



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**[YÜKSEK LİSANS TEZİ]**

**[PİST BAŞI BEKLEMELERİNİN GERÇEK ZAMANLI TRAFİK  
VERİSİ KULLANILARAK KUYRUK TEORİSİ YÖNTEMİ İLE  
ANALİZİ: İSTANBUL HAVALİMANI ÖRNEĞİ]**

**[İsmail DEMİRHAN]**

**[Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı]**

**[Akıllı Ulaşım Sistemleri Programı]**

**DANIŞMAN**  
**[Prof. Dr. Abdullah OKUMUŞ]**

**[Temmuz, 2021]**

**İSTANBUL**

Bu çalışma, 5.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı, Akıllı Ulaşım Sistemleri Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

Prof. Dr. Abdullah OKUMUŞ (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
İşletme Fakóltesi

Dr. Öğr. Üyesi Abit BALIN  
İstanbul Üniversitesi  
Ulaştırma ve Lojistik Fakóltesi

Doç. Dr. Muhammet GÜL  
Munzur Üniversitesi  
Sağlık Bilimleri Fakóltesi

## İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince şahsıma yapmış olduğu katkılar için danışmanım Sayın Prof. Dr. Abdullah OKUMUŞA en içten teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmamın başlangıcından bitimine dek sağlamış olduğu tüm yol gösterici ve bilimsel katkılarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abit BALIN'a ve Kuyruk Teorisi konusu ile ilgili olarak tarafıma sağlamış olduğu detaylı teknik yardımdan dolayı Sayın Doç. Dr. Erkan ÇELİK'e şükran ve minnet duygularımı sunarım.

Ve son olarak, eğitim hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans sürecinde de her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür eder, tüm hayatım boyunca sadakat duyacağımı belirtmek isterim.

Temmuz 2021

İsmail DEMİRHAN

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2 LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. HAVA TRAFİK HİZMETLERİ .....</b>	<b>11</b>
3.1. HAVA TRAFİĞİ .....	11
3.2. HAVA TRAFİK KONTROLÜ.....	11
3.2.1. Meydan Kontrol Hizmeti .....	12
3.2.2. Yaklaşma Kontrol Hizmeti.....	13
3.2.3. Saha Kontrol Hizmeti.....	14
3.3. HAVA TRAFİK HİZMETLERİ İLE İLİŞKİLİ TEMEK KAVRAMLAR.....	14
3.3.1. Havalimanı .....	15
3.3.2. Terminal .....	15
3.3.3. Apron.....	15
3.3.4. Uçak Park Pozisyonu .....	15
3.3.4. Pist.....	15
3.3.5. Pist Bekleme Noktası .....	15
3.3.6. Taksi Yolu.....	16
3.3.7. Taksi Hareketi .....	16
3.3.8. Push-back .....	16
3.4. İSTANBUL HAVALİMANI'NIN YAPISI.....	17
<b>4. HAVAYOLU TAŞIMACILIĞI .....</b>	<b>21</b>
4.1. GİRİŞ .....	21
4.2. HAVA TAŞIMACILIĞININ TARİHÇESİ .....	21
4.3. DÜNYA GENELİNDE HAVA TAŞIMACILIĞI VERİLERİ.....	22
4.4. TÜRKİYE İÇİN HAVA TAŞIMACILIĞI VERİLERİ .....	26
<b>5. KUYRUK TEORİSİ .....</b>	<b>33</b>
5.1. KUYRUK TEORİSİ NEDİR? .....	33
5.2. KUYRUK MODELLERİNİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ .....	34

5.3. KENDAL NOTASYONU.....	35
5.3.1. Poisson Dağılımı .....	36
5.3.2. Üstel dağılım .....	36
5.4. M/M/1 KUYRUK MODELİ.....	37
5.5. M/M/s KUYRUK MODELİ .....	42
<b>6. MATEMATİKSEL MODEL ANALİZİ .....</b>	<b>48</b>
6.1. TEMEL VERİLER.....	48
6.2. MODEL ANALİZİ .....	56
6.3. MODEL 1.....	60
6.4. MODEL 2.....	64
6.5. MODEL 3.....	67
6.6. MODEL 4.....	70
6.7. MODEL 5.....	71
6.8. MODEL 6.....	75
6.9. MODEL 7.....	78
6.10. MODEL 8.....	78
6.11. KURULAN MODELE İLİŞKİN SONUÇLAR.....	79
<b>7. KURULAN MODELE AİT SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>82</b>
7.1. KURULAN MODELİN LİMİTLERİ VE AVANTAJLARI .....	82
7.2. İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR.....	84
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>90</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 3. 1: Bir uçuşun tüm safhaları boyunca sağlanan hava trafik kontrol hizmeti. ....	12
Şekil 3. 2: Pist başında kalkış için bekleyen uçak grubu. ....	16
Şekil 3. 3: Planlanan tüm etaplarıyla birlikte İstanbul Havalimanı'nın yapısı. ....	18
Şekil 3. 4: İstanbul Havalimanı'nın mevcut yapısına ilişkin şematik görsel. ....	19
Şekil 3. 5: İstanbul Havalimanı terminal ve apron sahasını gösteren bir görsel. ....	20
Şekil 4. 1: ACI (Airports Council International) tarafından yayınlanan 2018 yılı hava taşımacılığına ilişkin bir veri. ....	24
Şekil 4. 2: Yolcu trafiği açısından gelişmekte olan ülkelerin pazar payındaki yeri. ....	25
Şekil 4. 3: 2010-2019 yılları arasında Türkiye için yolcu trafiği verisindeki değişim. ....	29
Şekil 4. 4: 2010-2019 yılları arasında Türkiye için uçak trafiği verisindeki değişim. ....	29
Şekil 4. 5: 2010 – 2019 yılları arasında Türkiye için toplam yük trafiği (bagaj + kargo + posta) verisindeki grafiksel değişim. ....	32
Şekil 5. 1: Temel bir kuyruk modelinin yapısı. ....	34
Şekil 6. 1: Saatlik uçak kalkış verisinin grafiksel değişimi. ....	49
Şekil 6. 2: Saatlik uçak iniş verisinin grafiksel değişimi. ....	50
Şekil 6. 3: Saatlik toplam uçak (iniş + kalkış) verisinin grafiksel değişimi. ....	51
Şekil 6. 4: 00:00-00:59 zaman aralığında uçak kalkış verisi için Poisson testi grafiksel gösterim. ....	53
Şekil 6. 5: Model 1 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	60
Şekil 6. 6: Model 2 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	64
Şekil 6. 7: Model 3 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	67
Şekil 6. 8: Model 4 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	71
Şekil 6. 9: Model 5 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	72
Şekil 6. 10: Model 6 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	75
Şekil 6. 11: Model 7 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	78
Şekil 6. 12: Model 8 için pist kullanım konfigürasyonu. ....	79

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Tablo 4. 1:</b> Toplam uçuş adedi (iniş-kalkış) bakımından dünya genelinde en yoğun havalimanlarının 2010 ile 2017 yılları için sıralaması.....	26
<b>Tablo 4. 2:</b> 2010 -2019 yılları arasında Türkiye'nin toplam yolcu ve uçak trafiği rakamları. ....	28
<b>Tablo 4. 3:</b> 2010 – 2019 yılları arasında Türkiye için toplam yük trafiği (bagaj + kargo + posta) verisindeki değişim. ....	31
<b>Tablo 5. 1:</b> Kuyruk modellerine dair güncel hayatımızdan çeşitli örnekler.....	34
<b>Tablo 5. 2:</b> Bu çalışmada kuyruk modeli performans parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak formülasyonların özeti.....	47
<b>Tablo 6. 1:</b> Farklı saat aralıkları için tespit edilen uçak kalkış verisi.....	49
<b>Tablo 6. 2:</b> Farklı saat aralıkları için tespit edilen uçak iniş verisi.....	50
<b>Tablo 6. 3:</b> Farklı saat aralıkları için tespit edilen toplam iniş ve kalkış trafik verisi.....	51
<b>Tablo 6. 4:</b> 00:00-00:59 saat diliminde uçak kalkış verisi için Statistica Poisson testi sonuçları.....	52
<b>Tablo 6. 5:</b> Radar ayırmasının tesis edildiği durumda inişler arası mesafe ayırması. ....	54
<b>Tablo 6. 6:</b> Radar ayırmasının tesis edilmediği durumda inişler arası zaman ayırması. ....	54
<b>Tablo 6. 7:</b> Kalkış uçakları arasındaki vortex (dümensuyu türbülansı) ayırması. ....	54
<b>Tablo 6. 8:</b> İstanbul Havalimanı için uçak ayırma minimaları. ....	55
<b>Tablo 6. 9:</b> Kuzey yönlü pist konfigürasyonları ve oluşan kuyruk modeli yapısı. ....	57
<b>Tablo 6. 10:</b> Güney yönlü pist konfigürasyonları ve oluşan kuyruk modeli yapısı. ....	58
<b>Tablo 6. 11:</b> İstanbul Havalimanı için elde edilen kuyruk modeli yapıları.....	59
<b>Tablo 6. 12:</b> Model-1 'e ait sistem başarımlar parametreleri. ....	62
<b>Tablo 6. 13:</b> Model-2 'ye ait sistem başarımlar parametreleri.....	66
<b>Tablo 6. 14:</b> Model-3 'e ait sistem başarımlar parametreleri. ....	69
<b>Tablo 6. 15:</b> Model-5 'e ait sistem başarımlar parametreleri. ....	74
<b>Tablo 6. 16:</b> Model-6 'e ait sistem başarımlar parametreleri. ....	77
<b>Tablo 6. 17:</b> Kuyruk uzunluğuna göre belirlenen yoğunluk analizi. ....	80
<b>Tablo 6. 18:</b> İstanbul Havalimanı için kalkış kuyruk modeli karşılaştırmalı analiz.....	81



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$D$	: Deterministik ya da sabit
$E(W_q)$	: Muhtemel bekleme süresi
$E_k$	: Earlang
$G$	: Genel
$L_q$	: Kuyruk uzunluğu
$M$	: Üstel
$P(t)$	: T zamanı kadar bekleme olasılığı
$Q(t)$	: T zamanında sistemdeki müşteri adedi
$Q_q$	: Kuyruktaki müşteri adedi
$T$	: Müşterinin sistemde harcadığı zaman
$T_q$	: Müşterinin kuyrukta harcadığı zaman
$V$	: Varyans
$\lambda$	: Geliş oranı
$\lambda_k$	: İlgili saat diliminde planlanan tüm kalkış trafikleri
$\lambda_i$	: İlgili saat diliminde planlanan tüm iniş trafikleri
$\lambda_i'$	: İlgili saat diliminde planlanan iniş trafiklerinin bir kısmı
$\mu$	: Servis oranı
$\rho$	: Kullanım oranı (trafik yoğunluğu)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ACI	: Aiports Council International
CD	: Clearance Delivery (uçuş izni teslimi)
DHMİ	: Devlet Hava Meydanları İşletmeciliği
Dk	: Dakika
FIFO	: First in first out (ilk gelene ilk hizmet prensibi)
FIR	: Flight Information Refion (uçuş bilgi bölgesi)

IATA	: International Air Transport Association
ICAO	: International Civil Aviation Organization
LIFO	: Last in first out (son gelene ilk hizmet prensibi)
NM	: Nautical mile, havacılık mili
PR	: Service according to priority (önceliğe göre hizmet))
SIRO	: Service in random order (rastgele seçim prensibi)
SPT	: Shortest processing time first (hizmet süresi en kısa olana ilk hizmet)
TMA	: Terminal Control Area (terminal kontrol sahası)
VFR	: Visual Flight Rules (görerek uçuş şartları)



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail DEMİRHAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Abdullah OKUMUŞ

Bu çalışmada Türk havacılığının yenilenen yüzü ve geleceğe dönük hedeflerin bir parçası olarak inşa edilen İstanbul Havalimanı hava trafiği açısından incelenmektedir.

Buna göre; İstanbul Havalimanı'nın mevcut uçak trafiği dikkate alınarak pist başı gecikmeleri kuyruk modeli yöntemi ile analiz edilmiştir. 24 saatlik zaman dilimi halinde ortalama uçak trafikleri tespit edilmiş ve tüm pist konfigürasyonları için pist başı beklemleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Böylelikle hava trafik ünitelerince ilgili saat dilimlerinde oluşabilecek gecikmelerin önceden öngörülebilmesi ve buna istinaden çözümleyici adımların atılması amaçlanmaktadır.

-----  
Temmuz 2021, 102 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Havacılık, İstanbul Havalimanı, akıllı ulaşım, kuyruk teorisi, gecikme analizi,

## **SUMMARY**

### **M.Sc. THESIS**

**İsmail DEMİRHAN**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Sciences**

**Department of Intelligent Transport Systems**

**Supervisor : Prof. Dr. Abdullah OKUMUŞ**

**Co-Supervisor : Academic Title Name SURNAME**

This study addresses Istanbul Airport, which was built to reflect Turkey's future outlook in aviation and as part of modern aviation strategies, in terms of air traffic management.

Waiting time of departure traffic at runway holding points have been analyzed by queuing model using prevailing air traffic for the airport. For this purpose; firstly, daily mean traffic numbers were identified hourly through statistical approach. Then, runway waiting times of departure aircraft was calculated for all possible runway configurations. Hence, it is aimed to predict possible delays for regarding time segment by air traffic unites beforehand, and then to produce solution methods for better and effective air traffic management.

-----

July 2021, 102 pages.

**Keywords:** Aviation, Istanbul Airport, intelligent transport, queueing theory, delay analysis

## 1. GİRİŞ

Teknolojik ve teknik gelişmelerin aralıksız olarak devam ettiği ve sürekli olarak hız kazandığı günümüz modern dünyasında zamana ayak uydurmak mecburi bir ihtiyaç haline gelmiştir. Teknoloji ile ilişkili diğer sahalara benzer şekilde, 100 yılı aşan modern havacılık endüstrisi de gelişimine aralıksız olarak devam etmektedir. Havacılık adına yaşanan tüm iyileştirici ve geliştirici faaliyetler neticesinde sektör günden güne gelişimini sürdürmektedir. Hava taşımacılığına yönelik Türkiye ve Dünya'dan rakamsal veriler incelendiğinde ortaya çıkan sonuçlar, sektörün ne denli büyük olduğunu gözler önüne sermektedir. Dolayısıyla sektörün operasyonel gelişimine katkı sağlamak için mevcut işleyişi en iyi şekilde anlaşılması ve eksik yönlerin tespit edilerek çözümleyici adımların atılması bir gereklilik haline gelmiştir [1].

Hava taşımacılığı kapsamında uçak operasyonları için en önemli kriterlerin başında zaman ve kaynak yönetiminin geldiği görülmektedir. Özellikle yoğunluğun arttığı büyük havalimanları için zaman ve kaynak yönetiminin verimlilik noktasında daha da önem kazanmaktadır. Örneğin, uçuşun herhangi bir safhasında oluşabilecek en ufak bir gecikme dahi silsile yolu ile tüm hava trafiğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, uçak operasyonlarını gerek işletici şirketler gerekse hava trafik üniteleri adına verimli kılmak üzere çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu noktada kuyruk teorisi metodu, havacılıkta gecikme analizi yaparak zamanın planlanması adına önemli bir bakış açısı sunmaktadır [2].

Kuyruk teorisi, bekleme sıraları ve kuyrukların matematiksel çalışması olup yöneylem araştırmasının bir alt dalı olarak kabul edilir. Fabrika üretim bantları, müşteri kuyruklarının ortaya çıktığı yapılar (banka kuyruğu, bilet gişeleri vb.), hizmet almak için bekleyen nesne grupları (araç yıkama istasyonu gibi) gibi durumlar kuyruk modellerinin ortaya çıktığı sistemlere örnek olarak verilebilir. Bu yöntemin ana amacı, ilgili sistemdeki kuyruk uzunluğunu ve bekleme zamanını öngörmektedir. Dolayısıyla sistemin bütününe ilişkin planlama avantajı sağlamaktadır [3].

Bu çalışmada Türk havacılığının yenilenen yüzü ve geleceğe dönük hedeflerin bir parçası olarak inşa edilen İstanbul Havalimanı hava trafiği açısından incelenmektedir. İstanbul Havalimanı'nın mevcut uçak trafiği dikkate alınarak pist başı gecikmeleri kuyruk modeli yöntemi ile analiz edilmektedir. Buna göre, 24 saatlik zaman dilimi halinde ortalama uçak trafikleri tespit edilmiş ve tüm pist konfigürasyonları için pist başı beklemeleri ayrı ayrı analiz

edilmiştir. Böylelikle hava trafik ünitelerince ilgili saat dilimlerinde oluşabilecek gecikmelerin önceden öngörülebilmesi ve buna istinaden çözümleyici adımların atılması amaçlanmaktadır. Dolayısıyla, kalkış uçakları açısından pist başı yoğunluğunun ve muhtemel gecikmelerin analiz edildiği bu çalışmanın, zaman ve kaynakların en verimli bir şekilde kullanımını noktasında etkili olacağını düşünmekteyiz.

Bu tez çalışması; yedi ana başlıktan oluşmaktadır. Birinci bölümde; bu tez çalışmasına duyulan ihtiyaç, amaç ve öngörülen katkıların yer aldığı ‘giriş’ bölümü yer almaktadır. Takiben ikinci bölümde; yapılan çalışmaya paralel olarak incelediğimiz ve metodoloji ve/veya amaç bakımından benzer çalışmaların yer aldığı literatür taraması yer almaktadır. Üçüncü bölümde; hava trafik hizmetlerine ilişkin temel unsurların anlatılmakta olup, terminolojik bilgilere yer verilmektedir. Ayrıca bu bölümde İstanbul Havalimanı’na ilişkin yapısal bilgilere de yer verilmiştir. Dördüncü bölümde; havayolu taşımacılığına ilişkin tarihsel veri akışı sunulmuş, devamında ise Dünya genelinde ve Türkiye için hava taşımacılığına dair istatistikî veriler sunulmuştur. Beşinci bölümde; kuyruk teorisi metoduna ilişkin teknik bilgiler yer almakta olup, spesifik olarak bu çalışmada kullanılan M/M/1 ve M/M/s kuyruk modelleri tanıtılmıştır. Altıncı bölümde; matematiksel model analizi yapılmış, uçak kalkış kuyrukları muhtemel bütün pist kullanım konfigürasyonları için hesaplanmıştır. Çalışmanın yedinci ve son bölümünde ise; kurulan modele yönelik çıkarımlar yapılarak avantajları ve eksik yönleri vurgulanmış, gelecek çalışmalara yönelik bilgilendirme yapılmıştır.

## 2 LİTERATÜR TARAMASI

Hava taşımacılığında yaşanan sektörel değişim ve gelişime ışık tutacak ve tecrübe edilen eksiklik ve diğer problemlere çözüm getirecek şekilde farklı alanlarda çok sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. Aşağıda seçmiş olduğumuz çalışmalardan oluşan literatür taramamız kuyruk teorisinin yanı sıra, optimizasyon ve araç rotalama gibi farklı uygulamaları ve farklı alanlardan emsal örnekleri içerecek şekilde kapsamlı bir şekilde sunulmaktadır.

BATUR, çalışmasında her geçen gün gelişen havayolu taşımacılığının işleyişi hakkında kapsamlı bilgiler sunmuş ve bu gelişim süreci içerisinde gelen sorunlara çözüm önerileri sunmayı hedeflemiştir. Havayolu taşımacılığına ilişkin Türkiye'den ve Dünya'dan örneklendirmeler yapmıştır [4]. ULAŞ, yapmış olduğu çalışmada paralel kanallı bekleme hattı kuyruk sistemi teorik olarak incelemiş, doğum ölüm sürecini kullanarak paralel hatlı kuyruk sisteminin parametrelerini elde etmiştir. Ayrıca poisson süreci ve özelliklerini ele almış ve iki heterojen kanallı kuyruk sisteminin analizini yaparak parametrelerini elde etmiştir [5]. ŞİMŞEK, tek servis kanallı model uygulaması olarak İstanbul Boğazı'ndan tanker ve diğer gemilerin geçişleri incelemiştir. Ulaşılan sonuçlar ışığında İstanbul Boğazı'nda yoğun bir tanker trafiği olduğu ve geçiş yapan tanker sayısının arttığı görülmüştür [6]. KİREMİTÇİ, araç rotalama probleminin deniz taşımacılığı sektöründe uygulamasını yapmış ve gemilerin taşıma planlarının verimli bir şekilde oluşturulmasını dolayısıyla da maliyet tasarrufunu amaçlamıştır [7]. PARLAK, hastaların sağlık kurumlarındaki kuyruk sistemleri ile Merkezi Hekim Randevu Sistemini (MHRS) nasıl değerlendirdiklerini, randevu sistemleri hakkında ne kadar bilgi sahibi olduklarını, memnuniyet düzeylerini ve randevu sistemlerinin sağlık hizmetlerine erişimde hastalara ne oranda fayda sağladığını tespit etmek istemiştir. Bu amaçlarla kuyruk modelini sağlık sistemine uyarlayan bir çalışma yapmıştır [8]. SZTRIK, yapmış olduğu çalışmasında kuyruk teorisi konusunu temel yönleri ile ele alarak konu ile ilgili teknik bir zemin oluşturmak istemiştir [9]. CHAVES, iki kademeli olarak oluşturduğu çalışmasında kuyruk teorisini havacılığa uyarlamıştır. Birinci olarak; gelişler arası sürenin ve servis süresinin genel dağılıma uyduğu ve tek kanallı – çok fazlı kuyruk modelini (G/G/k) incelemiştir. İkincil olarak ise, iki aşamalı kuyruk modeli önermiştir. Buna göre; ilk aşamada genel dağılımlı çok fazlı, ikinci aşamada ise genel dağılımlı tek fazlı model önermiştir [10]. ADAN ve RESING, yapmış olduğu çalışmada kuyruk modeli örneklerini detaylarıyla incelemiş ve matematiksel modellemeleri hakkında teknik bilgi sağlamıştır [11]. ERTUĞRUL, BİRSEN ve ÖZÇİL, yöneylem araştırması

tekniklerinden Kuyruk Teorisini incelenmiş, uygulama kısmında ise Denizli ilinde faaliyet gösteren iki bankanın altı farklı şubesindeki müşterilerin sıra beklemelerine ilişkin bilgileri kuyruk teorisi yardımıyla analiz etmiş ve sistemin ortalama etkinliğini hesaplamıştır [12]. MAJID ve MANOHARAN, M/M/c kuyruk modelini iki farklı model üzerinden inceleyerek oluşturduğu modelin kıyaslamasını yapmıştır [13]. YILDIZ ve ARSLAN, bekleme hattı modeli ile Düzce Üniversitesi Merkez Yemekhanesinde öğrencilerin yemek kuyruğunda beklemelerine ilişkin verileri incelemiş ve sistemin ortalama performansını hesaplamıştır [14]. MARAGATHASUNDARI, PRABHU ve PALANIVEL, Markovian olmayan kuyruk modellerinin uçak kontrol sistemleri üzerine bir incelemesini yapmıştır [15]. LAN ve TANG, incelemiş olduğu Geo/Geo/1 kuyruk sisteminde herhangi bir zamanda problem oluşabileceğini bu esnada bir tamir ve/veya düzeltme sürecinin devreye gireceğini varsayarak, bu koşullar altında stabilite analizi yapmıştır [16]. KIM, JIE ve CHOI, yapmış olduğu çalışmada havalimanlarında ortaya çıkabilecek kuyruk modellerini incelemiş ve kiosk cihazları gibi insansız ve otomatik sistemler için simülasyon tabanlı kuyruk modeli oluşturmuştur [17]. ANOSIKE ve NNEKA, Nijerya Nnamdi Azikiwe International Airport (NAIA) Havalimanı için yolcu kuyruğu problemini inceleyerek matematiksel bir model oluşturmuştur. 4 farklı havayolu şirketinden elde edilen yolcu verileri kullanılarak, havalimanının mevcut talebe yeterliliği incelenmiştir [18]. SMITH, M/M grubu kuyruk modellerini rakamsal hesaplama durumunda yuvarlama hatasını dikkate alarak analiz etmiştir. Pratikte kullanılacak basit modeller üzerinde hatayı engellemeye yönelik bir inceleme yapmıştır [19]. JAWAB ve diğerleri, Fas'ın Fez-Sais Havalimanı için yolculara yönelik kuyruk modelini ele almış ve yaşanan sürece dair detayları optimize ederek geliştirmeyi amaçlamıştır [20]. GİRGINER ve ŞAHİN, spor tesisi işletmelerinde, spor aletleri kullanımı sırasında oluşan bekleme (kuyruk) problemini benzetim yöntemiyle araştırmıştır. Çalışmada, bir spor tesisindeki sistem, 45 gün süresince toplanan verilerle Arena benzetim programında simüle edilerek, kapasite sorununa etki eden faktörler belirlenmeye çalışılmıştır [21]. KUMAR, SOM ve JAIN, M/M/1/N geri beslemeli (memnuniyet üzerine geri bildirim sağlayan) müşteri kuyruğu incelemesi yapmış ve performans parametreleri üzerine çalışmıştır [22]. ARTALEJO ve FALIN, bir müşterinin sınırlı kapasite, yoğunluk gibi sebeplere dayalı olarak hizmet göremediği yenilemeli kuyruk modeli analizi yapmıştır. M/G/1 ve M/M/c kuyruk modelleri incelenerek karşılaştırılması yapılmıştır [23]. SMITH ve diğerleri, kuyruk sisteminin iki tip kullanıcının (öncelikli ve önceliksiz) N adet kaynağa ulaşmaya çalıştığı M/M/N/N formatında olduğunu ele alarak, kullanım önceliği cihetinden inceleme yapmıştır. Bu çalışma ile özellikle geleceğe yönelik taşınabilir radyo



sistemler için modelleme yapmak istemişlerdir [24]. IBE ve ISIJOLA, yoğun periyodu (busy period) takiben çoklu dinlendirmenin olduğu kuyruk sistemini M/M/1 kuyruk modeli üzerinde incelemiştir. Yoğun periyodun ardından hiç bir müşteriye hizmet sunulmayan (zero duration) model ile yoğun periyodun hemen ardından hizmet sunulabilen (nonzero duration) modelin yorumlaması yapılmıştır [25]. VANDAELE, WOENSEL ve VERBRUGGEN, geleneksel olarak deneysel (empirik) metotlara dayalı olduğunu ifade ettiği kesintisiz bir trafik akışı analizini, analitik kuyruk modeli geliştirerek incelemiştir. Trafik kontrolü, yoğunluk analizi gibi amaçlarla kurdukları modeli bir anayol üzerinde açıklamıştır [26]. KUMAR, Markovian olan çok fazlı kuyruk sistemini (M/M/c) Bessel Fonksiyonu ve olasılık tekniğini kullanarak incelemiştir. Kurulan modelin, hastanelerdeki acil durumlar ve çağrı merkezi gibi sistemlerde öne çıkacağı sonucuna ulaşmıştır [27]. WANG ve ZHU, aşırı talebin çoklu shift modeli uygulanarak çözüldüğü dinamik bir kuyruk modeli önermiştir. Değerleme ve maliyet olarak seçtiği iki kriterdeki farklılıklardan dolayı, bazı müşteriler kuyruğa erken dâhil olurken, bazıları da geç dâhil olmuşlardır. Bu varsayımı alışveriş merkezi, restoran ve anayol gibi sistemler üzerinde incelemiştir [28]. SHARMA ve diğerleri, kuyruk teorisinin temelleri ve kullanımı üzerine açıklamalarda bulunmuş matematiksel modelleme hakkında bilgilendirme yapmıştır [29]. CHRISTIEN ve diğerleri, farklı operasyonel prosedürlerin uygulandığı Avrupa'nın üç büyük limanı için iniş uçağı sıralaması üzerine çalışmışlardır. Yoğun saatler için yapılan çalışmanın karmaşık operasyonların çözümüne için ışık tutması planlanmıştır [30]. MEHRI, DJEMEL ve KAMMOUN, seçtikleri temel kuyruk modellerini açıklayarak matematiksel modelleme üzerine çalışmışlardır [31]. CHEW, standart M/M/1 kuyruk yapısının yeni bir modellemesi üzerine çalışmıştır. Bu yeni yapıya göre, tek fazlı ve iki tip (gerçek ve sanal) müşterinin bulunduğu bir kuyruk bulunmaktadır. Kurulan bu model simülasyon ile desteklenerek standart model ile kıyaslanmaktadır [32]. WINSTON, hazırlamış olduğu yöneylem araştırması kitabında, kuyruk teorisi konusunun temellerine ve matematiksel modellemeye yer vermektedir [33]. AWASTHI, müşterilere ait sıkça rastlanan davranışlardan balking (müşterinin bekleme hattı çok uzunsa ayrılması) ve reneging (müşterinin bekleme hattı çok yavaş ilerliyorsa ayrılması) üzerine M/M/1/K sonlu kapasiteli kuyruk modeli üzerine çalışmıştır [34]. SOM ve SETH, tek fazlı ve sonlu kapasiteli gelişler için Markov kuyruk sistemi geliştirmiştir. Teşvikli geliş modeli (encouraged arrival) olarak ele alınan müşteriler, şirketler tarafından uygulanan indirimleri ve diğer cazibeli teklifleri yansıtmaktadır. Oluşturulan model rakamsal olarak ve benzetim modeliyle incelemiştir [35]. JHALA ve BHATWALA, havalimanlarında ortaya çıkan kuyrukları ve bekleme sürelerini azaltıp müşteri memnuniyetini

arttırmaya yönelik bir model önerisinde bulunmuştur [36]. ÇEVİK ve YAZGAN, bekleme hattı modeli yardımıyla bir bankadaki müşterilerin sıra beklemelerine ilişkin model belirlemiş ve sistemin ortalama etkinliği hesaplamıştır [37]. POONGODI ve MUTHULAKSHMI, sonsuz kapasiteli M/M/s kuyruk modeli için kontrol tablosu (control chart) metodu önermiştir. Bu metoda göre önceden, muhtemel bekleme zamanı, maksimum bekleme zamanı ve minimum bekleme zamanı öngörülerek müşteri memnuniyeti gözetilmek istenmektedir [38]. MASSEY, operatör analitiği tekniği kullanarak statik olmayan durumlar için M/M/1 Markov kuyruk modeli tasarlamıştır. Bu tekniğe göre, bilinen geniş zamanlı analizden farklı olarak, geliş ve servis oranlarını belirlediği bir ortak parametreye bölerek kullanmaktadır. Böylelikle kuyruk uzunluğu sürecinde dinamik asimptotik davranış ortaya çıkmaktadır [39]. IDRIS ve diğerleri, Boston Logan Uluslararası Havalimanı için bir model hazırlamış ve havalimanı sistemleri için kalkış operasyonlarını geciktiren akış kısıtlarını belirlemek üzere veri analizi yapmış ve diğer limanlara kıyaslama yapmıştır [40]. SHONE ve diğerleri, pist başı uçak kuyruklarının optimal bir şekilde kontrolü ve modellemesi üzerine çalışmış ve ilişkili diğer çalışmalar üzerine literatür taraması sunmuştur [41]. TIWARI ve diğerleri, poisson gelişleri ve üstel servis zamanına sahip çok fazlı M/M/s kuyruk modeli üzerine çalışmışlar, beklenen toplam minimum maliyet üzerine araştırma yapmışlardır [42]. THIAGARAG ve SESHAIÁH, iniş uçakları için kullanılan pistlere yönelik çalışmış, analitik yaklaşımın limitlerini araştırarak, simülasyon metodunun nasıl kullanılması üzerine çıkarımlarda bulunmuştur [43]. BERTSIMAS ve NAKAZATO, Earlang dağılımının bir alt sınıfı olan MGE metodunu kullanarak  $MGE_L/MGE_M/1$  kuyruk modelini incelemiş, ilk gelene ilk hizmet prensibi ile kuyruk uzunluğu ve bekleme zamanlarının dağılımını hesaplamışlardır [44]. KARAPETYAN ve diğerleri, uçakların kalkış öncesi sıralaması üzerine çalışarak, sistemin amaçları, gereklilikleri ve gerçek zamanlı karar mekanizması kullanarak geliştirilen algoritma üzerine incelemede bulunmuşlardır [45]. AYDIN, havalimanına iniş yapmak üzere havada bulunan uçaklar için iniş sıra ve zamanlarının belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Bu çalışma ile, uçak çizelgeleme probleminin metasezgisel yöntemlerle çözülebildiği, optimum çözüme ulaşıldığı ve çalışmanın ileri dönemlerde UÇP ile ilgili çalışmalara ışık tutacağı görüşüne varmaktadır [46]. ARSLAN, uçak kapıların verimli kullanımı üzerine çalışmıştır. Yolcu memnuniyeti üzerinde büyük etkiye sahip olan kapı ataması işlemi yapılırken; yolcu yürüme mesafesi/süresi, bagajlara erişim mesafesi süresi, uçuş-kapı boyutlarının uyumu sağlanmaya çalışılmıştır [47]. DOĞAN, havayolu şirketlerinin beklenmedik uçuş yönlendirmeleri sonucunda ortaya çıkan beklenmedik maliyetleri en aza indirmek üzerine çalışma yapmıştır. Bu amaca yönelik olarak iki farklı karar destek sistemi

geliştirilmiştir. Bu iki sistemde ortak amaç, meteorolojik verilerin geçmişe dönük analizini yaparak, geleceğe yönelik tahminlerde bulunmaktır; böylece, doğru uçuş kararının verilmesine destek olacak bir sistem tasarlanmasıdır [48]. ÇALLIOĞLU, yapmış olduğu çalışmada uçak tipine göre piste önce hangi uçağın inmesinin daha optimum olduğu sorusuna Yapay Zeka'nın önemli bir dalı olan Bulanık Mantık teorisiyle cevaplar aranmış ve havacılık sektöründe çalışan insanlara kolaylık sağlayacak ve önerilerde bulunacak bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir [49]. ÇINTAŞ, düşman savaş uçağı (DSU) rota tahmin problemine bir Semantik Web/Anlamsal Ağ (SW-AA) yaklaşımı uygulamıştır. Savaş uçağı gerçek imalat değerleri (uçağın kanat alanı, motor tipi, özgül yakıt sarfiyatı, bomba ve silah yükü, maksimum kütle vb.), aerodinamik parametreler (hava yoğunluğu, mach sayısı, boyutsuz sürüklenme katsayısı vb.), seyahat menzili denklemleri ve radar bilgileri (irtifa, hız, yön) esas alarak DSU'nun mantıksal olarak anlık hangi rotalara gidebileceğini tahmin etmeyi amaçlanmıştır [50]. GÜLER, havalimanlarında mevcut park yerlerini en efektif bir şekilde kullanmak amacıyla yerdeki uçaklar için park pozisyonu ataması problemi üzerine çalışılmıştır [51]. GÜÇLÜ, toplam gecikmelerin etkisini azaltmak için daha taktiksel park yeri tahsisi algoritması olan Hibrit Dinamik Park Yeri Tahsisi Modelini ortaya koymuştur. Bu model algoritma, temel anlamda uygun park yerlerinin ve taksi yollarının son yaklaşma hattında önceden belirlenmiş bölgelere giriş yapmış uçaklara tahsis edilmesini ön görmektedir [52]. ALDEMİR, hava trafik kontrol sistemlerinin önemli alt işlerinden biri olan uçuş zamanlama ve sıralama problemlerini ve bunların çözümü için sunulan algoritmaları ele almıştır. Bu çözümlerin geliştirilmesinin mümkün olup olmadığını değerlendirmiş ve simülasyonlarını gerçekleştirmiştir [53]. BAYAR, havaalanlarının hava tarafının bir elemanı olan pist kapasitesi üzerinde durmuş ve hava tarafı teorik kapasitesini hesaplamak için kullanılacak analitik bir yöntem incelemiştir [54]. GÜRKAN, maliyetleri düşürmek, uçak/yolcu/kabin ekibi gecikmelerini azaltmak, gecikmeler olduğu takdirde kolay çözüm yolları üretmek amaçlı optimizasyon uygulaması yapmıştır. Bu çalışması ile üç aşamalı (planlama, filo atama ve rotalama) çözüm yolu izlemiştir [55]. KİRAZOĞLU, tam sayılı programlama metodu ile uçakların kalkış ve varış noktaları arasında optimal rota bulma amaçlı uçak rotalama problemi çalışmıştır [56]. ATKIN, NATS sorumluluğu altındaki Londra Heathrow Havalimanı için uçak kalkışları için kullanılabilir sıralama mekanizması üzerine çalışmıştır. Bu çalışması ile taksiyolu kavşak noktalarında ve pist başlarında gecikmeleri azaltmayı amaçlamıştır [57]. LI, uçak operasyonları üzerine çalışarak yaşanan gecikmeleri incelemiş ve uçak rotalama problemine çözümler aramıştır [58]. RAVIZZA, uçak yer hareketliliği için yeni modeller üzerinde çalışarak, problemlere çözümler

aramıştır. Taksi süresinin daha doğru tahmini, taksi zamanı ve yakıt tüketimi arasındaki ilişki gibi sorunlara, statik analiz, regresyon modeli ve metasezgisel yöntem ile çözümler üretmiştir [59]. HAFNER, havayolu şirketleri, havalimanı ve ATC hedeflerine paralel olarak uçak önceliklendirme üzerine çalışmış, geçmiş uçuş verilerini ve taksi süresini kullanarak iniş ve kalkış slotu problemini incelemiştir [60]. MESGARPOUR, tek pist için optimizasyon uygulaması yapmış, iniş ve kalkış uçaklarının planlaması ve gerçek hayata uygulanabilirliği üzerine çalışmıştır [61]. JADHAV, havalimanlarında kullanılan end-around taksi yollarının etkisini simülasyon metodu ile araştırmış, taksi zamanını azaltmadaki etkisini test etmiştir [62]. BURGAIN, stokastik modelleme yöntemi ile uçakların yerdeki konum bilgisinin taksi müsaadesi üzerine etkisini incelemiş, çevresel ve operasyonel açıdan değerlendirme yapmıştır. Bu modellemesinde push-back ve taksi hareketleri için havayolu şirketlerine slot atama metodunu kullanmıştır [63]. RIDDLE, pist bekleme noktalarında uzun uçak bekleme kuyrukları üzerine çalışarak hava trafik kontrolörlerine yönelik otomatik karar mekanizması üzerine çalışmıştır. Yer hareketliliğinde etkinliği arttırmayı amaçladığı bu çalışmasında Dallas Fort Worth Uluslararası Havalimanı örneğini kullanmıştır [64]. LEE, karma tam sayılı liner programlama yöntemi ile pist ve taksi yolu ağında kullanılacak hızlı ve etkin algoritmalar üzerinde çalışmıştır. Bu çalışması ile pist gecikmelerini en aza indirmeyi amaçlarken, karar mekanizmasında kullanılacak veri ağını geliştirmek istemiştir [65]. ŞAHİN, kapasite kısıtlı araç rotalama problemlerinin (KARP) çözümü için geliştirilmiş olan meta sezgisel yöntemler ile ilgili geniş bir literatür araştırması sunmuştur. Buna göre yazar, problemin gerçek yaşam ile uyumlu hale gelmesi için kapasite ve zaman gibi kısıtlar probleme eklenebileceğini düşünmektedir. Ayrıca, optimale yakın çözümlerin kabul edilebilir bir hesap süresinde sağlanabilmesi için sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin son yıllarda yaygın olarak kullanılmakta olduğunu vurgulamaktadır [66]. YAZGAN ve diğerleri, bir araç rotalama probleminde toplam kat edilen mesafeyi en aza indirmek amacıyla sezgisel yöntemlerden Clarke ve Wright tasarruf algoritması ve en kısa yol yönteminin avantajlı yönlerini bir araya getirerek yeni bir melez algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma farklı sayıdaki problem setleri ile denenmiş ve elde edilen sonuçlar, ANOVA testi ile yorumlanmıştır. Sonuçlar, yeni geliştirilen melez metodun daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [67]. PALA ve AKSARAYLI, oteller ile havalimanı arası yolcu taşımacılığı yapan ve bir firmanın toplam tur sürelerini ve bir yolcunun ortalama ulaşımında geçirdiği süreyi minimize etmek amacıyla optimizasyon uygulaması geliştirmişlerdir [68]. TAŞ ve diğerleri, seyahat masraflarını en aza indirmek ve hastalara verilen hizmet kalitesini en üst düzeye çıkarmak evde bakım ve tedavi

hizmeti yapan araçlar için rotalama problemi çalışmıştır [69]. TAŞ ve diğerleri, Ankara ilinde kamu kurumuna bağlı yaşlılara evde bakım hizmeti sağlayan bir şirketin seyahat edilen toplam mesafesini en aza indirmek için araç rotalaması yapmıştır. Yapılan uygulama sayesinde minimum maliyet ile her ekibin minimum izleyeceği rotaların oluşturulması sağlanmıştır [70]. ÖZGER ve OKTAL, hava aracı ve havayolu taşımacılığının sektörel karakteristiklerini dikkate alarak ağ tasarımı problemlerinde kullanılacak yeni kısıtlar geliştirmiştir. Çalışmanın amacı yeni kısıtların ana dağıtım üssü yerleşimine etkisini analiz etmektir [71]. ÇAVUŞ ve TUNCER, insansız hava araçlarının (İHA) bir başlangıç noktasından hedef noktasına kadar herhangi bir engelle (dağ, tepe vb.) çarpmadan veya tehlikeli bir bölgeye (radar vb.) girmeden takip edebileceği en uygun güzergâhın bulunması ve İHA'nın bu güzergâh boyunca otonom olarak hedefe doğru ilerlemesi üzerine çalışmıştır [72]. YAPICIOĞLU, gezgin satıcı probleminin geliştirilmiş hali olan çoklu gezgin satıcı problemi, zaman kısıtları altında 0 - 1 tamsayılı olarak modellemiştir. Önerilen model tamsayılı programlama tekniği ile toplam gezgin satıcı sayısını en küçükmek amacı kullanılarak çözdürülmüş ve sonuçlar raporlanmıştır. Raporlanan sonuçlar önerilen modelin karar vericiler için önemli bir destek aracı olabileceğini göstermiştir [73]. JIANG ve diğerleri, genetik algoritma kullanarak uçak taksi hareketini optimize etmişlerdir. Oluşturulan model, uçak önceliklendirme üzerine bir karar mekanizması sunmaktadır [74]. JIANG ve diğerleri, havalimanları için operasyonel emniyeti sağlamak, yer operasyonlarında etkinliği arttırmak, taksi rotası planlamada adaletli seçimi sağlamak gibi amaçlarla uçak yer hareketleri için optimizasyon uygulaması yapmıştır [75]. JIANG ve diğerleri, toplam gecikme maliyetini düşürmek ve uçucu şirketler arasında adaleti temin amacıyla karınca kolonisi algoritmasını kullanarak optimizasyon uygulaması geliştirmişlerdir [76]. ZHOU ve JIANG, uçuş planlama için yeni bir model ve algoritma önermişlerdir. Uçuş gecikme maliyeti, kontrolör iş yükü, pist kullanımına yönelik bilgi akışı gibi kriterleri öne alarak genetik algoritma metodu ile optimizasyon yapmışlardır [77]. JI-YANG ve diğerleri, şehirlerarası çok istasyonlu bir taşıma ağına yönelik esnek bir otobüs rotalama uygulaması üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada optimal rotayı belirleme, araç sürüş maliyetini en aza indirme ve yolcu seyahat sürelerini düşürme gibi kriterleri dikkate almışlardır [78]. ROLLING ve VISER, limanın efektif kullanımı, gecikmelerin ve toplam taksi süresinin optimize edilmesi amacıyla uçak yer hareketliliğine yönelik karma tamsayılı lineer uygulama geliştirmişlerdir [79]. EUN ve diğerleri, havalimanı uçak kalkış ve yer hareketlerinin yönetimi için kontrolörlere yönelik olarak karar mekanizması olabilecek bir uygulama yapmışlardır. Bu uygulama ile körükten çıkma zamanının tahmini, taksi yolu ve pist planlama gibi amaçları

çalışmışlardır [80]. HO-HUU ve diğerleri, gürültü ve yakıt tüketimi kriterlerini baz alarak uçak kalkış rotalarının tasarımı ve uçuşlar için seçimi üzerine optimizasyon uygulaması geliştirmişlerdir [81]. DABACHINE ve diğerleri, uçak yer hareketliliğini planlamaya yönelik üç farklı algoritmayı kullanmış ve en kısa rotayı bulmayı sağlayacak yeni bir algoritma çalışmışlardır [82]. DABACHINE ve diğerleri, taksi yollarının kapasitesini dikkate alarak uçak gecikmelerini en aza indirecek ve uçak planlama problemine çözüm olabilecek bir optimizasyon uygulaması çalışmışlardır [83]. RATHINAM ve diğerleri, havalimanı yer hareketliliğinde ortaya çıkan uçak taksi hareketi planlama problemini optimizasyon modeli ile incelemiştir. Karma tam sayılı lineer programlama tekniğini kullanarak, taksi süresini kısaltırken uçaklar arasında emniyetli ayırmayı da temin etmeyi amaçlamışlardır [84]. WANG ve TSAO, hava sahası için zaman bazlı ayırma kriterlerini dikkate alarak bir model geliştirmiştir. Bu modele göre hava sahasının kalabalık olup olmadığını ve uçaklar arasındaki ayırmanın yeterliliğini incelemiştir [85]. DAI ve diğerleri, havalimanı kalkış uçakları için gecikme analizi yapmıştır. Gecikmeye uğrayan uçakların toplam gecikmeye olan etkisini incelemiş ve kalkış uçaklarını farklı kalkış rotalarına yönlendirme üzerine bir model oluşturmuşlardır [86]. IDRIS ve diğerleri, uçakların push-back hareketinden kalkışa dek (taxi-out) yaptıkları yer hareketi süresince harcadıkları zamanı tahmin etmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. Boston Logan Havalimanı örneği üzerinde uyguladıkları kuyruk teorisi metodu ile elde ettikleri sonuçlar, taksi hareketi süre tahmininde önemli iyileştirmeler ile sonuçlanmıştır [87]. BAŞPINAR ve KOYUNCU, Avrupa bölgesi hava sahası için yoğun havalimanlarına ait geçmiş uçuş verilerini incelemiş talep ve kapasite dengesi için kuyruk modeli yaklaşımını uygulamışlardır. Bölgeye ait lokal problemler, farklı kapasite şartlarında simüle edilmiştir [88]. SCHNEIDEWIND, uçak hareketliliği için kuyruk modeli tabanlı bir yazılım geliştirmiş, kuyruk modelinde hata tespiti ve düzeltme süreci için kullanılabileceğini önermişlerdir [89].

### 3. HAVA TRAFİK HİZMETLERİ

#### 3.1. HAVA TRAFİĞİ

Hava trafiği tanım olarak belli bir hava sahasında belli bir rota boyunca uçmakta olan tüm hava araçlarını ifade etmektedir. Hava trafiğinin bu rotalar boyunca hareketi ilgili otoriteler tarafından tanımlı usuller çerçevesinde gerçekleşmekte olup, bu organize hareketin kontrolü ve takibi hava trafik üniteleri tarafından yapılmaktadır. Hava trafik kontrol üniteleri tarafından hava trafiğine yönelik sağlanan hizmete ise hava trafik hizmeti denilmektedir. Hava trafik hizmetleri temel olarak aşağıdaki 4 alt unsuru ihtiva eden bir terimdir;

- 1) Hava trafik kontrol hizmeti
- 2) Hava trafik tavsiye hizmeti
- 3) Uçuş bilgi hizmeti
- 4) İkaz hizmeti

Hava trafik hizmetlerinin amaçları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir;

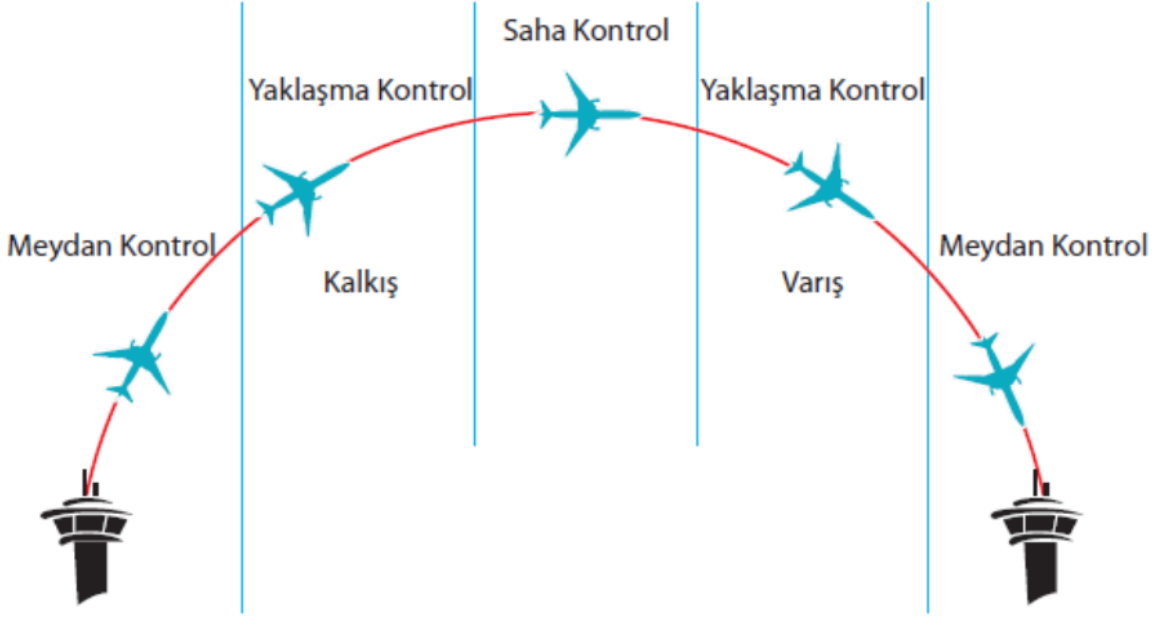
- Gerek havada gerekse yerde uçaklar arasındaki ayırmaları tesis edip kazaları engellemek.
- Hızlı ve düzenli bir hava trafik akışını tesis etmek.
- Güvenli ve efektif bir uçuş deneyimi sağlamak amacıyla uçuculara gerekli tavsiye ve bilgileri sağlamak.
- Arama ve kurtarma gereken durumlarda ilgili ünitelere gerekli bilgi akışını sağlamak [90].

Hava trafiğinin arzu edilen ölçüde işleyişi için, hava trafik üniteleri ve uçucular için belirlenen usullerin uygulanması hayati önem arz etmektedir. Zira havacılığın birbirini tamamlayan bu iki unsurundan herhangi birinde yaşanan aksaklık ve eksiklikler geri dönülemez sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

#### 3.2. HAVA TRAFİK KONTROLÜ

Herhangi bir hava aracının kontrolü, ilgili hava aracından sorumlu pilot ya da pilotlar tarafından sağlanırken, hava araçlarının tamamının düzenli ve emniyetli bir şekilde sevk ve idaresi hava trafik kontrol ünitelerince temin edilmektedir. Hava trafik kontrol üniteleri; meydan kontrol,

yaklaşma kontrol ve saha kontrol olmak üzere üç ana birimden müteşekkildir. Hava trafik ünitelerince sağlanan hava trafik kontrol hizmeti, hava araçlarının park yerinde motor çalıştırması ile başlayıp varış noktasında motor susturması aşamasına kadar aralıksız olarak devam eder [91]. Aşağıda verilmekte olan şekil 3.1 ile hava trafik kontrol hizmetinin aşamaları temel olarak özetlenmektedir.



Şekil 3. 1: Bir uçuşun tüm safhaları boyunca sağlanan hava trafik kontrol hizmeti.

### 3.2.1. Meydan Kontrol Hizmeti

Meydan kontrol hizmeti, meydan kontrol kulesi tarafından meydan trafiğini kontrol etmek amacıyla verilmektedir. Bu hizmet, hava trafik kontrolörleri tarafından görsel temasın sağlandığı trafiklere sağlanmaktadır.

Meydan kontrol hizmetinin sağlandığı üniteye meydan kontrol kulesi adı verilmektedir. Meydan kontrol kulesi, meydan üzerindeki ve civarındaki trafiğin emniyetli, düzenli ve hızlı akışını sağlamak için gerekli izin ve bilgileri yayınlamaktan sorumludur. Bu izin ve bilgiler ise;

- Meydan trafik paternlerini de kapsayacak şekilde belirlenmiş olan sorumluluk sahası içinde uçan uçaklar arasında,
- Yerde manevra sahası üzerinde hareket eden uçaklar arasında,
- İniş ve kalkış yapan uçaklar arasında,



- Manevra sahası üzerinde hareket eden uçaklar ile diğer araçlar arasında,
- Manevra sahası üzerindeki uçaklar ile bu sahadaki mâniyeler arasında,

gerekli ayırmaları temin etmek ve havacılık bağlamındaki tüm bilgi ve izinleri hava araçlarına sunmak şeklinde gerçekleşmektedir.

Hava trafiği yoğun olan meydanlarda meydan kontrol ünitesi; CD (clearance delivery), yer kontrol (ground) ve kule (tower) olmak üzere alt sektörler ayrılmaktadır. Bir veya birden fazla alt sektörün senkronizasyonu sonucunda hava trafiğinin sevk ve idaresi sağlanmaktadır.

Kalkışa gitmek üzere uçuş plana dolduran trafikler hava trafik kontrol ünitelerinden öncelikle CD sektörü ile temas etmektedirler. CD, uçuş boyunca uygulanacak prosedürlerin uçaklara aktarıldığı ve sistem üzerinde aktif edildiği sektördür.

Yer kontrol (ground), uçakların push-back yapmak suretiyle park pozisyonundan çıkarak kalkış için pist başına kadar geldikleri zaman ya da inişini tamamlayan uçakların park yerine gidene dek geçen zaman diliminde kontrol edildiği sektördür. Meydanın büyüklüğü ve yoğunluğu ile ilişkili olarak yer kontrol sektörü de kendi içerisinde birden fazla alt üniteye ayrılabilir.

Kule sektörü ise iniş ve kalkış yapacak uçakların kontrolünün tesis edildiği ünite. Yine ilgili meydanın büyüklüğü ve yoğunluk ile ilişkili olarak kule sektörü birden fazla alt sektör olarak hizmet verebilmekte ya da bazı durumları sadece iniş ve sadece kalkış olmak üzere de iki sektör halinde hizmet verebilmektedir [92].

### **3.2.2. Yaklaşma Kontrol Hizmeti**

İniş veya kalkış yapan kontrollü uçuşlara verilen hizmete yaklaşma kontrol hizmeti adı verilmektedir. Yaklaşma kontrol hizmeti, yaklaşma kontrol ünitesi tarafından sağlanmaktadır. Yaklaşma kontrol ofisi, bir veya birden fazla meydana iniş kalkış yapan kontrollü uçuşlara hava trafik kontrol hizmet sağlamak için oluşturulmuş ünite.

Yaklaşma kontrolörleri, kule ve saha kontrol sektörleri arasındaki tanımlı hava sahasında uçmakta olan trafiklere hizmet vermekle yükümlüdürler. Yaklaşma kontrolörlerinin sorumluluğu altındaki bu sahaya TMA (Terminal Control Area) adı verilmektedir. TMA'da uçmakta olan trafikler; kalkışını tamamlayıp düz uçuş öncesi tırmanma safhasına geçen uçaklar ya da iniş yapmak üzere düz uçuştan ayrılarak alçalmaya başlayan uçaklardan müteşekkildir. Ayrıca bazı durumlarda ise düşük irtifalarda uçmakta olan VFR uçaklar için de radar kontrolünde hizmet verilebilmektedir.

Yaklaşma kontrol ünitesi, sorumluluk sahasındaki trafiklere belli kurallar çerçevesinde tavsiye, talimat ve izinler yayınlamakla yükümlüdür. Yaklaşma kontrol ünitesinin en temel sorumlulukları ise;

- Tırmanan ve alçalan uçaklar ayırmaları tesis edilmesi,
- Sorumluluğu altındaki trafikler ile düz uçuş safhasındaki diğer uçaklar arasında standart ayırmaları sağlamak için gerekli tavsiye, talimat ve izinlerin verilmesi,
- Gerekli durumlarda kule ve saha kontrol üniteleri arasında gerekli bilgi akışının sağlanması [92].

### 3.2.3. Saha Kontrol Hizmeti

Saha kontrol hizmeti; sorumluluk sahası içerisindeki kontrollü uçuşlara verilen hava trafik kontrol hizmetine denilmektedir. Saha kontrol hizmetinin sunulduğu sorumluluk sahası ise FIR (Flight Information Region) olarak adlandırılan ve trafiklerin düz uçuş yapmış oldukları hava sahasından oluşmaktadır.

Saha kontrolörleri sorumluluk sahasındaki uçaklar arasında yatay ve dikey olmak üzere iki çeşit ayırma sağlamaktadırlar. Saha kontrol ünitesinin sağlamış olduğu hava trafik hizmeti aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yaklaşma kontrol ünitesinden devralınan uçaklar ile sorumluluk sahasında bulunan diğer uçaklar arasındaki ayırmaları tesis etmek,
- Düz uçuş yapan trafiklere, doldurmuş oldukları uçuş planları ile uyumlu olacak şekilde uçuş seviyeleri tahsis etmek,
- Gerektiğinde kendi sorumluluk sahasında uçan uçakların devrini komşu FIR'a devretmek,
- İniş öncesinde trafikleri uygun yerlerden zamanda uygun seviyelere alçaltmak ve yaklaşma kontrol ünitesine devretmek,
- Sorumluluk sahasındaki tüm uçaklara gerekli izin ve bilgi akışını yayınlamak [92].

## 3.3. HAVA TRAFİK HİZMETLERİ İLE İLİŞKİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Hava trafik hizmetlerini, yasal otoritelerin koymuş olduğu kurallar çerçevesinde sağlamak üzere çok sayıda yapısal ve teknik unsur bulunmaktadır. Bu unsurlar; havalimanları, havalimanına ait alt birimler olan; terminal, apron, pist, taksi yolu gibi çoğaltılabilir. Bu başlık

altında ise hava trafiği denilince aklımıza gelebilecek ve bu çalışma boyunca sıklıca sözü geçen en temel öğeler kısaca açıklanacaktır.

### **3.3.1. Havalimanı**

Havalimanları (aerodrome), su veya kara üzerinde ilişkili çeşitli bina, ekipman ve diğer unsurları da içerecek şekilde kısmen veya tamamen hava araçlarının yüzey hareketi, iniş ve kalkışının planlandığı tanımlı alanlardır [93].

### **3.3.2. Terminal**

Havacılıkta terminal, bir havalimanında yolcuların inişten sonra veya kalkış amacıyla kullandıkları ve uçaklar ile yer istasyonu arasındaki bağlantıyı sağlayan yapılardır. Terminale bağlı körükler ile yolcuların uçaklara erişimi sağlanmaktadır [93].

### **3.3.3. Apron**

Apron, bir kara havalimanında uçakların yolcu indirme / bindirme, kargo yükleme / boşatma, yakıt ikmali, bakım / onarım yapımı ya da parklandırma gibi amaçlarla kullanılan tanımlı alanlardır [93].

### **3.3.4. Uçak Park Pozisyonu**

Apron bölgesinde yolcu indirme ve bindirmenin yapıldığı ve uçakların parklandırma amacıyla kullanıldığı alanlara uçak park pozisyonları adı verilir. Uçak park pozisyonları terminale biririşik körükler ya da açık park pozisyonları olabilmektedir [93].

### **3.3.4. Pist**

Hava araçlarının iniş ve kalkış operasyonlarını gerçekleştirmesi amacıyla bir kara havalimanında tanımlı dikdörtgen yapıdaki sahalara pist (runway) adı verilir [93].

### **3.3.5. Pist Bekleme Noktası**

Pist bekleme noktası (runway holding point), aktif pistleri korumak ve olası kaza/kırım hadiselerini engellemek amacıyla taksi hareketi yapmakta olan uçakların pist öncesinde yaklaşabilecekleri nihai noktayı ifade etmektedir [93].



**Şekil 3. 2:** Pist başında kalkış için bekleyen uçak grubu.

### 3.3.6. Taksi Yolu

Bir kara havalimanında, uçakların taxi hareketleri için tanımlanmış ve havalimanının bir noktası ile diğer noktaları arasında bağlantı görevi gören yollara taksi yolu (taxiway) denilmektedir. Taksi yolları uçakların pist ile apron ve park pozisyonları arasından hareketini sağlayan ağların tümüdür [93].

### 3.3.7. Taksi Hareketi

Uçakların bir kara havalimanında taksi yolları boyunca ve kendi motor güçlerini kullanarak yapmış oldukları harekete taksi hareketi denilmektedir [93].

### 3.3.8. Push-back

Park pozisyonlarında park halinde bulunan uçakların harici bir güç kullanılarak (genellikle push-back aracı denilen özel araçlar) buldukları pozisyondan geriye doğru itilmesi ve taksi yolu üzerinde konumlandırılması sürecine push-back denilir [93].

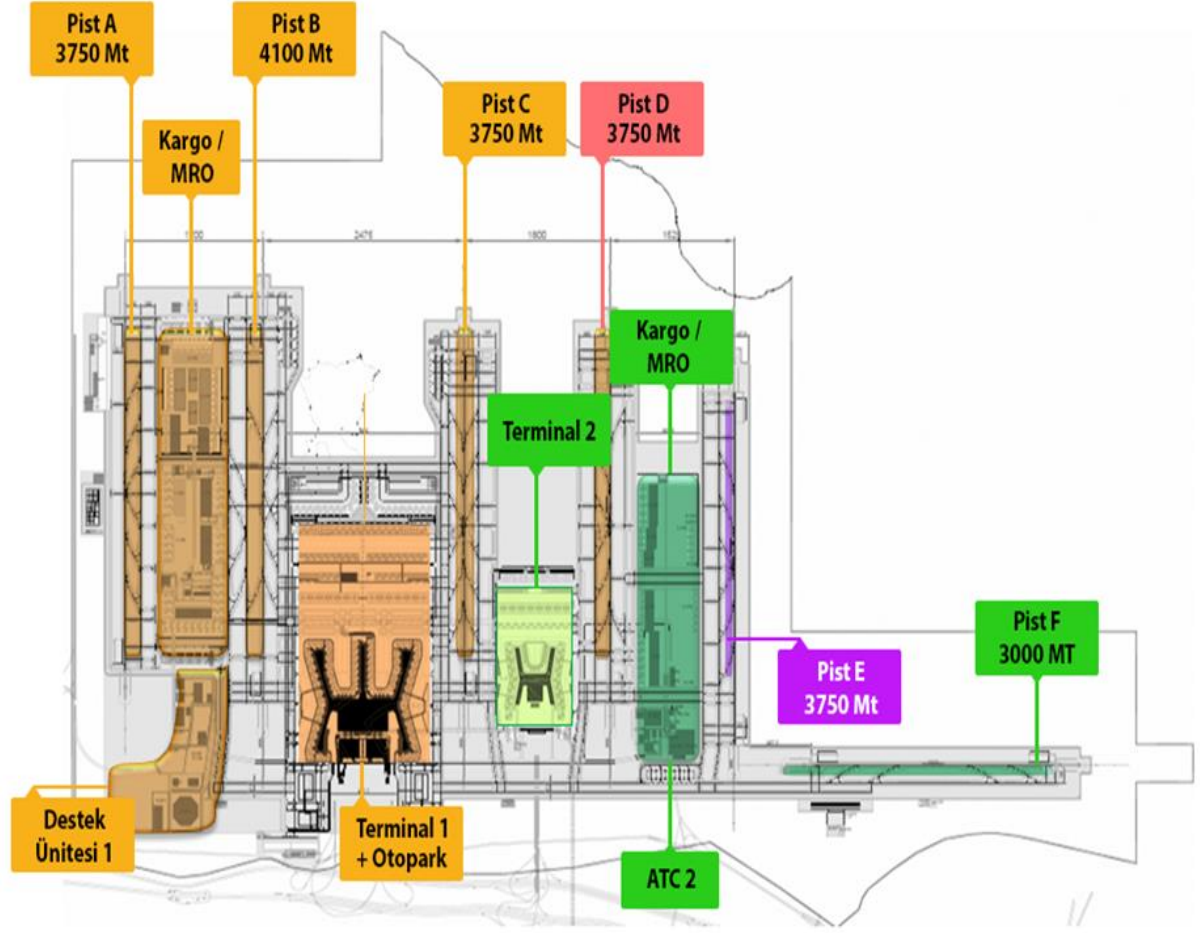
Özellikle aprona park halinde bulunan uçakların ters motor gücü kullanılarak geri gelmesi, apron ve yakınlardaki diğer yapı ve unsurlar için tehlikeli olacağından push-back usulü tercih edilir.

### 3.4. İSTANBUL HAVALİMANI'NIN YAPISI

1912 yılında askeri bir meydan olarak kurulan Yeşilköy Havalimanı, 1950'li yıllardan itibaren sivil trafiğe açılmış ve zamanla gelişimini sürdürerek Türkiye'nin ve dünyanın önemli hub limanlarından biri haline gelmiştir. Geçirdiği önemli değişimlerle birlikte Atatürk Havalimanı adını alan bu liman, zamanla Türk havacılığında yaşanan büyüme ve hava taşımacılığına olan talebin artması ile kapasite noktasında yetersiz kalmaya başlamıştır. Bu nedenle, hem kapasite problemini çözecek hem de Türkiye'nin havacılıktaki gelecek yüzünü yansıtacak şekilde yeni bir havalimanının inşa edilmesine karar verilmiş ve yeni havalimanının hizmete girmesini takiben Atatürk Havalimanı 6 Nisan 2019 tarihinde ticari yolcu taşımacılığına kapatılmıştır [94].

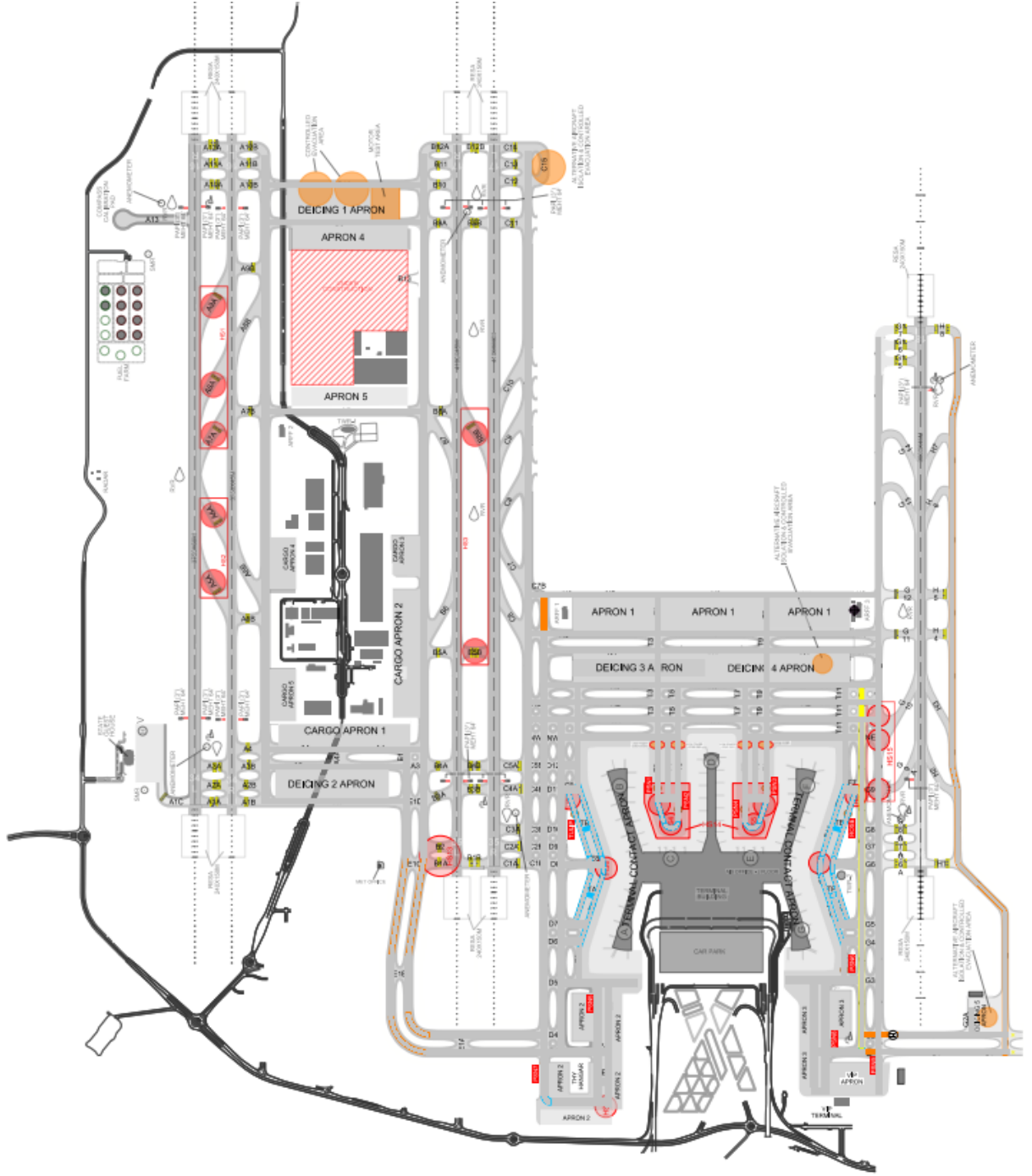
Yap-işlet-devret modeli ile özel sektör tarafından İstanbul'un Avrupa yakasında inşa edilen İstanbul Havalimanı 29 Ekim 2018'de hizmete girerek kademeli olarak Atatürk Havalimanı ait ticari uçuş yükünü devralmıştır. Tüm etapları tamamlandığında 76,5 milyon metrekare alanda, 6 bağımsız pist, 2 yolcu terminali ve 200 milyonu aşan yolcu kapasitesi ile hizmet vermesi planlanmaktadır. İnşaat sürecinin aktif olarak devam ettiği İstanbul Havalimanı'nda 4 faz halinde tüm etapların tamamlanması planlanmaktadır [95].

Mevcut durumda, üçü bağımsız paralel (34,35 ve 36 pistleri) olmak üzere toplamda 5 pist, yolcu 1 apronu, 1 kargo apronu ve diğer teknik üniteleri ile birlikte hizmet vermekte olan İstanbul Havalimanı planlanan fazların hizmete girmesi ile beraber Türk sivil havacılığına önemli bir katkı sağlayacaktır. Aşağıda sunulmakta olan Şekil 3.3 planlanan tüm etaplarıyla birlikte İstanbul Havalimanının yapısını göstermektedir [96].



Şekil 3. 3: Planlanan tüm etaplarıyla birlikte İstanbul Havalimanı'nın yapısı.

Hali hazırda inşaatı tamamlanan 3750m uzunluğundaki 34 L/R pist çifti, 4100m uzunluğundaki 35 L/R pist çifti ve takiben hizmete giren 3750m uzunluğundaki 36 pisti hava trafiğine hizmet sunmaktadır. Bununla beraber 34 ve 35 pistleri arasında konumlandırılan kargo apronu; kargo taşımacılığı ve lojistik amacıyla hizmet vermektedir. Bununla beraber uçak bakım hangarlarının da yer aldığı İstanbul Havalimanı sadece yerli uçucu şirketler için değil, aynı zamanda bölgesel olarak da uçak bakım hizmeti sunabilecek potansiyelde inşa edilmiştir. Ayrıca, ilave teknik destek üniteleri ve sosyal alanları ile birlikte İstanbul Havalimanı konum avantajını da kullanarak önemli bir hub havalimanı görevi görmektedir. Aşağıda sunulmakta olan şekil 3.4 ile İstanbul Havalimanı'nın mevcut yapısına ait bir şematik görsel verilmiştir [97].



Şekil 3. 4: İstanbul Havalimanı'nın mevcut yapısına ilişkin şematik görsel.



**Şekil 3. 5:** İstanbul Havalimanı terminal ve apron sahasını gösteren bir görsel.

İstanbul Havalimanı'nın mevcut yapısı incelendiğinde; 3 paralel pist (34L/R, 35L/R ve 36), ana terminal binası, kargo apronu ve diğer alt teknik birimleriyle hizmet verdiği görülmektedir. Dolayısıyla şekil-3.3 ile gösterilen ve planlanan tüm etaplardan A, B ve C pistleri aktif olarak hizmet vermektedir. Hava trafiği açısından bir incelemesini yapmış olduğumuz İstanbul Havalimanı'na ait bu çalışmada da hâlihazırda hizmet vermekte olan mevcut etaplar dikkate alınmıştır.



## 4. HAVAYOLU TAŞIMACILIĞI

### 4.1 GİRİŞ

Tarih boyunca uçmak ve hava aracılığı ile seyahat fikri bir ütopya gibi görünse de insanların zihnini meşgul etmiş ve dönemsel gelişmelerle insanoğlu bu hayalin gerçekleşmesi umudunu daima taze tutmuştur. Hezarfen Ahmet Çelebi'nin uzun çalışmalar neticesinde Galata Kulesi'nden yapmış olduğu uçuş deneyiminden, Leonardo Da Vincinin havada uçabilen araç tasarımlarına kadar pek çok çalışma bu hayalin bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Nihayet, Wright kardeşlerin kendilerinden önceki çalışmaları geliştirerek ortaya çıkardıkları tasarım tarihteki ilk uçağın ortaya çıkmasını sağlamış ve bu tarihten itibaren havacılık bambaşka bir vizyona ulaşarak günümüzdeki yerini almıştır [1].

Havayolu ile ulaşımın günümüz dünyasında çokça tercih edilmesinin başlıca nedeninin zamandan tasarruf olduğu söylenebilir. Diğer ulaşım seçenekleriyle günlerce, belki de aylarca gidilemeyecek mesafelerin saatler içerisinde ulaşılabilir olması bu durumu en güzel şekilde özetlemektedir. Dolayısıyla bu avantajı neticesinde gelişimini aralıksız sürdüren havacılık, bu gelişime paralel olarak birçok yapısal ve sistemsel usul ve kaidenin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Hava araçlarına ev sahipliği yapan en küçüğünden en büyük olanına kadar binlerce havalimanı, uçuş boyunca takip edilecek rotalar, hava trafik ve uçuş ekiplerine ait lisanslamalar ve diğer çalışma usulleri bu ihtiyacın neticesinde ortaya çıkmıştır. Gelişen havayolu ağı ile birlikte, geçmişte tecrübe edilen kaza ve kırım gibi üzücü hadiselerin de bir sonucu olarak havayolu taşımacılığı, profesyonel kimliğini sürekli güncel tutmak durumunda kalarak iyileştirici, geliştirici faaliyetler süregelmektedir [1].

### 4.2 HAVA TAŞIMACILIĞININ TARİHÇESİ

Havayolu taşımacılığı, havanın kaldırma kuvvetini kullanmak suretiyle yapılan bir taşımacılık türü olup, hava aracılığı ile seyahat için gerekli her türlü teknik yapının, hava araçlarının tasarımı, bakımı ve işletimi gibi daha genel unsurlar ise havacılık terimi altında birleşmektedir. Havacılık terimi ayrıca hava taşıtları ile ilgili olan tüm eylemleri, endüstrileri, kurumları da kapsayacak bir kapsamdadır [98].

Havacılık bağlamında bilinen ilk çalışmalar; 9. yüzyıl ile 11. yüzyıl arasında Armen Firman'nın paraşüt uçuşu ve Abbas ibni Firnas'ın planör ile yaptığı uçuşlar olarak bilinmektedir. Kısa

mesafeli olarak yapılan bu ilk uçuş deneyimleri havacılık bağlamında büyük önem arz etmektedir. Ayrıca Evliya Çelebi'nin Seyahatname isimli eserinde kaydedildiği üzere; Osmanlı döneminde Hezarfen Ahmet Çelebinin muhtemel olarak kuşlardan esinlenerek yaptığı kanat tasarımıyla Galata Kulesi ile Üsküdar arasındaki uçuş deneyimi havacılık bağlamında önemli olaylar arasında yerini almıştır. Nispeten daha uzun mesafeli olarak yapılan bu uçuş deneyimi birçok noktada önemli bir ilham kaynağı olmuştur [1].

Modern havacılığın temelleri, Montgolfier kardeşler tarafından tasarlanmış olan bir sıcak hava balonunun uçurulması ise başlamıştır. Bu olay ile ilk defa havadan hafif bir uçuş gerçekleştirilmiş ve böylece balonlu uçuş deneyimi yaygın hale gelerek 19. yüzyıl boyunca var olmaya devam etmiştir. Bugünkü manasıyla havacılık terimine temel oluşturan sıcak hava balonlarını, planör ve zeplin gibi hava araçlarının icadı takip etmiştir. Nihayet 1900'lü yılların başında Wright kardeşlerin sabit kanatlı ve kendi gücünü kullanabileceği ekipmanıyla (motor) birlikte tasarladıkları ilk ilkel uçak yeni bir dönemin başlangıcına öncülük etmiştir. Takip eden yıllarda jet motorlarının icadı havadan ağır nesnelere uçmasını kolaylaştıran diğer önemli bir icat olarak öne çıkmıştır [1].

Geride kalan ve 100 yılı aşan bir süre zarfında, modern havacılık büyük mesafeler kat ederek günümüzdeki yerini almıştır. Günümüz dünyasında artık insanoğlu, nasıl uçulacağından ziyade, nasıl daha hızlı, daha güvenli ve daha uzaklara uçulabilir sorularına cevaplar aramakta ve bu bağlamda çalışmalar yapılmaktadır. İnsanların uzun mesafeleri daha kısa zamanda ve daha konforlu bir şekilde kat etmesi amacıyla havacılık endüstrisi gelişimini aralıksız olarak sürdürmektedir [99].

#### **4.3 DÜNYA GENELİNDE HAVA TAŞIMACILIĞI VERİLERİ**

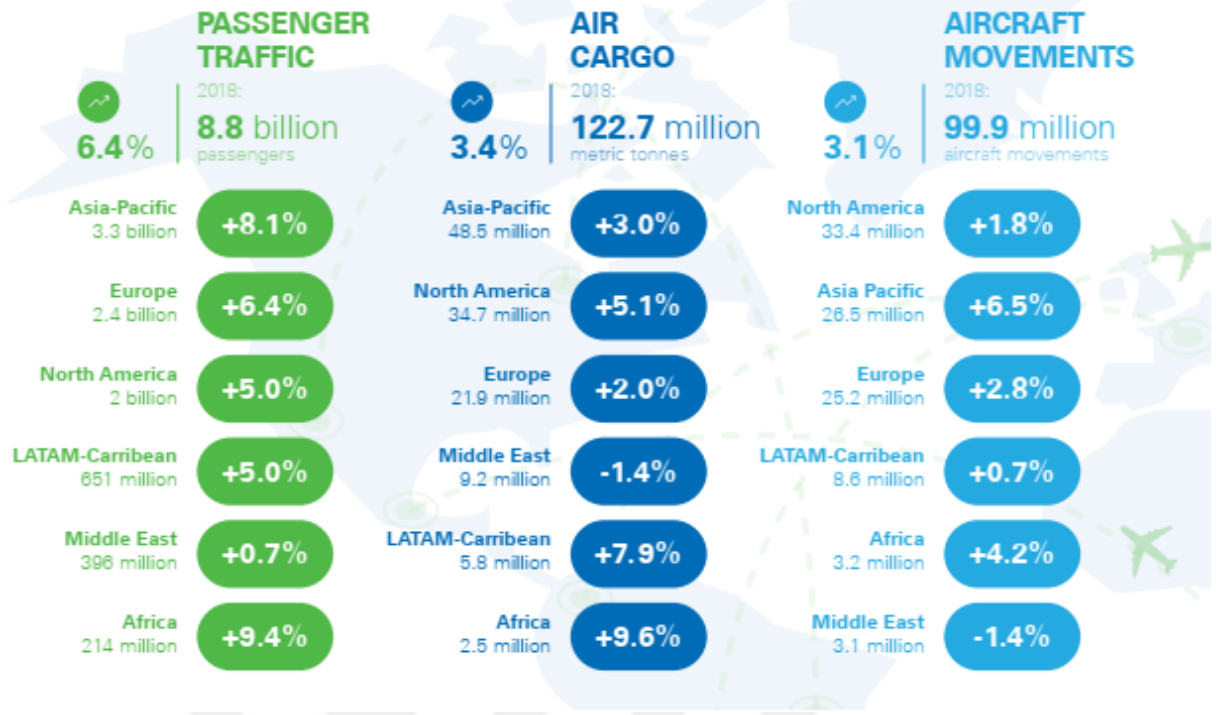
Hava taşımacılığı önemli icat ve tasarımların da etkisiyle kara, demir ve deniz ulaşımına alternatif olan yeni bir ulaşım metodu olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle jet motorlarının icadı ile artık havayolu ulaşımının doğal bir parçası olan büyük ölçekli uçakların tasarımı mümkün olmuş ve böylelikle hava taşımacılığının daha geniş bir kitleye ulaşması mümkün olmuştur. İnsanoğlunun ulaşım tercihlerine bakıldığında farklı faktörleri (hız, emniyet, konfor, maliyet vb.) göz önüne alarak, buna istinaden kara, demir, deniz ya da havayolu ulaşımından birini tercih ettiği görülmektedir. Bu noktada özellikle hız ve konforu tercih edenlerin hava yolu ulaşımını ilk seçenek olarak tercih etmeleri kaçınılmaz olmaktadır. Dolayısıyla, zaman zaman

dönemsel krizlerden etkilense de havayolu taşımacılığı pek çok avantajı sayesinde insanoğlunun ulaşım tercihlerinde ön sıralardaki yerini korumaktadır [100].

Havayolu taşımacılığına ilişkin profesyonel yapılanma bu alandaki pek çok ulusal ve uluslararası yapılanma tarafından takip edilmektedir. Örneğin; 1945 yılında kurulan IATA (International Air Transport Association) dünya genelinde havayolu şirketlerinin dâhil olduğu ve belli teknik ve ticari standartların oluşturulduğu bir yapılanmadır. Çoğunluğu Avrupa ve Kuzey Amerika'dan olmak üzere 120 ülkeden 290 üyesiyle bu yapılanma havacılığın önemli bir küresel organizasyonu konumundadır [101]. Yine birleşmiş milletlere bağlı özel bir yapılanma olan ICAO (International Civil Aviation Organization) hava trafiğine yönelik prensipler, mesleki ve teknik alt yapının oluşturulması geliştirilmesi gibi konularda çalışmalar yapmaktadır. 1947 yılında kurulan ve Türkiye'nin de üye olduğu bu yapılanma ülkeler arasında da hava trafik noktasında işbirliği oluşturma gayreti taşımaktadır [102]. Bu ve benzeri birçok örgüt tarafından ilgili çalışma sahasına ait rapor, istatistikler ve yayınlar hava taşımacılığındaki gelişim sürecini ortaya koymaktadır.

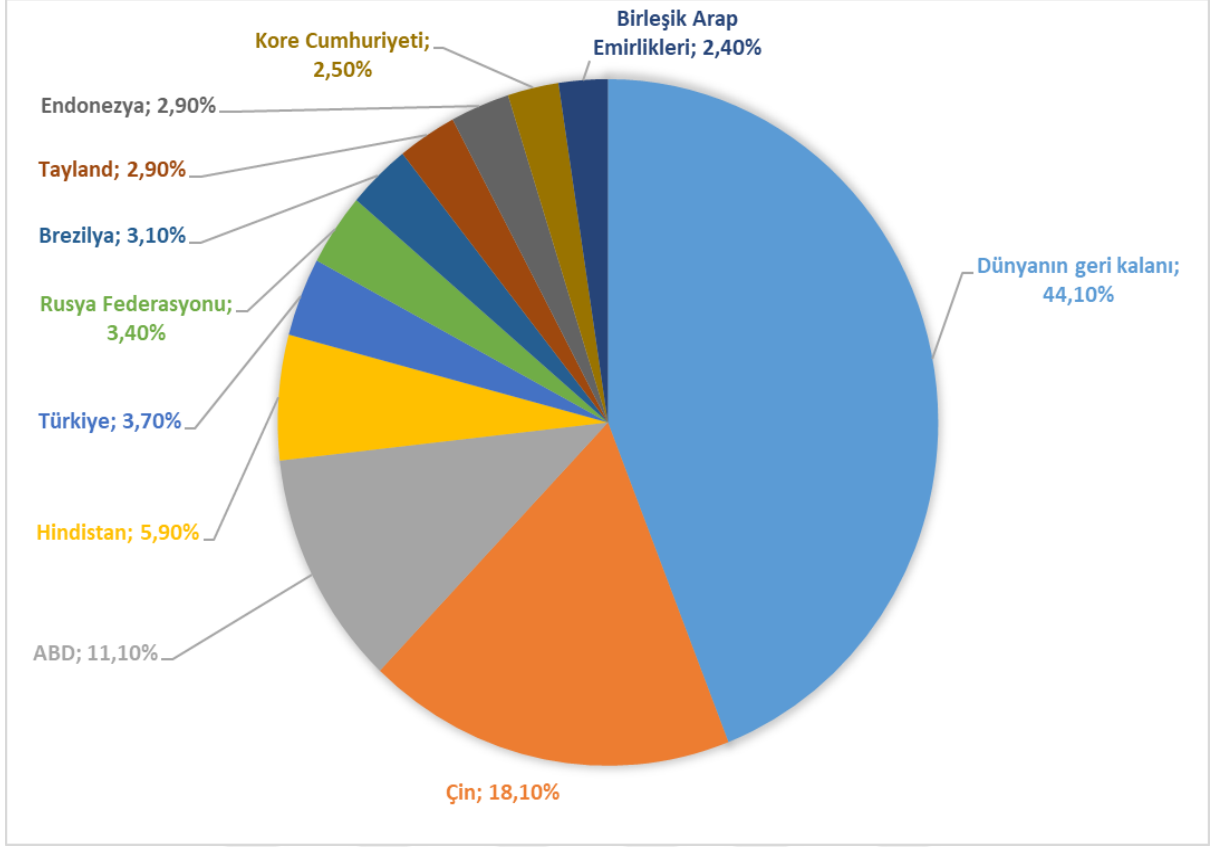
Aşağıda verilmekte olan şekil-4.1 ile yolcu, kargo ve uçak hareketliliğine ilişkin 2018 yılı verisi sunulmaktadır [103]. Buna göre, dünya genelinde 6 bölgeye ilişkin sunulan istatistiksel veri 2018 yılı için hava taşımacılığındaki rakamsal değişiklikleri gözler önüne sermektedir. Yayınlanan veriler rakamsal olarak incelediğinde; 8.8 milyar yolcu adedi, 122.7 milyon ton kargo miktarı, 99.9 milyon uçak hareketliliği ile hava taşımacılığının ne denli büyük ölçekli olduğu açıkça görülmektedir.

Yine bu tabloya göre, Türkiye'nin de içinde yer aldığı Avrupa bölgesinde; yolcu trafiğinin %6.4, hava kargonun %5.1 ve uçak hareketliliğinin (uçak iniş kalkış operasyonları) ise %6.5 oranında artış gösterdiği görülmektedir. 3 farklı kategoride yayınlanan verilere göre; yolcu taşımacılığında en büyük artışı %9,4 büyüme ile Afrika bölgesi, benzer şekilde hava kargo taşımacılığında %9,6 büyüme ile yine Afrika bölgesi göstermiştir. Toplam uçak hareketliliğinde ise en büyük artış %6,5 oranında büyüme ile Asya-Pasifik bölgesinde görülmüştür. Tüm veriler için 2018 yılında bölgesel büyümenin devam ettiği görülmekte olup, yalnızca Orta-Doğu bölgesi hava kargo ve toplam uçak hareketliliği verisinde %1.4 düşüş gözlenmiştir.



**Şekil 4. 1:** ACI (Airports Council International) tarafından yayınlanan 2018 yılı hava taşımacılığına ilişkin bir veri.

ACI tarafından yayınlanan raporlarda, gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelere ait hava taşımacılığına ilişkin kapsamlı birçok veriye ulaşmak mümkün olmaktadır. Şekil 4.2 ile ülkeler bazında yolcu trafiğine ilişkin farklı bir veri sunulmaktadır [103]. Buna göre; yolcu trafiği açısından gelişmekte olan ülkelere yer verilerek, pazardaki payları yüzdesel olarak gösterilmektedir. Aralarında Türkiye'nin de yer aldığı gelişmekte olan pazarların dünya geneline göre %55,9 oranında bir yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Yine, %3,7'lik pazar payı ile Türkiye'nin yolcu trafiği açısından da önemli bir yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 2: Yolcu trafiği açısından gelişmekte olan ülkelerin pazar payındaki yeri

Şekil 4.1 ile özetlendiği üzere hava taşımacılığı yıllık bazda incelendiğinde, milyarlarca insanın yer değiştirdiği ve milyonlarca ton kargonun taşındığı kitlesel bir yoğunluğu ortaya koymaktadır. Böylesine büyük rakamların taşınabilmesi için de milyonlarca uçağın hareketliliği gerekmektedir. Dolayısıyla büyüklüklerine göre gün içerisinde onlarca, yüzlerce farklı uçağa ev sahipliği yapan havalimanları arasında da büyük bir hareketlilik söz konusu olmaktadır. Özellikle uçak trafik sayısı yüksek olan majör havalimanları düşünüldüğünde bu rakamların binlerin üzerine çıktığı görülmektedir. Tablo 4.1 dünya genelinde en yoğun uçak hareketliliğinin (iniş ve kalkış) yaşandığı 20 havalimanının 2010-2017 yılları arasındaki değişimini göstermektedir.

Tablo 4.1 ile sunulan veriler incelendiğinde uçak hareketliliği noktasında 2010 yılında ABD şehirlerine ait limanların ilk sıralarda yer aldığı ve 2017 yılı için de bu sıralamanın değişmediği görülmektedir. Farklı olarak büyüyen pazarlardan Çin'e ait şehirlerin 2017 yılında üst sıralara çıktığı göze çarpmaktadır. Benzer şekilde Avrupa pazarından Paris, Londra ve Frankfurt gibi şehirlere ait büyük limanların üst sıralarda yer aldığı görülmektedir. En yoğun meydanlar listesinde göze çarpan diğer bir önemli detay ise İstanbul Atatürk Havalimanı'nın 2017

sıralamasına 16. sıradan dâhil olarak yoğun meydanlar arasında yerini alması olmuştur. Yıllık bağlamda 460 bini aşan iniş-kalkış rakamıyla İstanbul Atatürk Havalimanı Türk Havacılığındaki önemli gelişimi gözler önüne sermektedir.

**Tablo 4. 1:** Toplam uçuş adedi (iniş-kalkış) bakımından dünya genelinde en yoğun havalimanlarının 2010 ile 2017 yılları için sıralaması.

2010			2017		
SIRA	ŞEHİR (LİMAN)	TOPLAM UÇUŞ	SIRA	ŞEHİR (LİMAN)	TOPLAM UÇUŞ
1	ATLANTA - ATL	950 119	1	ATLANTA - ATL	879 560
2	CHİCAGO - ORD	882 617	2	CHICAGO - ORD	867 049
3	LOS ANGELOS - LAX	666 938	3	LOS ANGELOS - LAX	700 362
4	DALLAS - DFW	652 261	4	DALLAS - DFW	654 344
5	DENVER - DEN	630 063	5	BEIJING - PEK	597 259
6	HOUSTEN - IAH	531 347	6	DENVER - DEN	574 966
7	CHORLETTE - CLT	529 101	7	CHORLETTE - CLT	553 817
8	BEIJING - PEK	517 584	8	LAS VEGAS - LAS	542 994
9	LAS VEGAS - LAS	505 591	9	AMSTERDAM – AMS	514 625
10	PARIS - CDG	499 997	10	SHANGHAI - PVG	496 774
11	FRANKFURT - FRA	464 432	11	PARIS - CDG	482 676
12	PHILEDELPHIA - PHL	460 799	12	LONDON - LHR	475 915
13	LONDON LHR	454 883	13	FRANKFURT - FRA	475 537
14	DETROIT - DTW	452 616	14	TORONTO - YYZ	465 555
15	PHOENIX - PHX	449 351	15	GUANGZHOU - CAN	465 295
16	MINNEAPOLIS - MSP	436 625	16	ISTANBUL - IST	460 785
17	MADRID - MAD	433 683	17	SAN FRANCISCO - SFO	460 243
18	TORONTO - YYZ	418 298	18	TOKYO - HND	453 126
19	NEWARK - EWR	403 880	19	HOUSTON - IAH	450 383
20	AMSTERDAM - AMS	402 372	20	MEXICO CITY - MEX	449 664

#### 4.4 TÜRKİYE İÇİN HAVA TAŞIMACILIĞI VERİLERİ

Havayolu taşımacılığı 2. Dünya Savaşı'ndan sonra teknolojik ve yapısal değişikliklerin de etkisiyle daha hızlı bir gelişme trendine girmiştir. Özellikle ulaşım noktasında hız avantajının da etkisiyle yolcu ve kargo taşımacılığı önemli ilerlemeler kat etmiştir. Geniş kapasiteli, yakıt tasarruflu, düşük gürültü ve emisyon sağlayan uçakların üretilmesinin yanı sıra sektörde

serbestleşme ve ticari yapının artması gibi gelişmelerle havayolu taşımacılığı zamanla önemli bir pazar haline gelmiştir [1].

Havayolu taşımacılığı dünya genelinde gelişimine devam ederken, benzer şekilde Türkiye için de önemli sektörel gelişmeler yaşanmıştır. 1912 yılında başlayan ilk sivil havacılık faaliyetleri, 1925 yılında Türk Hava Kurumu'nun temellerini oluşturan Türk Tayyare Cemiyetinin kurulması ile devam etmiştir. Takiben, 1956 yılında havalimanlarının işletimi ve hava sahası yönetimi gibi amaçlarla Devlet Hava Meydanları İşletmesi'nin kurulması, 1980'li yıllardan sonra bayrak taşıyıcı şirket olan THY'nin modernizasyonu gibi atılımların neticesinde zamanla profesyonel bir kimliğe bürünmüştür. Tüm bu gelişmelerin yanı sıra, kıtalar arası kesişim noktasında bulunan Türkiye havayolu taşımacılığında önemli bir stratejik avantaja sahip olmuştur. Dolayısıyla, birçok noktada olduğu gibi ulaşımda da coğrafi konum avantajının da etkisiyle Türkiye için havacılık verileri sürekli bir gelişim eğilimi göstermektedir [104].

Türk sivil havacılığına yönelik istatistiksel veriler DHMİ tarafından ilan edilmekte olup ve bunlara dayalı eylem planları açıklanan veriler ışığında yapılmaktadır. Türkiye'deki devlet havalimanlarının işletimi ve Türk hava sahasının yönetilmesi görevini üstlenen DHMİ tarafından aylık ve yıllık periyotlar halinde yayınlanan hava taşımacılığı verileri sektörel detayları ortaya koymaktadır. Bu verilerin ışığında kısa, orta ve uzun vadeli olarak uygun eylem planları hazırlamak mümkün olmaktadır.

Aşağıda tablo-4.2 ile 2010-2019 yılları arasında Türkiye'deki toplam yolcu ve uçak trafiği rakamlarının değişimi verilmektedir [105]. Yolcu trafiği verilerine bakılacak olursa; 2010 yılında 50.575.426 olan iç hat yolcu adedinin 2019 yılı sonunda yaklaşık ikiye katlanarak 99.946.572 adedine ulaştığı görülmektedir. Benzer şekilde dış hat yolcu trafiği 2010 yılında 52.224.966 iken, 2019 yılı sonunda iki katından fazla bir artış göstererek 108.427.124 değerine ulaşmıştır. Transit yolcu trafiğinde ise yıllara oranla daha düzensiz bir dağılım görülmektedir. 2010 yılında 736.121 adet olan transit yolcu verisi zaman zaman artış, zaman zaman ise azalış eğilimi göstermiş 2019 yılı sonunda ise azalarak 537.642 adedine inmiştir. Yolcu rakamlarına genel toplamda bakıldığında ise ardışık yıllar arasında kısmi azalma görülse de yükseliş trendinin uzun vadeli olarak korunduğu görülmektedir.

DHMİ tarafından açıklanan istatistikler arasında diğer önemli bir veriyi ise uçak trafiği (iniş-kalkış) rakamları oluşturmaktadır. Veriler incelendiğinde yıllara göre zaman zaman azalış olduğu görülse de her üç segment (iç hat, dış hat, transit) için de 10 yıllık süreçte önemli bir

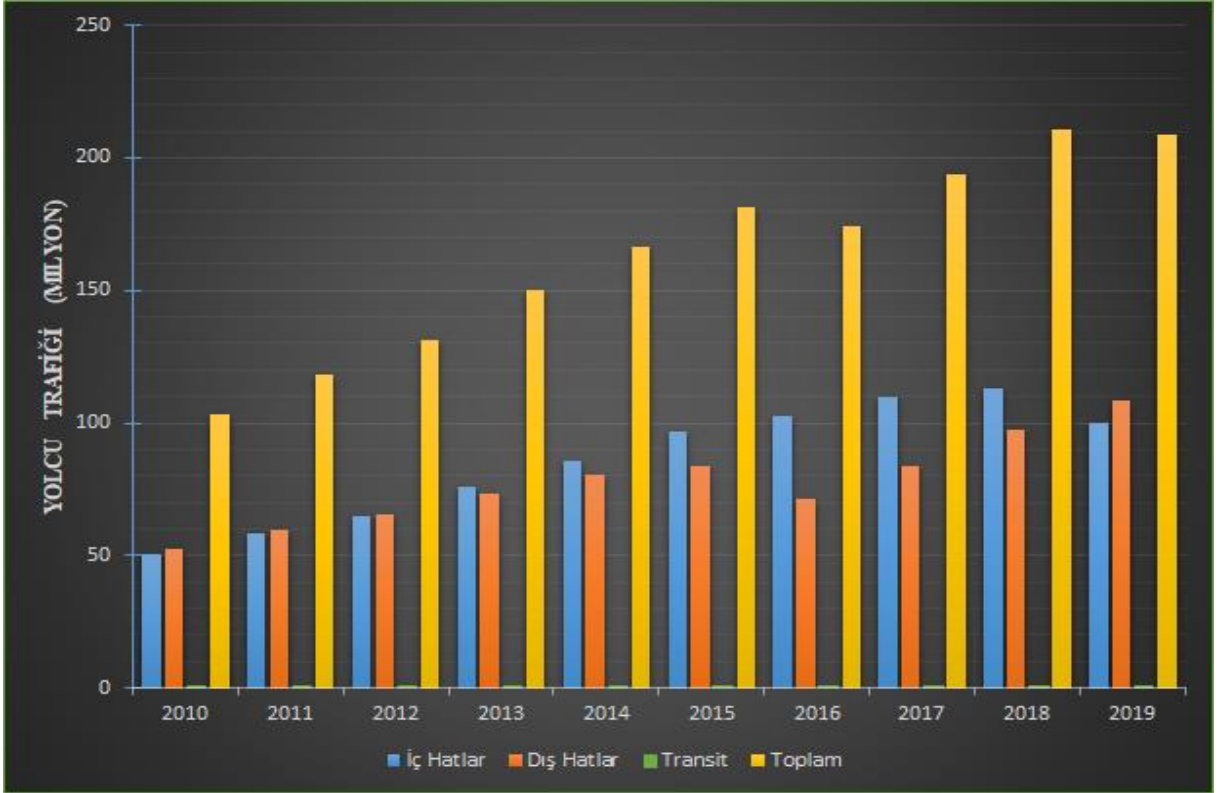
artış yaşandığı görülmektedir. 2010 yılında 497.862 olan iç hat uçak trafiğinin 2019 yılında 1,5 katından fazla yükselerek 839.894 değerine ulaştığı ve yine 2010 yılında 421.549 olan dış hat uçak trafiğinin 1,5 kattan fazla artarak 716.523 değerine ulaştığı görülmektedir. Transit uçak sayısında ise transit yolcu trafiğinden farklı bir grafiksel davranış görülmektedir. 2010-2013 yılları arasında kısmi bir azalış göstererek 293.714 adedinden 281.178 değerine inen transit uçak trafiği, takip eden yıllarda yükseliş trendine girmiş ve 2019 yılı sonunda 1.5 kattan fazla bir artış göstererek 478.013 değerine ulaşmıştır.

**Tablo 4. 2:** 2010 -2019 yılları arasında Türkiye'nin toplam yolcu ve uçak trafiği rakamları.

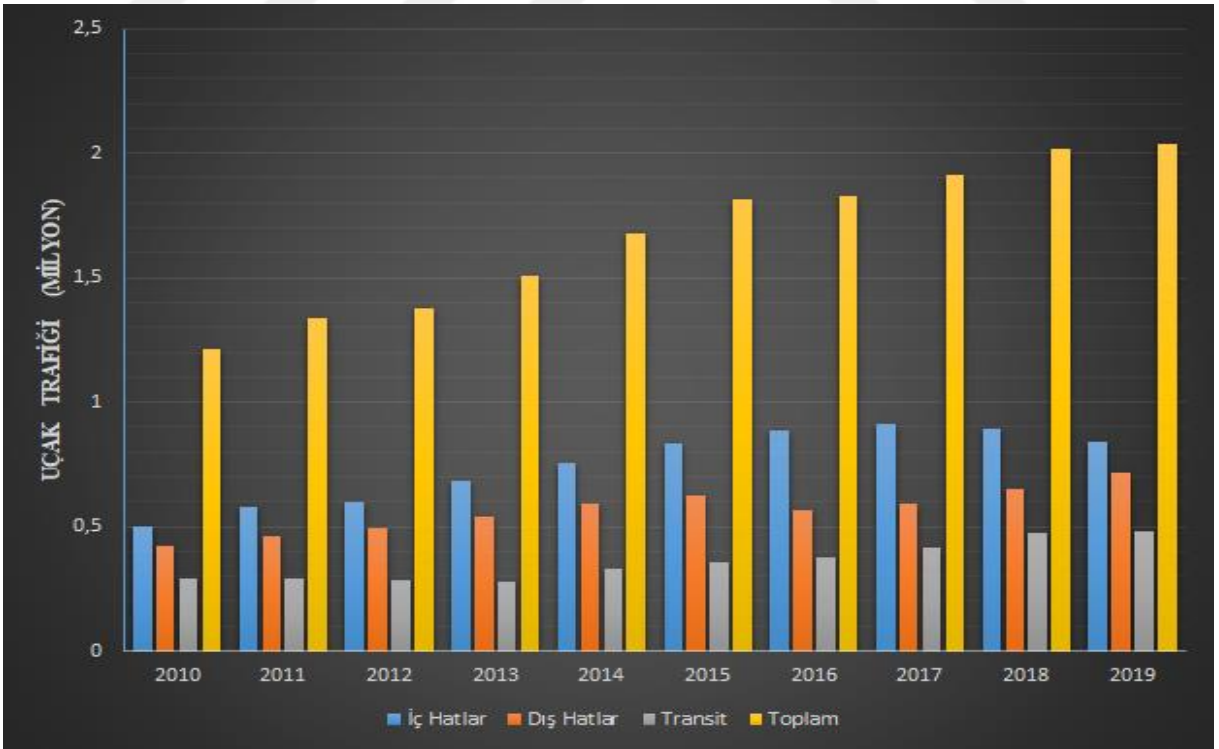
	YOLCU TRAFİĞİ			UÇAK TRAFİĞİ		
	İç Hat	Dış Hat	Transit	İç Hat	Dış Hat	Transit
<b>2010</b>	50 575 426	52 224 966	736 121	497 862	421 549	293 714
	<b>Toplam: 103 536 513</b>			<b>Toplam: 1 213 125</b>		
<b>2011</b>	58 258 324	59 362 145	671 531	579 488	462 881	292 816
	<b>Toplam: 118 292 000</b>			<b>Toplam:1 335 185</b>		
<b>2012</b>	64 721 316	65 630 304	677 896	600 818	492 229	283 439
	<b>Toplam: 131 029 516</b>			<b>Toplam: 1 376 486</b>		
<b>2013</b>	76 148 526	73 281 895	565 447	682 685	541 110	281 178
	<b>Toplam: 149 995 868</b>			<b>Toplam: 1 504 973</b>		
<b>2014</b>	85 416 166	80 304 068	461 105	754 259	591 695	333 017
	<b>Toplam: 166 181 339</b>			<b>Toplam: 1 678 971</b>		
<b>2015</b>	97 041 210	84 033 321	362 473	832 958	623 715	358 285
	<b>Toplam: 181 437 004</b>			<b>Toplam: 1 814 958</b>		
<b>2016</b>	102 499 358	71 244 179	409 609	886 228	566 767	376 913
	<b>Toplam: 174 153 146</b>			<b>Toplam: 1 829 908</b>		
<b>2017</b>	109 511 390	83 533 953	531 501	909 332	591 125	413 560
	<b>Toplam: 193 576 844</b>			<b>Toplam: 1 914 017</b>		
<b>2018</b>	112 911 108	97 587 056	449 475	892 405	651 764	473 051
	<b>Toplam: 210 947 639</b>			<b>Toplam: 2 017 220</b>		
<b>2019</b>	99 946 572	108 427 124	537 642	839 894	716 523	478 013
	<b>Toplam: 208 911 338</b>			<b>Toplam: 2 034 430</b>		

Aşağıda verilmekte olan tablo-4.3 ve tablo-4.4 ile 2010 ve 2019 yılları arasında Türkiye'ye ilişkin yolcu ve uçak trafiğindeki rakamsal değişimler görsel halinde sunulmaktadır. İlgili verilerdeki artış ve/veya azalış trendleri bu görsellerde daha belirgin bir şekilde görülmektedir.





Şekil 4. 3: 2010-2019 yılları arasında Türkiye için yolcu trafiği verisindeki değişim.



Şekil 4. 4: 2010-2019 yılları arasında Türkiye için uçak trafiği verisindeki değişim.

Taşımacılık kavramı insanların ihtiyaçları doğrultusunda ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla yöntem ve metot değişse de taşımacılığın insan tarihi boyunca sürekli var olması kaçınılmaz bir gerçektir. İnsanoğlu hayatın devamlılığının bir gereği olarak ürettikleri ürünleri ilkel metotlar ile de olsa binlerce yıldır farklı yerlere aktarmak durumunda kalmıştır. Bun noktada, tarihsel olarak milattan önce 700'lü yıllara uzanan taşımacılık verileri kayıtlarda yer almaktadır. Zaman içerisinde, ortaya çıkan ihtiyaçlara binaen yapılan iyileştirmelere ve geliştirmeler ile taşımacılığın kapsamı gelişmiş, özellikle modern zamanlardan itibaren daha profesyonel bir kimlik almıştır.

Havayolu taşımacılığı bilindiği üzere tarihsel süreç bakımından diğer taşımacılık türlerine nazaran oldukça yeni bir metottur. Hava taşımacılığının insan hayatına dâhil olmasıyla birlikte, lojistik amaçlı taşımacılık da havacılıkta yerini bulmuştur. Dünya ticaretinde yaşanan büyük gelişmelere paralel olarak çeşitlilik artmış ve bunun sonucunda rekabet ortamı daha da şiddetlenmiştir. Bu noktada iş süreçlerinin daha da hızlandırarak şekilde hava araçlarının sağlamış olduğu tüm avantajlar kullanılmak istenmektedir. Hava kargo başlangıçta posta taşımacılığı ile başlarken zamanla ürün yelpazesi genişlemiştir. Posta taşımacılığı, günümüzde gelirin takribi olarak %7 'lik bir kısmına tekabül etmektedir. Havayolu kargo taşımacılığında diğer taşımacılık türlerine nispeten hacim ve ağırlık olarak düşük ancak değeri yüksek olan eşyalar tercih edilmektedir [104].

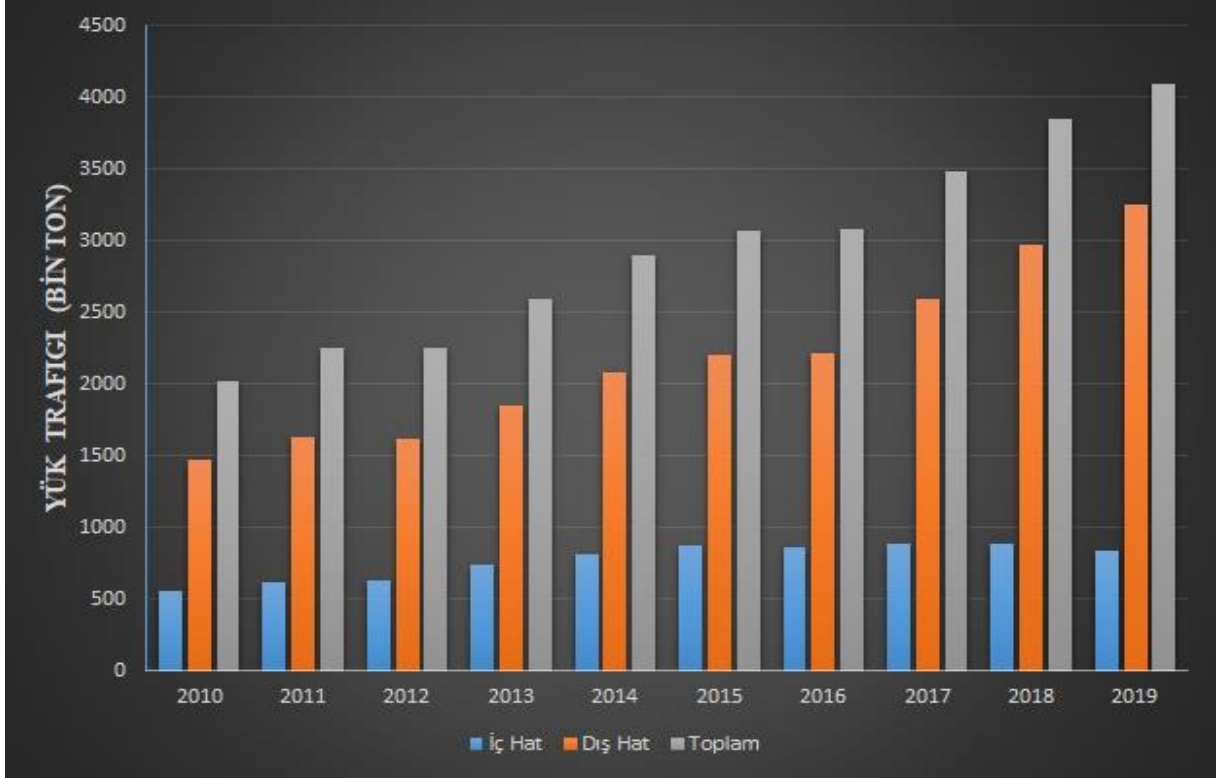
Aşağıda verilmekte tablo-4.3, Türkiye için 2010-2019 yılları arasındaki yük trafiği verilerini özetlemektedir [105]. Ayrıca yük trafiğinin yıllara göre grafiksel değişimi şekil-4.5 ile sunulmaktadır. Tablo ile ilgili veriler incelendiğinde; iç hat yük trafiği 2019 yılında bir önceki yıla göre kısmi bir düşüş yaşansa da, 2010 yılında 554.710 ton olan trafiğin 2019 sonunda 833.768 tona ulaştığı görülmektedir. Dış hat yük trafiği 2013 yılında bir önceki yıla nazaran kısmi bir azalış göstermiş ancak, 2010 yılında 1.466.366 ton olan dış hat yük trafiği genel yükseliş trendini koruyarak 2019 yılı sonunda 3.256.399 tona ulaşmıştır. Toplam yük trafiği ise aralıksız yükselişini sürdürmüş ve 2010 yılında 2.021.076 ton olan toplam yük trafiği 2019 yılı sonunda iki kattan fazla bir artış göstererek 4.090.167 ton değerine ulaşmıştır.

**Tablo 4. 3:** 2010 – 2019 yılları arasında Türkiye için toplam yük trafiği (bagaj + kargo + posta) verisindeki değişim.

	YÜK TRAFİĞİ (TON)	
	İç Hat	Dış Hat
2010	554.710	1.466.366
	<b>Toplam: 2.021.076</b>	
2011	617.835	1.631.639
	<b>Toplam: 2.249.474</b>	
2012	633.076	1.616.058
	<b>Toplam: 2.249.134</b>	
2013	744.028	1.851.289
	<b>Toplam: 2.595.317</b>	
2014	810.858	2.082.142
	<b>Toplam: 2.893.000</b>	
2015	871.327	2.201.504
	<b>Toplam: 3.072.831</b>	
2016	857.335	2.219.579
	<b>Toplam: 3.076.914</b>	
2017	884.811	2.596.400
	<b>Toplam: 3.481.211</b>	
2018	886.025	2.969.206
	<b>Toplam: 3.855.231</b>	
2019	833.768	3.256.399
	<b>Toplam: 4.090.167</b>	

Aşağıda verilmekte olan şekil-4.5 ile, Türkiye'ye ilişkin örnek olarak verilen yük taşımacılığı verileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Yük trafiğine ilişkin trend davranışı bu görsel ile daha net bir şekilde anlaşılmaktadır.

Buna göre; 10 yıllık süreç boyunca iç hat yük trafiğindeki yatay trend dikkat çekmektedir. Ancak dış hat yük trafiğinde görülen yukarı trend toplam yük trafiğini belirgin ölçüde etkilemiş ve bunun sonucunda 10 yıllık süreç boyunca toplam yük trafiğinde de artış eğilimi görülmüştür.



**Şekil 4. 5:** 2010 – 2019 yılları arasında Türkiye için toplam yük trafiği (bagaj + kargo + posta) verisindeki grafiksel değişim.

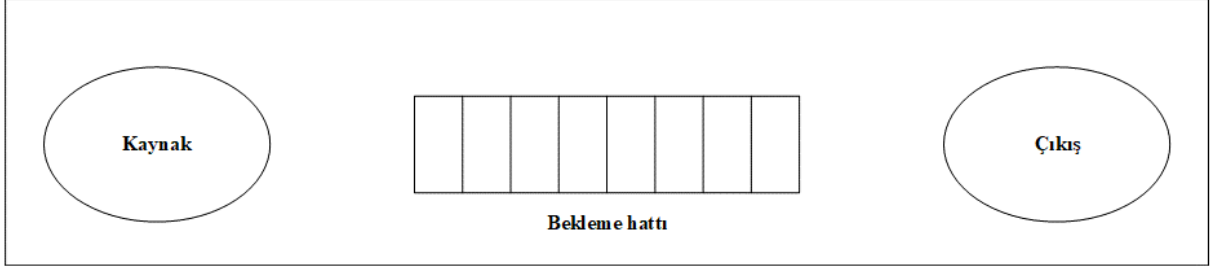
## 5. KUYRUK TEORİSİ

### 5.1 KUYRUK TEORİSİ NEDİR?

Bekleme hatları ya da daha genel bir ifade ile kuyruklar gündelik yaşamımızın pek çok noktasında tecrübe ettiğimiz bir durumdur. Örneğin; bir süpermarkette alışveriş yapmakta olan bir kişi ödeme esnasında kasada, bir bankada işlem yapan kişi banka gişesinde, havalimanında seyahat amacıyla bulunan bir diğer kişi ise güvenlik noktasında gecikmelere maruz kalabilmektedir. Benzer şekilde üretim aşamasıyla ilişkili olarak pek çok sahada nesnelere gecikmesi de söz konusu olabilmektedir. Örneğin; bir fabrikada üretim bandına getirilen araçların oluşturduğu kuyruk, üretim ile ilgili sürecin incelenmesini ve analizini gerektirecek bir süreç olabilmektedir. Bu benzeri birçok örnekte olduğu gibi başta zamanı ve kaynakları en iyi şekilde kullanma amacı olmak üzere, sistemin çalışmasını yoğunluğa göre tetkik etmek bir ihtiyaç haline gelmektedir [3].

Kuyruk teorisi ya da diğer bir adıyla bekleme hattı modelleri, insan hayatını doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen birçok sistemin çalışmasıyla ilişkili olarak ortaya çıkan beklemleri anlama, analiz etme ve dolayısıyla daha modern yaklaşımları entegre ederek iyileştirme amacıyla kullanılan matematik dalına ait bir çalışma sahasıdır. Bekleme hattı modelleri sistem ve talep arasındaki ilişkiyi ve kullanıcıların maruz kaldığı gecikmeleri araştıran operasyon yönetiminin bir alt bölümüdür. Kuyruk teorisi yaklaşımı; gerek üretim, gerekse servis alanında olsun pek çok sahada kullanılan yaygın bir durumdur [106].

Kuyruk modelleri, bekleme hatlarının tasarımı ve performans parametrelerinin değerlendirilmesinde güçlü bir bakış açısı sağlamaktadır. Bu amaçlarla simülasyon yöntemi kuyruk modellerinin incelenmesinde sıkça rastlanan bir metottür. Daha gerçekçi ve karmaşık sistemlerin analizinde benzetim (simülasyon) metodu tercih edilmektedir. Ancak daha temel bir bakış açısı ile oluşturulan matematiksel modeller ilgili kuyruk modelinin yapısını anlamamıza yardımcı olmaktadır. En basit bir kuyruk modelinin yapısı şekil-5.1 ile gösterilmektedir.



**Şekil 5. 1:** Temel bir kuyruk modelinin yapısı.

## 5.2 KUYRUK MODELLERİNİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ

Herhangi bir sisteme ait kuyruk modeli temel olarak; geliş popülasyonu (kaynak) ve hizmetin verildiği servis sürecinden oluşmaktadır. Geliş popülasyonu herhangi bir tesis ya da üniteye hizmet almak üzere gelen kişiler, makineler gibi unsurları ifade ederken, servis süreci ise bekleme hattının oluştuğu noktayı ifade etmektedir. Kuyruk modellerine örnek olabilecek farklı durumlar tablo-5.1 ile sunulmaktadır.

**Tablo 5. 1:** Kuyruk modellerine dair güncel hayatımızdan çeşitli örnekler.

SİSTEM	GELİŞ POPÜLASYONU	SERVİS SÜRECİ
Havalimanı	Uçaklar	Pist
Hastane	Hastalar	Hemşire
Yol ağı	Araçlar	Trafik Işıkları
Süpermarket Kasası	Müşteriler	Kasiyer
Banka	Müşteriler	Vezne
Fabrika	Teknolojik ürün	Üretim bandı

Tablo 5.1 üzerinde örneklendiği gibi çok farklı yapılarda kuyruk modelleri oluşabilecek olup bu modeller belli karakteristik özelliklere göre şekillenmektedir;

- Geliş popülasyonunun (hizmet almak için gelen potansiyel müşteriler) sonlu ya da sonsuz sayıda olduğu düşünülmektedir. Geliş oranı; hizmet gören ya da hizmet görmek için bekleyen müşteri sayısına bağlı ise sonlu, değil ise sonsuz olduğu varsayılır.
- Sistem kapasitesi (kuyruk modeli) kuyrukta bekleyen müşteri sayısındaki üst sınır olup, limitli ya da limitsiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Limitli kapasiteye sahip sistemlerde tam kapasiteye ulaşılmca yeni müşteri kabul edilmez.

- Sisteme gelişlerin tipi; rasgele ya da planlı olarak iki kısımdır. Rasgele gelişlerde gelişler arası süreler genellikle olasılık dağılımı olarak ifade edilmektedir. Planlı gelişlerde ise gelişler arası süreler standart olarak ifade edilmektedir.
- Varsayım olarak sistemde her zaman bir müşterinin olduğu düşünülür. Böylelikle sistemin beklemede (idle pozisyonu) olmadığı kabul edilir (bir üretim bandında gerekli ham maddenin her zaman hazır bulunması örneğinde olduğu gibi).
- Kuyrukta gelen müşterilerin davranışı üç tipte olabilmektedir;

Balk: Bekleme hattı çok uzunsa ayrılır.

Reneg: Kuyruk çok yavaş ilerlediğinde ayrılır.

Jockey: Kuyrukta bir hattan daha kısa olana geçiş yapabilir

- Kuyrukta gelenlerin mantıksal dizilimi, kuyruk disiplini olarak ifade edilir. Kuyruk disiplini, gelişlerin hizmet alması ile ilgili sıralama kriterlerini ifade etmektedir.  
FIFO (first in first out): İlk gelene ilk hizmet prensibi  
LIFO (last in first out): Son gelene ilk hizmet prensibi  
SIRO (service in random order): Rastgele seçim prensibi  
SPT (shortest processing time first): Hizmet süresi en kısa olana ilk hizmet prensibi  
PR (service according to priority): Önceliklendirme prensibi
- Ardışık gelişler arasında servis süresi sabit ya da rastgele olabilmektedir. Rastgele gelişlerde gelişler arası dağılım; exponansiyel, gamma, lognormal gibi türlere ayrılmaktadır [107].

### 5.3. KENDAL NOTASYONU

Kendall notasyonu; 1953 yılında D. G. Kendall tarafından tanımlanan ve bir kuyruk modelinde gelişlerin pateni, servis zamanı ve kanalların sayısını tanımlamada yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Bu notasyona kuyruk modelleri için geliştirilen yazılımlarda sıkça rastlanmaktadır. Kendall notasyonunda verilen en temel üç faktör sıralı olarak; geliş dağılımı/servis zamanı dağılımı/açık olan kanal sayısı şeklindedir.

Kendall notasyonu A/B/C/D/E/F şeklinde uzunca tanımlanabilecek olan tipik bir kuyruk modelini kısaca ifade etmek için kullanılmaktadır. Burada ifade edilen karakterler ise aşağıdaki özellikleri tanımlamada kullanılmaktadır.

**A:** gelişler arası dağılım

**B:** servis zamanı dağılımı

**C:** paralel kanal sayısı

**D:** kuyruk disiplini

**E:** sistem kapasitesi

**F:** popülasyon büyüklüğü

Kendall notasyonunda A ile B yerine kullanılabilir yaygın ifadeler ise; M (üstel), D (sabit ya da deterministik),  $E_k$  (Erlang) ve G (genel)

Örneğin; M/M/3 şeklinde ifade edilen bir kendall notasyonuna göre, bu kuyruk modelinde gelişler Poisson dağılımına (dolayısıyla gelişler arası süre üstel dağılıma) uyarken, servis zamanı da üstel (servis oranı ise Poisson) dağılıma uymaktadır. Sistemde aynı servis oranıyla aktif 3 kanal bulunmaktadır [108].

### 5.3.1. Poisson Dağılımı

Bir zaman aralığı içinde bir olayın belirli sayıda olma olasılığı ile ilgilenen sonlu bir olasılık dağılımıdır. Olayların ortalama gerçekleşme sayısı biliniyorsa poisson dağılımına dayanarak bu olaylarla ilgili çıkarım yapılabilir. Örneğin; bir turnikeden geçen insan sayısı, dükkana gelen insan sayısı, bir çağrı merkezinin aranma sayısı gibi [5].

### 5.3.2. Üstel dağılım

Meydana gelen iki olay arasında geçen süre veya ilgili olayın ilk defa ortaya çıkması için geçen sürenin dağılışıdır. Bir banka veznesi işlemleri arasında geçen süre, bir hastanenin acil servisine gelen hastalar arasında geçen süre gibi.

Poisson ve üstel dağılım arasındaki ilişkiye daha net bir örnek verecek olursak; belirli bir zaman aralığında bir mağazaya gelen müşteri sayısının dağılışı poisson dağılımına uygundur. Bu durumda, müşterilerin mağazaya varış zamanları arasında geçen sürenin dağılımı üstel dağılıma uyar [109].

Geride ifade edilen karakteristik özelliklere göre şekillenen, çok farklı yapılarda kuyruk modelleri ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ise incelenen konuya uygun olarak tek kanallı tek



fazlı M/M/1 ile çok kanallı tek fazlı M/M/s kuyruk modellerinin matematiksel yapısı incelenecektir.

#### 5.4 M/M/1 KUYRUK MODELİ

M/M/1 kuyruk modeli poisson gelişleri ve üstel servis süresine uyan bir kuyruk modelidir. Tek kanallı bir yapıya sahip olan M/M/1 kuyruk modeli için pratikte kullanılmakta olan en basit bir yapıya sahip model olduğu söylenebilir. Bu modele göre,  $\lambda$  oranındaki gelişler Poisson dağılıma uymaktadır.

Matematiksel ifade ile ise belli bir  $(0,t]$  zaman aralığında sisteme gelen  $N(T)$  adedindeki müşterinin (gelişler) Poisson dağılımına uyduğu düşünülür. Bu durumda gelişler arası süre  $[A(x)$  olasılık yoğunluk fonksiyonu] ise üstel dağılıma uymaktadır.

$$P[N(t) = j] = e^{-\lambda t} \frac{\lambda t^j}{j!} \quad j = 0,1,2, \dots \quad (5.4.1)$$

$$A(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad x > 0 \quad (5.4.2)$$

Varsayım olarak servis zamanının da olarak üstel dağılıma uyduğunu ele alırsak;

$$B(x) = \mu e^{-\mu x} \quad x > 0 \quad (5.4.3)$$

Bu varsayımlarla birlikte aşağıdaki iki ifade elde edilmektedir;

$$E(\text{varışlar arası süre}) = \frac{1}{\text{geliş oranı}} = \frac{1}{\lambda} \quad (5.4.4)$$

$$E(\text{servis süresi}) = \frac{1}{\text{servis oranı}} = \frac{1}{\mu} \quad (5.4.5)$$

Kuyruk teorisinde geliş oranı ile servis oranı arasındaki ilişki önemli bir performans parametresi görevi görmektedir. Buna göre trafik yoğunluğu (ya da sistemin kullanım oranı) aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\rho = \text{traffic yoğunluğu} = \frac{\text{geliş oranı}}{\text{servis oranı}}$$

Buna göre M/M/1 kuyruk modeli için yoğunluk parametresi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\rho(\text{trafik yoğunluğu}) = \lambda \mu \quad (5.4.6)$$

M/M/1 kuyruk modeli genel doğum ve ölüm metodunun (general birth and death model) özel bir türü olduğu söylenebilir. Bu metoda göre  $n$  popülasyona sahip bir model için gelişler (birth) ve çıkışlar (death) için matematiksel bir modelleme yapmak mümkündür. Gelişlerin Poisson ve servis zamanının üstel olduğu durum için  $[t, t + \Delta t]$  sürecinde olasılıksal modelleme yapılmaktadır.

'Birth and death' metodunda  $\lambda_n \rightarrow \lambda$  ve  $\mu_n \rightarrow \mu$  ifadeleri jeneratör matriste yerine yazılırsa;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & & & \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & & & \\ & \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & & \\ & & \mu & -(\lambda + \mu) & \ddots & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5.4.7)$$

Buna göre  $P_n(t)$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) için ilgili Kolmogorov eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$P'_n(t) = -(\lambda + \mu) P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + \mu P_{n+1}(t) \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.4.8)$$

Bu denklemlerin çözüm kümesi karmaşık ve uzun olması itibariyle bu çalışmada yer verilmemiştir. Bununla ilgili detaylı çözüm Fundamentals of Queueing Theory (Donald Gross ve Carl M. Harris – 1985) adlı çalışmada yer verilmiştir.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t) = P(n) \quad (5.4.9)$$

Üstte (5.4.9) ile verilen limitten aşağıdaki sabit durum eşitlikleri elde edilir.

$$\lambda_0 p_0 = \mu_1 p_1$$

$$(\lambda_n + \mu_n) p_n = \lambda_{n-1} p_{n-1} + \mu_{n+1} p_{n+1} \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.4.10)$$

Ayrıca rastsal ifadelerin toplamının 1'e eşit olduğu bilinmektedir.

$$\sum_0^{\infty} p(n) = 1 \quad (5.4.11)$$

Buna göre (5.10) ve (5.11) çözümü olarak aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$p_n = (1 - p)p^n \quad n = 0,1,2$$

$$p = \frac{\lambda}{\mu} < 1 \quad (5.4.12)$$

Yukarıdaki (5.4.12) ifadesinin çözümü için  $p$  değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir. Elde edilen ifadelerden sistemin performans parametrelerine ulaşılabilir. Dolayısıyla,  $\rho$  ifadesi trafik yoğunluğu olduğuna göre sistemin kullanım faktörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{kullanım faktörü} = \rho = 1 - p_0 \quad (5.4.13)$$

$$Q(t) \rightarrow \text{sistemdeki tüm müşteri sayısı}$$

$$Q_q \rightarrow \text{kuyruktaki müşteri adedi ve } Q(\infty) = Q \quad (5.4.14)$$

Sistemde 1 müşterinin hizmet almakta olduğu düşünülürse (5.4.14) deki ifadeler yazılabilir. Ayrıca, (5.12) kullanılarak  $L = E(Q)$  ve  $L_q = E(Q_q)$  ortalama değerleri (kuyruk uzunluğu) elde edilir.

$$L = \sum_{n=1}^{\infty} n(1 - p)p^n = \frac{p}{1 - p}$$

ya da

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (5.4.15)$$

Kuyruk uzunluğu ise ( $L_q$  ifadesi) ise aşağıdaki gibi elde edilir;

$$L_q = \sum_{n=1}^{\infty} (n - 1) p_n$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=1}^{\infty} n p_n - \sum_{n=1}^{\infty} p_n \\
&= L - p = \frac{p^2}{1-p} \\
&= \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}
\end{aligned} \tag{5.4.16}$$

Sistem kullanım faktörü ( $\rho$ ) denge durumunda sistemin yoğun olma olasılığını ifade etmekte ve sistem içerisinde beklenen adedi vermektedir. Bu çıkarıma göre (5.4.16) denklemini aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz.

$$E(\text{sistemdeki adet}) = E(\text{bekleyen adet}) + E(\text{servis sunulan adet})$$

Ayrıca (5.12) ile verilen ifadelerden sistemdeki müşterilerin varyansı elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
V(Q) &= \frac{\rho}{(1-\rho)^2} \\
&= \frac{\lambda \mu}{(\mu - \lambda)^2}
\end{aligned} \tag{5.4.17}$$

Müşteri tarafından bakılacak olursa kuyrukta harcanan sürenin iki önemli karakteristik özelliği bulunmaktadır. Sistem denge durumunda iken; bir müşterinin kuyrukta harcadığı zaman  $T_q$ , sistemde harcadığı zaman ise  $T$  olsun. Sistemin ise ilk gelene ilk hizmet prensibi (FCFS) ile çalıştığını kabul edelim.

FCFS kuyruk disiplinde, bir müşterinin hizmet için bekleme süresi ( $T_q$ ), o anda sistemde olan müşterilerin toplam hizmet süresine eşittir. Sistemdeki toplam süre;

$$T(\text{sistemdeki toplam süre}) = T_q + \text{servis süresi}$$

Sistemde  $n$  adet müşteri olduğunu düşünecek olursak; servis süresi  $\mu$  parametresine bağlı üstel bir ifade olduğu için,  $n$  adet müşterinin servis süresi Erlang olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilebilir;

$$f_n(x) = e^{-\mu x} \frac{\mu^n x^{n-1}}{(n-1)!} \tag{5.4.18}$$

Kuyrukta bekleme süresine ( $T_q$ ) ait olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$F_q(t) = P(T_q \leq t)$$

$$F_q(0) = P(T_q = 0) = P(Q = 0) = 1 - \rho \quad (5.4.19)$$

Hizmet görmekte olan müşterinin kalan servis süresi de üstel dağılıma sahiptir.

$$dF_q(t) = P(T < T_q \leq t + dt) \quad t > 0$$

$$dF_q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n e^{-\mu t} \frac{\mu^n t^{n-1}}{(n-1)!} dt$$

$$= (1 - \rho) \sum_{n=1}^{\infty} \rho^n e^{-\mu t} \frac{\mu^n t^{n-1}}{(n-1)!} dt$$

$$= \lambda (1 - \rho) e^{-\mu(1-\rho)t} dt \quad (5.4.20)$$

$T_q$  'nun dağılımında sıfırda süreksizlik olduğu için aşağıdaki ifade yazılabilir. Buna göre;

$E(T_q) = W_q$  ve  $E(T) = W$  olsun.

$$W_q = E(T_q) = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}$$

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (5.4.21)$$

$$V(T_q) = \frac{\rho(2-\rho)}{\mu^2(1-\rho)^2} \quad (5.4.22)$$

Sistemdeki toplam sürenin  $T$  'nin,  $T_q$  değerlerinin tümü ile servis süresi toplamı olduğunu biliyoruz. O halde;

$$W = E(T)$$

$$= \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} + \frac{1}{\mu} \quad (5.4.23)$$

Yukarıda detaylı olarak açıklandığı üzere sistem denge durumunda iken kuyruk modeline ilişkin sistem parametreleri elde edilebilmektedir. Herhangi bir kuyruk modelinde denge durumunda iken varış ve çıkışlara yönelik performans parametreleri kullanılarak ilgili sistemin davranışını detaylı olarak incelemek mümkün olmaktadır [110].

### 5.5. M/M/s KUYRUK MODELİ

Poisson gelişleri ve üstel servis süresine sahip olan kuyruk sistemlerinde, kanal sayısının birden fazla olduğu durumlarda M/M/s kuyruk modeli ortaya çıkmaktadır. M/M/s kuyruk modellerine; banka kuyukları, havalimanı bilet gişeleri, çoklu üretim hattının bulunduğu fabrikalar gibi alanlarda rastlanmaktadır.

Bu modelde;  $\lambda$  oranındaki gelişler poisson dağılımına uyarken, servis süresinin ise üstel olduğu kabul edilir. Ayrıca  $s$  adet kanalın birbirinden bağımsız olduğu düşünülür. M/M/s kuyruk modeli de 'birth and death' (doğum ve ölüm) modeline uygun olarak M/M/1 Kuyruk modelinden türetilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \lambda_n &= \lambda & n &= 0,1,2 \dots \\
 \mu_n &= n \mu & n &= 1,2 \dots, s-1 \\
 &= s\mu & n &= s, s+1 \dots
 \end{aligned} \tag{5.5.1}$$

$$A = \begin{bmatrix}
 -\lambda & \lambda & & & \\
 \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & & \\
 & 2\mu & -(\lambda + 2\mu) & \lambda & \\
 & & & \lambda & \\
 & & & s\mu & -(\lambda + s\mu)
 \end{bmatrix} \tag{5.5.2}$$

Jeneratör matriste ilgili Kolmogorov eşitlikleri yazılırsa;

$$\begin{aligned}
 \lambda p_0 &= \mu p_1 \\
 (\lambda + n\mu)p_n &= \lambda p_{n-1} + (n+1)\mu p_{n+1} \quad 0 < n < \infty
 \end{aligned}$$

$$(\lambda + s\mu)p_n = \lambda p_{n-1} + s\mu p_{n+1} \quad s \leq n < \infty \quad (5.5.3)$$

$$n\mu p_n = \lambda p_{n-1} \quad n = 1, 2, \dots, s$$

$$s\mu p_n = \lambda p_{n-1} \quad n = s + 1, s + 2, \dots \quad (5.5.4)$$

$$\mu_n p_n = \lambda_{n-1} p_{n-1} \quad (5.5.5)$$

Yukarıda (5.5.4) ve (5.5.5) ile verilen denklemler kullanılarak (5.5.6) elde edilir.

$$p_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n p_0 \quad 0 \leq n \leq s$$

$$p_{s+n} = \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)^n p_s \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$p_n = \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)^{n-s} p_s \quad n = s, s + 1, \dots \quad (5.5.6)$$

Yukarıdaki ifadelerde  $\frac{\lambda}{s\mu} = \rho$  yazarak kısaltma yapılabilir.

$$p_n = \frac{1}{n!} (s\rho)^n p_0 \quad 0 \leq n < s$$

$$= \frac{1}{s!} (s\rho)^s p^{n-s} \quad s \leq n < \infty \quad (5.5.7)$$

Daha önce ifade edildiği üzere  $\sum_0^\infty p_n = 1$  koşulu kullanılarak işlemlere devam edilirse;

$$p_0 = \left[ \sum_{r=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^r}{r!} + \frac{(s\rho)^s}{s!(1-\rho)} \right]^{-1}$$

$$p_n = \frac{(s\rho)^n}{n!} p_0 \quad 0 \leq n < s$$

$$= \frac{s^n \rho^n}{s!} p_0 \quad s \leq n < \infty \quad (5.5.8)$$

$s\mu$  maksimum servis oranı ve  $\rho$  ise trafik yoğunluğu olmak üzere;

$$\frac{\lambda}{s\mu} = \rho < 1 \quad (5.5.9)$$

$$p_n = p^{n-s} p_s \quad n \geq s \quad (5.5.10)$$

Sistemdeki müşteri sayısı  $s$  kanal sayısından daha az sayıda ise bu sistem servis oranı  $s\mu$  olacak M/M/1 davranışı sergilemektedir.  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$  ve  $\frac{\alpha}{s} = \rho$  yazılarak (5.5.10) denklemi aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} p_0 &= \left[ \sum_{r=0}^{s-1} \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s!} \left(1 - \frac{\alpha}{s}\right)^{-1} \right]^{-1} \\ p_n &= \frac{\alpha^n}{n!} p_0 \quad 0 \leq n < s \\ &= \frac{\alpha^s}{s!} \left(\frac{\alpha}{s}\right)^{n-s} p_0 \quad s \leq n < \infty \end{aligned} \quad (5.5.11)$$

Yukarıda (5.5.8) ile verilen eşitlikler kullanılarak  $L$  ve  $L_q$  değerleri elde edilir.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} npn &= p_0 \left[ \sum_{n=1}^s n \frac{\alpha^n}{n!} + \sum_{n=s+1}^{\infty} n \rho^{n-s} \frac{\alpha^s}{s!} \right] \\ &= \left[ \alpha \sum_{n=1}^{s-1} \frac{\alpha^{n-1}}{(n-1)!} + \frac{\alpha^s}{s!} \sum_{n=s+1}^{\infty} n \rho^{n-s} \right] \\ &= p_0 \left[ \sum_{r=0}^{s-1} \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s!} \sum_{r=1}^{\infty} (r+s) \rho^r \right] \\ &= p_0 \left[ \alpha \sum_{r=0}^{s-1} \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s!} \left( \frac{\rho}{(1-\rho)^2} \right) + \frac{s\rho}{1-\rho} \right] \\ &= \frac{\rho \alpha^s p_0}{s! (1-\rho)^2} + \alpha p_0 \left[ \sum_{r=0}^{s-1} \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s! (1-\rho)} \right] \end{aligned}$$



Son eşitlikte köşeli parantez içerisindeki ifade  $p_0^{-1}$  'e eşittir. Dolayısıyla denklem düzenlenecek olursa;

$$L = \alpha + \frac{\rho \alpha^s p_0}{s! (1 - \rho)^2}$$

$$L = \alpha + \frac{\rho p_s}{(1 - \rho)^2} \quad (5.5.12)$$

$L_q$  kuyruk uzunluğunu ise aşağıdaki adımları takip ederek elde edebiliriz.

$$L_q = \sum_{n=s+1}^{\infty} (n - s) \frac{\alpha^s}{s!} p^{n-s} p_0$$

$$= p_0 \frac{\alpha^s}{s!} \sum_{n=s+1}^{\infty} (n - s) p^{n-s}$$

$$= p_0 \frac{\alpha^s}{s!} \sum_{r=1}^{\infty} r p^r$$

$$= \frac{\rho \alpha^s p_0}{s! (1 - p)^2}$$

$$= \frac{\rho p_s}{(1 - \rho)^2} \quad (5.5.13)$$

Bekleme süresi analizinde M/M/1 kuyruk modelinde de olduğu gibi FCFS (ilk gelene ilk hizmet) prensibi dikkate alınmaktadır. Sistemdeki müşteri sayısı kanal sayısı  $s$  'ten büyük olduğu durumda gelişler arası süre üstel olmaktadır. Müşterinin bekleme süresi  $T_q$  olmak üzere;

$$F_q(t) = P[T_q \leq t] \text{ ve } t \rightarrow \infty$$

$$F_q(0) = P[T_q = 0] = P(Q < s)$$

$$= \sum_{n=0}^{s-1} p_n$$

$$= p_0 \sum_{n=0}^{s-1} \frac{\alpha^n}{n!}$$

(5.5.11) ile verilen denklemlerden ilk ifade düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\alpha^n}{n!} = \frac{1}{p_0} - \frac{\alpha^s}{s!} \frac{1}{1-\rho}$$

Bu ifade yerine yazılırsa  $F_q(0)$  değeri aşağıdaki gibi bulunur;

$$F_q(0) = 1 - \frac{\alpha^s p_0}{s! (1-\rho)} \quad (5.5.14)$$

Ayrıca M/M/1 kuyruk modeli ile ilgili olarak (5.4.20) ile verilen argümanlar takip edilecek olursa;

$$\begin{aligned} dF_q(t) &= \sum_{n=s}^{\infty} p_n e^{-s\mu t} \frac{(s\mu t)^{n-s}}{n-s!} s\mu dt \\ &= p_s e^{-s\mu t} \sum_{n=s}^{\infty} \rho^{n-s} \frac{(s\mu t)^{n-s}}{(n-s)!} s\mu dt \\ &= s\mu p_s e^{-s\mu(1-\rho)t} dt \\ &= \frac{s\mu \alpha^s}{s!} p_0 e^{-s\mu(1-\rho)t} dt \end{aligned} \quad (5.5.15)$$

$$\begin{aligned} W_q &= \int_0^{\infty} t dF_q(t) \\ &= \int_0^{\infty} s\mu p_s t e^{-s\mu(1-\rho)t} dt \\ &= \frac{p_s}{s\mu(1-\rho)^2} \end{aligned} \quad (5.5.16)$$

$p_s$  yerine  $p_0$  ile verilen ifade yazılacak olursa;

$$W_q = \frac{\alpha^s p_0}{s! s \mu (1 - \rho)^2} \quad (5.5.16)$$

Kuyruk modelleri ile ilgili formülasyonlar farklı performans modellerini de içerecek şekilde çoğaltılabilmektedir. Ancak geride geçen ifadeler bu çalışmada kullanılacak parametreleri içermektedir. Aşağıda verilmekte olan tablo-5.2 ile M/M/1 ve M/M/s kuyruk modellerine ilişkin kullanılacak performans parametreleri özetlenmiştir [110].

**Tablo 5. 2:** Bu çalışmada kuyruk modeli performans parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak formülasyonların özeti.

Parametre	M/M/1	M/M/s
Pist kullanım oranı	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	$\rho = \frac{\lambda}{s\mu}$
Kalkış için bekleyen muhtemel uçak sayısı	$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$	$L_q = \frac{\rho \alpha^s p_0}{s! (1 - \rho)^2}$ $p_0 = \left[ \sum_{r=0}^{1} \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s! (1 - \rho)} \right]^{-1}$ $\alpha = s\rho$
Muhtemel bekleme süresi	$E(W_q) = \frac{\lambda}{\mu (\mu - \lambda)}$	$E(W_q) = \frac{\alpha^s p_0}{s! s \mu (1 - \rho)^2}$
Kalkış için bekleme olmama olasılığı	$P(T_q = 0) = 1 - \rho$	$F_q(0) = 1 - \frac{\alpha^s p_0}{s! (1 - \rho)}$
Kalkış için belli sürelerde bekleme olasılıkları	$P(T_q > t) = \rho e^{-\mu(1-\rho)t}$	$P(T_q > t) = \frac{\alpha^s p_0}{s! (1 - \rho)} e^{-s\mu(1-\rho)t}$

## 6. MATEMATİKSEL MODEL ANALİZİ

### 6.1 TEMEL VERİLER

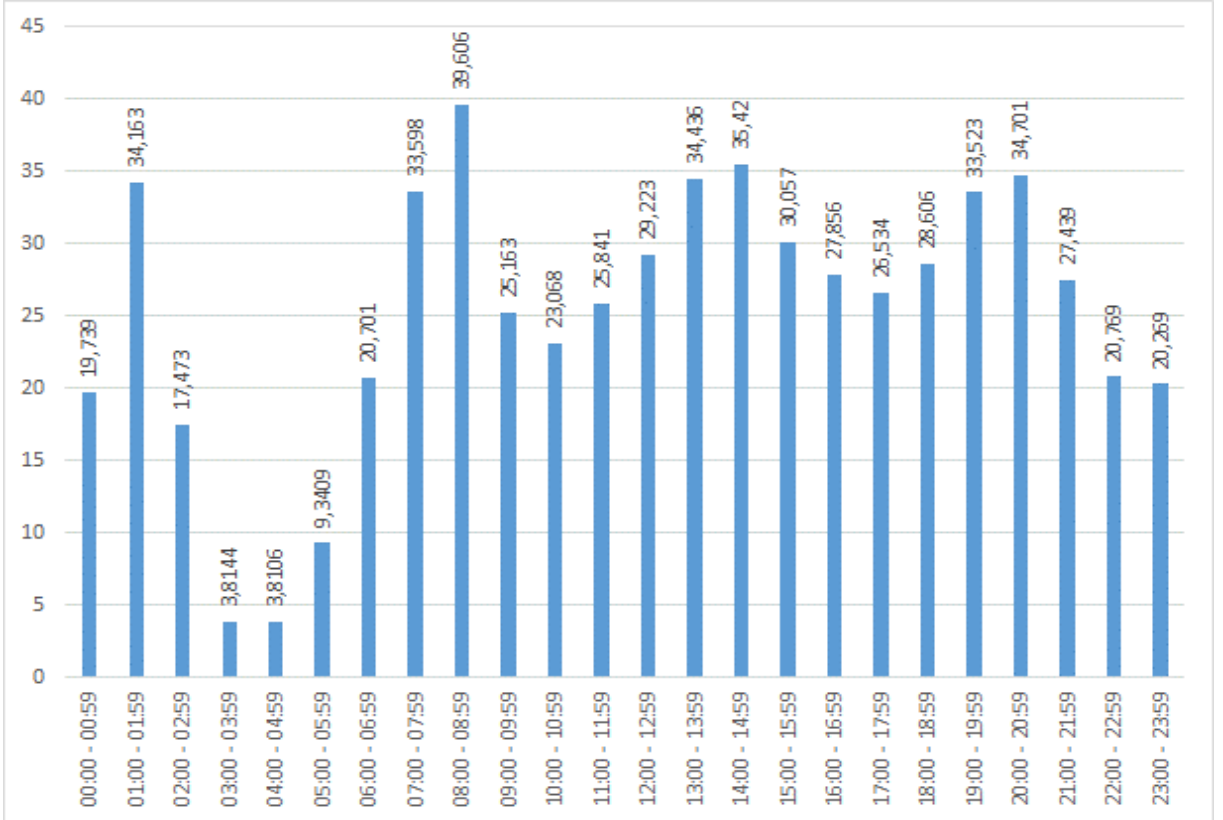
Bekleme hattı modelleri birçok sistemin çalışmasını incelemek ve analiz etmek üzere yaygınca kullanılmaktadır. Bilindiği üzere günlük trafik sayısı yüksek olan (özellikle 1000'in üzerindeki majör havalimanları için) havalimanlarında gerek push-back, gerek taksi hareketi, gerekse pist başındaki beklemler oldukça uzun sürebilmektedir. Özellikle trafik yoğunluğunun yüksek olduğu belli saat dilimlerinde uzun uçak kalkış kuyukları görülebilmektedir. Bu durumun sonucu olarak hava trafik üniteleri tarafından yapılan planlamalar önemli ölçüde gecikmelere uğrarken, öncelikle zaman ve yakıt tüketimi noktasında olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Benzer şekilde zaman kayıpları ve ilave yakıt tüketiminin oluşturduğu çevresel bir etki olarak da emisyonların arttığı görülmektedir. Bu nedenle, hem zamanı en iyi şekilde planlamak hem de çevresel etkiyi en aza indirmek amacıyla mevcut işleyişin en iyi şekilde analiz edilmesi, ortaya çıkan ihtiyaçlara bağlı olarak uygun metotların tespit edilmesi ve sistemlere uyarlanması gerekmektedir.

Çalışmanın bu kısmında İstanbul Havalimanı için pist başı beklemlerinden kaynaklı gecikmeler kuyruk modeli kullanılarak analiz edilmiştir. İstanbul Havalimanı resmi olarak 29 Ekim 2018 tarihinde hizmete girmekle beraber, Atatürk Havalimanı bünyesindeki uçak operasyonlarının İstanbul Havalimanına kaydırılması daha uzun zaman almıştır. Bununla birlikte 2020 yılı itibariyle dünya genelinde yaşanan Covid-19 salgını uçak operasyonlarını olumsuz yönde etkilemiş ve günlük trafik verilerinde ciddi oranlarda düşüşlere neden olmuştur. Dolayısıyla sonuçların gerçeğe daha yakın olması amacıyla havalimanının normal kapasitesi dahilinde çalıştığı dönem baz alınarak 9 aylık gerçek trafik verisi kullanılmıştır. Seçilen trafik verisinin hangi kuyruk modeline uyduğunu tespit etmek üzere istatistiksel paket program olarak EasyFit 5.6 Professional ve Statistica programlarından yararlanılmıştır.

Hava trafik operasyonları için yapılacak planlamalar ve analizler yaygın olarak saatlik dilimler halinde işleme tabi tutulmaktadır. Bu nedenle, çalışmanın kapsamında seçilen 9 aylık veri saatlik dilimler halinde ve her gün için 24 adet olmak üzere detaylandırılmıştır. Kullanılan paket program aracılığı ile kullanılacak verilerin istatistiksel dağılımı kontrol edilmiş, saatlik verilerin Poisson dağılıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Buna göre her bir saat dilimi için tespit edilen tek bir lambda ( $\lambda$ : geliş oranı) değeri tablo halinde sunulmakta olup, ayrıca saatlik ortalama trafik verisinin grafiksel değişimi de gösterilmektedir.

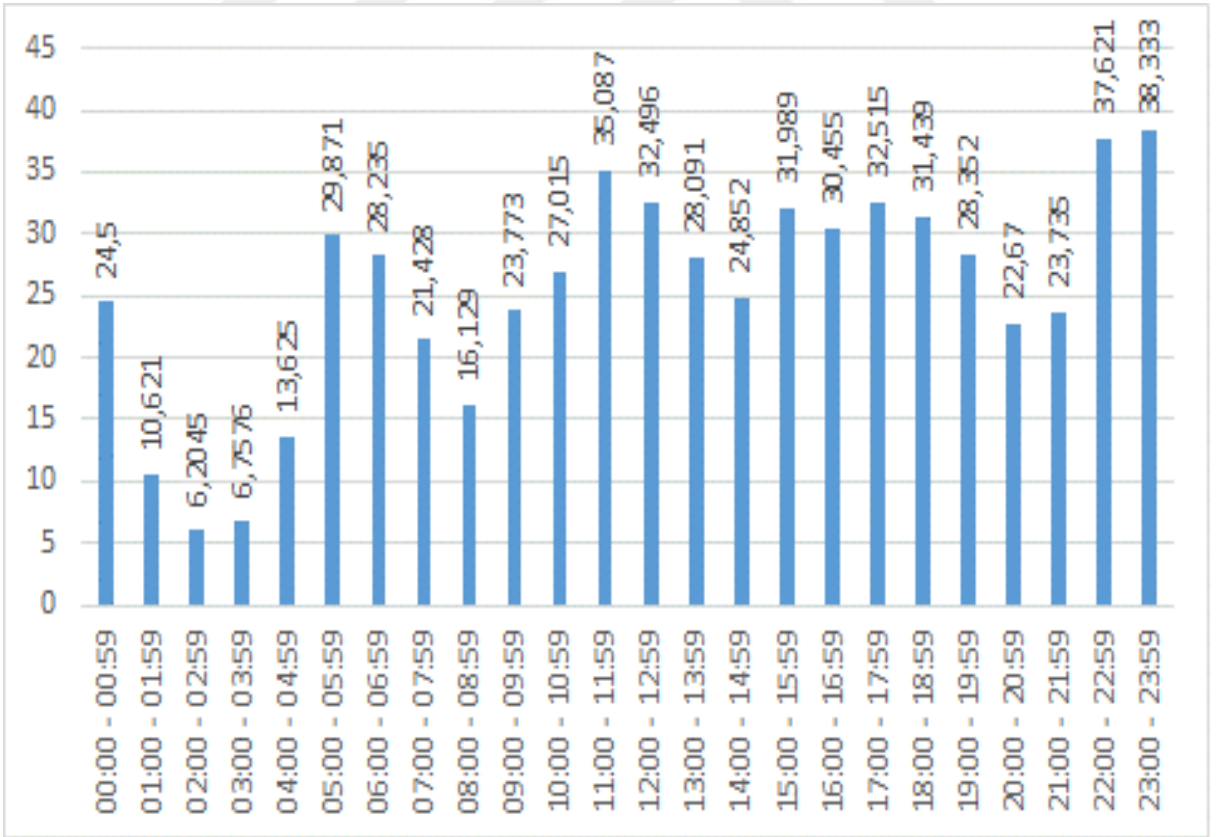
**Tablo 6. 1:** Farklı saat aralıkları için tespit edilen uçak kalkış verisi.

SAAT ARALIĞI	GELİŞ ORANI ( $\lambda$ )	SAAT ARALIĞI	GELİŞ ORANI ( $\lambda$ )
00:00 - 00:59	19,739	12:00 - 12:59	29,223
01:00 - 01:59	34,163	13:00 - 13:59	34,436
02:00 - 02:59	17,473	14:00 - 14:59	35,42
03:00 - 03:59	3,8144	15:00 - 15:59	30,057
04:00 - 04:59	3,8106	16:00 - 16:59	27,856
05:00 - 05:59	9,3409	17:00 - 17:59	26,534
06:00 - 06:59	20,701	18:00 - 18:59	28,606
07:00 - 07:59	33,598	19:00 - 19:59	33,523
08:00 - 08:59	39,606	20:00 - 20:59	34,701
09:00 - 09:59	25,163	21:00 - 21:59	27,439
10:00 - 10:59	23,068	22:00 - 22:59	20,769
11:00 - 11:59	25,841	23:00 - 23:59	20,269

**Şekil 6. 1:** Saatlik uçak kalkış verisinin grafiksel değişimi.

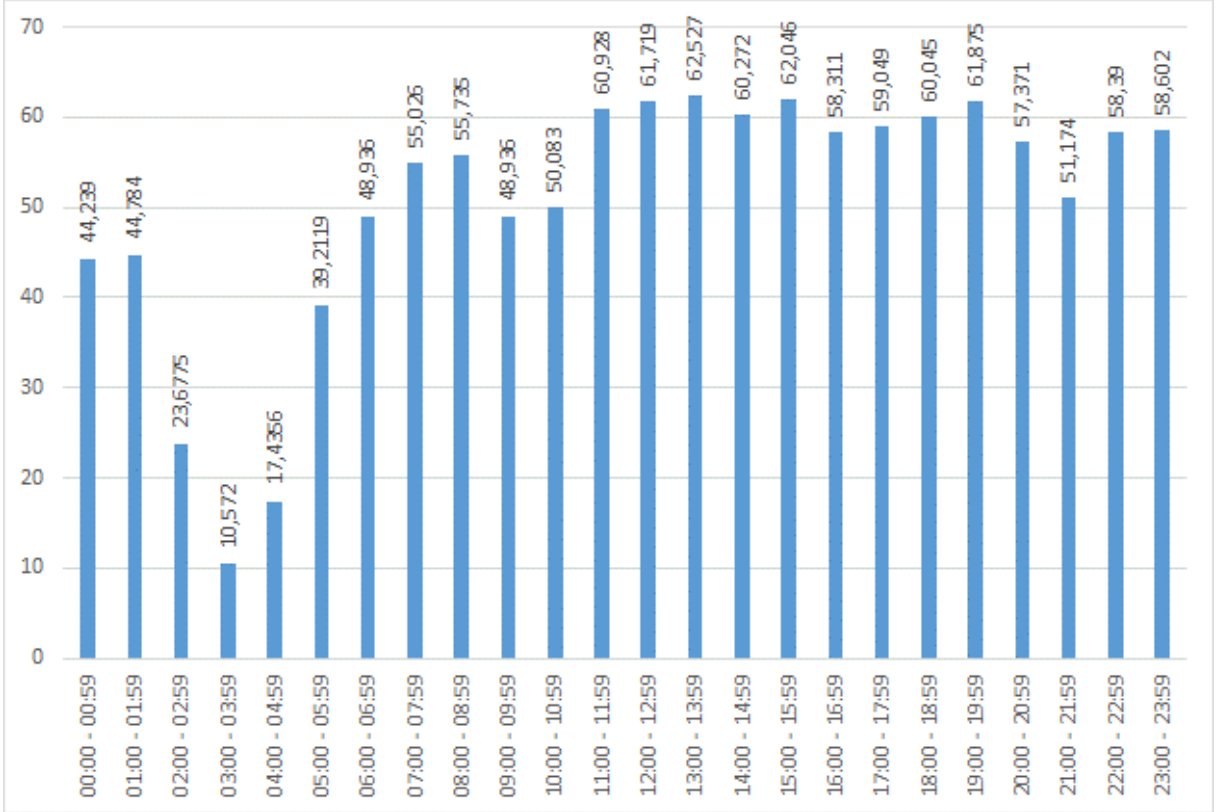
**Tablo 6. 2:** Farklı saat aralıkları için tespit edilen uçak iniş verisi.

SAAT ARALIĞI	GELİŞ ORANI ( $\lambda$ )	SAAT ARALIĞI	GELİŞ ORANI ( $\lambda$ )
00:00 - 00:59	24,5	12:00 - 12:59	32,496
01:00 - 01:59	10,621	13:00 - 13:59	28,091
02:00 - 02:59	6,2045	14:00 - 14:59	24,852
03:00 - 03:59	6,7576	15:00 - 15:59	31,989
04:00 - 04:59	13,625	16:00 - 16:59	30,455
05:00 - 05:59	29,871	17:00 - 17:59	32,515
06:00 - 06:59	28,235	18:00 - 18:59	31,439
07:00 - 07:59	21,428	19:00 - 19:59	28,352
08:00 - 08:59	16,129	20:00 - 20:59	22,67
09:00 - 09:59	23,773	21:00 - 21:59	23,735
10:00 - 10:59	27,015	22:00 - 22:59	37,621
11:00 - 11:59	35,087	23:00 - 23:59	38,333

**Şekil 6. 2:** Saatlik uçak iniş verisinin grafiksel değişimi.

**Tablo 6. 3:** Farklı saat aralıkları için tespit edilen toplam iniş ve kalkış trafik verisi.

SAAT ARALIĞI	GELİŞ ORANI ( $\lambda$ )	SAAT ARALIĞI	GELİŞ ORANI ( $\lambda$ )
00:00 - 00:59	44,239	12:00 - 12:59	61,719
01:00 - 01:59	44,784	13:00 - 13:59	62,527
02:00 - 02:59	23,6775	14:00 - 14:59	60,272
03:00 - 03:59	10,572	15:00 - 15:59	62,046
04:00 - 04:59	17,4356	16:00 - 16:59	58,311
05:00 - 05:59	39,2119	17:00 - 17:59	59,049
06:00 - 06:59	48,936	18:00 - 18:59	60,045
07:00 - 07:59	55,026	19:00 - 19:59	61,875
08:00 - 08:59	55,735	20:00 - 20:59	57,371
09:00 - 09:59	48,936	21:00 - 21:59	51,174
10:00 - 10:59	50,083	22:00 - 22:59	58,39
11:00 - 11:59	60,928	23:00 - 23:59	58,602

**Şekil 6. 3:** Saatlik toplam uçak (iniş + kalkış) verisinin grafiksel değişimi.

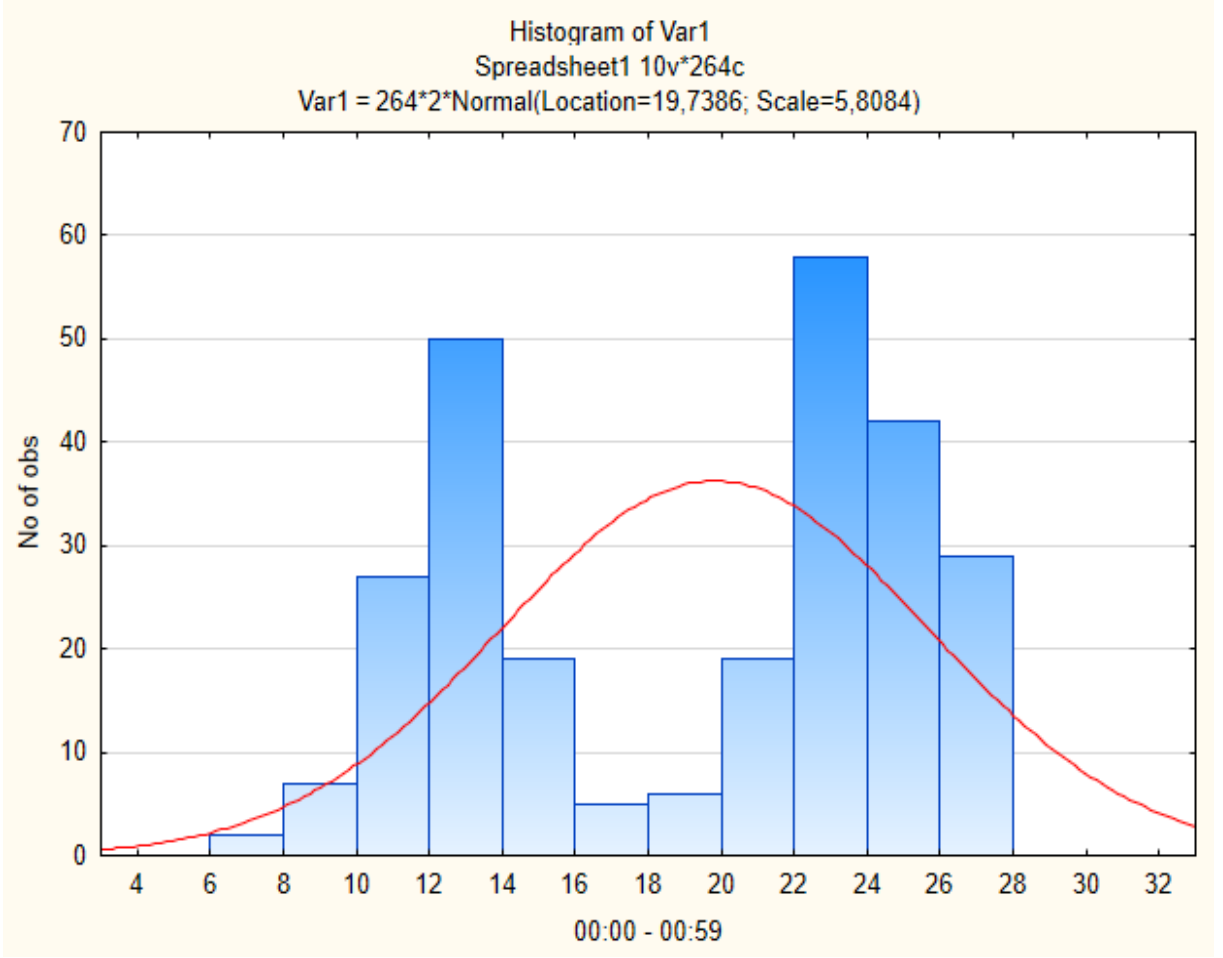
İstanbul Havalimanı hava trafik operasyonları açısından incelendiğinde paralel 5 pist ile hizmet sunmaktadır. Ancak, çevresel koşullar, pist üzeri bakım ve inşaat çalışmaları ve sair diğer hava trafik kısıtlamaları nedeniyle aktif pist kullanımları zamana göre değişkenlik gösterebilmektedir. Operasyonel olarak tüm pistler kalkış amaçlı olarak kullanılabilir iken, iniş amaçlı olarak ise ILS (aletli iniş sistemi) tesis edilen üç farklı pist kullanılabilir. Bununla beraber 34L/R, 35L/R pistleri kendi içlerinde bağımlı paralel pistler olup aynı anda sadece bir pistin kullanımı mümkün olmaktadır. Örneğin; 35L pisti kalkış amaçlı kullanılırken, 35R pisti ise bağımlı olarak iniş ya da kalkış amaçlı kullanılabilir. Dolayısıyla 35 L/R pistleri aynı anda sadece iniş ya da sadece kalkış yapılabilecek şekilde bağımlı pistler olup, tek bir pist hükmündedir. Farklı olarak 36 pisti mevcut durumda tek bir pist şeklinde inşa edilmiş olup, iniş veya kalkış amacıyla kullanılabilir.

Kuyruk modelleri pratikte kullanımları bakımından incelendiğinde en yaygın modelin M/M/1 olduğu görülmektedir. Bu modele göre belli bir zaman aralığındaki gelişler ( $\lambda$ ) Poisson dağılımına uyarken, gelişler arasındaki süre eksponansiyel dağılıma sahiptir. En basit yapıdaki bu model tek kanallı tek fazlı yapıya sahiptir. M/M/1 modelinden türetilen M/M/s kuyruk modeli ise aynı yapıya sahip çok kanallı bir kuyruk modelini ifade etmektedir. Dolayısıyla uçak kalkış operasyonları amacıyla kullanılan bağımlı pist çiftleri kuyruk modeli olarak incelendiğinde tek kanallı bir yapıya uyarken, bağımsız pist grupları ise iki kanallı yapı oluşturmaktadır. Aşağıda sunulmakta olan şekil ile kurulan modele ilişkin olarak Statistica paket programı ile elde edilen Poisson dağılımına uygunluk testinin sonucuna bir örnek sunulmaktadır.

**Tablo 6. 4:** 00:00-00:59 saat diliminde uçak kalkış verisi için Statistica Poisson testi sonuçları.

Category	Variable: Var1, Distribution: Poisson, Lambda = 19,73864 (Spreadsheet1) Chi-Square = 282,25529, df = 8 (adjusted) , p = 0,00000								
	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 4,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,00553	0,0055	0,00209	0,0021	-0,0055
6,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,07569	0,0812	0,02867	0,0308	-0,0757
8,00000	2	2	0,75758	0,7576	0,56755	0,6488	0,21498	0,2457	1,4324
10,00000	7	9	2,65152	3,4091	2,63412	3,2829	0,99777	1,2435	4,3659
12,00000	27	36	10,22727	13,6364	8,29780	11,5807	3,14311	4,3866	18,7022
14,00000	50	86	18,93939	32,5758	18,88274	30,4634	7,15255	11,5392	31,1173
16,00000	19	105	7,19697	39,7727	32,47122	62,9347	12,29971	23,8389	-13,4712
18,00000	5	110	1,89394	41,6667	43,65767	106,5923	16,53700	40,3759	-38,6577
20,00000	6	116	2,27273	43,9394	47,13427	153,7266	17,85389	58,2298	-41,1343
22,00000	19	135	7,19697	51,1364	41,74984	195,4764	15,81433	74,0441	-22,7498
24,00000	58	193	21,96970	73,1061	30,87996	226,3564	11,69695	85,7411	27,1200
26,00000	42	235	15,90909	89,0152	19,35601	245,7124	7,33182	93,0729	22,6440
28,00000	29	264	10,98485	100,0000	10,41154	256,1239	3,94377	97,0166	18,5885
< Infinity	0	264	0,00000	100,0000	7,87605	264,0000	2,98335	100,0000	-7,8761





Şekil 6. 4: 00:00-00:59 zaman aralığında uçak kalkış verisi için Poisson testi grafiksel gösterim.

Modelle ilgili diğer önemli parametre ise hizmet süresinin tespit edilmesidir. Bu çalışma kapsamında kullanılacak hizmet süresi ise bir uçağın ilgili piste giriş yaparak kalkışını tamamlaması ve akabinde aynı ya da bağımlı bir diğer pistin uçak iniş/kalkış operasyonları için kullanılabilir olmasını ifade etmektedir. Diğer bir ifade ile iniş-kalkış uçakları arasındaki zaman ayırması hizmet süresini vermektedir. Uçaklar arası ayırma minimaları ICAO dökümanlarında tanımlanmış olup, pistlere ve uçak türbülans kategorisine bağlı olarak çok farklı sayıda ayırma kriterleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamına uygun olarak dikkate alınan ayırma verileri aşağıda tablo halinde sunulmaktadır [111]. Bu veriler ışığın matematiksel modelleme için kullanılacak hizmet süresinin tespit edilmiştir.

**Tablo 6. 5:** Radar ayırmasının tesis edildiği durumda inişler arası mesafe ayırması.

ÖNDEKİ UÇAK	TAKİP EDEN UÇAK	AYIRMA MİNİMASI
Heavy	Heavy	4 NM
Heavy	Medium	5 NM
Heavy	Light	6 NM
Medium	Light	5 NM
Super Heavy	Heavy	6 NM
Super Heavy	Medium	7 NM
Super Heavy	Light	8 NM

**Tablo 6. 6:** Radar ayırmasının tesis edilmediği durumda inişler arası zaman ayırması.

ÖNDEKİ UÇAK	TAKİP EDEN UÇAK	AYIRMA MİNİMASI
Heavy	Heavy	2 dk
Heavy	Medium	2 dk
Heavy	Light	3 dk
Medium	Light	3 dk

**Tablo 6. 7:** Kalkış uçakları arasındaki vortex (dümensuyu türbülansı) ayırması.

ÖNDEKİ UÇAK	TAKİP EDEN UÇAK	KALKIŞ AYIRMASI	KAVŞAK KALKIŞI AYIRMASI
Heavy	Heavy	2 dk	3 dk
Heavy	Medium	2 dk	3 dk
Heavy	Light	2 dk	3 dk
Medium	Light	2 dk	3 dk

ICAO kurallarına ilave olarak bu kurallar ile çelişmeyecek şekilde her bir havalimanı için lokal anlaşma mektuplarında uyulacak ilave prosedürler yer almaktadır. İstanbul Havalimanı için kule ve yaklaşma kontrol üniteleri arasında imzalanan ve farklı pist konfigürasyonları için mevcut ayırma verileri aşağıda verilmektedir [97].

**Tablo 6. 8:** İstanbul Havalimanı için uçak ayırma minimaları.

KULLANILAN PİSTLER	AYIRMA MİNİMASI
34L: iniş 34R: operasyon yok	3 NM
34L: iniş 34R/L: kalkış	7 NM
35R: iniş 35L: operasyon yok	3 NM
35R: iniş 35L: kalkış	5 NM
35R: iniş/kalkış	7 NM
36: iniş	3 NM
36: iniş/kalkış	7 NM
16R: iniş 16L: operasyon yok	3 NM
16R: iniş 16R/L: kalkış	7 NM
17L: iniş 17R: operasyon yok	3 NM
17L: iniş 17R: kalkış	5 NM
17L: iniş/kalkış	7 NM
18: iniş	3 NM
18: iniş/kalkış	8 NM

Tablo 6.6'daki ayırma verilerine ilave olarak, dümensuyu türbülansı ayırmaları geçerli olup ayrıca düşük performanslı bir uçağın arkasından kalkış yapacak yüksek performanslı diğer bir uçak için ilave ayırma değeri sağlanmaktadır. Bu durumların dışında ise aynı türbülans kategorisine sahip trafikler için ayırma değeri 1 dakikaya kadar azaltılabilmektedir. Bu durumda münferit olarak kalkış trafikleri arasında uygulanan ayırma değerleri 1 dakika ile 2 dakika arasında değişkenlik göstermektedir. Ancak uzun periyotlar halinde gerçek trafik verileri incelendiğinde ayırma değerinin ortalama 90 saniye değerine yakınsadığı görülmektedir. Dolayısıyla saatlik dilimler halinde inceleyeceğimiz kuyruk analizinde, kısa vadeli zaman diliminde farklılık gösterebilen hizmet süresi için uzun vadeli analizde dengelendiği 90 saniye değeri referans olarak alınmıştır.

## 6.2 MODEL ANALİZİ

Uçak iniş-kalkış operasyonlarında kullanılan pistler; ilgili meydanın yapısı, mevcut hava trafiğinin ihtiyaçları, hava koşulları, bakım-onarım çalışmaları gibi birçok etmene bağlı olarak farklı konfigürasyonlarda hizmet vermektedir. Örneğin; uçak operasyonlarının yoğun olarak yapıldığı bir zaman dilimi için iki farklı pist kullanılabilir iken, bakım amaçlı kapalılığın olduğu farklı bir zaman diliminde sadece tek bir pist hizmet verebilmektedir. Dolayısıyla kullanımda olan pist ya da pist grubuna göre ortaya çıkan kuyruk modelinde farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

Öncelikle, daha önce ifade edildiği üzere bu çalışma kapsamında kalkış trafiklerinin push-back ve taksi hareketi süresince harcadıkları zamana yer verilmemiş, yalnızca pist başı beklemleri üzerine çalışılmıştır. Bu yaklaşıma göre terminal ve apron bölgesinde yer alan tüm kalkış trafikleri ilgili saat dilimlerinde aktif kalkış pistlerine dağıtılmaktadır. Dolayısıyla ortaya çıkan model tüm durumlar için tek fazlı bir yapıya sahip iken, kullanımda olan aktif pist sayısına göre kanal yapısı değişmektedir.

Operasyonel olarak incelendiğinde, bağımsız paralel pistlerden yapılmak koşulu ile aynı anda en fazla iki uçağın iniş ya da kalkış yapması mümkün olmaktadır. Bu nedenle oluşan kuyruk tüm kuyruk modellerinin yapısı tek fazlı-tek kanallı ya da tek fazlı-iki kanallı şeklindedir. Aşağıda verilen tablo 6.2 ve tablo 6.3 üzerinde İstanbul Havalimanı için kullanılabilecek pist konfigürasyonları ve buna istinaden oluşan kuyruk modeli yapısı verilmektedir.

**Tablo 6. 9:** Kuzey yönlü pist konfigürasyonları ve oluşan kuyruk modeli yapısı.

	İniş Pisti	Kalkış Pisti	Model		İniş Pisti	Kalkış Pisti	Model
1	34L	34L	M/M/1	46	34L-35R	34L	M/M/1
2	34L	34R	M/M/1	47	34L-35R	34R	M/M/1
3	34L	35L	M/M/1	48	34L-35R	35L	M/M/1
4	34L	35R	M/M/1	49	34L-35R	35R	M/M/1
5	34L	36	M/M/1	50	34L-35R	36	M/M/1
6	34L	34L-34R	M/M/1	51	34L-35R	34L-34R	M/M/1
7	34L	34L-35L	M/M/2	52	34L-35R	34L-35L	M/M/2
8	34L	34L-35R	M/M/2	53	34L-35R	34L-35R	M/M/2
9	34L	34L-36	M/M/2	54	34L-35R	34L-36	M/M/2
10	34L	34R-35L	M/M/2	55	34L-35R	34R-35L	M/M/2
11	34L	34R-35R	M/M/2	56	34L-35R	34R-35R	M/M/2
12	34L	34R-36	M/M/2	57	34L-35R	34R-36	M/M/2
13	34L	35L-35R	M/M/1	58	34L-35R	35L-35R	M/M/1
14	34L	35L-36	M/M/2	59	34L-35R	35L-36	M/M/2
15	34L	35R-36	M/M/2	60	34L-35R	35R-36	M/M/2
16	35R	34L	M/M/1	61	34L-36	34L	M/M/1
17	35R	34R	M/M/1	62	34L-36	34R	M/M/1
18	35R	35L	M/M/1	63	34L-36	35L	M/M/1
19	35R	35R	M/M/1	64	34L-36	35R	M/M/1
20	35R	36	M/M/1	65	34L-36	36	M/M/1
21	35R	34L-34R	M/M/1	66	34L-36	34L-34R	M/M/1
22	35R	34L-35L	M/M/2	67	34L-36	34L-35L	M/M/2
23	35R	34L-35R	M/M/2	68	34L-36	34L-35R	M/M/2
24	35R	34L-36	M/M/2	69	34L-36	34L-36	M/M/2
25	35R	34R-35L	M/M/2	70	34L-36	34R-35L	M/M/2
26	35R	34R-35R	M/M/2	71	34L-36	34R-35R	M/M/2
27	35R	34R-36	M/M/2	72	34L-36	34R-36	M/M/2
28	35R	35L-35R	M/M/1	73	34L-36	35L-35R	M/M/1
29	35R	35L-36	M/M/2	74	34L-36	35L-36	M/M/2
30	35R	35R-36	M/M/2	75	34L-36	35R-36	M/M/2
31	36	34L	M/M/1	76	35R-36	34L	M/M/1
32	36	34R	M/M/1	77	35R-36	34R	M/M/1
33	36	35L	M/M/1	78	35R-36	35L	M/M/1
34	36	35R	M/M/1	79	35R-36	35R	M/M/1
35	36	36	M/M/1	80	35R-36	36	M/M/1
36	36	34L-34R	M/M/1	81	35R-36	34L-34R	M/M/1
37	36	34L-35L	M/M/2	82	35R-36	34L-35L	M/M/2
38	36	34L-35R	M/M/2	83	35R-36	34L-35R	M/M/2
39	36	34L-36	M/M/2	84	35R-36	34L-36	M/M/2
40	36	34R-35L	M/M/2	85	35R-36	34R-35L	M/M/2
41	36	34R-35R	M/M/2	86	35R-36	34R-35R	M/M/2
42	36	34R-36	M/M/2	87	35R-36	34R-36	M/M/2
43	36	35L-35R	M/M/1	88	35R-36	35L-35R	M/M/1
44	36	35L-36	M/M/2	89	35R-36	35L-36	M/M/2
45	36	35R-36	M/M/2	90	35R-36	35R-36	M/M/2

**Tablo 6. 10:** Güney yönlü pist konfigürasyonları ve oluşan kuyruk modeli yapısı.

	İniş Pist	Kalkış Pisti	Model		İniş Pisti	Kalkış Pisti	Model
1	16R	16R	M/M/1	46	16R-17L	16R	M/M/1
2	16R	16L	M/M/1	47	16R-17L	16L	M/M/1
3	16R	17R	M/M/1	48	16R-17L	17R	M/M/1
4	16R	17L	M/M/1	49	16R-17L	17L	M/M/1
5	16R	18	M/M/1	50	16R-17L	18	M/M/1
6	16R	16R-16L	M/M/1	51	16R-17L	16R-16L	M/M/1
7	16R	16R-17R	M/M/2	52	16R-17L	16R-17R	M/M/2
8	16R	16R-17L	M/M/2	53	16R-17L	16R-17L	M/M/2
9	16R	16R-18	M/M/2	54	16R-17L	16R-18	M/M/2
10	16R	16L-17R	M/M/2	55	16R-17L	16L-17R	M/M/2
11	16R	16L-17L	M/M/2	56	16R-17L	16L-17L	M/M/2
12	16R	16L-18	M/M/2	57	16R-17L	16L-18	M/M/2
13	16R	17R-17L	M/M/1	58	16R-17L	17R-17L	M/M/1
14	16R	17R-18	M/M/2	59	16R-17L	17R-18	M/M/2
15	16R	17L-18	M/M/2	60	16R-17L	17L-18	M/M/2
16	17L	16R	M/M/1	61	16R-18	16R	M/M/1
17	17L	16L	M/M/1	62	16R-18	16L	M/M/1
18	17L	17R	M/M/1	63	16R-18	17R	M/M/1
19	17L	17L	M/M/1	64	16R-18	17L	M/M/1
20	17L	18	M/M/1	65	16R-18	18	M/M/1
21	17L	16R-16L	M/M/1	66	16R-18	16R-16L	M/M/1
22	17L	16R-17R	M/M/2	67	16R-18	16R-17R	M/M/2
23	17L	16R-17L	M/M/2	68	16R-18	16R-17L	M/M/2
24	17L	16R-18	M/M/2	69	16R-18	16R-18	M/M/2
25	17L	16L-17R	M/M/2	70	16R-18	16L-17R	M/M/2
26	17L	16L-17L	M/M/2	71	16R-18	16L-17L	M/M/2
27	17L	16L-18	M/M/2	72	16R-18	16L-18	M/M/2
28	17L	17R-17L	M/M/1	73	16R-18	17R-17L	M/M/1
29	17L	17R-18	M/M/2	74	16R-18	17R-18	M/M/2
30	17L	17L-18	M/M/2	75	16R-18	17L-18	M/M/2
31	18	16R	M/M/1	76	17L-18	16R	M/M/1
32	18	16L	M/M/1	77	17L-18	16L	M/M/1
33	18	17R	M/M/1	78	17L-18	17R	M/M/1
34	18	17L	M/M/1	79	17L-18	17L	M/M/1
35	18	18	M/M/1	80	17L-18	18	M/M/1
36	18	16R-16L	M/M/1	81	17L-18	16R-16L	M/M/1
37	18	16R-17R	M/M/2	82	17L-18	16R-17R	M/M/2
38	18	16R-17L	M/M/2	83	17L-18	16R-17L	M/M/2
39	18	16R-18	M/M/2	84	17L-18	16R-18	M/M/2
40	18	16L-17R	M/M/2	85	17L-18	16L-17R	M/M/2
41	18	16L-17L	M/M/2	86	17L-18	16L-17L	M/M/2
42	18	16L-18	M/M/2	87	17L-18	16L-18	M/M/2
43	18	17R-17L	M/M/1	88	17L-18	17R-17L	M/M/1
44	18	17R-18	M/M/2	89	17L-18	17R-18	M/M/2
45	18	17L-18	M/M/2	90	17L-18	17L-18	M/M/2

Tablo 6.2 ve tablo 6.3 ile sunulan pist kullanım konfigürasyonları incelendiğinde ortaya çıkan modeller her iki durum için de birbirinin eşdeğeri seklindedir. Bu analiz için farklılık gösteren tek durum ise pistlerin kullanım yönünün kuzeyli ya da güneyli istikamette olmasıdır. Ortaya çıkan kuyruk modelleri aynı paralelde olup, pist kullanım yönünün değişmesine bağlı olarak körüklerden çıkan uçakların pist başına varma süreleri değişkenlik gösterebilmektedir.

Kalkış kuyruk modeli analizinde önemli bir detay ise seçilen aktif pistlerin (iniş ve kalkış pistleri) aynı ya da bağımlı pistler olup olmamasıdır. İniş ve kalkış pistlerinin aynı seçildiği konfigürasyonlar ya da kalkışların inişlere bağımlı olarak yapılabildiği bağımlı paralel pistler için iniş trafikleri de kuyruk analizi için dikkate alınması gereken birer faktör konumundadır. Zira tek bir iniş-kalkış pistinde olduğu gibi, bağımlı paralel pistlerden de aynı anda ya iniş ya da kalkış operasyonları yapılabilmektedir. Bağımsız paralel pistler için ise durum tamamen farklı olup, bir piste yapılan iniş ya da kalkış operasyonu, diğer pistin kullanımı için herhangi bir kısıtlama ortaya çıkarmamaktadır. Bu nedenle yapılan hesaplamalarda seçilen pistlerin aynı ya da bağımlı olup olmamasına bağlı olarak saatlik iniş rakamları da göz önüne alınacaktır.

Yukarıdaki yaklaşıma binaen tablo 2 ve tablo 3 ile sunulan konfigürasyonlar analiz edildiğinde elde edilen kuyruk modeli yapıları tablo 4 üzerinde özetlenmektedir. Dolayısıyla elde edilen 8 farklı modelin analizi ve başarımlar parametreleri detaylı olarak incelenecektir.

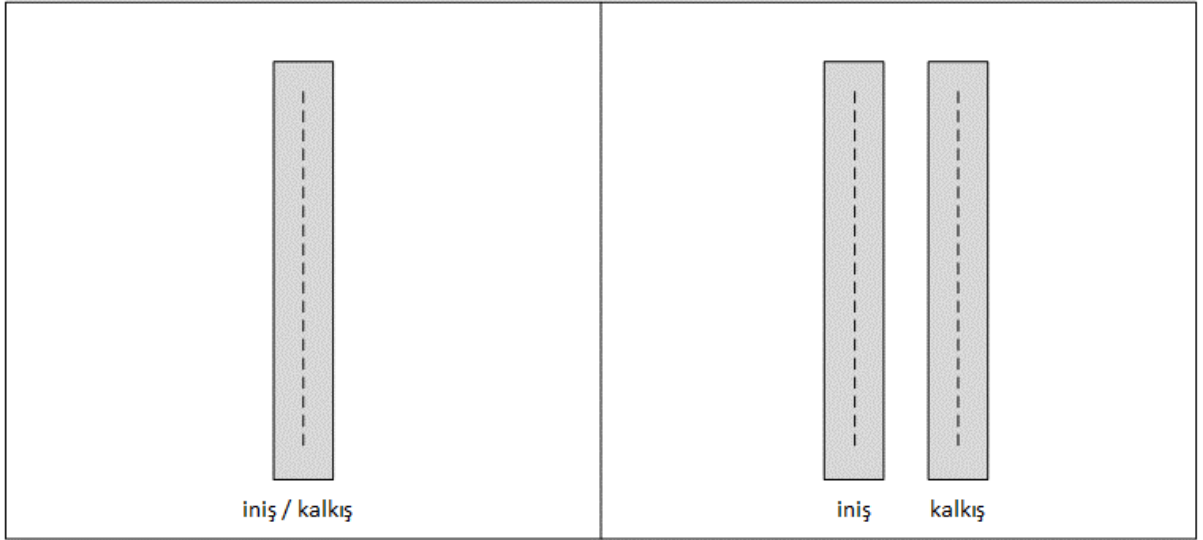
**Tablo 6. 11:** İstanbul Havalimanı için elde edilen kuyruk modeli yapıları.

		İNİŞ PİST ADEDİ	
		Tek iniş pisti	İki iniş pisti
KALKIŞ PİST ADEDİ	Tek kalkış pisti	İniş-kalkış aynı pist ya da bağımlı kalkış pisti	Kalkış pisti bir iniş pisti ile aynı ya da bağımlı pist
		Bağımsız kalkış pisti	Bağımsız kalkış pisti
	İki kalkış pisti	Kalkış pistlerin biri bağımsız pist İkinci kalkış pisti iniş pisti ile aynı ya da bağımlı pist	Bir kalkış pisti iniş pistlerinden biri ile aynı ya da bağımlı Diğer kalkış pisti bağımsız
		İki bağımsız kalkış pisti	Kalkış pistleri iniş pistleri ile aynı ya da bağımlı pistler

### 6.3 MODEL 1

Bu model; iniş ve kalkış operasyonlarının aynı pistten yapıldığı tek pist ya da kalkış operasyonlarının iniş trafiklerine bağımlı olarak yapılabildiği bağımlı paralel iki pistten oluşmaktadır. Dolayısıyla tüm iniş trafikleri kalkışlar için önemli birer etmen olup kuyruk analizinde yapılan hesaplamalara dâhil edilmektedir. Model-1 tek bir kalkış pisti ve tek fazlı yapıya sahip olması itibariyle M/M/1 kuyruk modeli yapısına uymaktadır.

Aşağıda verilmekte olan şekil 6.1 ile model-1'e uygun iki farklı pist kullanım modeli sunulmaktadır.



Şekil 6. 5: Model 1 için pist kullanım konfigürasyonu.

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_i$$

İniş ve kalkış operasyonlarının bağımlı olarak yapıldığı durumlarda iniş trafikleri arasındaki ayrımlar artmakta ve inişler arasında kalkış operasyonları yapılmaktadır. Bu modele göre iniş trafikleri de kalkış trafikleri için önemli birer etmen olup, yoğunluğa bağlı olarak ilave gecikmelere yol açabilmektedir.

Saatlik analize göre, 90 saniye hizmet süresinin bulunduğu bu modelin servis oranı ( $\mu$ );

$$\mu = \frac{60}{1,5} = 40/sa$$

Pist kullanım oranı;



$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda}{40}$$

Kalkış için beklemekte olan muhtemel uçak sayısı;

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{40}\right)^2}{1 - \frac{\lambda}{40}}$$

Kalkış uçağı için muhtemel bekleme süresi;

$$\begin{aligned} E(W_q) &= \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \\ &= \frac{\lambda}{40(40 - \lambda)} \end{aligned}$$

Bu modele göre pist başında hiç bekleme olmama olasılığı;

$$P(\text{bekleme olmaması}) = P(T_q = 0)$$

$$P(T_q = 0) = 1 - \rho$$

$$= 1 - \frac{\lambda}{40}$$

Pist başında belli sürelerde bekleme olasılıkları aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$P(T_q > t) = \rho e^{-\mu(1-\rho)t}$$

Kalkış kuyruğunda en az 5 dakika ve en az 10 dakika bekleme olasılıkları sırasıyla;

$$P(T_q > 5) = \rho e^{-\mu(1-\rho)\left(\frac{5}{60}\right)}$$

$$P(T_q > 10) = \rho e^{-\mu(1-\rho)\left(\frac{10}{60}\right)}$$

Model-1 ile elde edilen sonuçlar hesaplanarak aşağıdaki tablo 6.11 üzerinde sunulmuştur.

**Tablo 6. 12:** Model-1 'e ait sistem başarımlı parametreleri.

T	$\lambda$	$\rho$	$L_q$	$E(W_q)(dk)$	$P(T_q = 0)$	$P(T_q > 5)$	$P(T_q > 10)$
00:00 - 00:59	44,239	<b>1,105</b>	Sürekli artan kuyruk				
01:00 - 01:59	44,784	<b>1,119</b>	Sürekli artan kuyruk				
02:00 - 02:59	23,677	0,591	0,858	2,175	0,408	0,151	0,038
03:00 - 03:59	10,572	0,264	0,094	0,538	0,735	0,022	0,001
04:00 - 04:59	17,435	0,435	0,336	1,159	0,564	0,066	0,010
05:00 - 05:59	39,211	0,980	48,774	74,632	0,019	0,917	0,859
06:00 - 06:59	48,936	<b>1,223</b>	Sürekli artan kuyruk				
07:00 - 07:59	55,026	<b>1,375</b>	Sürekli artan kuyruk				
08:00 - 08:59	55,735	<b>1,393</b>	Sürekli artan kuyruk				
09:00 - 09:59	48,936	<b>1,223</b>	Sürekli artan kuyruk				
10:00 - 10:59	50,083	<b>1,252</b>	Sürekli artan kuyruk				
11:00 - 11:59	60,928	<b>1,523</b>	Sürekli artan kuyruk				
12:00 - 12:59	61,719	<b>1,542</b>	Sürekli artan kuyruk				
13:00 - 13:59	62,527	<b>1,563</b>	Sürekli artan kuyruk				
14:00 - 14:59	60,272	<b>1,506</b>	Sürekli artan kuyruk				
15:00 - 15:59	62,046	<b>1,551</b>	Sürekli artan kuyruk				
16:00 - 16:59	58,311	<b>1,457</b>	Sürekli artan kuyruk				
17:00 - 17:59	59,049	<b>1,476</b>	Sürekli artan kuyruk				
18:00 - 18:59	60,045	<b>1,501</b>	Sürekli artan kuyruk				
19:00 - 19:59	61,875	<b>1,546</b>	Sürekli artan kuyruk				
20:00 - 20:59	57,371	<b>1,434</b>	Sürekli artan kuyruk				
21:00 - 21:59	51,174	<b>1,279</b>	Sürekli artan kuyruk				
22:00 - 22:59	58,390	<b>1,459</b>	Sürekli artan kuyruk				
23:00 - 23:59	58,602	<b>1,465</b>	Sürekli artan kuyruk				

Tablo üzerinde verilen sonuçlar incelendiğinde  $p < 1$  için daha düzenli bir dağılım elde edilirken  $p \geq 1$  için dağılımın bozulduğu görülmektedir. Pist kullanım oranı 1 eşik değerinin üzerine çıktığında kuyruk uzunluğu azalmamakla beraber devamlı olarak artmaktadır. Bu durumda beklemeelerde önemli oranda artışlar yaşanırken ilgili saat dilimi hizmet bekleyen tüm uçaklar için yeterli olmamakta ve trafik yoğunluğu takip eden saat dilimine aktarılmaktadır. Bu nedenle mevcut trafik planlaması bu model için etkin olmayan bir pist kullanımını ortaya çıkarmaktadır.

Performans parametrelerinin daha kapsamlı bir şekilde yorumlanabilmesi amacıyla ilave metotların kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, tablo ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sistem başarımlarını parametreleri açısından farklı modellerin birbirleri ile daha kolay bir şekilde kıyaslanabilmesi amacıyla aşağıdaki yöntem geliştirilmiştir. Buna göre; 5 farklı kriter altında kuyruk uzunluğuna dayanan pist yoğunluğu skalası belirlenmiştir. Gerçek trafik koşulları dikkate alınarak oluşturulan yoğunluk analizi aşağıda sunulmaktadır;

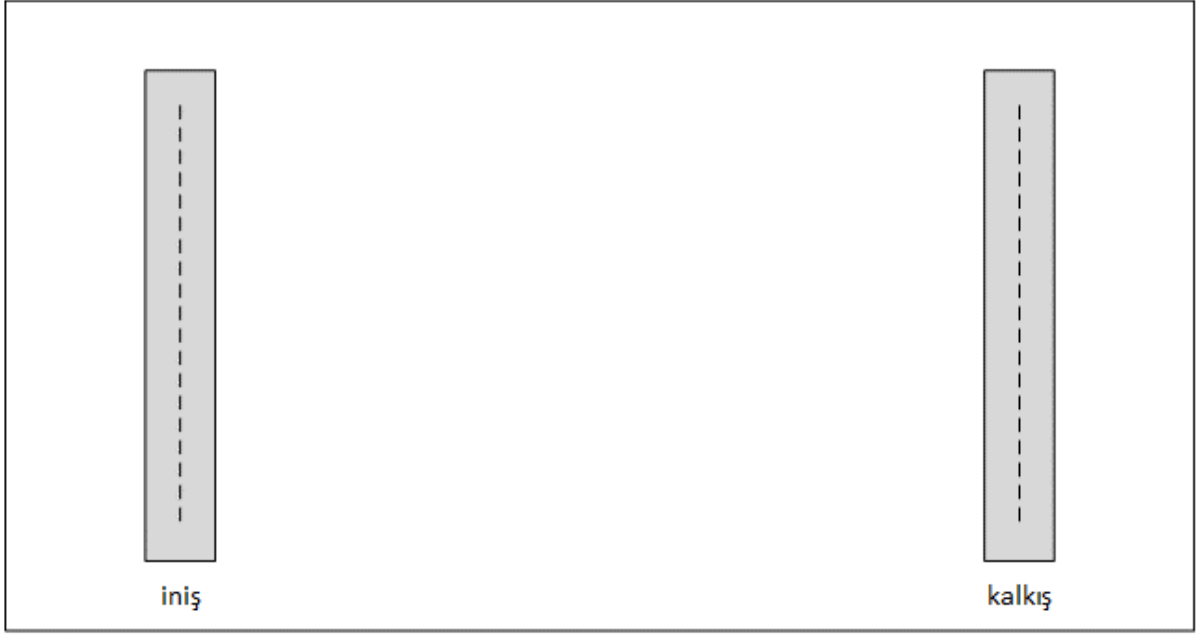
- Beklenen kalkış kuyruğu;  $L_q \leq 1$  ise yoğun olmayan kuyruk,
- Beklenen kalkış kuyruğu;  $1 < L_q \leq 3$  ise az yoğun kuyruk,
- Beklenen kalkış kuyruğu;  $3 < L_q \leq 10$  ise yoğun kuyruk,
- Beklenen kalkış kuyruğu;  $10 < L_q$  ise çok yoğun kuyruk,
- Pist kullanım oranı;  $\rho \geq 1$  için ise sürekli artan kuyruk,

Model-1 için elde edilen sistem başarımlarına göre; 24 farklı saat diliminden 20 tanesinde pist kullanım oranı 1 eşik değerinin üzerinde çıkmakta ve buna dayalı olarak devamlı artan bir kalkış kuyruğu beklenmektedir. Dolayısıyla bu saat dilimleri için modelin davranışı rakamsal olarak sunulamamıştır. Bununla beraber 05:00 - 05:59 saat dilimi arasında yüksek yoğunluklu kalkış kuyruğu öngörülmektedir. Matematiksel verileri sunulan 02:00 - 04:59 saatleri arasındaki 3 farklı zaman dilimi için ise yoğun olmayan bir kalkış kuyruğu beklenmektedir.

Model-1'e ilişkin performans parametreleri bir bütün olarak incelendiğinde yüksek yoğunluklu bir kalkış kuyruğu olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla bu sonucun hava trafik ünitelerince istenen bir durum olmadığı söylenebilir.

## 6.4 MODEL 2

Bu model; kalkış ve iniş operasyonlarının birbirinden bağımsız olarak yapıldığı (bağımsız paralel pistler) iki ayrı pistten oluşmaktadır. Dolayısıyla iniş trafikleri kalkış trafikleri için herhangi bir kısıtlama oluşturmamaktadır. Tek bir kalkış pisti ve tek fazdan oluşan bu model M/M/1 kuyruk modeli yapısına uymaktadır.



Şekil 6. 6: Model 2 için pist kullanım konfigürasyonu.

$$\lambda = \lambda_k$$

Saatlik analize göre, 90 saniye hizmet süresinin bulunduğu bu modelin servis oranı ( $\mu$ ) aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\mu = \frac{60}{1,5} = 40/sa$$

Pist kullanım oranı;

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda}{40}$$

Kalkış için beklemekte olan muhtemel uçak sayısı;

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{40}\right)^2}{1 - \frac{\lambda}{40}}$$

Kalkış uçağı için muhtemel bekleme süresi;

$$E(W_q) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

$$= \frac{\lambda}{40(40 - \lambda)}$$

Bu modele göre pist başında hiç bekleme olmama olasılığı;

$$P(\text{bekleme olmaması}) = P(T_q = 0)$$

$$P(T_q = 0) = 1 - \rho$$

$$= 1 - \frac{\lambda}{40}$$

Pist başında belli sürelerde bekleme olasılıkları aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$P(T_q > t) = \rho e^{-\mu(1-\rho)t}$$

Kalkış kuyruğunda en az 5 dakika ve en az 10 dakika bekleme olasılıkları sırasıyla;

$$P(T_q > 5) = \rho e^{-\mu(1-\rho)\left(\frac{5}{60}\right)}$$

$$P(T_q > 10) = \rho e^{-\mu(1-\rho)\left(\frac{10}{60}\right)}$$

Model-2 ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, düzensiz dağılıma yol açan bir veriye rastlanmamaktadır. Bu modele göre, 9 farklı saat dilimi için yoğun olmayan kalkış kuyruğu beklenmektedir. Bununla beraber 8 farklı saat dilimi için az yoğun, 6 farklı saat dilimi için yoğun, 1 saat dilimi için ise çok yoğun kalkış kuyruğu öngörülmektedir.

Model-2 ile elde edilen sonuçlar hesaplanarak aşağıda tablo 6.12 üzerinde sunulmuştur.

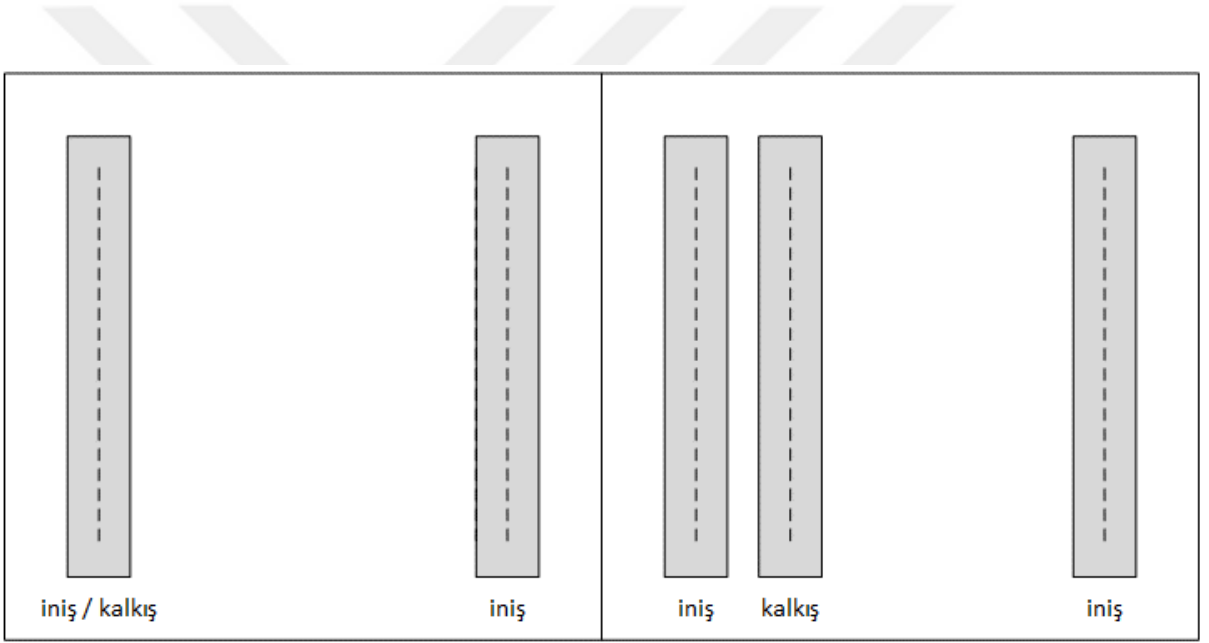
**Tablo 6. 13:** Model-2 'ye ait sistem başarımlar parametreleri.

T	$\lambda$	$\rho$	$L_q$	$E(W_q)(dk)$	$P(T_q = 0)$	$P(T_q > 5)$	$P(T_q > 10)$
00:00 - 00:59	19,739	0,493	0,480	1,461	0,506	0,091	0,016
01:00 - 01:59	34,163	0,854	4,998	8,779	0,145	0,525	0,322
02:00 - 02:59	17,473	0,436	0,338	1,163	0,563	0,066	0,010
03:00 - 03:59	3,814	0,095	0,010	0,158	0,904	0,004	0,000
04:00 - 04:59	3,810	0,095	0,010	0,157	0,904	0,004	0,000
05:00 - 05:59	9,340	0,233	0,071	0,457	0,766	0,018	0,001
06:00 - 06:59	20,701	0,517	0,555	1,608	0,482	0,103	0,020
07:00 - 07:59	33,598	0,839	4,408	7,872	0,160	0,492	0,288
08:00 - 08:59	39,606	0,990	99,530	150,784	0,009	0,958	0,927
09:00 - 09:59	25,163	0,629	1,066	2,543	0,370	0,182	0,053
10:00 - 10:59	23,068	0,576	0,785	2,043	0,423	0,140	0,034
11:00 - 11:59	25,841	0,646	1,179	2,737	0,353	0,198	0,061
12:00 - 12:59	29,223	0,730	1,981	4,067	0,269	0,297	0,121
13:00 - 13:59	34,436	0,860	5,328	9,283	0,139	0,541	0,340
14:00 - 14:59	35,420	0,885	6,848	11,600	0,114	0,604	0,412
15:00 - 15:59	30,057	0,751	2,271	4,534	0,248	0,328	0,143
16:00 - 16:59	27,856	0,696	1,597	3,440	0,303	0,253	0,092
17:00 - 17:59	26,534	0,663	1,307	2,955	0,336	0,215	0,070
18:00 - 18:59	28,606	0,715	1,795	3,765	0,284	0,276	0,107
19:00 - 19:59	33,523	0,838	4,337	7,763	0,161	0,488	0,284
20:00 - 20:59	34,701	0,867	5,681	9,822	0,132	0,557	0,358
21:00 - 21:59	27,439	0,685	1,498	3,276	0,314	0,240	0,084
22:00 - 22:59	20,769	0,519	0,560	1,619	0,480	0,104	0,021
23:00 - 23:59	20,269	0,506	0,520	1,540	0,493	0,097	0,018

### 6.5 MODEL 3

Bu model, bağımsız paralel iki iniş pisti ve iniş pistlerinden birine bağımlı olan kalkış pistinden oluşmaktadır. Dolayısıyla kalkış pistine yapılan iniş operasyonları gecikme analizinde etkili olmaktadır. Tek bir kalkış pisti ve tek fazdan oluşan bu model M/M/1 kuyruk modeli yapısındadır.

Bu modele göre kalkış pistinin iniş pisti ile aynı ya da iniş pistine bağımlı ikinci bir pist olarak kullanım durumuna göre iki alt model ortaya çıkmaktadır. Performans parametrelerinin analizi açısından bu iki alt modelin birbirinden herhangi bir farkı bulunmamaktadır. Aşağıda verilmekte olan şekil 6.3 ile model-3'e ilişkin pist kullanım konfigürasyonu sunulmaktadır.



Şekil 6. 7: Model 3 için pist kullanım konfigürasyonu.

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_i'$$

Bu model için önemli olan nokta ise iniş trafiklerinin pistlere nasıl dağıtıldığı sorusudur. Teorik olarak incelendiğinde, iniş trafiklerinin her iki piste eşit olarak dağıtıldığı bir yapı ya da sadece iniş amaçlı kullanılan pistin tam kapasiteli olarak kullanıldığı ve kalan iniş trafiklerin ise diğer iniş pistine yönlendirildiği ikinci bir yapı ortaya çıkmaktadır.

Buna göre; iniş verileri incelendiğinde tüm değerlerin saatlik kapasite olan 40 değerinin altında olduğu görülmektedir. Bu durumda iniş pisti tam kapasiteli olarak kullanıldığında, mevcut

trafik verileri için kalkış trafiklerine yönelik ilave bir gecikme ortaya çıkmamaktadır. Dolayısıyla model-2 ile elde edilen sistem başarımları parametreleri aynı şekilde geçerli olmaktadır.

İniş trafiklerinin iniş pistlerine eşit olarak dağıtıldığı ikinci yapıda ise kalkış kuyruğu analizinde sistem başarımları parametreleri değişkenlik göstermektedir. Zira iniş trafiklerinin bir kısmı kalkış trafikleri için ilave gecikmelere yol açmaktadır.

Saatlik analize göre, 90 saniye hizmet süresinin bulunduğu bu modelin servis oranı ( $\mu$ );

$$\mu = \frac{60}{1,5} = 40/sa$$

Pist kullanım oranı;

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda}{40}$$

Kalkış için beklemekte olan muhtemel uçak sayısı;

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{40}\right)^2}{1 - \frac{\lambda}{40}}$$

Kalkış uçağı için muhtemel bekleme süresi;

$$\begin{aligned} E(W_q) &= \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \\ &= \frac{\lambda}{40(40 - \lambda)} \end{aligned}$$

Bu modele göre pist başında hiç bekleme olmama olasılığı;

$$\begin{aligned} P(\text{bekleme olmaması}) &= P(T_q = 0) \\ P(T_q = 0) &= 1 - \rho \\ &= 1 - \frac{\lambda}{40} \end{aligned}$$



Pist başında belli sürelerde bekleme olasılıkları aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$P(T_q > t) = \rho e^{-\mu(1-\rho)t}$$

Kalkış kuyruğunda en az 5 dakika ve en az 10 dakika bekleme olasılıkları sırasıyla;

$$P(T_q > 5) = \rho e^{-\mu(1-\rho)\left(\frac{5}{60}\right)}$$

$$P(T_q > 10) = \rho e^{-\mu(1-\rho)\left(\frac{10}{60}\right)}$$

Model-3 ile elde edilen sistem başarımlarına göre; 12 farklı zaman dilimi için düzensiz dağılım ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bu saat dilimleri için sürekli artan bir kalkış kuyruğu öngörülmektedir. Bununla beraber; 4 farklı saat dilimi için yoğun olmayan, 3 farklı saat dilimi için yoğun ve 5 farklı zaman dilimi için ise çok yoğun kalkış kuyruğu öngörülmektedir.

Modele ait sonuçlar hesaplanarak tablo 6.13 üzerinde sunulmaktadır.

**Tablo 6. 14:** Model-3 'e ait sistem başarımlarına göre parametreleri.

T	$\lambda$	$\rho$	$L_q$	$E(W_q)(dk)$	$P(T_q = 0)$	$P(T_q > 5)$	$P(T_q > 10)$
00:00 - 00:59	31,989	0,799	3,193	5,989	0,200	0,410	0,210
01:00 - 01:59	39,473	0,986	73,986	112,460	0,013	0,944	0,903
02:00 - 02:59	20,575	0,514	0,544	1,588	0,485	0,101	0,020
03:00 - 03:59	7,193	0,179	0,039	0,328	0,820	0,011	0,000
04:00 - 04:59	10,623	0,265	0,096	0,542	0,734	0,022	0,001
05:00 - 05:59	24,276	0,606	0,937	2,315	0,393	0,163	0,044
06:00 - 06:59	34,818	0,870	5,849	10,079	0,129	0,565	0,367
07:00 - 07:59	44,312	<b>1,1078</b>	Sürekli artan kuyruk				
08:00 - 08:59	47,670	<b>1,191</b>	Sürekli artan kuyruk				
09:00 - 09:59	37,049	0,926	11,630	18,835	0,073	0,724	0,566
10:00 - 10:59	36,575	0,914	9,766	16,020	0,085	0,687	0,516

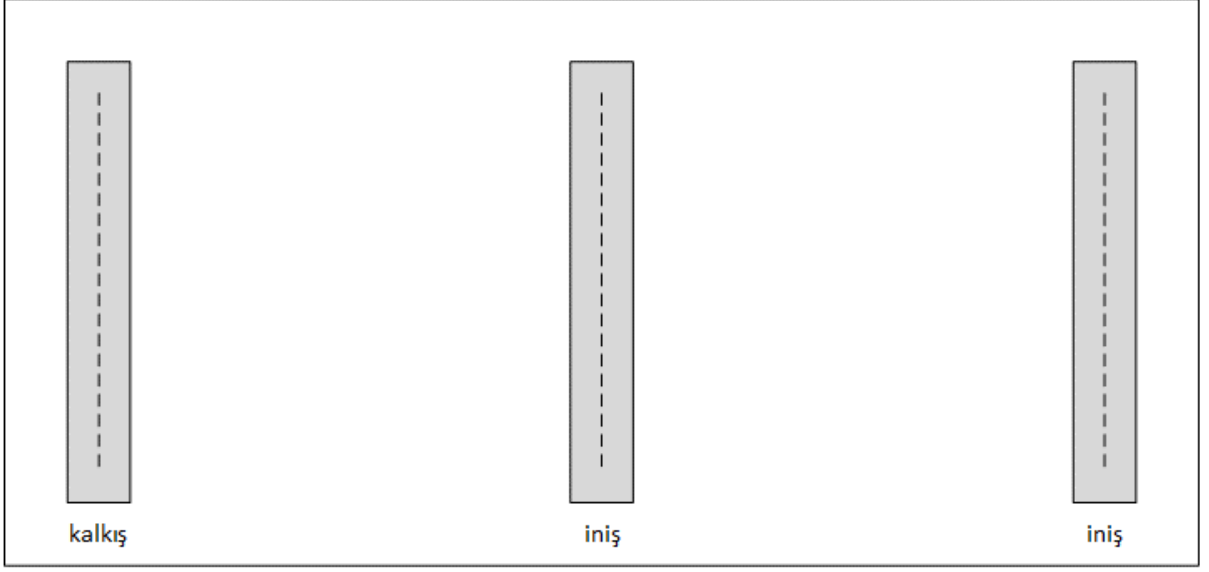
**Tablo 6. 13 (devamı):** Model-3 'e ait sistem başarıml parametreleri.

11:00 - 11:59	43,384	<b>1,084</b>	Sürekli artan kuyruk				
12:00 - 12:59	45,471	<b>1,136</b>	Sürekli artan kuyruk				
13:00 - 13:59	48,481	<b>1,212</b>	Sürekli artan kuyruk				
14:00 - 14:59	47,846	<b>1,196</b>	Sürekli artan kuyruk				
15:00 - 15:59	46,051	<b>1,151</b>	Sürekli artan kuyruk				
16:00 - 16:59	43,083	<b>1,077</b>	Sürekli artan kuyruk				
17:00 - 17:59	42,791	<b>1,069</b>	Sürekli artan kuyruk				
18:00 - 18:59	44,325	<b>1,108</b>	Sürekli artan kuyruk				
19:00 - 19:59	47,699	<b>1,192</b>	Sürekli artan kuyruk				
20:00 - 20:59	46,036	<b>1,150</b>	Sürekli artan kuyruk				
21:00 - 21:59	39,306	0,982	55,695	85,017	0,017	0,927	0,875
22:00 - 22:59	39,579	0,989	93,135	141,187	0,010	0,955	0,922
23:00 - 23:59	39,435	0,985	68,873	104,788	0,014	0,940	0,897

## 6.6 MODEL 4

Bu model; bağımsız paralel olan bir kalkış ve iki iniş pistinden oluşmaktadır. Kalkış analizi bakımından incelendiğinde bu model, model-2 ile aynı yapıya dönüşmektedir. Benzer şekilde tek kalkış pisti ve tek fazdan oluşan bu model de M/M/1 kuyruk modeli yapısındadır. Dolayısıyla model-2 ile aynı başarıml parametrelerine sahip bu model için rakamsal verilere ayrıca değinilmemiştir.

Model 4'e ilişkin pist kullanım konfigürasyonu aşağıda verilmekte olan şekil 6.4 ile gösterilmektedir.



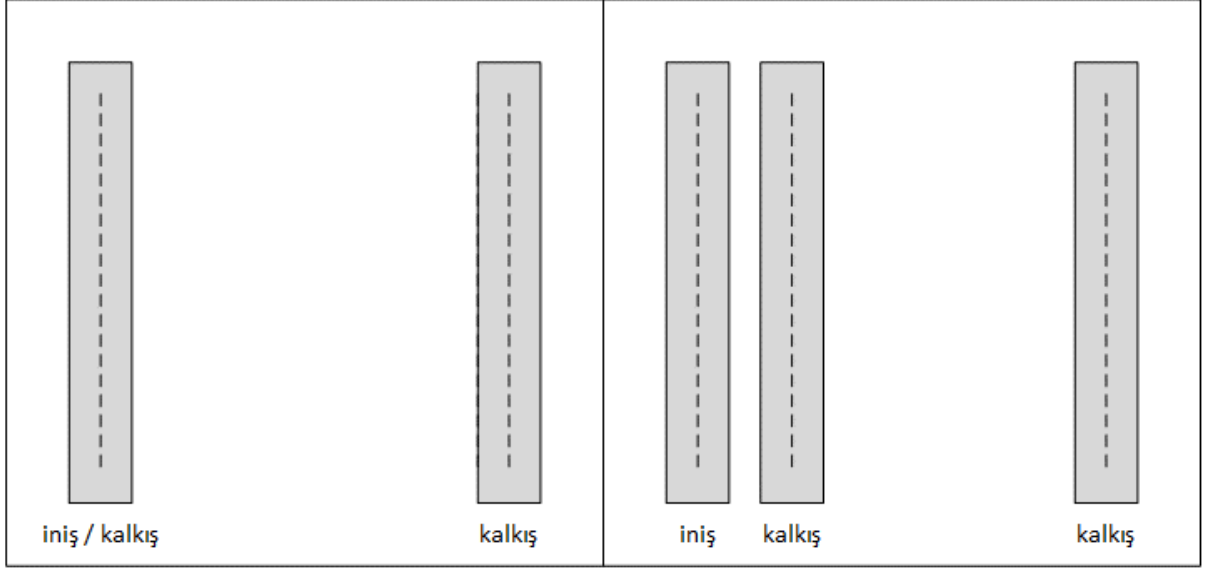
Şekil 6. 8: Model 4 için pist kullanım konfigürasyonu.

Bu modeli, model-2'den ayıran tek farklılık paralel iki iniş pistinin bulunmasıdır. İniş pistlerinin artırılması iniş trafikleri için yaşanabilecek gecikmeleri azaltırken, kalkış operasyonları açısından herhangi bir etkiye yol açmamaktadır. Ancak pratik olarak düşünüldüğünde bu modelin mevcut durumda kullanımı bulunmamaktadır. Zira iniş pistinde pas geçmelerin ortaya çıktığı durumlar için aynı anda 3 trafiğin havalanma riski bulunup, mevcut hava sahası buna uygun olarak tasarlanmamıştır. Ancak teorik olarak düşünüldüğünde inişlerin daha yoğun olduğu zaman dilimleri için bu modelin kullanımı, iniş trafiği beklentileri açısından avantajlı olacaktır.

## 6.7 MODEL 5

Bu model; bağımsız paralel iki kalkış pisti ve kalkış pistlerinden birinin aynı zamanda iniş amaçlı kullanıldığı bir yapıdan oluşmaktadır. Bu modele göre iniş trafikleri kalkış kuyruğu için önemli birer etmen konumundadır. Dolayısıyla kalkış gecikmesi analizinde iniş verileri de kullanılmaktadır. İki farklı kalkış pisti ve tek fazlı yapıdan oluşan bu model çok kanallı bir kuyruk modeli örneği olup M/M/2 yapısına uymaktadır.

Model 5'e ilişkin pist kullanım konfigürasyonu aşağıda verilmekte olan şekil 6.5 ile gösterilmektedir.



Şekil 6. 9: Model 5 için pist kullanım konfigürasyonu.

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_i$$

Her bir pistin kullanım oranı;

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} = \frac{\lambda}{2\mu}$$

Kalkış için bekleyen muhtemel uçak sayısı (kalkış kuyruğunun uzunluğu);

$$L_q = \frac{\rho \alpha^s p_0}{s! (1 - \rho)^2}$$

$$L_q = \frac{\rho \alpha^2 p_0}{2 (1 - \rho)^2}$$

$$\alpha = s\rho = 2\rho$$

$$p_0 = \left[ \sum_{r=0}^{1} \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s! (1 - \rho)} \right]^{-1}$$

$$= \left[ 1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{s! (1 - \rho)} \right]^{-1}$$

$$= \left[ 1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2(1-\rho)} \right]^{-1}$$

Kalkış kuyruğunda muhtemel bekleme süresi;

$$E(W_q) = \frac{\alpha^s p_0}{s! s \mu (1-\rho)^2}$$

$$E(W_q) = \frac{\alpha^2 p_0}{2! 2 30 (1-\rho)^2}$$

Kalkış kuyruğunda hiç bekleme olmama olasılığı;

$$P(\text{bekleme olmaması}) = P(T_q = 0)$$

$$= 1 - \frac{\alpha^s p_0}{s! (1-\rho)}$$

$$= 1 - \frac{\alpha^2 p_0}{2 (1-\rho)}$$

Kalkış kuyruğunda belli bir sürenin üzerinde bekleme olasılığı;

$$P(T_q > t) = \frac{\alpha^s p_0}{s! (1-\rho)} e^{-s \mu (1-\rho)t}$$

Buna göre kalkış kuyruğunda en az 5 dakika ve en az 10 dakika bekleme olasılıkları sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$P(T_q > t) = \frac{\alpha^s p_0}{s! (1-\rho)} e^{-s \mu (1-\rho) \frac{5}{60}}$$

$$P(T_q > t) = \frac{\alpha^s p_0}{s! (1-\rho)} e^{-s \mu (1-\rho) \frac{10}{60}}$$

Model-5 ile elde edilen sistem başarımlarını parametreleri incelendiğinde düzensiz bir dağılıma yol açan veriye rastlanmamaktadır. Bu modele göre; 13 farklı saat dilimi yoğun olmayan kalkış kuyruğu ve 11 farklı saat dilimi için ise az yoğun kalkış kuyruğu öngörülmektedir. Yoğun veya çok yoğun kalkış kuyruğunun beklenmediği bu model hava trafik ünitelerince tercih edilebilecek bir yapıyı ifade etmektedir.

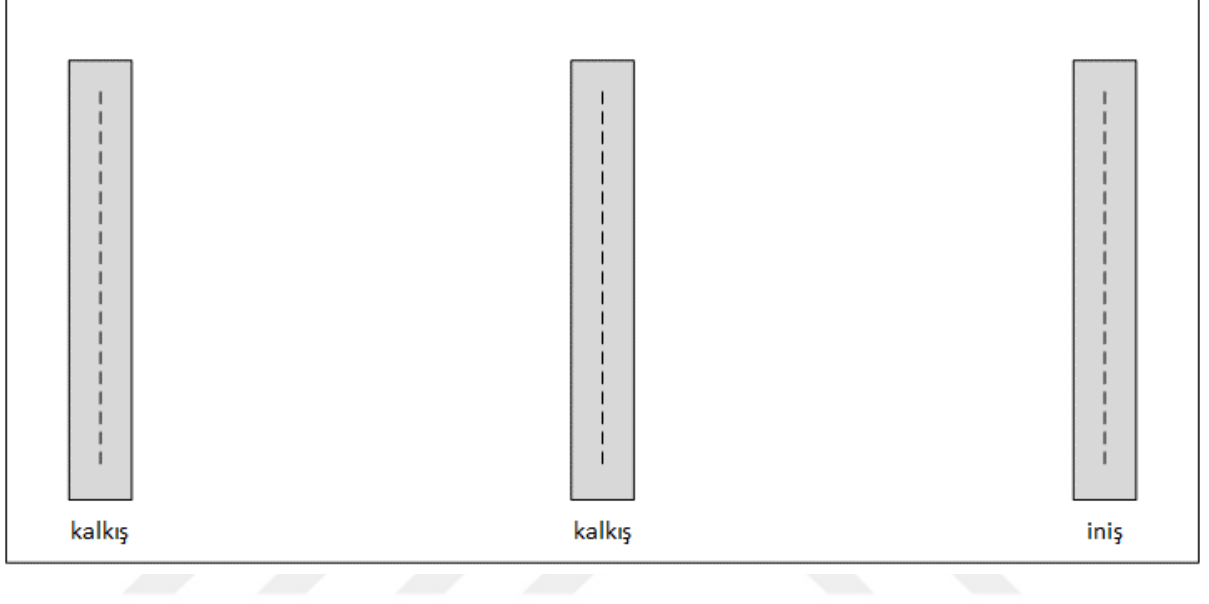
Modele ait sonuçlar hesaplanarak tablo 6.14 üzerinde sunulmaktadır.

**Tablo 6. 15:** Model-5 'e ait sistem başarımlar parametreleri.

T	$\lambda$	$\rho$	$L_q$	$E(W_q)(dk)$	$P(T_q = 0)$	$P(T_q > 5)$	$P(T_q > 10)$
00:00 - 00:59	44,239	0,552	0,349	0,474	0,717	0,014	0,000
01:00 - 01:59	44,784	0,559	0,364	0,488	0,713	0,015	0,000
02:00 - 02:59	23,677	0,295	0,050	0,126	0,880	0,001	0,000
03:00 - 03:59	10,572	0,132	0,004	0,025	0,970	0,000	0,000
04:00 - 04:59	17,435	0,217	0,020	0,069	0,927	0,000	0,000
05:00 - 05:59	39,211	0,490	0,234	0,358	0,756	0,008	0,000
06:00 - 06:59	48,936	0,611	0,499	0,612	0,682	0,023	0,001
07:00 - 07:59	55,026	0,687	0,791	0,863	0,640	0,044	0,005
08:00 - 08:59	55,735	0,696	0,835	0,899	0,636	0,048	0,006
09:00 - 09:59	48,936	0,611	0,499	0,612	0,682	0,023	0,001
10:00 - 10:59	50,083	0,626	0,544	0,652	0,674	0,026	0,002
11:00 - 11:59	60,928	0,761	1,268	1,249	0,602	0,081	0,016
12:00 - 12:59	61,719	0,771	1,356	1,319	0,598	0,087	0,019
13:00 - 13:59	62,527	0,781	1,455	1,396	0,593	0,094	0,022
14:00 - 14:59	60,272	0,753	1,200	1,195	0,607	0,075	0,014
15:00 - 15:59	62,046	0,775	1,395	1,349	0,596	0,090	0,020
16:00 - 16:59	58,311	0,728	1,023	1,053	0,619	0,062	0,010
17:00 - 17:59	59,049	0,738	1,086	1,103	0,614	0,067	0,011
18:00 - 18:59	60,045	0,750	1,178	1,177	0,608	0,074	0,014
19:00 - 19:59	61,875	0,773	1,375	1,333	0,597	0,088	0,019
20:00 - 20:59	57,371	0,717	0,949	0,993	0,625	0,056	0,008
21:00 - 21:59	51,174	0,639	0,591	0,692	0,667	0,030	0,002
22:00 - 22:59	58,390	0,729	1,029	1,058	0,618	0,062	0,010
23:00 - 23:59	58,602	0,732	1,047	1,072	0,617	0,064	0,010

### 6.8 MODEL 6

Bu model, bağımsız paralel iki kalkış ve bir iniş pistinden oluşmaktadır. Dolayısıyla kalkış trafiği açısından ki kanallı ve tek fazlı kuyruk yapısına uymakta olan bu model M/M/2 formatındadır.



Şekil 6. 10: Model 6 için pist kullanım konfigürasyonu.

Model-4 'te ifade edildiği gibi benzer olarak iniş trafiğinin pas geçme ihtimaline binaen bu modelin pratikte kullanımı bulunmamaktadır. Ancak teorik yaklaşımla, iniş trafiklerinin bulunmadığı zaman dilimleri için kullanımı mümkündür.

$$\lambda = \lambda_k$$

Her bir pistin kullanım oranı;

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} = \frac{\lambda}{2\mu}$$

Kalkış için bekleyen muhtemel uçak sayısı (kalkış kuyruğunun uzunluğu);

$$L_q = \frac{\rho \alpha^s p_0}{s! (1 - \rho)^2}$$

$$L_q = \frac{\rho \alpha^2 p_0}{2 (1 - \rho)^2}$$

$$\alpha = s\rho = 2\rho$$

$$\begin{aligned} p_0 &= \left[ \sum_{r=0}^1 \frac{\alpha^r}{r!} + \frac{\alpha^s}{s!(1-\rho)} \right]^{-1} \\ &= \left[ 1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2(1-\rho)} \right]^{-1} \\ &= \left[ 1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2(1-\rho)} \right]^{-1} \end{aligned}$$

Kalkış kuyruğunda muhtemel bekleme süresi;

$$\begin{aligned} E(W_q) &= \frac{\alpha^s p_0}{s! s \mu (1-\rho)^2} \\ E(W_q) &= \frac{\alpha^2 p_0}{2! 2 30 (1-\rho)^2} \end{aligned}$$

Kalkış kuyruğunda hiç bekleme olmama olasılığı;

$$\begin{aligned} P(\text{bekleme olmaması}) &= P(T_q = 0) \\ &= 1 - \frac{\alpha^s p_0}{s!(1-\rho)} \\ &= 1 - \frac{\alpha^2 p_0}{2(1-\rho)} \end{aligned}$$

Kalkış kuyruğunda belli bir sürenin üzerinde bekleme olasılığı;

$$P(T_q > t) = \frac{\alpha^s p_0}{s!(1-\rho)} e^{-s \mu (1-\rho)t}$$

Buna göre kalkış kuyruğunda en az 5 dakika ve en az 10 dakika bekleme olasılıkları sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\begin{aligned} P(T_q > t) &= \frac{\alpha^s p_0}{s!(1-\rho)} e^{-s \mu (1-\rho) \frac{5}{60}} \\ P(T_q > t) &= \frac{\alpha^s p_0}{s!(1-\rho)} e^{-s \mu (1-\rho) \frac{10}{60}} \end{aligned}$$

Modele ait sonuçlar hesaplanarak tablo 6.15 üzerinde sunulmaktadır.



**Tablo 6. 16:** Model-6 'e ait sistem başarımlar parametreleri.

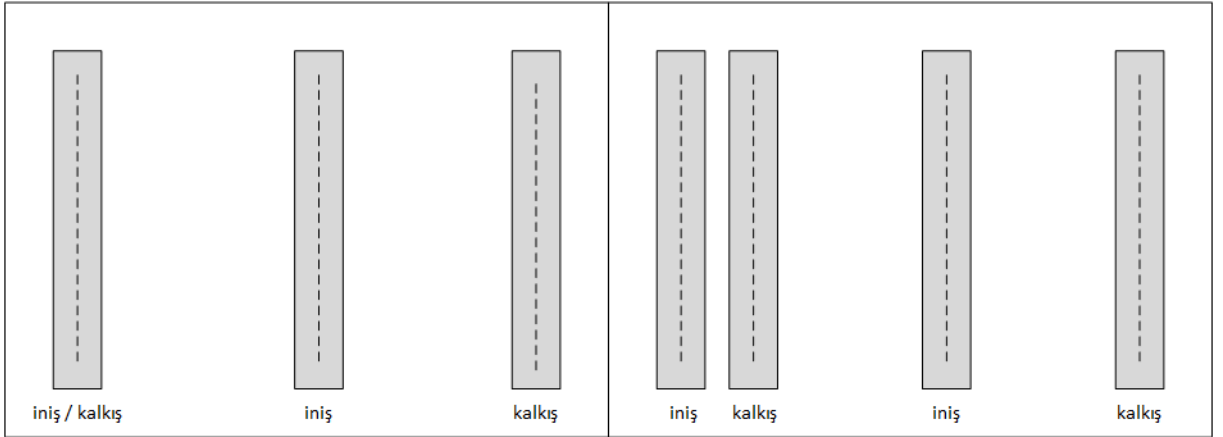
T	$\lambda$	$\rho$	$L_q$	$E(W_q)(dk)$	$P(T_q = 0)$	$P(T_q > 5)$	$P(T_q > 10)$
00:00 - 00:59	19,739	0,246	0,029	0,088	0,911	0,000	0,000
01:00 - 01:59	34,163	0,427	0,151	0,266	0,796	0,004	0,000
02:00 - 02:59	17,473	0,218	0,020	0,069	0,927	0,000	0,000
03:00 - 03:59	3,814	0,047	0,000	0,003	0,995	0,000	0,000
04:00 - 04:59	3,810	0,047	0,000	0,003	0,995	0,000	0,000
05:00 - 05:59	9,340	0,116	0,003	0,020	0,976	0,000	0,000
06:00 - 06:59	20,701	0,258	0,033	0,097	0,903	0,000	0,000
07:00 - 07:59	33,598	0,419	0,144	0,257	0,801	0,004	0,000
08:00 - 08:59	39,606	0,495	0,242	0,366	0,753	0,008	0,000
09:00 - 09:59	25,163	0,314	0,060	0,143	0,869	0,001	0,000
10:00 - 10:59	23,068	0,288	0,046	0,120	0,885	0,000	0,000
11:00 - 11:59	25,841	0,323	0,065	0,150	0,863	0,001	0,000
12:00 - 12:59	29,223	0,365	0,094	0,193	0,836	0,002	0,000
13:00 - 13:59	34,436	0,430	0,155	0,270	0,794	0,004	0,000
14:00 - 14:59	35,420	0,442	0,169	0,287	0,786	0,005	0,000
15:00 - 15:59	30,057	0,375	0,102	0,204	0,829	0,002	0,000
16:00 - 16:59	27,856	0,348	0,081	0,175	0,847	0,001	0,000
17:00 - 17:59	26,534	0,331	0,070	0,159	0,858	0,001	0,000
18:00 - 18:59	28,606	0,357	0,088	0,185	0,841	0,002	0,000
19:00 - 19:59	33,523	0,419	0,143	0,256	0,801	0,004	0,000
20:00 - 20:59	34,701	0,433	0,159	0,275	0,792	0,004	0,000
21:00 - 21:59	27,439	0,342	0,077	0,170	0,850	0,001	0,000
22:00 - 22:59	20,769	0,259	0,033	0,097	0,903	0,000	0,000
23:00 - 23:59	20,269	0,253	0,031	0,093	0,907	0,000	0,000

Tüm saat dilimleri için yoğun olmayan bir kalkış kuyruğunun beklendiği bu model, geride açıklanan yapılar içerisinde hava trafiği açısından en avantajlı olan modeli ortaya koymaktadır. Hava sahasının uygun olarak tasarlanması durumunda bu model hava trafik ünitelerince kalkış trafikleri açısından tercih edilebilecek en uygun yapıyı sunmaktadır.

### 6.9 MODEL 7

Model-5 'ten farklı olarak ilave bir bağımsız paralel iniş pistinin bulunduğu bu model M/M/2 kuyruk modeli yapısındadır. Dolayısıyla üçüncü bir pistten dolayı farklı olarak pratikte kullanımı bulunmamaktadır. Teorik olarak incelendiğinde sistem başarımları parametreleri model-5 benzer sonuçlar veren bu model için rakamsal verilere ayrıca değinilmemiştir.

Aşağıda verilmekte olan şekil 6.7 ile model-7 için kullanılabilir pist konfigürasyonları gösterilmektedir.

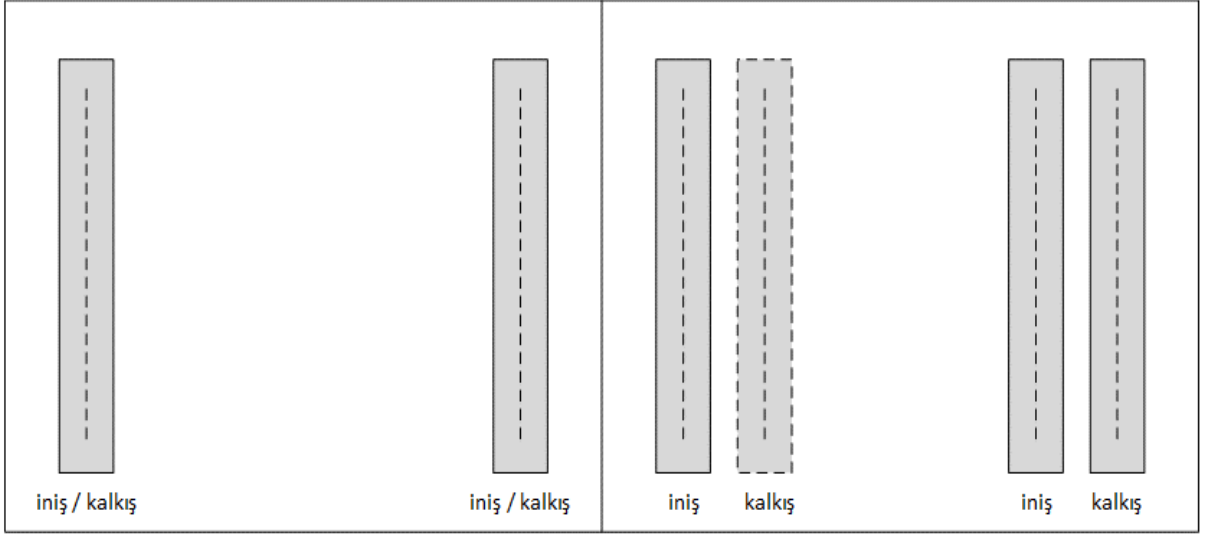


Şekil 6. 11: Model 7 için pist kullanım konfigürasyonu.

### 6.10 MODEL 8

Bu model; iniş/kalkış operasyonlarında ortak olarak kullanılan bağımsız paralel iki pistten oluşmaktadır. İki kanallı ve tek fazlı yapıdaki bu model M/M/2 kuyruk modeline uymaktadır.

Aşağıda verilmekte olan şekil 6.8 ile model-8 için kullanılabilir pist konfigürasyonları gösterilmektedir.



**Şekil 6. 12:** Model 8 için pist kullanım konfigürasyonu.

Bu model için model-5'ten farklı olarak her iki pist de iniş ve kalkış operasyonları için tahsis edilmiştir. Dolayısıyla buna paralel olarak pratik kullanımda model-5 için her iki pistin kalkış trafiği açısından kullanımını eşit değil iken, model-8 de bu durum ortadan kalkmaktadır.

Teorik olarak incelendiğinde bu yapı da model-5 ile benzer sonuçlar vermekte olup rakamsal analize ayrıca değinilmemiştir.

### 6.11 KURULAN MODELE İLİŞKİN SONUÇLAR

Hava trafiğinin akışı son derece dinamik olup, mevcut hava trafiğinin gerekliliklerinin yanı sıra çevresel etmenlere de bağlı olarak pist kullanım usulleri değişkenlik gösterebilmektedir. Bununla beraber hava limanlarının tasarımı birbirlerinden farklı olup, bununla ilişkili olarak birbirinden farklı lokal usuller de ortaya çıkabilmektedir. Dolayısıyla bağımsız paralel 3 pist içeren İstanbul Havalimanı için mevcut pistler ve hava sahasına binaen kullanılacak yapılar ve bu yapılar sonucunda ortaya çıkan kalkış kuyruk modelleri geride detaylı olarak incelenmiştir.

Aşağıda verilmekte olan tablo 6.16, kalkış kuyruk uzunluğuna göre oluşturulan yoğunluk skalası modelini özetlemektedir.

**Tablo 6. 17:** Kuyruk uzunluğuna göre belirlenen yoğunluk analizi.

	KALKIŞ KUYRUĞU UZUNLUĞU ( $L_q$ )				
	$L_q < 1$	$1 \leq L_q < 3$	$3 \leq L_q < 10$	$L_q > 10$	$\rho \geq 1$
YOĞUNLUK	Yoğun olmayan kuyruk	Az yoğun kuyruk	Yoğun kuyruk	Çok yoğun kuyruk	Sürekli artan kuyruk

Tablo 6.16 ile gösterilen metot kullanılarak oluşturulan modeller ile ilgili elde edilen sonuçların karşılaştırması ve modellerin birbirlerine göre başarımlarının yorumlanması mümkün olmaktadır.

Buna göre; 20 farklı saat dilimi için sürekli artan kuyruk öngörüsü ile Model-1 en yoğun model olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla beraber gün içerisinde sadece 3 farklı saat diliminde yoğun olmayan kalkış kuyruğu beklenirken, bu değer diğer modellere nazaran en düşük seviyede kalmaktadır.

Model-6, tüm saat dilimleri için yoğun olmayan bir kalkış kuyruğu oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu model, incelenen tüm modeller içerisinde başarımların parametresi en yüksek olan model olarak karşımıza çıkmaktadır.

Diğer modellere ilişkin sıralama ise yoğun olmayan saat dilimlerinin miktarına göre belirlenmiştir. Buna göre bu modellere ilişkin başarımların parametreleri incelendiğinde; 13 adet yoğun olmayan, 11 adet az yoğun saat dilimi ile model-5 başarımların sıralamasında ikinci sırada bulunmaktadır. Model-5'i ise sırasıyla; model-2 (9 yoğun olmayan ve 8 az yoğun saat dilimi, 6 yoğun saat dilimi, 1 çok yoğun saat dilimi, sürekli artan kuyruk yok) ve model-3 (4 yoğun olmayan saat dilimi, 3 yoğun saat dilimi, 5 çok yoğun saat dilimi, 12 sürekli artan kuyruk) takip etmektedir.

Aşağıda verilmekte tablo-6.18 'de, oluşturulan tüm modellerin yoğunluk analizi özetlenmektedir.

**Tablo 6. 18:** İstanbul Havalimanı için kalkış kuyruk modeli karşılaştırmalı analiz.

		KUYRUK YAPISI				
		Yoğun olmayan	Az yoğun	Yoğun	Çok yoğun	Sürekli artan
<b>MODEL</b>	<b>Model 1</b>	3	-	-	1	20
	<b>Model 2</b>	9	8	6	1	-
	<b>Model 3</b>	4	-	3	5	12
	<b>Model 4</b>	Model-2 ile aynı				
	<b>Model 5</b>	13	11	-	-	-
	<b>Model 6</b>	24	-	-	-	-
	<b>Model 7</b>	Model-5 ile aynı				
	<b>Model 8</b>	Model-5 ile aynı				

## 7. KURULAN MODELE AİT SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 7.1 KURULAN MODELİN LİMİTLERİ VE AVANTAJLARI

Tarihsel olarak bakacak olursak, en temel bir bakış açısıyla kuyruk modellerine çözümün genelde fiziksel ve anlık olduğunu görmekteyiz. Günümüzde artık birçok alanda karşılaşmış olduğumuz kuyruk modelleri yeni bir kavram olmaktan öte, etkinlik bağlamında çözüm bekleyen bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Zira iyi bir kuyruk yönetiminin, müşteri memnuniyetini artırması, çalışanların yoğunluğunu azaltması (insan veya makina) gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, farklı sahalara uyarlanan kuyruk modeli yapıları birçok akademik çalışma ve pratik araştırmaya da konu olmaktadır.

Uçak trafik yoğunluğu yüksek olan meydanlar incelendiğinde (özellikle günlük trafik sayısı 1000'i aşan hub limanlar) uçuş süresinin önemli bir kısmının kalkış meydanında vakit kaybı olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Trafik yoğunluğu yüksek olan saat dilimlerinde, uçak park yerinde başlayan bekleme süreleri, uzun süren taksi hareketi ve pist başında uzun kalkış kuyruklarının oluşması gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla yoğunluğun yüksek olduğu zamanların etkin bir biçimde planlanması hava trafik ünitelerince öncelik oluşturmaktadır. Bununla beraber, beklemelelerdeki artış hava trafik operasyonlarında aksamalara yol açarken, zincirleme olarak uçak işleticisi şirketlere de olumsuz olarak yansıtacak; yüksek yakıt tüketimi, planlanan seferlerin aksaması ve müşteri memnuniyetinde azalma gibi etkilere yol açacaktır. Tüm bunlara ilave olarak, yüksek yoğunluğa dayalı olarak, yüksek yakıt tüketiminin ortaya çıkması, artan gürültü kirliliği çevresel açıdan da negatif bir sonuç oluşturacaktır. Bu bağlamda, farklı birçok sahada da tecrübe edildiği üzere kuyruk yönetimi kavramı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmamızda da, İstanbul Havalimanı'nın uçak kalkış operasyonları kuyruk modeli yaklaşımı ile incelemesi yapılmış ve karşılaşılabilecek olumsuzlukların önceden belirlenmesi ve çözüm odaklı planların oluşturulması amaçlanmıştır.

Yapmış olduğumuz çalışmada öncelikle İstanbul Havalimanı'nın ortalama günlük trafik sayısı tespit edilmiştir. Bu amaçla 9 aylık bir süreyi kapsayan günlük iniş-kalkış trafik verisine ulaşılmış ve bu veri istatistik paket programı kullanılarak ortalama değere indirgenmiştir. Bilindiği üzere istatistiksel açıdan doğru bir sonuca ulaşmak için verilerin uzun vadeli periyotlarda incelenmesi gerekmektedir. Bu nokta itibarıyla, 29 Ekim 2018 tarihinde hizmete açılan İstanbul Havalimanı'nın aktif fazlarıyla beraber tam fonksiyonlarıyla hizmete girmesi Nisan 2019 tarihine kadar sürmüştür. Ayrıca hâlihazırda kargo trafiği bakımında aktif olarak

kullanılan Atatürk Havalimanı, İstanbul Havalimanı'nın potansiyel kargo trafiğini paylaşmaktadır [95]. Bu durum hava trafiği açısından kullanılabilir kapasiteyi sınırlı kılmıştır. Bununla beraber 2019 yılı sonu itibariyle tüm dünyayı etkisi altına alan Covid-19 salgını nedeniyle hava taşımacılığı dünya genelinde olumsuz etkilenmiş ve günlük uçuş rakamlarında büyük düşüşler yaşanmıştır. Dolayısıyla, incelemiş olduğumuz kuyruk modeli için kullanabileceğimiz veri seti yaklaşık olarak 9 aylık süre ile limitli kalmıştır.

Mevcut çalışma ile ilgili diğer bir kısıtlama ise saatlik pist kapasitelerinin tespiti olmuştur. Hava trafiği ile ilgili kapasite planlamaları ve trafik analizi, uçuş yapacak trafiklerin türbülans kategorilerine göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; geniş gövde bir uçağın ardından kalkış yapacak olan dar gövde uçak için ayırma değerleri artmakta iken, dar gövde bir uçağın arkasından kalkış yapacak diğer bir dar gövde uçak için ise ayırma değerleri daha düşük kalmaktadır. Dolayısıyla uçak tipleri ile ilişkili olarak bir saatlik dilimde hizmet verilebilecek uçak adedi değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada ise kurulan modelin yapısı itibariyle uçak tipleri ile ilgili ayrı bir kıstas belirlenmemiştir. Bunun yerine uzun periyotlu trafik analizi yapılarak tüm uçaklar için ortalama bir ayırma değeri, dolayısıyla hizmet süresi tespit edilmiştir.

Hava trafiğinin en etkin bir biçimde sevk ve idaresi, mevcut trafik yükünün en iyi şekilde analiz edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu noktada, oluşturulan kuyruk modeli İstanbul Havalimanı için saatlik bağlamda beklenen trafik yükünün analizi açısından temel bir veri sunmaktadır. Buna göre, pist başı yoğunluk analizi yapılarak kabul edilebilir rakamların üzerindeki gecikmeler önceden tespit edilebilecektir. Örneğin; hava trafik ünitelerince pist başında olması istenen maksimum uçak adedi, ya da uçak işleticileri tarafından pist başından harcanması kabul edilebilecek maksimum zaman miktarı tespit edilebilecektir. Dolayısıyla bu değerlerin üzerindeki hava trafiğine hizmet, park pozisyonunda sıra bekleme usulüne göre yapılabilecektir. Böylelikle uçakların; dolayısıyla da uçuş ekibi ve yolcuların kalkış öncesi uzun süren beklemeleri engellenmiş olacaktır. Öte yandan, uzun uçak kuyruklarının ve uzun süren beklemelerin yol açtığı yakıt emisyonlarının da önüne geçilebilecek, çevresel zarar minimize edilebilecektir. Özetle zamanın verimli bir şekilde kullanımı; yolcu memnuniyetinde artış, kullanılan kaynaklarda (yakıt tüketimi, personel planlama gibi) verimlilik ve çevresel zararın indirgenmesi gibi sonuçlara katkı sağlayacaktır.

## 7.2 İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Mevcut çalışmanın hava trafiğine yönelik en önemli katkısı, zaman yönelik trafik analizi ve bununla ilişkili olarak da zaman bazında planlamanın mümkün olması şeklindedir. Oluşturulan model, mevcut trafik yüküne ilişkin yoğunluk analizini ve performans parametrelerini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yoğunluğun yüksek ve verimliliğin düşük olduğu saat dilimlerinin tespiti, bu saat dilimlerine yönelik daha etkin trafik planlamasının yapılması mümkün olabilecektir. Oluşturulan model, zaman bağlamında trafik yönetimi hususunda önemli bir veri teşkil etmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında, güncel trafik verisine yönelik performans parametrelerini yansıtan bir veri tabanı oluşturulması mümkün olabilecektir. Yazılımsal destek ile hava trafiğine yönelik planlama mümkün olabilecektir. Kabul edilebilir gecikme miktarlarına göre trafiğe hizmet sağlanırken, diğer trafikler sistem üzerinde sıralama yöntemine tabi tutulabilecektir. Yine gerektiği durumlarda gecikme analizine göre öngörülen hizmet zamanının ilgili trafiklere iletilmesi mümkün olabilecektir.

Bu çalışmada kurulan model uçakların pist başı beklemlerine yönelik veri sunarken, push-back ve taksi hareketine yönelik herhangi bir veri sunmamaktadır. Bununla ilgili olarak uçakların körükten çıkarak kalkışlarını tamamladıkları, dolayısıyla tüm yer hareketlerinde harcadıkları zamanın analizi ileriki çalışmalara konu olacaktır. Bu amaçla, kalkış anına dek harcanan zamanın analizi için optimizasyon uygulamalarına başvurulacaktır.



## KAYNAKÇA

1. *History of Aviation*. 2021 [cited 2021 16 Mayıs ]; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_aviation](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aviation).
2. *Asia/Pacific Regional Air Traffic Flow Management Concept of Operations*. 2015, ICAO Asia and Pacific Office: Bangkok.
3. *Queueing Theory*. [cited 2021 20 April]; Available from: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Queueing\\_Theory](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Queueing_Theory).
4. BATUR, B.S., *Hava Yolcu ve Kargo Taşımacılığı: Dünya'da ve Türkiye'de Uygulamalar*, in *Sosyal Bilimler Enstitüsü - İşletme Anabilim Dalı*. 2008, Dokuz Eylül Üniversitesi.
5. ULAŞ, M., *İki Hizmet Kanalına Sahip Kuyruk Sistemlerinin Analizi*, in *Fen Bilimleri Enstitüsü - İstatistik Anabilim Dalı*. 2007, Fırat Üniversitesi.
6. Şimşek, H., *Kuyruk Teorisinin İstanbul Boğazi Tanker ve Gemi Geçişleri ile Haydarpaşa Limanı Konteyner Terminaline Uygulanması*, in *Fen Bilimleri Enstitüsü*. 2004, İstanbul Teknik Üniversitesi.
7. KİREMİTÇİ, S., *Denizyolu Yük Taşımacılığında Rotalama ve Çizelgeleme*, in *Sosyal Bilimler Enstitüsü - İşletme Anabilim Dalı*. 2011, İstanbul Üniversitesi.
8. PARLAK, Ş., *Hastane Randevu Sisteminin Hastalar Açısından Değerlendirilmesi*, in *Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Sağlık Yönetimi Anabilim Dalı*. 2008, Necmettin Erbakan Üniversitesi: Konya.
9. SZTRIK, D.J., *Basic Queueing Theory*. 2012: Universty of Debrecen - Faculty of Informatics.
10. CHAVES, C.R., *Approximation for Single-channel Multi-server Queues and Queueing Networks with Generally Distributed Inter-arrival and Service times*, in *Engineering Management and Systems Engineering*. 2016, Missouri University of Science and Technology.
11. RESING, I.A.J., *Queueing Systems*. 2015, Eindhoven, The Netherlands: Department of Mathematics and Computing Science Eindhoven University of Technology.
12. ÖZÇİL, İ.E.B.B.A., *İki Bankanın Farklı Şubelerindeki Müşteri Bekleme Sürelerinin Kuyruk Modeliyle Etkinlik Analizi*. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2015. **5**(1): p. 275-292.
13. Manoharan, S.M.P., *Analysis of a M/M/c Queue with Single and Multiple Synchronous Working Vacations*. Applications and Applied Mathematics: An International Journal (AAM), 2017. **12**(2): p. 671-694.
14. ARSLAN, M.S.Y.H.M., *Bekleme Hattı Modeliyle Servis Sisteminin Analizi: Düzce Üniversitesi Merkez Yemekhanesi Örneği*. Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 2013. **21**.
15. PALANIVEL, S.M.C.P.M., *A Study on Stages of Queueing System in Aircraft Control System*. 3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme, 2020.
16. TANG, S.L.Y., *Performance Analysis of a Discrete-Time Queue with Working Breakdowns and Searching for the Optimum Service Rate in Working Breakdown Period*. Journal of Systems Science and Information, 2017. **5**(2): p. 176-192.
17. CHOI, D.-U.K.M.-S.J.W.-H., *Airport Simulation Based on Queueing Model Using ARENA*. International Journal of Advanced Science and Technology, 2018. **115**: p. 125-134.
18. NNEKA, N.A.A.a.A.E., *Queueing Modelling of Air Transport Passengers of Nnamdi Azikiwe International Airport Abuja, Nigeria Using Multi Server Approach*. Middle-East Journal of Scientific Research, 2014. **21**(12).
19. SMITH, D.K., *Calculation of Steady-State Probabilities of M/M Queues: Further Approaches*. journal of Applied Mathematics and Decision Sciences, 2002. **6**(1): p. 43-50.
20. ZEHMED, F.J.M.K.K.A.I.M.Y.F.N.L.K., *Queueing Model for Improving Airport Passengers Treatment Process*, in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 2018: Paris- France.

21. ŞAHİN, N.G.B., *Spor Tesislerinde Kuyruk Modeline Yönelik Bir Benzetim Uygulaması*. Hacettepe Journal of Sport Sciences, 2007. **18**(1): p. 13-30.
22. JAIN, R.K.B.K.S.S., *An M/M/1/N Feedback Queueing System with Reverse Balking*. Journal of Reliability and Statistical Studies, 2015. **8**(1): p. 31-38.
23. FALIN, J.A.a.G., *Standart and Retrial Queueing Systems: a Comparative Analysis*. Revista Matematica Complutense, 2002. **15**(1): p. 101-129.
24. SHAFI, P.J.S.A.F.P.A.D.M., *Analysis of the M/M/N/N Queue with Two Types of Arrival Process: Applications to Future Mobile Radio Systems*. Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences, 2011.
25. ISIJOLA, O.C.I.O.A., *M/M/1 Multiple Vacation Queueing Systems with Differentiated Vacations*. Hindawi Publishing Corporation - Modelling and Simulation in Engineering 2014. **Volume 2014**: p. 6.
26. VERBRUGGEN, N.V.T.V.W.A., *A Queueing Based Traffic Flow Model*. Transportation Research-D: Transport and environment, 2000. **5**(2): p. 121-135.
27. KUMAR, R., *A Transient Solution to the M/M/c Queueing Model Equation with Balking and Catastrophes*. Croatian Operational Research Review, 2017. **2017**(8): p. 577-591.
28. ZHU, S.W.L., *A Dynamic Queueing Model*. The Chinese Journal of Economic Theory, 2014. **1**: p. 14-35.
29. SHARMA, A.K.S.R.K.G.K., *Queueing Theory Approach with Queueing Model: A Study*. International Journal of Engineering Science Invention, 2013. **2**(2).
30. ZEGHAL, R.C.E.H.A.T.K., *An Extended Analysis of Sequencing Arrivals at Three Major European Airports*, in *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. 2018: Atlanta - Georgia (USA).
31. KAMMOUN, H.M.T.D.H., *Solving of Waiting Lines Models in the Airport Using Queueing Theory Model and Linear Programming the Practice Case : A.I.M.H.B*, in *HAL*. 2008.
32. CHEW, S., *Continuous-Service M/M/1 Queueing Systems*. Applied System Innovation, 2019. **2**(16).
33. WINSTON, W.L., *Operations Research: Applications and Algorithms*. 2nd ed. 1991: PWS Kent Publishing.
34. AWASTHI, B., *Performance Analysis of M/M/1/K Finite Capacity Queueing Model with Reverse Balking and Reverse Reneging*. Journal of Computer and Mathematical Sciences, 2018. **9**(7): p. 850-855.
35. SETHI, B.K.S.S., *An M/M/1/N Queueing system with Encouraged Arrivals*. Global Journal of Pure and Applied Mathematics, 2017. **13**(7): p. 3443-3453.
36. BHATHAWALA, N.J.P., *Application of Queueing Theory to Airport Related Problems*. Global Journal of Pure and Applied Mathematics, 2017. **13**(7): p. 3863-3868.
37. YAZGAN, O.Ç.A.E., *Hizmet Üreten Bir Sistemin Bekleme Hattı (Kuyruk) Modeli ile Etkinliğinin Ölçülmesi*. Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2008. **1**(2): p. 119-128.
38. MUTHULAKSHMI, T.P.S., *Control chart for waiting time in system of (M/M/s) : (∞ / FCFS) Queueing model*. IOSR Journal of Mathematics (IOSR-JM), 2013. **5**(6): p. 48-53.
39. MASSEY, W.A., *Asymptotic Analysis of the Time Dependant M/M/1 Queue*. Mathematics of Operations Research, 1985. **10**(2).
40. ODoni, H.R.I.B.D.I.A.W.D.H.J.-P.C.R.J.H.E.F.A.R., *Observations of Departure Processes At Logan Airport to Support the Development of Departure Planning Tools*. 1999.
41. ZOGRAFOS, R.S.K.G.K., *Stochastic Modelling of Aircraft Queues: A Review*, in *OR60 Annual Conference*. 2018: UK.
42. JOSHI, S.K.T.V.K.G.T.N., *M/M/S Queueing Theory Model to Solve Waiting Line and to Minimize Estimated Total Cost*. International Journal of Science and Research (IJSR), 2016. **5**(5).

43. SESHAIH, H.B.T.C.V., *A Queueing Model for Airport Capacity and Delay Analysis*. Applied Mathematical Sciences, 2014. **8**: p. 3561 - 3575.
44. NAKAZATO, D.J.B.D., *Transient and Busy Period Analysis of the GI/G/1 Queue: The Method of Stages*. Queueing Systems 10, 1992: p. 153-184.
45. Castro-GUTIERREZ, D.K.J.A.D.A.A.J.P.J., *Lessons from Building an Automated Pre-departure Sequencer for Airports*. 2015, Springer Science+Business Media: New York.
46. AYDIN, A., *Metasezgisel Yöntemlerle Uçak Çizelgeleme Problemi Optimizasyonu*, in *Ekonometri Anabilim Dalı*. 2009, Marmara Üniversitesi: İstanbul.
47. ARSLAN, Ş., *Uçakların Terminal Kapılarına Atanması Probleminin Farklı Yöntemlerle Çözümü ve Uygulaması*, in *Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı - Endüstri Mühendisliği Programı*. 2011, Yıldız Teknik Üniversitesi: İstanbul.
48. DOĞAN, H.B., *Beklenmedik Uçak Yönlendirmelerini Azaltma: Zaman Serisi Analizi ve Yapay Sinir Ağları ile Modelleme*, in *Fen Bilimleri Enstitüsü - Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı*. 2019, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi.
49. ÇALLIOĞLU, T., *Bulamık Mantık Kontrol Tekniği Kullanarak Pist Planlama İçin Uçak Tipine Göre İniş Önceliklendirme*, in *Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*. 2019, Gazi Üniversitesi: Ankara.
50. ÇINTAŞ, E., *Anlamsal Ağ ve Hareketli Nesne Veri Tabanı Kullanılarak Savaş Uçakları İçin Anlık Rota Önerme Sistemi*, in *Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı*. 2018, Atatürk Üniversitesi: Erzurum.
51. GÜLER, B., *Aircraft Parking Optimization Using Genetic Algorithm*, in *Department of Mathematical Engineering*. 2017, İstanbul Technical University: İstanbul.
52. GÜÇLÜ, O.E., *Havaalanlarında Uçak Park Yeri Tahsisi ve Taksi Hareketleri Optimizasyonu*, in *Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı*. 2015, Anadolu Üniversitesi: Eskişehir.
53. ALDEMİR, B., *Uçak İnişlerinin Gerçek Zamanlı Çizelgelenmesinin Tasarımı ve Simülasyonu*, in *Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı*. 2018, Ankara Üniversitesi: Ankara.
54. BAYAR, S., *ICAO Uçak Kategorilerine Göre Tek Pist Sistemi İçin Kapasite Hesaplamalarında Kullanılacak Analitik Bir Model*, in *Hava Trafik Kontrol Ana Bilim Dalı*. 2013, Anadolu Üniversitesi: Eskişehir.
55. GÜRKAN, H., *An Integrated Approach for Robust Airline Scheduling, Aircraft Fleeting and Routing with Cruise Speed Control*, in *Department of Industrial Engineering*. 2014, Bilkent University: Ankara.
56. KİRAZOĞLU, N., *Solving Aircraft Routing Problem with Integer Programming*, in *Industrial Engineering*. 2009, Bahçeşehir University: İstanbul.
57. ATKIN, J.A.D., *On-line Decision Support for Take-off Runway Scheduling at London Heathrow Airport*, in *Doctor of Philosophy*. 2008, University of Nottingham.
58. LI, G., *Empirical Investigations of Properties of Robust Aircraft Routing Models in Industrial Engineering*. 2015, University of Illinois: Urbana, Illinois.
59. RAVIZZA, S., *Enhancing Decision Support Systems for Airport Ground Movement*, in *School of Computer Science*. 2013, University of Nottingham.
60. HAFNER, F.B., *Improving Airline Schedule Reliability Using A Strategic Multi-Objective Runway Slot Assingment Search Heuristic*, in *Department of Industrial Engineering and Management Systems*. 2008, University of Central Florida: Orlando, Florida.
61. MESGARPOUR, M., *Airport Runway Optimization*, in *Faculty of Social and Human Sciences*. 2012, University of Southampton: Southampton. p. 185.
62. JADHAV, A.V., *Modelling of Ground Operations Using End-Around (Perimeter) Taxiways for the Modernized Chicago O'Hare International Airport*, in *Master of Science in Aerospace Engineering*. 2013, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, Illinois.
63. BURGAIN, P., *On The Control of Airport Departure Operations*, in *School of Electrical and Computer Engineering*. 2010, Georgia Institute of Technology.

64. RIDDLE, K.T., *Integration of Automated Decision Aids with a Prototype Air Traffic Control Interface in Support of Time-Based Surface Operations*, in *Master of Science in Human Factors*. 2012, University of Illinois: Urbana-Champaign.
65. LEE, H., *Airport Surface Traffic Optimization and Simulation in the Presence of Uncertainties*, in *Aeronautics and Astronautics*. 2014, Massachusetts Institute of Technology.
66. ŞAHİN, Y., *Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi İçin Metasezgisel Yöntemler: Bilimsel Yazın Taraması*. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2014. **19**(4): p. 337-355.
67. ARSLAN, H.R.Y.S.E.C., *Talep ve Kapasite Kısıtlı Optimizasyon Problemi İçin Yeni Bir Melez Algoritma*. Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Dergisi, 2014. **25**(1-2): p. 16-28.
68. AKSARAYLI, O.P.M., *Çok Amaçlı Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi Çözümünde Bir Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması Yaklaşımı*. The Journal of Operations Research, Statistics, Econometrics and Management Information Systems, 2018. **6**(1).
69. ÇETİN, C.T.N.B.T.E.H.M.A.S., *Evde Sağlık Hizmetlerinde Araç Rotalama ile Güzegahların Belirlenmesi; Devlet Hastanesinde Bir Uygulama*. Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi, 2018. **4**(3): p. 264 -283.
70. Cemre TAŞ; Neşet BEDİR, K.Y., Hacı Mehmet ALAKAŞ, Tamer EREN, Suna ÖZEL ÇETİN, *Yaşlılara Bakım Hizmetinde En Uygun Rotanın Belirlenmesi*. Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi (KÜSBD), 2019. **9**(2): p. 391-402.
71. OKTAL, A.Ö.H., *Tek Aşamalı Ana Dağıtım Üssü Yerleşim Problemine Yeni Bir Yaklaşım ve Hava Kargo Uygulaması*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2013. **19**(2): p. 68-75.
72. TUNCER, V.Ç.A., *İnsansız Hava Araçları İçin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Rota Planlama*. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2017: p. 259-265.
73. YAPICIOĞLU, H., *Zaman Kısıtları Altında Çok Periyotlu Çoklu Gezgin Satıcı Problemi*. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2014. **15**(2): p. 113-124.
74. ZHANG, Y.J.Z.L.H., *A Collaborative Optimization Model for Ground Taxi Based on Aircraft Priority* 2013, Hindawi Publishing Corporation - Mathematical Problems in Engineering. p. 9.
75. LUO, Y.J.X.X.H.Z.Y., *Taxiing Route Scheduling between Taxiway and Runway in Hub Airport*. Hindawi Publishing Corporation - Mathematical Problems in Engineering, 2015. **Volume 2015**: p. 14.
76. LUO, Y.J.Z.X.X.Z.L.Y., *A Schedule Optimization Model on Multirunway Based on Ant Colony Algorithm*. Mathematical Problems in Engineering, 2014. **Volume 2014**: p. 14.
77. ZHOU, H. and X. JIANG, *Multirunway Optimization Schedule of Airport Based on Improved Genetic Algorithm by Dynamical Time Window*. Mathematical Problems in Engineering, 2015. **Volume 2015**: p. 12.
78. JIAN-LIN, S.J.-Y.H.J.-L.C.Y.-Y.W.P.-Y.J., *Flexible Bus Route Optimization for Multitarget Stations*. Hindawi Mathematical Problems in Engineering. **2020**: p. 8.
79. VISER, P.C.R.H.G., *Optimal Airport Surface Traffic Planning Using Mixed Integer Linear Programming*. International Journal of Aerospace Engineering, 2018. **Volume 2008**: p. 11.
80. HONG, Y.E.D.J.H.L.Y.C.J.Z.Z.M.J.H.K.E.O.S., *Optimization of Airport Surface Traffic: A Case-study of Incheon International Airport*, in *17th AIAA Aviation Technology, Integrations and Operations Conference*. 2017: Denver, Colorado.
81. CURREN, V.H.-H.S.H.H.G.V.R., *An Optimization Framework For Route Design and Allocation of Aircraft to Multiple Departure Routes*. Elsevier Journal - Transportation Research Part D, 2019: p. 273-288.
82. BALOUKI, Y.D.B.B.A., *Bidirectional Search Algorithm for Airport Ground Movement*, in *International Arap Conference on Information Technology*. 2020. p. 9.
83. BALOUKI, Y.D.M.B.B.B.A., *Conflict Distribution Prediction and Optimization of Aircraft in Ground Movements*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2020. **Volume 98**(4): p. 21.

84. JUNG, S.R.J.M.Y., *An Optimization Model for Reducing Aircraft Taxi Times at the Dallas Fort Worth International Airport*, in *26th International Congress of Aeronautical Sciences*. 2008: Alaska - USA. p. 14.
85. TSAO, T.-C.W.C.-H., *Time-Based Separation for Aircraft Landing Using Danger Value Distribution Flow Model*. Hindawi Publishing Corporation - Mathematical Problems in Engineering, 2012. **2012**: p. 16.
86. LIU, X.D.M.H.W.T.H., *Modeling Congestion Propagation in Multistage Schedule within an Airport Network*. Hindawi - Journal of Advanced Transportation, 2018. **Volume 2018**: p. 11.
87. KANG, H.I.J.-P.C.R.B.L., *Queuing Model for Taxi-Out Time Estimation*. 2016. **10(1)**.
88. KOYUNCU, B.B.E., *Demand and Capacity Balancing Through Probabilistic Queuing Theory and Garound Holding Program for European Air Transportation Network*. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2017. **18(2)**: p. 360-374.
89. SCHNEIDEWIND, N., *Software Development Queuing Model*, in *ATC Quarterly 2010*. 2012.
90. *Air Traffic Services*, in *Manual of Air Traffic Services – Part 1*. 2017. p. Section 1 Chapter 1 - page 1-2.
91. NOLAN, M.S., *Fundamentals of Air Traffic Control*. 2011, International Code Council: USA.
92. ŞEN, Ö.G.G., *Hava Trafik Kuralları Ders Notları*. İstanbul Aydın Üniversitesi Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği Bölümü.
93. *Annex 14 - Aerodromes*. Vol. 1. 2016, Canada: ICAO - International Civil Aviation Organization.
94. *Istanbul Ataturk Airport*. 2021 [cited 2021 25]; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Istanbul\\_Ataturk\\_Airport](https://en.wikipedia.org/wiki/Istanbul_Ataturk_Airport).
95. *Istanbul Airport*. 2021 [cited 2021 28/03]; Available from: [https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0stanbul\\_Havaliman%C4%B1](https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0stanbul_Havaliman%C4%B1).
96. *İnşaat*. 2020; Available from: <http://iga.phools.net/istanbul-yeni-havalimani/insaat/>.
97. *AIP Turkey*. 2021, DHMİ.
98. *Air Travel*. [cited 2021 20 April]; Available from: [en.m.wikipedia.org/wiki/Air\\_travel](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Air_travel).
99. *Aviation - Wikipedia*. 2021.
100. CANGÖZ, N., *Yabancıların Havayolu Ulaşımını Tercih Etme Nedenleri: Türkiye'ye Ait Havayolu İşletmeleri Üzerine Bir Araştırma*. Dergipark, 2018: p. 196,213.
101. *The Founding of IATA*. IATA, 2021.
102. *International Civil Aviation Organization*. 2021.
103. *Annual World Air Traffic Report - WATR 2019*. 2021.
104. *Ülkemizde Sivil Havacılık*, in *Havayolu Taşımacılığı*. 2011, MEB: Ankara.
105. *Havalimanları Karşılaştırmalı İstatistikleri*. 2021.
106. SHARMA, A.K., R. KUMAR, and G.K. Sharma, *Queueing Theory Approach with Queueing Model: A Study*. International Journal of Engineering Science Invention, 2013: p. 1.
107. Troitzsch, K.G., *Characteristics of Queuing Models*, in *Queuing Models and Discrete Event Simulation*. 2000, SICSS Summer School 2000: Germany.
108. Notes, D.N.N.L., *Operations Research - Queueing Theory*.
109. *Exponential distribution*. [cited 2021 20 April]; Available from: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Exponential\\_distribution](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Exponential_distribution).
110. BHAT, N.U., *An Introduction to Queueing Theory*. 2008: Birkhauser.
111. *Doc 4444 - Air Traffic Management*. 16th edition ed. 2016: ICAO.

## ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı	İsmail
Soyadı	DEMİRHAN

## EĞİTİM BİLGİLERİ

LİSANS	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

YÜKSEK LİSANS	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı
Programı	Akıllı Ulaşım Sistemleri Programı
Mezuniyet Yılı	2021

MAKALE VE BİLDİRİLER
İsmail Demirhan, Abit Balın, Abdullah Okumuş, 2021, An Overview of Air Traffic and Effective Air Traffic Control Strategies for Istanbul Airport, Journal of Transportation and Logistics, 6(1), 107-124