

**ICAO UÇAK KATEGORİLERİNE GÖRE TEK PİST  
SİSTEMİ İÇİN KAPASİTE HESAPLAMALARINDA  
KULLANILACAK ANALİTİK BİR MODEL**

Serkan Bayar  
Yüksek Lisans Tezi

Hava Trafik Kontrol Ana Bilim Dalı

Eylül 2013

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Serkan Bayar'ın “ICAO Uçak Kategorilerine Göre Tek Pist Sistemi İçin Kapasite Hesaplamalarında Kullanılacak Analitik Bir Model”** başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi; 17.09.2013 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı) :	<b>Prof.Dr.AYDAN CAVCAR</b>	.....
Üye :	<b>Yard.Doç.Dr.ERTAN ÇINAR</b>	.....
Üye :	<b>Yard.Doç.Dr.HAKAN KORUL</b>	.....

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun**  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Enstitü Müdürü**



## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## ICAO UÇAK KATEGORİLERİNE GÖRE TEK PİST SİSTEMİ İÇİN KAPASİTE HESAPLAMALARINDA KULLANILACAK ANALİTİK BİR MODEL

Serkan BAYAR

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aydan CAVCAR  
2013, 67 sayfa

Havaalanları, havayolu ulaştırma sistemi içerisinde uçuşların başladığı ve bittiği yerler olarak önemli bir yer tutmaktadır. Havaalanlarının yapımı ve işletimindeki maliyet faktörleri göz önüne alınacak olursa, hizmet verilecek olan hava trafiğinin sayısı, tipi ve operasyon özelliklerinin ileriye yönelik olarak mümkün olduğunca gerçeğe yakın tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada havaalanlarının hava tarafının bir elemanı olan pist kapasitesi üzerinde durulacak ve havaalanları hava tarafı teorik kapasitesini hesaplamak için kullanılacak analitik bir yöntem verilecektir. Pist kapasitesi üzerinde yapılan çalışmalar gözlemlere dayalıdır. Bu çalışmada meşguliyet zamanları, uçuş mekaniği prensiplerine ve Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'nın yayınlarında yer alan uçaklar arası ayırma esaslarına dayalı olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Havaalanı, Kapasite, Pist, İniş Mesafesi, Kalkış Mesafesi

## **ABSTRACT**

**Master Thesis**

### **AN ANALYTICAL MODEL FOR CAPACITY CALCULATION IN SINGLE RUNWAY SYSTEM ACCORDING TO ICAO AIRCRAFT CATEGORIES**

**Serkan BAYAR**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Department of Air Traffic Control**

**Advisor: Prof. Dr. Aydan CAVCAR**

**2013, 67 Pages**

Airports are the places that all of the flights begin and finish, in this view airports have an important role for the air transportation system. If the total cost factors for construction and operating of airports are considered, a realistic forecast for the number, type and operational specifications of air traffic demands is required. In this study, capacity of runway as a part of airside of an aerodromes will be considered and an analytical model will be developed in order to calculate airside theoretical capacities of an aerodrome. The studies for runway capacities are based on observations. In this study, occupation times are calculated according to flight mechanics principles and the separation minimums between the aircrafts stated on International Civil Aviation Organization documents.

**Keywords:** Airport, Capacity, Runway, Landing Distance, Take-off Distance

## TEŐEKKÖR

Lisansüstü akademik kariyerin dönüm noktalarından biri olan yüksek lisansımı tamamlamış bulunmaktayım. Önümdeki dönüm noktalarının, aşmam gereken engellerin farkında olarak...

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisinden ve tecrübesinden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden faydalanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı danışman hocam Prof. Dr. Aydan CAVCAR'a sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	x
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. HAVAALANLARI VE HAVAALANI ELEMANLARI</b> .....	3
2.1. Havaalanlarının Sistematik Olarak Sınıflandırılması.....	3
2.2. Havaalanı Trafik Yoğunluğu.....	5
2.3. Havaalanı Elemanları.....	5
2.4. Havaalanı Hava Tarafı Elemanları.....	6
2.4.1. Pistler.....	7
2.4.1.1. Tek pist.....	8
2.4.1.2 Paralel pistler.....	9
2.4.1.3. Kesişen pistler.....	10
2.4.1.4. Açık V şeklindeki pistler.....	11
2.4.2. Taksi yolları.....	12
2.4.2.1. Paralel taksi yolları.....	13
2.4.2.2. Giriş taksi yolları.....	13
2.4.2.3. Çıkış taksi yolları.....	13
2.4.2.4. Hangar ve apron sahalarına ulaşım taksi yolları.....	13
2.4.3. Apron Sahaları.....	13
<b>3. HAVAALANI KAPASİTESİ</b> .....	15

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

3.1. Kapasite.....	15
3.2. Talep.....	16
3.3. Gecikme.....	17
3.4. Kapasiteye Etki Eden Faktörler.....	18
3.4.1. Ayırma minimumları.....	18
3.4.2. Hava trafiğinin özellikleri.....	21
3.4.3. Operasyon karmaşı.....	22
3.4.4. Pist konfigürasyonları.....	22
3.4.5. Hava trafik kontrol stratejileri.....	22
<b>4. HAVAALANI HAVA TARAFI TEORİK</b>	
<b>KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI</b>	23
4.1. Kullanılacak Ayırma Kuralları.....	23
4.1.1. Ardısıra inecek olan uçaklar arasındaki ayırmalar.....	24
4.1.2. Gelen uçakları takip eden kalkış uçakları arasındaki ayırmalar.....	26
4.1.3. Kalkan uçakları takip eden gelen uçaklar arasındaki ayırmalar.....	27
4.1.4. Kalkan uçaklar arasındaki ayırmalar.....	28
4.2. Uçak Performansına Bağlı Olarak Meşguliyet Sürelerinin Bulunması.....	29
4.2.1. Kalkış performansı.....	30
4.2.2. İniş performansı.....	34
4.2.3. Uçak performans modelleri.....	36
4.3. Kabuller.....	37
4.4. Tek Pisti Olan Havaalanı İçin Saatlik Kapasite Modeli.....	38
4.4.1. Mesafe süre diyagramlarının oluşturulması.....	38
4.4.2. Olasılık matrislerinin oluşturulması ve matris değerlerinin bulunması.....	42

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4.3. Olası tüm uçak ve akış karmalarına göre saatlik pist kapasitenin hesaplanması.....	44
4.5. Uygulama 1.....	46
4.6. Uygulama 2.....	54
<b>5. SONUÇ</b>	<b>64</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>67</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Havaalanı sistemi bileşenleri.....	6
2.2. Tek pist.....	8
2.3. Dört adet paralel pist.....	10
2.4. Kaydırılmış eşikli paralel pist.....	10
2.5. Kesişen pistler.....	11
2.6. Açık ‘V’ şeklindeki pistler.....	12
3.1. Ortalama gecikme ve ortalama talep.....	16
3.2. Bir uçağa iniş izni verilebilmesi için gerekli koşullar.....	19
3.3. Arka arkaya kalkacak uçakların ayırması.....	20
3.4. Kalkıştan sonra rotaları ayrılan uçakların ayırması.....	20
3.5. Seviye kat edilecekse kullanılacak ayırma.....	20
3.6. İniş ve kalkış uçakları arasındaki ayırma.....	21
4.1. İniş uçaklarının ayrılması.....	24
4.2. Uçağın alçalma esnasındaki uçuş hızı bileşenleri.....	26
4.3. Gelen uçağı takip eden kalkış uçağı arasındaki ayırma.....	27
4.4. Kalkan uçağı takip eden uçaklar arasındaki ayırma.....	27
4.5. Ayırmaların genel gösterimi.....	28
4.6. Kalkan uçaklar arasındaki ayırmalar.....	29
4.7. Uçağın kalkış hareketi.....	30
4.8. Yer rulesi esnasında uçağa etki eden kuvvetler.....	31
4.9. Uçağın iniş hareketi.....	34
4.10. Orta kategorideki bir uçağın mesafe-süre diyagramı.....	40
4.11. Pist ve tek taksi yolu sistemi.....	47
4.12. Tek taksi yoluna sahip pist üzerinde ağır ve hafif kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisi.....	52
4.13. Tek taksi yoluna sahip pist üzerinde orta ve hafif kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisi.....	53
4.14. Tek taksi yoluna sahip pist üzerinde ağır ve orta kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisi.....	54
4.15. 2. uygulamada kullanılan pist modeli.....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

4.16. 2. uygulamada yer alan pist ve taksi yolu sistemi üzerinde ağır ve hafif kategoride yer alan uçakların saatlik kapasite üzerine olan etkisi.....	61
4.17. 2. uygulamada yer alan pist ve taksi yolu sistemi üzerinde ağır ve orta kategoride yer alan uçakların saatlik kapasite üzerine olan etkisi.....	62
4.18. 2. uygulamada yer alan pist ve taksi yolu sistemi üzerinde orta ve hafif kategoride yer alan uçakların saatlik kapasite üzerine olan etkisi .....	62

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. ICAO havaalanı sınıflandırması.....	4
4.1. Mesafe esasına dayalı radar yaklaşması ayırmaları.....	24
4.2. Zaman esasına dayalı radar yaklaşması ayırmaları.....	25
4.3. Mesafe ve zaman ayırmaları.....	25
4.4. Saniye cinsinden ayırma mimimumları.....	26
4.5. Arka arkaya kalkan uçakların ayırma minimumları.....	29
4.6. Olasılık matrisi.....	42
4.7. Tüm kategoriler için olasılık matrisi.....	43
4.8. Geliş-Kalkış karması.....	44
4.9. 100 uçaklık trafik karması.....	45
4.10. Uygulama 1: hafif kategorideki uçağın “ $t_1$ ve $t_1'$ ” zamanı.....	47
4.11. Uygulama 1: orta kategorideki uçağın “ $t_1$ ve $t_1'$ ” zamanı.....	48
4.12. Uygulama 1: ağır kategorideki uçağın “ $t_1$ ve $t_1'$ ” zamanı.....	48
4.13. “ $t$ Kalkış – Kalkış” ayırmaları.....	49
4.14. Tek taksi yoluna sahip tek pistli havaalanı ayırma matrisi.....	49
4.15. Tek taksi yoluna sahip tek pistli havaalanı saatlik kapasite değerleri.	50
4.16. Uygulama 2: hafif Kategorideki uçağın “ $t_1$ ve $t_1'$ ” zamanı.....	56
4.17. Uygulama 2: orta kategorideki uçağın “ $t_1$ ve $t_1'$ ” zamanı.....	57
4.18. Uygulama 2: ağır kategorideki uçağın “ $t_1$ ve $t_1'$ ” zamanı.....	57
4.19. Birden fazla taksi yoluna ve hızlı çıkış taksi yollarına sahip pist için ayırma matrisi.....	58
4.20. Birden fazla taksi yoluna sahip tek pistli havaalanı saatlik kapasite değerleri.....	58

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$C_D$	: Sürüklenme katsayısı
$C_L$	: Taşıma katsayısı
$D$	: Sürüklenme kuvveti (Newton)
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $m/sn^2$ )
$h$	: İrtifa (m veya feet)
$L$	: Taşıma kuvveti (Newton)
$m$	: Kütle (kg)
$R$	: Yer tepki kuvveti (Newton)
$ROC$	: Tırmanma oranı (m/sn veya fpm)
$RD$	: Süzülüş oranı (m/sn veya fpm)
$S$	: Kanat alanı ( $m^2$ )
$T$	: Tepki kuvveti (Newton)
$t$	: Zaman (sn)
$t_{LDt}$	: Toplam iniş süresi (sn)
$t_{LDg}$	: İnişte yerdeki durma süresi (sn)
$t_{LDa}$	: İnişte havadaki yaklaşma süresi (sn)
$t_{TOt}$	: Toplam kalkış süresi (sn)
$t_{TOa}$	: Kalkışta 35 feet irtifaya ulaşma süresi (sn)
$t_{TOg}$	: Kalkış için yer rulesi zamanı (sn)
$V_{LOF}$	: Emniyetli kalkış hızı (km/saat veya knots)
$V_{TAS}$	: Gerçek hava hızı (km/saat veya knots)
$V_u$	: İlerleme hızı (km/saat veya knots)
$W$	: Ağırlık (Newton)
$x_{LDa}$	: İnişte havada katedilen mesafe (m)
$x_{LDg}$	: Yerdeki durma mesafesi (m)
$x_{TO}$	: Kalkışta yerde katedilen mesafe (m)
$x_{TOa}$	: Kalkışta havada katedilen mesafe (m)

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

$\mu$	:	Pist sürtünme katsayısı
$\rho$	:	Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )
$\theta_D$	:	Süzülüş açısı
$\theta_T$	:	Tırmanma açısı
AIL	:	Havacılık Aletleri Laboratuvarı Airborne Instruments Laboratory
BADA	:	Uçak Verileri Base of Aircraft Data
CAT	:	ILS Kategorisi
Dk	:	Dakika
DME	:	Mesafe Ölçüm Cihazı Distance Measuring Equipment
FAA	:	A.B.D.Ulusal Havacılık Teşkilatı Federal Aviation Administration
FL	:	Uçuş Seviyesi Flight Level
ICAO	:	Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı International Civil Aviation Organization
IFR	:	Aletli Uçuş Kuralları Instrument Flight Rules
ILS	:	Aletli Yaklaşma Sistemi Instrument Landing System
kt	:	Knots
LDA	:	Mevcut İniş Mesafesi Landing Distance Available
LDR	:	Gerekli İniş Mesafesi Landing Distance Required
NDB	:	Yönlendirilmemiş Radyo Yayını Non-Directional Beacon

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Nm	:	Deniz Mili Nautical Mile
PAR	:	Hassas Yaklaşma Radarı Precision Approach Radar
VFR	:	Görerek Uçuş Kuralları Visual Flight Rules
VOR	:	Yüksek Frekanslı çok Yönlü Verici Very High Frequency Omni Directional Range

## 1. GİRİŞ

Havaalanları, havayolu ulaştırma sistemi içerisinde uçuşların başladığı ve bittiği yerler olarak önemli bir yer tutmaktadır. Hava sahası kapasite artırımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, ne kadar gelişmiş olursa olsun, sonuçta havaalanlarının kapasitesi hava sahalarının bir kısıtlayıcısı olarak kalmaya devam edecektir. Havaalanlarının yapımı ve işletimindeki maliyet faktörleri göz önüne alınacak olursa, burada hizmet verilecek olan hava trafiğinin sayısı, tipi ve operasyon özelliklerinin ileriye yönelik olarak mümkün olduğunca gerçeğe yakın tahmin edilmesi gerekmektedir. Mevcut bir havaalanının kapasitesinde yetersizlikler yaşıyorsa bu kapasitenin fiziksel ortam elverdiğince nasıl artırılacağı ancak doğru kapasite hesaplarının yapılabilmesine dayalıdır.

Eğer bir bölgede mevcut havaalanında kapasite problemleri yaşırsa çözüm için iki yöntem vardır. Bunların ilki yeni bir havaalanının yapılması diğeri ise mevcut havaalanında iyileştirmeler yapılmasıdır. Bu iyileştirmeler, yeni pist eklenmesi, taksi yolu ağının yeniden düzenlenmesi, apron kapasitesinin artırılması ve yürütülen hava trafik operasyon usullerinin iyileştirilmesidir. Her iki çözüm yöntemi de uçakların havaalanı kontrol bölgesini terk etmesinden sonra dâhil olacağı terminal kontrol alanında da düzenlemeler yapılmasını ve koordinasyon yöntemlerinin yenilenmesini gerektirmektedir. Tüm sistemlerde olduğu gibi havayolu ulaştırma sisteminde de elemanların birinde yapılacak olan iyileştirmeler sistemin bütününe olduğu gibi yansımaz. Herhangi bir elemanda yapılan iyileştirme diğer elemanlarda da bir takım düzenlemeler gerektirir.

Bu çalışmada havaalanlarının hava tarafının bir elemanı olan pist kapasitesi üzerinde durulacak ve havaalanları hava tarafı teorik kapasitesini hesaplamak için kullanılacak analitik bir yöntem verilecektir. Pist kapasitesi üzerinde yapılan çalışmalar gözlemlere dayalıdır. Pist meşguliyet zamanlarının ölçülmesinde gözleme ve simülasyona dayalı teknikler kullanılmaktadır. Oysaki bu çalışmada meşguliyet zamanları, uçuş mekaniği prensiplerine ve Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'nın yayınlarında yer alan uçaklar arası ayırma esaslarına dayalı olarak hesaplanmıştır. Uçaklara ait aerodinamik ve tepki kuvveti verileri ise Eurocontrol tarafından geliştirilmiş uçak performans modelinden alınmıştır.

Mevcut bir havaalanında kapasite iyileştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulması halinde; örneğin yeni hızlı çıkış taksi yolunun eklenmesi durumunda kapasitenin nasıl etkileneceği bu analitik yöntem yardımıyla hesaplanarak, maliyet-fayda analizi yapılabilir. Kısaca bu çalışma ile sunulan yöntem pist kapasite iyileştirme çalışmaları için ön tasarım karar kriteri olarak kullanılabilir. Ayrıca bu çalışma ile birlikte bir havaalanındaki talebin hangi uçak karmasından oluştuğunun ve bu uçaklardan hangilerinin iniş ve/veya kalkış uçağı olduğunun bilinmesi durumunda, havaalanında yapılan operasyonun ne kadar sürede gerçekleşeceği bulunabilecektir.

Çalışmada kullanılan analitik yöntem sayesinde talebin kapasiteyi aşması durumunda, sırada bekleyen uçakların ne zaman hizmet alabileceği hesaplanabilir veya analitik yöntemle hesaplanan kapasiteye ulaşamaması durumunda problemin hangi aşamadan veya aşamalardan kaynaklandığı kolaylıkla bulunabilir.

Çalışmanın ilk bölümünde amaç verildikten sonra, ikinci bölümünde havaalanı ve havaalanı elemanlarının ne anlama geldiği ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde kapasite, talep ve gecikme kavramları ile kapasiteye etki eden faktörler açıklanmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde ise havaalanı hava tarafında yer alan pist kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan ayırmalar ve analitik yöntem modelinin oluşturulması açıklanarak iki hayali pist üzerinde uygulama yapılmıştır.

Bu çalışma, hayali veya mevcut bir pistin saatlik kapasitesinin hesaplanmasında, akış ve uçak karmalarına göre maksimum kapasite değerlerine nasıl ulaşılacağı konusunda prensipler ortaya koymaktadır.



## 2. HAVAALANLARI VE HAVAALANI ELEMANLARI

Bu çalışmada, havaalanı hava tarafı elemanlarından olan pist için analitik bir model oluşturularak saatlik kapasite değerleri bulunacaktır. Bu bağlamda öncelikle havaalanları ve havaalanı elemanları tanıtılacaktır.

Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'nın (ICAO-International Civil Aviation Organization) 14. ekine [1] göre havaalanı; karada veya suda, içerisindeki bina, tesis ve donanımları da içine kaplayan, kısmen veya tamamen uçakların iniş, kalkış ve yer hareketlerini yaparken kullanabilmeleri amacı için belirlenmiş sahalar olarak tanımlanır.

Havaalanları çok farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bunlar özellikle hizmet verdiği trafiğin türüne, trafiğin hacmine göre ve sahip oldukları fiziksel tesis ve donanımlara göre sivil, askeri ve genel havacılık amaçlı hizmet veren havaalanları olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu çalışmada sivil hava trafiğine hizmet veren karma trafik yapısına sahip bir hayali havaalanı üzerinden saatlik pist kapasitesi hesaplanacaktır. Özellikle trafik karmasının pist kapasitesini nasıl etkilediği açısından havaalanlarının sistematik sınıflandırılması ve havaalanı trafik yoğunluğu konu açısından önemlidir.

### 2.1. Havaalanlarının Sistematik Olarak Sınıflandırılması

Havaalanlarının sınıflandırılmasında en yaygın olarak kullanılan sistematik sınıflandırmalar ICAO ve A.B.D. Ulusal Havacılık Teşkilatı'na (FAA-Federal Aviation Administration) ait sınıflandırmalardır. Şikago anlaşması ile benimsenen ICAO yaklaşımında her bir havaalanına, sahip olduğu pistlerin fiziksel özelliklerine göre, bir harf ve rakamdan oluşan bir kod atanmaktadır. Bu sınıflamada rakam kodu havaalanının sahip olduğu pist uzunluğu, harf kodu ise o havaalanının hizmet verebileceği uçakların kanat açıklığı ve iniş takımı dış tekerlek mesafesi üst limitini göstermektedir. Çizelge 2.1'de verilen referans kodları, belirli bir uçuş operasyonu planlanırken o operasyon için en uygun havaalanının veya en uygun uçak tipinin seçiminde büyük kolaylıklar sağlamaktadır [1].

Çizelge 2.1. ICAO Havaalanı Sınıflandırması [1]

Kod Ögesi 1		Kod Ögesi 2		
Kod No	Pist Uzunluğu	Kod Harfi	Kanat Açıklığı	Tekerlek Dışı Kenarları Arasındaki Mesafe
1	800 m'den az	A	15 m'ye kadar	4,5 m'ye kadar
2	800 m – 1200 m arası	B	15 m – 24 m arası	4,5 m – 6 m arası
3	1200 m – 1800 m arası	C	24 m – 36 m arası	6 m – 9 m arası
		D	36 m – 52 m arası	9 m – 14 m arası
4	1800 m ve fazlası	E	52 m – 65 m arası	9 m – 14 m arası
		F	65 m – 80 m arası	14 m – 16 m arası

FAA sınıflandırmasında ise havaalanları hizmet verdiği yolcu trafiği ve uçuş faaliyetlerinin türü temel alınmaktadır. Bu sınıflandırmada Amerika Birleşik Devletleri 'de faaliyet gösteren havaalanları “Havaalanı ve Havayolu Taşımacılığı Geliştirme Kanunu”na (1982) göre temel havaalanları; ticari hizmet veren havaalanları; genel havacılık havaalanları ve hava trafiğini rahatlatıcı havaalanları olarak dört ayrı grupta incelenmektedir [2]. Temel havaalanları yılda 1.000.000'dan fazla yolcu kapasitesi olan havaalanlarıdır. Tarifeli yolcu taşımacılığına hizmet veren ve yıllık 50.000 ile 1.000.000 arasında yolcu kapasitesine sahip havaalanları ise ticari hizmet veren havaalanları olarak adlandırılmaktadır. Genel havacılık havaalanları özellikle iş ve özel amaçlı uçuş operasyonları için kullanılan ve yılda 2.500'den az yolcuya hizmet veren havaalanlarıdır. Trafiği rahatlatıcı havaalanları ise temel havaalanlarında yaşanan tıkanıklıkları hafifletmek ve genel havacılık operasyonlarına daha fazla giriş sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

## 2.2. Havaalanı Trafik Yoğunluğu

ICAO havaalanlarını trafik yoğunluklarına göre de sınıflandırmaktadır [1]. Buna Göre;

- a) Hafif. Trafiğin en yoğun olduğu ortalama saatte hareket sayısının pist başına 15'den fazla olmadığı veya tipik olarak 20 toplam havaalanı hareketinden az olduğu durumlarda.
- b) Orta. Trafiğin en yoğun olduğu ortalama saatte hareket sayısının pist başına sırasına göre 16 ile 25 arasında olduğu veya tipik olarak 20 ile 35 toplam havaalanı hareketi olduğu durumlarda.
- c) Şiddetli. Trafiğin en yoğun olduğu ortalama saatte hareket sayısının pist başına sırasına göre 26 veya daha fazla olduğu veya tipik olarak 35 toplam havaalanı hareketinden fazla olduğu durumlarda.

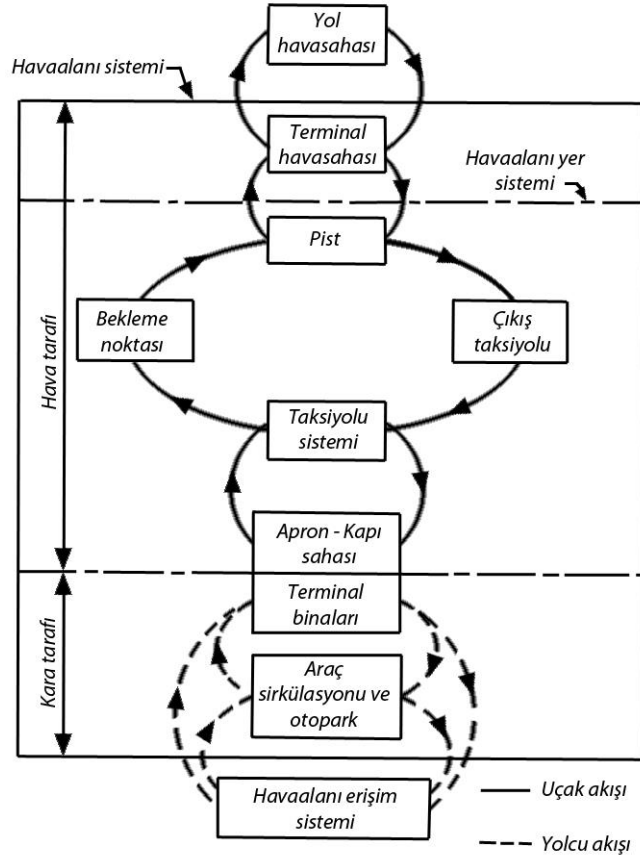
Tanımlamalarda verilen, trafiğin en yoğun olduğu ortalama saatteki hareket sayısı, günlük en yoğun saatteki hareketlerinin sayısının yıllık aritmetik ortalamasıdır. Bir kalkış veya bir iniş, bir hareketi oluşturur.

## 2.3. Havaalanı Elemanları

Havaalanları uçaklara, yolculara, kargoya ve yerdeki araçlara hizmet veren karmaşık taşımacılık sistemleridir. Kapladıkları alan bakımından diğer taşımacılık sistemlerinin terminallerinden çok daha fazla alana ihtiyaç duyarlar. Büyük bir otobüs terminalinin kapladığı alanın yaklaşık 3000 katı veya büyük bir tren istasyonunun kapladığı alanın yaklaşık 1000 katı alanı kaplayabilirler.

Havaalanları Şekil 2.1'de verildiği gibi iki ana bölümden oluşmaktadır: Hava tarafı ve kara tarafı. Terminal binalarındaki uçak kapıları, bu iki bölümün sınırını oluşturmaktadır. Hava tarafı tesisleri, uçakların üzerinde operasyonlarını gerçekleştirdiği alanlardır. Pistler, taksi yolları, hangar, yolcuların indirilip bindirildiği ve uçakların park ettiği apron ve kapılardan meydana gelmektedir [3]. Kara tarafı ise yerdeki ulaşım da dâhil olmak üzere yolculara hizmet verilen alanlardan oluşur. Yolcu indirme ve bekleme alanlarını, bilet kontuarlarını, bagaj

işleme alanlarını, restoranları, dükkânları, oto kiralama bürolarını ve bunun gibi yerleri içinde bulunduran terminal binasından oluşur [3].



Şekil 2.1. Havaalanı sistemi bileşenleri [2].

Havaalanı sistemini oluşturan bu elemanlar işlevlerine göre “hava tarafı” ve “kara tarafı” olarak iki temel grupta incelenmektedir. Bu çalışmanın konusu hava tarafında yer alan pist kapasitesi ile ilgili olduğundan, kara tarafı detaylı olarak açıklanmamıştır.

#### 2.4. Havaalanı Hava Tarafı Elemanları

Havaalanı hava tarafı elemanları temel olarak pist, taksi yolları ve aprondan oluşur.

### 2.4.1. Pistler

Bir havaalanı içerisinde uçakların iniş ve kalkışlarını yapmaları için hazırlanmış, havaalanı arazisi içerisindeki dikdörtgen şeklindeki alana pist denir. Pistler ICAO tarafından yayınlanan ilgili eklerinde seyrüsefer kolaylıkları esas alınarak üç gruba ayrılmaktadır.

- a. Aletsiz Pistler ( Non-Instrument Runway )
- b. Aletli Hassas Yaklaşmasız Pistler ( Non-Precision Approach Runway )
- c. Hassas Yaklaşmalı Pistler ( Precision Approach Runway )

Aletsiz pistler, yalnızca görerek uçuş kurallarına (VFR-Visual Flight Rules) göre uçuş yapan bir uçağın faaliyetleri için tasarlanmıştır. Aletli hassas yaklaşmasız pistler, yöneltilmemiş radyo yayını (NDB-Non-directional Beacon), mesafe ölçüm cihazı (DME-Distance Measuring Equipment) ve yüksek frekanslı çok yönlü verici (VOR-Very High Frequency Omni Directional Range) gibi hava seyrüsefer cihazlarına sahip olan pistleridir. Hassas yaklaşma pisti ise hassas yaklaşma radarı (PAR-Precision Approach Radar) ya da aletli iniş sistemi (ILS-Instrument Landing System) kullanılan, aletli yaklaşma sistemine sahip olan pisttir [1].

Herhangi bir havaalanında tek bir pist olabileceği gibi, birden fazla pist de olabilir. Pist veya pistlerin uzunluğu, kullanım amaçlarına göre uçakların operasyonel ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik olmalıdır. Uzunluklar belirlenirken uçakların iniş ve kalkış gereklilikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Pist konumunun ve sayısının havaalanı kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır ve havaalanı yerleşkesi pist veya pistlerin konumlarına göre belirlenir. “Pistin konumlandırılmasından sonra havaalanının diğer elemanları pist ile ilişkilendirilerek, birbirleri ile arasındaki mesafeler göz önünde tutularak, mevcut ve gelecekteki büyüklükleri esas alınarak havaalanı yerleşim planı hazırlanmalıdır” [4].

Pist veya pistlerin konumunu etkileyen faktörler şunlardır:

- a. Hava koşulları, hâkim rüzgâr ve yan rüzgâr,
- b. Yaklaşma ve pas geçme hatlarındaki arazinin yapısı, coğrafi koşullar,
- c. Havaalanı trafik durumu ve yoğunluğu,
- d. Havaalanını kullanacak uçak karması,
- e. Havaalanı çevresindeki kısıtlamalar, gürültü etkileri, değişmez yerleşim birimleri

göz önünde bulundurularak pist veya pistler konumlandırılır [5].

Temel pist konfigürasyonları aşağıda sıralanmıştır:

- a. Tek pist,
- b. Paralel pistler,
- c. Kesişen pistler ve
- d. Açık V şeklindeki pistlerdir [6].

#### **2.4.1.1. Tek pist**

Pist konfigürasyonlarının en basiti olan ve Şekil 2.2’de verilen bu tek pist, VFR’ a göre uçuş yapan uçaklar için saatte 50 – 100 trafik kapasitesine, aletli uçuş kurallarına (IFR-Instrument Flight Rules) göre uçuş yapan ve mevcut seyrüsefer teknolojisine bağlı olarak saatte 50 – 70 trafik kapasitesine sahiptir [7].



**Şekil 2.2.** Tek pist [6]

Ülkemizdeki havaalanlarının çoğu tek pist konfigürasyonuna sahiptir. Pist kapasitesinden daha az talep olduğu ve kullanılabilirlik faktörü ( pistin yan rüzgâr sebebi ile kullanımının kısıtlanmadığı günlerin yıl içerisindeki yüzdesi) %95’in altına inmediği sürece bu basit konfigürasyon yeterli olacaktır.

Bu pist türünde herhangi bir zamanda pisti sadece tek bir uçak kullanabileceğinden, kalkacak olan uçağın kalkış hareketine başlamadan önce inen uçağın pisti terk etmiş olması gerekmektedir.

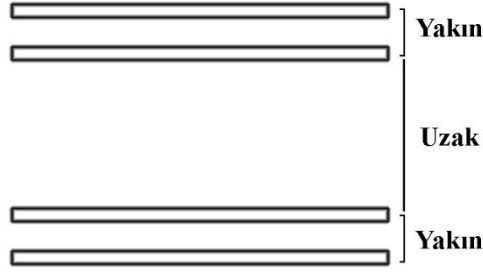
#### 2.4.1.2. Paralel pistler

Paralel pistlere havaalanı kapasitesi arttırılmak istendiğinde ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak paralel pistlerin kapasitesi pistler arasındaki mesafe ile ilişkilidir. Paralel pistler, pist merkez hattına olan uzaklıklarına göre üç grupta incelenebilir. Bunlar;

- a. Yakın mesafeli paralel pistler: Aralarındaki mesafe 2500 ft'e kadar olan pistlerdir. Yakın paralel pistler IFR şartlarında bir pistteki operasyon diğer pistteki operasyona bağlı olduğundan ötürü "Bağımlı IFR" olarak da ve hatta double pist olarak da adlandırılmaktadır [4]. Aynı anda her iki piste iniş veya kalkışa izin verilmez.
- b. Orta mesafeli paralel pistler: Aralarındaki mesafe 2500 ft ile 4300 ft arasında olan pistlerdir. Bu tipteki paralel pistlerde IFR şartlarda bir piste inen uçak, diğer pistten kalkan uçaktan bağımsızdır.
- c. Uzak mesafeli paralel pistler: Aralarındaki mesafe en az 4300 ft olan pistlerdir. Bu tip pistlerde, IFR şartlarda aynı anda her iki pist de iniş ve kalkış için kullanılabilir.

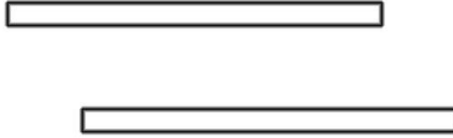
Yukarıda da belirtildiği gibi paralel pistlerin merkezleri arasındaki mesafe operasyon olanaklarında belirleyici rol oynamaktadır.

Eğer terminal binaları paralel pistlerin arasında konumlandırılmış ise, pistler arasında her zaman binalar apron ve taksi yolları için bir mesafe olacağından, bu tip yapılanmalarda genelde uzak mesafeli paralel pistler kullanılır. Dört adet paralel pist kullanılacağı zaman ikişerli pistler yakın mesafeli, yakın mesafeliler ise uzak mesafeli olarak konumlandırılır (Şekil 2.3) [6].



**Şekil 2.3.** Dört adet paralel pist

Bir pistin kalkış değerinin ise iniş için kullanılacağı durumlarda, kalkacak ve inecek olan uçağın taksi mesafesini azaltmak amacı ile pistler kaydırılarak yerleştirilebilir. Bu tip yerleşkede terminal binaları, apron ve taksi yolları paralel pistlerin arasında yer alır. Şekil 2.4’de verilen, sola yakın eşiğe sahip piste inen uçak pisti terk ettikten sonra kısa bir taksi mesafesi ile aprona ulaşabilir. Sağa yakın eşiğe sahip pistten kalkacak uçak ta kısa bir taksi mesafesi ile pist başına ulaşabilir.



**Şekil 2.4.** Kaydırılmış eşikli paralel pist

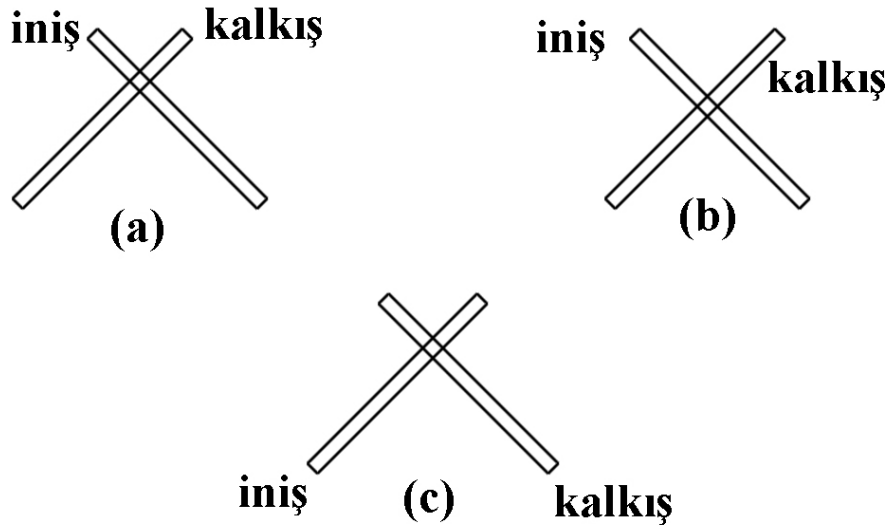
### 2.4.1.3. Kesişen pistler

A.B.D.’deki birçok havaalanında iki veya daha fazla pist birbirlerini farklı noktalardan kesmektedir. Bu türdeki pistlere “kesişen pistler” adı verilmektedir (Şekil 2.5.). Bu tür pistler genel olarak rüzgârın gün içerisinde birçok farklı yönden estiği bölgelerde konumlandırılmıştır. Rüzgârın sakin olduğu durumlarda her iki pist de iniş ve kalkış için kullanılabilir. Rüzgârın güçlü olduğu durumlarda da uygun olan tek pist kullanılabilir ve bu da kapasitenin oldukça düşmesine neden olmaktadır.



Kesişen pistlerde kapasiteyi temel olarak pistlerin kesişme noktası belirlemektedir. Operasyonlarda kullanılan iniş ve kalkış pistlerinin uzak noktada kesişmesi kapasiteyi düşürmekte, yakın noktada kesişmesi ise kapasiteyi arttırmaktadır.

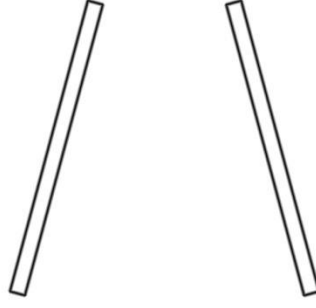
Şekil 2.5a’da gösterildiği gibi iniş ve kalkışın en yakın mesafede kesiştiği durumda VFR şartlarda saatte 60 – 175 operasyon, IFR şartlarda saatte 60 – 70 operasyon yapılabilmektedir. Şekil 2.5b’de verildiği gibi konumlandırılan kesişen pistlerde, VFR şartlarda saatlik kapasite 60 – 100 operasyon arasında, IFR şartlarda ise saatte 45 -60 operasyon arasında değişmektedir. Şekil 2.5c’deki gibi konumlandırılan kesişen pistlerde, VFR şartlarda saatlik kapasite 50 – 100 operasyon arasında, IFR şartlarda ise saatte 40 – 60 operasyon arasında değişmektedir [6].



Şekil 2.5. Kesişen pistler

#### 2.4.1.4. Açık V şeklindeki pistler

Farklı yönlerde konumlandırılan, birbirlerini kesmeyen ancak yaklaşma veya pas geçme uzantıları birbirlerini kesen pistler “açık V şeklindeki pistler” olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.6.). Açık V şeklindeki pistlerde, kesişen pistlerde olduğu gibi rüzgârın çok kuvvetli estiği durumlarda yalnız uygun olan tek pist kullanılabilir. En yüksek kapasiteye, iniş ve kalkış pistlerinin birbirine yaklaşan “V” tarafından yapılması ile ulaşılmaktadır.



**Şekil 2.6.** Açık 'V' şeklindeki pistler

Yakın 'V' tarafından yapılan VFR operasyonlarda saatlik kapasite 60 – 180 trafik arasında, IFR operasyonlarda ise saatlik 50 – 80 trafik arasında değişmektedir. Uzak 'V' tarafından yapılan VFR operasyonlarda saatlik kapasite 50 – 100 trafik arasında, IFR operasyonlarda ise saatlik 50 – 60 trafik arasında değişmektedir [6].

#### **2.4.2. Taksi yolları**

Uçakların pist, apron ve hangarlar arasında hareket edebilmeleri için tasarlanmış yollar taksi yolları olarak tanımlanır. Taksi yollarının en önemli amaçları uçuş faaliyetlerinin devamını sağlamak, kapasiteyi arttırmak ve emniyeti arttırmaktır. Taksi yollarının genişliği ve mukavemeti havaalanı kategorisine ve hizmet verilen uçakların operasyon koşullarına göre değişmektedir. Taksi yolları yeni inmiş bir uçağın, kalkış için taksi yapan bir uçağı engellemeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Taksi yolları, aprondan itibaren pist sonlarına mümkün olan en kısa mesafelerde yerleştirilmelidir. Planlama yapılırken taksi yollarının aktif pisti mümkün olduğu kadar kesmemesine dikkat edilmelidir.

Havaalanı kapasitesi üzerinde pistlerin olduğu kadar taksi yollarının da büyük etkisi vardır. İnen bir uçak pisti terk etmeden, kalkacak olan uçağı kalkış müsaadesi verilemeyeceğinden, yoğun bir trafikte devamlılığın sağlanabilmesi için uçakların inişlerinden sonra pisti mümkün olan en kısa sürede terk etmesi gerekmektedir.

Taksi yolları işlevlerine göre dört grupta toplanmaktadır. Bunlar; [8]

- a. Paralel taksi yolları
- b. Giriş taksi yolları
- c. Çıkış taksi yolları
- d. Hangar ve apron sahalarına ulaşım taksi yolları

#### **2.4.2.1. Paralel taksi yolları**

Paralel taksi yolları, piste paralel uzanan taksi yollarıdır. Pist ile irtibatını sağlayan birden fazla çıkış taksi yoluna sahip olabilir. FAA, çok yoğun havaalanlarında (yıllık 20.000'den fazla uçak trafiği), uçakların birbirlerinden fazla etkilenmeden taksi hareketini yapabilmeleri için tek yönlü iki adet paralel taksi yolları yapılması tavsiye etmektedir.

#### **2.4.2.2. Giriş taksi yolları**

Giriş taksi yolları pistin her iki ucunda yer almaktadır. Uçakların kalkış amacı ile piste girmelerini sağlayan hafif kavisli taksi yollarıdır.

#### **2.4.2.3. Çıkış taksi yolları**

İnişini gerçekleştiren uçakların pisti terk edebilmeleri için yerleştirilen ve pist boyunca birden fazla olabilecek taksi yollarıdır. Çıkış taksi yolları piste 90 derecelik bir açı ile yerleştirilebileceği gibi, yoğun havaalanlarında uçakların pisti kısa bir sürede, hızını çok yavaşlatması gerekmeden terk edebilmesi için 30 – 45 derecelik açılarla da yerleştirilebilir.

#### **2.4.2.4. Hangar ve apron sahalarına ulaşım taksi yolları**

Pist veya diğer bölümlerden, hangar ve aprona ulaşımı sağlamak için tasarlanmış taksi yollarıdır.

#### **2.4.3. Apron Sahaları**

Apron; uçakların yolcu ve kargo indirme ve bindirme, yakıt alma, park etme ve bakımı amacıyla hazırlanmış alanlarıdır [1].

Apron, terminal veya hangarın önünde bulunabileceği gibi terminalden uzak bir yerde de konumlandırılabilir. Böyle bir durumda uçaklar açığa park edeceğinden, yolcular uçaklara otobüslerle götürülmektedir.

Düzenli ve hızlı bir trafik akışı için uçaklar, kapıları (gate) mümkün olduğu kadar az işgal etmelidir. Yoğun bir trafik akışında bazen kapılar yetersiz kalarak talebi karşılayamamaktadır. Kapı işgal sürelerinin (Gate Occupancy Time) azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmakla birlikte, gelecekteki talebi tahmin etmek zor olacağından yedek apron sahaları tasarlanmaya başlamıştır.

### 3. HAVAALANI KAPASİTESİ

Bir havaalanının amacı inen ve kalkan uçaklar için oluşan talebi olanakları dâhilinde karşılamaktır. Bu olanakların ise (özellikle pistlerin) belirli bir kapasitesi ve işletme maliyeti vardır. Talebin kapasiteye yaklaşması ile birlikte gecikmeler oluşmaya başlar ve oluşan gecikmeler maliyetlerin artmasına neden olur.

Bu çalışmanın amacı analitik bir model geliştirerek saatlik kapasite hesaplama olduğundan, maliyetler ile ilgili bilgilere yer verilmemiştir. Ancak konunun daha iyi kavranabilmesi için talep, kapasite ve gecikmelerin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

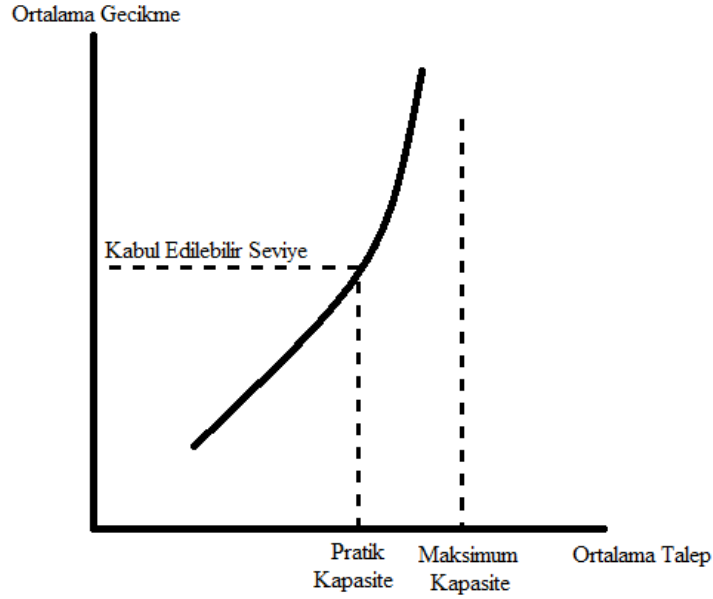
#### 3.1. Kapasite

Havacılığa olan talebin artması, pist kapasitesi ve gecikmelerle ilgili tartışmaları beraberinde getirmiştir. 1960'lı yılların başlarında Havacılık Aletleri Laboratuvarı (AIL-Airborne Instruments Laboratory) pratik pist kapasitesini, 'belirlenen zaman dilimi içerisinde, kabul edilebilir seviyedeki ortalama gecikmeler dâhilindeki uçak operasyonlarının sayısı' [9] olarak tanımlamıştır. Ancak sürekli artan taleple beraber bu tanım beraberinde bir takım sorunları da getirmiştir. Kabul edilebilir gecikmelerin havaalanı işletmecileri tarafından isteğe bağlı değiştirilmesi, havaalanlarının kapasitelerinin üzerinde kullanımıyla sonuçlanmıştır. Bu da aslında kabul edilemeyen gecikmelere neden olmuştur. Kapasite, talep ve gecikmenin bu kadar karmaşık bir şekilde tanımlanması ile 1960'ların sonunda havaalanlarındaki tıkanıklık yüzünden kriz çıkmıştır [9].

1973 yılında FAA günümüzde de kullanılan saatlik pist kapasitesi tanımını, 'sürekli bir talebin olduğu durumda, havaalanının bir saat dilimi içerisinde hizmet edebileceği maksimum uçak operasyonu (iniş-kalkış) sayısı' [9] olarak değiştirdi ve AIL'nin yapmış olduğu eski tanım geçerliliğini yitirdi. Bu tanımda kullanılan sürekli talep kelimesi, kalkış ve iniş için her zaman hazırda uçak olduğu anlamına gelmektedir.

Kapasite tanımlarında farklı kavramlar ortaya çıkmaktadır. Bunlar; maksimum kapasite, doymuş kapasite veya maksimum çıktı oranıdır. Maksimum kapasite kavramı, belirli bir zaman dilimi içerisinde gecikmelerin göz ardı

edilerek, talebin devam ettiği sürece sistem içinde hizmet edilebilecek maksimum uçuş operasyonu sayısıdır. Ortalama gecikmeler ne kadar artarsa artsın maksimum kapasite değeri aşılamaz. Maksimum kapasite; operasyonun gerçekleşebileceği maksimum sayıdır. Bu nedenden dolayı bu tanıma doymuş kapasite veya maksimum çıktı oranı da denilmektedir. Pratik pist kapasitesi ve maksimum pist kapasitesinin ilişkisini gösteren ilişki Şekil 3.1’de verilmiştir [6].



Şekil 3.1. Ortalama gecikme ve ortalama talep [6]

Şekil 3.1’de artan talep doğrultusunda, kabul edilebilir gecikme seviyesinde oluşan kapasiteye pratik, talebin artmasına devam etmesi halinde hizmetin devam edeceği, maksimum operasyon sayısına ulaşılan kapasiteye ise maksimum kapasite adı verilir. Pratik kapasitenin aşılması halinde ortalama gecikmeler de nihai/maksimum kapasiteye ulaşıncaya dek hızla artmaktadır.

### 3.2. Talep

Birim zamanda pist kullanımı için yapılan isteklerin oranına talep denir. Talebin en önemli karakteristik özelliği ise sabit olmamasıdır. Talep sıfırdan başlayarak, geçici olarak pist kapasitesinin üzerine de çıkabilir. Ayrıca talep oranındaki değişiklikler havaalanı sisteminin oluşan tıkanıklığı çözmeye zaman vermeyecek şekilde hızlı da olabilir. Talep oranı azalsa dahi, bir önceki yoğun dönemden kalan bekleyen uçaklarla uzun gecikmeler yaşanabilir.

Farklı karakteristik özelliklere sahip olan uçak karmalarından oluşan, iniş ve kalkış zamanlarına göre talepler, pist kapasitesi üzerinde büyük rol oynar.

Yayınlanmış olan uçuş tarifelerine bakarak gerçek talebin hesaplanmasında hatalar oluşabilir. Çünkü gecikmeler hava taşımacılığı sisteminin bir parçası olmasına rağmen, uçuş tarifeleri gecikmeler göz önünde bulundurularak yapılmaz.

### 3.3. Gecikme

Gecikme planlana zaman ile gerçekleşen zaman arasındaki mutlak farktır. FAA 1973 yılında gecikmeyi ‘bir uçağın, başka herhangi bir uçaktan etkilenmeden hizmet alacağı süre ile gerçekte hizmet aldığı süre arasındaki fark’ [9] olarak tanımlamıştır.

Hava taşımacılığı sistemindeki gecikmelerin tek nedeni tabii ki pist tıkanıklığı değildir, yol safhasında tahmin edilemeyen kötü hava koşulları da yolculuk sürelerini uzatabilir. Aynı zamanda yolcu terminali ve yükleme kapıları da gecikmeye sebep olabilir. Gecikmeler ile ilgili karşılaşılan en büyük problemlerden bir tanesi, pist tıkanıklığından oluşan gecikmelerle diğer gecikmelerin birbirine karıştırılmasıdır.

Hava alanlarına gelen ve giden uçakların operasyon sıklıkları sürekli olarak değişmektedir. Kapasitenin altında gerçekleşen taleplerde dahi iki veya daha fazla uçak aynı pisti kullanmak istediğinde gecikmelerin yaşanması kaçınılmazdır. Talebin kapasitesi aşması durumunda, daha sonra talep kapasitenin altına düşse dahi hizmet bekleyen uçak sayısı kapasitenin altına düşmedikçe gecikmeler yaşanmaya devam edecektir. Örneğin; saatlik 60 operasyon kapasitesi olan bir hava alanında operasyon talebi 70’e çıktığı takdirde, her saat 10 uçak hizmet almak için bekleyecek ve 10 dakikalık gecikme yaşanacaktır. Talep daha sonra saatte 40 operasyona düşerse, operasyon talebi olan uçaklardan sadece saatte 20 uçağa hizmet verilebilir.

### 3.4. Kapasiteye Etki Eden Faktörler

Bir havaalanının hava tarafı kapasitesine etki eden faktörler havaalanı elemanları ile birlikte düşünülmelidir.

Bir hava alanındaki pist kapasitesi her zaman sabit değildir. Gün veya yıl içerisinde fiziksel ve operasyonel faktörlerden dolayı kapasite sürekli olarak değişmektedir. Hava alanı kapasitesi için bir rakam verildiğinde, bu rakam genellikle bazı varsayılan koşullar veya mevcut çalışma deneyimine dayalı ortalamayı gösterir [10].

Ortalama pist kapasitesi değerini yükseltebilmek, gecikmeleri azaltabilmek adına, pist kapasitesini etkileyen faktörlerin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu faktörler: Ayırma minimumları, hava trafiğinin özellikleri, operasyon karmaşıklığı, pist konfigürasyonları, hava trafik kontrol stratejileri olarak 5 ana grupta incelenebilir.

#### 3.4.1. Ayırma minimumları

Uçaklar arasındaki ayırmalar, pist kapasitesini etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Uçaklar arasındaki ayırmalar (zaman ve mesafe esasına dayalı) yerde bekleme pozisyonlarında başlayıp, yaklaşma ve kalkış kontrol hizmetlerinde devam edip, saha kontrol hizmetlerindeki ayırmalara kadar uzanmaktadır.

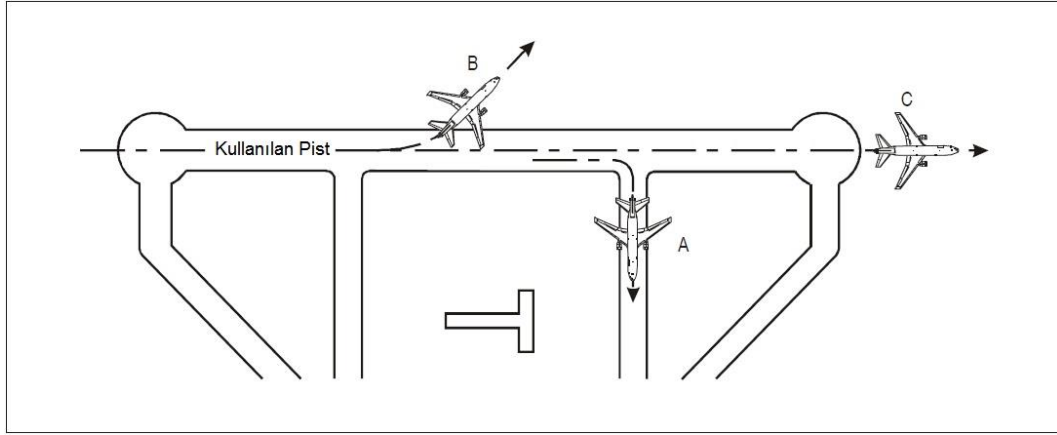
Pist kapasitesine etki eden ayırma minimumlarını ele alacak olursak;

- a. Bir uçağa iniş izni verilebilmesi için gerekli olan koşulları,
- b. Önden kalkmış olan uçağın arkasından kalkacak uçağa, kalkış izninin verilebilmesi için gereken ayırmaları,
- c. İniş ve kalkış uçakları arasında uygulanan ayırma kurallarını detaylı olarak incelememiz gerekmektedir.

Verilenlere ek olarak, öndeki ağır uçağı takip eden hafif uçağı, ağır uçağın oluşturduğu türbülansı korumak amacı ile geliştirilen dümen suyu türbülansı (WTS -Wake Turbulence Separation) ayırmaları kullanılır.



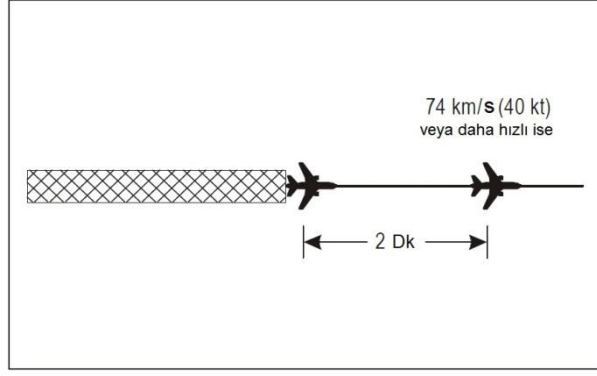
Bir uçağa iniş izni verilebilmesi için gerekli olan koşullar ICAO'nun 4444 numaralı dokümanı olan Procedures for Air Navigation Services Air Traffic Management [11] dokümanında da belirtildiği gibi bir uçağa iniş izninin verilebilmesi için pistin, tüm uçaklardan ve tehlike oluşturabilecek engellerden arındırılmış olması gerekmektedir. Şekil 3.2' den görüleceği üzere kalkan uçak pisti (c) veya pist doğrultusunu terk ettiğinde (b) veya inen uçak pisti terk ettiğinde, (a) inecek olan uçağa iniş izni verilebilir.



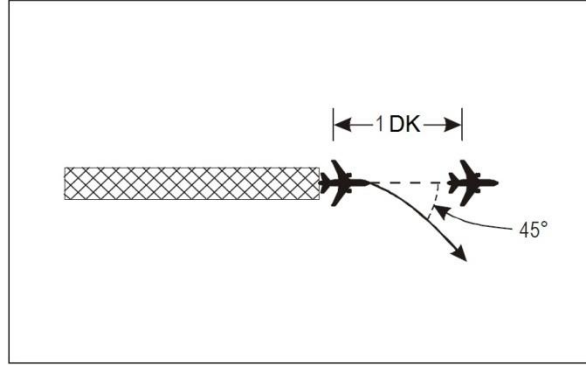
Şekil 3.2. Bir uçağa iniş izni verilebilmesi için gerekli olan koşullar [11].

Arka arkaya kalkacak olan uçaklara, kalkış izninin verilebilmesi için gerekli olan bazı ayırma minimumları vardır. Bunlar;

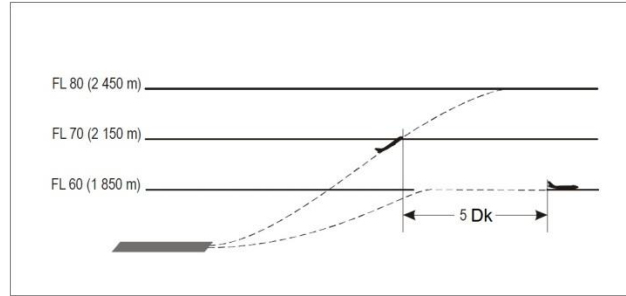
- Önden kalkan uçak, arkadan kalkacak uçaktan 40 knots (kt) (74 km/s) veya daha hızlı ise 2 dakika ara ile arkadaki uçağa kalkış izni verilebilir. (Şekil 3.3.)
- Kalkıştan hemen sonra rotaları arasında 45 dereceden daha fazla bir açı farkı olarsa 1 dakika ara ile arkadaki uçağa kalkış izni verilebilir. (Şekil 3.4.)
- Arkadan kalkacak olan uçak, önden kalkan uçağın seviyesini kat edecekse, seviye kat edildiği anda aralarında 5 dakika olacak şekilde uçağın kalkışına izin verilir (Şekil3.5).



Şekil 3.3. Arka Arkaya kalkacak uçakların ayırması [11].



Şekil 3.4. Kalkıştan sonra rotaları ayrılan uçakların ayırması [11].

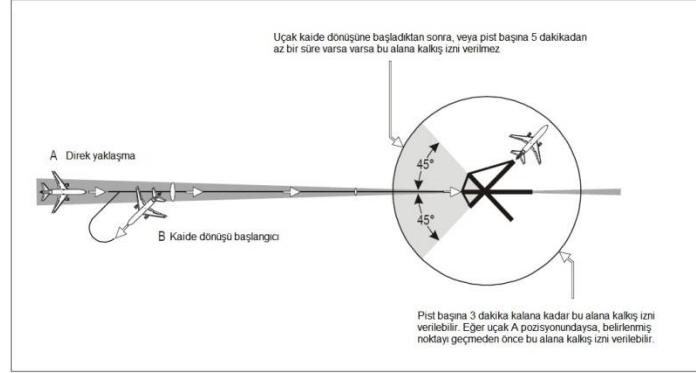


Şekil 3.5. Seviye kat edilecekse kullanılan ayırma [11].

İniş ve kalkış uçakları arasındaki ayırma kuralları ise şöyle özetlenebilir: Eğer direk yaklaşma yapan bir uçak varsa, kalkacak olan uçağa kalkış izninin verilebilmesi için;

- a. İnecek olan uçak pist başına gelmeden 5 dakika öncesine kadar her yöne,
- b. İnecek olan uçağın pist istikametinin, 45'er derecelik alanı dışında kalan alana;
  - i. İnecek olan uçak pist başına gelmeden 3 dakika öncesine yukarıda belirtilen alana,

- ii. İnecek olan uçak yaklaşma hattı üzerinde belirlenmiş bir noktayı geçmeden önce veya hava trafik hizmeti otoritesi tarafından belirlenen noktadan önce yukarıda belirtilen alana kalkış izni verilebilir.



Şekil 3.6. İniş ve kalkış uçakları arasındaki ayırma [11].

ICAO'nun 4444 [11] dokümanında yer alan ayırma minimumları, pist kapasitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Pist kapasitesinin belirlenmesinde hava trafiğinin özelliklerinin de büyük etkisi vardır.

### 3.4.2. Hava trafiğinin özellikleri

Pist kapasitesini etkileyen uçak performans özellikleri; ağırlık, hız ve uçağın sahip olduğu teknik donanımlardır. Ağırlık, kuyruk türbülansı oluşturması nedeni ile ağır uçağı takip eden hafif uçağı korumak amacı ile kuyruk türbülansı ayırma minimumları kullanılmaktadır. ICAO, Doc. 4444'e göre uçaklar maksimum kalkış ağırlıklarına göre üç farklı kategoride değerlendirilmektedir. [11] Bunlar;

- AĞIR (H - Heavy) – 136.000Kg ve üzeri tüm uçak tipleri
- ORTA (M - Medium) – 136.000Kg'den az 7.000Kg'den fazla olan tüm uçak tipleri
- HAFİF (L - Light) – 7.000Kg'den az olan tüm uçak tipleridir.

ICAO'nun belirlemiş olduğu uçak kategorilerine göre; ağır (H) kategorideki bir uçağı takiben yaklaşan orta (M) kategorideki uçak arasında minimum 2 dakika, ağır (H) veya orta (M) kategorilerdeki uçakları takiben yaklaşan hafif (L) kategorideki uçak arasında minimum 3 dakikalık ayırma minimumu uygulanır.

Belirlenmiş uçak kategorisinin yanında uçağın iniş hızı pist işgal süresini etkilemektedir. Uçağa monte edilmiş donanımlar ise olumsuz meteorolojik koşullarda dahi yer ve uydu tabanlı iniş destek sistemi sağlayarak operasyonun aksamasını engellemektedir. Kapasitenin etkin kullanımı için operasyon karmaşı önemlidir.

### **3.4.3. Operasyon karmaşı**

Operasyon karmaşı; bir piste operasyon düzenleyen uçakların, uçak tipleri ile birlikte iniş ve kalkış sıraları olarak tanımlanabilir. Uçak tiplerine göre uçakların ağırlığı, yaklaşma hızı, iniş ve durma mesafesi, kalkış mesafesi farklılık göstermektedir. Dolayısı ile uçak tiplerinin pist işgal süresi ve geliş ayırmaları üzerinde büyük etkisi vardır. Operasyonların sırası ve çeşitliliği pist kapasitesi üzerinde ve kontrolör iş yükünde etkin rol oynamaktadır.

### **3.4.4. Pist konfigürasyonları**

Kullanılan pistin nasıl seçildiği ve pist konfigürasyonlarının kapasiteye olan etkisi çalışmanın Bölüm 2.4 başlığında açıklanmıştır. Birden fazla pist var ise; pistlerin arasındaki uzaklıklar, kesişme noktaları ve çıkış taksi yolları, pist konfigürasyonlarının kapasiteye olan etkisi araştırılırken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardır. Yukarıda belirtilen noktalar her havaalanında farklılık göstereceği için, pist kapasitesine etki eden tüm faktörler göz önünde bulundurularak uygun stratejiler üretilmelidir ve herhangi bir uçak kategorisi için kısıtlaması bulunan pist veya pistlere dikkat edilerek operasyon düzenlenmelidir.

### **3.4.5. Hava trafik kontrol stratejileri**

Kullanılacak pist veya pistlerin seçimi, aynı anda talepleri olan uçaklardan hangisine daha önce hizmet verileceği, incek veya kalkacak olan uçakların sıralaması, olası hava hadiselerinde kontrolörlerin emniyet dâhilinde sunduğu çözümler gibi hadiseler, hava trafik kontrol stratejilerini belirler.

Bundan sonraki bölümde çalışmanın esas kısmını oluşturan havaalanı hava tarafı teorik kapasite hesaplamaları verilecektir.

#### **4. HAVAALANI HAVA TARAFI TEORİK KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI**

Artan hava taşımacılığı ile birlikte, uçuşların başladığı ve sona erdiği yerler olan havaalanlarında kapasite problemleri ortaya çıkmaktadır. Yoğun talebi karşılayamayan havaalanlarındaki gecikmeler, uzun kalkış kuyrukları, iniş için yolunu uzatan veya havada bekleyen uçuşlara sebebiyet vermektedir. Geciken her uçak, havayolu işletmecileri için ek maliyet, havayolu müşterileri için ise memnuniyetsizlik demektir. Gecikmelerin önüne geçebilmek ve azaltmak ancak iyi bir planlama ile mümkün olur. İyi bir planlama ise havaalanı kapasitesinin önceden doğru bilinmesini gerektirir.

Bir havaalanı kapasitesi hesaplanırken, havaalanı pist kapasitesini, taksi yollarının kapasitesini, apron kapasitesini ve kapıların kapasitesini ayrı ayrı hesaplamak gerekmektedir. Özellikle tıkanıklık problemi yaşayan mevcut havaalanlarının kapasitelerini artırmak amacı ile yapılması planlanan yeni taksi yolu, apron veya pistin kapasiteyi ne kadar etkileyeceğinin önceden doğru bir şekilde belirlenmesi, yapılacak yatırımlar açısından önemlidir. Bu çalışmada, deniz seviyesi koşullarında tek pistli bir havaalanında farklı çıkış taksi yollarına göre kapasitenin nasıl değiştiğinin analitik yöntem kullanılarak hesaplanması ve yorumlanması yapılmıştır. Çalışmada trafik karması ve uçak karması tüm olasılıklar hesaba katılmak üzere yapıldığı için, çalışma farklı türden karmaya sahip havaalanlarının kapasite planlamalarına faydalı olacaktır. Bunun için öncelikle, pist kapasitesini belirleyen en önemli faktör olan ayırmaların nasıl belirleneceği anlatılacaktır.

##### **4.1. Kullanılacak Ayırma Kuralları**

Pist kapasitesini belirleyen en önemli faktör iniş ve kalkış, arka arkaya kalkacak veya iniş için yaklaşmakta olan uçaklar arasında olması gerekli mesafe veya zamanlardır. Bu mesafe veya zamanlara ayırma denilir. Çalışmanın temeli teorik kapasitenin bulunması olduğuna göre bu başlıkta kullanılacak ayırma prensipleri verilecektir.

#### 4.1.1. Ardı sıra inecek olan uçaklar arasındaki ayırmalar

Öndeki uçağın pist eşiğini geçtiği andan, arkadaki uçağın pist eşiğini geçtiği ana kadar geçen zaman, gelen uçaklar arasında olması gereken zaman ayırmasını verir [11].



Şekil 4.1. İniş uçaklarının ayrılması [12]

Ardı sıra gelen uçaklar arasındaki ayırma minimumlarının belirlenebilmesi için Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatının Hava Trafik Yönetimi isimli, 4444 numaralı dokümanda [11] yer alan geliş trafikleri için ayırma minimumları temel alınmıştır. Bu ayırma:

‘Radar kapasitesine bağlı olarak ilgili hava trafik hizmet sağlayıcı otoritenin, yaklaşma kontrol hizmeti verilirken uzunlamasına radar ayırma minimumunu 3 Nm olarak belirlediği kabul edilmiştir’ demektedir.

Yaklaşma kontrol hizmeti verilirken uçaklar arasında dümen suyu türbülansı ayırmaları Çizelge 4.1.’deki gibi uygulanır.

Çizelge 4.1. Mesafe esasına dayalı radar yaklaşması ayırmaları [11]

Kategoriler		Ayırmalar
Öndeki uçak	Arkadaki Uçak	
Ağır	Ağır	7,4 Km (4 Nm)
	Orta	9,3 Km (5 Nm)
	Hafif	11,1 Km (6 Nm)
Orta	Hafif	9,3 Km (5 Nm)

İniş için arka arkaya gelen uçaklarda ağır veya orta kategorideki bir uçağın iniş yapmasından sonra uygulanması gereken, zaman esasına dayalı ayırma minimumları Çizelge 4.2.’deki gibi uygulanır.

**Çizelge 4.2.** Zaman esasına dayalı radar yaklaşması ayırmaları [11]

Öndeki uçak	Arkadaki Uçak	Zaman (Dakika)
Ağır	Orta	2
Ağır veya Orta	Hafif	3

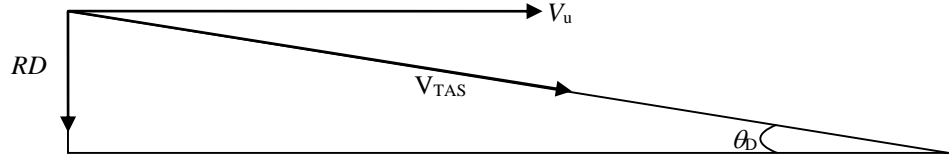
Bu çalışmada uçaklar arasındaki ayırmalara dayalı olarak kapasiteler analitik olarak bulunacağı için, inen uçaklar arasında ICAO'nun 4444 numaralı dokümanda [11] yer alan geliş trafikleri için ayırma minimumlarının tamamı “saniye” olarak belirtilmelidir.

Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 bir arada değerlendirilecek olursa çalışmada kullanılacak tüm ayırmalar Çizelge 4.3’de verildiği gibi elde edilir.

**Çizelge 4.3.** Mesafe ve zaman ayırmaları

Saniye (Sn) ve Nm		ARKADAKİ		
		AĞIR	ORTA	HAFİF
ÖNDEKİ	AĞIR	4 (Nm)	120 (Sn)	180 (Sn)
	ORTA	3 (Nm)	3 (Nm)	180 (Sn)
	HAFİF	3 (Nm)	3 (Nm)	3 (Nm)

Uçaklar son yaklaşma aşamasında 3°'lik bir süzülüş açısı yaklaşırlar. Çizelge 4.3’deki Nm cinsinden verilen mesafe değerlerini zaman cinsinden ifade etmek için ağır kategorideki bir uçağın 4 Nm ve 3 Nm’lik yolu, orta kategorideki bir uçağın 3 Nm’lik yolu, hafif kategorideki bir uçağın 3 Nm’lik yolu ne kadar zamanda kat edeceğinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesabın yapılabilmesi her bir kategorideki uçağın gerçek hava hızına göre ( $V_{TAS}$ ) yatayda aldığı mesafenin belirlenmesi gerekmektedir.



**Şekil 4.2.** Uçağın alçalma esnasındaki uçuş hızı bileşenleri

Gerçek hava hızının düşeydeki bileşeni alçalma oranı ( $RD$ ) ve yataydaki bileşeni ise ( $V_u$ ) ilerleme hızıdır ve süzülüş açısı ( $\theta_b$ )  $3^\circ$  olarak verilmiştir. Yatay hız,

$$V_u = V_{TAS} \cos \theta_D \quad (4.1)$$

(4.1) denklemi ile verilmiştir. (4.1) denklemi kullanılarak her bir uçak kategorisi için son yaklaşma hızlarına göre hesaplanan zaman esasına dayalı ayırma minimumları Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir.

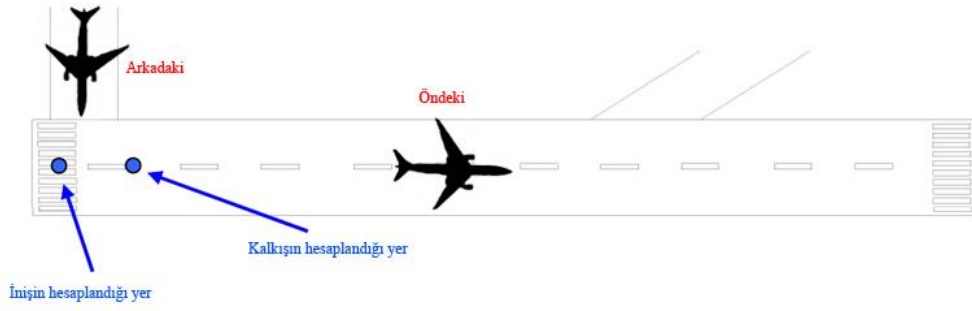
**Çizelge 4.4.** Saniye cinsinden ayırma minimumları

	Arka arkaya gelen uçaklar için saniye cinsinden ayırma minimumları (Sn)	Arkadaki		
		AĞIR	ORTA	HAFİF
Öndeki	AĞIR	99,447	120,000	180,000
	ORTA	74,585	77,249	180,000
	HAFİF	74,585	77,249	154,498

#### 4.1.2. Gelen uçakları takip eden kalkış uçakları arasındaki ayrımlar

İniş için gelen uçağın pist eşiğini geçtiği andan itibaren, kalkacak olan uçağın kalkış için hareketine başladığı ana kadar geçen zaman, gelen uçakları takip eden kalkış uçakları arasında olması gereken zaman ayırmasını verir [11].



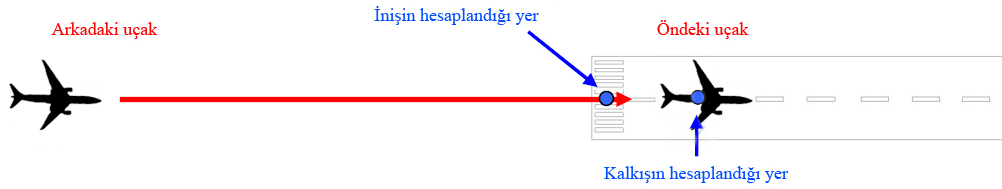


Şekil 4.3. Gelen uçağı takip eden kalkış uçağı arasındaki ayırma[12]

Tek bir pist kullanılırken inen bir uçaktan sonra kalkacak olan uçağa kalkış izninin verilebilmesi için, inmiş olan uçağın pisti tamamen boşaltması gerekmektedir.

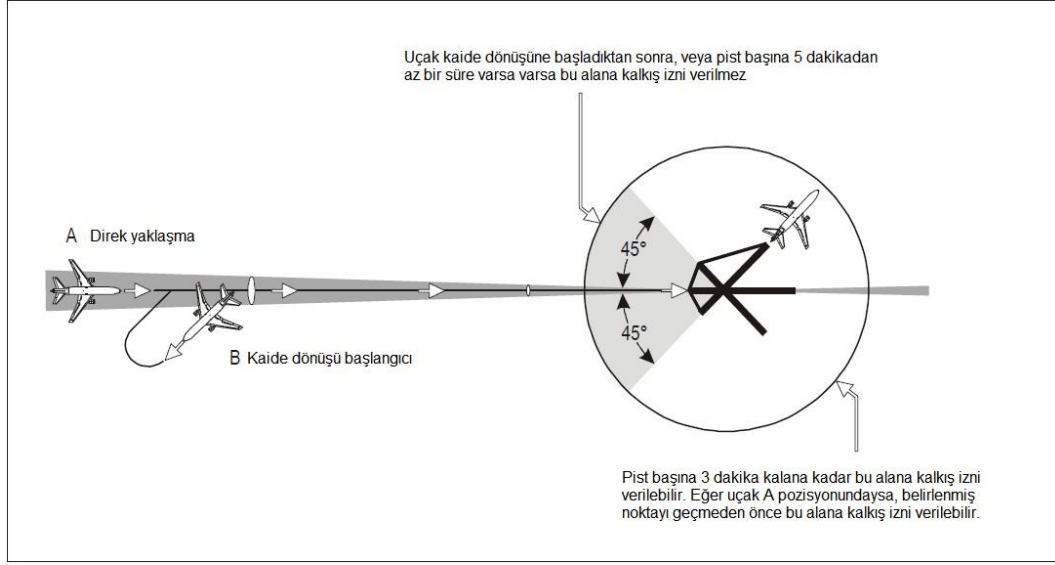
#### 4.1.3. Kalkan uçakları takip eden gelen uçaklar arasındaki ayırmalar

Kalkacak olan uçağın, kalkış için harekete başladığı andan itibaren iniş için gelen uçağın pist eşiğini geçtiği ana kadar geçen zaman, kalkan uçakları takip eden gelen uçaklar arasındaki zaman ayırmasını verir [12].



Şekil 4.4. Kalkan uçağı takip eden uçaklar arasındaki ayırma [12]

Kalkan uçakları takip eden gelen uçaklar arasındaki zaman ayırması minimumları ICAO'nun, 4444 numaralı dokümanda [11] belirtilmiştir. Buna göre;



Şekil 4.5. Ayırmaların genel gösterimi [11]

İniş ve kalkış uçakları arasındaki ayırma kuralları ise şöyle özetlenebilir: Eğer direk yaklaşma yapan bir uçak varsa, kalkacak olan uçağa kalkış izninin verilebilmesi için; [11]

- a. İnecek olan uçak pist başına gelmeden 5 dakika öncesine kadar her yöne,
- b. İnecek olan uçağın pist istikametinin, 45'er derecelik alanı dışında kalan bölgeye;
  - i. İnecek olan uçak pist başına gelmeden 3 dakika öncesine kadar ya da,
  - ii. İnecek olan uçak yaklaşma hattı üzerinde belirlenmiş bir noktayı geçmeden önce veya hava trafik hizmet sağlayıcı otorite tarafından belirlenen bir fiksten veya coğrafi noktadan önce kalkış izni verilebilir (Şekil 4.5).

Bu çalışmada bir uçağa kalkış izni verilebilmesi için, hava trafik hizmet sağlayıcı otoritenin pist başına 3 Nm uzaklıkta bir fiks belirlediği kabul edilmiştir.

#### 4.1.4. Kalkan uçaklar arasındaki ayırmalar

Önden kalkan uçağın, kalkış için hareketine başladığı andan itibaren, arkasından kalkacak olan uçağın kalkış için hareketine başladığı ana kadar geçen zaman kalkan uçaklar arasındaki zaman ayırmasını verir [11].



**Şekil 4.6.** Kalkan uçaklar arasındaki ayırmalar [12]

Arka arkaya kalkan uçaklar arasındaki zaman ayırması minimumları ICAO'nun 4444 numaralı dokümanına [11] ve Hava Trafik Hizmetleri Planlama Elkitabı isimli, 9426 numaralı dokümanına [13] göre Çizelge 4.5.'teki gibi yapılacaktır.

**Çizelge 4.5.** Arka arkaya kalkan uçakların ayırma minimumları [11,13]

SANİYE	AĞIR	ORTA	HAFİF
AĞIR	60	120	120
ORTA	60	60	120
HAFİF	60	60	60

Kullanılacak ayırmalardan sonra ikinci adımda uçakların meşguliyet sürelerini belirleyecek iniş ve kalkış zamanlarının belirlenme prensibi anlatılacaktır.

#### 4.2. Uçak Performansına Bağlı Olarak Meşguliyet Sürelerinin Bulunması

Teorik kapasitenin bulunmasındaki diğer bir önemli parametre, ilgili havaalanına iniş, kalkış yapan uçakların manevra süreleridir. Bu sürelerin hesaplanmasındaki en yaygın yöntem gözlem tekniğidir. Bu çalışmada ise farklı bir yöntem uçuş mekaniği prensiplerine dayalı olarak iniş ve kalkış performans değerleri hesaplanacaktır. Böylece her bir uçak kategorisine bağlı olarak ayrı ayrı seçilen uçak tipleri için manevra süreleri bulunacaktır.

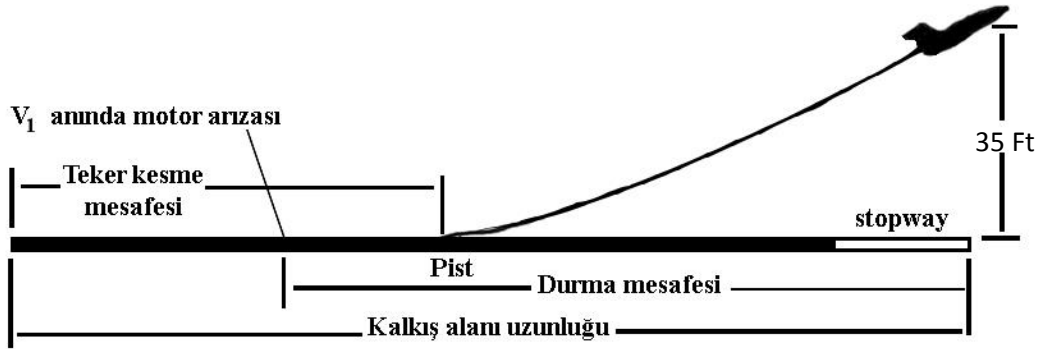
Uçakların iniş ve kalkış sürelerinin uçuş mekaniğine göre nasıl bulunacağı konu ile ilgili çok sayıda ders kitaplarında bulunabilir [14-17]. Bir uçağın iniş ve kalkış performansını etkileyen pek çok değişken vardır. Bunlar,

- Uçağın kalkış ve iniş ağırlığı,
- Uçağın aerodinamik-tepki özellikleri,
- Pist rakımı,
- Kalkış anındaki meteorolojik koşullar,
- Pist yüzeyinin durumu, pist sürtünme katsayısı
- Havayolu şirketi usulleri.

Burada kullanılacak performans değerleri standart atmosfer koşulları için hesaplanmıştır.

#### 4.2.1. Kalkış performansı

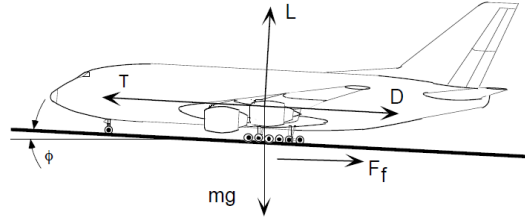
Bir uçağın kalkış mesafesi uzunluğu iki kısımdan oluşur. Yerde pist üzerinde kat ettiği mesafe ve kalkışı takiben 35 feet yüksekliğe ulaşana kadar havada kat ettiği mesafedir (Şekil 4.7). Bu her iki mesafenin toplamı uçağın kalkış uzunluğu olarak tanımlanır.



Şekil 4.7. Uçağın kalkış hareketi

- Yer rulesi uzunluğu ve süresi

Uçağa ait yer rulesi uzunluğunun hesaplanması için öncelikle uçağa etki eden kuvvetler ile birlikte çizilen, harekete ait serbest cisim diyagramı Şekil 4.8’de verilmiştir.



**Şekil 4.8.** Yer rulesi esnasında uçağa etki eden kuvvetler

Yer rulesi esnasında uçağa taşıma ( $L$ ), ağırlık ( $W=mg$ ), sürüklenme ( $D$ ), motor tepki ( $T$ ) ve sürtünme kuvveti ( $F_f$ ) etki etmektedir. Pistin eğimini gösteren ( $\phi$ ) açısı sıfır derece kabul edilmiştir. Bütün incelemeler aynı pist için yapılacağından bu kabul çok fazla hata getirmeyecektir. İncelenen hareke ait hareket denklemleri (4.2) ve (4.3) denklemleri ile verilmiştir. Burada  $R$  yer tepki kuvveti  $\mu$  ise yere ait sürtünme katsayısını göstermektedir. Bu durumda her iki ifadenin çarpımı sürtünme kuvvetini verecektir.

$$T - D - \mu R = \frac{W}{g} \frac{dV}{dt} \quad (4.2)$$

$$R = W - L \quad (4.3)$$

(4.2) ve (4.3) denklemleri bir arada değerlendirilirse ve ivme ifadesi yol cinsinden yazılacak olursa, (4.4) denklemi elde edilir.

$$T - D - \mu(W - L) = \frac{W}{g} \frac{dV}{dt} = \frac{W}{g} \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{W}{g} V \frac{dV}{dx} \quad (4.4)$$

Bu durumda yer rulesi uzunluğu için;

$$dx = \frac{W}{g} \frac{V dV}{(T - \mu W) - (C_D - \mu C_L) \frac{\rho}{2} V^2 S} \quad (4.5)$$

(4.5) diferansiyel ifadesi bulunur. Burada integral sınırları için uçak pist başında  $V_1=0$  hızından başlayarak  $V_2=V_{LOF}$  emniyetli kalkış hızına yani yerden tekerlek kestiği hıza kadar ivmelenecektir. Kalkış esnasındaki tüm hızlar uçağın minimum havada tutunma hızının (stall hızı) belirli katı olacak şekilde uluslararası standartlarca belirlenmiştir. Belirlenmiş bu hızlar ilgili koşula ait minimum değerlerdir. JAR/FAR 25.107'e göre emniyetli kalkış hızı uçağın stall hızının 1,1 katıdır. Bu durumda (4.5) integralinin sonucu (4.6) denkleminde olduğu hesaplanır.

$$x_{TO} = \frac{W}{g} \left( \frac{1}{2B} \ln \frac{A}{A - BV_{LOF}^2} \right) \quad (4.6)$$

Bu denklemdeki A ve B katsayıları ise (4.7) denkleminde verilmiştir.

$$\begin{aligned} A &= T - \mu W \\ B &= (C_D - \mu C_L) \frac{\rho}{2} S \end{aligned} \quad (4.7)$$

Bu denklemlerde  $C_D$  sürüklenme katsayısını,  $C_L$  taşıma katsayısını,  $S$  uçağın referans kanat alanını ve  $\rho$  ise hava yoğunluğunu göstermektedir.

İncelenen hareketin süresi ise yine benzer şekilde (4.4) denkleminin zamana bağlı olacak şekilde integralinin alınması ile (4.8) de verilen yer rulesi kalkış zamanı istenilen hız aralığı için bulunabilir.

$$t_{TOg} = \frac{W_{TO}}{g\sqrt{AB}} a \tanh\left(\sqrt{\frac{B}{A}} V_{LOF}\right) \quad (4.8)$$

b. Uçak havada iken yerde kat ettiği mesafe

Uçak pistten kalktıktan sonra da tırmanışını 35 feet irtifaya ulaşana kadar pist üzerinde tırmanmaya devam etmektedir. Burada uçağa ait tırmanma oranı ( $ROC$ );

$$ROC = \frac{T - D}{W} V_{TAS} \quad (4.9)$$

Öncelikle hesaplanmalıdır. (4.9) denklemindeki sürüklenme kuvveti gerçek hava hızı bilindiğinden (4.10) denklemi ile hesaplanabilir.

$$D = C_D \frac{\rho}{2} V_{TAS}^2 S \quad (4.10)$$

Tırmanma oranı bilindiğine göre tırmanma açısı (4.11) ve uçuş hızının yatay bileşeni (4.1) denklemlerinden bulunabilir.

$$\theta_T = \text{Arc sin} \left( \frac{ROC}{V_{TAS}} \right) \quad (4.11)$$

Bu aşamadan sonra 35 feet irtifaya ulaşma süresi, tırmanma hızının küçük irtifa dilimleri için irtifa ile doğrusal değiştiği kabulüne dayalı olarak (4.12) ifadesindeki gibi bulunur.

$$t_{TOa} = \frac{h_2 - h_1}{ROC_2 - ROC_1} \ln \left( \frac{ROC_2}{ROC_1} \right) \quad (4.12)$$

Toplam kalkış süresi,

$$t_{TOt} = t_{TOg} + t_{TOa} \quad (4.13)$$

bulunur. Bu aşamada yerde kat ettiği mesafe ise (4.13) ve (4.1) denklemlerinden bulunabilir.

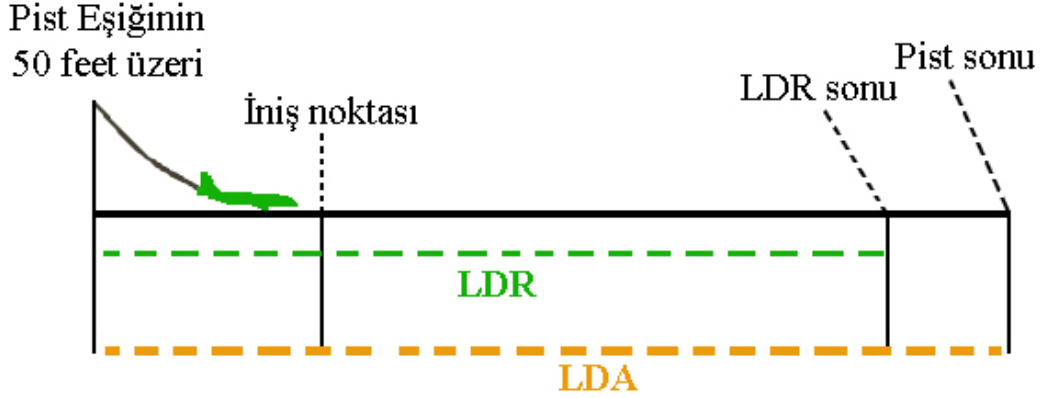
$$x_{TOa} = V_u x t_{TOa} \quad (4.14)$$

Kalkış hareketi için toplam uzunluk ise, (4.6) ve (4.14) denklemlerinden bulunan değerlerin toplanması ile elde edilir.

Böylece uçağın kalkış uzunluğu ve pist uzunluğu bilindiğine göre her iki değer karşılaştırılarak, uçağın pist doğrultusunu terk etme zamanı ve irtifası kolayca bulunur. İşlem hassasiyeti açısından irtifa dilimleri ne kadar küçük seçilirse, bulunan zamanlar da o derece doğru olacaktır.

#### 4.2.2. İniş performansı

Uçağın iniş hareketi performansları da kalkış hareketine benzer şekilde hesaplanır. Kalkıştan farklı olarak, hızlı çıkış taksi yolu yerlerinin belirlenmesi açısından, iniş hareketi yer rulesi aşamasında uçağın farklı hızlara pistin kaçınıcı metresinde ve ne zaman ulaşacağını bulunması önem taşımaktadır.



Şekil 4.9. Uçağın iniş hareketi

Uçağın iniş mesafesi uzunluğu 50 feet irtifadan iniş yapıp pist üzerinde duruncaya kadar kat ettiği mesafe olarak tanımlanır. Kalkış hareketine benzer şekilde, uçağın havada ve yerde kat ettiği mesafelerin toplamı uçağın iniş mesafesini verecektir. Şekil 4.9’da ifade edilen LDA, bir uçağın inişi sırasında yerde durabilmesi için uygun ve mevcut beyan edilmiş pist uzunluğu [4], LDR ise uçağın iniş ağırlığı, yer rüzgârı ve sıcaklık, pist rakımı ve eğimi, pistin durumu (kuru, ıslak, karlı vb.) ve uçağın frenleme sistemlerinin durumuna göre hesaplanan gerekli iniş mesafesidir.

##### a. Yer rulesi mesafesi ve süresi

Yer rulesi mesafesi için Şekil 4.8’den faydalanarak hareket denklemleri yazılacak olursa (4.15) denklemi elde edilir. Bu aşamada uçağın motorlarının rölantide çalıştığı kabul edilmiştir. Doğal olarak sürtünme katsayısının değeri kalkış hareketinden farklıdır.



$$-D - \mu(W - L) = \frac{W}{g} \frac{dV}{dt} = \frac{W}{g} \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{W}{g} V \frac{dV}{dx} \quad (4.15)$$

(4.15) denkleminin integral sınırları uçağın piste teker koyduğu andaki hızı ve uçağın taksiye başlayacağı hız değeri arasında incelenecektir. Piste teker koyma hızı havada tutunma hızının 1,3 katına eşittir. (4.16) denklemi istenilen herhangi bir hız değeri için uçağın pist üzerinde durma mesafesini verecektir.

$$x_{LDg} = \frac{W}{2gB} \left( \ln \frac{A - BV^2}{A - BV_{LD}^2} \right) \quad (4.16)$$

(4.16) denklemindeki A ve B katsayılarının değerleri ise (4.17) denkleminde verilmiştir.

$$\begin{aligned} A &= \mu W \\ B &= (\mu C_L - C_D) \frac{\rho}{2} S \end{aligned} \quad (4.17)$$

Bu aşama ile ilgili süre ise (4.15) denkleminde bulunur.

$$t_{LDg} = \frac{W_{LD}}{g\sqrt{AB}} a \tanh\left(\sqrt{\frac{B}{A}} V_{LOF} - \sqrt{\frac{B}{A}} V\right) \quad (4.18)$$

b. Havada kat ettiği mesafe

Uçağın 50 feet irtifadan alçalıp piste tekerlek koyuncaya kadar yer yüzeyi üzerinde almış olduğu mesafedir. Burada da kalkış hareketine benzer şekilde öncelikle alçalma oranı (RD) hesaplanmalıdır.

$$RD = \frac{T - D}{W_{LD}} V_{TAS} \quad (4.19)$$

(4.9) denklemindeki sürükleme kuvveti gerçek hava hızı bilindiğinden (4.10) denklemi ile hesaplanabilir. Alçalma oranı bilindiğine göre alçalma açısı (4.20) ve uçuş hızının yatay bileşeni (4.1) denklemlerinden bulunabilir.

$$\theta_D = \text{Arc sin} \left( \frac{RD}{V_{TAS}} \right) \quad (4.20)$$

Bu aşamadan sonra 50 feet irtifadan piste alçalma süresi, alçalma hızının küçük irtifa dilimleri için irtifa ile doğrusal değiştiği kabulüne dayalı olarak (4.21) ifadesindeki gibi bulunur.

$$t_{LDa} = \frac{h_2 - h_1}{RD_2 - RD_1} \ln \left( \frac{RD_2}{RD_1} \right) \quad (4.21)$$

Toplam iniş süresi,

$$t_{LDt} = t_{LDg} + t_{LDa} \quad (4.22)$$

bulunur. Bu aşamada yerde kat ettiği mesafe ise (4.23) denklemi ile bulunabilir.

$$x_{LDa} = V_u x t_{LDa} \quad (4.23)$$

Kalkış hareketi için toplam uzunluk ise, (4.16) ve (4.23) denklemlerinden bulunan değerlerin toplanması ile elde edilir.

#### 4.2.3. Uçak performans modelleri

Uygulama için seçilecek örnek uçaklara ait aerodinamik ve tepki kuvveti model ve katsayıları için Eurocontrol tarafından geliştirilmiş olan BADA (Base of Aircraft Data) [20] modelinin 3.6 numaralı versiyonu kullanılmıştır.

Hesaplamalarda her bir kategori için seçilen örnek uçaklar şunlardır:

1. Ağır kategori için: B773
2. Orta kategori için: B738
3. Hafif kategori için: Trinidad, TB-20

Devlet Hava Meydanları İşletmesinin 2011 istatistik yılına [21] göre ülkemizdeki hava trafiğinin %30'unu B738, %16'sını A320 tipi orta kategorideki uçaklar oluşturmaktadır. Ülkemizdeki hava trafiğinin %80'i orta kategorideki uçaklar tarafından sağlanmaktadır. Geriye kalan ancak %17'ini ağır kategorideki uçaklar sağlamaktadır. Hafif kategorideki IFR uçuş sayısı ise oldukça azdır. Bu yüzden seçilen uçak tipi örneklemeleri geneli temsil eder niteliktedir.

### 4.3 Kabuller

Tek bir piste sahip havaalanında, farklı çıkış taksi yollarının kapasiteyi nasıl etkilediğinin bulunabilmesi ve yorumlanabilmesi için analitik model oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda verilmiştir.

1. Pist uzunluğu 3000 m., genişliği 60 m. ve deniz seviyesindedir.
2. Bütün uçuş operasyonları için standart atmosfer koşulları geçerlidir.
3. Uçuş operasyonları gerçekleştirilirken herhangi bir hava olayı olmayıp, rüzgâr hızı ve ivmesi sıfırdır.
4. Operasyonların tümü IFR koşullar altında gerçekleşmiştir.
5. Tüm uçaklar CAT I ILS yaklaşması yapmaktadırlar. Karar İrtifası (DH-Decision Height) 200 feet'te ve 3°'lik süzülüş açısına göre pist başına 1163 m. uzaklıktadır.
6. İnecek olan uçak son yaklaşma 3 Nm 'ye gelinceye kadar, kalkış izni verilebilir.
7. Ağır, orta ve hafif kategorideki uçakları temsilen sırası ile B773, B738 ve TB-20 uçaklarının Bada'daki referans ağırlıkları ve hızları temel alınmıştır. Buna göre uçakların son yaklaşma hızları;
  - a. Ağır – 145 Knot,
  - b. Orta – 140 Knot,
  - c. Hafif – 70 Knot'tır.
8. İnen uçaklar pist başında 50 feet irtifada bulunmaktadır ve pist başından itibaren teker koyana kadar geçen süre 7,5 saniyedir.
9. Ağır ve orta kategorideki uçaklar, maksimum 40 Knot hız ile hızlı çıkış taksi yoluna (eğer var ise) giriş yapabilecek, hafif kategorideki uçaklar ise maksimum 20 Knot ile hızlı çıkış taksi yollarına giriş yapabileceklerdir.
10. Pist üzerindeki geri dönüş hızı tüm uçaklar için 3 Knot'tır.
11. Pist üzerindeki taksi hızları;
  - a. B773: 30 knot
  - b. B738: 30 knot
  - c. TB-20: 20 knot olarak belirlenmiştir.

#### 4.4. Tek Pisti Olan Havaalanı İçin Saatlik Kapasite Modeli

Analitik yöntem ile saatlik pist kapasitesinin hesaplanabilmesi için uçak karmasının ve trafik akış karmasının bilinmesi gerekmektedir. Uçak karması uçakların tip ve kategori karmasıdır. Farklı performanstaki uçakların aynı pisti kullanmak istemelerinden oluşan karma söz konusudur. Trafik karması ise iniş için gelen ve kalkış için bekleyen uçaklar ile ilgili karmadır. Bu çalışma mevcut bir pist üzerinde uçak ve trafik akış karmasını incelemeyen, tek piste sahip havaalanlarında genel olarak her tür karmaya uygulanabilecek bir model öngörmektedir. Öngörülen model üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- a. Mesafe Süre diyagramlarının oluşturulması
- b. Olasılık matrislerinin oluşturulması ve matris değerlerinin bulunması
- c. Olası tüm uçak ve akış karmalarına göre saatlik pist kapasitenin hesaplanması

##### 4.4.1. Mesafe süre diyagramlarının oluşturulması

Tek pisti olan bir havaalanında bir uçağın pist üzerinde yapabileceği tüm hareketleri görsel olarak gösterebilmek için ağır, orta ve hafif kategorideki uçakları temsilen, orta kategorideki bir uçak için Şekil 4.10’da verilen mesafe – süre diyagramı oluşturulmuştur.

Şekil 4.10’daki mesafe – süre diyagramı, yoğun bir trafikte ayırma minimumlarını ihlal etmeden trafik akışları arasında olabilecek minimum zamanları vermektedir. Mesafe – süre diyagramında, ‘X’ eksenini saniye cinsinden zamanı, ‘Y’ eksenini ise metre cinsinden mesafeyi temsil etmektedir. 3000 metre uzunluğundaki pist ‘X’ ve ‘Y’ eksenlerinin orijinine yerleştirilmiştir. Olası tüm trafik akış hareketlerini temsil etmek üzere, diyagrama 5 trafik akışı yerleştirilmiştir. Buna göre akışların her biri şu şekilde açıklanabilir:

1 numara ile gösterilen uçak: Bir iniş uçağıdır. Uçağın pist başını geçtiği an “ $t_1$ ” olarak gösterilmiştir. Uçağın pisti tamamen terk ettiği an ise “ $t_1'$ ” olarak gösterilmiştir. Şekil 4.10’da uçağın pist üzerinde geri dönüş (backtrack) yaparak pisti terk ettiği görülmektedir.

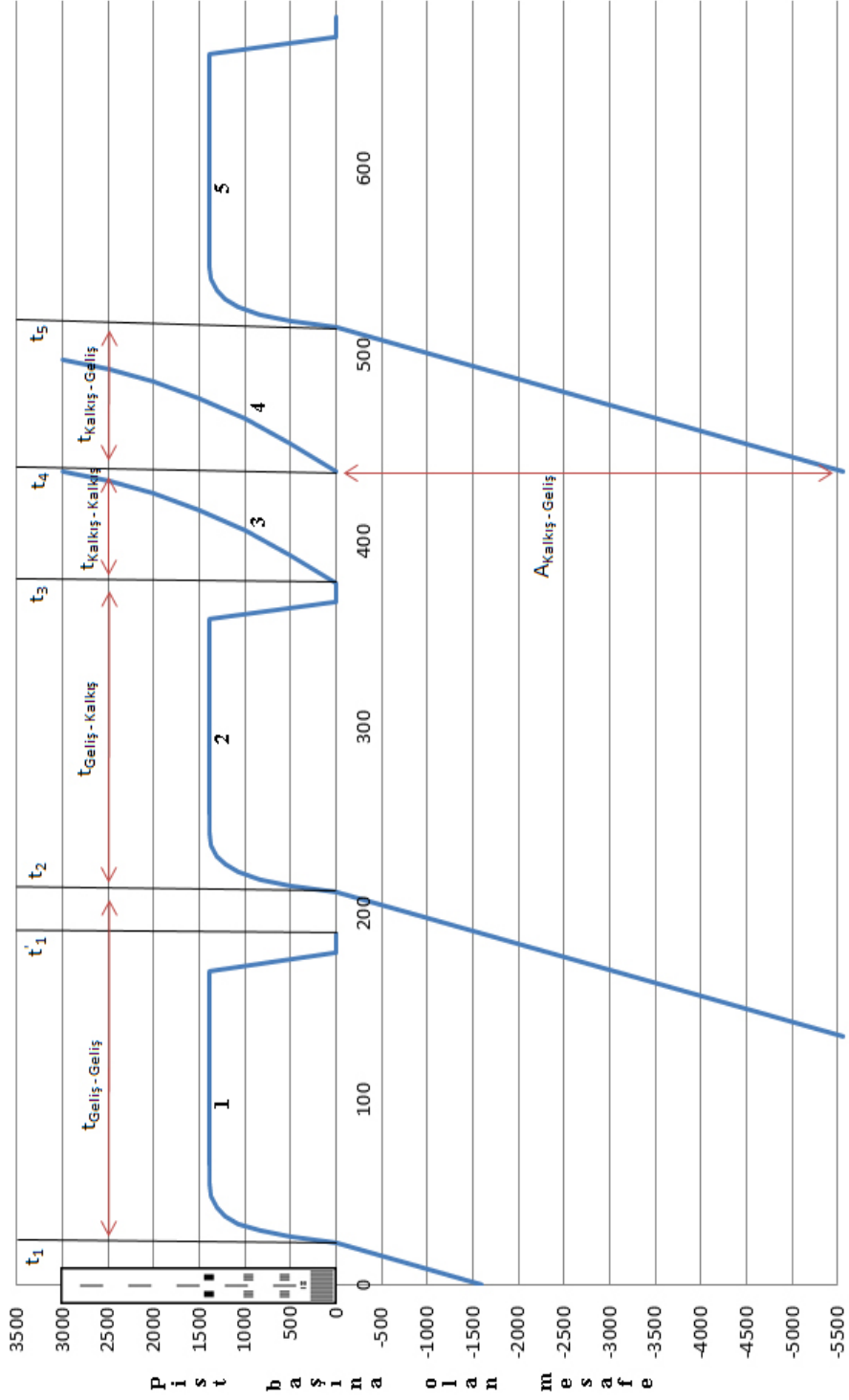
2 numara ile gösterilen uçak: İniş takip eden diğer bir iniş uçağıdır. Uçağın pist başını geçtiği an “ $t_2$ ”, pisti tamamen terk ettiği an “ $t_3$ ” olarak gösterilmiştir.

3 numara ile gösterilen uçak: İniş takip eden bir kalkış uçağıdır. İnen uçağın pisti terk etmesi ile birlikte, kalkacak olan uçağın kalkış için hareketine başladığı an “ $t_3$ ” olarak gösterilmiştir.

4 numara ile gösterilen uçak: Önden kalkan uçağın arkasından kalkacak olan kalkış uçağıdır. Kalkış ayırma minimumları temel alınarak 4 numara ile gösterilen uçağın kalkış hareketine başladığı an “ $t_4$ ” olarak gösterilmiştir.

5 numara ile gösterilen uçak: Kalkış uçağının arkasından gelen bir iniş, uçağıdır. İniş uçağının pist başını geçtiği an “ $t_5$ ” olarak gösterilmiştir. “ $t_4$ ” ve “ $t_5$ ” arasında geçen süre “ $A_{\text{Kalkış} - \text{Geliş}}$ ” ayırmasına göre hesaplanır.

Orta kategorideki bir uçağın mesafe - süre diyagramı



Şekil 4.10. Orta kategorideki bir uçağın mesafe-süre diyagramı

İnişte arka arkaya gelen uçaklardan, arkadakine iniş izni verilebilmesi için öndeki uçağın pisti tamamen terk etmesi gerekmektedir. Kabullerde de verilen ILS CAT I yaklaşması yapan bir uçak için karar irtifası 200 feet'tir ve pist başına 1163 m. uzaklıktadır. 3°'lik süzülüş açısı ile yaklaşan hafif, orta ve ağır kategorideki uçakların 1163 m. yolu kat edebilmesi için (4.1) ile verilen denkleme göre hafif kategorideki uçaklar için 32,325 saniye, orta kategorideki uçaklar için 16,176 saniye ve ağır kategorideki uçakları için 15,618 saniyeye ihtiyaç vardır. Ortalama pilot reaksiyon zamanı olan [21] 6 saniye de dikkate alındığında öndeki uçak pisti terk ettiği anda, arkadaki uçağın pist başına hafif kategorideki uçak için 38,325 saniye, orta kategorideki uçaklar için 22,176 saniye ve ağır kategorideki uçaklar için 21,618 saniye uzaklıkta olması gerekmektedir ve bu da “ $t_1$  ve  $t_2$ ” arasında geçen zamanı verir.

Şekil 4.10'da “ $t_1$ ” ve “ $t_2$ ” arasında geçen zaman “ $t_{\text{Geliş - Geliş}}$ ” olarak gösterilmiştir. Bu zaman inen uçağın pist eşiğini geçtiği andan itibaren başlar ve arkadaki uçağın pist eşiğini geçtiği anda sona erer.  $t_{\text{Geliş - Geliş}}$  zamanı “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” ve “ $t_1'$  ve  $t_2$ ” zamanlarının toplamıdır ve Çizelge 4.4'te verilen saniye cinsindeki ayırmalardan daha az olamaz. Eğer  $t_{\text{Geliş - Geliş}}$  zamanı Çizelge 4.4'te verilen ayırmalardan daha düşük olursa Çizelge 4.4'te verilen ayırma minimumları olduğu şekilde kullanılır.

$$t_{\text{Geliş - Geliş}} = “t_1 - t_1'” + “t_1' - t_2” \quad (4.24)$$

Şekil 4.10'da “ $t_2$  ile  $t_3$ ” arasında geçen zaman “ $t_{\text{Geliş - Kalkış}}$ ” olarak gösterilmiştir. Bu zaman inen uçağın pist eşiğini geçtiği anda başlar ve kalkacak uçağın hareketine başladığı anda sona erer.

Şekil 4.10'da “ $t_3$  ile  $t_4$ ” arasında geçen zaman “ $t_{\text{Kalkış - Kalkış}}$ ” olarak gösterilmiştir. Bu zaman önden kalkan uçağın kalkış hareketine başladığı anda başlar ve arkadaki kalkacak olan uçağın kalkış hareketine başladığı anda sona erer.  $t_{\text{Kalkış - Kalkış}}$  zamanı Çizelge 4.5'te verilen ayırma minimumlarıdır.

“ $t_4$  ile  $t_5$ ” arasında geçen zaman “ $t_{\text{Kalkış-Geliş}}$ ” olarak gösterilmiştir. Bu zaman öndeki kalkan uçağın kalkış hareketine başladığı anda başlar ve iniş için gelen uçağın pist eşiğini geçtiği anda sona erer. Bir uçağa kalkış izninin verilebilmesi için iniş için gelen uçağın Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatının Hava Trafik Yönetimi isimli, 4444 numaralı dokümanına göre [1] hava seyrüsefer hizmet sağlayıcı otorite tarafından belirlenen bir fiksi geçmemesi gerekmektedir. Yapılan kabullerde bu fiks pist başına 3 Nm uzaklıkta belirlenmiştir. Bölüm (4.21) denklemine göre yapılan hesaplamalarda hafif kategorideki bir uçağın 3 Nm’lik yolu kat etmesi için gerekli olan zaman 154,498 saniye, orta kategorideki bir uçak için 77,249 saniye ve ağır kategorideki bir uçak için 74,585 saniye olarak bulunmuştur ve bu da “ $t_{\text{Kalkış-Geliş}}$ ” zamanını ifade etmektedir.

Şekil 4.10’da da görüldüğü gibi geliş ve kalkış olmak üzere iki tip akış karması vardır. Bunlar da “ $t_{\text{Geliş-Geliş}}$ ”, “ $t_{\text{Geliş-Kalkış}}$ ”, “ $t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$ ” ve “ $t_{\text{Kalkış-Geliş}}$ ” olmak üzere 4 farklı ayırmadır.

#### 4.4.2. Olasılık matrislerinin oluşturulması ve matris değerlerinin bulunması

Oluşturulan modelin ikinci aşamasında, akış karması ve ayırmalara göre olasılık matrisleri oluşturulur. Bölüm 4.4.1’de belirtilen 4 farklı ayırma, bir matris üzerinde gösterilecek olursa Çizelge 4.6 elde edilir.

Çizelge 4.6. Olasılık matrisi

OLASILIK MATRİSİ		ARKADAKİ	
		Geliş	Kalkış
(Saniye)		Geliş	Kalkış
ÖNDEKİ	Geliş	$t_{\text{Geliş-Geliş}}$	$t_{\text{Geliş-Kalkış}}$
	Kalkış	$t_{\text{Kalkış-Geliş}}$	$t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$

Oluşturulan model tüm uçak kategorilerini kapsadığından, tüm uçak kategorileri dâhil edilerek ve Çizelge 4.6’de belirtilen olasılık matrisi genişletilerek Çizelge 4.7 oluşturulur.



**Çizelge 4.7.** Tüm kategoriler için olasılık matrisi

OLASILIK MATRİSİ (Saniye)			ARKADAKİ					
			GELİŞ			KALKIŞ		
ÖNDEKİ	GELİŞ	Ağır	1	2	3	10	11	12
		Orta	4	5	6	13	14	15
		Hafif	7	8	9	16	17	18
	KALKIŞ	Ağır	19	20	21	28	29	30
		Orta	22	23	24	31	32	33
		Hafif	25	26	27	34	35	36

Çizelge 4.7’de verilen olasılık matrisinde 1,2,3,4,5,6,7,8 ve 9 rakamları ile ifade edilen değerler  $t_{\text{Geliş-Geliş}}$  zamanını temsil etmektedir. 10,11,12,13,14,15,16,17 ve 18 sayıları ile ifade edilen değerler  $t_{\text{Geliş-Kalkış}}$  zamanını temsil etmektedir. 19,20,21,22,23,24,25,26 ve 27 sayıları ile ifade edilen değerler  $t_{\text{Kalkış-Geliş}}$  zamanını temsil etmektedir. 28,29,30,31,32,33,34,35 ve 36 sayıları ile ifade edilen değerler ise  $t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$  zamanını temsil etmektedir.

$t_{\text{Geliş-Geliş}}$  zamanı (4.24)’te verilen denklemde “ $t_1 - t_1'$ ”+“ $t_1' - t_2$ ” olarak belirtilmiştir. Bölüm 4.4.2’de mesafe süre diyagramında inen bir uçağın pist işgal süresi olarak tanımlanan “ $t_1 - t_1'$ ” zamanı (4.6), (4.12), (4.13), (4.14), (4.18), (4.21), (4.22), ve (4.23) denklemleri kullanılarak hesaplanır. “ $t_1' - t_2$ ” zamanı ise bölüm 4.4.1’de hesaplaması yapılan hafif kategorideki uçak için 38,325 saniye, orta kategorideki uçaklar için 22,176 saniye ve ağır kategorideki uçaklar için 21,618 saniyedir. Bu iki zamanın toplamı eğer Bölüm 4.1.1 Çizelge 4.4. verilen değerlerden daha az ise Çizelge değerleri daha fazla ise toplam zaman ilgili matris değerinde yerine yerleştirilir.

$t_{\text{Geliş-Kalkış}}$  zamanı ise “ $t_1 - t_1'$ ” zamanı ile aynı olduğundan (4.6), (4.12), (4.13), (4.14), (4.18), (4.21), (4.22), ve (4.23) denklemleri kullanılarak hesaplanan zamanlar ilgili matris değerinde yerine yerleştirilir.

$t_{\text{Kalkış-Geliş}}$  zamanında kullanılacak matris değerleri Bölüm 4.4.1’de tanımlanmıştır.

$t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$  zamanında matris değerlerine Bölüm 4.1.4, Çizelge 4.5’te ifade edilen değerler yazılacaktır.

Olasılık matrisleri oluşturulduktan ve matris değerleri hesaplandıktan sonra, uçak ve akış karmalarına göre saatlik pist kapasiteleri hesaplanabilir.

#### **4.4.3. Olası tüm uçak ve akış karmalarına göre saatlik pist kapasitenin hesaplanması**

Farklı uçak ve akış karmalarına göre saatlik pist kapasitesinin hesaplanabilmesi için ağır, orta ve hafif kategorideki uçaklar için öncelikle Çizelge 4.8. oluşturulmuştur.

**Çizelge 4.8.** Geliş-kalkış karması

		<b>Geliş</b>	<b>Kalkış</b>
		<b>Akış Karması Oranı</b>	
<b>Ağır</b>	Uçak	1	4
<b>Orta</b>	Karması	2	5
<b>Hafif</b>	Oranı	3	6

Çizelge 4.8’a göre 1 ile ifade edilen değer ağır kategorideki bir uçağın havaalanına iniş yapacağını, 2 ile ifade edilen değer orta kategorideki bir uçağın havaalanına iniş yapacağını, 3 ile belirtilen değer ise hafif kategorideki bir uçağın havaalanına iniş yapacağını göstermektedir. Kalkış trafiklerinde ise 4 ile belirtilen değer ağır kategorideki bir uçağın havaalanından kalkış yapacağını, 5 ile belirtilen değer orta kategorideki bir uçağın havaalanından kalkış yapacağını, 6 ile belirtilen değer hafif kategorideki bir uçağın havaalanından kalkış yapacağını ifade etmektedir.

**Çizelge 4.9.** 100 uçaklık trafik karması

Uçak Sırası	Rastgele		Rastgele		Rastgele		Rastgele	
	Akış ve Uçak Karması	Uçak Sırası	Akış ve Uçak Karması	Uçak Sırası	Akış ve Uçak Karması	Uçak Sırası	Akış ve Uçak Karması	
<b>1</b>	2	<b>26</b>	4	<b>51</b>	1	<b>76</b>	4	
<b>2</b>	2	<b>27</b>	2	<b>52</b>	1	<b>77</b>	5	
<b>3</b>	5	<b>28</b>	1	<b>53</b>	4	<b>78</b>	6	
<b>4</b>	2	<b>29</b>	4	<b>54</b>	4	<b>79</b>	5	
<b>5</b>	1	<b>30</b>	4	<b>55</b>	2	<b>80</b>	1	
<b>6</b>	4	<b>31</b>	5	<b>56</b>	1	<b>81</b>	3	
<b>7</b>	1	<b>32</b>	3	<b>57</b>	1	<b>82</b>	1	
<b>8</b>	5	<b>33</b>	1	<b>58</b>	4	<b>83</b>	5	
<b>9</b>	5	<b>34</b>	4	<b>59</b>	6	<b>84</b>	5	
<b>10</b>	4	<b>35</b>	5	<b>60</b>	4	<b>85</b>	4	
<b>11</b>	3	<b>36</b>	2	<b>61</b>	4	<b>86</b>	4	
<b>12</b>	1	<b>37</b>	1	<b>62</b>	5	<b>87</b>	3	
<b>13</b>	5	<b>38</b>	2	<b>63</b>	4	<b>88</b>	1	
<b>14</b>	5	<b>39</b>	4	<b>64</b>	4	<b>89</b>	4	
<b>15</b>	1	<b>40</b>	1	<b>65</b>	4	<b>90</b>	6	
<b>16</b>	1	<b>41</b>	4	<b>66</b>	1	<b>91</b>	4	
<b>17</b>	5	<b>42</b>	2	<b>67</b>	2	<b>92</b>	1	
<b>18</b>	6	<b>43</b>	5	<b>68</b>	5	<b>93</b>	1	
<b>19</b>	1	<b>44</b>	1	<b>69</b>	2	<b>94</b>	5	
<b>20</b>	4	<b>45</b>	4	<b>70</b>	4	<b>95</b>	4	
<b>21</b>	5	<b>46</b>	4	<b>71</b>	4	<b>96</b>	4	
<b>22</b>	6	<b>47</b>	4	<b>72</b>	5	<b>97</b>	4	
<b>23</b>	2	<b>48</b>	1	<b>73</b>	2	<b>98</b>	4	
<b>24</b>	4	<b>49</b>	1	<b>74</b>	4	<b>99</b>	4	
<b>25</b>	4	<b>50</b>	4	<b>75</b>	6	<b>100</b>	1	

Örneğin; uçak karması %60 ağır, %30 orta, %10 hafif olarak belirlendiğinde ve akış karması %40 geliş, %60 kalkış olduğunda 100 uçak için Çizelge 4.8'a göre MS Office Excel'e 24 adet 1 numara, 12 adet 2 numara, 4 adet 3 numara, 36 adet 4 numara, 18 adet 5 numara ve 6 adet 6 numara ile ifade edilen uçaklar dâhil edilir. 1,2,3,4,5 ve 6 ile ifade edilen uçaklar, uçak ve akış karmasına göre rastgele atandığında 100 uçaklık Çizelge 4.9 elde edilir.

Çizelge 4.9'a göre ilk sıradaki 2 ile adlandırılan uçak, Çizelge 4.8 da belirtilen orta kategoride iniş yapacak olan uçaktır. İkinci sırada belirtilen 2 numaralı uçak orta kategoride iniş yapacak olan uçaktır. Üçüncü sırada belirtilen 5 numaralı uçak ise orta kategoride kalkış yapacak olan uçaktır.

Bölüm 4.4.2'de hesaplanan matris değerleri Çizelge 4.9 ile karşılaştırılarak bulunan değerler alt alta toplanır.

Çizelge 4.9'da da belirtilen 100 uçak için ayırma zamanları toplamı Çizelge 4.8'da belirtilen trafik akış karması oranına göre 100 uçağa hizmet verilebilecek minimum sürenin toplamıdır. Bu süre saatlik pist kapasitesi ile doğru orantılıdır.

Havaalanı pist kapasitesi hesaplarında, uçak karmasının %10'luk değerler ile değiştiği, akış karmasının ise %30 ile %70 arasında %10'luk parametreler ile değiştiği varsayılmıştır. Sonuç olarak yapılan her iki uygulamada da 66 farklı uçak karmasına göre toplam 330 adet havaalanı pist kapasitesi hesabı yapılarak ortaya çıkan saatlik kapasite değerleri bulunmuştur.

#### **4.5. Uygulama 1**

Oluşturulan model doğrultusunda yapılan ilk uygulama tek taksi yoluna sahip ve tek pistli bir havaalanı için yapılmıştır. Bir uçağın pist üzerinde yapabileceği tüm hareketleri gösterebilmek için Şekil 4.11'de görülen pist ve taksi yolu sistemi oluşturulmuştur. Pist giriş ve çıkışların yapıldığı taksi yolunun pistin başında olduğu kabul edilmiştir. Çalışmanın devamında bu pist ve taksi yolu sistemi üzerinden tüm uçakların 18 pistine iniş ve kalkış yaptıkları varsayılmıştır.



Şekil 4.11. Pist ve tek taksi yolu sistemi.

Şekil 4.11’de verilen pist için hafif kategorideki uçakları temsilen, hesaplamalarda kullanılan TB–20, orta kategorideki uçakları temsilen, hesaplamalarda kullanılan B-738 ve ağır kategorideki uçakları temsilen, hesaplamalarda kullanılan B-773 uçağının iniş veya kalkış halinde tüm zaman ve mesafeleri (4.6), (4.12), (4.13), (4.14), (4.18), (4.21), (4.22) ve (4.23) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Pisti terk etmek için gerekli olan süre olan ve modelde açıklanan “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanları sırası ile Çizelge 4.10, Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Uygulama 1: hafif kategorideki uçağın “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanı

	TB 20	Süre (Sn)	Mesafe (m)	Pist Eşiği = 0 Pist Konumu	Toplam Süre (Sn)
	Pist Başı 50 Feet	0,000	0,000	0,000	0,000
	Piste Teker Koyma	7,500	269,713	269,713	7,500
	Hız 60 Kt	1,565	294,112	563,825	9,065
	Hız 50 Kt	1,820	122,343	686,168	10,885
	Hız 40 Kt	1,970	67,315	753,483	12,855
	Hız 30 Kt	2,255	41,589	795,072	15,110
	Hız 20 Kt	2,802	25,751	820,823	17,912
	Hız 10 Kt	4,050	14,194	835,017	21,962
	Hız 3Kt	5,073	4,141	839,157	27,036
	Geri Dönüşün Yarısı	3,090	3,800	842,957	30,126
	Geri Dönüşün Tamamı	3,090	3,800	839,157	33,216
	Hızın Tekrar 20 Kt Çıkması	9,124	18,334	820,823	42,339
	20 Kt hız ile pistte ilerleme	77,996	802,489	18,334	120,335
	20 Knottan 3 Knota düşme	9,124	18,334	0,000	129,459
	3kt ile pisti terk etme	3,090	0,000	0,000	132,549*

“\*” “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanlarıdır.

Çizelge 4.11 Uygulama 1: orta kategorideki uçağın “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanı

	B 738	Süre (Sn)	Mesafe (m)	Pist Eşiği	Toplam
				= 0 Pist Konumu	
ORTA	Pist Başı 50 Feet	0,000	0,000	0,000	0,000
	Piste Teker Koyma	7,500	539,425	539,425	7,500
	Hız 120 Kt	3,355	509,045	1048,470	10,855
	Hız 100 Kt	3,604	333,413	1381,883	14,458
	Hız 80 Kt	3,807	222,771	1604,654	18,265
	Hız 60 Kt	4,163	151,156	1755,810	22,428
	Hız 40 Kt	4,759	98,551	1854,361	27,187
	Hız 20 Kt	5,802	55,883	1910,244	32,989
	Hız 3Kt	6,495	17,725	1927,969	39,484
	Gerİ Dönüşün Yarısı	10,224	1,900	1929,869	49,708
	Gerİ Dönüşün Tamamı	10,224	1,900	1927,969	59,931
	Hızın Tekrar 30 Kt Çıkması	9,569	40,732	1887,237	69,501
	30 Kt hız ile pistte ilerleme	119,644	1846,505	40,732	189,145
	30 Knottan 3 Knota düşme	9,569	40,732	0,000	198,714
	3kt ile pisti terk etme	10,224	0,000	0,000	208,938*

“\*” “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanlarıdır.

Çizelge 4.12 Uygulama 1: ağır kategorideki uçağın “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanı

	B 773	Süre (Sn)	Mesafe (m)	Pist Eşiği	Toplam
				= 0 Pist Konumu	
AĞIR	Pist Başı 50 Feet	0,000	0,000	0,000	0,000
	Piste Teker Koyma	7,500	558,690	558,690	7,500
	Hız 120 Kt	4,275	592,382	1151,072	11,775
	Hız 100 Kt	3,625	306,017	1457,089	15,400
	Hız 80 Kt	3,828	212,381	1669,470	19,228
	Hız 60 Kt	4,166	147,330	1816,800	23,394
	Hız 40 Kt	4,714	97,350	1914,150	28,108
	Hız 20 Kt	5,631	55,640	1969,790	33,738
	Hız 3Kt	6,073	17,710	1987,500	39,811
	Gerİ Dönüşün Yarısı	20,346	8,800	1996,300	60,157
	Gerİ Dönüşün Tamamı	20,346	8,800	1987,500	80,502
	Hızın Tekrar 30 Kt Çıkması	9,037	40,650	1946,850	89,539
	30 Kt hız ile pistte ilerleme	123,512	1906,200	40,650	213,051
	30 Knottan 3 Knota düşme	9,036	40,650	0,000	222,087
	3kt ile pisti terk etme	20,346	0,000	0,000	242,432*

“\*” “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanlarıdır.

“ $t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$ ” ayırmaları için ise Çizelge 4.13’teki ayırmalar kullanılacaktır.

Çizelge 4.13 “ $t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$ ” Ayırmaları

SANIYE	AĞIR	ORTA	HAFİF
AĞIR	60	120	120
ORTA	60	60	120
HAFİF	60	60	60

“ $t_{\text{Kalkış-Geliş}}$ ” ayırmaları için gerekli olan zamanlar Bölüm 4.4.1’de tanımlanmış olup hafif kategorideki bir uçak için 154,498 saniye, orta kategorideki bir uçak için 77,249 saniye ve ağır kategorideki bir uçak için 74,585 saniye olarak belirtilmiştir.

“ $t_{\text{Geliş-Geliş}}$ ” ayırmalarını hesaplamak için, bölüm 4.4.1’de hafif kategorideki uçak için 38,325 saniye, orta kategorideki uçaklar için 22,176 saniye ve ağır kategorideki uçaklar için 21,618 saniye diğer bir deyiş ile “ $t_1$  ve  $t_2$ ” zamanları “ $t_1$  ve  $t_1$ ” zamanlarına eklenerek toplanır. Elde edilen toplamların hiçbiri Bölüm 4.1.1 Çizelge 4.4’te yer alan ayırmalardan az olmadığı için toplam zamanlar “ $t_{\text{Geliş-Geliş}}$ ” ayırma zamanları olarak kullanılır.

“ $t_{\text{Geliş-Geliş}}$ ”, “ $t_{\text{Geliş-Kalkış}}$ ”, “ $t_{\text{Kalkış-Kalkış}}$ ” ve “ $t_{\text{Kalkış-Geliş}}$ ” ayırmalarını bir matris üzerinde gösterildiğinde Çizelge 4.14 elde edilir.

Çizelge 4.14 Tek taksi yoluna sahip tek pistli havaalanı ayırma matrisi

SANIYE		ARKADAKİ					
		GELİŞ			KALKIŞ		
		Heavy	Medium	Light	Heavy	Medium	Light
ÖNDEKİ	Heavy	264,05	264,61	280,78	242,43	242,43	242,43
	GELİŞ Medium	230,56	231,12	247,29	208,94	208,94	208,94
	Light	154,17	154,73	170,90	132,55	132,55	132,55
	Heavy	74,59	77,25	154,50	60,00	120,00	120,00
	KALKIŞ Medium	74,59	77,25	154,50	60,00	60,00	120,00
	Light	74,59	77,25	154,50	60,00	60,00	60,00

Çizelge 4.15 Tek taksi yoluna sahip tek pistli havaalanı saatlik kapasite değerleri

UÇAK KARMASI DEĞİŞİMLERİ	AKIŞ KARMASI DEĞİŞİMLERİ				
	%70 Geliş - %30 Kalkış	%60 Geliş - %40 Kalkış	%50 Geliş - %50 Kalkış	%40 Geliş - %60 Kalkış	%30 Geliş - %70 Kalkış
%100 Ağır	18	20	23	26	31
%90 Ağır - %10 Hafif	18	20	23	26	30
%80 Ağır - %20 Hafif	19	21	23	26	30
%70 Ağır - %30 Hafif	19	21	24	26	30
%60 Ağır - %40 Hafif	20	22	24	26	30
%50 Ağır - %50 Hafif	21	22	24	27	30
%40 Ağır - %60 Hafif	21	23	25	28	31
%30 Ağır - %70 Hafif	22	24	26	28	31
%20 Ağır - %80 Hafif	23	24	26	29	32
%10 Ağır - %90 Hafif	24	25	27	30	33
%100 Hafif	24	26	28	31	35
%90 Hafif - %10 Orta	24	25	28	30	34
%80 Hafif - %20 Orta	23	25	27	29	33
%70 Hafif - %30 Orta	23	24	27	29	32
%60 Hafif - %40 Orta	22	24	26	29	32
%50 Hafif - %50 Orta	22	24	26	29	32
%40 Hafif - %60 Orta	22	23	26	28	32
%30 Hafif - %70 Orta	21	23	25	28	32
%20 Hafif - %80 Orta	21	23	25	28	32
%10 Hafif - %90 Orta	21	23	25	28	32
%100 Orta	20	23	25	29	33
%90 Orta - %10 Ağır	17	19	20	23	26
%80 Orta - %20 Ağır	18	19	21	23	26
%70 Orta - %30 Ağır	18	19	21	24	27
%60 Orta - %40 Ağır	18	20	22	25	28
%50 Orta - %50 Ağır	19	21	23	26	29
%40 Orta - %60 Ağır	18	20	22	25	28
%30 Orta - %70 Ağır	18	19	21	24	27
%20 Orta - %80 Ağır	17	19	21	23	26
%10 Orta - %90 Ağır	17	18	20	22	25
%80 Ağır - %10 Orta - %10 Hafif	19	21	23	26	30
%70 Ağır - %20 Orta - %10 Hafif	19	21	23	26	30
%60 Ağır - %30 Orta - %10 Hafif	19	21	23	26	30
%50 Ağır - %40 Orta - %10 Hafif	19	21	24	26	30
%40 Ağır - %50 Orta - %10 Hafif	19	21	24	26	30
%30 Ağır - %60 Orta - %10 Hafif	20	22	24	27	30



Çizelge 4.15 (devam)

<b>%20 Ağır - %70 Orta - %10 Hafif</b>	20	22	24	27	31
<b>%10 Ağır - %80 Orta - %10 Hafif</b>	20	22	25	28	31
<b>%70 Ağır - %10 Orta - %20 Hafif</b>	19	21	23	26	29
<b>%60 Ağır - %20 Orta - %20 Hafif</b>	19	21	23	26	29
<b>%50 Ağır - %30 Orta - %20 Hafif</b>	20	21	24	26	30
<b>%40 Ağır - %40 Orta - %20 Hafif</b>	20	22	24	27	30
<b>%30 Ağır - %50 Orta - %20 Hafif</b>	20	22	24	27	30
<b>%20 Ağır - %60 Orta - %20 Hafif</b>	20	22	24	27	31
<b>%10 Ağır - %70 Orta - %20 Hafif</b>	21	23	25	28	31
<b>%60 Ağır - %10 Orta - %30 Hafif</b>	20	21	24	26	30
<b>%50 Ağır - %20 Orta - %30 Hafif</b>	20	22	24	26	30
<b>%40 Ağır - %30 Orta - %30 Hafif</b>	20	22	24	27	30
<b>%30 Ağır - %40 Orta - %30 Hafif</b>	20	22	24	27	30
<b>%20 Ağır - %50 Orta - %30 Hafif</b>	21	23	25	27	30
<b>%10 Ağır - %60 Orta - %30 Hafif</b>	21	23	25	28	31
<b>%50 Ağır - %10 Orta - %40 Hafif</b>	20	22	24	27	30
<b>%40 Ağır - %20 Orta - %40 Hafif</b>	20	22	24	27	30
<b>%30 Ağır - %30 Orta - %40 Hafif</b>	21	22	25	27	30
<b>%20 Ağır - %40 Orta - %40 Hafif</b>	21	23	25	27	30
<b>%10 Ağır - %50 Orta - %40 Hafif</b>	21	23	25	28	31
<b>%40 Ağır - %10 Orta - %50 Hafif</b>	21	23	25	27	30
<b>%30 Ağır - %20 Orta - %50 Hafif</b>	21	23	25	27	30
<b>%20 Ağır - %30 Orta - %50 Hafif</b>	21	23	25	28	31
<b>%10 Ağır - %40 Orta - %50 Hafif</b>	22	23	26	28	31
<b>%30 Ağır - %10 Orta - %60 Hafif</b>	21	23	25	28	31
<b>%20 Ağır - %20 Orta - %60 Hafif</b>	22	23	25	28	31
<b>%10 Ağır - %30 Orta - %60 Hafif</b>	22	24	26	28	31
<b>%20 Ağır - %10 Orta - %70 Hafif</b>	22	24	26	28	31
<b>%10 Ağır - %20 Orta - %70 Hafif</b>	22	24	26	29	32
<b>%10 Ağır - %10 Orta - %80 Hafif</b>	23	25	27	29	32

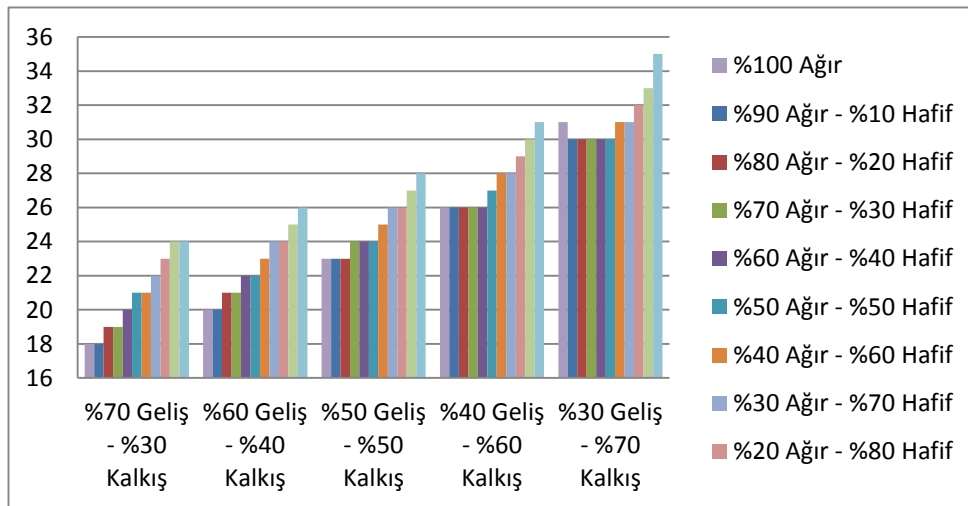
Ayrırma zamanları, Çizelge 4.14’de belirtilen pist ve taksi yolu sistemi için hesaplanan kapasite değerleri Çizelge 4.15’de verilmiştir. Her bir akış ve uçak karması değeri için Bölüm 4.4.3 Çizelge 4.9’da belirtilen deney yöntemi 10 kez uygulanmış ve elde edilen kapasite değerleri birbirine çok yakın olduğundan dolayı daha fazla deney yapılmamıştır.

Hesaplanan saatlik kapasite değerleri düşük çıkmıştır. Bunun sebebi ise inen her uçağın pist üzerinde geri dönüş yaparak pisti terk etmesi gerektiğidir. Bir örnek ile ağır kategorideki bir uçağın arkasından inecek olan ağır kategorideki bir

uçak için minimum radar ayırması Bölüm 4.1.1 Çizelge 4.4'te açıklandığı gibi 99,447 saniyedir. Ancak bu havaalanında inen ağır kategorideki bir uçağın sadece pisti terk etme süresi 242,432 saniyedir. Dolayısı ile akış karmasında geliş trafiklerinin yüzdesi arttıkça saatlik pist kapasitesi düşmektedir.

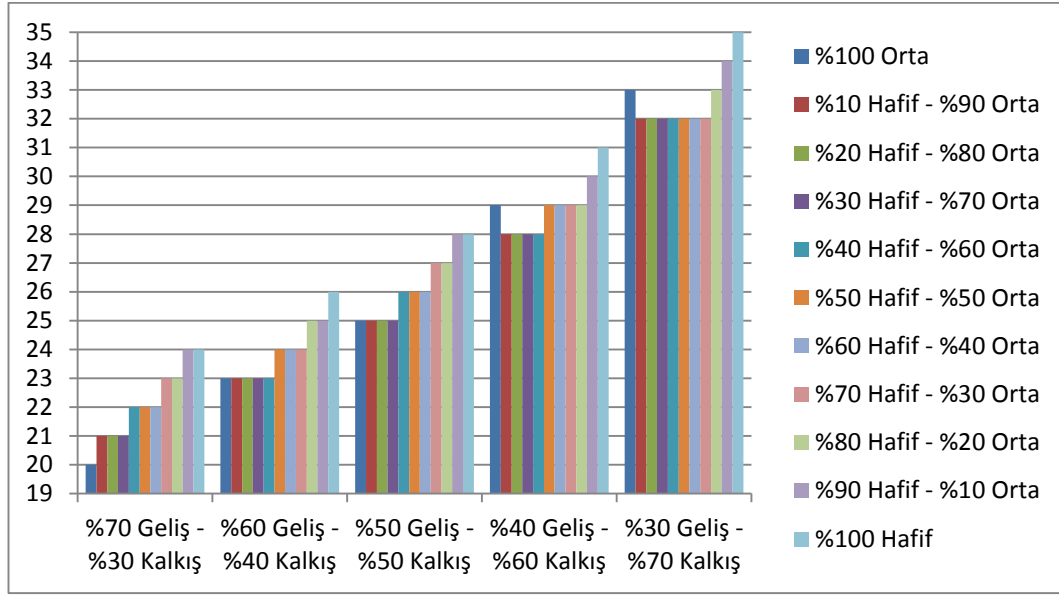
Hesaplanan kapasite değerlerine göre maksimum kapasite değeri olan saatlik 35 uçaklık kapasite değerine %100 hafif kategorideki trafik ve %30 geliş %70 kalkış karmasında ulaşılmıştır. Ayrıca inen her uçağın pisti geri dönüş ile terk etmesi nedeni ile uçak performansındaki farklılıkların kapasite üzerinde çok fazla etki etmediği görülmüştür. Tek taksi yoluna sahip pist için, hafif kategoride yer alan uçakların pisti, orta ve ağır kategoride yer alan uçaklara göre daha hızlı terk etmesinden dolayı, karma içerisinde hafif kategorideki uçak sayısı artışının kapasiteyi yükselttiği görülmektedir (Şekil 4.12 ve 4.13).

Uçak kategorilerinin saatlik pist kapasitesi üzerinde birbirlerine olan etkisi Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te verilmiştir. Şekil 4.12 ve 4.13 de görüldüğü üzere akış karmasında kalkış yüzdesinin artması saatlik kapasite ile doğru orantılıdır. Bunun sebebi kalkacak olan iki uçak arasındaki olması gereken saniye cinsinden ayırmanın gelen uçaklar arasında olması gereken ayırmadan daha düşük olmasıdır.



Şekil 4.12 Tek taksi yoluna sahip pist üzerinde ağır ve hafif kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisi

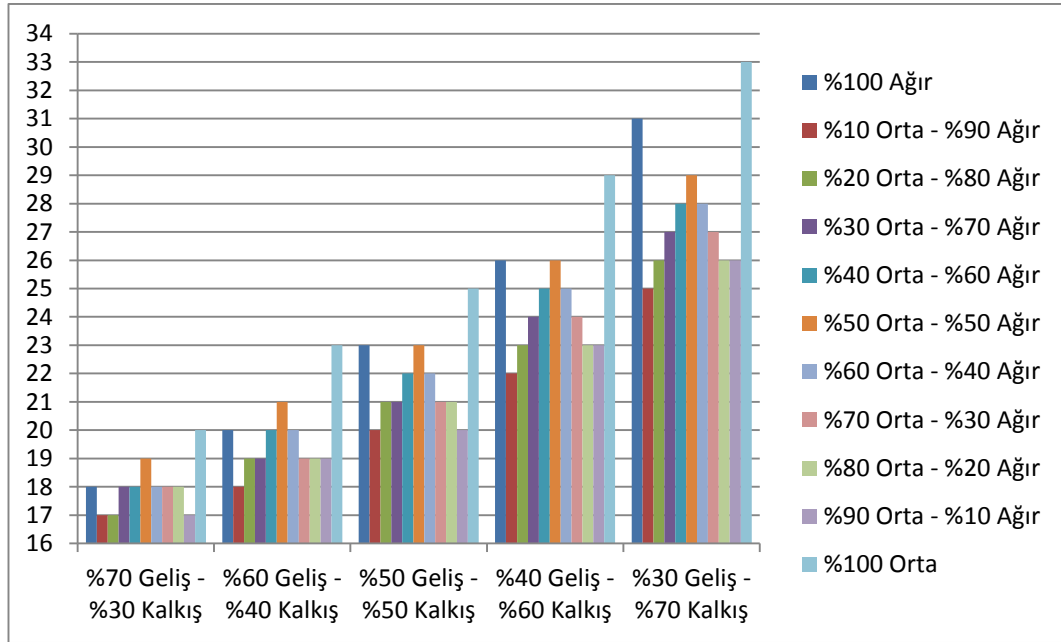
Orta ve hafif kategoriye sahip uçakların birbirleri ile karşılaştırılarak saatlik kapasite değişimi incelendiğinde; ağır ve hafif kategorideki uçakların birbirlerine olan etkisine benzer bir durum ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.13'te verilen akış ve trafik karmasına göre kapasite etkisinde maksimum kapasiteye %100 hafif trafik karmasında %30 geliş - %70 kalkış akış karmasında ulaşılmıştır.



Şekil 4.13 Tek taksi yoluna sahip pist üzerinde orta ve hafif kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisi

Şekil 4.14'te karşılaştırılan ağır ve orta kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisine bakıldığında diğerlerinden farklı bir sonuçla karşılaşılmıştır. Akış karmasının %50-50 olduğu durumda tüm trafik karması ağır uçaklardan (%100 ağır) oluştuğunda saatlik kapasite değeri 23 iken, trafik karmasının %10'unu orta kategorideki uçaklar oluşturduğunda saatlik kapasite değeri 20'ye düşmektedir. Orta kategorideki uçakların yüzdesi %50'ye ulaşıncaya kadar kapasite artarken, %50'den %90'a ulaşıncaya kadar tekrar düşmektedir. Tüm uçakların orta kategori uçak olması halinde, saatlik 25 uçaklık bir pist kapasitesi elde edilmektedir. Akış karmasındaki kalkış oranı yüzdesi düşükken saatlik kapasite farklarının az olduğu, yüzde arttıkça bu farkın arttığı Şekil 4.14'de verilmektedir. Bunun sebebi, aynı kategorideki iki uçak arka arkaya kalkacak ise aralarında 60 saniye olması gerekirken, ağır kategorideki bir uçaktan sonra orta

kategorideki bir uçağın kalkış yapabilmesi için aralarında 120 saniye olması gerektiğidir.



**Şekil 4.14** Tek taksi yoluna sahip pist üzerinde ağır ve orta kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesine olan etkisi

İlk uygulamada bir uçağın pist üzerinde yapabileceği tüm hareketlerin gösterilebilmesi ve incelenmesi adına tek taksi yolu sistemi kullanılmıştır. Bu tip bir havaalanında büyük gövdeli uçaklara hizmet verildiği veya yıllık trafik hacminin yüksek olduğu beklenemez.

İniş yapan trafiklerin pisti hızlı terk edebilmesi için ve uçak kategorilerinin pist kapasitesi üzerindeki etkilerini daha iyi görebilmek için 2. uygulama hızlı çıkış taksi yolları eklenen tek pistli bir havaalanı üzerinden yapılmıştır.

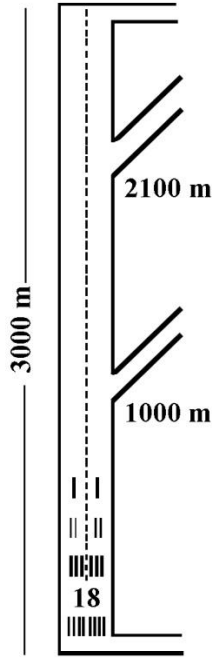
#### 4.6. Uygulama 2

Yapılan ikinci uygulamada birden fazla taksi yoluna, hızlı çıkış taksi yollarına sahip ve tek pistli bir havaalanı için saatlik kapasite değerleri hesaplamasını içermektedir.

Kabullerde de belirtildiği gibi uçaklar hızlı çıkış taksi yollarını kullanarak pisti terk edebilmeleri için hızlarının ağır ve orta kategorideki uçakların 40 Knot,

hafif kategorideki uçakların ise 20 Knot'a düşmesi gerekmektedir. (4.15), (4.16), (4.17), (4.18), (4.19), (4.20), (4.21), (4.22) ve (4.23)'de verilen denklemler kullanılarak ağır kategorideki uçak modeli olan B773 uçağının pist eşiğinden itibaren hızının 40 Knota düşene kadar pist üzerinde kat ettiği mesafe ise 1914,1502 metre olarak bulunmuştur. Orta kategorideki B738 uçağının pist eşiğinden itibaren hızının 40 Knota düşene kadar pist üzerinde kat ettiği mesafe ise 1854,361 metre olarak bulunmuştur. Hafif kategorideki TB-20 uçağının pist eşiğinden itibaren hızının 20 Knota düşene kadar pist üzerinde kat ettiği mesafe ise 820,823 metre olarak bulunmuştur.

Oluşturulan havaalanında pist başı ve sonunda yer alan taksi yollarının dışında hafif kategorideki uçakların pisti hızlı terk edebilmesi ve pist üzerinde hızının 20 Knota düşebilmesi için gerekli olan mesafeye yaklaşık %20 eklenerek pistin 1000. metresine bir hızlı çıkış taksi yolu konulmuştur. Orta ve ağır kategorideki uçakların pisti hızlı terk edebilmesi için ise uçakların pist üzerinde hızının 40 Knota düşmesi için gerekli olan maksimum mesafeye yaklaşık %10 eklenerek pistin 2100. metresine hızlı çıkış taksi yolu konulmuştur (Şekil 4.15). Hızlı çıkış taksi yolları, uçakların pisti hızlı terk edebilmesine olanak verecek şekilde rastgele olarak yerleştirilmiştir. Çalışmanın devamında bu pist ve taksi yolu sistemi üzerinden tüm uçakların 18 pistine iniş ve kalkış yaptıkları varsayılmıştır.



Şekil 4.15. 2. uygulamada kullanılan pist modeli

Hafif, orta ve ağır kategorideki uçakların “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanları sırası ile Çizelge 4.16, Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18’da verilmiştir.

Çizelge 4.16 Uygulama 2: hafif Kategorideki uçağın “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanı

	TB 20	Süre (Sn)	Mesafe (m)	Threshold = 0 Pist Konumu	Toplam Süre (Sn)
HAFIF	Pist Başı 50 Feet	0,000	0,000	0,000	0,000
	Piste Teker Koyma	7,500	269,713	269,713	7,500
	Hız 60 Kt	1,565	294,112	563,825	9,065
	Hız 50 Kt	1,820	122,343	686,168	10,885
	Hız 40 Kt	1,970	67,315	753,483	12,855
	Hız 30 Kt	2,255	41,589	795,072	15,110
	Hız 20 Kt	2,802	25,751	820,823	17,912
	Hız 20 Kt ile pist üzerinde ilerleme ve pisti terk etme	17,415	179,177	1000,000	35,327*

“\*”uçağın pisti terk etmesi için gerekli olan süreyi ( $t_1$  ve  $t_1'$ )vermektedir.

Çizelge 4.17 Uygulama 2: orta kategorideki uçağın “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanı

	B 738	Süre (Sn)	Mesafe (m)	Threshold = 0 Pist Konumu	Toplam Süre (Sn)
ORTA	Pist Başı 50 Feet	0,000	0,000	0,000	0,000
	Piste Teker Koyma	7,500	539,425	539,425	7,500
	Hız 120 Kt	3,355	509,045	1048,470	10,855
	Hız 100 Kt	3,604	333,413	1381,883	14,458
	Hız 80 Kt	3,807	222,771	1604,654	18,265
	Hız 60 Kt	4,163	151,156	1755,810	22,428
	Hız 40 Kt	4,759	98,551	1854,361	27,187
	Hız 40 Kt ile pist üzerinde ilerleme ve pisti terk etme	11,937	245,639	2100,000	39,124*

“\*”uçagın pisti terk etmesi için gerekli olan süreyi ( $t_1$  ve  $t_1'$ )vermektedir.

Çizelge 4.18 Uygulama 2: ağır kategorideki uçağın “ $t_1$  ve  $t_1'$ ” zamanı

	B 773	Süre (Sn)	Mesafe (m)	Threshold = 0 Pist Konumu	Toplam Süre (Sn)
AĞIR	Pist Başı 50 Feet	0,000	0,000	0,000	0,000
	Piste Teker Koyma	7,500	558,690	558,690	7,500
	Hız 120 Kt	4,275	592,382	1151,072	11,775
	Hız 100 Kt	3,625	306,017	1457,089	15,400
	Hız 80 Kt	3,828	212,381	1669,470	19,228
	Hız 60 Kt	4,166	147,330	1816,800	23,394
	Hız 40 Kt	4,714	97,350	1914,150	28,108
	40 Kt Sürat ile Pist Üzerinde İlerleme ve Pisti Terk Etme	9,032	185,850	2100,000	37,139*

“\*”uçagın pisti terk etmesi için gerekli olan süreyi ( $t_1$  ve  $t_1'$ )vermektedir.

Hafif kategoride yer alan TB20 uçağının pisti terk etmesi için 35,327 saniyeye, orta kategorideki B738 uçağının 39,124 saniyeye ve ağır kategorideki B773 uçağının ise 37,139 saniyeye ihtiyacı vardır. Bölüm 4.4.1 Mesafe Süre diyagramlarında açıklanan “ $t_1'$  ve  $t_2$ ” zamanları hafif kategorideki uçak için 38,325 saniye, orta kategorideki uçaklar için 22,176 saniye ve ağır kategorideki uçaklar için 21,618 saniyedir. Hesaplanan  $t_{Geliş - Geliş}$  zamanları, başka bir deyiş ile ( $t_1$  ve  $t_1'$ ) ve ( $t_1'$  ve  $t_2$ ) zamanlarının toplamı bölüm 4, Çizelge 4.4'te verilen

değerlerden daha düşük olduğu için ayırma matrisinde Çizelge 4.4'te verilen değerler kullanılmıştır.

Şekil 4.15'te verilen pist konfigürasyonu için ayırma matrisi Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19 Birden fazla taksi yoluna ve hızlı çıkış taksi yollarına sahip pist için ayırma matrisi

SANIYE		ARKADAKI					
		GELİŞ			KALKIŞ		
		Heavy	Medium	Light	Heavy	Medium	Light
ÖNDEKİ	Heavy	99,45	120,00	180,00	37,14	37,14	37,14
	GELİŞ Medium	74,59	77,25	180,00	39,12	39,12	39,12
	Light	75,66	77,25	154,50	35,33	35,33	35,33
	Heavy	74,59	77,25	154,50	60,00	120,00	120,00
	KALKIŞ Medium	74,59	77,25	154,50	60,00	60,00	120,00
	Light	74,59	77,25	154,50	60,00	60,00	60,00

Çizelge 4.19'da hesaplanan ayırma matrisi değerleri Bölüm 4.4.3 Çizelge 4.9'da belirtilen kapasite hesaplama yöntemi ile hesaplandığında, trafik ve akış karmalarına göre elde edilen saatlik kapasite değerleri Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20 Birden fazla taksi yoluna sahip tek pistli havaalanı saatlik kapasite değerleri

UÇAK KARMASI DEĞİŞİMLERİ	AKIŞ KARMASI DEĞİŞİMLERİ				
	Saatlik Kapasite Değerleri	%70 Geliş - %30 Kalkış	%60 Geliş - %40 Kalkış	%50 Geliş - %50 Kalkış	%40 Geliş - %60 Kalkış
%100 Ağır	47	50	54	56	59
%90 Ağır - %10 Hafif	44	48	51	53	55
%80 Ağır - %20 Hafif	42	45	47	50	52
%70 Ağır - %30 Hafif	40	42	45	47	49
%60 Ağır - %40 Hafif	38	40	43	45	47
%50 Ağır - %50 Hafif	36	39	41	44	46
%40 Ağır - %60 Hafif	35	37	40	42	45
%30 Ağır - %70 Hafif	33	36	39	41	44
%20 Ağır - %80 Hafif	32	35	38	40	43
%10 Ağır - %90 Hafif	31	34	37	40	43
%100 Hafif	30	33	36	40	44



Çizelge 4.20 (devam)

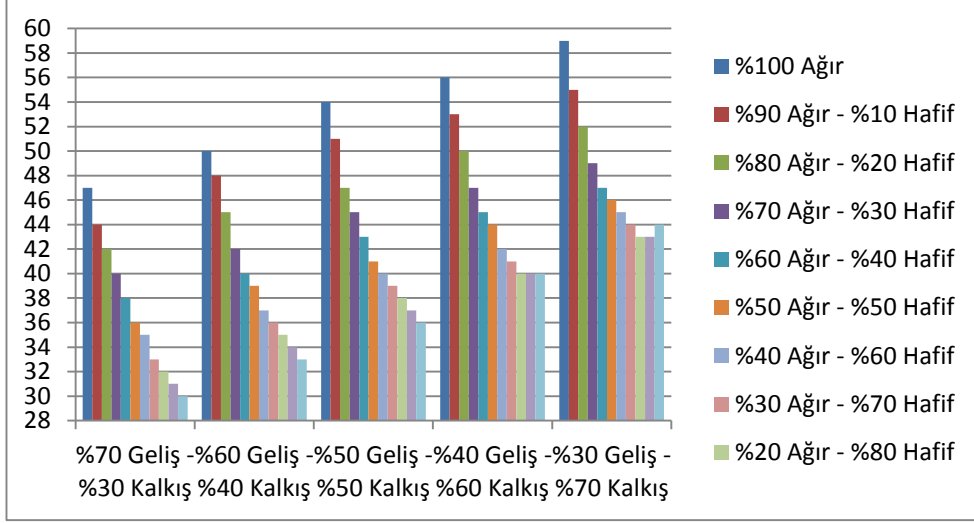
%90 Hafif - %10 Orta	31	34	37	40	44
%80 Hafif - %20 Orta	32	35	37	40	43
%70 Hafif - %30 Orta	33	36	38	41	44
%60 Hafif - %40 Orta	35	38	40	43	45
%50 Hafif - %50 Orta	37	40	42	44	46
%40 Hafif - %60 Orta	39	42	44	46	47
%30 Hafif - %70 Orta	42	44	46	48	49
%20 Hafif - %80 Orta	45	47	49	50	52
%10 Hafif - %90 Orta	49	51	53	54	55
%100 Orta	54	56	57	59	60
%90 Orta - %10 Ağır	52	54	55	56	57
%80 Orta - %20 Ağır	51	53	54	55	55
%70 Orta - %30 Ağır	49	52	53	54	53
%60 Orta - %40 Ağır	49	51	52	53	53
%50 Orta - %50 Ağır	48	50	52	53	53
%40 Orta - %60 Ağır	47	50	52	53	54
%30 Orta - %70 Ağır	47	49	51	53	54
%20 Orta - %80 Ağır	47	50	52	54	55
%10 Orta - %90 Ağır	47	50	53	55	56
%80 Ağır - %10 Orta - %10 Hafif	44	47	49	51	53
%70 Ağır - %20 Orta - %10 Hafif	44	47	49	51	52
%60 Ağır - %30 Orta - %10 Hafif	44	47	48	50	51
%50 Ağır - %40 Orta - %10 Hafif	44	47	48	50	50
%40 Ağır - %50 Orta - %10 Hafif	45	48	49	50	50
%30 Ağır - %60 Orta - %10 Hafif	46	48	49	51	50
%20 Ağır - %70 Orta - %10 Hafif	47	49	50	51	51
%10 Ağır - %80 Orta - %10 Hafif	48	49	51	52	53
%70 Ağır - %10 Orta - %20 Hafif	42	44	47	48	50
%60 Ağır - %20 Orta - %20 Hafif	42	44	46	48	49
%50 Ağır - %30 Orta - %20 Hafif	42	44	46	48	49
%40 Ağır - %40 Orta - %20 Hafif	43	45	47	48	48
%30 Ağır - %50 Orta - %20 Hafif	43	45	47	48	48
%20 Ağır - %60 Orta - %20 Hafif	43	46	47	49	49
%10 Ağır - %70 Orta - %20 Hafif	44	46	48	50	50
%60 Ağır - %10 Orta - %30 Hafif	39	42	45	46	48
%50 Ağır - %20 Orta - %30 Hafif	39	42	44	46	47
%40 Ağır - %30 Orta - %30 Hafif	40	42	44	46	47
%30 Ağır - %40 Orta - %30 Hafif	40	42	44	46	47
%20 Ağır - %50 Orta - %30 Hafif	41	43	45	46	47
%10 Ağır - %60 Orta - %30 Hafif	41	43	46	47	48
%50 Ağır - %10 Orta - %40 Hafif	38	40	42	45	46
%40 Ağır - %20 Orta - %40 Hafif	38	40	42	45	46

**Çizelge 4.20 (devam)**

<b>%30 Ağır - %30 Orta - %40 Hafif</b>	38	40	42	44	45
<b>%20 Ağır - %40 Orta - %40 Hafif</b>	38	41	42	44	46
<b>%10 Ağır - %50 Orta - %40 Hafif</b>	39	41	43	45	46
<b>%40 Ağır - %10 Orta - %50 Hafif</b>	36	38	41	43	45
<b>%30 Ağır - %20 Orta - %50 Hafif</b>	36	38	41	43	45
<b>%20 Ağır - %30 Orta - %50 Hafif</b>	36	39	41	43	45
<b>%10 Ağır - %40 Orta - %50 Hafif</b>	36	39	42	43	45
<b>%30 Ağır - %10 Orta - %60 Hafif</b>	34	37	40	42	44
<b>%20 Ağır - %20 Orta - %60 Hafif</b>	35	37	39	42	44
<b>%10 Ağır - %30 Orta - %60 Hafif</b>	35	37	40	42	44
<b>%20 Ağır - %10 Orta - %70 Hafif</b>	33	36	38	41	44
<b>%10 Ağır - %20 Orta - %70 Hafif</b>	33	36	38	41	44
<b>%10 Ağır - %10 Orta - %80 Hafif</b>	32	35	37	40	43

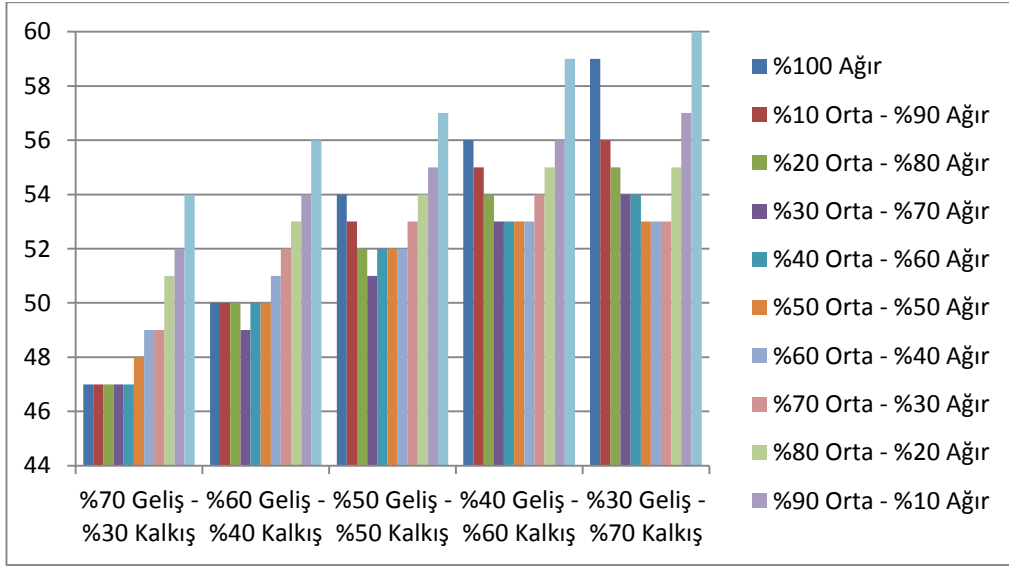
Uçakların pisti hızlı terk edebilmesi için pistin 1000. metresine ve 2100. metresine yerleştirilen hızlı çıkış yolları sayesinde elde edilen kapasite değerleri birinci uygulamaya göre yaklaşık iki kat daha fazla çıkmıştır. Uçak karmasının tamamı orta kategorideki uçaklardan oluştuğunda ve %30 Geliş - %70 Kalkış akış karması olduğu durumda maksimum kapasite değeri olan saatlik 60 uçaklık kapasiteye ulaşılmıştır.

Ağır ve hafif kategoride yer alan uçakların saatlik pist kapasitesi üzerine etkisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Trafik karmasının tamamı ağır kategorideki uçaklardan oluştuğunda her bir akış karması için maksimum değerler elde edilirken, trafik karmasına hafif kategoride yer alan uçaklar ilave edildiğinde kapasite değerleri düşmeye başlamaktadır.



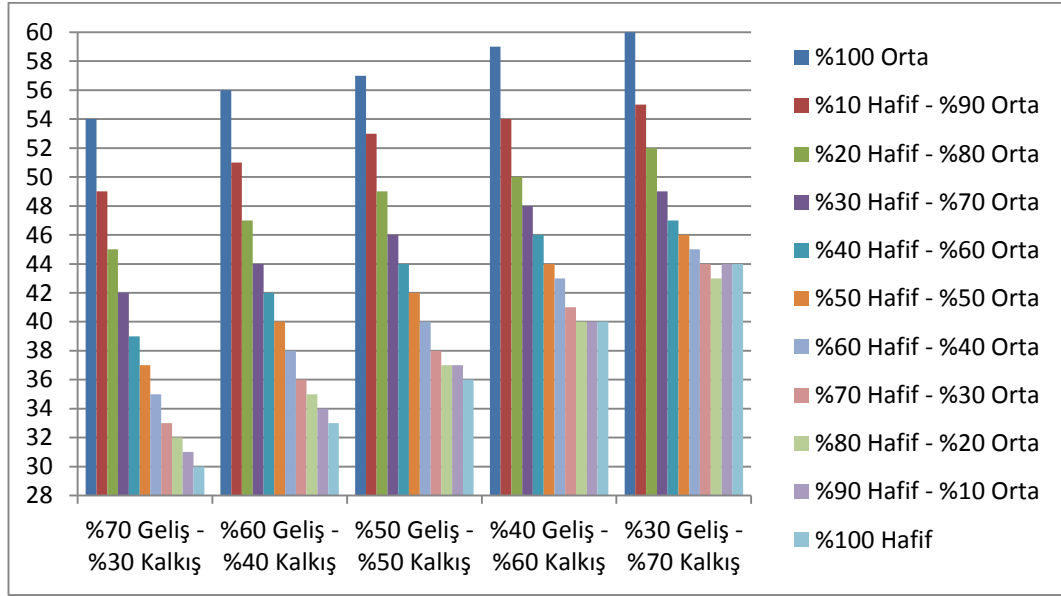
Şekil 4.16 2. uygulamada yer alan pist ve taksi yolu sistemi üzerinde ağır ve hafif kategoride yer alan uçakların saatlik kapasite üzerine etkisi

Ağır ve orta kategoride yer alan uçakların saatlik pist kapasitesine etkisi Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Uçak karmasının tamamının orta kategorideki uçaklardan oluştuğu varsayıldığında maksimum saatlik kapasite değeri olan 60 uçaklık kapasiteye %30 geliş ve % 70 kalkış akış karmasında ulaşılmaktadır. Uçak karması bozulmaya başladığında, ağır ve orta kategorideki uçakların performans ve kategori farklılıklarından kaynaklanan ayırma değerleri arttığı için kapasiteyi olumsuz etkilemektedir.



Şekil 4.17 2. uygulamada yer alan pist ve taksi sistemi üzerinde ağır ve orta kategoride yer alan uçakların saatlik kapasite üzerine etkisi

Şekil 4.18’de ise orta kategorideki uçaklar ile hafif kategorideki uçakların saatlik pist kapasitesi üzerine etkisi gösterilmiştir. Düşük performansa sahip hafif kategoride yer alan uçaklar kapasiteyi %70 kalkış ve %30 geliş akış karmasında yaklaşık %40, %70 geliş ve %30 kalkış akış karmasında yaklaşık %85 düşürmektedir.



Şekil 4.18 2. uygulamada yer alan pist ve taksi sistemi üzerinde orta ve hafif kategoride yer alan uçakların saatlik kapasite üzerine etkisi

İkinci uygulamada yerleştirilen hızlı çıkış taksi yolları, uçakların pisti çok hızlı terk edebilmesine olanak sağlamıştır. Pisti hızlı terk eden uçaklar sayesinde geliş kalkış ayırma zamanları düşmüştür. Uçak performansları arasındaki farklılıklardan ve ayırma kurallarının gerekliliklerinden dolayı düşük performansa sahip olan uçaklar kapasiteyi olumsuz etkilemektedir.

## 5. SONUÇ

Ulaştırma sistemleri içinde demiryolu, karayolu, denizyolu, havayolu ve boru hattı taşıma sistemleri yer almaktadır. Hiç şüphe yoktur ki bu sistemler arasında işletme maliyetleri en yüksek olan sistem, havayolu taşıma sistemidir. Havayolu taşıma sistemi için yapılabilecek her türlü iyileştirme, yıllık maliyet-fayda analizlerine bakıldığında oldukça yüksek faydalar getirecektir.

Her geçen gün havayolu taşımacılığına artan talep, sistem içerisinde tıkanıklıklara, uzun bekleme sürelerine ve gecikmelere sebep olmaktadır. O halde oluşan talep doğrultusunda planlamanın iyi yapılması gerekmektedir. Planlamanın yapılabilmesi için bir uçağın motorlarını çalıştırmaktan, uçuşunu tamamlayıp tekrar motorlarını kapatana kadar geçen sürenin doğru olarak hesaplanabilmesi gerekmektedir. Uçuş süresinin doğru olarak hesaplanabilmesi için kalkış ve iniş yapılacak havaalanındaki diğer uçakların konumlarının, uygulanan hava trafik kontrol stratejilerinin, anlık sıcaklık ve basınç değerlerinin, rüzgârın yönü ve şiddetinin, piste operasyon düzenleyecek uçakların sıralamalarının önceden bilinmesi gerekmektedir. Buna ilaveten uçağın havadaki hareketleri esnasında geçeceği tüm havayolu noktalarına varış zamanlarının bilinmesi gerekmektedir. Fakat uçağın seyahatine etki eden meteorolojik faktörler gibi önceden öngörülemeyen tüm faktörler yörüngenin doğru tahminin zorlaştırmaktadır. Havayolu taşımacılığı sistemini etkileyen faktörlerin doğru olarak hesaplanamaması ve bazı faktörlerin önceden bilinmemesi nedeni ile havayolu taşımacılığı sistemi devam ettiği sürece gecikmeler de var olacaktır.

Gecikme nedenlerinden bir tanesi de kapasitedir. Bir havaalanının kapasitesini aşan bir talep olduğunda, kapasiteyi aşan uçaklar gecikmeye maruz kalacaktır ve bu gecikmeler talep, kapasitenin altına düşene kadar devam edecektir; ancak talebin uzun süre kapasitenin altında seyretmesi ile sona erecektir.

Bu çalışmada deniz seviyesinde, hayali iki farklı pist konfigürasyonu için, analitik bir model kullanarak saatlik kapasite hesabı yapılmıştır. Kullanılan analitik model, standart atmosferik koşullarda, uçuş mekaniği prensiplerine bağlı olarak her bir zaman diliminde uçakların pozisyonlarının belirlenmesi ve

önündeki veya arkasındaki uçakla olması gereken ayırmaların, ayırma kuralları dâhilinde hesaplanması ile oluşturulmuştur. Modelin geçerliliği ve sınanması gözlem imkânı olmamasından dolayı çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Çalışmada önerilen model, iki farklı pist konfigürasyonu üzerinden saatlik pist hesabına yöneliktir. Ancak yapılması planlanan bir pistin veya herhangi bir havaalanındaki mevcut pistin saatlik kapasite değerlerinin bulunmasında kullanılabilir. Pist üzerindeki taksi yollarının pozisyonlarının değiştirilmesinin kapasiteye olan etkisini hesaplamak amacı ile de kullanılabilir.

Çalışmada önerilen model geliştirilmeye açıktır. Ayırma minimumlarının değişmesi halinde veya deneysel olarak ayırma minimumlarını değiştirilmesi istenildiğinde kolaylıkla modele uygulanabilir.

Çalışmada önerilen modelde karmaşık ve sadece sonuç veren matematiksel formüller yerine basit hesaplamalar kullanılarak sonuca ulaşılmıştır. Model sayesinde, talebi oluşturan uçak karması sisteme girildiğinde, sadece talebi karşılamak için gereken süre değil, aynı zamanda talebin içerisinde rastgele seçilen uçaklar için gerekli olan pist işgal süreleri kolaylıkla bulunabilir. Bu da gerçekleşen süreler ile modelde önerilen süreler birbirleri ile karşılaştırıldığında eğer gecikme meydana gelmiş ise bu gecikmenin tam olarak nereden kaynaklandığının kısa sürede bulunmasını sağlamaktadır.

Çalışmada önerilen model pist başında kalkış için bekleyen uçakların veya iniş için yaklaşmakta olan uçakların tahmini bekleme sürelerinin doğru olarak hesaplanması amacı ile kullanılabilir.

Talebin kapasiteyi aşması durumunda, kapasitenin üzerindeki uçakların ne zaman hizmet alacağı, tahmini gecikme süreleri model doğrultusunda hesaplanabilir.

Model oluşturulurken hafif, orta ve ağır kategorideki en fazla kullanılan uçak modelleri baz alınmış ve tek piste sahip olan hayali bir havaalanı için olasılık matrisleri oluşturulmuştur. Uçak modellerinin değiştirilmesi istendiğinde veya birden fazla piste sahip olan bir havaalanı üzerinde çalışma yapılmak istendiğinde,

önerilen modelin yapısını bozmaya gerek olmadan olasılık matrisleri genişletilerek uyarlanabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda model gerçek havaalanları üzerinde uygulanarak gerçekleşen ve hesaplanan kapasite değerleri karşılaştırılabilir. Kullanılan ayırma minimumlarının düşürülmesi ya da artırılması için kapasite çalışmalarında da bu model kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Annex 14, “*Aerodromes*”, ICAO Publications, 1999.
- [2] Wright P. H. Ve Ashford N., *Airport Capacity and Configuration, Airport Engineering*, (S.W.), John Wiley & Sons, New York, 185-229, 1992.
- [3] *Airport Planning Manual*, Doc 9184-AN/902 ICAO Publications *Part 1 Master Planning*, Second Edition 1987.
- [4] Tunç, A., *Havaalanı Mühendisliği ve Uygulamaları*, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 2003
- [5] *Aerodrome Design Manual* DOC 9157-AN/901 ICAO Publications *Part 1 Runways*
- [6] Horonjeff R. Ve McKelvey F. X., *Airport Airside Capacity and Delay, Planning and Design of Airports*, Boston, Mass. : McGraw-Hill, 293-361, c1994.
- [7] Dempsey S. P., *Airport Planning and Development Handbook, A Global Survey*, McGraw-Hill, 285-296, 1999
- [8] Oyman K., “*Hava Alanı Yönetim Modeli ve İşleyiş Sistemleri*”, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Temmuz 1998
- [9] Franzi P., *Airport Runway Capacity and Delay: Some Models for Planners and Managers*, Australian Government Publishing Service, Canberra, 1982
- [10] Wells A. T. Ve Ed.D., *Airport Planing and Management*, McGraw-Hill, New York, 179, 1996
- [11] ICAO, *Procedures for Air Navigation Services Air Traffic Management*, Doc 4444-ATM/501, ICAO, Montreal, 2012.



- [12] Varet A., Fortschrittliche ATM-Konzepte: *Possible effects of news technologies and operational concepts on airport runway seperation parameters*, Institute of Flight Guidance, Germany, 2010
- [13] ICAO, *Air Traffic Services Planning Manual*, Doc 9426-AND24, ICAO, Montreal, 2012.
- [14] Anderson, J.D, JR., *Aircraft Performance and Design*, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [15] Shevell, R.S., *Fundamentals of Flight*, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.
- [16] Hale, J.F., *Aircraft Performance, Selection and Design*, John Wiley and Sons, New York, 1984.
- [17] McCormick, B.W., *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [18] Swatton, P.J., *Aircraft Performance Theory and Practice for Pilots*, John Wiley and Sons, New York, 2008.
- [19] Anderson, J.D, JR., *Introduction to Flight*, McGrawHill, New York, 1985.
- [20] Eurocontrol, *BADA Revision 3.6*, Eurocontrol, Bretigny-Sur-Orge, Fransa 2004.
- [21] DHMİ, *DHMİ İstatistik Yıllığı 2011*, DHMİ, Ankara, 2012.
- [22] Bolstad C.A, Howell C.D, “The Effect of Time-Sharing Training on Pilot Situation Awareness”, *12th International Symposium on Aviation Psychology*, Dayton, Ohio, 2003.