



Aircraft sequencing and passenger flow optimization: Istanbul Sabiha Gokcen Airport

Soner Demirel^{1*}

Erzincan Binali Yıldırım University, Ali Cavit Celebioglu School of Civil Aviation, Department of Air Traffic Control, 24002, Erzincan, Türkiye

Highlights:

- Handling sequencing of arrival aircraft and air/rail passengers' flow.
- Considering cabin/cargo luggages, gender and subway/bus waitings.
- Focusing on Istanbul Sabiha Gokcen Airport for this problem

Keywords:

- Transfer passengers
- Aircraft sequencing
- Passenger dynamics
- Passenger flow
- Mathematical modelling

Article Info:

Research Article

Received: 22.08.2025

Accepted: 14.10.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1770787

Correspondence:

Author: Soner Demirel

e-mail:

sdemirel@erzincan.edu.tr

phone: +90 446 224 0426 / 41198

Graphical/Tabular Abstract

Model 1 focuses on minimizing total airborne delay and Model 2 aims to minimize total arrival time of transfer passengers to the connecting flight's gate or high-speed train station while Model 3 focuses on both. The comparison of the three models with these objectives in terms of delay metrics is given in Figure A. The highest total delay comes from the flight time on the sequencing leg in Model 2. In general, Model 3 performs better than the other models in most scenarios. Model 1 and Model 3 give similar results in terms of the flight time on the sequencing leg in the first scenario. In addition, Model 1 and Model 2 show similar total separation delays (margin delay) in the same scenario.

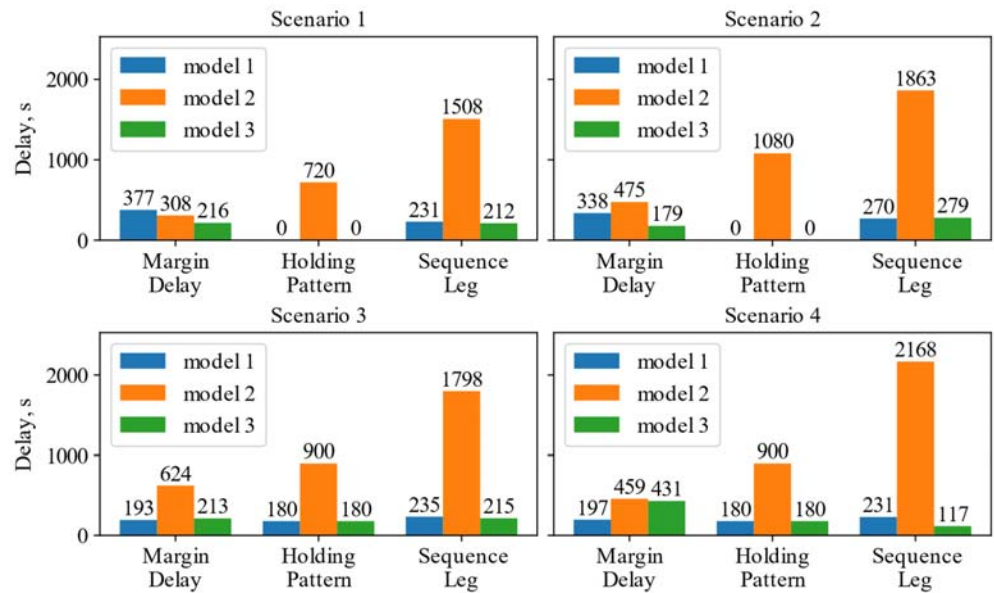


Figure A. Total delay in each scenario

Purpose: Efficient transferring passengers in multimodal transportation hubs, such as airports, are critical for improving travelers experience, satisfaction and operational efficiency. This study presents an optimization model that integrates aircraft sequencing and passenger transfer dynamics to analyze the transfer process.

Theory and Methods: The model considers several real-world factors including walking time affected by luggage, gender and distances between terminal-specific points as well as waiting times at bus stops and metro stations. The research methodology involves identifying flights with the highest transfer passenger volumes and prioritizing the top five of twenty aircraft for detailed analysis. Passenger behavior, such as baggage handling and walking times, is individually incorporated into the optimization framework.

Results: When the differences between the models are analyzed, passengers' early arrival times at transfer points vary between 0 and 5 minutes. Although this is practically important, no statistical difference was found. The analysis shows that Model 3 (43%) is superior to the other models.

Conclusion: This study contributes to the literature by combining operational decision making with individual passenger characteristics, providing practical insights for traffic flow managers and transport planners.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Uçuş sıralaması ve yolcu akışı optimizasyonu: İstanbul Sabiha Gökçen havalimanı

Soner Demirel^{1*}

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Ali Cavit Çelebioğlu Sivil Havacılık Yüksekokulu, Hava Trafik Kontrol Bölümü, 24002, Erzincan, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İniş uçuş sıralaması ve hava/demiryolu yolcu akışının ele alınması
- Kabin/kargo bagajları taşıma, cinsiyet ve metro/otobüs bekleme sürelerinin dikkate alınması
- Sabiha Gökçen Havalimanı'na odaklanılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.08.2025

Kabul: 14.10.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1770787

Anahtar Kelimeler:

Transfer yolcu,
uçak sıralama,
yolcu dinamikleri,
yolcu akışı,
matematiksel modelleme

ÖZ

Bu çalışma, havada bekleme süresi ve hava ve tren aktarma yolcularının istasyon ve kapılara ulaşımı açısından transfer sürecini analiz etmek için uçak sıralaması ile yolcu aktarma dinamiklerini bütünleştiren bir model sunmaktadır. Model, terminal içerisindeki noktalara olan mesafeler, bagaj durumu ve cinsiyete bağlı yürüme süreleri ile otobüs ve metro istasyonlarındaki bekleme süreleri gibi gerçek dünya faktörlerini dikkate almaktadır. Araştırma, en yüksek transfer yolcusuna sahip uçuşların belirlenmesini ve yirmi uçaktan en yoğun beşe öncelik verilerek analiz yapılmasını içermektedir. Yolcuların bagaj ve yürüme süreleri gibi bireysel davranışları da optimizasyon çerçevesine dahil edilmiştir. Modeller arası fark analiz edildiğinde yolcuların transfer noktalarına erken varış süreleri 0-5 dakika arasında değişmektedir. Bu, pratik olarak önemli olsa da modeller arasında anlamlı bir fark tespit edilememiştir. Analiz sonuçları, Model 3'ün (%43) diğer modellere kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir. Model 2, ortalama 1.066 saniye gecikme sonucuna ulaşırken, Model 3 ise 185 saniye gecikmeye sahip bir çözüm üretmiştir. Bulgular, yolcuların tren istasyonu ve aktarma uçuş kapısına ulaşma sürelerinin iyileştirilmesinde Model 1 ile Model 3'ün benzer bir performans sergilediğini göstermektedir. Literatürde genelde ayrı incelenen uçak sıralama ve yolcu aktarma dinamiklerinin birleşimi, modelin özgün katkısını oluşturmaktadır. Ayrıca, modelde yolcuya özgü faktörler ve operasyonel kısıtlar dahil edilerek daha gerçekçi ve uygulanabilir çözümler sunulması sağlanmıştır.

Aircraft sequencing and passenger flow optimization: Istanbul Sabiha Gokcen Airport

H I G H L I G H T S

- Handling sequencing of arrival aircraft and air/rail passengers' flow
- Considering cabin/cargo luggages, gender and subway/bus waitings
- Focusing on Istanbul Sabiha Gokcen Airport for this problem

Article Info

Research Article

Received: 22.08.2025

Accepted: 14.10.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1770787

Keywords:

Transfer passengers,
aircraft sequencing,
passenger dynamics,
passenger flow,
mathematical modelling

ABSTRACT

This study presents a model that combines aircraft sequencing and passenger transfer dynamics to analyze the transfer process in terms of delay and how air-to-air and air-to-train transfer passengers reach stations and gates. The model considers real-world factors such as distances inside the terminal, walking times depending on baggage and gender, and waiting times at bus/metro stations. The research includes identifying the flights with the highest number of transfer passengers and conducting the analysis by giving priority to the busiest five aircraft. Individual behaviors of passengers, such as baggage and walking times, are also included in the optimization framework. When the differences between the models are analyzed, passengers' early arrival times at transfer points vary 0-5 minutes. Although this is important, no statistical difference was found. The analysis shows that Model 3 (43%) is superior to the others. While Model 2 reached an average delay of 1,066 seconds, Model 3 produced a delay of 185 seconds. Model 1 and 3 have similar performance. The combination of aircraft sequencing and transfer dynamics is the original contribution of the model. In addition, by including passenger-specific factors and operational constraints in the model, it becomes possible to offer more realistic and practical solutions.

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda, çok modlu ulaşım sistemleri, özellikle havalimanları gibi stratejik ulaşım merkezlerinde giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir. Hava-hava ve hava-demiryolu bağlantılarında aktarma yapan yolcu sayısının artışı, havalimanı operasyonlarını daha karmaşık hale getirmekte ve etkin bir yolcu akışı yönetimini zorunlu kılmaktadır. Türkiye için DHMI tarafından yayımlanan istatistiklere göre 2023 yılında aktarma yapan yolcu sayısı 443.412 olarak gerçekleşmiş, bu sayının 2025 yılında %4,22 oranında artacağı öngörülmüştür [1]. Artan bu talep, yalnızca operasyonel verimliliği değil, aynı zamanda yolcu memnuniyetini doğrudan etkileyen bir faktör haline gelmiştir.

Literatürde, bazı çalışmalar kapı yeniden atama yaparak transfer yolcuların daha az yürüme mesafesine ulaşmasını sağlamaya çalışmıştır. [2]. Farklı çalışmalar uçak ve tren seferlerini eşleştirerek zaman çizelgesi uyumuna ve hızlı tren seferlerinin yolcu aktarım sürecine olan katkısına odaklanırken [3-5], diğerleri simülasyon modelleri aracılığıyla yolcu davranışlarını, otobüs gibi kaynak kullanımı ve uçak içi koltuk atamayı incelemiştir [6-8]. Bunun yanında hem optimizasyon hem simülasyonu bir arada kullanan çalışmalar [9, 10] ve bireysel yolcu aktarma sürelerini dağılım olarak tahminleyen kestirimci modeller [11] de mevcuttur. Bu örneklerle ek olarak genetik algoritma, yasak arama gibi algoritmalarından yararlanan ve meta sezgisel çözümlere odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır [12-14]. Ancak bu çalışmalarda genellikle belirli bir faktör (örneğin kapı ataması, otobüs kaynak kullanımı veya tren-uçak çizelge uyumu) ön plana çıkarılmakta, yolcuya özgü bireysel özellikler ile operasyonel koşulların bütünlük şeklinde ele alındığı kapsamlı modeller sınırlı kalmaktadır.

Bu bağlamda, mevcut çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Çalışmada geliştirilen optimizasyon modeli, uçak iniş sıralaması, kapı ataması, yolcu hareket dinamikleri, taşınan bagaj etkisi, cinsiyet farklılıkları ve terminal içerisindeki noktaların mesafeleri gibi bireysel parametreleri dikkate almaktadır. Ayrıca otobüs ve metro bekleme sürelerini de modelleyerek daha gerçekçi bir modelleme sunmaktadır. Böylece yolcu akışını bütüncül olarak iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Uygulama alanı olarak seçilen İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı (LTFJ), ikinci pistinin hizmete girmesiyle birlikte hem iç hatlarda hem de Avrupa trafiğinde önemli bir artış yaşamıştır. Bu nedenle çalışmada önerilen modelin bu havalimanı özelinde test edilmesi hem akademik literatüre katkı hem de operasyonel açıdan doğrudan uygulanabilirlik sağlamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan modelin özellikle TNS modelleme aşaması ilgili literatürdeki [15] çalışma ile benzerlik göstermektedir. Literatürdeki çalışmada, LTFJ havalimanına yaklaşan uçakların iniş sıralamasının belirli ölçütler altında önceliklendirilmesine odaklanılmıştır. Ana ölçüt ise ilgili uçaklarda bulunan transfer yolcularının toplam sayısıdır. Iniş sıralamasının oluşturulmasında transfer yolcu sayısına ek olarak tek pist operasyonu nedeniyle kalkış uçaklarıyla paylaşılan pist kullanım kısıtları ve uçakların gecikme süreleri de dikkate alınmış ve modelleme çerçevesi uçakların inişinden sonraki safhaları kapsamayacak şekilde oluşturulmuştur. Çözüm yöntemi olarak çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Benzer biçimde bu çalışmada da TNS yapısı kendine özgü değişmeyen özellikler barındırdığından benzer şekilde modellenmiştir. Buradaki tercih yalnızca metodolojik benzerlikten ibaret olmayıp aynı zamanda literatür sürekliliğinin korunmasına yöneliktir. Bunun haricinde iki araştırma arasında belirgin farklar bulunmaktadır. Söz konusu çalışma tek pist operasyonunu esas alarak yalnızca uçak sıralamasına odaklanmakta, yolcu karakteristikleri, terminal içi transfer dinamikleri veya otobüs/metro bağlantıları, bagaj

taşıma durumu, yürüme hızları, kapı atama gibi faktörleri dikkate almamaktadır. Bu makalede önerilen model, belirtilen durumları da göz önüne alarak hizmete alınan ikinci pist sayesinde ayrı pist operasyonlarını benimsemektedir. En önemli fark ise bu çalışmanın yalnızca transfer yolcularına göre uçak sıralaması yapmakla kalmayıp, aynı zamanda transfer yolcularının terminal içi ve dışı hareketlerini de analiz ederek iki farklı alanı bütünleştirmesidir. Böylece model, uçak iniş sıralaması ile yolcu hareket dinamiklerini tek bir çatı altında birleştirerek bütüncül bir çözüm sunmaktadır. Bu yaklaşım, parametre seti ve kısıtların kapsamını genişletmekte, literatürde yeterince incelenmeyen bireysel yolcu özelliklerinin modele dahil edilmesini sağlamaktadır.

Bu bağlamda çalışmanın motivasyonu hem akademik hem de pratik gereksinimlerden beslenmektedir. Literatürde genellikle birbirinden bağımsız ele alınan uçak sıralaması ve yolcu hareket dinamiklerinin tek bir modelde bütünleştirilmesi, önemli bir araştırma boşluğunu doldurmaktadır. Pratik açıdan ise, özellikle İstanbul gibi yoğun ulaşım ağına sahip şehirlerde transfer yolcularının artan sayısı, operasyonel gecikmelerin azaltılması ve yolcu memnuniyetinin artırılması açısından kritik bir sorun teşkil etmektedir. Dolayısıyla önerilen model, pratik açıdan uygulanabilir ve yolcu odaklı stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

2. Modellemenin Çerçevesi (Modelling Framework)

2.1. Veri Matrisi Oluşturulması (Creating Data Matrix)

Modelde iki ana veri matrisi kullanılmaktadır: biri hava trafik akışı ve İstanbul Terminal Manevra Sahası (TMS) yapısına yönelik verileri (mesafeler, hızlar, havada bekleme noktaları, Toplama Noktası Sistemi (TNS) özellikleri vb.), diğeri ise aktarma yolcusuna odaklı verileri içermektedir. Trafik akışı verisi, LTFJ'nin iki piste sahip olduğu ve bu pistlerden birinin çoğunlukla kalkışlara, diğerinin ise inişlere tahsis edildiği varsayımıyla 20 uçağı (TMS'ye girişten önceki 30 dakikalık zaman dilimi içinde gelen) kapsamaktadır. İlgili havalimanının Nisan 2023 ile Eylül 2023 arasındaki 6 aylık dönemi kapsayan hava trafik akış verisi incelenerek, uçakların ağırlık kategorileri verisi [16] analiz edilmiştir. Uçak ağırlık kategorileri Hafif (örn. Cessna), Orta (örn. B737), Ağır (örn. B747) ve Çok Ağır (örn. A380) olarak dörde ayrılmaktadır. Sonuç olarak, LTFJ havalimanında çoğunlukla orta kategori uçakların operasyon gerçekleştirdiği tespit edilmiş ve bu nedenle çalışmadaki modelde ana uçak kategorisinin Orta olmasına karar verilmiştir. Havalimanı için İstanbul TMS yapısı ve özellikleri, Havacılık Bilgi Yayının'da yayımlanan rota yapısına dayanarak tanımlanmıştır. Modelde kullanılan yolcu odaklı veri matrisi, Python ortamında oluşturulan bir algoritma ile elde edilmiş ve temsili algoritma adımları Tablo 1'de verilmiştir.

Bu algoritma, temel olarak bagaj aktarma süreci (süre, s), bagaj bekleme süresi (süre, s), otobüs bekleme süresi (süre, s), metro bekleme süresi (süre, s), ulaşım modu (0: hava aktarması – 1: raylı aktarma), bagaj durumu (0: bagaj yok – 1: bir ya da iki bagaj), cinsiyet (0: erkek – 1: kadın), yolcunun acele etme düzeyi (1: acelesi yok – 2: acelesi var) gibi parametreleri içermektedir. Buna ek olarak, matris, yolcunun koltuk konumu ve uçağın olası park pozisyonuna bağlı olarak her bir aktarma yolcusunun uçağtan iniş süresini de gerçekçi şekilde dikkate almaktadır. Ek olarak, eğer uçak körüklü bir kapıya park etmişse, orta kategori uçaklar için yalnızca tek bir çıkış kapısının kullanımına izin verilmiştir. Öte yandan, uçak terminale körükle bağlantısı olmayan bir park pozisyonuna park etmişse, uçaktaki ön ve arka iki çıkış kapısının da kullanılabilir olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda ise yolcuların apron içindeki bir otobüs aracılığıyla terminale ulaşması durumu modele dahil edilmiştir.

Tablo 1. Python temsili algoritma akışı (Python Pseudo Code)

Temsili Algoritma Akışı	
Adım	İşlem
1	Parametreleri tanımla. • Toplam yolcu sayısı. • Taban süreler: yürüyüş, bagaj transfer, bekleme süreleri. • Transfer yolcu sayısı en az-en çok değerleri. • Parametre alt ve üst limit katsayıları: $alt_limit - üst_limit$.
2	Boş listeler oluştur. • Aktarma durumu, terminal içi yürüme, bagaj bekleme, aktarma modu, uçak içi bagaj durumu, cinsiyet gibi.
3	Her uçak için (20 uçak): • Transfer yolcu sayısını rasgele ata. • Yolcu dizilerini üret (0: normal, 1: transfer). • Zaman / süre dizilerini üret (yürüyüş, bagaj, otobüs, metro vb.). • Yolcu temelli özellikleri üret (cinsiyet, bagaj, aciliyet, ulaşım modu). • Bu dizileri önceki adımdaki listelere ekle.
4	Veri matrislerini oluştur. • Listeleri “Pandas Veri Matrisi” olarak dönüştür. • Transfer olmayan yolcular için süreleri sıfırlayarak filtreleme yap (ps (yolcu statüsü) matrisi kullanımıyla).
5	Uçak/kapı verilerini oluştur. • Uçak numarası, ağırlık kategorisi, transfer yolcu sayısı. • Kapı-terminal referans noktaları arası taban yürüme süreleri ve toplam transit yolcu sayıları.
6	Uçaktan yolcu tahliye süreleri. • S adet sıra, K adet koltuk. • İlk sıra için ($S=1$) taban süre + her sıra için ekstra süre. • Koltuk pozisyonuna göre ek süre (koridor / orta / cam kenarı). • Sıra sonuna doğru (çıkış kapısı) tıkanıklık ekle. • Her koltuk numarası için toplam tahliye süresi ekle (tek kapı – çift kapı).
7	Sonuçları modelde kullanmak üzere Excel’e aktar. • Uçak / kapı / transit verileri. • Yolcu süreleri (otobüs bekleme gibi). • Uçak tahliye süreleri (tek kapı ve çift kapı).

2.2. Optimizasyon Modeli (Optimization Model)

Çalışmada kullanılan modelin üç temel bölümü bulunmaktadır: TMS rotaları, TNS yapısı ve yolcuların iniş noktasından aktarma noktasına (diğer aktarma uçağı ya da yüksek hızlı tren istasyonu) kadar olan hareketleri. TMS yapısı ile metro ve otobüs güzergâhları sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 1’de her bir uç nokta TMS’ye giriş noktalarını temsil etmektedir. Bu uç noktalardan sahaya giriş yapan uçaklar TMS yol yapısı dahilinde uçuşlarını TNS yayına kadar gerçekleştirmektedir. TNS, sıralama yayı (bacağı) ve toplama noktasından oluşan bir yapıya sahiptir [17, 18] ve uçakların yaklaşmada sıralanmasını sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir sistemdir [19-22]. Bir uçak önündeki diğer bir uçakla emniyetli bir ayırma sağlanana kadar sıralama yayı üzerinde uçuşuna devam etmektedir. Bu yaylar birbirinden 1000 feet dikey ayırma ile birbirlerinden ayrılmaktadır ve yayın geometrik özelliği gereği uçaklar bu yay üzerinde uçuş yaparken toplama noktasına olan mesafeleri değişmemektedir. Şekil 2’de ise havalimanından ilgili durağa kadar metro hattı ve devamında ise YHT istasyonuna ulaşmak için kullanılan otobüs rotası belirtilmiştir.

Modelde, i ($i \in I$), pp ($pp \in PP$) ve gg ($gg \in GG$) sırasıyla uçak, yolcu ve kapı indekslerini ifade etmektedir. Ayrıca o ($o \in O$), p ($p \in P$) ve w ($w \in W$) sırasıyla uçakların ağırlık kategorileri, TMS giriş kapıları ve

TMS içerisindeki yol noktaları indekslerini ifade etmektedir. $d_{w1,w2}$ ve $v_{w1,w2}$, sırasıyla $w1$ ve $w2$ yol noktaları arasındaki mesafeleri ve uygulanan hızları bulunduran parametrelerdir. ct , zaman çevirimi için kullanılan bir sabittir. cat_i ve $fmode_i$, sırasıyla her bir uçağın ağırlık kategorisini ve uçuş modunu temsil eder. Bu çalışmada ise sadece iniş uçaklarına ($fmode_i = 1$) odaklanılmış ve genel gösterimde yer alması için modele eklenmiştir. $csarr_{o1,o2}$, $o1$ ve $o2$ ağırlık kategorileri arasındaki ayırma süresidir. $durseq$, TNS sıralama yayı üzerinde uçulabilecek en fazla süre parametresidir. $durseqmpt$, bu yay ile toplama noktası arasındaki uçuş süresini temsil eden parametredir. ep_i , her bir uçağın TMS’ye giriş noktalarını veren parametredir. et_i , her bir uçağın sisteme giriş zamanını temsil etmektedir. h_w , ikili parametredir. Eğer w yol noktası bir bekleme noktası ise h_w değeri 1 olur. $maxhld$, her bir uçağın yapabileceği en fazla bekleme sayısını ifade eder. $maxhldcount$, bir yol noktasının toplam kaç defa bekleme için kullanılabileceğini ifade eder. Bu değer, çok verimli olmayan bekleme prosedürü sayısını sınırlamak amacıyla kullanılmaktadır. $maxhlddur$, her bir uçak için bir bekleme paterninde geçirebileceği en fazla süreyi ifade eder. $maxmctr$, her bir uçağın alabileceği ayırma gecikmesi talimatı sayısının üst limitini ifade eder. $maxmctrdur$, her bir uçağın toplam uygulayabileceği en fazla ayırma gecikmesi süresini ifade eder. $maxmd$, her bir uçağın iki yol noktası arasında uygulayabileceği en fazla ayırma gecikmesi süresini ifade eder.



Şekil 1. LTFJ için TMS ve TNS yapısı (pist 06) (TMA and PMS structure for LTFJ RWY06- Google Earth)

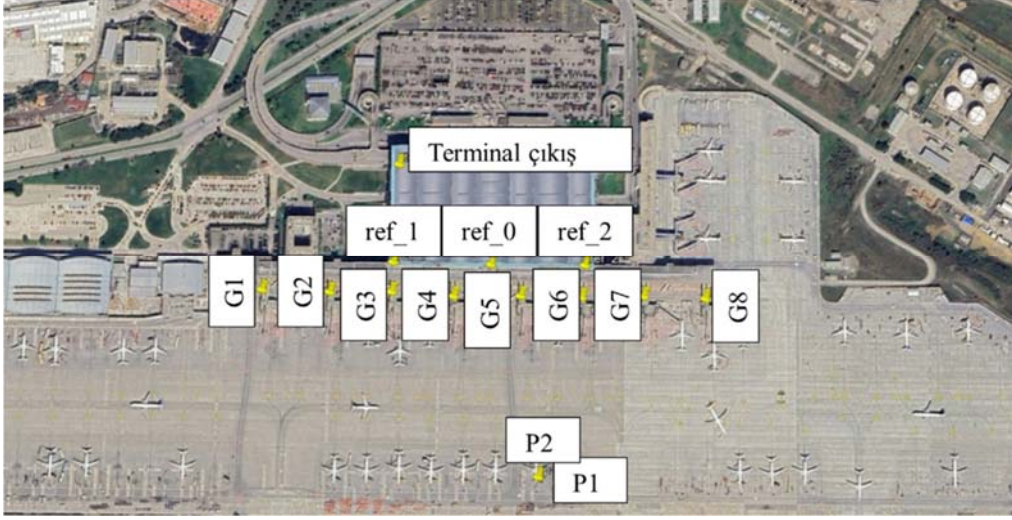


Şekil 2. Metro ve otobüs güzergahı (Subway and bus route-Google Maps)

$minmd$ ve $minhd$ sırasıyla, eğer uygulanıyorsa, ayırma gecikmesi ve bekleme paterni için en az süreyi ifade eder. pms_p , TNS yayı üzerindeki giriş noktalarını temsil eder. $r_{p,w}$, TMS'deki giriş noktalarına göre kullanılacak rotaları barındıran parametre matrisidir ve rota içerisinde kullanılacak her bir w yol noktası için değeri 1 olur. $seq_{w1,w2}$, TMS içerisindeki yol noktalarının bağımlı durumlarını gösteren parametre matrisidir ve $w1$ ile $w2$ arasında tanımlı bir yol varsa değeri 1 olur. sep , TMS içerisindeki uçaklar arasındaki ayırma süresini veren bir sabittir. $transit_i$, her bir uçakta bulunan toplam aktarma yolcusu sayısını ifade eder. ad_i , her bir uçağın sahip olduğu hava gecikmesini temsil eden değişkendir. $crmHLD_i$ ve $crmMCTR_i$, sırasıyla her bir uçağın sahip olduğu bekleme paterni ve ayırma gecikmesi sayılarını ifade eden değişkenlerdir. $durseqleg_i$, her bir uçağın TNS yayı üzerinde uçuğu süreyi veren değişkendir. $hd_{i,w}$, her bir uçağın w yol noktası üzerindeki bekleme paterni gecikmesini veren değişkendir. $md_{i,w1,w2}$, her bir uçağın $w1$ yol noktasından $w2$ 'ye geçerken aldığı ayırma gecikmesini veren değişkendir ve bu gecikmenin uygulanması için seçilecek yöntem hava trafik kontrolörüne bırakılmıştır. mpt_i , her bir uçağın TNS üzerindeki toplama noktasını geçtiği zamanı veren değişkendir. $n_{i,w}$, her bir

uçağın uyguladığı bekleme paterni sayısını veren tam sayı bir değişkendir. $t_{i,w}$, her bir uçağın w yol noktasından geçme zamanını temsil eden değişkendir. tp_i , her bir uçağın TNS yayına giriş zamanını ifade eden değişkendir. $x_{i1,i2}$, $i1$ uçağı $i2$ 'den önce bir yol noktasını geçerse değeri 1 olan ikili bir değişkendir. $y_{i,w1,w2}$, bir uçak $w1$ ile $w2$ yol noktaları arasında uçarken ayırma gecikmesi alırsa değeri 1 olan ikili bir değişkendir. $y2_{i1,i2}$, $i1$ uçağı $i2$ 'den önce TNS içerisindeki toplama noktasını geçerse değeri 1 olan ikili bir değişkendir.

CI ($CI \subset I$) ve CP ($CP \subset PP$), sırasıyla, toplam aktarma yolcu sayısı sistemdeki ortalama aktarma yolcu sayısından büyük olan ilk beş uçağın ve modeldeki tüm aktarma yolcularının kümeleridir. $pi_{i,pp}$, aktarma yolcularının aciliyet düzeyini ifade etmektedir. $transit_i$, her bir uçakta bulunan toplam aktarma yolcu sayısını temsil etmektedir. Ayrıca, deg_{pp} ve des_{pp} , sırasıyla yalnızca bir çıkış kapısının kullanılabilir olduğu durumda ve iki çıkış kapısının kullanılabilir olduğu durumda her bir yolcunun uçaktan iniş süresini sırasıyla göstermektedir. Literatürdeki bir çalışmada [23] belirtildiği gibi, bazı yaygın biniş stratejileri mevcuttur; bunlardan biri “blok ve dıştan içe” prosedürleridir. İniş, birincil odak olsa da aynı zamanda içten dışa bir yaklaşım kullanılarak da yönetilebilir. Bu nedenle, bu çalışmada,



Şekil 3. Terminaldeki referans noktaları, kapılar ve park alanları (Reference points, gates and parking stands)

uçakta koridor koltuklarındaki yolcular ilk olarak hareket eder, ardından bunu orta koltuklar ve pencere koltuklarındaki yolcular takip etmektedir. Her bir yolcunun iniş süresi bu prosedüre göre hesaplanmaktadır.

$coeff1$, kabinde bagajı bulunan her bir yolcunun uçaktan inişi sırasında eklenecek ekstra süreyi temsil etmektedir. $ls_{i,pp}$ ve $ls2_{i,pp}$, sırasıyla uçak içindeki her bir yolcu için kargo ve kabin bagaj durumunu (0: bagaj yok, 1: en az bir bagaj var) ifade etmektedir. $ps_{i,pp}$, uçak içindeki yolcunun aktarma durumu bilgisini göstermektedir (0: aktarma yok, 1: aktarma var). wrp_{gg} , aktarma yolcularının uçaktan indikten sonra terminal içindeki referans noktalarına (Şekil 3'te ref_0, ref_1, ref_2) temel ulaşma süresini temsil etmektedir. Bu aşamada, referans noktalar ile uçakların olası park pozisyonları eşleştirilmiştir. Modelde kullanılan ilk üç park yeri (G) ref_1 ile, G4 ve G5 ref_0 ve G6-G8 ise ref_2 ile eşleştirilmiştir. Ayrıca, terminal köprüsü bulunmayan iki park yeri (P1-P2) mevcuttur ve bu alanlara park eden uçakların yolcuları aprondaki otobüsler ile taşınmaktadır. Bu park alanları da ref_0 ile eşleştirilmiştir. $gen_{i,pp}$, uçak içerisindeki her bir yolcunun cinsiyetini temsil etmektedir. Cinsiyet durumu matrisini oluşturmak için, önce (20 uçak $\times$ 180 yolcu) boyutlarında bir matris oluşturulmuş, ardından bu matris, tüm kadınların erkeklere göre daha yavaş yürüdüğünü varsaymamak amacıyla, yine (20 uçak $\times$ 180 yolcu) boyutunda başka bir rassal ikili matrisle çarpılarak filtrelenmiştir. got , her bir uçağın park pozisyonunda geçirdiği süreyi ifade eder. $mot_{i,pp}$, uçak içindeki aktarma yolcusu için ulaşım modunu (0: hava yolu aktarması, 1: yüksek hızlı tren aktarması) göstermektedir. $wg_{i,pp}$, hava yolu ile aktarma yapacak yolcuların diğer uçağın binış kapısına ulaşmaları için gereken süreyi ifade etmektedir. $ltp_{i,pp}$, hava yolu aktarma yolcularının bagajlarının yer hizmetleri operatörleri tarafından diğer aktarma uçağına taşınması için gerekli süredir. wte_{gg} , her bir yolcunun terminal çıkışına ulaşması için gereken taban süreyi göstermektedir. Çalışmanın amacı doğrultusunda makul birer referans noktası olarak belirlenen üç ana terminal giriş noktası ve bir çıkış noktası Şekil 3'te verilmiştir. Ancak, herhangi bir havalimanı için bilinen referans koordinatlara ulaşılması hâlinde, bu noktalar daha gerçekçi bir biçimde güncellenebilir. Yine de mevcut haliyle, söz konusu noktalar bu çalışma kapsamındaki havalimanı için yeterli bir temel sağlamaktadır. Bu referans noktaları, uçakların park ettikleri kapılar ve açık park alanları ile eşleştirilmiştir. Bu yüzden, çalışmada uçakların park pozisyonları dikkate alınarak taban sürelerle dayalı bir değerlendirme yapılması mümkün kılınmıştır. Örneğin, eğer bir uçak,

bir numaralı ($gg=1$) kapıya park ederse, yolcunun aktarma türüne bağlı olarak ya ref_1 noktasından aktarma uçağının binış kapısına ya da tren istasyonuna ulaşmak üzere terminal çıkışına doğru hareket ettiği kabul edilmektedir. Bu durumda, $wte_{gg=1}$ ilgili yolcu için taban süreyi temsil etmektedir.

$coeff2$ ve $coeff3$, terminale giriş ve çıkışlar süresince bagaj taşıma ve cinsiyet durumuna göre belirlenen fazladan süre için kullanılan katsayıları göstermektedir. $wl_{i,pp}$, her bir yolcunun terminaldeki bagaj bandından bagajını alması için gerekli süreyi temsil etmektedir. wts , tis ve $wtm_{i,pp}$, her uçaktaki her bir yolcunun sırasıyla terminal çıkışından metro istasyonuna yürüyüş, metro içindeki yolculuk ve metro bekleme sürelerini temsil etmektedir. $wths$, tib , $wtb_{i,pp}$ ve $wttp$, sırasıyla otobüs durağına yürüme, otobüsteki seyahat, otobüs bekleme ve otobüs durağından tren istasyonuna yürüme sürelerini göstermektedir. Bu süreler taban süreler olarak tanımlanmıştır ve cinsiyet ile bagaj durumuna ilişkin matrislere göre ek sürelerle birlikte değerlendirilmektedir. Mesafeler dışındaki bu parametrelerin her biri, yolcuların havaalanından tren istasyonuna ya da aktarma uçağının kapısına kadar olan yolculukları sırasında karşılaşılabilecekleri rastlantısal olayları modellemek amacıyla rastgele şekilde tanımlanmıştır. Bu yüzden bu yaklaşım, modelin yolcu akışını daha gerçekçi bir bakış açısıyla ele almasını sağlamaktadır.

$ttp_{i,pp}$ ve $tbg_{i,pp}$, sırasıyla aktarma yolcularının tren istasyonuna ve aktarma uçağının kapısına varış zamanını ifade eden değişkenlerdir. $xg_{i,gg}$, her bir uçağın bir kapı gg 'ye atanması durumunda 1 değerini alan, aksi takdirde 0 olan ikili bir değişkendir. lt_i , her bir i uçağı için iniş zamanını; pt_i , i uçağının park edilme zamanını; $te_{i,pp}$, uçak i 'deki her bir yolcunun terminale giriş zamanını; $tex_{i,pp}$, aynı yolcunun terminalden çıkış zamanını temsil etmektedir. $y2_{i1,i2}$, uçak $i1$ 'in uçak $i2$ 'den önce iniş yapması durumunda 1 değerini alan, aksi takdirde 0 olan ikili bir değişkendir. adi_i , uçak i 'nin hava gecikme süresini ifade eder ve bu süre, aynı yol noktasından geçecek uçakların ayrımını sağlamak üzere tanımlanan ayırma gecikmesi, hava sahasında bekleme noktalarındaki bekleme süresi ve TNS üzerindeki sıralama yayındaki uçuş süresinden oluşmaktadır.

$$t_{i,w} = et_i, w = ep_i, fmode_i = 1, \forall i \in I, \forall w \in W \quad (1)$$

$$t_{i,w2} = t_{i,w1} + (d_{w1,w2}/v_{w1,w2}) * ct + h_{w1} * hd_{i,w1} + md_{i,w1,w2}, w1 \neq w2, r_{p,w1} = 1, p = ep_i,$$

$$\begin{aligned} seg_{w1,w2} &= 1, fmode_i = 1, \forall i \in I, \\ \forall (w1, w2) \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t_{i2,w} - t_{i1,w} &\geq sep - M * (1 - x_{i1,i2}), \\ i1 \neq i2, r_{p1,w} &= 1, r_{p2,w} = 1, p1 = ep_{i1}, \\ p2 &= ep_{i2}, fmode_{i1} = 1, fmode_{i2} = 1, \\ \forall (i1, i2) \in I, \forall w \in W, \forall (p1, p2) \in P \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} t_{i1,w} - t_{i2,w} &\geq sep - M * (x_{i1,i2}), \\ i1 \neq i2, r_{p1,w} &= 1, r_{p2,w} = 1, p1 = ep_{i1}, p2 = ep_{i2}, \\ fmode_{i1} &= 1, fmode_{i2} = 1, \\ \forall (i1, i2) \in I, \forall w \in W, \forall (p1, p2) \in P \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} n_{i,w} &= (h_w * hd_{i,w}) / minhd, \\ r_{p,w} &= 1, p = ep_i, fmode_i = 1, \\ \forall i \in I, \forall w \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} crmHLD_i &= \sum_{(w|w \in W)} \sum_{(p|p \in P)} n_{i,w}, r_{p,w} = 1, \\ p &= ep_i, fmode_i = 1, \forall i \in I \end{aligned} \quad (6)$$

$$crmHLD_i \leq maxhld, fmode_i = 1, \forall i \in I \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(w|w \in W)} \sum_{(p|p \in P)} h_w * hd_{i,w} &\leq maxhlddur, \\ r_{p,w} &= 1, p = ep_i, fmode_i = 1, \forall i \in I \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(i|i \in I)} \sum_{(p|p \in P)} n_{i,w} &\leq maxhldcount, \\ r_{p,w} &= 1, p = ep_i, fmode_i = 1, h_w = 1, \forall w \in W \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} md_{i,w1,w2} &\geq 0 - M * y_{i,w1,w2}, \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, p = ep_i, seg_{w1,w2} = 1, \\ fmode_i &= 1, \forall i \in I, \forall (w1, w2) \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} md_{i,w1,w2} &\leq 0 + M * y_{i,w1,w2}, \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, p = ep_i, seg_{w1,w2} = 1, \\ fmode_i &= 1, \forall i \in I, \forall (w1, w2) \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} md_{i,w1,w2} &\geq minmd - M * (1 - y_{i,w1,w2}), \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, p = ep_i, seg_{w1,w2} = 1, \\ fmode_i &= 1, \forall i \in I, \forall (w1, w2) \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} md_{i,w1,w2} &\leq maxmd, \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, p = ep_i, seg_{w1,w2} = 1, \\ fmode_i &= 1, \forall i \in I, \forall (w1, w2) \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} crmMCTR_i &= \sum_{(w1|w1 \in W)} \sum_{(w2|w2 \in W)} \sum_{(p|p \in P)} y_{i,w1,w2}, \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, p = ep_i, \\ seg_{w1,w2} &= 1, fmode_i = 1, \forall i \in I \end{aligned} \quad (14)$$

$$crmMCTR_i \leq maxmctr, fmode_i = 1, \forall i \in I \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(w1|w1 \in W)} \sum_{(w2|w2 \in W)} \sum_{(p|p \in P)} md_{i,w1,w2} &\leq maxmctrdur, \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, p = ep_i, \\ seg_{w1,w2} &= 1, fmode_i = 1, \forall i \in I \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} tp_i &= t_{i,w}, w = pms_p, p = ep_i, fmode_i = 1, \\ \forall i \in I, \forall w \in W, \forall p \in P \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} mpt_i &= tp_i + durseqmpt + durseqleg_i, \\ fmode_i &= 1, \forall i \in I \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} mpt_{i2} - mpt_{i1} &\geq csarr_{o1,o2} - M * (1 - y_{i1,i2}), \\ i1 \neq i2, o1 &= cat_{i1}, o2 = cat_{i2}, fmode_{i1} = 1, fmode_{i2} = 1, \\ \forall (i1, i2) \in I, \forall (o1, o2) \in O \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} mpt_{i1} - mpt_{i2} &\geq csarr_{o1,o2} - M * y_{i1,i2}, \\ i1 \neq i2, o1 &= cat_{i2}, o2 = cat_{i1}, fmode_{i1} = 1, fmode_{i2} = 1, \\ \forall (i1, i2) \in I, \forall (o1, o2) \in O \end{aligned} \quad (20)$$

$$durseqleg_i \leq durseq, fmode_i = 1, \forall i \in I \quad (21)$$

$$\begin{aligned} ad_i &= durseqleg_i + \sum_{(w1|w1 \in W)} \sum_{(w2|w2 \in W)} \sum_{(p|p \in P)} md_{i,w1,w2} + \\ &\sum_{(w|w \in W)} \sum_{(p|p \in P)} h_w * hd_{i,w}, \\ w1 \neq w2, r_{p,w1} &= 1, r_{p,w2} = 1, p = ep_i, \\ seg_{w1,w2} &= 1, fmode_{i1} = 1, \forall i \in I \end{aligned} \quad (22)$$

$$\sum_{gg} xg_{i,gg} = 1, transit_i > avetransit, i \in CI \quad (23)$$

$$pt_i = mpt_i + durmptw + taxin, \forall i \in I \quad (24)$$

$$\begin{aligned} te_{i,pp} &\geq pt_i + (deg_{pp} + coeff1 \times ls2_{i,pp}) \times xg_{i,gg|gg \in Gate} + \\ &(des_{pp} + coeff1 \times ls2_{i,pp}) \times xg_{i,gg|gg \in Stand} + \\ &(wrp_{gg} + wrp_{gg} \times coeff2 \times gen_{i,pp}) - (1 - xg_{i,gg}) \times M, \\ transit_i &> avetransit, ps_{i,pp} = 1, \\ \forall i \in CI, \forall pp \in CP, \forall gg \in GG \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} te_{i,pp} &\leq pt_i + (deg_{pp} + coeff1 \times ls2_{i,pp}) \times xg_{i,gg|gg \in Gate} + \\ &(des_{pp} + coeff1 \times ls2_{i,pp}) \times xg_{i,gg|gg \in Stand} + \\ &(wrp_{gg} + wrp_{gg} \times coeff2 \times gen_{i,pp}) + (1 - xg_{i,gg}) \times M, \\ transit_i &> avetransit, ps_{i,pp} = 1, \\ \forall i \in CI, \forall pp \in CP, \forall gg \in GG \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} pt_{i2} - pt_{i1} &\geq got - (2 - xg_{i1,gg} - xg_{i2,gg}) \times \\ &M - (1 - y_{i1,i2}) \times M, i1 \neq i2, \forall i1, i2 \in CP \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} pt_{i1} - pt_{i2} &\geq got - (2 - xg_{i1,gg} - xg_{i2,gg}) \times \\ &M - (y_{i1,i2}) \times M, i1 \neq i2, \forall i1, i2 \in CP \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} tex_{i,pp} &\geq te_{i,pp} + (wg_{i,pp} + wg_{i,pp} \times coeff2 \times gen_{i,pp}) \times \\ &(1 - mot_{i,pp}) \times (1 - ls_{i,pp}) + (wg_{i,pp} + wg_{i,pp} \times coeff2 \times \\ &gen_{i,pp} + wg_{i,pp} \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp} + ltp_{i,pp}) \times \\ &(1 - mot_{i,pp}) \times (ls_{i,pp}) + (wte_{gg} + wte_{gg} \times coeff2 \times gen_{i,pp}) \times \\ &(mot_{i,pp}) \times (1 - ls_{i,pp}) + (wte_{gg} + wte_{gg} \times coeff2 \times gen_{i,pp} + \\ &wte_{gg} \times coeff3 \times ls_{i,pp} + wte_{gg} \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp} + wl_{i,pp}) \times \\ &(mot_{i,pp}) \times (ls_{i,pp}) - (1 - xg_{i,gg}) \times M, \\ transit_i &> avetransit, ps_{i,pp} = 1, \\ \forall i \in CI, \forall pp \in CP, \forall gg \in GG \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} tex_{i,pp} &\leq te_{i,pp} + (wg_{i,pp} + wg_{i,pp} \times coeff2 \times gen_{i,pp}) \times \\ &(1 - mot_{i,pp}) \times (1 - ls_{i,pp}) + (wg_{i,pp} + wg_{i,pp} \times coeff2 \times \\ &gen_{i,pp} + wg_{i,pp} \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp} + ltp_{i,pp}) \times \\ &(1 - mot_{i,pp}) \times (ls_{i,pp}) + (wte_{gg} + wte_{gg} \times coeff2 \times gen_{i,pp}) \times \\ &(mot_{i,pp}) \times (1 - ls_{i,pp}) + (wte_{gg} + wte_{gg} \times coeff2 \times gen_{i,pp} + \\ &wte_{gg} \times coeff3 \times ls_{i,pp} + wte_{gg} \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp} + wl_{i,pp}) \times \\ &(mot_{i,pp}) \times (ls_{i,pp}) + (1 - xg_{i,gg}) \times M, \\ transit_i &> avetransit, ps_{i,pp} = 1, \\ \forall i \in CI, \forall pp \in CP, \forall gg \in GG \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} tbg_{i,pp} &= tex_{i,pp}, transit_i > avetransit, \\ ps_{i,pp} &= 1, mot_{i,pp} = 0, \\ \forall i \in CI, \forall pp \in CP, \forall gg \in GG \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
t_{p,i,pp} = & tex_{i,pp} + (wts + wts \times coeff2 \times gen_{i,pp} + \\
& wts \times coeff3 \times ls_{i,pp} + wts \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp}) + \left(\frac{tis +}{wtm_{i,pp}} + \right. \\
& \left. \left(wtbs + wtbs \times coeff2 \times gen_{i,pp} + wtbs \times coeff3 \times ls_{i,pp} + \right. \right. \\
& \left. \left. wtbs \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp} \right) + \right. \\
& \left. (tib + wtb_{i,pp}) + (wttp + wttp \times coeff2 \times gen_{i,pp} + \right. \\
& wttp \times coeff3 \times ls_{i,pp} + wttp \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp}), \\
& transit_i > avetransit, ps_{i,pp}=1, mot_{i,pp}=1, \\
& \forall i \in CI, \forall pp \in CP, \forall gg \in GG
\end{aligned} \quad (32)$$

$$ad_i \leq ub, fmode_i=1, \forall i \in I \quad (33)$$

$$enk(\sum_{i \in I} ad_i) \quad (34)$$

$$enk \left(\frac{w1 \times \sum_{i \in CI} \sum_{pp \in CP} (pi_{i,pp} \times t_{p,i,pp})}{+ w2 \times \sum_{i \in CI} \sum_{pp \in CP} (pi_{i,pp} \times tb_{g,i,pp})} \right) \quad (35)$$

$$enk \left(\frac{\sum_{i \in CI} \sum_{pp \in CP} (pi_{i,pp} \times t_{p,i,pp}) +}{\sum_{i \in CI} \sum_{pp \in CP} (pi_{i,pp} \times tb_{g,i,pp}) + \sum_i ad_i} \right) \quad (36)$$

Eş. 1, her bir uçağın TMS'ye giriş zamanlarını kontrol eder. Eş. 2, TMS'ye giren uçakların bu saha içerisindeki her bir yol noktasını geçtiği zamanı hesaplar ve uçaklar arasında gereken zaman ayırmasını gecikme değişkenleriyle kontrol eder. Eş. 3 ve 4, kesişen rotalarda uçan uçaklar arasındaki zaman ayırmasının belirlenen sürede olmasını sağlar. Eş. 5, her bir uçağın w yol noktasında, eğer varsa, bekleme sayısını hesaplar. Her bir $minhd$ bir tur beklemeye denk gelmektedir. Eş. 6-9, bekleme talimat sayısını ve bekleme süresini kontrol eder. Eş. 10-13 grubu ise kesişen rotalarda uçan uçaklar arası ayırma için verilen ayırma gecikmesinin en az ve en çok olarak belirlenen aralıklarda olmasını sağlar. Aynı zamanda bu kısıt grubu içerisinde verilen her bir ayırma gecikmesi talimatının sayısı hesaplanır. Eş. 14-16, ayırma gecikmesi talimatının sayısını ve toplam süresini kontrol eder. Eş. 17, uçağın yaklaşma yönüne bağlı olarak Şekil 1'de gösterilen ve TNS sistemine ait olan sıralama bacağına (yay şeklinde ve ileride tek bir notada birleşen yollara sahip sistem) giriş zamanlarını kontrol eder. Eş. 18-20, bu sıralama bacaklarından ilerideki toplam noktasına yapılan uçuşlar için, uçakların bu nokta üzerinde bulunma zamanını ve art arda bu noktaya uçan uçaklar arasındaki ayırma sürelerini kontrol eder. Eş. 21 her bir uçağın TNS yayı üzerinde uçabileceği süreyi bir sınır süre ile kontrol eder. Eş. 22 ise TMS'ye giren her bir uçak için uygulanan gecikme sürelerini hesaplayarak uçakların bu saha içerisinde aldığı toplam gecikme sürelerini hesaplar. Eş. 23, her bir uçağa bir park yeri atanması için kullanılır. Eş. 24, her bir uçağın körüklü kapıya veya aprondaki park yerine varış zamanını hesaplamak amacıyla kullanılır. Eş. 25 ve 26 ise her bir yolcunun terminale giriş zamanını hesaplamak için kullanılır. Bu kısıtlarda, eğer atanan park pozisyonu bir körüklü kapı ise deg_{pp} aksi takdirde des_{pp} parametresi dikkate alınır. Ayrıca, $gen_{i,pp} = 1$ olduğunda, formülasyona $wrp_{gg} \times coeff2$ işlemi de eklenir. Bu kısıtlarda, her bir uçağa atanan park yerini takip edebilmek için ve park yerine özgü parametreleri kullanmak amacıyla büyük bir sabit M ile $xg_{i,gg}$ ikili değişkeninden yararlanır. Eş. 27 ve 28, park yerlerinin uçaklar arasındaki kullanımını kontrol eder. Eş. 29 ve 30 ise her bir yolcunun terminalden çıkış zamanını kontrol etmek için kullanılır. Bu kısıtlarda iki temel ikili parametre ($mot_{i,pp}$ ve $ls_{i,pp}$) bulunduğundan, bu parametrelerin değerlerine bağlı olarak dört farklı alt senaryo oluşur. Bu kısıtlarda, eğer bir yolcunun bagajı uçak altı kargo bölümündeyse, bagajın yürüyüş süresine etkisini hesaba katmak için $wte_{gg} \times coeff3 \times ls_{i,pp}$ işlemi kullanılır. Ayrıca, yolcunun kabin bagajı

varsa, bu bagajın yürüyüş süresine etkisini dikkate almak amacıyla $wte_{gg} \times (\frac{coeff3}{2}) \times ls2_{i,pp}$ işlemi kullanılır. Benzer bir yapı $ls_{i,pp}$ veya $ls2_{i,pp}$ parametresi 1'e eşit olduğunda modelde yer alan diğer denklemler için de uygulanır. Kabin bagajının ağırlığı genellikle kargo bagajının yarısı kadar olduğu için, ilgili katsayı da buna göre yarıya düşürülmüştür. Hava yolu aktarma yolcularının aktarma uçağının biniş kapısına varış zamanı Eş. 29 ve 30'da hesaplandığından, bu süre Eş. 31'de $tex_{i,pp}$ olarak temsil edilmektedir. Öte yandan, hızlı trene aktarma yapan yolcular için tren istasyonuna varış süresi Eş. 32'de hesaplanmaktadır. Bu kısıt; cinsiyet ve bagaj durumuna göre yürüme süresi, otobüs ve metro istasyonlarına yürüme süresi, otobüs ve metro için bekleme süresi, otobüs ve metro seyahat süresi ile tren istasyonuna yürüme süresini dikkate alır. Eş. 33 ise her bir uçağın havadaki gecikme süresini kontrol eder.

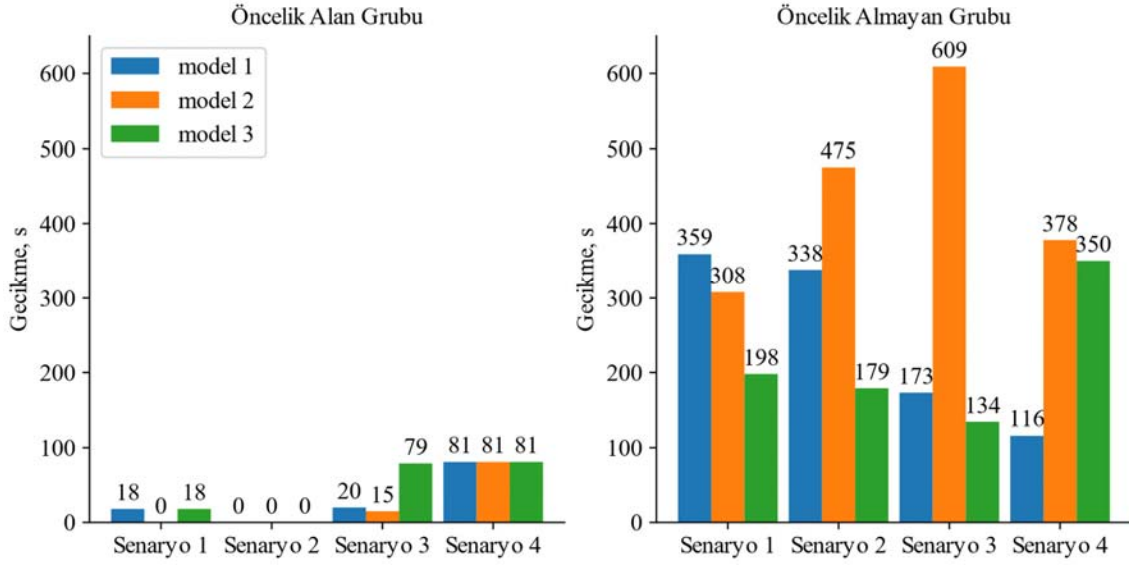
Bu çalışmada üç model bulunmaktadır. Her bir model değişken amaçları test edebilmek için farklı bir amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Model 1 Eş. 34 ile eşleşirken, Model 2 ve Model 3 sırasıyla Eş. 35 ve Eş. 36 ile eşleşmektedir. Her bir modeldeki amaç fonksiyonu farklılaşırken kısıtlar her modelde aynı bırakılmıştır. Model 1'de kullanılan amaç fonksiyonu, toplam havadaki gecikme süresini en aza indirmek üzerine odaklanmaktadır. Model 2'de kullanılan bir diğer amaç fonksiyonu, her bir yolcunun aciliyet düzeyi dikkate alınarak yolcuların tren peronuna ve aktarma uçağına ulaşma zamanlarının toplamını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Tren yolcularına öncelik verilmesi amacıyla $w1$ eşittir 2 ve $w2$ eşittir 1 olarak tüm modellerde tanımlanmıştır. Model 3'te kullanılan son amaç fonksiyonu ise, Eş. 35'i de dikkate alarak toplam havadaki gecikme sürelerini en aza indirmeye odaklanmaktadır. Ayrıca, TMS içinde daha dengeli bir akış sağlanabilmesi için, uçakların iniş sıralamasında mutlak bir önceliklendirme yerine amaç fonksiyonlarında toplam aktarma yolcu sayılarına göre seçilen uçaklar dikkate alınarak önceliklendirme yapılmıştır. Model 3 amacıyla yer alan iki fonksiyona da min-max normalizasyonu uygulanmış ve çözüm sürelerinin 7-13 dakika aralığında olduğu ölçülmüştür. Bu çözüm süresi Model 1 ve Model 2 için ise 1,5-5 dakika aralığındadır. Ayrıca, Model 2, uçaklar arasında dengeli bir gecikme dağılımı sağlanabilmesi için hava gecikmelerini kontrol eden Eş. 33'ü içermektedir. Bu yaklaşım sayesinde, model yolcu aktarma sürelerini en aza indirmeyi önceliklendirirken, hava gecikmelerinin önceden tanımlanmış sınırlar içerisinde kalmasını da sağlamaktadır.

Bir sonraki bölümde model, Python ortamında oluşturulan ve yolcu odaklı parametrelerin farklılaştığı dört farklı senaryoyla test edilmiştir. Her bir senaryo, önceden de belirtilen üç farklı amaç fonksiyonu ile değerlendirilmiştir.

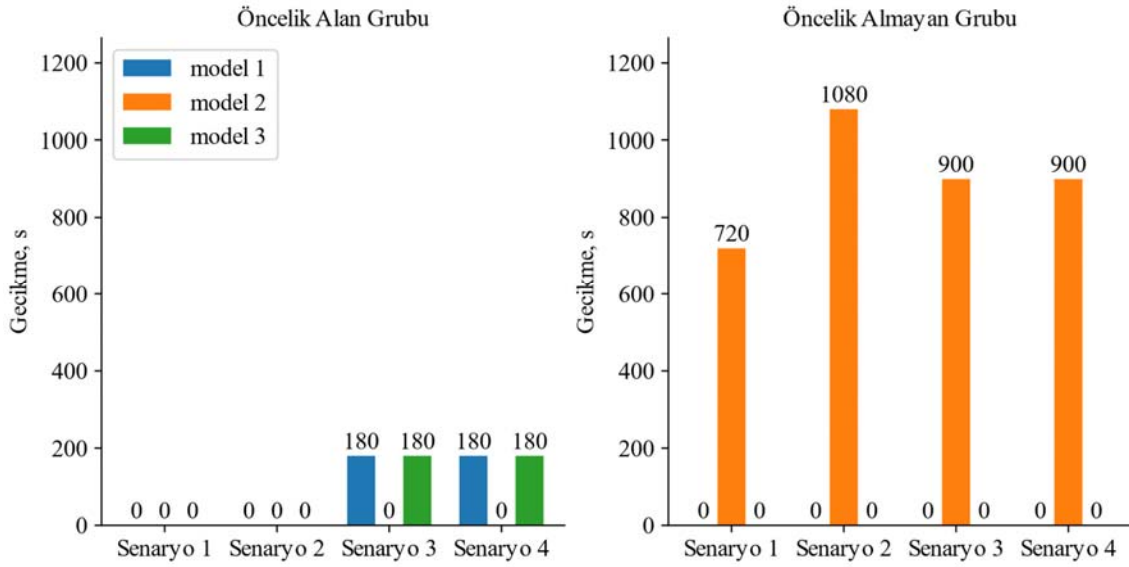
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde üç modelin sonuçları analiz edilip karşılaştırılmıştır. Bu modellerin çalıştırılması, tüm uçaklar, önceliksiz uçaklar ve seçilen öncelikli uçaklar için hava gecikmeleri açısından amaç fonksiyonlarının karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, her bir model için tren istasyonuna ve aktarma uçağına varış zamanlarına ilişkin betimleyici istatistikler de elde edilmektedir.

Şekil 4, uçakların çakışma noktalarını emniyetli şekilde geçmeleri için uygulanan toplam ayırma gecikmesini göstermektedir. Model 3, dördüncü senaryo hariç olmak üzere, her bir senaryoda "öncelik almayan" için diğer modellere kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Dördüncü senaryoda ise Model 1'in aynı grup için daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Ancak, Model 2, "öncelik alan" grubu için ayırma gecikmesini iki senaryoda sıfıra indirerek özellikle birinci ve ikinci senaryolarda en iyi performans göstererek diğer modellerden üstünlük sağlamıştır.



Şekil 4. Her bir senaryodaki toplam ayırma gecikmesi (Total margin delay in each scenario)



Şekil 5. Her bir senaryodaki toplam bekleme gecikmesine (Total holding delay in each scenario)

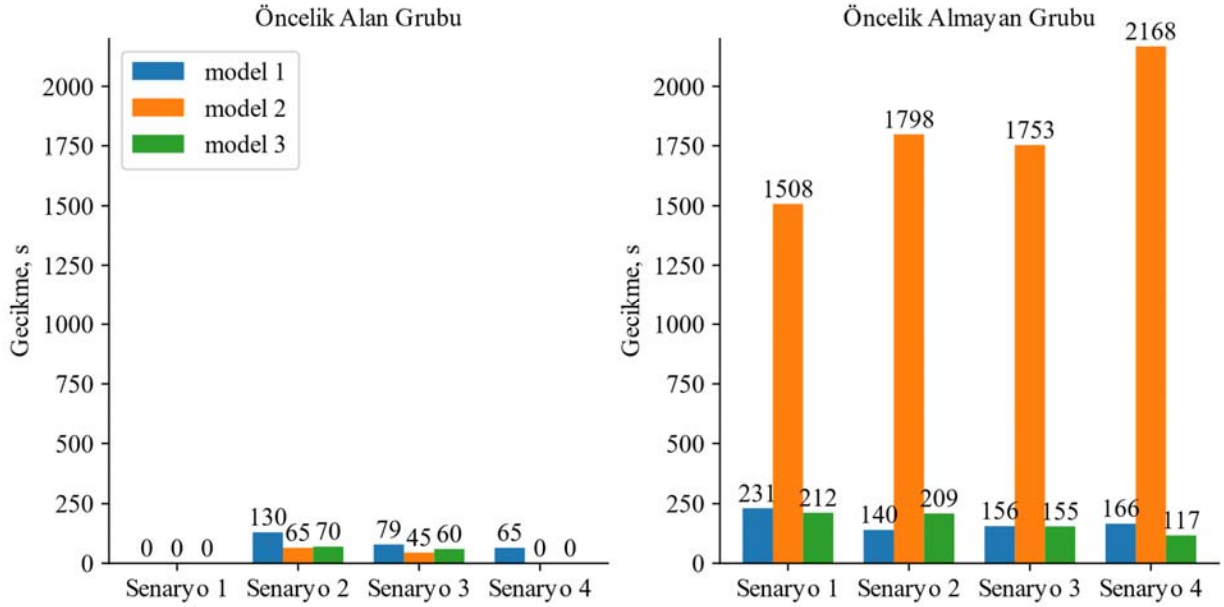
Şekil 5, TMS içerisinde uçakların ayırmasında kullanılan sistemdeki tüm uçakların toplam bekleme gecikmesini göstermektedir. Modellerde bu gecikme, gecikmeye dayalı bir çözüm yöntemi olarak ayırma gecikmesine kıyasla daha seyrek sıklıkta uygulanmıştır. Model 2’de, her bir senaryoda “öncelik alan” grubu için bekleme süresi sıfır olarak hesaplanmıştır. Buna karşın, Model 1 ve Model 3, aynı karşılaştırma kapsamında üçüncü ve dördüncü senaryolarda birer kez bekleme gecikmesi uygulamıştır. Ancak, Model 1 ve Model 3, “öncelik almayan” grubu için bekleme gecikmesi uygulama sıklığı açısından Model 2’ye kıyasla daha düşük bir değere (0) sahiptir. “Öncelik almayan” uçaklar için bekleme gecikmesinin en fazla uygulandığı model ise ikinci senaryoda toplam altı kez ile Model 2 olmuştur.

Şekil 6, uçakların iniş sıralamasında temel rol oynayan TNS’nin sıralama ayağındaki toplam uçuş süresini göstermektedir. “Öncelik alan” grubu açısından değerlendirildiğinde, Model 2 her senaryoda diğer modellere üstünlük sağlamaktadır. Ancak, “öncelik almayan”

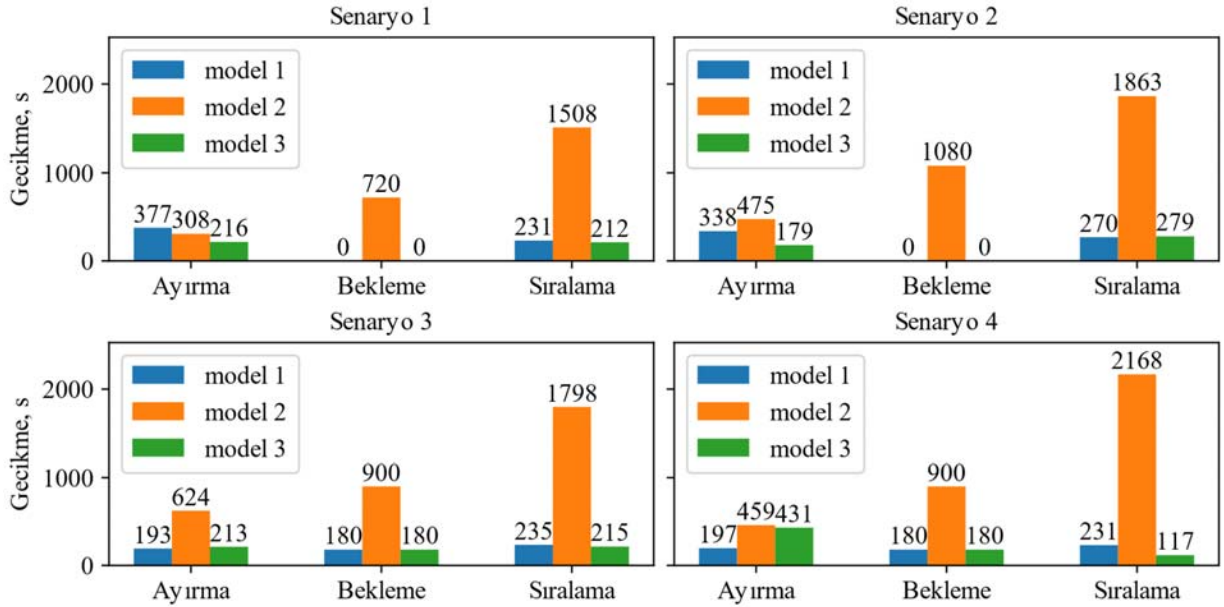
grubu için tüm senaryolarda en kötü sonucu vermektedir. Model 1 ve Model 3 ise “öncelik almayan” grubun yönetimi açısından genel olarak birbirine karşı eşit derecede iyi performans sergilemektedir.

Şekil 7, “öncelik almayan” ve “öncelik alan” gruplar dikkate alınarak tüm uçaklar için oluşan toplam gecikmeleri göstermektedir. En yüksek toplam gecikme, Model 2’de sıralama ayağındaki uçuş süresinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak, Model 3 çoğu senaryoda diğer modellere üstünlük sağlamaktadır. Ancak bazı durumlarda, toplam havadaki gecikmeyi en aza indirmeye doğrudan odaklanan Model 1’e kıyasla Model 2 ve Model 3 de benzer bir performans sergilemektedir. Model 1 ve Model 3, birinci senaryodaki sıralama ayağındaki uçuş süresi açısından benzer sonuçlar ortaya koymaktadır. Ayrıca, Model 1 ve Model 2, aynı senaryoda benzer toplam ayırma gecikmeleri göstermektedir.

Bir modelin gecikmeler temelinde diğerlerinden daha iyi performans gösterdiği her durum için bir puan verilerek bir skorlama yapıldığında,



Şekil 6. Her bir senaryodaki TNS sıralama ayağındaki toplam uçuş süresi (Total flight duration on PMS sequence leg in each scenario)



Şekil 7. Tüm uçaklar için toplam gecikmeler (Total delay in each scenario)

Model 3 %43 başarı oranıyla en iyi model olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, Model 1 ve Model 2'nin başarı oranları sırasıyla %27 ve %29'dur. Bu farkın nedenleri arasında her modelde Eşitlik 30'un uygulanmasına rağmen Model 2'nin amacında uçak gecikmelerinin optimize edilmemesi ve dolayısıyla diğer modellere yeterli üstünlük sağlamaması gösterilebilir. Model 1 için ise bu farkın nedenleri arasında Model 3'teki amaç fonksiyonundaki normalizasyon ve dengeli dağılımın oluşması gösterilebilir. Model 3 iki fonksiyon arasında dengeli bir çözüm bulmaya yönelmektedir. Bu, aktarma noktalarına varış zamanlarının optimize edilmesini ve dolaylı olarak gecikmelerin de iyileştirilmesini sağlayabilmektedir.

Tablo 2, aktarma yolcularının tren istasyonuna ve aktarma uçağı kapısına varış sürelerine göre Model 3 ile diğer modeller arasındaki

karşılaştırmayı sunmaktadır. Model 3'ün burada ortak payda seçilmesinin nedeni ise gecikme sürelerinde diğer modellere sağladığı üstünlükten kaynaklanmaktadır.

Bu oranlar, Model 3 ile Model 2 ve Model 3 ile Model 1 arasındaki karşılaştırmaların sonuçlarını temsil etmektedir. Tablo 2'de gösterildiği üzere, pozitif değerler Model 1 veya Model 2'nin Model 3'e kıyasla daha iyi varış süreleri elde ettiğini, negatif değerler ise tam tersini göstermektedir. İstatistiksel analizler (tek yönlü ANOVA kullanılarak) modeller arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını ($p_value > .05$) ortaya koymuştur. Ancak, bu oranlar 0-7 dakika aralığındaki süre farklarını yansıtmaktadır, bu nedenle bu farklar pratikte birçok yolcu için önemli farklar oluşturabilmekte ve önemli hale gelebilmektedir.

Tablo 2. Modeller arasındaki varış süresi karşılaştırması (Comparison of arrival times among the models)

Aktarma Yapılacak Tren İstasyonuna					
Senaryo	Model	Ortalama %	Ortanca %	En çok %	En az %
Senaryo 1	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	1.05	2.02	0.95	0.84
Senaryo 2	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	1.10	0.85	0.53	5.38
Senaryo 3	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	1.84	1.68	1.00	3.23
Senaryo 4	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	2.11	0.72	0.94	1.68
Aktarma Yapılacak Uçak Kapısına					
Senaryo	Model	Ortalama %	Ortanca %	En çok %	En az %
Senaryo 1	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	0.81	1.13	1.20	0.07
Senaryo 2	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	0.62	0.91	-0.58	-0.08
Senaryo 3	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	2.10	3.25	0.01	1.95
Senaryo 4	Model 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	Model 2	2.58	2.30	5.25	-6.11

Tablo 3. Emisyon katsayıları (Emission coefficients)

HC		CO		NOx		Yakıt Akışı	
Yaklaşma	Rölanti	Yaklaşma	Rölanti	Yaklaşma	Rölanti	Yaklaşma	Rölanti
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	kg/s	kg/s
0,1	2,4	2,2	22	10,1	4,4	0,316	0,109

Senaryolara göre modellerin elde ettiği yolcuların aktarma noktalarına varış süreleri arasındaki en erken ($\min(\text{varış_zamanları})$) ve en geç ($\max(\text{varış_zamanları})$) zamanlar arasındaki fark analiz edildiğinde, en erken varış zamanı olarak Model 2, ikinci senaryoda Model 1'den yaklaşık 5 dakika önce ilk yolcusunu tren istasyonuna getirebilmiştir ve bu fark üçüncü senaryo için ise yaklaşık 3 dakika olarak bulunmuştur. Aktarma uçuşun kapısına varış zamanları incelendiğinde ise dördüncü senaryoda Model 2, Model 1'den yaklaşık 7 dakika daha erken şekilde tüm aktarma yolcularını aktarma kapısına ulaştırmıştır. Ancak, en erken varış sürelerine bakıldığında ise durum yaklaşık 3 dakika fark ile Model 1 lehine gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, bu analize göre, Model 2, Model 1'den tren istasyonuna varış durumu için %5,37 daha iyi sonuç verirken bu oran aktarma uçuş kapısına varış süresi için %5,25 olarak gerçekleşmiştir. Model 1 lehine gerçekleşen durumda ise bu model, Model 2'den %5,76 oranında daha iyi sonuç vermiştir.

Gecikme ve zaman analizine ek olarak, bu çalışmanın doğrudan amacı emisyonları azaltmak olmasa da her modeldeki emisyon değerlerini gözlemlemek faydalı içgörüler sunabileceği için bir emisyon analizi gerçekleştirilmiştir. Emisyon değerlerinin hesaplanmasında ICAO veri tabanı [24] ve Tablo 3'de listelenen katsayılar kullanılarak B738-Orta kategori uçak için değerlendirme yapılmıştır.

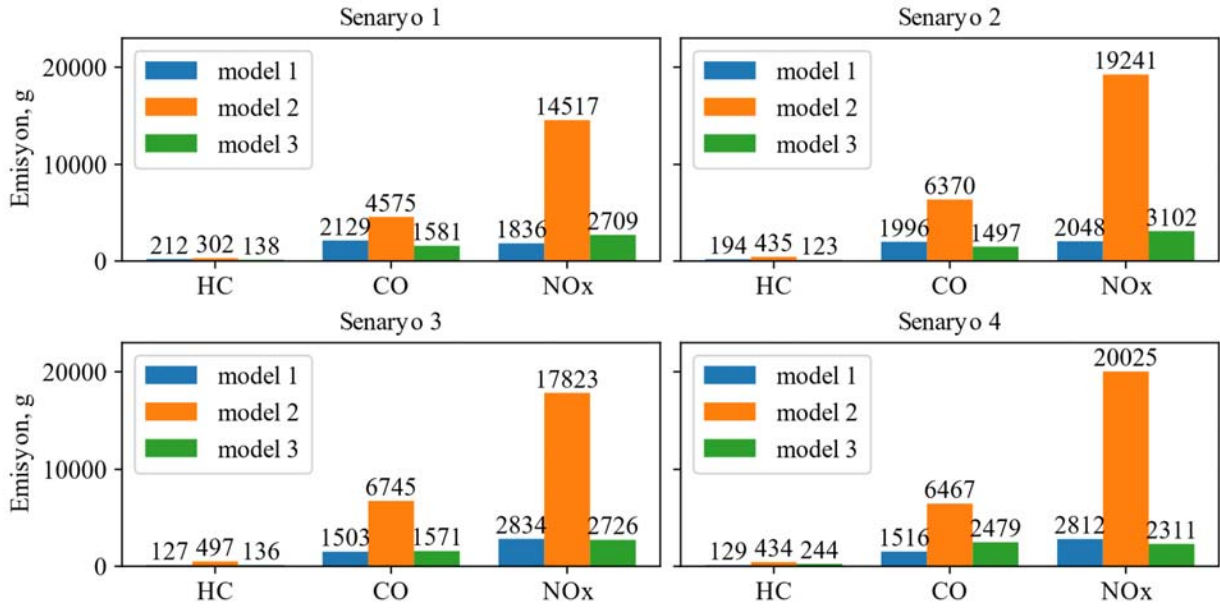
Her bir emisyon için hesaplama denklemi [25], Eş. 37'de gösterilmiştir. Bu denklemde, TIM , FF , EI , Ne ve E sırasıyla modda geçirilen süre (s), yakıt akışı, her bir kirlenici maddeye ait indeks, uçak motorlarının sayısı ve her bir kirlenici madde tarafından üretilen toplam emisyonları temsil etmektedir. Şekil 8, her bir senaryo için toplam emisyon değerlerini göstermektedir.

$$E_{ij} = \sum TIM_{jk} * FF_{jk} * EI_{ijk} * Ne_j \quad (37)$$

Toplam gecikmeler, her bir model için emisyon değerlerinin hesaplanmasında dikkate alınmıştır. Model 2, HC için çoğu senaryoda diğer modellere yakın performanslar sergilese de CO ve NOx emisyonları için diğer modellerin oldukça gerisinde kalmaktadır. Bu farkın temel sebebi de Model 2'nin çözümlerinde özellikle TNS sıralama ayağındaki uçuş sürelerinin fazla olmasıdır. Model 1 ve Model 3, tüm senaryolarda küçük değişimlerle benzer emisyon sonuçlarına sahiptir.

Elde edilen sonuçlar, çalışmada ele alınan havalimanı ile tren istasyonu ve aktarma uçağı arasındaki transfer sürecinin modellenmesi açısından önemli bir adımı temsil etmektedir. Ancak, bu çalışmada elde edilen bulguların literatürdeki benzer çalışmalarla doğrudan karşılaştırılması sınırlıdır, çünkü literatürde hava trafik yönetimi ve raylı sistemler veya transfer yolcularının yer hareket dinamikleri genellikle ayrı ele alınmaktadır. Ülkemiz özelinde ise, Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı ve TCDD Hızlı Tren arasındaki bütünleşik transfer süreçlerini kapsayan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın özgün noktaları da düşünüldüğünde klasik şekilde birebir karşılaştırmalar yapılamamıştır. Bununla birlikte, benzer uygulama havalimanına sahip olan bir çalışma [15] irdelenmiş ve temel farkları önceki bölümlerde detaylı şekilde belirtilmiştir.

Buna karşın, çalışmanın literatüre sağladığı özgün katkı, iki farklı alanı (uçak iniş sıralaması ve transfer yolcularının yer hareket dinamikleri) tek bir modelde birleştirmesidir. Model yolcuya özgü faktörleri (bagaj taşıma, cinsiyet, bagajla/bagajsız yürüme süreleri, otobüs ve metro bekleme süreleri) ve operasyonel kısıtları dikkate alarak, önceki modellerden daha kapsamlı bir analiz gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca uçak operasyonlarını optimize etmek yerine havalimanı içi yolcu akışı ve



Şekil 8. Her bir senaryodaki emisyonları (Emissions in each scenario)

transfer süreçlerinin etkileri de analiz edilebilmiş ve literatürde yeni parametreler modele dahil edilmiştir.

Sonuç olarak, çalışmanın literatürdeki benzer modellerle karşılaştırmalı analizi doğrudan sayısal veya performans karşılaştırmaları yerine yöntemin bütünsel yapısı ve uygulama alanı özelindeki özgün katkılar üzerinden yapılmıştır. Bu bağlamda, modelin literatürdeki yaklaşımlardan temel farkı ve yeniliği, iki ayrı alanı birleştiren yaklaşımı ve yerel havalıman koşullarını dikkate alan uygulama yönüdür.

3.1. Çalışmanın Sınırlılıkları (Limitations of The Study)

Bu çalışma, konusu, yaklaşımı ve uygulama alanıyla literatürde özgün bir yere sahip olsa da tartışılması gelecek çalışmalar için önemli olan bazı sınırlılıklara sahiptir. İlk olarak, otobüs ve metro trenlerinin kapasitesi, her bir aktarma yolcusuna rastgele gecikme değerleri atanarak dolaylı yoldan hesaba katılmaya çalışılmıştır. Bu yaklaşım modele dinamiklik ve rastlantısallık kazandırsa da gelecekteki çalışmalarda her bir taşıma aracının saatlik kapasitesinin gerçek yolcu verileri ve zaman çizelgeleri ile dikkate alınması faydalı olacaktır. Model, uçaktan iniş sürecinde koltuk konumlarını dikkate almaktadır; ancak gerçek yolcu koltuk yerleşim verilerine erişilmesi, çalışmanın gerçekliğini önemli ölçüde artıracaktır.

Bu araştırmanın sonucunda tartışılması ve izleyen çalışmalarda geliştirilmesi gereken bir diğer durum ise aktarma yolcularının bağlantılı uçuşlar için biniş kapılarına ya da trenler için istasyona varış zamanlarına dair bir üst limit belirlenmeden doğrudan varış zamanlarının en aza indirilmeye çalışılmasıdır. Bu yaklaşım, modelin test edilmesinde bir yan etkiye sahip olmasa da aktarma yolcuları özelinde yeni durumların, örneğin tren istasyonuna çok erken ya da çok geç varmak istememek gibi, tanımlanmasından sonra yolcu özelinde üst limitler tanımlanmasının gerekli olacağı öngörülmektedir. Bu ise gerçek yolcu verilerinin sisteme dahil edilmesi ve daha hassas zamanların kullanılmasıyla daha verimli olabilecektir. Ancak bu etki olmadan da modelin mevcut yolcu karakteristikleriyle kabul edilebilir çözüm üretmesi gerçekleştirilmiştir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu makale, aktarma yolcularının bireysel özelliklerini dikkate alarak LTFJ'deki geliş trafiği akışının sıralanmasına odaklanan bir çalışmayı sunmuştur. Modele etki eden temel faktörler arasında cinsiyet, kabin/kargo bagajı, hava/demiryolu bağlantıları ve aktarma yolcuları için yürüme süresi yer almaktadır.

Bu problem, bir uçak sıralama sorunu olarak ele alınmış ve çözüm için karma tam sayılı doğrusal programlama modeli kullanılmıştır. LTFJ havalımanı çevresindeki trafik akışı, Havacılık Bilgi Yayını'nda yayımlanan özelliklere dayananak Toplama Noktası Sistemi (Point Merge System) kullanılarak modellenmiştir. Modelin sadeleştirilmesi, çözüm etkinliğinin artırılması ve daha dengeli operasyonel kararlar alınabilmesi amacıyla, aktarma yolcu sayısı ortalamasının üzerinde olan ilk beş uçak model tarafından önceliklendirilmiştir. Çalışmada, her biri farklı bir amaç fonksiyonuna sahip üç ayrı model kullanılmıştır: Model 1 yalnızca toplam hava gecikmesini en aza indirmeyi; Model 2, yolcuların hem tren istasyonuna hem de aktarma uçağına ulaşma zamanlarını, aciliyet durumları ile değerlendirerek en aza indirmeyi ve Model 3, hem toplam hava gecikmesini hem de Model 2'nin amaçlarını birlikte en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Cinsiyetin ve bagaj durumunun yürüme süreleri üzerindeki etkisinin modele eklenmesi ve farklı amaç fonksiyonları ile oluşturulmuş senaryoların analiz edilmesi, bu çalışmanın temel ve özgün bileşenleridir. Yapılan analizler, gecikmeler açısından Model 3'ün diğer modellere kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir. Model 2, her bir uçak için havadaki toplam gecikmeyi sıkı bir kısıt ile kontrol altına almasına rağmen, gecikmeleri en aza indirme açısından Model 3 kadar etkili değildir. Diğer yandan, Model 1 ve Model 3, yolcuların tren istasyonuna ve aktarma uçak kapısına varış sürelerini azaltma konusunda benzer performanslar sergilerken Model 2'ye göre daha kötü bir performans göstermektedirler.

Uygulama yönünden sonuçlar değerlendirildiğinde ise Model 1, hava gecikmelerinin azaltılmasına odaklandığından özellikle operasyonel sürekliliğinin kritik olduğu durumlara uygundur. Model 2, yolcu aciliyetlerini dikkate alarak bireysel transfer sürelerini optimize

etmektedir ve bu nedenle aktarma yolcu memnuniyetinin ön planda olduğu durumlarda daha elverişlidir. Model 3 ise her iki yaklaşımı dengeli biçimde bütünleştirerek hem operasyonel hem de yolcu deneyimini gözetken senaryolarda uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Çözüm süresi açısından Model 1'in daha hızlı olması birçok senaryoda daha pratik bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Model 3, çözüm süresi daha uzun olmasına rağmen hava gecikmelerinin azaltılması performansında diğer modellere kıyasla üstünlük sağlamaktadır. Model 2 ise çözüm süresi ve yolcu aciliyeti odaklı yaklaşımı sayesinde farklı sonuçlar üretmekte ve daha yolcu merkezli stratejiler için uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Dolayısıyla model seçimi, karar vericilerin önceliklerine bağlıdır. Hız ve operasyonel basitlik öncelikliyse Model 1, yolcu memnuniyeti ve kritik transferlerin optimize edilmesi önemliyse Model 2, hem operasyonel hem de yolcu performansını dengeli şekilde gözetmek istenirse Model 3 tercih edilebilir.

Gelecekteki çalışmalar, her ne kadar bu çalışma farklı cinsiyet gruplarına göre yürüme hızlarını dikkate alan bir yapıya sahip olsa da yaya bölgeleri ve erişilebilirlik temalı farklı çalışmalarda da ön plana çıkarılan [26, 27] fiziksel engelli bireylerin, yaya bölgelerini kullanımları ve bu bölgelerin erişilebilirliğe yönelik durumlarının da göz önünde bulundurularak bütünsel bir yönde araştırmanın genişletilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, yukarıda belirtilen sınırlılıkları aşmak amacıyla eksiksiz veri kullanmayı veya verilerin bazı bölümlerini kestirimsel tekniklerle desteklemeyi hedefleyecektir. Bunun olumlu bir sonucu olarak, her bir aktarma yolcusunun transfer noktalarında bulunmak istediği zamanlara dayalı olarak bu yolcuların aktarma noktalarına zamanında ulaşmalarını garanti etmek amacıyla üst sınır tanımlamaları yapılması planlanmaktadır. Bu yaklaşım, modellerin performanslarını birbirinden daha net şekilde ayırmaya yardımcı olacak ve yolcu taleplerine göre modelin genişletilmesini sağlayarak gerçekçiliğini artıracaktır. Ayrıca, aktarma yolcuları için toplam işlem süresinin en aza indirilmesi ve ortalama gecikmelerin azaltılması gibi yeni amaç fonksiyonları da çalışmanın kapsamını genişletmek üzere ele alınacaktır. Aynı zamanda yine çözüm süresinin etkilerini azaltabilmek amacıyla optimum sonuç ile hızlı çözüm arasında bir denge kurulmaya çalışılarak meta-sezgisel modeller kullanımına yönelik planlamalar yapılacaktır.

Kaynaklar (References)

1. DHMI, Annual traffic and passenger report in 2023, DHMI, 2023.
2. Yu, C., Cheng, M., Airport gate reassignment with transfer connections, *Computers & Industrial Engineering*, 111317, 2025.
3. Jiang, Y., Chen, S., An, W., Hu, L., Li, Y., Liu, J., Demand-driven train timetabling for air and intercity high-speed rail synchronization service, *Transportation Letters*, 15 (4), 321-335, 2023.
4. Buire, C., Delahaye, D., Marzuoli, A., Feron, E., Mongeau, M., Air-rail timetable synchronization for a seamless passenger journey, *Bildiri kitabı: International Workshop on ATM/CNS 2022 International Workshop on ATM/CNS Electronic Navigation Research Institute*, 79-86, 2022.
5. Zhu, Z., Zhang, A., Zhang, Y., Connectivity of intercity passenger transportation in China: A multi-modal and network approach, *Journal of Transport Geography*, 71, 263-276, 2018.
6. Schultz, M., & Fricke, H., Managing passenger handling at airport terminals, 9. Air Traffic Management Research and Development Seminars, 2011.
7. Lou, X., Huang, A., Yuan, Y., Li, M., Resource allocation optimization for airport landside multi-modal transportation: a simulation case study in Beijing Daxing International Airport, *IEEE 7. International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, 46-51, 2022.
8. Scozzaro, G., Mota, M. M., Look-ahead airline seat allocation: enhancing efficiency in passenger transfers at hub airports, *SESAR Innovation Days* 2024.
9. Buire, C., Marzuoli, A., Delahaye, D., Mongeau, M., Air-rail timetable synchronisation: improving passenger connections in Europe within and across transportation modes, *Journal of Air Transport Management*, 115, 102526, 2024.
10. Mykoniatis, G., Puechmorel, S., Mora-Camino, F., Zerrouki, L., Richard, M., Demand capacity balancing in multi-modal transportation through optimization and simulation, *IC-EPSMSO*, 8. International Conference on Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization, 2019.
11. Guo, X., Grushka-Cockayne, Y., De Reyck, B., Forecasting airport transfer passenger flow using realtime data and machine learning, *Manufacturing and Service Operations Management*, 25 (2), 391, 2023.
12. Kim, S. H., Feron, E., Clarke, J. P., Marzuoli, A., & Delahaye, D., Airport gate scheduling for passengers, aircraft, and operations, *Journal of Air Transportation*, 25 (4), 109-114, 2017.
13. Ali, H., Guleria, Y., Alam, S., & Schultz, M., A passenger-centric model for reducing missed connections at low cost airports with gates reassignment, *IEEE Access*, 7, 179429-179444, 2019.
14. Xiao, M., Chien, S., Schonfeld, P., & Hu, D., Optimizing flight equencing and gate assignment considering terminal configuration and walking time, *Journal of Air Transport Management*, 86, 101816, 2020.
15. Demirel, S., Transit passenger-oriented optimisation of arrival aircraft sequencing, *The Aeronautical Journal*, 129, 169-188, 2024.
16. Matthias Schäfer, Martin Strohmeier, Vincent Lenders, Ivan Martinovic, & Matthias Wilhelm., Bringing up OpenSky: A large-scale ADS-B sensor network for research, 13. International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 83-94, 2014.
17. Boursier, L., Favenec, B., Hoffman, E., Trzmiel, A., Vergne, F., Zeghal, K., Merging arrival flows without heading instructions, *Proceedings of the 7th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, 414-421, 2007.
18. Dönmez, K., Çetek, C., Kaya, O., Aircraft sequencing and scheduling in parallel-point merge systems for multiple parallel runways, *Transportation Research Record*, 2676 (3), 108-124, 2022.
19. Aydoğan, E., & Çetek, C., Point merge concept for en route air traffic flow management, *Journal of aircraft*, 55 (6), 2203-2216, 2018.
20. Çeçen, R. K., Çetek, C., Kaya, O., Aircraft sequencing and scheduling in TMAs under wind direction uncertainties, *The Aeronautical Journal*, 124 (1282), 1896-1912, 2020.
21. Liang, M., Delahaye, D., Marechal, P., Integrated sequencing and merging aircraft to parallel runways with automated conflict resolution and advanced avionics capabilities, *Transportation Research Part C*, 85, 268-291, 2017.
22. Liang, M., Delahaye, D., Marechal, P., Conflict-free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point-merge system, *Transportation Research Part C*, 95, 207-227, 2018.
23. Schultz, M., Reitmann, S., Prediction of passenger boarding progress using neural network approach. 8. International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT), 26-29, 2018.
24. ICAO, "ICAO aircraft engine emissions databank", Erişim linki: www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank, Erişim tarihi: 2025.
25. ICAO, "Doc 9889 - Airport air quality manual", 2. Basım, ICAO, Kanada, 2020.
26. Bekci B., Sipahi M., Investigation of spatial accessibility on the scale of pedestrian areas, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 2155-2165, 2023.
27. Şahin, Y. D., Sirel, B., Determining accessibility levels on pedestrian routes the sample of Çukurova University campus example, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (2), 811-824, 2024.

