

## مدل بهینه طراحی محوطه توقفگاه هواپیما (ایپرون) فرودگاه

محمود صفارزاده\*، و غلامرضا معصومی\*\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۷۹/۳/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۶/۱۹)

**چکیده:** در حقیقت در فرایند طراحی بهینه محوطه توقفگاه هواپیماها با ایپرون<sup>۱</sup> در فرودگاه باید پاسخی برای مسائلی یافت که عمده ترین آنها عبارتند از: مساحت، ابعاد و اندازه بهینه محوطه توقفگاه پایانه موجود و یا طراحی شده اعم از مسافری و باری؛ تعداد و ابعاد و همچنین نحوه آرایش گیتها<sup>۲</sup> براساس انواع مختلف عملیات ورود و خروج و نحوه توقف هواپیماها؛ شبیه سازی و آرایش هواپیماها در محوطه توقفگاه موجود یا پیش بینی شده در مقاطع زمانی مختلف از روز در فرودگاه. به طور کلی در این تحقیق، ابتدا مدل ریاضی بهینه ای برای طرح و آرایش محوطه توقفگاه هواپیماها ارائه و سپس براساس مبانی نظری این مدل و به منظور دستیابی به شرایط واقعی طرح و لحاظ کردن مشخصه ها و متغیرهای تصادفی از جمله تقاضای وارده بر مجموعه عناصر سیستم و ارزیابی و آزمایش آن، مدل شبیه سازی طراحی این بخش از فرودگاه مطرح خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه سازی رایانه ای مبتنی بر مدل ریاضی ارائه شده نشان دهنده این است که سیاستها و خط مشیهای مدیران فرودگاه و شرکت های هوایی در قالب برنامه های زمان بندی پروازی، نوع کاربری گیت های توقفگاه، ترکیب ناوگان هواپیمایی فرودگاه در طول دوره های طرح، شرایط عملیاتی و خدمات رسانی و ملاحظات اقتصادی تأثیر تعیین کننده ای در ساختار طراحی توقفگاه های هواپیما دارد.

واژگان کلیدی: فرودگاه، توقفگاه (ایپرون)، بهینه سازی

## An Optimum Model for the Design of Airport Aprons

M. Saffarzadeh and Gh. Masoumi

Department of Civil Engineering, Tarbiat Modarres University

**Abstract:** In the process of the optimum design of aprons, solutions should be found for problems and such issues as the optimum area and dimensions of the apron, including the passenger and the cargo; the number and dimensions of the gates on the basis of different types of aircraft; parking configuration; aircraft simulation and arrangement in different time periods of the given day at the airport. In this research, a mathematical model was developed for the analysis and design of airport aprons based on minimum transportation cost. Some of the parameters of transportation cost include user, capital, and operational costs. Moreover, based on the fundamentals of the mathematical model, a computerized simulation model was developed taking into consideration the actual parameters of design of airport aprons such as stochastic demand, passenger behaviour, and evaluation of analytical model. The results obtained from the computerized simulation model indicate that policies of the airport authorities and air carriers such as flight schedules, gate use strategy, the mix of aircraft fleet during the planning horizon, operational conditions, and economic considerations have significant impacts on the design of the aprons.

**Keywords:** Airport, Apron, Optimization, Design.

\*\* - کارشناس ارشد

\* - استادیار

جامعیت روشهای ریاضی در تشریح عملکرد اجزای مختلف فرودگاه در شرایط عملی و عینی و همچنین متغیر بودن تقاضای وارده بر مجموعه عناصر سیستم، مدل شبیه‌سازی دارای مزایای بیشتری در مقایسه با مدل‌های ریاضی برای تحلیل و طراحی محوطه توقفگاه هواپیماهاست [۲]. از شبیه‌سازی می‌توان به عنوان اولین مرحله برای تحلیل، طراحی و ارزیابی سیستم‌های واقعی استفاده کرد و با کمک آن می‌توان بدون طراحی، ساخت و یا تخریب سیستم واقعی به نتایج سودمندی دست یافت.

## ۲- پیشینه تحقیق

مطالعات نظری خاصی در طراحی مدل‌های ریاضی به منظور بهینه‌سازی عملکرد بخش‌های زمینی، هوایی و پایانه فرودگاه‌ها انجام شده است. از جمله این کارها شامل بهینه‌سازی عملیات پردازش مسافران پایانه [۲]، مدل تحلیل تقاضا برای تعیین تعداد گیتها یا جایگاه‌های توقف هواپیما [۵]، مدل حداقل مسافت پیاده‌روی مسافران در ساختمان پایانه [۸] و طرح جانمایی بهینه پایانه در فرودگاه [۹] هستند.

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی مدل‌های شبیه‌سازی طرح و تحلیل اجزای مختلف سیستم فرودگاه مانند توقفگاه هواپیما می‌توان به مدل SIMMOD برای تحلیل وضعیت موجود بخش هوایی فرودگاه، مدل ALSIM برای تحلیل مجموعه بخش زمینی فرودگاه، مدل ATFM سازمان حمل و نقل کانادا و مدل نرم‌افزاری طراحی فرودگاه ۳/۲ اشاره کرد [۳ و ۱]. مدل SIMMOD همان طور که اشاره شد، محدود به تحلیل فرودگاه‌های موجود با اجزا و بخش‌های مشخص است؛ به گونه‌ای که فرودگاهی با مشخصات ثابتی برای مدل تعریف می‌شود و سپس مدل مورد نظر براساس برنامه زمان‌بندی پروازی و حجم تقاضای پیش‌بینی شده در بخش‌های مختلف محوطه پروازی، وضعیت ظرفیت و تأخیر عملیاتی در آن فرودگاه را تحلیل و بررسی می‌کند. علاوه بر آن همان طور که اشاره شد، سازمان هوانوردی فدرال برنامه رایانه‌ای طراحی فرودگاه ۳/۲ را تهیه کرده است که با استفاده از آن می‌توان ابعاد

فرودگاه مجموعه‌ای از تأسیسات و تجهیزات و بخش‌های مختلف است که به منظور فراهم آوردن امکانات برای انجام حمل و نقل هوایی در کنار یکدیگر تلفیق شده‌اند. به طور کلی ارکان و بخش‌های اصلی یک فرودگاه عبارت‌اند از: سیستم کنترل ترافیک هوایی، مجموعه بخش هوایی فرودگاه شامل باند پرواز، باند خزش و محوطه توقفگاه هواپیماها یا ایپرون، مجموعه بخش زمینی اعم از محدوده پایانه مسافری و باری و سیستم گردشی وسایل نقلیه و حمل و نقل زمینی در فرودگاه و همچنین پارکینگ، شبکه‌های دسترسی به فرودگاه و تسهیلات و تجهیزات پشتیبانی و تدارکاتی. محوطه توقفگاه هواپیماها، به ویژه توقفگاه پایانه مسافری و باری در واقع قسمتی از محدوده بخش هوایی فرودگاه است که محوطه‌ای برای خدمات‌رسانی به هواپیما به منظور پیاده و سوار کردن مسافران، بار و محموله‌های پستی، سوختگیری، عملیات‌های تعمیر و سایر خدمات است. انواع طرح‌های محوطه توقفگاه هواپیماها مشتمل بر طرح‌های خطی، انگشتی، اقماری، ترانسپورتر و یا ترکیبی از دو یا چند طرح مذکورند [۱].

از جمله مسائل و مشکلاتی که در محاسبه، طراحی و تحلیل محوطه توقفگاه هواپیما در فرودگاه‌های موجود یا در حال ساخت و توسعه، به ویژه در کشور ما وجود دارد، عدم استفاده و بهره‌وری بهینه از محوطه، عدم آرایش و قرارگیری مناسب گیت‌های هواپیما، عدم کارایی عملیاتی در مرحله ورود و خروج و مانور هواپیما در محوطه توقفگاه است. وجود شرایط مذکور موجب استفاده ناکارا از محدوده زمین موجود، افزایش اجتناب ناپذیر مسافت پیاده‌روی مسافران، افزایش تأخیر وارد به هواپیما در طی مراحل دریافت خدمات و همچنین افزایش هزینه‌های عملیات خدمات‌رسانی و عدم کارایی آنها می‌شود. به منظور جلوگیری از پیامدهای مذکور در فرایند تحلیل و طراحی ایپرون باید از مدل‌های عددی و ریاضی یا مدل‌های شبیه‌سازی استفاده کرد. در واقع از مدل‌های ریاضی می‌توان به عنوان مبنای نظری مدل‌های شبیه‌سازی استفاده کرد. به دلیل عدم کفایت و

۳- شبیه سازی و چگونگی آرایش و استقرار هواپیماها در محل جایگاههای موجود یا پیش بینی شده توقفگاه در مقاطع زمانی مختلف روز طرح از جمله ساعت و مقطع زمانی اوج براساس برنامه زمان بندی پروازی هواپیماهای ورودی و خروجی

۴- استقرار جایگاههای محل توقف هواپیما در محدوده توقفگاه براساس تابع هزینه سفر و با استفاده از مدل سازی ریاضی بر مبنای پارامترهای مؤثر حمل و نقلی همچون مؤلفه های مسافری و رفتار آنها، مؤلفه های مربوط به پایانه مسافری و مؤلفه های هزینه ای به منظور دستیابی به آرایش بهینه جایگاههای هواپیما

۵- ارائه مناسبترین طرح از نظر فنی، اجرایی، عملیاتی و اقتصادی براساس ویژگیها و مشخصات خاص هر فرودگاه

۶- تحلیل و سنجش دقیق قابلیت و کارایی وضعیت موجود توقفگاهها از نظر محدودیتهای مختلف

۷- طراحی انواع مختلف توقفگاههای متداول در فرودگاهها و تأمین امکان مقایسه و ارزیابی آنها و نهایتاً انتخاب گزینه بهینه

۸- طراحی و تدوین مدل رایانه ای شبیه سازی محوطه توقفگاه به منظور آزمایش و ارزیابی مدل پیشنهادی با مشخصات بالا.

چگونگی و روند انجام فرایند بالا به نوع و طرح ساختمان و مجموعه پایانه و نحوه توقف هواپیماها و همچنین نوع عملیات ورود و خروج آنها بستگی دارد. در بخش تحلیل محوطه توقفگاه هواپیما یا به عبارت دیگر تحت شرایط محدودیت زمین نیز، میزان و حجم تقاضای استفاده از جایگاههای توقف هواپیما براساس برنامه زمان بندی ورود و خروج آنها با تسهیلات و امکانات موجود آن فرودگاه که دارای محدوده زمین قابل استفاده و تسهیلات مشخصی است، مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. از این طریق می توان قابلیت محوطه توقفگاه موجود برای جوابگویی به تعداد جایگاههای مورد نیاز در مقطع زمانی اوج روز طرح را سنجید.

لازم نواحی و سطوح بحرانی باند پرواز از جمله طول سطح روسازی، شانه باند پرواز، سطح مانع از فرسایش<sup>۳</sup>، محدوده ایمنی و بدون مانع و سطوح تقرب باند پرواز را محاسبه کرد.

هر یک از مدل های طراحی شده بالا علی رغم داشتن قابلیتها و مزایای کم نظیر و قابل توجه دارای کمبودهایی نیز هستند که می توان به مواردی از آنها اشاره کرد. مدل های ریاضی معرفی شده غالباً به فرایند پردازش مسافران، تحلیل تقاضا، جابه جایی و سرویس دهی آنها در ساختمان پایانه و جانمایی بهینه آن در محوطه فرودگاه می پردازند. مدل های شبیه سازی نیز عمدتاً محدود به تحلیل فرودگاههای موجود با اجزا و بخشهای مشخص است؛ بنابراین نمی توان از آنها برای طراحی اجزای بخش هوایی از جمله محوطه توقفگاه هواپیما در یک فرودگاه جدید استفاده کرد. در مدل طراحی فرودگاه ۳/۲ نیز، فرایند طراحی منحصر به باند پرواز فرودگاه است. مقاله مورد نظر در واقع به بررسی و تشریح اجمالی مدل شبیه سازی تحلیل و طراحی توقفگاه هواپیماها می پردازد که علاوه بر فرایند تحلیل، در برگیرنده طراحی انواع مختلف توقفگاهها و ملزومات طرح هندسی جایگاههای هواپیما در حالت های مختلف توقف و شرایط عملیاتی ورود و خروج هواپیماها و همچنین آرایش و استقرار بهینه آنها در محدوده توقفگاه است. مدل شبیه سازی مورد نظر تحت محیط سیستم عامل ویندوز ۹۵ و بالاتر قابل اجراست و زبان برنامه نویسی آن نیز، ویژوال بیسیک ۴/۰۰<sup>۴</sup> است.

### ۳- روند ساختاری مدل

در حقیقت در فرایند تحلیل و طراحی بهینه محوطه توقفگاه هواپیماها در فرودگاه باید پاسخی برای مسائلی یافت که عمده ترین آنها عبارت اند از

۱- مساحت، ابعاد و اندازه بهینه محوطه توقفگاه پایانه موجود و یا طراحی شده اعم از مسافری و باری.

۲- تعداد، ابعاد و اندازه و همچنین نحوه آرایش جایگاههای توقف براساس انواع مختلف عملیات ورود و خروج و شکل توقف هواپیماها

با انجام این فرایند، اداره کنندگان فرودگاه و شرکتهای هوایی قادر خواهند بود که کلیه طرحها و برنامه‌ریزیهای ساخت و توسعه خود طی سالهای آینده را براساس ویژگی و شرایط موجود توقفگاه تدوین و تنظیم کنند.

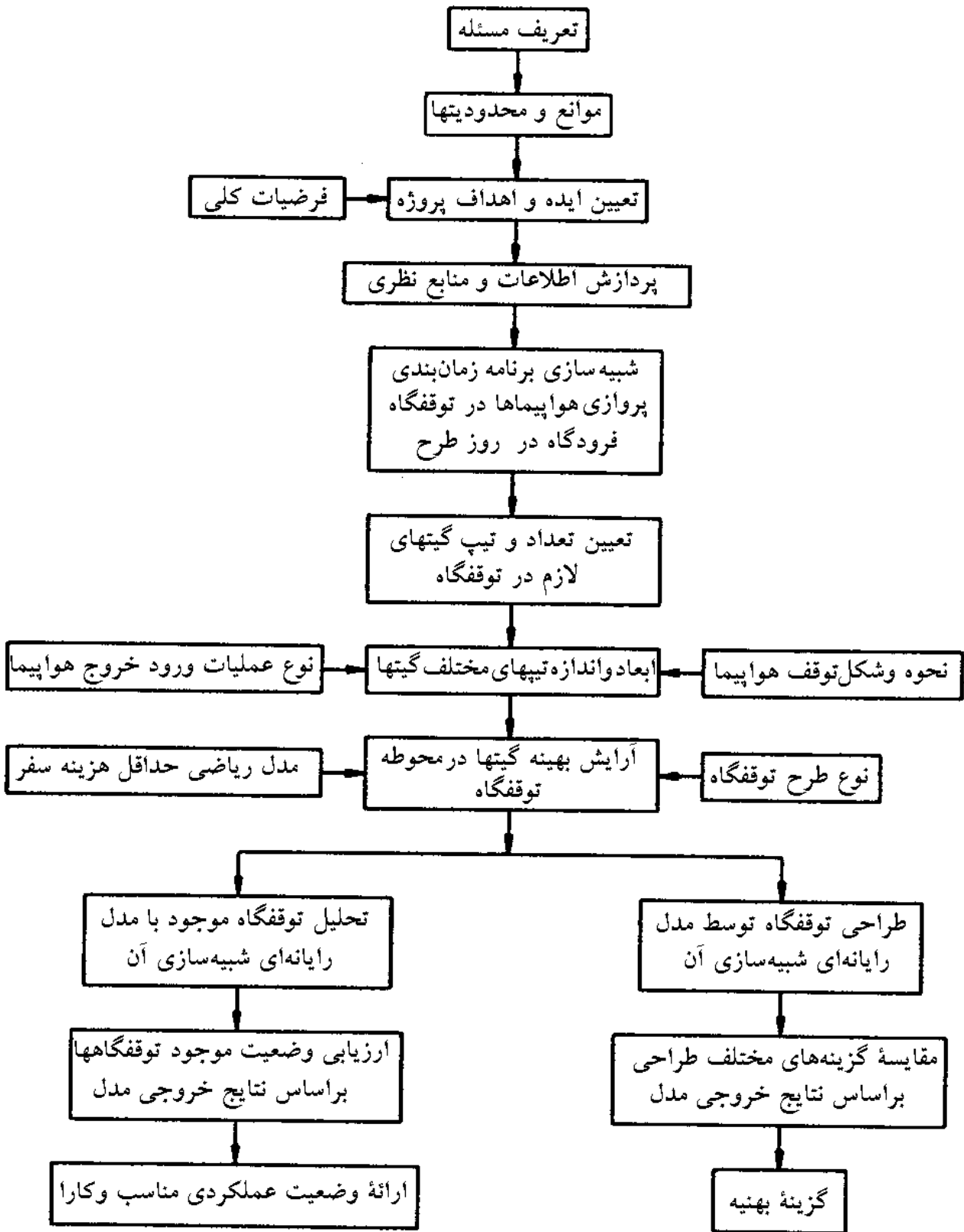
به طور کلی مدل مورد نظر علاوه بر تأمین اهداف بالا، دارای مرحله‌بندی منظم و سازمان یافته‌ای است، به طوری که در مرحله نخست با استفاده از برنامه زمان‌بندی شبیه‌سازی شده ورود و خروج هواپیماها به محوطه توقفگاه در روز طرح، وارد فرایند محاسبه تعداد و انواع جایگاههای مورد نیاز شده و جدول تخصیص هواپیماها به هر یک از انواع جایگاهها، نمودار رمپ یا رمپ چارت توقفگاه و همچنین نمودار میزان بهره‌وری هر یک از جایگاههای توقف در طی روز طرح محاسبه می‌شود [۱۰]. علاوه بر برنامه زمان‌بندی پروازی، حداقل زمان مجاز بین خروج هواپیما از یک جایگاه و ورود هواپیما بعدی به آن و همچنین تعداد و تیپ ابعادی (A,B,C,D) جایگاههای دارای استفاده اختصاصی و شرکت هوایی مالک آن نیز باید در این مرحله مشخص شود. پس از این مرحله وارد فرایند طراحی یا تحلیل می‌شویم. در این فاز می‌توان یکی از انواع طرحهای پایانه‌ای متداول در فرودگاههای دنیا از جمله پایانه‌های با طرح خطی اعم از ساده، نیم‌دایره‌ای و سه‌وجهی، طرح انگشتی ساده و دوگانه، طرح اقماری، ترانسپورتر و یا ترکیبی از دو یا چند طرح بالا را انتخاب کرد. پس از آن، با آرایش و استقرار جایگاههای هواپیما در محوطه توقفگاه بر مبنای مدل ریاضی پیشنهادی می‌توان انواع توقفگاههای طراحی یا تحلیل شده بر اساس میزان تقاضای اوج را از نظر نوع طرح پایانه، چگونگی عملیات ورود و خروج هواپیما و نحوه توقف آن در محل جایگاه اعم از توقف با دماغه رو به جلو، توقف زاویه‌ای (۳۰ تا ۶۰ درجه) و توقف موازی، با یکدیگر مقایسه کرد. نهایتاً مدل بهینه و مطلوب برای اداره کنندگان فرودگاه، شرکتهای هوایی و سایر کاربران با توجه به گستره زمین، هزینه‌های اقتصادی، امکان تأمین تجهیزات و ماشین آلات یدک‌کش و سایر عوامل مؤثر تعیین خواهد شد. مراحل فرایند تحقیقی مورد نظر برای

دستیابی به مدل پیشنهادی مذکور در شکل (۱) نشان داده شده است.

#### ۴- فرایند طراحی و تحلیل بهینه محوطه توقفگاه هواپیما توسط مدل پیشنهادی

با توجه به شرح ساختار مدل مورد نظر، ابتدا می‌بایست ابعاد و اندازه دقیق جایگاههای استقرار هواپیماها در شرایط عملیاتی ورود و خروج و اشکال مختلف توقف هواپیما یعنی توقف رو به جلو، توقف زاویه‌ای با زوایای مختلف (۳۰ تا ۶۰ درجه با اختلاف ۵ درجه) و توقف موازی محاسبه شود. طبق تقسیم‌بندی بالا، جایگاههای هواپیما شامل ۶۸ تیپ هستند که هر تیپ از آنها دارای ابعاد طولی و عرضی مختلف‌اند که این ابعاد با محاسبات هندسی دقیقی در مدل ارائه شده تعیین می‌شوند. پس از محاسبه ابعاد و اندازه جایگاهها، باید تعداد مورد نیاز آنها در محوطه توقفگاه و در مقطع زمانی اوج از روز طرح فرودگاه مشخص شود. با بررسی دقیق کلیه روشهای تجربی و ریاضی موجود برای تعیین تعداد جایگاههای مورد نیاز توقفگاه، مشخص شد که روش شبیه‌سازی برنامه زمان‌بندی پروازی و طراحی نمودار رمپ به دلیل صحت و دقت قابل توجه و اعمال کلیه پارامترهای مؤثر، مناسبترین و کاراترین روش است [۶].

پس از مرحله مذکور می‌بایست نوع طرح مجموعه پایانه و توقفگاه هواپیماها مشخص شود تا جایگاههای محاسبه شده بر اساس مشخصات هندسی ویژه هر نوع توقفگاه، در محدوده آن مستقر شوند. چگونگی قرارگیری جایگاههای هواپیما در محوطه توقفگاه باید به گونه‌ای باشد که بتوان علاوه بر تأمین حداکثر کارایی و بهره‌وری از محدوده موجود، به مناسبترین و سازگارترین آرایش نیز دست یافت. از جمله مهمترین معیارها در بهره‌وری عملیاتی بهینه در محوطه توقفگاه، مسافت انتقال یا پیاده‌روی مسافران از هواپیما به داخل ساختمان پایانه و یا برعکس است [۷و۴]. در واقع شاخص سنجش کمی این معیار



شکل ۱- روند ساختاری و مراحل فرایند تحقیقی مدل

$P =$  درصد مسافران انتقالی به کل مسافران و

$Q =$  درصد مسافران انتقالی مستقیم به کل مسافران انتقالی

به طور کلی در مدل طراحی و تحلیل بهینه توقفگاه هواپیما، ترتیب و نحوه قرارگیری جایگاههای توقف به گونه‌ای است که مقدار تابع  $TC$  حاصله برحسب معیار کمی مسافر-متر یا مسافر-فوت، حداقل شود.

علاوه بر آن، در این تحقیق از دیدگاه جامعتری به تجزیه و تحلیل تابع هزینه سفر پرداخته شد، به گونه‌ای که در برگزیده مهمترین شاخصهای تأثیرگذار حمل و نقلی اعم از مؤلفه‌های مربوط به پایانه مسافری و مؤلفه‌های مربوط به مسافران و رفتار آنها باشد. با مطالعاتی که در این تحقیق و در مورد پایانه‌های با طرح شاخه‌ای یا انگشتی<sup>۷</sup> به عنوان نمونه انجام شد، تابع هزینه مدل تحت شرایط بدون محدودیت زمین و فضای لازم و با محدودیت زمین محاسبه شد.

*الف) بدون محدودیت زمین*

در این شرایط، قابلیت دسترسی و گستره زمین در فرایند طرح و آرایش بهینه جایگاههای هواپیما از نظر حداقل مسافت انتقال و هزینه سفر، به عنوان پارامتری تأثیرگذار و محدود کننده محسوب نمی‌شود.

$$TC_k = \sum_{k=1}^v TC = TC_1 + TC_2 + \dots + TC_n \quad (4)$$

$$TC_1 = \frac{\gamma_w}{L} (1 + P - 2PQ) \left[ \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4} + y^2 + by + \frac{b^2}{8} \right] \quad (5)$$

که در آن

$TC_1 =$  میانگین هزینه سرانه جا به جایی پیاده مسافران ورودی، خروجی و انتقالی غیرمستقیم در محدوده محوطه پایانه و شاخه‌های آن

$\gamma_w =$  هزینه انتقال هر مسافر به صورت پیاده‌روی به ازای هر کیلومتر

$$\frac{GS_g}{2} = L$$

$n =$  تعداد شاخه‌های ساختمان پایانه

در برنامه‌ریزیهای حمل و نقل، تابع هزینه سفر یا  $TC^6$  است. شکل کلی این تابع به صورت زیر است

$$TC = \sum_{n=1}^N P_n \cdot \bar{W} \quad (1)$$

$P_n =$  میانگین ظرفیت مسافری هواپیمای تپ هر جایگاه توقف

$\bar{W} =$  میانگین مسافت پیاده‌روی انواع مسافران

در معادله بالا، مسافرانی که باید مورد پردازش قرار گیرند و به تبع آن ملزم به جابه جایی یا پیاده‌روی هستند، به سه دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از مسافران خروجی، ورودی و انتقالی. مسافران انتقالی نیز شامل انتقالی مستقیم و انتقالی غیرمستقیم است. مسافران انتقالی مستقیم، مسافرانی هستند که پس از خروج از هواپیما مستقیماً به دروازه مربوط به جایگاه هواپیمای خروجی می‌روند. این نوع مسافران یا بلیط خود را از قبل تهیه کرده‌اند و یا در محل دروازه خروجی این کار را انجام می‌دهند [۷]. مسافران انتقالی غیرمستقیم نیز باید پس از پیاده شدن از هواپیما به محلهای پردازش داخل پایانه رفته و مبادرت به مطالبه توشه و یا خرید بلیط کنند. بنابراین میانگین مسافت جابه‌جایی کل مسافران انتقالی برابر است با

$$\bar{W}_H = r\bar{W}_{H_1} + (1-r)\bar{W}_{H_2} \quad (2)$$

که در آن

$\bar{W}_{H_1} =$  میانگین مسافت جابه‌جایی مسافران انتقالی مستقیمی که دروازه خروجی آنها از قبل تعیین شده باشد.

$\bar{W}_{H_2} =$  میانگین مسافت جابه‌جایی مسافران انتقالی مستقیمی که احتمال پرواز آنها از هر یک از دروازه‌های پایانه یکسان است.

$r =$  درصد مسافران انتقال مستقیمی که دروازه خروجی آنها از قبل تعیین شده باشد، نسبت به کل مسافران انتقالی مستقیم.

پس میانگین مسافت پیاده‌روی یا جابه‌جایی کل مسافران عبارت خواهد بود از

$$\bar{W} = (1-P)\bar{W}_A + P(1-Q)\bar{W}_N + PQ\bar{W}_H \quad (3)$$

که در آن

$\bar{W}_A =$  میانگین مسافت جابه‌جایی مسافران ورودی و خروجی

$\bar{W}_N =$  میانگین مسافت جا به جایی مسافران انتقال غیرمستقیم

$S =$  میانگین فاصله بین شاخه‌های ساختمان پایانه

$$TC_5 = \frac{\gamma_R}{L} PQ(1-r)S \left[ \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L} \left[ \sum_{k=1}^i (i-k)x_k + \sum_{k=i+1}^n (k-i)x_k \right] + \frac{2}{L} \left[ L - \sum_{i=1}^n x_i \right] \sum_{i=1}^n ix_i \right] \quad (9)$$

که در آن

$TC_5 =$  میانگین هزینه سرانه انتقال سواره مسافران انتقالی مستقیم

$$TC_6 = (1+P - PQ(1+r))\gamma_A \quad (10)$$

که در آن

$TC_6 =$  میانگین هزینه سرانه انتظار و دسترسی مسافران

$\gamma_A =$  هزینه انتظار و دسترسی هر مسافر

$$TC_7 = n\gamma_o \quad (11)$$

که در آن

$TC_7 =$  میانگین هزینه سرانه عملیاتی مسافران

$$\gamma_c + \gamma_m S = \gamma_o$$

$\gamma_c =$  هزینه سرمایه‌گذاری برای هر مسافر به ازای هر شاخه ساختمان پایانه

$\gamma_m =$  هزینه عملیاتی و تعمیر و نگهداری به ازای هر مسافر در هر کیلومتر

متغیرهای معادلات بالا را می‌توان به بخش مؤلفه‌های مربوط به پایانه مسافری و مؤلفه‌های مربوط به مسافران و رفتار آنها و مؤلفه‌های هزینه‌ای تقسیم بندی کرد. مؤلفه‌ها و شاخصهای پایانه مسافری شامل تعداد جایگاههای توقف ( $G$ )، میانگین فاصله بین شاخه‌های ساختمان پایانه ( $S$ )، تعداد شاخه‌های ساختمان پایانه ( $n$ )،  $I$ ، فاصله بین جایگاههای توقف ( $S_g$ )، طول هر یک از شاخه‌های ساختمان پایانه ( $x_i$ )، و بعد طولی ساختمان پایانه ( $b$ ) است. مؤلفه‌های مسافری مشتمل بر درصد مسافران انتقالی به کل مسافران ( $P$ )، درصد مسافران انتقالی مستقیم به کل مسافران انتقالی ( $Q$ )، و درصد مسافران انتقالی مستقیم که دروازه خروجی آنها از قبل تعیین شده باشد، نسبت به کل مسافران انتقالی است. متغیرهای هزینه‌ای نیز متشکل از هزینه

$x_i =$  طول هر یک از شاخه‌های ساختمان پایانه

$g_b S_g = b =$  بعد طولی ساختمان پایانه در جلوی توقفگاه که قابلیت استقرار جایگاههای هواپیما را دارد.

$g_b =$  تعداد جایگاههای توقف مستقر در جلوی ساختمان اصلی پایانه (در صورت وجود)

$$\frac{g_t S_g}{4} = y$$

$g_t =$  مجموع تعداد جایگاههای مستقر در جلوی شاخه متصل به ساختمان پایانه

$$TC_2 = \frac{\gamma_w}{L} PQr \left[ \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{3} + F(y) \right] \quad (6)$$

که در آن

$TC_2 =$  میانگین هزینه سرانه جا به جایی پیاده مسافران انتقالی مستقیمی که دروازه خروجی آنها از قبل تعیین شده باشد (یعنی از همان دروازه ورودی خارج خواهند شد).

$r =$  درصد مسافران انتقالی مستقیمی که دروازه خروجی آنها از قبل تعیین شده باشد (یعنی از همان دروازه خروجی خارج خواهند شد)، نسبت به کل مسافران انتقالی مستقیم

$$F(y) = \frac{\left( \frac{8y^3}{3} + 3by^2 + b^2y + \frac{b^3}{12} \right)}{\left( 2y + \frac{b}{2} \right)}$$

$$TC_3 = \frac{\gamma_w}{L} PQ(1-r) \left[ \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{2} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i^3}{6L} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L} \left( 2y(b+y) + \frac{b^2}{4} \right) - \frac{F(y)}{L} \left( 2y + \frac{b}{2} \right) \right] \quad (7)$$

$TC_3 =$  میانگین هزینه سرانه جا به جایی پیاده مسافران انتقالی مستقیمی که از همان دروازه ورودی خارج نخواهند شد.

$$TC_4 = \frac{\gamma_R}{L} (1+P - 2PQ) \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 (iS) \right] \quad (8)$$

که در آن

$TC_4 =$  میانگین هزینه سرانه انتقال سواره مسافران ورودی، خروجی و انتقالی غیرمستقیم

$\gamma_R =$  هزینه انتقال هر مسافر به صورت سواره به ازای هر کیلومتر

$x_i$  = تعداد جایگاههای مستقر در جلوی هر طرف از شاخه‌های پایانه با طول مشخص

$$TC_2 = \frac{\gamma_w}{L} PQr \left[ \sum_{i=1}^j \frac{x_i^2}{3} + \sum_{i=j+1}^n \frac{x_i^2}{3} + F_m(y) \right]$$

$$2y + \frac{b}{2} + \left[ \sum_{i=1}^j x_i + \sum_{i=j+1}^n x_i \right] = L \quad (14)$$

که در آن

$$\left[ \frac{8y^3}{3} + 2b_1y^2 + by^2 + b^2y + \frac{b^3}{12} \right] / \left[ 2y + \frac{b}{2} \right] = F_m(y)$$

$b_1$  = بعد عرضی ساختمان پایانه

$$TC_3 = \frac{\gamma_w}{L} PQ(1-r) \left[ \sum_{i=1}^j \frac{x_i^2}{2} + \sum_{i=j+1}^n \frac{x_i^2}{2} - \sum_{i=1}^j \frac{x_i^3}{6L} - \sum_{i=j+1}^n \frac{x_i^3}{6L} + \left( \sum_{i=1}^j \frac{x_i}{L} + \sum_{i=j+1}^n \frac{x_i}{L} \right) \left( 2y(b_1 + y) + \frac{b^2}{4} \right) + \frac{F_m(y)}{L} \left( 2y + \frac{b}{2} \right) \right] \quad (15)$$

$$TC_4 = \frac{\gamma_R}{L} (1+P-2PQ) \left[ \left( \sum_{i=1}^j x_i^2 + \sum_{i=j+1}^n x_i^2 \right) (S_1 - S_0) \right] \quad (16)$$

که در آن

$S$  = میانگین فاصله بین شاخه‌های ساختمان پایانه

$S - S_1 = S_0$

$S_1$  = فاصله بین ساختمان پایانه تا اولین شاخه آن

$$TC_5 = \frac{\gamma_R}{L^2} PQ(1-r) \left[ S \left( \sum_{i=1}^j x_i \left( \sum_{k=1}^j (i-k)x_k + \sum_{k=j+1}^i (k-i)x_k + \sum_{k=i+1}^n (k-i)x_k \right) + \sum_{i=j+1}^n x_i \left( \sum_{k=1}^j (i-k)x_k + \sum_{k=j+1}^i (i-k)x_k + \sum_{k=i+1}^n (k-i)x_k \right) + \left( L - \sum_{i=1}^j x_i + \sum_{i=j+1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^j ix_i + \sum_{i=j+1}^n ix_i \right) \right] + \left( 2S_0 \left( L - \sum_{i=1}^j x_i + \sum_{i=j+1}^n x_i \right) \right)$$

سرانه انتقال مسافر به صورت پیاده‌روی به ازای هر کیلومتر ( $\gamma_w$ )، هزینه انتقال هر مسافر به صورت سواره به ازای هر کیلومتر ( $\gamma_R$ ) و هزینه انتظار و دسترسی هر مسافر ( $\gamma_A$ ) است.

(ب) با محدودیت زمین

در حالت وجود محدودیت زمین برای ساخت محوطه توقفگاه هواپیماها باید در واقع تجزیه و تحلیلی از حجم تقاضای استفاده از جایگاههای توقف در مقایسه با سطح زمین قابل تأمین در محوطه توقفگاه فرودگاه انجام شود. این کار منجر به سنجش قابلیت و کفایت سطح محوطه موجود برای استقرار جایگاههای مورد نیاز در مقطع زمانی اوج تقاضا خواهد شد. راهکارهایی که می‌توان برای دستیابی به شرایط مناسب از آنها استفاده کرد، عمدتاً عبارت‌اند از: تعدیل مشخصات ابعادی اجزای مختلف محوطه توقفگاه از جمله طول و تعداد شاخه‌های ساختمان پایانه نوع انگشتی یا شاخه‌ای که در مدل ارائه شده در این تحقیق و برای این نوع پایانه در نظر گرفته شده است. از جمله روشهای دیگر می‌توان به تعدیل برنامه زمان‌بندی پروازی در روز طرح و یا تغییر دادن و بهینه کردن مشخصات عملیاتی جایگاه توقف هواپیما و نحوه استفاده از آنها اشاره کرد.

$$TC_k = \sum_{k=1}^7 TC = TC_1 + TC_2 + \dots + TC_7 \quad (12)$$

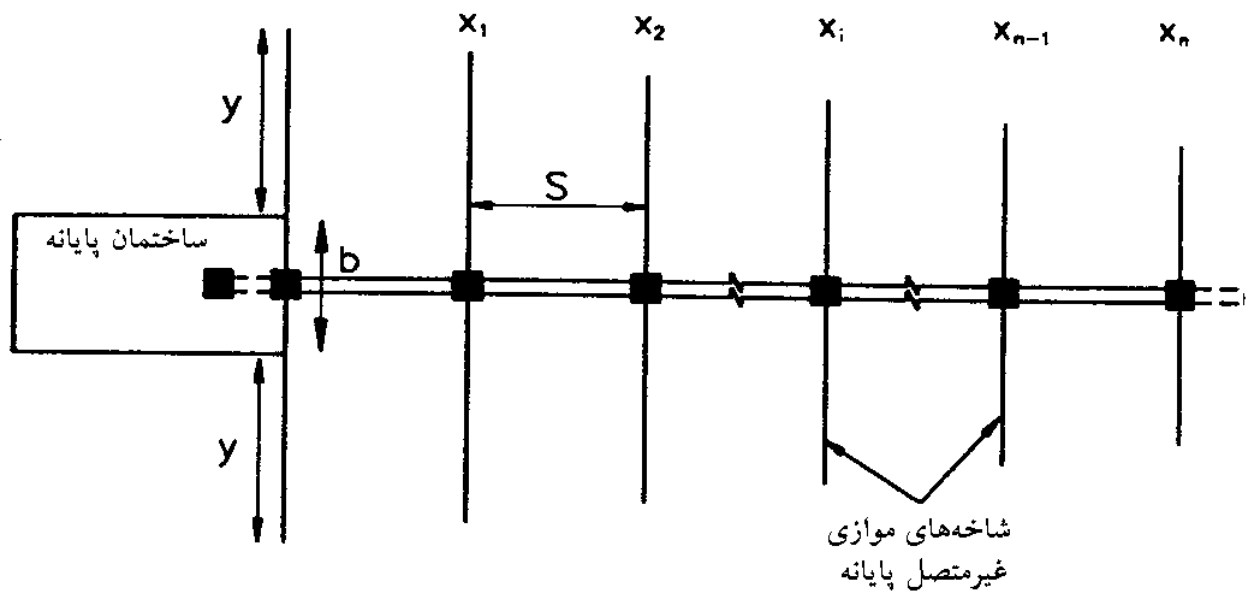
در مورد معادله بالا لازم به توضیح است که پارامترهای  $TC_1$  تا  $TC_7$  همان پارامترهای معرفی شده در معادلات (۱) تا (۵) هستند. با این تفاوت که در این معادلات مقادیر میانگین مسافت پیاده‌روی و مسافت انتقال سواره انواع مسافران و همچنین هزینه‌های سرانه مختلف انتقال آنان تحت شرایط وجود محدودیت زمین محاسبه شده‌اند.

$$TC_1 = \frac{\gamma_w}{L} (1+P-2PQ) \left[ \sum_{i=1}^j \frac{x_i^2}{4} + \sum_{i=j+1}^n \frac{x_i^2}{4} + y^2 + by + \frac{b^2}{8} \right] \quad (13)$$

که در آن

$z$  = تعداد شاخه‌های ساختمانی پایانه با طول مشخص





شکل ۲- مشخصات طرح هندسی محوطه پایانه و توقفگاه نوع انگشتی یا شاخه ای

ادامه این تحقیق ارائه می‌شود. در واقع مدل شبیه‌سازی مذکور به عنوان نمونه آزمایشگاهی سیستم واقعی در نظر گرفته می‌شود که می‌توان از آن به عنوان مناسبترین روش برای تحلیل، طراحی و ارزیابی سیستمهای واقعی استفاده کرد. استفاده از مدل شبیه‌سازی مورد نظر موجب تحقق همزمان و همه جانبه شرایط و ویژگیهای مدل ریاضی اقتصادی و بهینه مطرح شده برای تحلیل و طراحی این بخش از فرودگاه خواهد شد.

## ۵- آزمایش و ارزیابی مدل بهینه پیشنهادی با شبیه‌سازی رایانه‌ای

همان گونه که گفته شد، پس از تبیین مشخصات و ساختار مدل بهینه پیشنهادی در قالب اجزای مختلف آن، با طراحی نرم‌افزار شبیه‌سازی طرح و تحلیل محوطه توقفگاه می‌توان مدل ارائه شده را مورد ارزیابی و آزمایش قرار داد. نرم‌افزار شبیه‌سازی تحلیل و طراحی ایروان فرودگاه تحت محیط سیستم عامل ویندوز ۹۵ به بالا قابل اجراست. زبان برنامه‌نویسی مدل مذکور نیز، زبان ویژوال بیسیک ۴/۰۰ است. برنامه مورد نظر به صورت یک بسته نرم‌افزاری با قابلیت نصب خودکار و دارای

$$\left[ \sum_{i=1}^j x_i + \sum_{i=j+1}^n x_i \right] \quad (17)$$

$$TC_6 = (1 + P - PQ(1+r))\gamma_A \quad (18)$$

$$TC_7 = m\gamma_0 \quad (19)$$

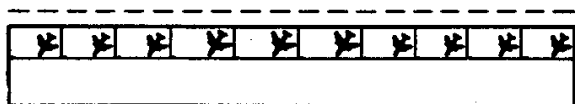
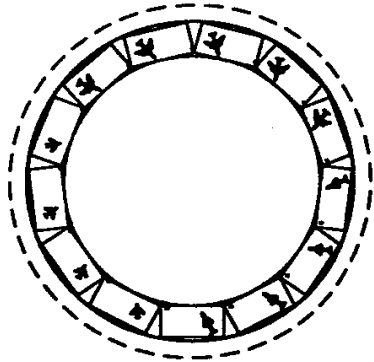
که در آن

$$m = \begin{cases} n & \text{در شرایط عدم محدودیت} \\ n+1 & \text{در شرایط محدودیت} \end{cases}$$

نمونه‌ای از محوطه توقفگاه هواپیما و پایانه دارای طرح انگشتی یا شاخه‌ای همراه با معرفی برخی مشخصه‌های مربوطه در مدل، در شکل (۲) نشان داده شده است.

به طور کلی به دلیل پیچیدگی حل فرمولهای ریاضی مدل تابع حداقل هزینه سفر و همچنین به دلیل اینکه حل مدل ریاضی مذکور در شرایط مختلف و با توجه به متغیر و تصادفی بودن تقاضا و رخدادهای وارد بر سیستم، منجر به تحلیل یا طراحی هندسی محوطه توقفگاه نخواهد شد، بنابراین با استفاده از مبانی مدل ریاضی پیشنهادی و برای لحاظ کردن شرایط واقعی طرح و مشخصه‌های متغیر حمل و نقلی و همچنین ارزیابی و آزمایش آن، مدل شبیه‌سازی این بخش از فرودگاه در

گرافیکی قابل نمایش در محیط اتوکد ۱۴ تبدیل کند. در حقیقت با توجه به قابلیت‌های گرافیکی بالای اتوکد، به ویژه نسخه ۱۴ آن، مدل نرم‌افزاری مذکور دارای توانایی انعطاف پذیری و اعمال تغییرات مختلف در طرح خواهد بود. حتی در صورت امکان می‌توان سایر اجزای مختلف فرودگاه از جمله عناصر محوطه پروازی مانند باندهای پرواز و خزش و نحوه اتصال آن به محوطه توقفگاه و همچنین اجزای بخش زمینی فرودگاه را در محیط اتوکد طراحی و ترسیم کرد. به عنوان مثال نمونه‌ای از فرایند طراحی محوطه توقفگاه هواپیماها در فرودگاهی با برنامه زمان‌بندی پروازی مشخص در روز طرح که دارای طرح اقماری ترکیبی باشد، مد نظر قرار می‌گیرد. نتایج مراحل مختلف این فرایند به صورت پلان طراحی شده محوطه توقفگاه، در شکل (۳) و خلاصه‌ای از نتایج محاسباتی به دست آمده از نرم‌افزار برای این نوع توقفگاه، در جدول (۱) نشان داده شده است. علاوه بر آن خلاصه‌ای از نتایج محاسباتی حاصل از گزینه‌های بهینه انواع توقفگاههای طراحی شده برای یک فرودگاه دارای برنامه زمان‌بندی پروازی یکسان، در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۳- پلان طراحی شده محوطه توقفگاه اقماری ترکیبی همراه با آرایش هواپیماها در محیط اتوکد

خصوصیات یک برنامه مناسب کاربر<sup>۱</sup> است. به طور کلی نرم‌افزار مورد نظر به تبع مدل ارائه شده دارای مرحله‌بندی منظم و سازمان‌یافته‌ای است، به طوری که پس از شبیه‌سازی برنامه زمان‌بندی ورود و خروج هواپیماها به توقفگاه در روز طرح و در نتیجه تعیین تعداد و تیپ جایگاههای مورد نیاز هواپیماها، وارد فرایند تحلیل یا طراحی می‌شود. در این فاز می‌توان یکی از انواع طرحهای توقفگاهی متداول در فرودگاهها از جمله طرحهای نوع خطی ساده<sup>۲</sup>، نیم‌دایره<sup>۳</sup> و سه‌ضلعی<sup>۴</sup>، انگشتی ساده و دوگانه<sup>۵</sup>، اقماری<sup>۶</sup>، ترکیبی<sup>۷</sup> و ترانسپورتر<sup>۸</sup> را انتخاب کرد. پس از آن با استفاده از نتایج به دست آمده از مرحله قبل، فرایند طراحی یا تحلیل انجام خواهد شد.

به طور کلی در فرایند ارزیابی و آزمایش مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار مورد بحث، هر یک از انواع عملیات ورود و خروج و اشکال مختلف توقف هواپیماها برای هر فرودگاه در نظر گرفته می‌شود. این به معنای این است که هر نوع توقفگاهی در حالت‌های عملیاتی ورود و خروج و نحوه توقف مختلف هواپیماها، تحلیل یا طراحی می‌شود. به عبارت دیگر، هدف اصلی از طراحی این نرم‌افزار شبیه‌سازی، اجرای همزمان و تلفیقی مراحل مدل پیشنهادی در قالب فرایندی منسجم است [۱۰]. با این کار در واقع تمامی معیارها و پارامترهای مدل در شرایط واقعی و برای نمونه‌های فرودگاهی مختلف با برنامه‌های زمان‌بندی پروازی متفاوت، قابل اجراست. نهایتاً بهترین گزینه طراحی شده و یا بهترین وضعیت تحلیل شده هر نوع توقفگاهی از نظر مشخصات مدل ارائه شده، تعیین می‌شود. به عنوان یک نمونه عملی، نتایج فرایند طراحی توقفگاه یکی از فرودگاهها در مقایسه با شرایط موجود آن در ادامه مطلب شرح داده خواهد شد. از خصوصیات بارز دیگر این نرم‌افزار، قابلیت گرافیکی برنامه در نمایش محوطه توقفگاه طراحی یا تحلیل شده و شبیه‌سازی قرارگیری بهینه هواپیماها براساس تابع حداقل هزینه سفر در طول ۲۴ ساعت روز طرح در محیط ویندوز است. علاوه بر محیط ویندوز، نرم‌افزار قادر است که فایل‌های طراحی شده با برنامه را در صورت دلخواه به فایل‌های

جدول ۱- نتایج محاسباتی حاصل از طراحی توقفگاه اقماری ترکیبی

نتایج	مشخصات	نتایج	مشخصات
۰	مساحت گیت‌های نگهداری	Power out	نوع عملیات خروج
۱۴۴۱ (m)	طول ساختمان پایانه	۳۰	زاویه توقف هواپیما
۱۲۲ (m)	عرض ساختمان پایانه	۲۳	تعداد جایگاه‌های اصلی
۳۲۳ (m)	شعاع ساختمان اقماری پایانه	۰	تعداد جایگاه‌های نگهداری
۶۱۰ (m)	فاصله اعمار تا ساختمان اصلی پایانه	۲۸۴۷۸۶ (m <sup>2</sup> )	مساحت جایگاه‌های اصلی

جدول ۲- خلاصه نتایج محاسباتی حاصله از گزینه‌های بهینه انواع توقفگاه‌های طراحی شده

انواع توقفگاه	عملیات ورود و خروج	مساحت کل جایگاه‌های هواپیما (مترمربع)	حداقل مساحت لازم محوطه توقفگاه (مترمربع)
انگشتی ساده	Push out	۶۴۵۱۳	۱۸۵۹۷۸
	Power out	۹۸۴۴۸	۲۶۲۹۸۴
انگشتی دوگانه	Push out	۶۴۵۱۳	۲۲۵۲۶۸
	Power out	۹۸۴۴۸	۲۹۴۳۶۹
خطی ساده	Push out	۶۴۵۱۳	۱۰۶۷۰۰
	Power out	۹۸۴۴۸	۲۶۴۱۴۵
نیم‌دایره‌ای	Push out	۷۲۲۰۳	۱۴۷۶۰۰
	Power out	۱۱۵۳۹۰	۲۱۸۱۹۰
سه‌وجهی	Push out	۶۴۵۱۳	۱۴۲۱۳۸
	Power out	۹۸۴۴۸	۲۰۷۴۵۶
اقماري دایره‌ای	Push out	۷۲۲۰۳	۲۶۰۹۸۴
	Power out	۱۱۵۳۹۰	۴۴۵۷۴۲
اقماري چهارضلعی	Push out	۷۲۲۰۳	۲۷۰۴۰۵
	Power out	۱۱۵۳۹۰	۴۴۸۱۷۶
ترکیبی دایره‌ای خطی	Push out	۷۲۲۰۳	۵۷۹۵۴۶
	Power out	۱۱۵۳۹۰	۶۵۱۱۷۵
ترکیبی چهارضلعی خطی	Push out	۷۲۲۰۳	۵۳۰۲۴۳
	Power out	۱۱۵۳۹۰	۵۷۶۷۵۵
ترانسپورتر	Push out	۷۲۲۰۳	۴۴۲۸۰۰
	Power out	۱۱۵۳۹۰	۴۴۶۵۲۰

## ۶- نتیجه گیری

بر اساس مشخصات مدل بهینه ارائه شده در این مقاله برای طراحی و تحلیل محوطه ایپرون یا توقفگاه هواپیماها و ارزیابی و آزمایش مدل با استفاده از نرم افزار شبیه سازی معرفی شده، به نتایج قابل توجهی دست می یابیم که به طور خلاصه شامل موارد زیرند

(الف) بهترین و مناسبترین روش برای تحلیل و طراحی بهینه انواع توقفگاه هواپیماها در شرایط عملیاتی مختلف برای هر فرودگاه و نهایتاً دستیابی به یک گزینه بهینه، شبیه سازی فرایند تحلیل و طراحی این بخش از فرودگاه بر اساس مبانی نظری و منطق حاکم بر مدل ریاضی حداقل هزینه سفر شرح داده شده و در واقع، کاربردی کردن و سپس ارزیابی مدل با نرم افزار شبیه سازی است.

(ب) نتایج حاصل از مدل بهینه پیشنهادی و آزمون و ارزیابی آن نشان دهنده این است که سیاستها و خط مشیهای مدیران فرودگاه و شرکتها هوایی در قالب برنامه های زمان بندی پروازی، انواع کاربری جایگاههای توقف، ترکیب ناوگان هواپیمایی فرودگاه در طول دوره های طرح، شرایط عملیاتی و خدمات رسانی و ملاحظات اقتصادی تأثیر تعیین کننده ای در چگونگی طراحی یا تحلیل توقفگاههای هواپیما دارد.

(ج) آرایش و قرارگیری هواپیماها در جایگاههای محوطه توقفگاه بر اساس مدل حداقل هزینه سفر یا TC موجب کاهش عمده ای در مسافت پیاده روی یا انتقال مسافران از هواپیما به پایانه و برعکس می شود.

(د) با مقایسه دو حالت عملیاتی خروج هواپیما از جایگاه توقف، مشخص شد که در صورت استفاده از ماشین آلات یدک کش برای این منظور، حداقل سطح مورد نیاز محوطه توقفگاه کاهش قابل ملاحظه ای (در بعضی موارد تا حدود ۵۰ درصد) می یابد.

## واژه نامه

ه) بهترین حالت توقف هواپیما در محل جایگاهها از نظر سطح زمین لازم، در شرایط عملیاتی خروج با استفاده از موتور هواپیما<sup>۱۶</sup>، توقف موازی با ساختمان پایانه و در شرایط عملیاتی خروج با یدک کش<sup>۱۷</sup>، توقف زاویه ای ۴۵ درجه است.

(و) مناسبترین روش از نظر تعداد جایگاههای لازم برای توقف هواپیماها و همچنین بهترین راهبرد دستیابی به بهره وری مناسب آنها، اتخاذ کاربری عمومی جایگاههای توقف برای تمامی شرکتها هوایی استفاده کننده از فرودگاه است.

(ز) از مهمترین مسائل لازم در مدل بهینه پیشنهادی که باید توسط کاربران، برنامه ریزان و طراحان فرودگاه دقیقاً رعایت شود، حفظ قابلیت انعطاف پذیری و امکان توسعه گزینه های تحلیل و طراحی شده در چارچوب برنامه ریزیهای آینده فرودگاه است.

(ح) با توجه به قابلیت نرم افزار در عملی کردن و ارزیابی مدل بهینه پیشنهادی و انتقال طرح منتخب به محیط اتو کد و نهایتاً الحاق مناسب سایر اجزای فرودگاه به محوطه پایانه و توقفگاه طراحی شده، به یک سیستم مناسب و کارا برای فرودگاه مورد نظر دست می یابیم.

(ط) به دلیل اینکه هزینه های اقتصادی از مهمترین پارامترهای برنامه ریزی، طراحی، انتخاب و اجرای هر پروژه است، بنابراین برنامه ریزان و اداره کنندگان فرودگاه باید با بررسی همه جانبه عوامل مختلف همچون هزینه های افزایش و تملک سطح زمین لازم، هزینه های ساخت انواع طرحها، تأمین ماشین آلات یدک کش و تجهیزات ویژه آن و ارزیابی و مقایسه تمامی گزینه های مطرح بر مبنای نتایج خروجی از نرم افزار مربوطه، به مدلی مناسب، اقتصادی و سازگار با ویژگیهای فرودگاه مورد مطالعه دست یابند.

1. apron
2. gates
3. blast pad
4. visual basic 4.00
5. power out & push out
6. travel cost
7. user friendly
8. finger concept

9. frontal or linear concept
10. semi-circular concept
11. trigonal concept
12. single & double finger concept

13. satellite concept  
14. hybrid concept

15. transporter concept  
16. power out

17. push out

## مراجع

1. Horonjeff, R., and MCKelvey, F. X., *Planning and Design of Airport*, Fourth Edition, Mc Graw Hill, 1994.
2. Parizi, M. S., "A Practical Procedure for the Optimum of Airport Passenger Terminals," Ph.D Thesis, Carleton University, Ottawa, 1995.
3. Federal, Aviation Administration, -AC 150/5360-13; "Planning and Design Guidelines for Airport Terminal Facilities," 1988.
4. International Air Transport Association, "Airport Development Reference Manual," 8th Edition, Montreal, Canada, 1995.
5. Hassounah, Mazen. I., and Steuart, Gerald. N., "Demand for Aircraft Gates," paper No. 93. Of 72nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C, January 1993.
6. International Civil Aviation Organization, DOC 9157-AN1901, "Aerodrome Design Manual," Part

- 2: *Taxiways, Aprons and Holding Bays*," Second Edition, 1983.
7. International Civil Aviation Organization, Annex 14, "Aerodromes," Vol. 1, *Aerodrome Design and Operations*, First Edition, Montreal, Canada, July 1990.
8. Bandara, S., and Wirasinghe, S. C., "Walking Distance Minimization and Simulation for Airport Terminal," Ph.D Thesis., The University of Calgary, Calgary, Canada, 1992.
9. Braaksma, J. P., "Optimum Airport Terminal Layout Planning," *Engineering Optimization Journal*, Vol. 3, pp. 1-15, 1977.

۱۰. معصومی، غ.، "طراحی مدل کامپیوتری برای طرح و آنالیز بهینه توقفگاه فرودگاه،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۷.