مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره ۲۳، شماره ۴، سال ۱۴۰۲
صفحات ۷ تا ۱۷

مدل ریاضی تخصیص بهینه هواپیما به گیت‌های اپرون با لحاظ کردن محدودیت‌های ایمنی

مصطفی فرج‌اللهی[۱]، علی عبدی کردانی[۲*]، علیرضا سرکار[۳]، مجید شادمان[٤]

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران
۳- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
٤- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

Email: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت ۱٤۰۰/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش ۱٤۰۱/۰۳/۳۱

چکیده

فرودگاه‌ها از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین زیرساخت‌های هر کشور هستند که نقش مهمی در جابه‌جایی بار و مسافر به دورترین‌نقاط جهان ایفا می کنند. حفظ و استفاده بهینه از منابع و دارایی‌های فرودگاه از اهداف اصلی مدیران فرودگاه‌ها به شمار می‌رود. از دیگر سو، خطوط هوایی نگاه ویژه‌ای به صرفه‌جویی در زمان، مصرف سوخت، حفظ رضایت‌مندی مسافران و غیره دارند. یکی از منابع مهم در فرودگاه‌های بزرگ دنیا، دروازه یا گیت‌های ترمینال مسافری فرودگاه‌ها هستند که نقش انکارناپذیری در عملکرد بهتر فرودگاه دارند. اختصاص هواپیماها به این گیت‌ها از مسائلی است که از دیرباز موردتوجه محققان رشته تحقیق در عملیات و همچنین فعالان حمل‌ونقل هوایی بوده است. این پژوهش به مسئله تخصیص هواپیما به گیت ترمینال مسافری می‌پردازد. مسأله تخصیص بهینه گیت یک موضوع پیچیده و نیازمند لحاظ کردن پارامترها و متغییرهای بسیاری است تا بتوان به نتیجه مطلوب دست یافت. برای حل اینگونه مسائل که معمولا توسط محاسبات دستی امکان‌پذیر نیست و یا بسیار زمان بر است از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر با ارائه یک مدل ریاضی به همراه قیودی که هرکدام محدودیت‌هایی برای پروازهای فرودگاه به وجود می آورند به ارائه یک روش بهینه‌سازی پرداخته می‌شود که نتایج حاصل از آن گواه بر دقت و کارایی تابع هدف است. روش کار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک می‌باشد که شامل جمعیت اولیه، انتخاب، ترکیب یا جهش، تولید نسل جدید و دوباره انتخاب است. در حقیقت نوآوری این پژوهش استفاده از الگوریتم ژنتیک در حل مسأله تخصیص گیت با رویکرد ایمنی در عملیات زمینی در فرودگاه است. در این پژوهش از ۵ سناریو براساس تغییر در تعداد پروازها و گیت‌ها استفاده شده است. در مجموع زمان‌های بیکاری در سناریوی اول به میزان ۷۲,۷۵٪ ، در سناریوی دوم ۷٦,۹۲٪ ، در سناریوی سوم ۸۲,۳۸٪ ، در سناریوی چهارم ۸۲,۳۸٪ و در سناریوی پنجم ۷۹,٦۷٪ بهبود یافت.

واژگان کلیدی: مدل ریاضی، تخصیص گیت، اپرون، ایمنی، الگوریتم ژنتیک.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر حجم ترافیک هوایی در جهان رشد چشم-گیری داشته است که در نتیجه تقاضا برای حمل‌ونقل هوایی روز به روز در حال افزایش است. از این رو فرودگاه‌های بزرگ و حتی متوسط با مشکل تراکم ظرفیت همراه هستند. با این اوصاف افزایش ظرفیت فرودگاه‌ها از طریق ساخت ترمینال‌های جدید و بیشتر، یک فرایند زمان‌بر است و نمی‌تواند مشکل تراکم ظرفیت فرودگاه‌ها را در کوتاه‌مدت حل کند. بنابراین مدیران و عوامل فرودگاه‌ها باید گیت‌های محدود موجود را به شیوه‌ای موثرتر به کار گیرند که فرایند سرویس‌دهی پروازها به استفاده حداکثری از ظرفیت موجود منجر شود. تخصیص غیراصولی و بدون برنامه‌ریزی ممکن است سبب تأخیر پرواز، رضایت‌مندی پایین مسافران و عدم هماهنگی گیت و هواپیما شود و بسیاری از موضوعات ایمنی در رابطه با خطرات احتمالی که حاصل مسائل مربوط به گردش به عقب[1] هواپیما و مشکل تداخل در مسیر باند خزش در اطراف ناحیه گیت و حتی هزینه‌های اضافی سوخت برای ورود و خروج هواپیما شود. مصرف بیشتر سوخت سبب انتشار بیشتر آلودگی خواهد شد به ویژه زمانی که ظرفیت هواپیما تقریباً پر است و هواپیما به دلیل وزن بیشتر سوخت بیشتری را مصرف می‌کند.

از این رو تصمیم‌گیری برای استفاده از این منابع وابسته به هم، سطوح و درجات متفاوت تأثیرگذاری روی هر بخش از عملیات کلی را به دنبال دارد. همچنین با توجه به اینکه تخصیص گیت به هواپیما یک فرایند ایستا و از پیش تعیین شده است باید برخی تغییرات موقتی را نیز کنترل نمود (تأخیر پرواز، پروازهای اورژانسی و ...) و همچنین حوادث ناگهانی از جمله مشکلات و خرابی مکانیکی هواپیماها، خطا در عملیات زمینی هدایت هواپیما و شرایط آب و هوایی نامساعد نیز وجود خواهد داشت. موضوع مهم دیگری که در تخصیص گیت باید به آن توجه داشت ایمنی است. عملیات فرودگاهی تا حد زیادی وابسته به فعالیت‌های زمینی است. بی‌توجهی و وجود خطاهای انسانی منجر به بروز خطرات ایمنی در محوطه اپرون فرودگاه خواهد شد. برخی مقیاس‌ها برای بهبود سطح ایمنی فرودگاه در ابعاد تئوریک و کاربردی در نظر گرفته شده است. برای نمونه، تنظیم یک زمان مناسب میان دو پرواز که برای گیت یکسان در نظر گرفته شده است یک نمونه بارز تئوریک از ایمنی و جلوگیری از هرگونه تداخل در محوطه گیت است.

مسائل ایمنی در فرودگاه ناشی از انواع تداخل است که در مجاورت گیت‌ها حادث می‌شود شامل تداخل بر سر احاطه گیت اصلی، تداخل در حرکات زمینی هواپیماها در نزدیکی گیت و همچنین تداخل در مسیرهای اصلی حرکت است.

به عنوان یک اصل کلی، فرودگاه در طول روز معمولاً صدها پرواز داخلی و خارجی را انجام می‌دهد. تعیین و تخصیص غیر منطقی ممکن است سبب تأخیر پرواز، کاهش رضایت‌مندی مشتری، عدم هماهنگی و همخوانی استفاده از گیت و بسیاری موضوعات ایمنی در رابطه با خطرات احتمالی می‌شود که حاصل مسائل مربوط به تأخیر پرواز و مشکلات و اختلافات خزش در اطراف ناحیه گیت و حتی هزینه‌های اضافی سوخت برای ورود و خروج هواپیماها می‌شود. مصرف سوخت مازاد ممکن است سبب انتشار بیشتر دود اگزوز نیز شود، به ویژه زمانی که ظرفیت هواپیما تقریباً پر است. به دلیل وجود مسائل مربوط به عدم اطمینان در عملیات، دیگر اصل بسیار مهم که باید در تعیین و گمارش گیت در نظر گرفته شود ایمنی عملیاتی است. برخی مقیاس‌ها برای بهبود سطح ایمنی عملیات فرودگاه‌ها در ابعاد کاربردی و تئوریک در نظر گرفته شده‌اند. برای نمونه، تنظیم یک زمان مناسب میان دو پرواز که برای یک گیت تعیین شده است یک مقیاس مشخص ارائه حفاظت ایمنی و جلوگیری از هرگونه بروز مشکل در رابطه با گیت است. مسائل ایمنی در عملیات فرودگاه ممکن است در اثر اختلافات متعددی باشد از جمله تداخل در استفاده از گیت، تداخل در حرکات زمینی هواپیما در نزدیکی گیت و همچنین تداخل در مسیرهای اصلی حرکت. کار پژوهشی حاضر در تلاش برای تشخیص علت تداخل از طریق در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی مربوط به عملیات اجرایی در یک مدل ریاضی است.

ابتدا چنگ [1] به تعریف تداخلات مربوط به اختلافات پرتنش و مشکل‌ساز پرداخت و تحلیل آثار هر دو عملیات حرکت

1. Pushback

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

زمینی و عملیات تخصیص گیت را به طور همزمان انجام داد. یک مدل پیاده‌سازی مبتنی بر شبکه به منظور پشتیبانی از تحلیل پیشنهاد شد. بابیک و همکاران در سال ١٩٨٤ این مسئله را به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح بیان کرده و از روش شاخه و کرانه (B&B[1]) برای یافتن حداقل طول پیاده‌روی مسافران استفاده نمودند [2]. منگوبی و همکاران در سال ١٩٨٥ برای به کمترین رساندن مسافت سیر مسافران، مسافران انتقالی را نیز علاوه بر مسافران در حال ورود در نظر گرفتند و از الگوریتم حریصانه برای حل مدل پیشنهادی خود استفاده نمودند [3]. بیر توانست در سال ١٩٩٠ مدل مفهومی خود را بر اساس برنامه ریزی عدد صحیح دودویی[2] با کمینه کردن مجموع مسافت پیاده روی مسافران و همچنین کل مسافت طی شده برای حمل بار مسافران ارائه نماید. این مدل تخصیص را درنهایت با اختصاص وزن (معمولاً) بیشتر به مسافت کل طی شده، گیت های ورودی خالی را به هواپیماهای در حال ورود اختصاص می‌داد [4]. در سال ١٩٩٨ حقانی و چن تخصیص چنددوره‌ای گیت ورود را در قالب فرمول نوینی از برنامه‌ریزی عدد صحیح بیان کردند [5]. ژو و بایلی مسئله تخصیص گیت فرودگاه را به صورتی در نظر گرفتند که گیت‌های فرودگاه را به صورت پویا بر اساس داده‌های مبدأ روزانه مسافران و داده‌های جریان مقصد، به پروازهای برنامه‌ریزی‌شده اختصاص می‌داد [6]. ماهارجان و ماتیس یک برنامه دودویی عدد صحیح را برای بازتخصیص بهینه هواپیماها به گیت‌ها در پاسخ به تأخیرهای روزانه پرواز فرموله کردند [7]. آتکین و همکاران از چندین داده آزمایش به منظور اثبات اینکه تداخل روی گام‌های دیگر عملیات باند خزش در مدیریت ترافیک فرودگاه اثر خواهد گذاشت استفاده کردند [8]. کیم و همکاران استراتژی‌های کنترل خروج را به کار می‌برند و از یک مدل پرس‌وجو برای پیاده‌سازی فرایند خروج هواپیما استفاده می‌کنند. سپس آنها تلاش می‌کنند تا به پیش‌بینی و کاهش زمان عملیات به منظور به حداقل رساندن ازدحام باند خزش بپردازند [9]. نارکیسو و پیرا در سال ٢٠١٥ یک رویکرد آزمایشی مبتنی بر شبیه‌سازی را که حداقل میزان جایگاه‌های لازم در ترمینال برای مقابله با الگوی ترافیک ورود/خروج تحت یک محدودیت تأخیر زمانی ارزیابی می‌کند را ارائه کردند [10]. مهم‌ترین پژوهش در زمینه تخصیص گیت به پژوهش لیو و همکاران که در سال ٢٠١٦ برمی‌گردد، جایی که هدف پژوهش آن‌ها بهینه‌سازی گیت فرودگاه با لحاظ کردن مباحث ایمنی، کاهش تداخل در نزدیکی محوطه اپرون و در نظر گرفتن اندازه گیت و پرواز بود. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش آن‌ها مقایسه خواهد شد [11]. پترنا و حقانی مطالعه فرمول‌بندی برنامه‌ریزی ریاضی تخصیص پرواز به گیت با مسافران مرتبط را مورد بررسی قرار دادند. برای اهداف آزمایش‌های خود، تعدادی از موارد با اندازه‌های مختلف و سناریوهای برنامه‌ریزی‌شده و همچنین مجموعه‌ای بر اساس یک فرودگاه واقعی اروپا را تولید کردند. سپس از نتایج خود برای شناسایی کارآمدترین فرمول‌بندی‌ها تحت عملکردهای مختلف هدف و فرضیات مسئله استفاده کردند. اغلب پژوهش های انجام شده پیرامون مسأله تخصیص گیت فرودگاه، موضوعات و مسائل ایمنی در نظر گرفته نشده است. در حقیقت، در نظر گرفتن موضوعات و مباحث ایمنی باید تعیین‌کننده اولویت‌های بالاتر از نکات اقتصادی وکارایی در مدیریت ترافیک فرودگاه (ATM[3]) باشند. از این رو، متفاوت از متداول‌ترین اهداف، برخی روش‌های دیگر درصدد است تا روی حل مسائل تداخل در عملیات فرودگاه‌های مرتبط تمرکز کند [12]. به نظر می‌رسد موضوع ایمنی در تخصیص گیت چندان مورد توجه تحقیقات پیشین قرار نگرفته است که مقاله حاضر سعی در حل مسئله تخصیص گیت با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به مباحث ایمنی مرتبط با برخورد هواپیماها را دارد.

٢- مدل تخصیص گیت

مسأله تخصیص گیت فرودگاه[4] روی تخصیص پروازها به گیت‌ها در یک فرودگاه تمرکز دارد که یک مسأله تصمیم‌گیری مهم در عملیات روزانه صنعت حمل‌ونقل هوایی مدرن امروزی

1 Branch and Bound
2 Binary
3 Air Traffic Management
4 AGAP

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]
[DOI: 0.22034/23.4.7]

محسوب می‌شود و هدف آن تخصیص بهترین گیت به هر پرواز است به گونه‌ای که محدودیت‌ها و قیود مسأله به صورت کامل رعایت شود. از آنجا که نتیجه فرایند تخصیص گیت به هواپیما، منتج به عملیات زمینی و حرکت هواپیما روی سیستم خزش و اپرون فرودگاه می‌گردد، برقراری یک سیستم مطمئن تخصیص گیت که بتواند ایمنی هواپیماها حین خزش را از لحاظ برخورد تأمین کند، اهمیت دارد. بنابراین این مسأله از دسته مسائل بهینه‌سازی با ارضای محدودیت محسوب شده و حل آنها بسیار پیچیده و زمان‌بر است [13].

۲-۱- پارامترها و متغیرها

$N = \{1, 2, ..., |N|\}$ مجموعه پروازهای برنامه‌ریزی ورودی و یا خروجی از فرودگاه در یک روز

$M = \{1, 2, ..., |M|\}$ مجموعه گیت‌های موجود در فرودگاه

A_i: زمان ورود پرواز iام

D_i: زمان خروج پرواز iام

α: کمترین فاصله زمانی بین تخصیص دو گیت متوالی به منظور پرهیز از تداخل

β: کمترین فاصله زمانی بین تخصیص دو پرواز متوالی به یک گیت به منظور پرهیز از تداخل

u_i: نوع پرواز iام را مشخص می‌کند. اگر مقدار آن یک باشد نوع پرواز با هواپیمای بزرگ است و نیاز به گیت متناسب با آن دارد و اگر برابر با صفر باشد نوع پرواز با هواپیمای کوچک است و بهتر است گیت کوچکتر به آن تخصیص داده شود.

v_k: نوع گیت k–ام (اگر مقدار آن یک باشد گیت یک گیت بزرگ است و اگر برابر با صفر باشد گیت از نوع کوچک است).

T: زمان بسته شدن ثابت کلیه گیت‌ها بعد از استفاده روزانه

θ: مقدار جریمه‌ای است که برای تخصیص یک پرواز به جایگاه راه دور باید در نظر گرفته شود.

در ادامه متغیرهای تصمیم آورده شده‌اند.

S_{ik}: زمان بیکاری گیت kام قبل از پرواز iام

X_{ik}: متغیر دودویی که اگر برابر با یک باشد به این معناست که از پرواز iام به گیت kام تخصیص داده شده‌است در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود.

z_{ijk}: متغیر دودویی که اگر پرواز i و j به گیت k تخصیص داده شوند و پرواز i قبل از پرواز jباشد مقدار این متغیر برابر با یک و درغیر این صورت برابر با صفر خواهد بود.

Z_{0jk}: متغیر دودویی که اگر پرواز j اولین پروازی باشد که به گیت k تخصیص داده شده مقدار این متغیر برابر با یک و درغیر این صورت برابر با صفر خواهد بود.

τ_k: زمان آخرین پرواز تخصیص‌یافته به گیت k

۲-۲- مدل ریاضی

تابع هدف و قیود مسأله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min F : \sum_{k=1}^{|M|}\sum_{i=1}^{|N|} S^{2}_{ik} + \sum_{k=1}^{|M|}\sum_{i=1}^{|N|} (T - \tau_k)^2 + \sum_{i=1}^{|N|} \theta X_{i|M|+1} \quad (۱)$$

$$\sum_{k=1}^{|M|+1} X_{ik} = 1 \quad i, j \in N, k \in M \quad (۲)$$

$$X_{ik} + X_{jk} \le 1 \text{ , If } (D_j - A_i)(D_i - A_j) > 0 \text{ and } (u_i X_{ik} + u_j X_{jk} - v_k) \ge 0 \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} Sh_{ijk} = 1 \text{ , If } (D_j - A_i)(D_i - A_j) > 0 \text{ and } (u_i X_{ik} + u_j X_{jk} - v_k \le 0) \quad (٤)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} z_{ijk} = 1 \text{ , If } (X_{ik} = X_{jk} = 1) \text{ and } (A_i - A_j) > 0 \quad (٥)$$

$$X_{jk} - z_{0jk} \ge 0 \quad (٦)$$

$$S_{jk} \ge \beta(1 - z_{0jk}) \quad (٧)$$

$$\sum_{i=1}^{N} m_{ik} \ge 0, \ \ If\,(u_i - v_k) X_{ik} \le 0, \ \ Then\ m_{ik} = 0, \ \ Else\ m_{ik} = 1 \quad (٨)$$

$$S_{jk} \le A_j - D_i + (1 - z_{ijk})T \quad (٩)$$

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

$$S_{jk} \geq A_j - D_i + (z_{ijk} - 1)T \quad (١٠)$$

$$\tau_k = \max\{D_i X_{ik}\} \quad (١١)$$

$$\tau_k \geq T \quad (١٢)$$

$$\begin{aligned} &|D_i - D_j| \geq \alpha\, X_{ik} X_{jk+1} \\ &|D_i - A_j| \geq \alpha\, X_{ik} X_{jk+1} \\ &|D_j - A_i| \geq \alpha\, X_{ik} X_{jk+1} \\ &|A_i - A_j| \geq \alpha\, X_{ik} X_{jk+1} \end{aligned} \quad (١٣)$$

$$\tau_k, S_{ik} \geq 0 \quad (١٤)$$

$$X_{ik}, z_{0jk}, z_{ijk} \in \{0,1\} \quad (١٥)$$

تابع هدف از سه جمله تشکیل شده است که جمله اول میزان مجموع زمان‌های بیکاری گیت‌ها را نشان می‌دهد. جمله دوم به ازای تمام زوج هایی (گیت، پرواز) که به صورت ناهمگن تخصیص داده شده‌اند و نوع آن‌ها با هم متفاوت است، تابع هدف را به میزان d جریمه می‌نماید. جمله سوم نیز به اندازه تعداد پروازهایی که به جایگاه راه دور تخصیص یافته‌اند تابع هدف را جریمه می‌کند زیرا که انتقال پرواز به جایگاه‌های راه دور هزینه‌های پرواز مانند مصرف سوخت را افزایش داده و رضایت‌مندی مشتریان را با افزایش زمان سفر و دور شدن مسافت، کاهش می‌دهد.

شکل ١. تداخل زمانی ممکن بین دو پرواز

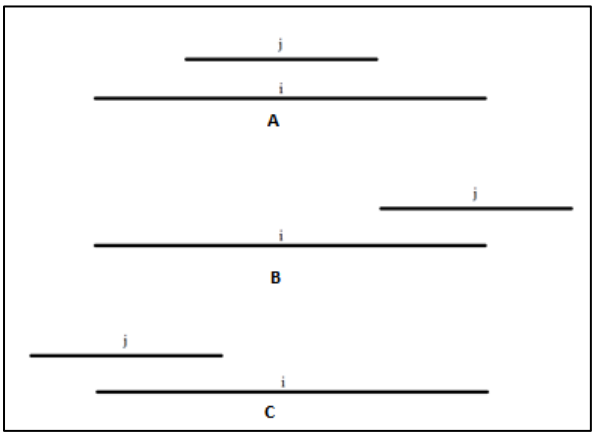

Fig. 1. Possible temporal conflicts between two flights

رابطه ٢ تعیین می‌کند که هر پرواز تنها می‌تواند به یک گیت تخصیص داده شود که اگر برابر با یک باشد به این معناست که پرواز ورودی به گیت تخصیص داده شده است در غیر این صورت برابر است با صفر. فرمول ٣ مانع از تخصیص همزمان چند پرواز به یک گیت می‌شود. شکل (١) تمامی تداخل ممکن بین دو پرواز iام و jام را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است زمانی که حاصل عبارت $(D_j - A_i)(D_i - A_j)$ عددی بزرگتر از صفر باشد بین دو پرواز تداخل وجود دارد. در این پژوهش فرض شده است که می‌توان دو پرواز با هواپیمای کوچک را به طور همزمان به یک گیت بزرگ تخصیص داد. این امر موجب بهره‌وری هرچه بیشتر از منابع شده و کارایی سیستم را افزایش می‌دهد که تحت عنوان اثر جایگاه چند هواپیمایی در رمپ[1] (MARS) شناخته می‌شود در فرمول ٤ این موضوع در نظر گرفته شده است. شکل (٢) چگونگی استفاده از گیت سوم را با یک پرواز با هواپیمای بزرگ یا دو پرواز با هواپیمای کوچک نشان می‌دهد. باید توجه داشت که در صورتی می‌توان یک گیت را به صورت همزمان به دو پرواز تخصیص داد که عبارت $(u_i X_{ik} + u_j X_{jk} - v_k)$ همواره کوچکتر یا برابر با صفر باشد. این عبارت نشان می‌دهد که مجموع ظرفیت دو پرواز باید کوچکتر یا مساوی با ظرفیت گیت باشد.

شکل ٢. اثر MARS

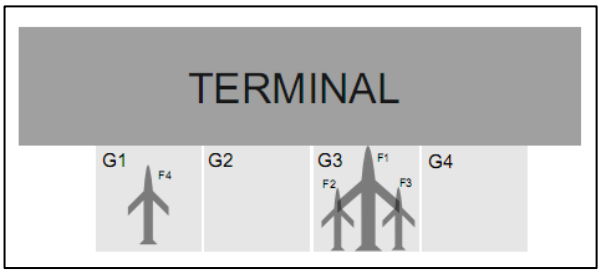

Fig. 2. MARS Effect

قید ٥ Z_{ijk} را محاسبه می‌نماید. این عبارت در صورتی که هر دو پرواز iام و jام به یک گیت تخصیص داده شده و پرواز iام قبل از پرواز jام انجام شده باشد برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود. از Z_{ijk} در قیود دیگر استفاده می‌شود. قید ٦ Z_{0jk} را محاسبه می‌نماید. قید ٧ تضمین می‌کند

1 Multi-Aircraft Ramp Stand

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

که بین خروج یک پرواز و رسیدن یک پرواز دیگر حداقل یک فاصله زمانی به اندازه β باید وجود داشته باشد که از هر گونه تداخل احتمالی در مجاورت گیت جلوگیری به عمل آید. همچنین این فاصله زمانی از ازدحام مسافرین در گیت جلوگیری کرده و مخاطرات ایمنی را کاهش می‌دهد. قید ۸ هماهنگی بین گیت و پرواز را مشخص می‌کند. در این پژوهش سعی شده است تا تخصیص‌ها به صورتی انجام شوند که ظرفیت پرواز با ظرفیت گیت متناسب باشد و بهترین گیت از نظر ابعاد به پروازها تخصیص داده شود. قیود ۹ و ۱۰ زمان بیکار بودن هر گیت را محاسبه می‌کند، این زمان هرگز نباید از زمان بسته شده گیت‌ها تجاوز نماید. قید ۱۱ زمان خروج آخرین پرواز از گیت‌ها را محاسبه کرده و قید ۱۲ تضمین می‌کند که این مقدار نباید از زمان بسته شده گیت‌ها تجاوز نماید. قید ۱۳ مانع از تداخل در تخصیص بین دو گیت مجاور می‌شود. شکل (۳) دو تداخل ممکن، زمانی که دو گیت مجاور به صورت همزمان تخصیص داده شده‌اند را نشان می‌دهد. حالت اول، حالتی که دو هواپیما در دو گیت مجاور در حال ورود به گیت هستند و حالت دوم حالتی است که هر دو هواپیما در حال خروج از گیت هستند. قید ١٤ تضمین می‌کند که τ_k , S_{ik} باید بزرگتر از صفر باشند و قید ۱۵ تضمین می‌کند که X_{ik}, z_{ijk}, z_{0jk} متغیرهای دودویی هستند.

شکل ۳. انواع تداخل در تخصیص گیت‌های مجاور

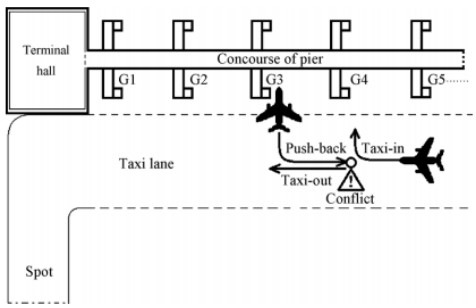

Fig. 3. Types of conflict in the assignment of adjacent gates

۳- روش حل مسأله

در روش پیشنهادی برای پرهیز از بهینگی‌های محلی و یافتن پاسخ‌های بهتر، از الگوریتم ژنتیک که الگوریتمی مبتنی بر جمعیت است استفاده شده است. به این صورت که در ابتدای اجرای الگوریتم، کروموزوم‌ها (نمونه‌های تصادفی از راه‌حل‌هایی که ممکن است قیود مسأله را برآورده سازد یا نسازد) به صورت تصادفی در فضای مسأله تولید و توسط تابع هدف که در قسمت قبل بیان شد، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. سپس عملگرهای تقاطع[1] و جهش[2] که از عملگرهای الگوریتم ژنتیک هستند روی آنها اعمال می‌شوند. برای پیاده‌سازی ایده پیشنهادی و مقاله پایه از نرم افزار Matlab استفاده شده است. دیتاست مورد استفاده در این پژوهش، دیتاست استانداردی است که در مرجع [12] آورده شده است. از داده‌های موجود پنج سناریو با مشخصاتی که در جدول (۱) آورده شده است، ایجاد شد. الگوریتم پیشنهادی و پایه روی این سناریوها اجرا و مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

جدول ۱. تعداد پروازها و گیت‌ها در سناریوهای پیشنهادی

Scenario	Flights	Gates
1	40	10
2	50	15
3	60	15
4	70	20
5	80	20

Table 1. Number of flights and gates in suggested scenarios

۳-۱- حل مدل پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک

روش پیشنهادی که از الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله تخصیص گیت استفاده می‌کند در ادامه تشریح شده و ساختار آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ایده پیشنهادی برای پرهیز از بهینگی‌های محلی و یافتن پاسخ‌های بهتر، از الگوریتم ژنتیک که الگوریتمی مبتنی بر جمعیت است استفاده شده است. به این صورت که در ابتدای اجرای الگوریتم، کروموزوم‌ها (نمونه‌های تصادفی از راه‌حل‌های که ممکن است قیود مسأله را برآورده سازد یا نسازد) به صورت تصادفی در فضای مسأله تولید و توسط تابع هدف که در قسمت قبل بیان شد، ارزیابی می‌شود.

1 cross
2 mutation

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

سپس عملگرهای تقاطع و جهش که از عملگرهای الگوریتم ژنتیک هستند روی آنها اعمال می‌شوند.

کروموزوم‌ها در الگوریتم پیشنهادی، راه‌حل‌های مختلف را نشان می‌دهند که هر کدام از آنها به صورت تصادفی تشکیل شده و باید درستی آن توسط تابع هدف مورد بررسی قرار بگیرد. این کروموزوم‌ها به صورت یک رشته تولید می‌شوند که طول هر رشته برابر با تعداد پروازهاست. این کروموزوم مشخص می‌کند که پرواز اول به گیت سوم، پرواز دوم به گیت دوم، پرواز سوم به گیت سوم، پرواز چهارم به گیت دوم و پرواز پنجم به گیت اول تخصیص داده شده است. با عنوان کردن یک نمونه روش حل مسأله واضح‌تر می‌شود. X_{ik} مشخص می‌کند که هر پرواز به کدام گیت تخصیص داده شده است.

جدول ۲. ماتریس X_{ik}

$X_{ik}=$	0	0	1
	0	1	0
	0	0	1
	0	1	0
	1	0	0

Table 2. X_{ik} Matrix

برای نمونه بالا مشخص می‌شود که پرواز اول به گیت سوم، پرواز دوم به گیت دوم، پرواز سوم به گیت سوم، پرواز چهارم به گیت دوم و پرواز پنجم به گیت اول تخصیص داده شده است. براساس ماتریس X_{ik} ماتریس z_{0j} به ازای همه گیت‌ها محاسبه می‌شود.

جدول ۳. ماتریس z_{0j}

$z_{0j1}=$	0	0	0	0	1
$z_{0j2}=$	0	1	0	0	0
$z_{0j3}=$	1	0	0	0	0

Table 3. Z_{0j} Matrix

از آنجایی که اولین پروازی که به گیت اول اختصاص داشته است، پرواز پنجم است بنابراین در سطر اول همه درایه ها به جز درایه پنجم صفر خواهد بود.

جدول ٤. ماتریس m_{jk}

$m_{jk}=$	0	0	1
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0

Table 4. m_{jk} Matrix

از آنجایی که نوع پرواز اول از نوع L بوده و به گیت سوم که از نوع S می‌باشد تخصیص داده شده است، بنابراین درایه سطر اول و ستون سوم برابر با یک می‌شود. در بقیه موارد تخصیص پرواز به گیت از نوع مناسب بوده و عدم هماهنگی وجود ندارد و بنابراین بقیه درایه ها برابر با صفر می‌شوند. در نهایت میزان بیکاری گیت‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

جدول ۵. ماتریس S_k

$S_{ik}=$	0	0	0
	0	0	0
	0	0	9-4=5
	0	10-6=4	0
	0	0	0
$S_k=$	0	4	5

Table 5. S_k Matrix

پروازهای اول، دوم و پنجم بلافاصله بعد از رسیدن گیتی به آنها تخصیص داده می‌شوند بنابراین برای دریافت گیت منتظر نمی‌مانند. اما پرواز سوم برای دریافت سرویس باید منتظر خروج پرواز اول و پرواز چهارم باید منتظر خروج پرواز دوم بماند. با فرض رعایت قیود مقدار تابع هدف به صورت برابر است با:

$$F= (0+4+5) +d\times1+\theta\times0=9+d$$

که d میزان جریمه به ازای هر پروازی است که به گیت متناسب تخصیص داده نشده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش پایه، از مقدار تابع هدف و مجموع زمانهای بیکاری گیت‌ها استفاده شده است. در ادامه به تشریح هر یک از معیارهای ارزیابی پرداخته می شود.

الف) کمینه کردن تابع هدف: تابع هدف بدنبال کمینه کردن زمان بیکاری گیت‌ها، کاهش جریمه ناشی از تخصیص ناهمگن

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

گیت به پرواز و همچنین کاهش جریمه‌های ناشی از انتقال پرواز به جایگاه راه دور می‌باشد. هرچه مقدار این تابع کمتر باشد، مطلوبیت راه حل پیدا شده بیشتر خواهد بود.

ب) مجموع زمان‌های بیکاری گیت‌ها: هر چه مقدار مجموع زمان‌های بیکاری گیت‌ها کمتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر خواهد بود. زیرا گیت‌ها به عنوان یک منبع در یک سیستم محسوب شده و استفاده حداکثری از آن‌ها موجب افزایش بهره‌وری در سیستم می‌شود.

٤- نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی پرداخته می‌شود. پارامترهای اولیه برای الگوریتم‌های پایه و پیشنهادی به ترتیب در جدول (٦) آورده شده است. این الگوریتم‌ها برای هر یک از سناریوها تعریف شده در بخش دوم از همین بخش، به تعداد ١٠ بار اجرا شده و میانگین نتایج محاسبه شد.

جدول ٦. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Algorithm Iteration	**1000**
Initial Population	100
Cross-over Rate	0.8
Mutation Rate	0.2

Table 6. Genetic Algotithm Parameters

در شکل (٤) تابع هدف برای همه سناریوهای مختلف و برای هر دو الگوریتم پایه و پیشنهادی آورده شده است.

شکل ٤. تابع هدف

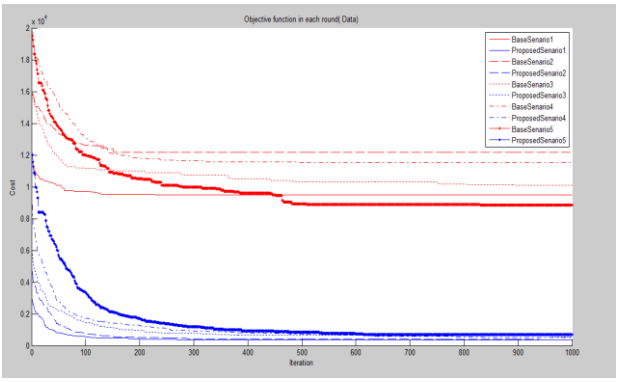

Fig. 4. Objective function

از آنجایی که در مدل پیشنهادی جمله زمان به عنوان یک قید در نظر گرفته شده است، تابع هدف علاوه‌بر تضمین بسته شدن تمام گیت‌ها در زمان مورد نظر، مقدار کمتری را نیز نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر تابع هدف برای حالتی که تمامی قیود رعایت شده باشند در شکل (٥) آورده شده است.

شکل ٥. مقدار تابع هدف برای بهترین پاسخ

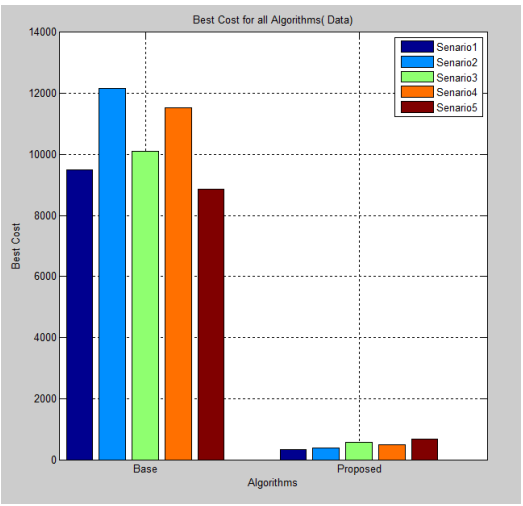

Fig. 5. Objective function value for the best answer

در شکل (٦) مجموع زمان بیکاری همه گیت‌ها در هر دور آورده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است روش پیشنهادی زمان بیکاری کمتری را نشان می‌دهد. در این بخش به منظور نشان دادن کارایی این الگوریتم نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از روش الگوریتم پایه مقایسه شد. جواب‌های بدست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد.

شکل ٦. مجموع زمان بیکاری

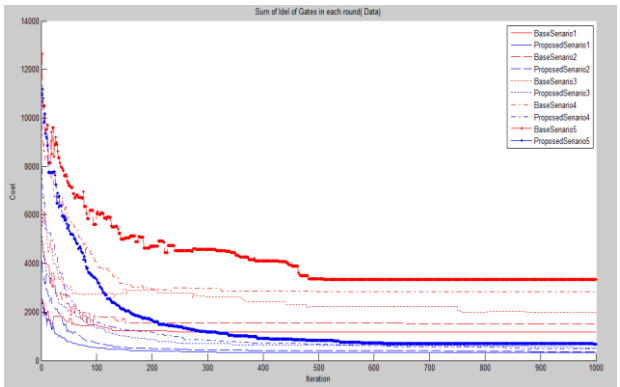

Fig. 6. Total of idle time

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

در جدول (۷) میزان بهبود حاصل از روش پیشنهادی نسبت به روش پایه برای سناریوهای اول تا پنجم را نشان داده شده است. میزان بهبود در مقدار تابع هدف برای هر پنج سناریو بین ۹۲/۳ تا ۹۷/۰ درصد و میانگین آن‌ها ۹۵/۲ درصد بوده است. همچنین درصد بهبود برای مجموع زمان بیکاری، از ۷۲/۸ تا ۸۲/٤ درصد در نوسان بوده و میانگین آن ۷۷/۱ درصد برای پنج سناریو بوده است. این اعداد نشان می‌دهند که درصد بهبود تابع هدف، مقدار بالاتری را نسبت به درصد بهبود زمان بیکاری کل نشان می‌دهد. همچنین سناریوی سوم با میانگین بهبود کلی بیشتر، درصد سازگاری بیشتری را برای این روش نشان می‌دهد.

جدول ۷. مقادیر بهبود برای تمام سناریوها

Parameters	Scenario	Values
Objective Function (Base)	1	9,489
	2	12,161
	3	10,094
	4	11,526
	5	8,866
Objective Function (Suggested)	1	341
	2	371
	3	564
	4	498
	5	681
Total Idle Time (Base)	1	1,178
	2	1,521
	3	1,994
	4	2,827
	5	3,349
Total Idle Time (Suggested)	1	321
	2	351
	3	524
	4	498
	5	681
Objective Function Improvement Percent	1	96.41
	2	96.95
	3	94.41
	4	95.68
	5	92.32
Total Idle Time Improvement Percent	1	72.75
	2	76.92
	3	73.72
	4	82.38
	5	79.67

Table 7. Improvement value for All scenarios

٥- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا به بررسی و مرور روش‌هایی که برای مسأله تعیین و تخصیص گیت در سال‌های اخیر انجام شده است، پرداخته شد. سپس با بررسی مدل‌های ریاضی ارائه شده، یک مدل بهینه برای این مسأله ارائه شد که محدودیت ایمنی عملیاتی و همچنین اثر MARS را در نظر می‌گیرد. هدف اصلی به کمترین کردن زمان اتلاف گیت (برای رسیدن به وضعیت بهینه مطلوب) است در حالی که این اطمینان نیز حاصل می‌شود که میان اندازه هر هواپیما و نوع گیت تخصیص داده‌شده برای آن تناسب وجود داشته و از خطرات احتمالی بدلیل تداخل عملیاتی محوطه بارگیری گیت اجتناب می‌شود. از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسأله کمک گرفته شد و براساس سناریوهای استاندارد تعریف شده در مقاله پایه، روش پیشنهادی بهبود قابل توجهی را نسبت به روش مورد مقایسه نشان می‌دهد.

٦- مراجع

[1] Cheng Y. 1998 Solving push-out conflicts in apron taxiways of airports by a network-based simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 351–369.

[2] Babić O., Teodorović D., and Tošić V., 1984 "Aircraft Stand Assignment to Minimize Walking." *Journal of Transportation Engineering*, 110 (1), 55–66.

[3] Mangoubi R., Mathaisel F. 1985 OPTIMIZING GATE ASSIGNMENTS AT AIRPORT TERMINALS. *Transportation Science*, 19(2), 173–188.

[4] Bihr R. 1990 A Conceptual Solution to the Aircraft Gate Assignment Problem Using 0,1 Linear Programming. *Computers and Industrial Engineering* 19, 280-284.

[5] Haghani A., Chen M. 1998 Optimizing Gate Assignments at Airport Terminals. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32 (6), 437–454.

[6] Jiefeng X., Bailey G. 2001 The Airport Gate Assignment Problem: Mathematical Model and a Tabu Search Algorithm. *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, 77.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

[7] Maharjan B., Matis T. 2011 An Optimization Model for Gate Reassignment in Response to Flight Delays. *Journal of Air Transport Management*, 17(4), 256-261.

[8] Atkin J. A. D., Burke E. K., Ravizza S. 2011 A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding. In Proceedings of the 5th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications, Phoenix, USA.

[9] Kim S. H., Feron E. 2012 Impact of gate assignment on gate holding departure control strategies. *In Proceedings of the IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference*, IEEE, Williamsburg, USA, 4E3-1–4E3-8.

[10] Narciso E., Piera M. 2015 Robust Gate Assignment Procedures from an Airport Management Perspective, *Omega*, 50, 82-95.

[11] Liu S., Chen W., Liu J. 2016 Robust assignment of airport gates with operational safety constraints. *International Journal of Automation and Computing*, 13(1), 31-41.

[12] Pternea M., and Haghani Ali., 2018 Mathematical Models for Flight-to-Gate Reassignment with Passenger Flows: State-of-the-Art Comparative Analysis, Formulation Improvement, and a New Multidimensional Assignment Model, *Computers and Industrial Engineering*, 123, 103–118.

[13] Safari H., Faghih A., 2015 Solve project scheduling problems with resource constraints using a modified Imperialist Competitive Algorithm, *Industrial Management Journal*, 7(2), 333-364 (In Persian).

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]

Mathematical Model of Optimal Assignment of Aircraft to Apron Gates with Safety Constraint Considerations

1- Mostafa Farajollahi, MSc, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2- Ali Abdi Kordani* (Corresponding Author), Professor, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Alireza Sarkar, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

4- Majid Shadman, PhD Candidate, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

*** Aliabdi@eng.ikiu.ac.ir**

Abstract:
Airports are one of the most vital infrastructures of any country, which play an important role in transporting cargo and passengers to different parts of the world. The preservation and optimal use of airport resources and assets is one of the main goals of airport managers. On the other hand, airlines have a special concern on saving time, fuel consumption, maintaining passenger satisfaction, and so on. One of the most important resources in the world's major airports are the gates of the passenger terminals of airports, which have an undeniable aspect in the better performance of the airport. The assigning of aircraft to these gates has long been a concern for researchers in operations research as well as air transport activists. This research deals with the issue of assigning aircraft to the passenger terminal gate. The problem of optimal gate assignment is a complex issue and requires consideration of many parameters and variables in order to achieve the desired result. In this research, it's tried to solve the gate allocation problem by presenting a suitable model. Providing an appropriate linear model is one of the main challenges of the problem. A special attention has been paid to the issue of safety. Therefore, by applying safety restrictions, a suitable model is provided. The main purpose of this study is to minimize the scatter of idle (lost) gates while not preventing mismatch between flight size and gate and also justifying safety needs. These cases are assigned and examined in the framework of the optimization model in this research. To solve such problems, which are usually not possible by manual calculations or are very time consuming, the metaheuristic algorithms are used. Since because NP-Hard nature of problem, it is very time consuming and difficult in the usual way. Therefore, this study tries to provide an efficient and fast way to solve the gate assignment problem. In the proposed method, first all the sentences of the objective function were considered as, then all were divided into two categories of hard and soft constraints. On the other hand, in the model of the basic method, the power of two terms in the objective function is used. The proposed model was modified. In the end, it was tried to modify the terms of the objective function and constraints in such a way that in addition to meeting the expectations and constraints of the problem, it allows the use of two flights from the same gate (MARS effect) to increase resource efficiency. The method is based on a genetic algorithm that includes the initial population, selection, combination or mutation, generation of a new offspring, and re-selection. In this study, 5 scenarios with various flights and gates have been used. The improvement of total idle times in the first scenario was 72.75%, in the second scenario 76.92%, in the third scenario 82.38%, in the fourth scenario 82.38% and in the fifth scenario 79.67%. All of results. Show the efficiency of proposed model.

Keywords: Mathematical model, Gate assignment, Apron, Safety, Genetic Algorithm

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-14]

[DOI: 0.22034/23.4.7]