

## زمان بندی ماشین های سری انعطاف پذیر با مدل دومعیاره برای بهینه کردن ظرفیت بخش هوایی فرودگاه

علی عبدی<sup>1\*</sup>، ابراهیم اسدی<sup>2</sup>، محمود صفارزاده<sup>3</sup>، فریبرز جولای<sup>4</sup> و نسیم نهبانندی<sup>5</sup>

<sup>1</sup>دکترای مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>2</sup>دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>3</sup>استاد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>4</sup>دانشیار مهندسی صنایع، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران

<sup>5</sup>استادیار مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت 87/11/14، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 90/3/4، تاریخ تصویب 90/6/27)

### چکیده

در این تحقیق برای اولین بار از مدل ماشین های سری انعطاف پذیر (flexible flow shop) برای در نظر گرفتن تخصیص همزمان باندها و برنامه ریزی عملیاتی استفاده شده است. یکی از مزایای توسعه این مدل، در نظر گرفتن مسیرهای هوایی داخل فضای هوایی فرودگاهها است که سبب تشابه مدل با شرایط واقعی می شود. همچنین با توجه به ماهیت دو مرحله مسیرهای هوایی و باندها از حالت No-Wait بین دو مرحله استفاده شده است. با توجه به اینکه در ادبیات موضوع فرودگاهی توابع هدف متفاوتی وجود دارد، یک مدل دومعیاره برای این مسئله ارائه شده و برای حل این مدل از روش فراابتکاری SA استفاده شده است. از مزایای مدل پیشنهادی، در نظر گرفتن فاصله جدایی بین هواپیماها است. از این رویکرد می توان به عنوان یک سیستم کمک کننده در تصمیم گیری استفاده کرد که کاهش دهنده تأخیرات و بهبود دهنده توان عملیاتی فرودگاهها است.

**واژه های کلیدی:** تخصیص، برنامه ریزی عملیاتی، توالی، مدل ترکیبی، Simulated annealing، ماشین های

سری انعطاف پذیر، تابع هدف دومعیاره

### مقدمه

یک سیستم پشتیبان تصمیم گیری که شامل الگوریتم های کنترل و برنامه ریزی باشد، ضروری به نظر می رسد [3]. یکی از روش های افزایش ظرفیت باندها، افزایش تعداد آنها است؛ ساخت باندهای جدید اغلب به دلیل تحمیل هزینه های زیاد و اشغال زمین، امکان پذیر نیست. همچنین افزایش تعداد باندها بدون تخصیص و برنامه ریزی عملیاتی بهینه، تأثیر چندانی نخواهد داشت. اینکه از کدام باند، برای کدام عملیات و در کدام زمان استفاده شود، مهم ترین بخش تعیین ظرفیت سیستم باندها را تشکیل می دهد. افزایش تعداد، پیچیدگی هندسی، مکان و تعیین موقعیت باندها، نقاط تقاطع باندها، مسیر پایانی باندها و بار کاری کنترل کنندگان ترافیک هوایی، از جمله موارد مهمی هستند که بدون برنامه ریزی عملیاتی و تخصیص بهینه، سبب اتلاف مقدار زیادی از ظرفیت باندها و در نهایت فضای هوایی می شوند. به علاوه تأخیرات به وجود آمده

امروزه با افزایش تقاضا در فرودگاهها، باندهای پروازی به عنوان نقطه گلوگاهی مطرح شده اند. در بسیاری از فرودگاهها که در اکثر ساعات روز با حداکثر ظرفیت خود کار می کنند، باندها به عنوان یک منبع بحرانی مطرح هستند، به گونه ای که ظرفیت آنها دستخوش تغییراتی ناشی از شرایط آب و هوایی و شرایط دید قرار می گیرند که سبب به وجود آمدن تأخیرات زیادی در پروازهای ورودی و خروجی می شود. بنابراین ظرفیت باندها باید به صورت کارا مورد استفاده قرار گیرد [1].

ظرفیت فرودگاه بر اساس مجموع عملیات ورودی و خروجی بیان می شود [2]. سطوح تقاضای موجود و پیش بینی شده باعث می شود که نیاز به افزایش ظرفیت فرودگاهها، کاهش تأثیرات محیطی (تشعشعات امواج موتور) و هزینه های ناشی از عملیات غیرکارا (مصرف سوخت) بیشتر حس شود. برای تأمین این نیازها، وجود

نظر گرفته می‌شود که به شکل موازی قرار دارند. در مرحله دوم این مدل، مانند مرحله اول، به تعداد باندها، ماشین وجود دارد که سرعت انجام کار این ماشین‌ها متفاوت است. در این مدل، هواپیماها به عنوان کار در نظر گرفته شده است.

### ساختار مدیریت ترافیک هوایی

در تعدادی از تحقیقات اخیر، ساختار جدیدی برای ATM<sup>1</sup> پیشنهاد شده است که پایه این مقاله است. این ساختار می‌تواند سبب استفاده مفید از سیستم‌های کمک-کننده در تصمیم‌گیری<sup>2</sup> برای کنترل‌کنندگان ترافیک هوایی شود؛ زیرا این ساختار سبب ایجاد ارتباط بین بخش‌های مهم ترافیک هوایی می‌شود. مهم‌ترین بخش ترافیک هوایی ROM<sup>3</sup> است که در واقع جزئی از سیستم سراسری ATM است و از تصمیمات گرفته شده در سایر بخش‌های ROM تأثیر می‌پذیرد. وظایف اصلی ROM عبارتند از:

- (1) مدیریت ترکیب باندها که شامل برنامه‌ریزی‌های راهبردی مانند ترکیب ساختار باندهای مورد استفاده، روش‌های عملیاتی مورد استفاده در هر ترکیب و زمان‌های تغییر این ترکیب‌ها است؛
- (2) مدیریت تخصیص باندها که تعیین‌کننده باندی است که باید به یک هواپیمای مشخص تخصیص یابد؛
- (3) برنامه‌ریزی عملیات باندها، یعنی برنامه‌ریزی تاکتیکی استفاده از باندها برای پروازهای ورودی و خروجی [5].

اگر چه بعضی از محققان این 3 بخش را به صورت سلسله‌مراتبی در نظر گرفته‌اند، اما در این تحقیق مدیریت تخصیص باندها و برنامه‌ریزی عملیات باندها با هم در نظر گرفته شده است.

### برنامه‌ریزی عملیاتی باندها

فرآیند تخصیص زمان باندها به عملیات مربوطه، یک وظیفه چالش‌برانگیز در همه فرودگاه‌های شلوغ است. برنامه‌ریزی و کنترل، دو وظیفه تاکتیکی هستند که باید بدون صرف‌نظر کردن از رابطه آنها، از یکدیگر تمییز داده شوند. این رابطه اغلب روشن و قابل رؤیت نیست، زیرا در بسیاری از مواقع، کنترل‌کننده، این دو کار را همزمان و به

منجر به پیامدهایی نظیر از بین رفتن منابع اقتصادی و رضایت نداشتن استفاده‌کنندگان (خطوط هوایی و مسافران) از فرودگاه‌ها می‌شود [4].

در این تحقیق، برای اولین بار از مدل ریاضی سری انعطاف‌پذیر در حالت No-wait برای تخصیص همزمان باندها و برنامه‌ریزی عملیاتی استفاده شده است. در این مدل، از زمان آماده‌سازی مبتنی بر توالی برای نشان دادن فاصله جدایی بین هواپیماها استفاده شده است که سبب می‌شود مدل، به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود. همچنین از یک تابع هدف دومعیاره (مدن زمان تأخیر و مدت زمان اشغال باندها و مسیرهای هوایی به وسیله هواپیماها) برای این مدل ریاضی استفاده شده است. برای حل این مدل از روش فراابتکاری SA استفاده شده است که جواب اولیه آن با استفاده از سه روش تصادفی، روش WEDD و روش ابتکاری تولید شده است.

بخش‌های مختلف این تحقیق بدین صورت است: در ادامه، توضیحاتی درباره موضوع تخصیص هواپیماها به باندها و نقش بخش‌های مختلف فرودگاهی در این زمینه داده خواهد شد. سپس با استفاده از رویکرد زمان‌بندی، این مسئله مدل می‌شود و مدل ریاضی مربوطه شرح داده می‌شود. در بخش بعدی، رویکردهای مختلف برای حل این مسئله شامل الگوریتم WEDD، الگوریتم ابتکاری و الگوریتم SA به طور خلاصه توضیح داده می‌شود و در نهایت نتایج مربوط به حل این مدل ارائه خواهد شد.

### توضیح مسئله

باندهای فرودگاه از جمله منابعی هستند که باید به عملیات فرودگاهی مختلف (ورود، خروج و تقاطع) تخصیص یابند. چون سیستم باندها به عنوان منبعی که باید بین همه هواپیماها تقسیم شود، بنابراین باندها گلوگاه سیستم فرودگاهی است که سبب به‌وجود آمدن محدودیت ظرفیت فرودگاه و یا افزایش تأخیرات می‌شود؛ در نتیجه باید از منابع فرودگاهی حداکثر استفاده شود. در این تحقیق، سعی در تخصیص هواپیماها به مسیرهای هوایی و باندها شده است، به گونه‌ای که مقدار تابع هدف مورد نظر که ترکیبی از مدت زمان تأخیر و زمان اشغال باندها توسط هواپیماها است، کمینه شود. در این تحقیق، از مدل زمان‌بندی ماشین‌های سری انعطاف‌پذیر استفاده شده است که مرحله اول به تعداد مسیرهای هوایی، ماشین در

باند به عملیات ورودی و یک باند به عملیات خروجی تخصیص می‌یابد). همان‌طور که مشخص است این نوع تصمیم‌گیری لزوماً منجر به برنامه‌ریزی و استفاده بهینه از باندها نمی‌شود.

بعضی از تحقیقات فقط برنامه‌ریزی عملیات ورودی و هزینه خطوط هوایی را در نظر می‌گیرند [8]. به دلیل وابستگی میان پروازهای ورودی و خروجی، انتظار می‌رود که اگر این پروازها با هم در نظر گرفته شوند، باعث صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌ها شود [1]. بعضی از محققان تخصیص همزمان پروازهای ورودی و خروجی را در نظر می‌گیرند. بنابراین برای افزایش توان عملیاتی فرودگاه، باید تخصیص عملیات ورودی و خروجی و تخصیص باندها به‌طور همزمان انجام گیرد.

## استفاده از زمان‌بندی برای تجزیه و تحلیل مسئله

زمان‌بندی، تخصیص منابع در طول زمان برای انجام کارهای مشخص است. فرآیند زمان‌بندی اغلب نیازمند توالی و تصمیم‌گیری در مورد تخصیص منابع است [9]. برای اینکه تابع هدف ارضا شود، نه تنها باید توالی پروازهای ورودی و خروجی در هر باند به شکل بهینه انجام گیرد، بلکه باید این کار در همه باندها انجام گیرد. یکی از تصمیم‌گیری‌های مهم در زمینه زمان‌بندی، انتخاب تابع هدف مناسب است. تابع هدف‌هایی که اغلب در ادبیات فرودگاهی استفاده می‌شود شامل حداقل کردن میانگین زمان اشغال باند، حداقل کردن حداکثر زمان اشغال باند، حداقل کردن میانگین تأخیر هواپیماها، حداقل کردن حداکثر تأخیر هواپیماها، حداقل کردن تعداد کارهای دیرکردار است. در این تحقیق، از تابع هدف دومعیاره استفاده شده است که شامل مدت زمان تأخیر هواپیماها و مدت زمان اشغال باندها و مسیرهای هوایی توسط هواپیماها (Flow Time) است.

در اینجا لازم به ذکر است که در ادامه از مدل گراهام برای نشان دادن مسائل موجود در زمان‌بندی استفاده می‌شود. این مدل به صورت  $\alpha/\beta/\gamma$  است که در آن  $\alpha$  نشان‌دهنده نوع مسئله،  $\beta$  نشان‌دهنده خصوصیات کارها و  $\gamma$  نشان‌دهنده معیار بهینه‌سازی است [10].

## مدل ریاضی

طور ذهنی انجام می‌دهد. یک طرح موفق از سیستم ROP<sup>4</sup>، باید یکپارچگی لازم میان تابع هدف‌های مختلف، محدودیت‌ها، کنترل‌ها و ورودی همه بخش‌های موجود در عملیات زمینی را فراهم کند. پس مسئله برنامه‌ریزی عملیاتی فرودگاه یک مسئله بهینه‌سازی است که به‌وسیله بخش‌های عملیاتی و مالی مانند استفاده‌کنندگان از فرودگاه‌ها (خطوط هوایی و مسافران) و فراهم‌کننده خدمات ATM (تصمیم‌گیرندگان در فرودگاه و کنترل-کنندگان هوایی) تحت تأثیر قرار می‌گیرد [5].

## مدیریت تخصیص باندها

تخصیص هواپیماها (ورودی و خروجی) به باندها همیشه یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های کنترل‌کنندگان است. زیرا آنها اغلب در تقاضاهای زیاد باید تصمیمات سریعی بگیرند که اغلب منجر به استفاده کامل از ظرفیت در دسترس باندها نمی‌شود [6].

تخصیص هواپیماهای ورودی به باندها، یک تصمیم تاکتیکی است که به وسیله کنترل‌کنندگان انجام می‌گیرد. فرآیند برنامه‌ریزی تاکتیکی مربوط به زمان‌بندی هواپیماهای ورودی، نیاز به هماهنگی بین کنترل‌کنندگان دارد و در نهایت منجر به افزایش بار کاری و تأخیرات می‌شود [7]. در ضمن چنین فرآیندی برای عملیات خروجی هم وجود دارد، اگر چه تخصیص عملیات ورودی و خروجی به‌طور مستقل انجام می‌گیرد.

اغلب بسیاری از تحقیقات انجام‌گرفته در این زمینه در مورد هواپیماهای ورودی انجام شده است؛ چون پروازهای ورودی نسبت به پروازهای خروجی اولویت دارند [6]. در این تحقیق نیز تمرکز بر پروازهای ورودی است و از پروازهای خروجی صرف‌نظر شده است.

## موارد مورد نیاز برای ترکیب ROP و ROM

تخصیص باند به هواپیماها در یک فرودگاه تک بانده، موضوع مهمی نیست و فقط برنامه‌ریزی عملیات ورودی و خروجی در این نوع فرودگاه‌ها مهم است. اما در فرودگاه‌های چندبانده علاوه بر برنامه‌ریزی عملیاتی نیاز به تخصیص هواپیماها به باندها است که این خود کار پیچیده‌ای است. این پیچیدگی سبب افزایش بار کاری کنترل‌کننده شده و در نهایت منجر به استفاده از روش‌های ساده برای تخصیص باندها می‌شود (مثلاً یک

	زمان فرود آید (در مرحله ی $i$ )
	برابر با 1 و در غیر این صورت 0
$T_j$	میزان تأخیر هواپیمای $j$
$F_j$	میزان اشغال باند و مسیر هوایی به وسیله ی همایمای هواپیمای $j$
$\lambda$	ضریب اهمیت معیارها

مدل ریاضی مسئله به این شرح است:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \lambda \cdot T_j + \sum_{j=1}^n w_j \cdot (1-\lambda) \cdot F_j \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{k=1}^{s_i} X_{ijk} = 1 \quad (2)$$

$$\forall j: 1 \leq j \leq n \quad \forall i: 1 \leq i \leq 2$$

$$C_{1j} \geq \sum_{k=1}^{s_1} p_{1jk} \cdot X_{1jk} \quad (3)$$

$$\forall j: 1 \leq j \leq n$$

$$C_{2j} = C_{1j} + \sum_{k=1}^{s_i} p_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (4)$$

$$\forall j: 1 \leq j \leq n$$

$$C_{ij} + M \times (3 - X_{ijk} - X_{ilk} - Y_{ilj}) \geq C_{il} + p_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (5)$$

$$\forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \quad \forall i: 1 \leq i \leq 2.$$

$$C_{il} + M \times (2 - X_{ilk} - X_{ijk} + Y_{ilj}) \geq C_{ij} + p_{ilk} \cdot X_{ilk} \quad (6)$$

$$\forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \quad \forall i: 1 \leq i \leq 2.$$

$$F_j \geq C_{j2} - r_j \quad (7)$$

$$T_j \geq C_{j2} - d_j \quad (8)$$

$$C_j, T_j \geq 0 \quad (9)$$

$$X_{ijk} = \{0,1\}, \quad Y_{ilj} = \{0,1\} \quad (10)$$

حال در این قسمت محدودیت فاصله جدایی به مدل اضافه می شود. برای نشان دادن فاصله جدایی دو محدودیت زیر به مدل اضافه می شوند:

برای مدلسازی مسئله، از مدل زمان بندی ماشین های سری انعطاف پذیر (FFS) استفاده می شود. اغلب در فرودگاه ها و قبل از مرحله باندها، تعدادی مسیر هوایی وجود دارد که می توان آنها را به عنوان یک مرحله مجزا در نظر گرفت که در آن تعدادی ماشین به طور موازی قرار دارد. در مرحله دوم نیز که مانند مرحله اول است، تعدادی باند به طور موازی قرار دارند. در نتیجه می توان مدل مسئله را به شکل ماشین های سری انعطاف پذیر دو مرحله ای در نظر گرفت که در هر مرحله تعدادی ماشین با سرعت های متفاوت وجود دارند. در این مدل از حالت No-Wait در زمان تکمیل کار هواپیماها در بین دو مرحله استفاده شده است؛ چون هر هواپیما بلافاصله بعد از طی مسیر هوایی بدون هیچگونه تأخیری باید وارد باندها شود و نمی تواند در بین این دو مرحله منتظر بماند. یکی از مهم ترین مزایای این مدل نسبت به مدل های قبلی این است که سبب شده است این مدل به شرایط واقعی نزدیک است استفاده از فاصله جدایی هواپیماها می باشد. در این مدل فاصله جدایی و زمان در دسترس بودن هواپیماهای ورودی (خروجی) به (از) نقاط ثابت در نظر گرفته می شود. تابع هدف استفاده شده در اینجا، ترکیبی از مدت زمان تأخیر و زمان اشغال باندها توسط هواپیماها است. در این مدل از پارامترهایی زیر استفاده شده است:

$j, l$	شاخص هواپیما (کار)
$i$	شاخص مراحل
$n$	تعداد هواپیماها
$m$	تعداد مراحل
$z$	تعداد مسیرهای هوایی
$P_{ijk}$	مدت زمان فرآیند هواپیمای $j$ در مرحله $i$
	روی باند یا مسیر هوایی
$w_j$	عامل وزنی هواپیماها
$r_j$	زمان ورود ژامین هواپیما به فضای هوایی
$d_j$	موعد تحویل هواپیمای $j$
$C_{ij}$	زمان تکمیل کار هواپیمای $j$ در مرحله $i$
$M$	عدد بسیار بزرگ
$X_{ijk}$	متغیر صفر و یک، اگر هواپیمای $j$ به مسیر هوایی یا باند $k$ در مرحله $i$ تخصیص یابد
	برابر با 1 و در غیر این صورت 0
$Y_{ilj}$	متغیر صفر و یک، اگر $l$ امین هواپیما قبل از

هوایمای متوالی در مرحله مسیره های هوایی یا باند، برابر با مدت زمان فرآیند هوایمای پسرو است.

7 و 8. محاسبه پارامترهای تابع هدف: این دو محدودیت به ترتیب نشان دهنده میزان اشغال باندها به- وسیله هوایماها و مقدار تأخیر است.

9 و 10. متغیرها: این دو محدودیت نوع متغیرها را نشان می دهد.

11 و 12. (محدودیت فاصله جدایی هوایماها در مسیره های هوایی و باندها): در اینجا اختلاف بین زمان آغاز کار هوایمای پسرو در مرحله مسیره های هوایی یا باندها برابر با فاصله جدایی این دو هوایما به علاوه مدت زمان جدایی دو هوایما است.

### آنالیز حل مسئله

از آنجا که مسئله  $\sum w_j.T_j$ ، NP-HARD است [10 و 11]، در نتیجه مسئله  $FFS|r_j, no-wait|\sum w_j.\lambda.T_j + \sum w_j.(1-\lambda).F_j$  که مشتق مسئله بالا است، نیز NP-HARD است. به همین دلیل حل این مدل با استفاده از روش های دقیق برای مسائل بزرگ امکان پذیر نیست. در نتیجه در این تحقیق از روش های ابتکاری استفاده شده است.

### الگوریتم SA

الگوریتم SA یک روش جستجوی تکراری است که در آن جواب اولیه با استفاده از یک سری تغییرات محلی کوچک بهبود می یابد، تا زمانی که جواب به دست آمده دیگر بهبود نیابد. این روش در سال 1983 توسط کرکپاتریک و همکاران [12] به وجود آمد. الگوریتم SA یک شبیه سازی از مکانیزمی برای بازپخت فیزیکی مواد جامد است. این مفهوم از بحث علم مواد می آید که در آن، مواد جامد ابتدا ذوب می شوند و سپس به طور آهسته سرد می شوند تا به یک تعادل ترمودینامیک برسند.

روش SA اغلب یک روش بهینه سازی است که تابع هدف  $F$  را در فضای گسسته  $S$  حداقل می کند. با شروع از یک جواب اولیه  $s \in S$  جواب دیگری  $s' \in S$  را در همسایگی  $s$  با استفاده از روش های ابتکاری به وجود می آورد. در این حالت مقدار  $f(s')$  را با مقدار  $f(s)$  مقایسه می کند و میزان  $\delta = f(s') - f(s)$  را محاسبه می کند. اگر میزان تابع هدف کاهش یابد

$$C_{ij} - p_{ijk}.X_{ijk} + M \times (3 - X_{ijk} - X_{ilk} - Y_{ilj}) \geq C_{il} + S_{lj} \quad (11)$$

$$\forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \forall i: 1 \leq i \leq 2.$$

$$C_{il} - p_{ilk}.X_{ilk} + M \times (2 - X_{ilk} - X_{ijk} + Y_{ilj}) \geq C_{ij} + S_{jl} \quad (12)$$

$$\forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \forall i: 1 \leq i \leq 2.$$

در این مدل  $S_{l,j}$  فاصله جدایی بین دو هوایمای  $l, j$  است که در آن هوایمای  $l$  قبل از  $j$  سرویس می گیرد.

### توضیح مدل

در این بخش، مدل ریاضی ارائه شده در قسمت قبل شرح داده می شود:

1. (تابع هدف): تابع هدف این مدل دو معیار دارد که با استفاده از روش وزنی با هم ترکیب شده اند. معیار اول مقدار تأخیر وزن دار هوایماها و معیار دوم مدت زمان اشغال باندها و مسیره های هوایی به وسیله هوایماها است.
2. (محدودیت تخصیص هوایمای  $j$  در هر مرحله): این محدودیت بیان می کند که هر هوایمای مفروضی مانند  $j$  فقط به یکی از مسیره های هوایی یا باندها تخصیص می یابد.
3. (محدودیت بین زمان اتمام کار هوایمای  $j$  در مرحله مسیره های هوایی و زمان در دسترس بودن هوایمای مفروض): این محدودیت این مطلب را بیان می کند که زمان اتمام کار هوایمای  $j$  در مرحله اول یا مسیره های هوایی حداقل به اندازه زمان در دسترس بودن هوایمای  $j$ ، به علاوه مدت زمانی است که طول می کشد تا هوایمای مفروض از مسیر هوایی مربوطه عبور کند.
4. (محدودیت بین زمان تکمیل کار هوایمای مفروض  $j$  در مرحله اول (مسیره های هوایی) و مرحله دوم (باندها)): این محدودیت نشان می دهد که زمان تکمیل کار هوایمای  $j$  در مرحله دوم، به طور دقیق برابر با زمان تکمیل کار هوایمای مفروض در مرحله اول، به- علاوه مدت زمان عبور هوایما از باند مربوطه است.

- 5 و 6. (محدودیت عدم هم پوشانی سرویس دهی به هوایماها در یک مسیر هوایی یا باند (با توجه به زمان پردازش)): در اینجا اختلاف بین زمان اتمام کار دو

### - روش تصادفی

در این روش همه فرآیند تولید جواب اولیه به طور تصادفی انجام می‌گیرد. گام‌های این روش به این شکل است:

- (1) تولید ترتیب اولیه هواپیماها به طور تصادفی؛
- (2) تقسیم این ترتیب به طور تصادفی به تعداد مسیرهای هوایی و قرار دادن روی مسیرهای هوایی
- (3) تقسیم این ترتیب به طور تصادفی به تعداد باندها و قرار دادن روی باندها.

### - الگوریتم WEDD

روش دومی که برای به دست آوردن جواب اولیه استفاده شده است، الگوریتم WEDD است. گام‌های این روش به این صورت است:

- (1) مرتب کردن هواپیماها با استفاده از ترتیب زیر:
 
$$\frac{d_{(1)}}{w_{(1)}} \leq \frac{d_{(2)}}{w_{(2)}} \leq \dots \leq \frac{d_{(n)}}{w_{(n)}}$$
 که در آن  $d_{(j)}$  و  $w_{(j)}$  به ترتیب موعد تحویل و وزن هواپیما هستند
- (2) تقسیم ترتیب به وجود آمده به طور تصادفی به تعداد مسیرهای هوایی و قرار دادن روی مسیرهای هوایی
- (3) تقسیم این ترتیب به طور تصادفی به تعداد باندها و قرار دادن روی باندها.

### - الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

این روش یک روش کاملاً ابتکاری بوده که بر پایه الگوریتم WEDD است که تغییراتی روی آن انجام گرفته است. گام‌های این روش به این ترتیب است:

گام 1: زمان پردازش مجازی هواپیمای  $\lambda_m$  روی باند  $m$  را از رابطه زیر محاسبه کنید:

$$P_{ij} + \min_{k \in \text{Runway}(i)} P'_{kj} = P_{ij}^* \quad (30)$$

گام 2: هواپیماها را بر اساس الگوریتم WEDD اولویت‌دهی شده و با توجه به زمان‌های پردازش مجازی به باندها تخصیص داده می‌شوند (در این گام فرض می‌شود مرحله مسیرهای هوایی وجود ندارد).

گام 3: پس از تعیین تخصیص هواپیماها به باندها، در مسئله اصلی به صورت پسر، عمل زمان‌بندی انجام می‌شود تا زمان شروع عملیات نشست هر هواپیما روی

$(\delta < 0)$  جواب جدید به طور خودکار انتخاب می‌شود و این جواب نقطه جدید برای جستجو است. اما اگر میزان تابع هدف افزایش یابد  $(\delta \geq 0)$ ، این جواب ممکن است با یک احتمال قبول شود که مقدار آن برابر با  $\exp(-\delta/T)$  است. در اینجا  $T \in R$  پارامتر کنترلی الگوریتم است که دما نام دارد. اهمیت  $T$  در اجرای الگوریتم کاملاً مشهود است. این درجه حرارت هر  $NT$  مرحله کاهش می‌یابد که در آن  $NT$  تعداد تکرارهای لازم (مقدار epoch) در هر مرحله است [13].

### جستجوی همسایگی

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در الگوریتم SA، استفاده از یک الگوریتم همسایگی مناسب است، به گونه‌ای که بتواند با یک مکانیزم ساده به اکثر فضای حل دست پیدا بکند. در ادامه مکانیزمی شرح داد می‌شود که با وجود سادگی، می‌تواند جواب‌های زیادی در فضای حل تولید کند. این مکانیزم به این شرح است:

- مرحله 1) قرار دادن همه هواپیماها در یک ردیف؛
- مرحله 2) انتخاب دو هواپیما به طور تصادفی و تغییر جای آنها؛
- مرحله 3) تقسیم ترتیب هواپیماها به  $Z$  قسمت؛
- مرحله 4) تخصیص بخش 1 به مسیر هوایی 1، بخش 2 به مسیر هوایی 2، ... و بخش  $Z$  به مسیر هوایی  $Z$ ؛
- مرحله 5) قرار دادن همه هواپیماها در مرحله باندها در یک ردیف؛
- مرحله 6) انتخاب دو هواپیما به طور تصادفی و تغییر جای آنها؛
- مرحله 7) تقسیم ترتیب هواپیماها به  $m$  قسمت؛
- مرحله 8) تخصیص بخش 1 به باند 1، بخش 2 به باند 2، ... و بخش  $m$  به باند  $m$ .

### روش‌های تولید جواب اولیه

یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت جواب نهایی SA، کیفیت جواب اولیه استفاده شده است. استفاده از جواب اولیه خوب باعث می‌شود که الگوریتم فقط در بخشی از فضای حل جستجو کند و در کیفیت جواب و مدت زمان حل بهبود حاصل شود. در ادامه 3 روش متفاوت برای به دست آوردن جواب اولیه مطرح می‌شود.

هنگام بررسی مسئله Graph coloring مطرح شد. در سال 1987 جانسون و همکاران [15] از همین رویکرد برای حل مسئله Graph partitioning استفاده کردند. آنها نشان دادند که کیفیت و زمان حل با استفاده از این رویکرد بهبود می‌یابد. اما از روش دوم برای فراهم کردن جواب اولیه خوب با استفاده از الگوریتم SA برای سایر روش‌ها، مانند شاخه‌وکران استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش اول، یعنی استفاده از سایر الگوریتم‌ها برای فراهم کردن یک جواب اولیه خوب برای روش SA، استفاده شده است.

### انتخاب مقادیر اولیه

برای استفاده از روش SA لازم است که مقادیر پارامترهای اولیه که شامل ضریب کاهش دما، درجه حرارت اولیه، درجه حرارت نهایی و تعداد تکرارهای لازم در هر دما (epoch) تعیین شوند. برای این منظور از پارامترهایی مرجع [16] استفاده شده است که به این ترتیب است:

جدول 1: پارامترهای اولیه الگوریتم SA

مقدار	پارامتر
10000	تعداد تکرارها در هر دما
0,9	ضریب کاهش دما
1	درجه حرارت اولیه
0,000005	درجه حرارت نهایی

### نتایج محاسباتی

برای حل مدل ترکیبی مطرح‌شده در ابعاد بزرگ‌تر، SA روش خوبی است. در این بخش، 3 مسئله با استفاده از جدول (2) تعریف شده‌اند. برای این مسئله از سه روش توضیح داده شده در بالا (روش WEDD، ابتکاری و تصادفی) برای به دست آوردن جواب‌های اولیه استفاده شده است.

باند مربوطه به‌دست آید (نحوه انجام عملیات زمان‌بندی پسرو در ادامه شرح داده می‌شود).

گام 4: این زمان‌های شروع نشست برای مرحله مسیره‌های هوایی به عنوان موعد تحویل خواهند بود. حال بر اساس این موعد تحویل‌ها برای مرحله اول، از طریق الگوریتم WEDD تخصیص هواپیماها به مسیره‌های هوایی مختلف و زمان اتمام عملیات آن به‌دست می‌آیند.

گام 5: بر اساس تخصیص‌های به دست آمده در گام 2 برای مرحله باندها و زمان اتمام عملیات مربوط به مرحله مسیره‌های هوایی، زمان‌بندی نهایی هواپیماها با توجه به زمان پردازش واقعی در مرحله باندها تعیین می‌شوند (در این مرحله زمان آغاز و اتمام هر عملیات نشست به‌دست می‌آیند).

گام 6: الگوریتم را خاتمه دهید.

رویه انجام عملیات پسرو به این ترتیب است:

برای هر باند عملیات زیر را انجام دهید:

گام 1: تعداد کارهای تخصیص داده شده به باند

مورد نظر را  $q$  بنامید.

گام 2: هواپیمای  $q$ ام را طوری زمان‌بندی کنید که

زمان اتمام عملیات نشست به طور دقیق برابر موعد تحویل آن  $(d_{(q)})$  شود. در این حالت زمان آغاز نشست را  $st_q$  بنامید. همچنین قرار دهید  $u=q$ .

گام 3: قرار دهید  $u=u-1$ .

گام 4: اگر  $d_{(u)}$  موعد تحویل هواپیمای  $u$ ام باشد، هواپیمای  $u$ ام را طوری زمان‌بندی کنید که زمان اتمام عملیات نشست آن به طور دقیق برابر عبارت زیر شود:

$$\min\{d_{(u)}, st_{(u+1)}\} \quad (31)$$

در این حالت زمان آغاز نشست را  $st_q$  بنامید.

گام 5: اگر  $u=1$  آنگاه الگوریتم را خاتمه دهید. در

غیر این صورت به گام 3 بروید.

### بهبود عملکرد SA

اغلب دو راه برای بهبود عملکرد SA وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از سایر الگوریتم‌ها برای فراهم کردن یک جواب اولیه خوب برای روش SA است و روش دوم استفاده از جواب‌های SA، برای جواب اولیه سایر روش‌ها است. روش اول توسط چمس و همکاران [14]

جدول 2: اطلاعات مسئله

AN	RT	CL	WT	DD	RWY1	RWY2	RWY3	RWY4	PCR1	PCR2	PCR3	PCR4	PCR5	PCR6
1	0	4	0,8	15	6	7	8	4	6	7	9	10	5	7
2	2	1	1	13	2	2	4	5	2	2	4	3	9	9
3	17	2	0,6	29	4	5	3	3	4	5	4	4	8	8
4	7	4	0,5	24	6	6	5	4	7	6	5	2	8	8
5	9	3	0,5	18	4	6	3	4	5	6	3	5	4	10
6	10	1	0,5	27	5	6	6	3	6	6	6	5	10	7
7	3	4	0,7	26	2	3	4	3	3	3	5	5	9	6
8	3	2	0,6	16	2	5	4	5	3	5	4	8	11	3
9	11	3	0,7	35	6	3	4	3	6	3	5	8	12	4
10	19	4	0,5	38	5	4	6	4	6	5	6	10	5	6
11	20	1	0,8	18	2	6	8	6	7	7	10	11	4	4
12	20	1	0,7	19	4	7	8	4	2	7	2	10	5	5
13	20	3	0,7	21	3	7	5	5	2	2	3	8	4	9
14	21	2	0,7	22	3	6	6	4	3	5	5	6	6	10
15	23	3	0,3	23	5	4	7	3	7	3	4	6	7	11
16	25	4	0,5	25	6	3	3	4	5	3	6	6	10	8
17	25	4	0,6	26	3	5	4	4	7	4	6	7	9	4
18	25	1	0,3	26	4	4	4	5	2	6	6	8	8	10
19	25	2	0,4	26	5	4	5	3	3	5	7	11	3	8
20	25	4	0,6	26	5	4	4	6	8	6	8	10	5	4

AN=شماره هواپیما، RT=زمان در دسترس بودن، CL=کلاس، WT=وزن، DD=موعد تحویل، RWY=باند، PCR=مسیر هوایی و

جدول 2: مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هدف مسئله 1 (15 هواپیما، 3 مسیر هوایی و 3 باند)

ضریب	روش WEDD		روش تصادفی		روش ابتکاری	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
0,7 و 0,3	70,85	2,17	74,67	4,11	70,23	2,66
0,8 و 0,2	65,90	2,42	66,80	3,24	58,41	2,56
0,9 و 0,1	59,90	1,53	60,54	2,79	54,00	1,67
0,95 و 0,05	59,55	1,65	55,62	2,14	53,53	2,51
0,1	48,68	2,08	48,78	2,20	51,44	1,40



جدول 3: مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هدف مسئله 2 (20 هواپیما ، 3 مسیر هوایی و 3 باند)

ضریب	روش WEDD		روش تصادفی		روش ابتکاری	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
0,7 و 0,3	114,84	2,68	118,70	3,76	110,47	2,62
0,8 و 0,2	109,85	2,84	97,00	3,29	104,40	1,88
0,9 و 0,1	105,00	1,65	97,19	1,75	99,68	2,04
0,95 و 0,05	93,40	2,19	94,13	3,01	95,80	1,94
0 و 1	95,96	2,25	85,71	2,84	78,65	3,70

جدول 4: مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هدف مسئله 3 (20 هواپیما ، 6 مسیر هوایی و 4 باند)

ضریب	روش WEDD		روش تصادفی		روش ابتکاری	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
0,7 و 0,3	161,54	4,81	171,10	4,64	164,56	2,21
0,8 و 0,2	157,51	4,21	156,63	3,96	153,20	1,72
0,9 و 0,1	148,63	4,08	154,50	3,56	140,94	2,36
0,95 و 0,05	128,53	5,06	146,80	3,90	139,72	2,14
0 و 1	127,04	4,00	144,43	3,17	129,00	2,18

ابتکاری جواب بهتری نسبت به سایر روش ها ارائه می دهد. فقط در ضریب 1 و 0 روش WEDD بهترین جواب ها را ارائه می دهد.

با توجه به جدول (5) فقط در ضریب 0,95 و 0,05 است که روش WEDD جواب های بهتری را تولید می کند، در حالی که در سایر روش ها مانند بالا، روش ابتکاری بهترین جواب ها را ارائه می کند.

همان طور که در جدول (6) ملاحظه می شود، در ضرایب 0,7 و 0,3 ، 0,95 و 0,05 ، 0 و 1 روش WEDD جواب های بهتری را تولید می کند و در سایر ضرایب، روش ابتکاری جواب های بهتری را تولید می کند. با توجه به این توضیحات می توان دریافت که در بیشتر ضرایب، روش ابتکاری جواب های بهتری به دست

نتایج محاسباتی این 3 مسئله در جداول (3)، (4) و (5) نشان داده شده است. در این جداول برای ضرایب مختلف تابع هدف ( $\lambda$ )، مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هدف با توجه به جواب اولیه های مختلف به دست آمده است.

قابل ذکر است که ضریب  $\lambda$  برای تأخیر هواپیماها و ضریب  $1-\lambda$  برای میزان اشغال باندها و مسیرهای هوایی توسط هواپیماها در نظر گرفته شده است. چون مقدار عددی تأخیرات در مسائل اغلب بیشتر مدت زمان اشغال است، در نتیجه ضریب تأخیرات در این تحقیق، بزرگ تر در نظر گرفته شده است.

همان طور که در جدول (4) دیده می شود، در ضریب 0,7 و 0,3 تقریباً میانگین دو روش ابتکاری و WEDD با هم برابر است، ولی در سایر ضرایب به جز 1 و 0 روش

برای حل مدل این تحقیق از روش فراابتکاری SA استفاده شده است که این روش می‌تواند در مسائلی با ابعاد بزرگ (در ترافیک سنگین) و در مدت زمان کم به جواب‌های قابل قبولی دست یافت. این تحقیق نشان می‌دهد که اگر جواب‌های روش ابتکاری به عنوان جواب اولیه برای الگوریتم SA استفاده شود، می‌تواند در اکثر موارد بهترین نتایج را ارائه کند.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در بیشتر موارد (حدود 70%) جواب اولیه حاصل از روش ابتکاری، بهترین نتایج را ارائه می‌کند و در تعداد محدودی از موارد روش WEDD جواب‌های بهتری را به دست می‌دهد.

### فهرست علائم

- ATM: مدیریت ترافیک هوایی  
 ROM: مدیریت عملیات باند  
 ROP: برنامه‌ریزی عملیات باند  
 SPT: کوتاه‌ترین مدت زمان فرآیند  
 WEDD: زودترین موعد تحویل وزن‌دار

می‌آورد و در تعداد معدودی، روش WEDD جواب‌های بهتری را تولید می‌کند که هر چه ابعاد مسئله بزرگ‌تر می‌شود این مورد را بیشتر می‌توان مشاهده کرد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به این واقعیت که افراد خبره مدت زمان محدودی برای انتخاب گزینه خوب دارند (که اغلب هم به یک توالی بهینه ختم نمی‌شود)، در نتیجه این افراد نیاز به یک ابزار تصمیم‌گیری برای تخصیص پروازها به باندها دارند. بنابراین استفاده از این ابزارها اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد.

در این تحقیق برای اولین بار، از روش زمان‌بندی و توالی عملیات، برای برنامه‌ریزی و تخصیص باندها استفاده شده است. برای این مسئله از مدل ماشین‌های سری انعطاف‌پذیر (Flexible Flow Shop) دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن حالت No-wait با تابع هدف دو معیاره استفاده شده است.

### مراجع

- 1- Soomer, M. J. (2006). "Equitable hub airport scheduling using airline costs." November, National aerospace Laboratory NLR.
- 2- Jason, A.D., Atkin, Edmund K., Burke, John S., Greenwood and Reeson, D. (2007). "Hybrid meta-heuristics to aid runway scheduling at London Heathrow airport." *Transportation Science*, Vol. 41, No. 1, PP. 90-106.
- 3- Anagnostakis, I., H.R., Clarke, J-P., Ferone, E., Hansman, R.J., Odoni, A. and Hall, W.D. (2000). "A conceptual design of a departure planner decision aid." Presented at the 3<sup>rd</sup> USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT R&D SEMINAR, Naples, Italy, 13th - 16th June.
- 4- Saffarzadeh, M., Kordani, A. A. and Beheshtinia, M. A. (2007). "A New Approach in Runway Operations Management for Airside Capacity Enhancement." *Air Transport research Society*, Conference ATRS 2007, Berkeley.
- 5- Anagnostakis, I., Clarke J-P, B'ohme D., Volckers Uwe, (2001). "Runway operations planning and control, sequencing and scheduling." Proceedings of the 34<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-34), Hawaii, January 3-6.
- 6- Isaacson, D.R. and Robinson, J.E. (2001). "A knowledge-based conflict resolution algorithm for terminal area air traffic control advisory generation." American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001-4116.
- 7- Isaacson, D.R., Davis, T.J. and Robinson, J.E. (1997). "Knowledge-based runway assignment for arrival aircraft in the terminal area." To be published at the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA August 11-13.
- 8- Soomer, M.J. and Franx, G.J. (2006). "Scheduling aircraft landings using airlines' preferences." *European Journal of Operations Research*, Submitted for publication (in revision).

- 9- Baker, Kenneth R. (1974). "Introduction to sequencing and scheduling. John Wiley & Sons."
- 10- Lawler, E.L. (1977). "A pseudopolynomial algorithm for sequencing jobs to minimize total tardiness." *Annals of Discrete Mathematics* 1, 331-342.
- 11- Lenstra, J.K. (1977). "Sequencing by enumerative methods." Mathematical Center Tracts 69, Mathematical Centrum, Amsterdam.
- 12- Santos, D.L., Hunsucker, J.L. and Deal, D.E. (1996). "An evaluation of sequencing heuristics in flow shops with multiple processors." *Computers & Industrial Engineering*, 30(4), PP. 681-91.
- 13- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr CD, Vecchi, M.P. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*; 220(4598):671-80.
- 14- Saffarzadeh, M., Kordani, A. A. and Beheshtinia, M. A. (2007). A New Approach in Runway Operations Management for Airside Capacity Enhancement. Air Transport research Society, Conference ATRS 2007, Berkeley.
- 15- Chams, M., Hertz, A. and de Werra, D. (1987). "Some experiments with simulated annealing for colouring graphs." *European Journal of Operational Research*, 32, 260-266.
- 16- Johnson, D.S., Aragon, C.R., McGeogh, L.A. and Schevon, C. (1987). "Optimization by simulated annealing: An experimental evaluation." Part I. AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, N J, preprint.
- 17- Saffarzadeh, M., Kamal Abadi, I.N., Kordani, A.A. and Gangraj, E.A. (2008). "A New Approach in Airport Capacity Enhancement Based on Integrated Runway Assignment and Operations planning Model." *Journal of Applied Science*, Volume 8, No. 17.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Air Traffic Management
- 2- Decision Aiding
- 3- Runway Operation Management
- 4- Runway Operation Planning