

## برنامه‌ریزی پرواز با استفاده از روشهای بهینه‌یابی جستجویی

سید صابر ناصرعلوی، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمود صفارزاده، استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: [saber\\_alavi@modares.ac.ir](mailto:saber_alavi@modares.ac.ir)

### چکیده

(Multi Commodity Network Flow)

Genetic )

Ant )

GAMS

(Simulated Annealing)

(Algorithm

(Colony Optimization

GAMS

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی پرواز، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده، الگوریتم کولونی مورچه.

### ۱. مقدمه

تعیین مسیر پرواز، برنامه‌ریزی خدمه پرواز و برنامه‌ریزی نگهداری هواپیما [۵ و ۶]. مطالعه حاضر به بررسی و حل مسأله تخصیص هواپیما به پرواز می‌پردازد و مسأله را با روشهای GA، SA، ACO حل می‌کند. پس از طراحی و پیاده‌سازی الگوریتمها با نرم‌افزار MATLAB، چندین مسأله نمونه برای بررسی کارایی روشها، حل شد.

### ۲. تعریف مسأله

در مسأله تخصیص هواپیما به پرواز، نوع هواپیمای هر پرواز

برنامه‌ریزی در حمل‌ونقل هوایی چه در قسمت فرودگاه و چه در بخش شرکتهای هوایی، امری اجتناب ناپذیر است. مطالعات بسیاری در زمینه مدیریت و بهینه‌سازی قسمتهای مختلف فرودگاه انجام شده است که یک نمونه از آن مطالعه اخیر [۱] است. استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی در برنامه‌ریزی پرواز شرکتهای هوایی نه تنها از دیرباز بلکه در حال حاضر نیز مورد توجه تصمیم‌گیرندگان و محققین بوده است [۲ و ۳ و ۴]. به دلیل بزرگ بودن مسأله بهینه‌سازی، معمولاً مسأله اصلی را به چند مسأله کوچک‌تر تقسیم می‌کنند. عناوین اصلی این مسائل عبارتند از: برآورد تقاضای پرواز، زمانبندی پرواز، تخصیص هواپیما به پرواز،

احتمالی حل شده است [۱۳].

در این بخش از مقاله، مدل مورد استفاده در این تحقیق که از مقاله هین اقتباس شده است ارائه می‌شود. این مدل به صورت یک مسأله جریان در شبکه چندکالایی، گسترده در زمان، بیان می‌شود.

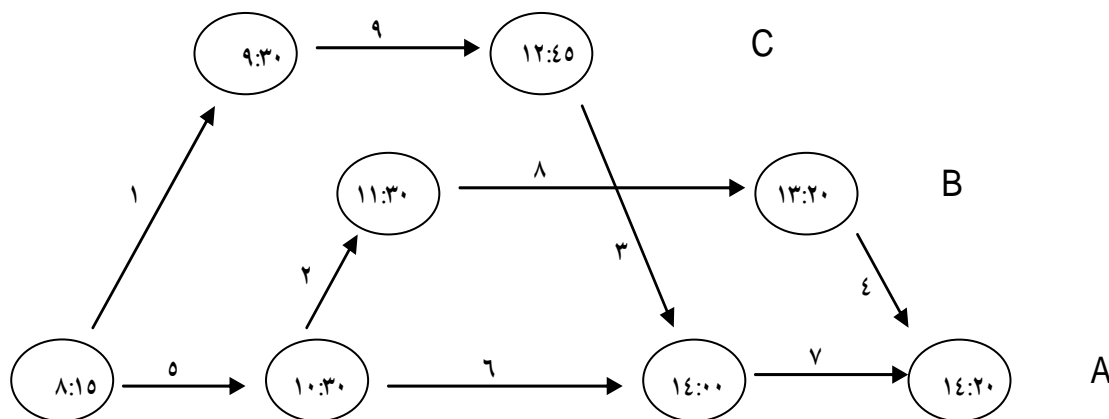
شبکه دارای دو نوع کمان است؛ کمانهای پروازی و کمانهای زمینی. در شکل (۱) مثال ساده‌ای از یک شبکه پرواز با یک نوع هواپیما، ۳ شهر و ۴ پرواز نشان داده شده است. کمانهای ۱، ۲، ۳ و ۴ از نوع پروازی و کمان ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ از نوع زمینی هستند.

فرض کنید  $C$  مجموعه فرودگاه‌ها،  $F$  مجموعه انواع ناوگان آماده پرواز،  $S(f)$  تعداد هواپیمای نوع  $f$ ،  $L$  مجموعه پروازهای زمانبندی شده، اعضاء این مجموعه به صورت  $\{i\}$  یا  $\{odi\}$  نشان داده می‌شوند که  $o$  معرف شهر مبدأ،  $d$  معرف شهر مقصد و  $t$  معرف یک زمان است،  $O(f)$  مجموعه کمانهای پرواز هواپیمای نوع  $f$  که تا پایان دوره زمانی (یک شبانه روز) هنوز به مقصد نرسیده‌اند،  $H$  مجموعه پروازهای زنجیره‌وار (برخی از پروازها که باید توسط یک هواپیما انجام شوند)،  $C_{fi}$  هزینه تخصیص هواپیمای نوع  $f$  به پرواز  $i$ ،  $N$  مجموعه گره‌های شبکه با اعضاء  $\{fot\}$  که در آن  $f$  معرف نوع هواپیما،  $o$  معرف یک شهر و  $t$  معرف زمان است که می‌تواند مربوط به زمان فرود در  $o$  یا زمان برخاست از  $o$  باشد. متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$x_{fot}$  یا  $x_{fi} =$  متغیرهای دوتایی پرواز؛ در صورتی که از هواپیمای نوع  $f$  در پرواز زمان  $t$  از شهر  $o$  به  $d$  استفاده شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

به نحوی تعیین می‌شود که کل هزینه ناشی از انجام پروازها حداقل گردد. در این مسأله، برنامه زمانبندی پروازها (شامل مدت زمان آماده‌سازی هواپیمای فرود آمده برای برخاست بعدی)، تقاضای هر پرواز و مشخصات ناوگان آماده برای عملیات (ظرفیت و هزینه عملیات) معلوم فرض می‌شود. محدودیتهای مربوط به برنامه خدمه و تعمیرات هواپیما نیز در این مسأله پیش‌بینی نمی‌شود. همچنین دوره زمانی برنامه‌ریزی به صورت تکراری فرض می‌شود (یک شبانه‌روز).

مقاله آبارا [۷] از نخستین مطالعات چاپ شده است که مسأله را به عنوان مسأله تخصیص هواپیما و با رویکرد یک مدل اعداد صحیح بررسی و حل می‌کند. در سال ۱۹۹۵ هین و همکارانش [۸] مسأله تخصیص هواپیما را به عنوان یک مسأله جریان در شبکه چند کالایی به نحو مطلوبی مدل‌سازی کردند. آنها با ارائه مدلی مرکب از متغیرهای صحیح و حقیقی (MIP)، سه روش مختلف را برای حل مسأله بکار گرفتند. پس از آنها کلارک [۹] به همراه جمعی از محققین، محدودیت برنامه تعمیر هواپیماها و محدودیت پرواز خدمه را به مطالعه قبل افزودند. از جمله مطالعات تکمیلی انجام شده بر مسأله تخصیص هواپیما می‌توان به مقاله گوو [۱۰] و کلاینسویچ [۱۱] و رکسینگ [۱۲] اشاره کرد. مقاله اول به بررسی برخی خواص و ویژگیهای محاسباتی مسأله می‌پردازد، مقاله دوم موارد خاصی را که در برنامه‌ریزی پرواز پیش می‌آیند، به مسأله تخصیص هواپیما وارد می‌کند و در مقاله سوم امکان تغییر ساعت پرواز را به مسأله می‌افزاید. اخیراً نیز به مسأله تخصیص هواپیما به پرواز، شرایط جدیدی از جمله خرابی هواپیماها و سایر عوامل اضافه شده و در محیطی کاملاً



شکل ۱. مثالی از یک شبکه پرواز کوچک

که در آن  $m$  اندیس زوجهای مبدأ- مقصد از مجموعه  $L(m), M$  مجموعه پروازهای بین زوج مبدأ - مقصد  $m$ ،  $P_m$  قیمت بلیط بین زوج مبدأ- مقصد  $m$ ،  $d_m$  تقاضای پیش بینی شده بین زوج مبدأ- مقصد  $m$ ،  $oc_{fi}$  هزینه عملیاتی انجام پرواز  $i$  با نوع  $f$  و  $cap_f$  تعداد صندلی قابل استفاده از هواپیمای نوع  $f$  است. برای تبدیل این تابع هدف به شکل خطی، کافی است یک متغیر جدید به مسأله اضافه شود:

(۹)

$$\text{Min} \sum_i \sum_f oc_{fi} \cdot x_{fi} + \sum_m P_m \cdot \text{Spill}_m \quad (10)$$

$$\text{Spill}_m \geq d_m - \sum_{i \in L(m)} \sum_f cap_f \cdot x_{fi} \quad (11)$$

$$\text{Spill}_m \geq 0$$

که در آن،  $spill(m)$  تعداد مسافر از دست رفته در پروازهای بین زوج شهر  $m$  است.

### ۳. شبکه پرواز

#### ۳-۱ تعاریف

- شبکه پروازی: شبکه پروازی از یک سری کمان و گره ساخته شده است.
- گره: گره‌ها به واسطه رویدادها (نشست‌ها و برخاست‌ها) به وجود می‌آیند. گره‌هایی که روی یک خط افقی قرار دارند مربوط به یک شهرند و رویدادهای آن شهر را به تصویر می‌کشند. بر روی هر گره عددی نوشته شده که آن عدد زمان رویدادی را نشان می‌دهد که در آن شهر اتفاق افتاده است.
- کمان: تمامی خطوط جهت دار در شبکه پروازی کمانها هستند و به دو دسته کمانهای پروازی و کمانهای زمینی تقسیم بندی می‌شوند.
- کمان پروازی: کمان پرواز در شبکه پروازی، به کمانی گفته می‌شود که ما بین دو شهر باشد و زمان مربوط به گره انتهایی آن بعد از زمان مربوط به گره ابتدایی آن باشد.
- کمان زمینی: کمانی که دو گره متوالی در یک شهر را به هم متصل می‌کند.
- کمان شبانه: نوعی کمان زمینی برای هر شهر که آخرین گره را به اولین گره متصل می‌کند.

$y_{fot}^+$  = متغیرهای حقیقی کمان‌های زمینی، این متغیر نشان‌دهنده تعداد هواپیمای نوع  $f$  روی زمین در شهر  $o$  و بین گره زمانی  $t$  و گره بعدیش  $t^+$  است.

هین مسأله تخصیص هواپیما به پرواز را به صورت مدل ریاضی زیر بیان می‌کند [۸]:

(۱)

$$\text{min} \sum_{i \in L} \sum_{f \in F} C_{fi} \cdot x_{fi} \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_f x_{fi} = 1 \quad \forall i \in L \quad (3)$$

$$\sum_d x_{fodt} + y_{fot}^+ - y_{fot}^- - \sum_d x_{fdot} = 0 \quad \forall \{fot\} \in N \quad (4)$$

$$x_{fi} - x_{fj} = 0 \quad \forall (i, j) \in H, f \in F \quad (5)$$

$$\sum_{i \in o(f)} x_{fi} + \sum_{o \in C} y_{fot, t_1} \leq S(f) \quad \forall f \in F \quad (6)$$

$$y_{fot}^+ \geq 0 \quad \forall \{fot\} \in N \quad (7)$$

$$x_{fi} \in \{0,1\} \quad \forall i \in L, f \in F$$

ضرایب  $C_{fi}$  شامل هزینه عملیات مانند هزینه سوخت [۱۴] و هزینه مسافر از دست رفته است. به منظور کاهش ابعاد مسأله، وقتی در یک شهر چند برخاست پیایی پس از چند نشست پیایی رخ دهند، می‌توان همگی آنها را در یک گره جای داد [۸].

در مدل ارائه شده، برای محاسبه هزینه مسافر از دست رفته در ضرائب  $C_{fi}$  لازم است مقدار تقاضای هر پرواز معلوم باشد. در برخی مواقع، به دلیل محدود بودن عرضه حمل و نقل هوایی، برآورد روزانه تقاضا، از دقت بیشتری نسبت به برآورد تقاضای هر پرواز برخوردار است.

یک روش برای در نظرگیری تقاضای روزانه در مدل تخصیص هواپیما به پرواز به صورت زیر است:

(۸)

$$\text{Min} \sum_i \sum_f oc_{fi} \cdot x_{fi} + \sum_m p_m \cdot \max \left\{ d_m - \sum_{i \in L(m)} \sum_f cap_f \cdot x_{fi}, 0 \right\}$$

کولونی مورچه بیان می‌شود و بعد از آن چگونگی بکارگیری این الگوریتمها برای بهینه‌سازی تخصیص هواپیما به پرواز تشریح می‌شود.

الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای جستجوی تصادفی برای یافتن جوابهای بهینه مسائل تحقیق در عملیات است که مکانیزم انتخاب طبیعی سیستمهای بیولوژیکی همچون بازتولید، ترکیب و جهش را شبیه‌سازی می‌کند. خصوصیات عمده الگوریتم ژنتیک، کد کردن مجموعه پارامترهای مسأله، چند نقطه‌ای بودن الگوریتم جستجو و عدم نیاز به اطلاعات در مورد مشتق تابع هدف است. با توجه به این خصوصیات الگوریتم ژنتیک این پتانسیل را دارد که روش جدید و مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی با ابعاد بزرگ باشد. اگر نحوه کد کردن و چگونگی برخورد با محدودیتها مناسب نباشد، جستجو برای جوابهای بهینه زمان محاسباتی زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. نحوه کد کردن و چگونگی برخورد با محدودیتها مباحث تحقیقاتی در حل هر مسأله هستند. می‌توان کد کردن پارامترها را به صورتی انجام داد که بعضی از محدودیت‌های مسأله در ساختار پارامترها کد شده که کروموزوم خوانده می‌شود، گنجانده شود. با این کدگذاری فضای جواب که باید توسط الگوریتم جستجو شود، محدودتر شده و در نتیجه زمان محاسبات برای جستجوی جوابهای بهینه کاهش می‌یابد [۱۵].

الگوریتم کلونی مورچه بر اساس توانایی مورچه‌ها برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین منبع غذایی و لانه است [۱۵ و ۱۶]. مورچه‌ها هنگام حرکت از محلی به محل دیگر مقداری فرومون<sup>۳</sup> در مقادیر مختلف بر روی زمین به‌جای می‌گذارند. فرومون یک ماده شیمیایی است که مورچه‌ها برای تعیین مسیر سایر مورچه‌ها و همچنین برای تشخیص راه برگشت خود به‌جای می‌گذارند [۱۶]. هر مورچه یک سری جواب کامل با حرکت از یک گره به گره دیگر، بر اساس قاعده انتقال<sup>۴</sup> که اطلاعات محلی را در اختیار آنها می‌گذارد، می‌سازد. به عبارتی مورچه‌ها تمایل به انتخاب مسیرهای کوتاه‌تر با میزان فرومون بیشتر دارند.

(۱۲)

$$p_{rs}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } s = \arg \max_{u \in N_k(r)} (\tau_{ru})^\alpha \cdot (\eta_{ru})^\beta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

• زنجیره پرواز: دنباله‌ای از کمانهای شبکه پرواز است که یک نوع هواپیما بر روی آنها می‌تواند وجود داشته باشد.

• حلقه: یک زنجیره پرواز است که گره ابتدایی اولین کمان آن همان گره انتهایی آخرین کمان آن است.

• الگو: الگو متشکل از یک سری حلقه است که کل شبکه پروازی را پوشش می‌دهند و در کمان پروازی مشترک نیستند و با تخصیص هواپیماهای ناوگان موجود به حلقه‌های الگو (یعنی تخصیص یک به یک هواپیماها به حلقه‌ها) می‌توان کل پروازها را عملیاتی کرد. به عبارت دیگر الگوی با تخصیص هواپیما بر روی حلقه‌های آن، برابر با یک جواب امکان‌پذیر و نه لزوماً بهینه مسأله تخصیص هواپیما به پرواز است.

• ترکیب حلقه‌های الگو: همان‌طور که از اسمش بر می‌آید به نحوه قرارگیری حلقه‌ها در یک الگو اطلاق می‌شود.

### ۳-۲-۳ خواص شبکه پرواز

۱- شبکه پرواز بدون کمانهای شبانه، یک شبکه بدون دور<sup>۱</sup> است، زیرا برای هر کمان شبکه، زمان مربوط به گره انتهایی آن بعد از زمان مربوط به گره ابتدایی آن است. این نوع شبکه را گسترده در زمان<sup>۲</sup> نیز می‌نامند.

۲- هر حلقه در شبکه پرواز، حداقل یک کمان شبانه را شامل می‌شود.

### ۳-۳-۳ خاصیت جواب امکان‌پذیر

با توجه به آنکه معادلات توازن جریان در گره‌های شبکه پرواز، برای هر نوع هواپیما برقرار است، هر جواب امکان‌پذیر دارای این خاصیت است که برای هر هواپیما از نوع  $f$  یک حلقه در شبکه وجود دارد که از این نوع استفاده می‌کند. استفاده کردن یک حلقه از هواپیمای نوع  $f$  به این معنی است که کمانهای پرواز آن با نوع  $f$  انجام شوند ( $x_{fi} = 1$ ) و بر روی کمانهای زمینی آن حداقل یک هواپیما از نوع  $f$  وجود داشته باشد ( $y_{fi} \geq 1$ )

### ۴. روشهای حل مسأله

#### ۴-۱ روش اول و روش دوم

روش اول و دوم به ترتیب مبتنی بر بکارگیری الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کولونی مورچه برای حل مسأله تخصیص هواپیما به پرواز است. در این قسمت ابتدا مبانی الگوریتمهای ژنتیک و

$\varphi$  پارامتری بین صفر و یک است.  $\Delta\tau_{rs}$  می‌تواند سه حالت داشته باشد [۱۶]:

الف) استفاده از الگوریتم  $Q$  که در آن  $\Delta\tau_{rs} = \gamma \cdot \max_{z \in N_k(s)} \tau_{sz}$ .

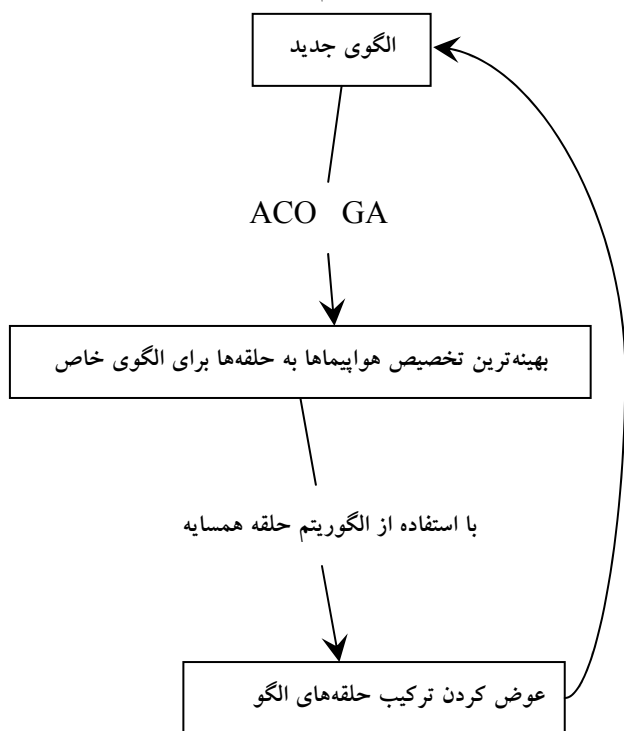
یعنی بخشی از حداکثر اثر موجود در مسیرهایی که می‌توان از گره مقصد  $s$  به آنها رفت را به عنوان  $\Delta\tau_{rs}$  انتخاب می‌کند.

ب)  $\Delta\tau_{rs} = \tau_0$ ،  $\tau_0$  سطح اولیه فرومون است.

ج)  $\Delta\tau_{rs} = 0$ .

نتایج به دست آمده از سه مقدار قبل نشان می‌دهد که استفاده از  $\Delta\tau_{rs} = 0$  جوابهای بدتری نسبت به دو حالت قبل دارد [۱۶].

نحوهٔ بکارگیری الگوریتمهای ژنتیک و کلونی مورچه برای حل مسألهٔ تخصیص با شکل ۲ قابل توضیح است. شکل ۲، فلوجارت حل مسأله را با روشهای اول و دوم، نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوجارت کلی حل مسألهٔ تخصیص هواپیما به پرواز با روشهای اول و دوم

برای حل مسأله، همان‌طور که از شکل هم بر می‌آید، از دو الگوریتم کلی استفاده می‌شود؛ اول، استفاده از الگوریتمهای ژنتیک و کلونی مورچه برای بهینه کردن تخصیص هواپیماها به حلقه‌های یک الگوی خاص و دوم، استفاده از الگوریتم حلقه همسایه برای عوض کردن ترکیب حلقه‌های الگو و دسترسی به یک الگوی جدید. با استفاده از الگوریتم اول قسمتی از مسأله

$$(13)$$

اگر  $q > q_0$

$$P_{rs}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ru})^\alpha (\eta_{ru})^\beta}{\sum_{u \in N_k(r)} (\tau_{ru})^\alpha (\eta_{ru})^\beta} & \text{if } s \in N_k(r) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

که در آن  $q_0 \in [0,1]$  یک پارامتر و  $q$  مقدار تصادفی بین  $[0,1]$ ،  $P_{rs}^k$  احتمال اینکه مورچه  $k$  واقع در گره  $r$ ، گره  $s$  را انتخاب بکند.  $N_k(r)$  مجموعه گره‌هایی که مورچه  $k$  با توجه به محدودیت‌های مسأله می‌تواند آنها را انتخاب بکند.  $\tau_{rs}$  میزان کل فرومون موجود در مسیر  $rs$ .  $\eta_{rs}$  اطلاعات کاوشی<sup>۵</sup> مسیر  $rs$  که بستگی به تابع هدف دارد.

$\alpha, \beta \in R$  پارامترهایی هستند که اهمیت نسبی اثر فرومون و اطلاعات کاوشی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که دیده می‌شود اگر  $q \leq q_0$  باشد از اطلاعات در دسترس استفاده می‌شود و بهترین گزینه با توجه به اطلاعات فرومون و اطلاعات کاوشی انتخاب می‌شود [۱۶].

$q_0$  تعاملی بین جستجوی گره‌های جدید و استفاده از گره‌های در دسترس در هر لحظه برقرار می‌کند.

بعد از اینکه تمام مورچه‌ها یک سری جواب کامل ساختند، در ابتدا میزان فرومون تمام مسیرها کاهش می‌یابد:

$$\tau_{rs} = (1 - \rho) \cdot \tau_{rs} \quad (14)$$

بهنگام سازی نهایی<sup>۶</sup> در مورد مسیرهای متعلق به بهترین جواب هر تکرار انجام می‌گیرد.

$$(15)$$

$$\tau_{rs} = \tau_{rs} + \rho \cdot \Delta\tau_{rs}(S_{global-best}) \quad \forall a_{rs} \in S_{global-best}$$

$$(16)$$

$$\Delta\tau_{rs}(S_{global-best}) = f(C(S_{global-best}))$$

که در آن  $\rho \in (0,1)$  نرخ تبخیر،  $S_{global-best}$  سری جواب یافت شده توسط مورچه "بهترین در کل"،

$C(S_{global-best})$  کیفیت سری جواب یافت شده است.

$\Delta\tau_{rs}^{global-best}$  میزان فرومون گذاشته شده در مسیر  $rs$  که به

کیفیت جواب مورچه "بهترین در کل" بستگی دارد.

مورچه‌ها بهنگام‌سازی محلی<sup>۷</sup> را نیز به منظور تولید جوابهای متفاوت اعمال می‌کنند.

$$\tau_{rs} \leftarrow (1 - \varphi)\tau_{rs} + \varphi\Delta\tau_{rs} \quad (17)$$

گام ۱: جواب امکان پذیر  $x_{i+1}$  در همسایگی  $x_i$  انتخاب کرده  $C(x_{i+1})$  را محاسبه کنید.

گام ۲: اگر  $C(x_{i+1}) < C(x_i)$  آنگاه  $x_{i+1} \leftarrow x_i$  و به گام ۳ بروید.

اگر  $C(x_{i+1}) > C(x_i)$  آنگاه با احتمال  $p = \exp\left(\frac{c_{i+1} - c_i}{T}\right)$  قرار دهید:  $x_{i+1} \leftarrow x_i$  و به ۳ بروید.

گام ۳: اگر شرط توقف صدق می‌کند، الگوریتم را پایان داده، بهترین جواب یافته شده را ارایه کنید در غیر این صورت به گام ۴ بروید.

گام ۴: طبق تابع کاهش دما  $f(T) \leftarrow T$  و به گام ۱ بازگشت شود.

برای حل، ابتدا لازم است بتوانیم یک حلقه پیدا کنیم؛ برای اینکار فرض کنید یک جواب امکان‌پذیر در دست است. می‌خواهیم برای کمان  $a$  که از هوایمای نوع  $f$  استفاده می‌کند یک حلقه پیدا کنیم. به این منظور هر بار یکی از کمان‌های خروجی از گره انتهایی کمان  $a$  را که از هوایمای نوع  $f$  استفاده می‌کند انتخاب می‌کنیم. این عمل را برای کمان جدید ادامه می‌دهیم تا به گره انتهایی کمان  $a$  برسیم.

گام اصلی الگوریتم SA مربوط به حرکت از یک جواب به جواب همسایه آن است.

الگوریتم یافتن جواب همسایه در این الگوریتم مشابه الگوریتم یافتن الگوی همسایه قسمت ۴-۱ است. فقط در اینجا به جای الگو، باید الگوی با تخصیص که همان جواب امکان‌پذیر است، بکار رود.

## ۵. مطالعه کاربردی

در این تحقیق، مسأله تخصیص هوایما به پروازهای داخلی شرکت هوایمایی ایران‌ایر مورد بررسی و حل قرار گرفته است. اطلاعات مورد استفاده مربوط به قسمتی از برنامه زمانبندی شرکت، برای روزهای دوشنبه بوده و از دفترچه تابستانی سال ۲۰۰۶ ایران‌ایر استخراج شده است. در حل مسأله از روشهای شاخه و کرانه، الگوریتم ژنتیک، جستجوی گرم و سرد کردن شبیه سازی شده و الگوریتم کلونی مورچه استفاده شده است. برای بکارگیری الگوریتمها با نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده و برای روش شاخه و کرانه از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. نرم‌افزار GAMS، برای حل مسائل MIP از روش شاخه و کرانه استفاده می‌کند. در این روش، حل مسائل با آزادسازی قید

بهینه می‌شود و با الگوریتم دوم به قسمتهای مختلف محدوده جواب دسترسی پیدا می‌شود.

بهینه‌ترین تخصیص هوایماها به حلقه‌ها برای الگوی خاص همان مسأله معروف و ساده شده فروشنده دوره‌گرد (TSP) است؛ بنابراین حل آن با الگوریتمهای ژنتیک و کلونی مورچه امکان‌پذیر است [۱۵].

مراحل عوض کردن ترکیب حلقه‌های الگو با استفاده از الگوریتم حلقه همسایه، عبارتند از:

گام ۰: یک الگوی اولیه را در نظر بگیرید.

گام ۱: کمان  $a_1$  را به‌طور تصادفی از مجموعه کمانهای الگو انتخاب کنید.

گام ۲: در الگوی امکان‌پذیر فعلی، برای کمان  $a_1$  یک حلقه پیدا کنید و آنرا  $c_1$  بنامید.

گام ۳: مانند گام ۱ و ۲ را برای انتخاب کمان  $a_2$  و حلقه  $c_2$  بنحوی که  $a_1 \neq a_2$  باشد، تکرار کنید.

گام ۴: فرض کنید، گره‌های حلقه  $c_1$  عبارتند از  $i_1, i_2, \dots, i_m, i_1$  و گره‌های حلقه  $c_2$  عبارتند از  $j_1, j_2, \dots, j_m, j_1$ . گره‌های مشترک دو حلقه را پیدا کرده در مجموعه ای به‌صورت  $k_1, k_2, \dots, k_r$  نگهدارید. از میان اعضاء این مجموعه دو تا را به‌طور تصادفی انتخاب کنید و  $k_s, k_e$  بنامید (از نظر زمانی،  $k_s$  جلوتر از  $k_e$  قرار دارد).

گام ۵: برای کمانهایی از دو حلقه که بین دو گره  $k_s, k_e$  قرار دارند دو زنجیره را جابجا کنید.

## ۴-۲ روش سوم

در روش سوم، مسأله تخصیص با الگوریتم SA حل شد. این الگوریتم نیز از جمله روشهای جستجوی ابتکاری است. SA در سالهای اخیر کاربردهای زیادی در حل مسائل بهینه‌سازی پیدا کرده است [۱۷]. در روشهای جستجوی ساده با داشتن یک جواب امکان‌پذیر، جواب دیگری در همسایگی آن تولید می‌شود و چنان که جواب جدید، تابع هدف بهتر داشته باشد، انتخاب می‌شود. در الگوریتم SA در صورتی که تابع هدف جواب جدید، بدتر از جواب قبلی باشد با احتمال خاص، پذیرفته می‌شود. گامهای این الگوریتم برای حل مسائل کمینه‌سازی به قرار زیر است [۱۸]:

گام ۰: دمای اولیه  $T_i$  و جواب اولیه  $x_i$  را انتخاب کنید و برای آن  $C(x_i)$  را به دست آورید.

استفاده شد و الگوی جوابی که از الگوریتم بهترین حلقه به دست آمد، به‌عنوان اولین الگو برای بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفت. پارامترهای الگوریتم SA عبارتند از: دمای اولیه  $0/01$ ، دمای انتهایی  $0/000015$ ، تعداد گام کاهش دما ۱۶، ضریب کاهش دما  $0/65$ ، و تعداد ثابت تکرار در هر دما ۲۰۰۰. برای یافتن جواب اولیه از خود برنامه استفاده شده‌است؛ ابتدا یک نوع هواپیمای مجازی با هزینه بسیار زیاد به همه پروازها تخصیص می‌یابد. بدیهی است که هواپیماهای واقعی به‌صورت استفاده نشده در نظر گرفته می‌شوند. آنگاه طی یک اجراء اولیه، الگوریتم تمامی هواپیماهای مجازی را با انواع واقعی جایگزین می‌کند. پارامترهای الگوریتم ACO عبارتند از: تعداد مورچه‌ها در هر تکرار برابر  $M = 30$ ،  $\alpha = 1$ ،  $\beta = 2$ ،  $\rho = 0/1$ ،  $\varphi = 0/9$ ،  $q_0 = 0/8$ ،  $Q = 100$ . به‌طور مشابه با الگوریتم ژنتیک، تعداد تکرار استفاده از الگوریتم الگوی همسایه ۱۰۰ مرتبه و برای بهینه‌سازی الگوی اولیه از الگوریتم بهترین حلقه استفاده شده است. علت ثابت بودن زمان الگوریتمها برای همه حالات، ثابت بودن پارامترهای آن است.

برای آزمون کارایی الگوریتمها در حل مسأله‌ای بزرگ‌تر، برنامه پرواز شرکت ایران‌ایرتور به برنامه شرکت ایران ایر افزوده شد. همه پروازهای شرکت ایران‌ایرتور را یک هواپیما انجام می‌دهد و هواپیماهای این شرکت باید شب را در مشهد بگذرانند. شبکه پرواز جدید، شامل ۱۱۴ کمان پرواز، ۷۲ کمان زمینی و ۸۸ گره همفزون شده است. برای عملیات روزانه شبکه جدید، به حداقل ۱۶ فروند هواپیما احتیاج است و همین تعداد در ۷ نوع مختلف به‌عنوان ناوگان آماده پرواز منظور می‌شود. مسأله تخصیص هواپیما برای شبکه جدید دارای ۹۱۴ محدودیت، ۷۹۸ متغیر دوتایی، ۶۷۴ متغیر حقیقی و ۵۳۵۳ عضو غیر صفر در ماتریس ضرایب است. نتایج حل این مسأله با نرم‌افزار GAMS و الگوریتمهای GA، SA، ACO در جدول ۲ قابل ملاحظه است. شرط توقف نرم‌افزار GAMS خطای نسبی ۰/۲ یا زمان ۱۲۰ دقیقه بود. پارامترهای الگوریتمهای GA، SA، ACO نیز مانند قبل انتخاب شده‌اند با این تفاوت که در GA و ACO، تعداد تکرار الگوریتم الگوی همسایه ۱۵۰ و در SA، تعداد تکرار در هر دما برابر ۳۰۰۰ انتخاب شده است. با این کار چون ابعاد مسأله جدید تقریباً ۱/۵ برابر شده، تعداد کل نقاط جستجو نیز به ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. جزئیات اطلاعات این مسأله و نتایج کامل آن در مرجع [۱۹] آمده است.

صحیح بودن از متغیرهای مسأله آغاز می‌شود. جواب مسأله آزاد شده در حکم یک حد پایینی برای مسأله اصلی است. نرم‌افزار GAMS پس از دستیابی به یک جواب اولیه، سعی می‌کند طی یک روش ابتکاری، به یک جواب صحیح امکان‌پذیر دست یابد. پس از این مقطع است که تکرارهای اصلی روش شاخه و کرانه شروع می‌شود. برنامه پرواز در نظر گرفته شده، دارای ۸۰ پرواز بین ۱۷ شهر است که مجموعاً ۳۸ زوج مبدا-مقصد را پدید می‌آورند. ناوگان قابل استفاده برای عملیات این پروازهای داخلی شامل ۱۱ هواپیما از ۶ نوع مختلف است. فرودگاه اصلی پروازهای داخلی ایران‌ایر، مهرآباد تهران است. کلیه ناوگان این شرکت از تهران بلند می‌شوند و در آخر شب به تهران باز می‌گردند و بنابراین هیچ شهر دیگری دارای کمان شبانه نیست. به این ترتیب در حدود بازه زمانی ۲:۰۰ تا ۵:۰۰ هیچ پرواز داخلی در فضای کشور انجام نمی‌شود. فرض می‌شود همه فرودگاه‌ها امکان پذیرش همه انواع ناوگان را داشته باشند (این فرض برای نوع ایرباس صادق نیست و جنبه ساده کننده دارد). در این مطالعه، زمان آماده سازی برای همه هواپیماها برابر ۳۰ دقیقه فرض شده است. با این فرض، که دور از واقعیت نیست، شبکه مسأله برای انواع هواپیماها یکسان می‌شود. شبکه ساخته شده دارای ۸۰ کمان پرواز، ۴۴ کمان زمینی و ۶۰ گره همفزون شده است و حداقل با ۱۰ فروند هواپیما قابل عملیات است. مدل ساخته شده، در اصل یک مسأله بهینه‌سازی خطی با متغیرهای دوتایی و حقیقی از نوع MIP است.

در ابتدا مقادیر تقاضای روزانه بین زوجهای مبدا-مقصد برابر تعداد مسافر جابجا شده فرض شد و سپس این مقادیر با نسبتهای ثابتی افزوده گردید. جدول ۱ نتایج حل مسأله با نرم‌افزار GAMS و الگوریتمهای GA، SA، ACO را برای مقادیر مختلف تقاضا نشان می‌دهد. شرط توقف نرم‌افزار GAMS خطای نسبی ۰/۲ یا زمان ۶۰ دقیقه بود. انتخاب پارامترهای مناسب برای حل یک مسأله با الگوریتمهای ابتکاری در سرعت و دقت جواب حاصل تأثیرگذار است. جهت انتخاب پارامترهای الگوریتمها حساسیت آنها نسبت به پارامترهایشان به‌طور مفصل مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای الگوریتم GA که در حل مسأله استفاده شده‌اند، عبارتند از: تعداد در هر نسل ۳۰، نخبه‌گرایی ۵ نفر در هر نسل، احتمال ترکیب ۰/۸۰، احتمال جهش ۰/۱۰، تعداد تکرار استفاده از الگوریتم الگوی همسایه ۱۰۰ مرتبه، برای بهینه‌سازی الگوی اولیه، از الگوریتم بهترین حلقه

جدول ۱. نتایج حل مسأله ایران ایر با تقاضای روزانه (تقاضای همه مبدأ- مقصدها به یک میزان افزایش یافته است)

نرم افزار GAMS				الگوریتم GA			
افزایش تقاضا (%)	بزرگترین حد پایینی	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی (%)	زمان (دقیقه)	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی از حد پایینی GAMS (%)	زمان (دقیقه)
۰	۲۱۳۸	۲۱۸۵/۰	۲/۲	۶	۲۱۷۸/۶	۱/۹	۴/۵
۱۰	۲۲۰۰	۲۲۶۸/۲	۳/۱	۵	۲۲۴۶/۲	۲/۱	۴/۵
۲۰	۲۳۲۸	۲۵۴۶/۸	۹/۴	۶۰	۲۳۷۶/۹	۲/۱	۴/۵
۴۰	۲۷۲۰	۲۹۱۰/۴	۷/۰	۶۰	۲۷۶۹/۰	۱/۸	۴/۵
۶۰	۳۲۲۲	۳۳۸۹/۵	۵/۲	۶۰	۳۲۸۳/۲	۱/۹	۴/۵
۸۰	۳۷۳۳	۳۸۵۹/۹	۳/۴	۴	۳۷۹۶/۵	۱/۷	۴/۵
۱۰۰	۴۲۵۷	۴۲۹۵/۳	۰/۹	۲	۴۲۹۵/۳	۰/۹	۴/۵
الگوریتم SA				الگوریتم ACO			
افزایش تقاضا (%)	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی از حد پایینی GAMS (%)	زمان (دقیقه)	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی از حد پایینی GAMS (%)	زمان (دقیقه)	
۰	۲۱۸۰/۸	۲	۴	۲۱۷۶/۵	۱/۸	۳/۷	
۱۰	۲۲۵۰/۶	۲/۳	۴	۲۲۴۴/۰	۲	۳/۷	
۲۰	۲۳۷۹/۲	۲/۲	۴	۲۳۷۴/۶	۲	۳/۷	
۴۰	۲۷۶۹/۰	۱/۸	۴	۲۷۶۶/۲	۱/۷	۳/۷	
۶۰	۳۲۸۶/۴	۲	۴	۳۲۸۳/۲	۱/۹	۳/۷	
۸۰	۳۸۰۰/۲	۱/۸	۴	۳۸۰۰/۲	۱/۸	۳/۷	
۱۰۰	۴۲۹۵/۳	۹/۰	۴	۴۲۹۱/۱	۰/۸	۳/۷	

جدول ۲. نتایج حل ترکیب مسأله ایران ایر و ایران ایر تور با تقاضای روزانه (تقاضای همه مبدأ- مقصدها به یک میزان افزایش یافته است)

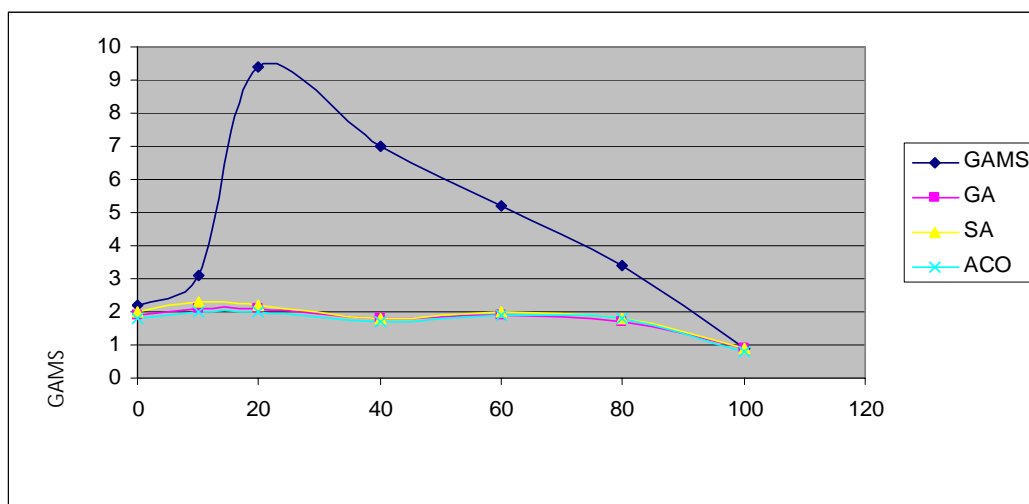
نرم افزار GAMS				الگوریتم GA			
افزایش تقاضا (%)	بزرگترین حد پایینی	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی (%)	زمان (دقیقه)	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی از حد پایینی GAMS (%)	زمان (دقیقه)
۰	۶۵۸۳	۶۶۱۵/۹	۰/۵	۲۸	۶۶۲۹/۱	۰/۷	۶/۸
۱۰	۶۶۰۱	۶۸۱۲/۲	۳/۲	۵۵	۶۶۶۰/۴	۰/۹	۶/۸
۲۰	۶۶۶۵	۶۷۸۵/۰	۱/۸	۴۰	۶۷۵۱/۶	۱/۳	۶/۸
۳۰	۶۶۸۳	۶۸۸۳/۵	۳	۵۹	۶۷۴۳/۱	۰/۹	۶/۸
۴۰	۷۱۰۶	جواب صحیح بدست نیامد	----	۱۲۰	۷۲۵۵/۲	۲/۱	۶/۸
۵۰	۷۳۴۳	۷۴۳۱/۱	۱/۲	۵۰	۷۴۰۱/۷	۰/۸	۶/۸
۶۰	۷۶۲۶	۸۰۸۳/۶	۶	۱۲۰	۷۷۷۸/۵	۲	۶/۸
۷۰	۷۹۱۶	۸۰۴۲/۷	۱/۶	۲۷	۸۰۳۴/۷	۱/۵	۶/۸
۸۰	۸۲۱۵	۸۳۶۲/۹	۱/۸	۴۰	۸۲۸۸/۹	۰/۹	۶/۸
۱۰۰	۸۸۱۵	۸۹۵۶/۰	۱/۶	۳۵	۸۹۰۳/۲	۱	۶/۸
الگوریتم SA				الگوریتم ACO			
افزایش تقاضا (%)	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی از حد پایینی GAMS (%)	زمان (دقیقه)	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی از حد پایینی GAMS (%)	زمان (دقیقه)	
۰	۶۶۲۹/۱	۰/۷	۶	۶۶۱۵/۹	۰/۵	۵/۶	
۱۰	۶۶۶۷/۰	۱/۰	۶	۶۶۵۳/۸	۰/۸	۵/۶	
۲۰	۶۷۵۸/۳	۱/۴	۶	۶۷۵۸	۱/۴	۵/۶	
۳۰	۶۷۴۹/۸	۱/۰	۶	۶۷۳۶/۵	۰/۸	۵/۶	
۴۰	۷۲۶۲/۳	۲/۲	۶	۷۲۵۴/۶	۲/۱	۵/۶	
۵۰	۷۴۱۶/۴	۱/۰	۶	۷۳۹۴/۴	۰/۷	۵/۶	
۶۰	۷۷۹۳/۸	۲/۲	۶	۷۷۶۳/۳	۱/۸	۵/۶	
۷۰	۸۰۵۰/۶	۱/۷	۶	۸۰۲۶/۸	۱/۴	۵/۶	
۸۰	۸۲۹۷/۲	۱/۰	۶	۸۲۷۲/۵	۰/۷	۵/۶	
۱۰۰	۸۹۲۰/۸	۱/۲	۶	۸۹۰۲/۴	۱	۵/۶	



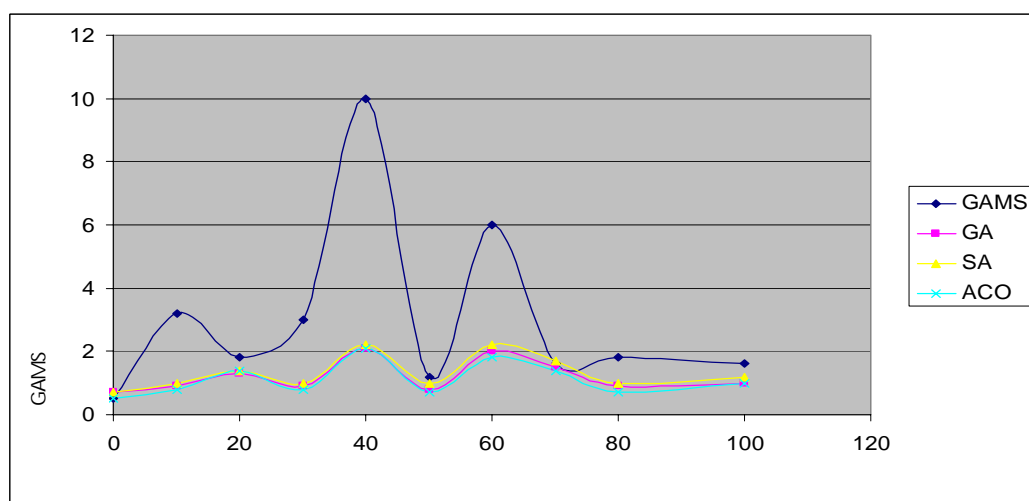
## ۶. نتیجه‌گیری

مسیرهای ارتباطی مناسبی برای این منظور وجود نداشت، امکان کسب این شناخت بسیار دشوار بود. بنابراین در این مطالعه، با بهره‌گیری نظرات تعدادی از کارشناسان یک شرکت داخلی، مسأله‌ای نزدیک به واقعیت مدل‌سازی و حل شد. برای بررسی عملکرد الگوریتمها، از نرم‌افزار GAMS برای مقایسه استفاده شد. جوابهای به‌دست آمده از حل کلیه مسائلی نمونه با روشهای پیشنهادی از نظر سرعت و دقت بسیار مطلوب‌اند. عملکرد الگوریتمها نزدیک به هم است، ولی با دقت در نتایج ملاحظه می‌شود که کارایی ACO کمی بیش از دو الگوریتم دیگر است. به این ترتیب امیدوار هستیم با استفاده از روشهای بهینه‌یابی جستجویی، بتوان زمینه حل همزمان مسائل برنامه‌ریزی پرواز را فراهم کرد.

هدف این مقاله ارائه روشهای حل ابتکاری برای یکی از مسائل مطرح در برنامه‌ریزی پرواز به نام تخصیص هواپیما به پرواز، بوده است. در این مسأله، نوع هواپیمای هر پرواز به گونه‌ای تعیین می‌شود که کل هزینه‌های عملیات حداقل شود. در این مطالعه سه روش مبتنی بر بکارگیری الگوریتمهای بهینه‌یابی جستجویی ژنتیک، گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده و کولونی مورچه برای این مسأله طراحی و پیاده‌سازی شده است. برای بررسی کارکرد الگوریتمها، مسأله‌ای نزدیک به مسأله واقعی یک شرکت هواپیمایی داخلی تهیه و حل شد. حل مسأله واقعی یک شرکت هواپیمایی مستلزم شناخت کامل ابعاد آن است. به دلیل آنکه



شکل ۳. میزان حداکثر خطای نسبی از حد پایینی نرم‌افزار GAMS در مقابل افزایش تقاضا



شکل ۴. میزان حداکثر خطای نسبی از حد پایینی نرم‌افزار GAMS در مقابل افزایش تقاضا

problem", *Mathematical programming*, 70, pp. 211-232.

9- Clarke, L., Hane, C., Johnson, E. and Nemhauser, G. (1996) "Maintenance and crew consideration in fleet assignment", *Transportation Science*, 30, pp. 249-260.

10- Gu, Z., Johnson, E., Nemhauser, G. and Wing, Y. (1994) "Some properties of the fleet assignment problem", *Operations Research Letters*, 15, pp. 59-71.

11- Klincewicz, J. and Rosenwein, M. (1995) "The airline exception scheduling problem", *Transportation Science*, 29, pp. 4-16.

12- Rexing, B., Barnhart, C., Kniker, T., Jarrah, A. and Krishnamurthy, N. (2000) "Airline fleet assignment with time windows", *Transportation Science*, 34, pp. 1-20.

13- Sherali, H., Bish, E. and Zhu, X. (2006) "Airline fleet assignment concepts, models, and algorithms", *European Journal of Operational Research*, 17, pp. 1-30.

14- Gillen, D. and Levinson, D. (1999) "Full cost of airline travel in the California corridor", *Transportation Research Record*, 1662, pp. 1-9.

15- Teodorović, D. (2008) "Swarm intelligence systems for transportation engineering: principles and applications", *Transportation Research, Part C*, 16, pp. 651-667

16- Dorigo, M., Di Caro, G. and Gambardella, L. (1999) "Ant algorithms for discrete optimization", *Artificial Life*, 5, pp. 137-172.

17- Sayarshad, H. and Ghoseiri, K. (2009) "A simulated annealing approach for the multi-periodic rail-car fleet sizing problem", *Computers & Operations Research*, 36, pp. 1789-1799.

18- Van Laarhoven, P., Arnts, E. (1989) "Simulated annealing: Theory and application", 3rd Edition, Kluwer Academic Publishers

۱۹- ناصرعلوی، سیدصابر (۱۳۸۵) "برنامه‌ریزی پرواز با روشهای بهینه‌یابی جستجویی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

## ۷. پانویس‌ها

- 1- Acyclic
- 2- Time Expanded
- 3- Pheromone
- 4- Transition Rule
- 5- Heuristic Information
- 6- Global Updating
- 7- Local Updating

## ۸. مراجع

۱- صفارزاده، محمود، عبدی، علی و بهشتی‌نیا، محمدعلی (۱۳۸۷) "ارایه الگوی نوین در مدیریت عملیاتی باندهای پروازی جهت ارتقاء ظرفیت بخش هوایی فرودگاه (در فرودگاه‌های چند بانده)", فصلنامه علمی- پژوهشی پژوهشنامه حمل‌ونقل، ۱، ص ۶۱-۶۹.

2- Etschmaier, M. and Mathaisel, D. (1985) "Airline scheduling: An Overview", *Transportation Science*, 19, pp. 127-138.

3- Kim, D. and Barnhart, C. (2007) "Flight schedule design for a charter airline", *Computers & Operations Research*, 34, pp. 1516-1531.

4- Warburg, V., Hansen, T., Larsen, A., Norman, H. and Andersson, E. (2008) "Dynamic airline scheduling: An analysis of the potentials of reflecting and retiming", *Journal of Air Transport Management*, 14, pp. 163-167.

5- Gopalan, R. and Talluri K. (1998) "Mathematical models in airline schedule planning: A survey", *Annals of Operations Research*, 76, pp. 155-185.

6- Abdelghany, K., Abdelghany, A. and Ekollu, G. (2008) "An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations", *European Journal of Operational Research*, 185, pp. 825-848

7- Abara, J. (1989) "Applying integer linear programming to the fleet assignment problem", *Interfaces*, 19, pp. 20-38.

8- Hane, C., Barnhart, C., Johnson, E., Marsten, R., Nemhauser, G. and Sigismondi, G. (1995) "The Fleet assignment problem: solving a large-scale integer