

## مدل ریاضی یکپارچه‌ی مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه برای خطوط هوایی با تنوع ناوگان وهاب تعمیرات

محمد امین گردانی\*، علیرضا رشیدی کمیجان\*\*

تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۲۷

### چکیده

مسائل برنامه ریزی پرواز به طور کلی شامل چهار مسئله (طراحی برنامه پرواز، تخصیص ناوگان، مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه) می‌باشد. در این پژوهش مدلی برای یکپارچه سازی مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه برای خطوط هوایی با تنوع ناوگان وهاب تعمیرات ارائه شده است. هدف اصلی مدل ارائه شده تعیین زنجیره‌ی پروازی برای هواپیماها و تخصیص خدمه (تیم پرواز) به تمام پروازهای هواپیماها با توجه به قوانین و مقررات در نظر گرفته شده توسط خطوط هوایی برای هواپیماها و خدمه به نحوی است، که هزینه‌های کل خطوط هوایی کمینه شود. بر خلاف مدل‌های یکپارچه سازی شده که توسط پژوهشگران پیشین در این حوزه ارائه شده است، نوع ناوگان وهاب نگهداری و تعمیرات در این پژوهش متنوع در نظر گرفته شده است. همچنین بحث کمینه کردن پروازهای بدون بلیت برای خدمه و هواپیما که می‌تواند هزینه‌های سنگینی را بر خطوط هوایی تحمیل کند به عنوان بخشی از تابع هدف در مدل ارائه شده، آورده شده است. برای حل مسئله در ابعاد کوچک از نرم افزار گمز و در ابعاد بزرگتر با توجه به پیچیده بودن مسئله و پیچیدگی محاسباتی آن، از روش فراالبتکاری ژنتیک استفاده شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی می‌تواند جوابی بهینه و یا نزدیک به بهینه را در زمانی قابل قبولی ارائه دهد.

**واژگان کلیدی:** مسیریابی هواپیماها، زمانبندی خدمه، تنوع ناوگان، تنوع وهاب تعمیرات، پرواز بدون بلیت، الگوریتم ژنتیک.

\* دانشجوی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*\* دانشیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه (نویسنده مسئول)،

## مقدمه

با تصویب قانون آزاد سازی در سال ۱۹۷۸ راه برای ایجاد تغییرات اساسی در صنعت هوایی هموار شد به گونه‌ای که شرکت‌های هواپیمایی قادر بودند مسیر پروازی و نرخ بلیت‌های هر مسیر را خود تعیین کنند. این امر موجب ایجاد فضای رقابتی بین خطوط هواپیمایی گردید. لذا خطوط هواپیمایی برای بقاء و تثبیت جایگاه خود در بازار رقابتی به وجود آمده ناگزیر به استفاده از ابزار قدرتمندی جهت اتخاذ تصمیم‌های دقیق و کاهش هزینه و افزایش سهم خود از تقاضای موجود بودند. این ابزار استفاده از رویکردهای برنامه ریزی سیستماتیک و مبتنی بر منطق ریاضی در بخش‌های مختلف خطوط هوایی بود. بخش‌های خطوط هوایی با هزینه‌های بسیار بالای عملیاتی و قوانین و مقررات منحصربه‌فرد و یک فرآیند برنامه ریزی پیچیده توصیف می‌گردند. برنامه ریزی پرواز بخش عمده‌ای از فعالیت‌های یک شرکت هوایی را در بر می‌گیرد. عنوان اصلی مسائلی که در برنامه ریزی پرواز مطرح می‌شود به شرح زیر است:

I- طراحی زمانبندی پرواز، II- تخصیص ناوگان، III- مسیریابی، نگهداری و تعمیرات هواپیماها، IV- برنامه ریزی خدمه پرواز

این فرآیند تصمیم‌گیری می‌تواند هم به صورت روش‌های سلسله‌مراتبی صورت گیرد و هم به صورت استفاده از مدل‌های یکپارچه سازی شده. در مدل‌های سلسله‌مراتبی از زمانبندی پرواز<sup>۱</sup> به عنوان ورودی برای حل تخصیص ناوگان<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند و بعد از تخصیص ناوگان مسیریابی برای هواپیماها صورت می‌گیرد. در آخرین مرحله نوبت به مسائل زمانبندی خدمه<sup>۳</sup> می‌رسد. همچنین محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات برای هر ناوگان معین در طول مسیریابی و یا بعد از حل آن بدست می‌آید. مسائل برنامه ریزی خدمه معمولاً به زمانبندی خدمه<sup>۴</sup> و مسائل تخصیص وظایف خدمه تقسیم می‌شوند. دو یا تعداد بیشتری از مسائل بهینه

---

1 -flight schedule

2 - aircraft routing problem

3 - crew management

4 - crew scheduling

سازی بالا پتانسیل این را دارند که به صورت همزمان حل شوند. که این امر منجر به راه حل - های بهتری می‌شود. علاوه بر اجتناب از راه حل‌های نشدنی بین حل‌های سلسله مراتبی، روش یکپارچه سازی<sup>۱</sup> می‌تواند راه حل‌های کوتاه تر و بهینه تری را تولید کند. امکان یکپارچه سازی تصمیم گیری‌های مربوط به مسیریابی هواپیماها و خدمه و همچنین زمانبندی مربوط به آن‌ها به عنوان یک حوزه‌ی پژوهشی بالقوه، برای صنعت حمل و نقل هوایی شناخته شده است ( برنهارت، ۱۹۹۸). در اولین مرحله از برنامه ریزی پرواز، شرکت‌های هوایی به دنبال پروازهایی از میان پروازهای کاندید می‌باشند که میزان درآمد شرکت را افزایش و به دنبال آن هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد. اطلاعات ورودی برای این مرحله از زمانبندی شامل، مشخص بودن تعداد مبدا و مقصدهای پروازی بر اساس تقاضا و هزینه‌های عملیاتی مربوط به ناوگان‌های موجود در شرکت و همچنین تعداد و ترکیب آن‌ها می‌باشد. از نتایج بدست آمده از مرحله اول زمانبندی، در مرحله تخصیص ناوگان استفاده می‌شود. اطلاعات ورودی در این مرحله شامل تعداد و نوع ناوگان و همچنین برنامه پروازی مشخص شده در مرحله اول می‌باشد. هدف از این بخش، تخصیص ناوگان به پروازهای برنامه ریزی شده از مرحله قبل می‌باشد. مرحله‌ی بعدی شامل مسیریابی هواپیماها با توجه به محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات آنها می‌باشد. این مرحله بخشی از مدل ارائه شده در این پژوهش را تشکیل می‌دهد که اطلاعات ورودی آن شامل، تعداد و نوع هواپیماها، هزینه‌های عملیاتی هر نوع هواپیما و محدودیت‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات هواپیماها می‌باشد. این مرحله از زمانبندی، تعیین می‌کند که هر زنجیره پروازی ( مجموعه پروازهایی که بصورت پشت سرهم انجام می‌شوند مانند: تهران به شیراز، شیراز به اصفهان، اصفهان به مشهد) باید توسط کدام هواپیما انجام شود تا علاوه بر رعایت محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات، هزینه‌های عملیاتی هواپیماها را مینیم کند و به طور کلی تر سود شرکت هوایی را افزایش دهد. در مرحله‌ی آخر از برنامه ریزی خطوط هوایی، نوبت به مرحله زمانبندی خدمه می‌رسد که این مرحله نیز به همراه مرحله‌ی قبلی قسمت‌های اصلی مدل ارائه شده در این تحقیق را تشکیل می‌دهند. بر

اساس نکته بیان شده توسط بازرگان (۲۰۱۰) بعد از هزینه سوخت، هزینه مربوط به خدمه پرواز بیشترین سهم را در هزینه‌های عملیاتی خطوط هوایی دارد. اطلاعات ورودی این مرحله شامل، برنامه پرواز شرکت هوایی و تعداد هواپیماها و دستمزد هر خدمه برای انجام هر پرواز می‌باشد. هدف اصلی این بخش، تخصیص خدمه پرواز به تمامی پروازهای برنامه ریزی شده، به نحوی است که مجموع هزینه‌های دستمزد خدمه را کمینه کند. مسئله‌ی در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل مدل سازی یکپارچه و همزمان مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه برای خطوط هوایی با تنوع ناوگان و هاب‌های نگهداری و تعمیرات به نحوی است که علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های شرکت هوایی، تمامی محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای هواپیماها و خدمه را ارضا کند. با توجه به اینکه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی قادر هستند این مسائل را حل کنند، اما به علت پیچیدگی مسائل مسیریابی هواپیما و زمانبندی خدمه (آبارا، ۱۹۸۹) برای حل مسائل با ابعاد بزرگ نیاز است تا از یک روش فراابتکاری بهره جست.

#### پیشینه تحقیق

تا کنون پژوهش‌های زیادی در حوزه‌ی مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه صورت گرفته است. کردو (۲۰۰۱) مسائل مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه را به صورت همزمان در نظر گرفت و یک مدل و رویکرد حل برای تصمیم‌گیری همزمان مسیریابی و زمانبندی ارائه داد. هدف وی مینیمم کردن زمانی بود که خدمه بعد از نشستن هواپیما فرصت داشتند تا هواپیما را برای پرواز بعدی آماده کنند. به طوری‌که هر دو پرواز توسط یک هواپیما انجام شود. وی برای حل مدل خود از رویکرد تجزیه بندرز استفاده کرد. سید زمان حسینی و رشیدی کمیجان (۱۳۹۵) مسئله مسیریابی در برنامه ریزی هواپیماها را بررسی کردند. آنها به دنبال ارائه‌ی مدلی بودند تا نشان دهند با تغییر فرودگاه قطب، شبکه پروازی را می‌توان با تعداد کمتری هواپیما به اجرا درآورد. در نهایت آنها مدلی ارائه کردند که با بررسی فرودگاه‌های مختلف در شبکه پروازی بهترین فرودگاه را انتخاب می‌کرد و یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل ارائه دادند. رشیدی کمیجان و شبانکاره (۱۳۹۶) دو مدل

جدید برای برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات هواپیما بر اساس ساعات پرواز و زمانبندی فعالیت‌های رمپینگ هواپیما با هدف مینیم کردن هزینه‌ها و تاخیرات ارائه کردند. آنها هر دو مدل خود را در گمز حل کردند و پس از تحلیل حساسیت بر روی آنها نشان دادند که در مدل نگهداری و تعمیرات، افزایش تعداد هواپیما باعث کاهش هزینه‌های مرتبط با نگهداری و تعمیرات هواپیما و افزایش ماشین‌آلات در مدل رمپینگ، باعث کاهش جزیی در تاخیرات می‌شود. ناصر علوی (۱۳۸۸) یک مدل ریاضی برای یکپارچه سازی مسائل مسیریابی هواپیماها و تخصیص ناوگان با هدف کمینه کردن هزینه سوخت هواپیماها و مسافران از دست رفته که به علت تاخیر هواپیما ایجاد می‌شد، ارائه کرد. وی چندین روش فراابتکاری را بررسی کرد و در نهایت از الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچگان برای حل مدل خود بهره جست. تونگ کوآن (۲۰۱۲) یک مدل ریاضی به منظور کاهش تعداد پروازهای تاخیری که بدلیل دیر رسیدن هواپیماها به ایستگاه‌های مقصد رخ می‌داد را با در نظر گرفتن افق زمانی یک روزه ارائه داد. از دیگر اهداف وی، مینیم کردن فاصله زمانی قانونی بین دو پرواز متوالی که توسط یک هواپیما انجام می‌شدند، بود. وی برای حل مدل خود از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده کرد. هیزاین گورکن (۲۰۱۶) یک مدل یکپارچه برای زمانبندی پرواز، تخصیص ناوگان و مسیریابی هواپیماها با در نظر گرفتن سرعت هواپیماها ارائه کرد. نوآوری وی نسبت به پژوهش‌های پیشین، در نظر گرفتن سرعت هواپیماها در مسائل مسیریابی بود. وی نشان داد که در نظر گرفتن این عامل در مسیریابی هواپیماها می‌تواند منجر به استفاده کارآمد تر از هواپیماها و کاهش تعداد هواپیماهای مورد نیاز برای انجام پروازها شود. ساندهو و کلابجن (۲۰۰۷) یک مدل یکپارچه سازی شده برای مسیریابی هواپیما و تخصیص ناوگان و زمانبندی خدمه به همراه محدودیت‌های تعداد هواپیماها را ارائه دادند. آنها در مدلشان محدودیت‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات هواپیماها را نادیده گرفتند و برای حل مدلشان از دو رویکرد استفاده کردند. رویکرد اول استفاده از آزاد سازی لاگرانژ به همراه الگوریتم تولید ستونی و رویکرد دوم مبتنی بر تجزیه بندرز بود. پاپاداکوس (۲۰۰۹) به بررسی مسائل مربوط به زمانبندی خدمه و تخصیص ناوگان و مسیریابی هواپیماها پرداخت. وی پس از

بررسی تمام مدل‌های ارائه شده در این حوزه‌ی پژوهشی یکی از کامل‌ترین‌های آنها را انتخاب کرد و یک الگوریتم جدید برای حل آن ارائه داد. همچنین وی محدودیت مربوط به تعداد هواپیماهای در دسترس را از محدودیت‌ها حذف کرد و آن را در مدل ترکیب کرد و نشان داد که محدودیت تعداد هواپیماها نمی‌تواند مسیرهای شدنی برای هواپیماها را تضمین کنند. رویکرد وی برای حل، ترکیبی از الگوریتم تولید ستونی و تجزیه بندرز بود. لیو (۲۰۱۷) یک مدل چند هدفه برای مسیریابی هواپیماها ارائه داد. از جمله اهداف وی می‌توان به مینیمم کردن مجموع انحرافات از برنامه پرواز اصلی و مینیمم کردن بیشترین زمان تاخیر نام برد. وی برای حل مدل خود از یک الگوریتم جست و جوی همسایه استفاده کرد. نادیا سویی (۲۰۰۹) مسائل زمانبندی خدمه را مورد بررسی قرار داد. وی در مدل خود محدودیت‌هایی از قبیل بازگشت خدمه به پایگاه بعد از سه روز پرواز، حداکثر زمان پرواز در یک روز و استراحت در یک بازه زمانی بین دو پرواز متوالی را در نظر گرفت و برای حل مدل خود از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. جوآن و همکارانش (۲۰۱۴) مسئله‌ی مربوط به زمانبندی خطوط هوایی را مطرح کردند. آنها از یک رویکرد برای حل مسائل تخصیص خدمه و مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه و تخصیص آنها استفاده کردند. تفاوت رویکرد آنها با رویکردهای پیشین این بود که هیچ محدودیتی را برای نگهداری و تعمیرات هواپیماها در طی طول روز در نظر نگرفته بودند. جنی رامیرز (۲۰۱۴) مدلی برای مسیریابی هواپیماها به همراه زمانبندی خدمه را با در نظر گرفتن یک نوع ناوگان و یک واحد نگهداری و تعمیرات ارائه داد. وی محل اقامت خدمه و تعمیرات و نگهداری را یکجا در نظر گرفته بود و برای حل از یک رویکرد تجزیه بندرز استفاده کرد. در انتها نتایج خود را با مدل سلسله مراتبی مقایسه کرد و نشان دادند که مدل وی در مقایسه با روش سلسله مراتبی هم سریع‌تر و هم بهینه‌تر است. شائو و همکارانش (۲۰۱۵) یک مدل ریاضی برای مسائل یکپارچه سازی شده‌ی تخصیص ناوگان و مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه با در نظر گرفتن میزان تقاضا برای سفر ارائه کردند. آنها برای حل مدل خود از رویکرد تجزیه‌ی بندرز به همراه چندین استراتژی که زمان رسیدن به جواب را تسریع می‌بخشید استفاده کردند. از دیگر فعالیت‌های محققین در این زمینه

می‌توان به فعالیت ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. این محققین با ارائه‌ی یک الگوریتم دو مرحله‌ای ابتکاری به مسئله‌ی بازیابی برنامه ریزی خدمه پرواز و هواپیما پرداخته‌اند. آنها با ارائه‌ی الگوریتم خود نشان دادند که الگوریتم تدوین شده نسبت به سایر الگوریتم‌های موجود جواب بهتری را در خصوص بازیابی برنامه ریزی انجام شده، ارائه می‌دهد. از مواردی که این محققین در نظر گرفتند می‌توان به مدیریت کردن پروازهای تاخیری، ظرفیت فرودگاه‌ها در روز برای پذیرش هواپیماها، زمان‌های استراحت و پرواز در روز برای هر خدمه و نگهداری و تعمیرات هواپیماها اشاره کرد. والتینا کاجیانی (۲۰۱۳) یک نگرش جدید برای مسئله‌ی جفت‌سازی خدمه، مسیریابی هواپیما و تخصیص ناوگان به صورت یکپارچه ارائه کرد. وی برای مسئله‌ی خود مفروضات خاصی را در نظر گرفت، این مفروضات شامل موضوعاتی نظیر اینکه در خلال شب پروازی وجود نداشته باشد، خدمه از یک پایگاه شروع به پرواز کند و در انتها مجدداً به آن باز گردد، بود. در نهایت وی مدل ریاضی خود را بر اساس مفروضات تعیین شده ارائه کرد و برای حل آن از الگوریتم تولید ستونی استفاده کرد. دونبار (۲۰۱۲) برای این مسائل یک مدل ریاضی با هدف مینیمم کردن مجموع تأخیرات خدمه و هواپیما که منجر به هزینه از دست رفتن مسافران می‌شد، ارائه کرد و نشان داد که مدل وی نسبت به مدل‌های سلسله‌مراتبی مسیریابی برای هواپیماها و خدمه را به نحوی موثر بهبود می‌دهد. وی برای حل مدل خود یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم تولید ستونی ارائه کرد. بن آمد (۲۰۱۷) یک مدل برای بهینه‌سازی مسائل مسیریابی هواپیماها و زمانبندی مجدد پروازها، به منظور حداقل کردن تاخیرات هواپیماها که در دنیای واقعی امری غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد ارائه کرد. وی در ابتدا دو مدل درجه‌ی دو از نوع عدد صحیح مختلط ارائه کرد و سپس برای حل آنها از الگوریتم انبوه ذرات استفاده کرد. جمیلی (۲۰۱۶) یک فرمول جدید را برای یکپارچه‌سازی مسائل مسیریابی هواپیماها و زمانبندی آنها با در نظر گرفتن تخصیص ناوگان را ارائه داد. که هدف آن تعیین برنامه سفر هواپیماها و توسعه جدول زمانی به نحوی که هزینه‌ها را مینیمم کند بود.

جدول (۱) خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته در راستای مسائل مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه با توجه به محدودیت‌های مرتبط به آن‌ها و همچنین تحقیق صورت گرفته توسط (رامیرز، ۲۰۱۴) و ارتباط تحقیق حاضر با آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه پژوهش‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران پیشین

پرواز بدون بلیت		تعداد مرکز نگهداری و تعمیرات		تعداد ناوگان		مدل ریاضی ارائه شده			سال	پژوهشگران
		چند	یک	چند	یک	مدل	زمانبندی خدمه	مسیریابی هواپیما		
برای خدمه	برای هواپیما			*		مدل یکپارچه		*	۲۰۱۷	بن آمد
		*		*			*	*	۲۰۱۷	ژانگ و همکاران
				*				*	۲۰۱۷	هانگ لیو
				*				*	۲۰۱۷	رشیدی کمیجان و شبانکاره
				*		*			۲۰۱۶	جمیلی
				*				*	۲۰۱۶	هیزاین گورکن
				*				*	۲۰۱۶	حسینی و رشیدی کمیجان



				*			*	*	۲۰۱۵	شانو و همکاران
*			*		*		*	*		رامیرز
				*			*	*	۲۰۱۴	جوآن و همکاران
					*	*			۲۰۱۳	کاجیانی
				*				*	۲۰۱۲	تونگ کوآن
					*	*			۲۰۱۲	دونبار
				*				*	۲۰۱۱	ناصر علوی
							*		۲۰۰۹	نادیا سویی
				*			*	*	۲۰۰۹	پاپادا کوس
				*				*	۲۰۰۷	ساندهو و کلابجن
					*	*			۲۰۰۱	کردو
*	*	*		*		*			۲۰۱۷	تحقیق حاضر

دراکثر پژوهش‌های ذکر شده، برای مسائل مسیریابی هواپیما و زمانبندی خدمه صرفاً یک مدل پوششی ساده (Covering Problem Set) ارائه شده است در حالیکه در این مقاله،

یک مدل یکپارچه حاوی محدودیتهای واقعی مسائل مسیریابی و محدودیتهای قانونی پرواز ارائه شده است. همچنین، علاوه بر در نظر گرفتن تنوع در نوع ناوگان و مراکز نگهداری و تعمیرات، هزینه‌های مرتبط با انجام پروازهای بدون بلیت برای هواپیماها و خدمه که می‌تواند هزینه‌های سنگینی را بر خطوط هوایی اعمال کند، دیده شده است. تفاوت دیگر این تحقیق با سایر مقالات آن است که در کلیه پژوهشهای پیشین، مدلها بگونه‌ای نوشته شده‌اند که قبل از تمام شدن سومین روز کاری یک هواپیما، تعمیرات کوتاه مدت (چک نوع A) انجام شود. به عبارت دیگر، ملاک انجام تعمیرات را روزهای پرواز در نظر گرفته‌اند در حالی که در این مقاله، ملاک ساعات پرواز است که هم واقعی تر و هم نگرارش محدودیتهای مربوطه پیچیده تر است. در نهایت برای حل مسئله در ابعاد بزرگ یک روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

### بیان مسئله

در این پژوهش خطوط هواپیمایی‌ای در نظر گرفته شده‌اند که دارای بیش از یک نوع ناوگان و مرکز نگهداری و تعمیرات (مراکزی که امکانات و نیروی لازم برای بازرسی هواپیماها در آنجا مستقر است) می‌باشند. این خطوط هوایی در پی آن هستند که در طی یک افق زمانی کوتاه مدت با توجه به قوانین و سیاست‌های در نظر گرفته شده برای خلبانان و هواپیماها، تصمیم‌گیری پیرامون مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه را به گونه‌ای انجام دهند که علاوه بر پوشش تمام پروازهای برنامه ریزی شده، هزینه کل نیز مینیمم شود. این هزینه‌ها می‌تواند شامل هزینه‌های انجام پروازها توسط هواپیماها، دستمزد خدمه برای انجام هر پرواز و پروازهای بدون بلیت برای هواپیماها و خدمه باشد.

پرواز بدون بلیت یک اتفاق ممکن (و البته نامطلوب) در صنعت هواپیمایی است که می‌تواند مربوط به هواپیما یا تیم پرواز باشد. پرواز بدون بلیت برای هواپیما زمانی است که هواپیما یک پرواز را بدون مسافر انجام دهد تا به شهری (مثلاً A) برسد و پرواز آن شهر به شهرهای دیگر را انجام دهد. این امر می‌تواند بدلیل حجم بالای تقاضای سفر از شهر A به سایر شهرها باشد

یا اینکه هواپیماهای موجود در شهر A به دلایل فنی امکان انجام پروازهای برنامه ریزی شده از آن شهر را نداشته باشند. به طور کلی این مورد عمدتاً در زمانی رخ می‌دهد که هواپیما یک پرواز خارج از برنامه زمانبندی را انجام دهد تا بتواند خود را به مقصدی برساند که از آنجا مسافران به نقطه‌ای دیگر منتقل نماید. منظور از پرواز بدون بلیت برای خدمه (تیم پرواز) زمانی است که خدمه به عنوان مسافر از شهر A به B پرواز می‌کنند تا هدایت پرواز از شهر B به C را بعهده گیرند. عمده دلیل این اتفاق آن است که خلبانهای ساکن در شهر B بدلیل تکمیل سقف ساعات پرواز روزانه (یا هفتگی) یا شرکت در دوره‌های آموزشی از پیش برنامه ریزی شده، امکان هدایت پرواز B به C را ندارند. بواسطه انجام پرواز بدون بلیت، هزینه‌های مشخصی متحمل شرکت هوایی می‌شود.

بر اساس سیاست این شرکت‌ها هر خدمه نباید بیشتر از حداکثر زمان در نظر گرفته شده درافق برنامه‌ریزی پرواز کند. این بازه‌ی در نظر گرفته شده، مستقل از نوع خلبانان در نظر گرفته شده است. همچنین از دیگر سیاست‌های آنها می‌توان به این نکته اشاره که: تمامی هواپیماها بدون در نظر گرفتن نوع آنها، حداکثر تا یک زمان مشخصی می‌توانند بدون آنکه تحت عملیات نت قرار گیرند، پرواز کنند. بنابراین در مسیریابی هواپیماها این نکته باید لحاظ شود. همانگونه که مشخص است مسئله مورد نظر یک مسئله‌ی ترکیبی از مسیریابی هواپیماها با توجه به محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات آنها و همچنین زمانبندی خدمه پرواز (تخصیص خدمه پرواز به پروازهای هواپیماها) با هدف، کمینه کردن هزینه کل انجام پروازها توسط خدمه و هواپیماها و هزینه انجام پروازهای بدون بلیت می‌باشد.

## مفروضات

- تعداد خلبانان، ناوگان‌ها و همچنین برنامه پروازی خطوط هوایی در دوره‌ی برنامه ریزی مشخص و معلوم است.

- محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات برای ناوگان‌ها مشخص و مستقل از نوع ناوگان‌ها است.
- هزینه‌های تخصیص خدمه و هواپیماها به پروازها مشخص است.
- زمان پرواز بین دو شهر مشخص و مستقل از نوع ناوگان است.
- هر پرواز می‌تواند توسط بیش از یک خدمه و یک هواپیما انجام شود.
- در صورت پرواز بدون بلیت برای هواپیما و خدمه یک هزینه ثابت و مشخص که مستقل از نوع خدمه و هواپیما می‌باشد، متحمل خطوط هوایی می‌شود.
- محدودیتی برای بازگشت خدمه و هواپیما در آخرین پرواز به شهری که اولین پرواز را از آنجا انجام داده‌اند در نظر گرفته نشده است.
- اولین پرواز برای هر هواپیما و خدمه از ایستگاهی آغاز می‌شود که محل استقرار آنها می‌باشد.
- هر خلبان توانایی پرواز با هر نوع ناوگان را دارد.
- هر خدمه حداکثر  $U$  ساعت در دوره برنامه‌ریزی باید پرواز کند.

### مدل ریاضی مسئله

در این بخش مدل ریاضی مسئله مورد نظر بیان می‌شود. پیش از ارائه مدل ریاضی مسئله، ابتدا نمادهای مورد استفاده معرفی می‌شوند.

#### • اندیس‌ها و مجموعه‌ها :

$I$ : اندیس گره (شهر)

$a$ : اندیس هواپیماها

$C$ : اندیس خدمه

$m$ : اندیس ایستگاههایی که هواپیما می‌تواند در آنها تعمیرات و نگهداری شود.

$p$ : اندیس مرتبه پرواز

$S$ : مجموع پروازهای برنامه ریزی نشده

$P$ : مجموع اندیس مرتبه پرواز

$M$ : مجموع هاب‌های تعمیرات و نگهداری

$F$ : مجموعه پروازهای برنامه ریزی شده.

$F'$ : مجموعه پروازهای برنامه ریزی شده و نشده.

### • پارامترهای مسئله

$cost_{aij}$ : هزینه‌ی عزیمت هواپیمای  $a$  از شهر  $i$  به شهر  $j$

$cost'_{cij}$ : دستمزد خدمه  $C$  برای پرواز از شهر  $i$  به شهر  $j$

$t_{ij}$ : زمان پرواز بین دو شهر  $i$  و  $j$

$A'_{ia}$ : نشان‌دهنده وجود ( $A'_{ia} = 1$ ) یا عدم وجود ( $A'_{ia} = 0$ ) هواپیمای  $a$  در شهر/گره  $i$  در شروع برنامه ریزی می‌باشد (وضعیت اولیه هواپیماها در شبکه).

$C'_{ia}$ : نشان‌دهنده وجود ( $C'_{ia} = 1$ ) یا عدم وجود ( $C'_{ia} = 0$ ) خدمه  $C$  در شهر/گره  $i$  در شروع برنامه ریزی می‌باشد (وضعیت اولیه خدمه در شبکه).

اسکالرها:

$H$ : حداکثر زمانی که هر هواپیما می‌تواند طی کند بدون آنکه به ایستگاه تعمیرات و نگهداری مراجعه کند.

$DH$ : هزینه پرواز بدون بلیت برای هواپیما

$DH'$ : هزینه پرواز بدون بلیت برای خدمه

$U$ : حداکثر زمان پرواز برای هر خدمه.

$M$ : یک عدد بزرگ است.

### • متغیرهای مسئله

$X_{aijp}$ : یک متغیر ۰ و ۱ است. اگر هواپیمای  $a$  از شهر  $i$  به سمت شهر  $j$  پرواز کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

$Y_{cijp}$ : یک متغیر ۰ و ۱ است. اگر خدمه‌ی  $c$  هدایت پرواز از شهر  $i$  به سمت شهر  $j$  را برعهده بگیرد ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

$Z_{iap}$ : یک متغیر ۰ و ۱ است. اگر در شهر  $i$  بر روی هواپیمای  $a$  عملیات نت صورت گیرد ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

$\varphi_{ajp}$ : زمان طی شده توسط هواپیمای  $a$  وقتی در  $p$  امین حرکت خود به شهر  $j$  می‌رسد.

### • بیان ریاضی اهداف مسئله

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} \sum_{(i,j) \in F'} x_{aijp} \text{cost}_{aij} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{(i,j) \in F'} y_{cijp} \text{cost}_{cij} + \sum_{(i,j) \in F} \left( \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} x_{aijp} \right. \\ & - 1) DH + \sum_{(i,j) \in F} \left( \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} y_{cijp} - 1) DH' \right. \\ & + \left( \sum_{(i,j) \in S} \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} x_{aijp} \right) DH \\ & + \left( \sum_{(i,j) \in S} \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} y_{cijp} \right) DH' \quad (1) \end{aligned}$$

در رابطه (۱): قسمت اول نمایانگر مجموع هزینه‌های انجام پروازها توسط هواپیماها و قسمت دوم نمایانگر مجموع هزینه‌های مربوط به خلبانان برای انجام پروازها می‌باشد. قسمت‌های سوم و چهارم در تابع هدف مرتبط با هزینه‌های مربوط به پروازهای بدون بلیت زمانی که یک پرواز برنامه ریزی شده توسط بیش از یک خدمه و یک هواپیما انجام شود، می‌باشد. در این حالت شرکت بابت هر خدمه و هر هواپیما یک هزینه‌ی ثابت  $DH$  و  $DH'$  را متحمل

می‌شود. دو قسمت آخر در ارتباط با هزینه‌ی مربوط به انجام پروازهای برنامه ریزی نشده توسط خدمه و هواپیماها می‌باشد، که در این حالت نیز شرکت هزینه‌ی ثابتی برابر با همان هزینه DH و DH' را به ازای هواپیما و خدمه متحمل می‌شود. همانگونه که در بالا اشاره شد تابع هدف به دنبال کمینه کردن تمامی این هزینه‌ها می‌باشد.

### • بیان ریاضی محدودیت‌های مسئله

در این مرحله با توجه به سیاست‌ها و قوانین شرکت هواپیمایی محدودیت‌های مدل نوشته می‌شود:

$$\sum_{j: (i,j) \in F'} x_{aijp+1} \leq \sum_{j: (j,i) \in F'} x_{ajip} \quad \forall a \in A, i \in N, p \in P \quad (2)$$

رابطه (۲): تضمین می‌کند که یک هواپیما زمانی می‌تواند از شهری در مرتبه  $p+1$  پرواز کند، که در مرتبه  $p$  از یکی از شهرها وارد آن شهر شده باشد.

$$\sum_{j: (i,j) \in F'} y_{cijp+1} \leq \sum_{j: (j,i) \in F'} y_{cji p} \quad \forall c \in C, i \in N, p \in P \quad (3)$$

رابطه (۳): یک خدمه برای آنکه بتواند در مرتبه  $p+1$  از شهری پرواز کند، حتما باید در مرتبه  $p$  از یکی از شهرها وارد آن شهر شده باشد.

$$\sum_{p \in P} \sum_{a \in A} x_{aijp} \geq 1 \quad \forall (i,j) \in F \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} y_{cijp} \geq 1 \quad \forall (i,j) \in F \quad (5)$$

رابطه (۴) و (۵): تضمین می‌کند که تمامی پروازهای برنامه ریزی شده باید توسط هواپیماها و خلبانان پوشش داده شوند. واضح است که اگر سمت چپ رابطه (۴) و (۵) بیش از یک شود پرواز بدون بلیت برای خلبانان و هواپیماها رخ داده است.

$$\sum_{a \in A} x_{aijp} = \sum_{c \in C} y_{cijp} \quad \forall (i,j) \in F', p \in P \quad (6)$$

رابطه (۶): تضمین می‌کند که یک هواپیما زمانی می‌تواند یک پرواز را در مرتبه‌ی  $p$  انجام دهد که یک خلبان نیز در آن مرتبه هدایت آن پرواز را برعهده گرفته باشد.

$$z_{iap} \leq \sum_{j: (j,i) \in F'} x_{ajip} \quad \forall a \in A, i \in M, p \in P \quad (۷)$$

بر اساس رابطه (۷) اگر هواپیمایی در یک مرتبه پروازی در یکی از هاب‌های نگهداری و تعمیرات تحت عملیات نت قرار گیرد باید حتما در همان مرتبه پروازی از یکی از شهرها به سمت هاب مورد نظر پرواز کرده باشد.

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in F'} t_{ij} y_{cijp} \leq U \quad \forall c \in C \quad (۸)$$

رابطه (۸): تضمین می‌کند که هر خدمه نباید در افق برنامه ریزی بیشتر از  $U$  ساعت پرواز کند.

$$\begin{aligned} -1 + t_{ij} + z_{aip-1} M \leq \varphi_{ajp} \leq \varphi_{aip-1} - M(x_{aijp} - 1) - t_{ij} + \varphi_{aip-1} \\ z_{aip-1} M + M(x_{aijp} \\ \forall a \in A, i, j \in N, i \neq j, p \in P \quad (۹) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{ij} - 1 - x_{aijp} (M - (1 - z_{aip-1})M) \leq \varphi_{ajp} \leq t_{ij} - 1 + x_{aijp} (M + (1 - z_{aip-1})M) \\ \forall a \in A, i, j \in N, i \neq j, p \in P \quad (۱۰) \end{aligned}$$

رابطه (۹) و (۱۰): محاسبه‌ی زمان طی شده توسط هواپیمای  $a$  وقتی در  $p$  امین حرکت خود به شهر  $j$  می‌رسد را نشان می‌دهد. برای تشریح این محدودیت به نکات زیر توجه کنید:

$$\varphi_{ajp} = \begin{cases} \varphi_{aip-1} + t_{ij} & z_{aip-1} = 0 \text{ و } x_{aijp} = 1 \\ t_{ij} & z_{aip-1} = 1 \text{ و } x_{aijp} = 1 \\ Relax & z_{aip-1} = 0 \text{ و } x_{aijp} = 0 \\ & z_{aip-1} = 1 \text{ و } x_{aijp} = 0 \end{cases} \quad (۱۱)$$



قسمت اول نمایانگر این موضوع است که اگر هواپیما در مرحله قبل از  $p$  در شهر  $i$  تحت عملیات نت قرار نگرفته شده باشد و از ایستگاه  $i$  به سمت ایستگاه  $j$  عزیمت کند، زمانی که طی می‌کند تا به ایستگاه  $j$  برسد برابر است با مجموع زمانی که طی کرده تا در مرحله‌ی قبل به ایستگاه  $i$  برسد به اضافه‌ی زمان پیموده شده بین دو شهر  $i$  و  $j$ . قسمت دوم نمایانگر این موضوع است که اگر هواپیما در مرحله قبل از  $p$  در شهر  $i$  تحت عملیات نت قرار گرفته شده باشد و از ایستگاه  $i$  به سمت ایستگاه  $j$  عزیمت کند، زمانی که طی می‌کند تا به ایستگاه  $j$  برسد تنها، برابر است با زمان پیموده شده بین آن دو شهر. در واقع زمانی که هواپیما در ایستگاهی تحت عملیات نت قرار می‌گیرد مجموع زمانی که طی کرده است تا به آن ایستگاه برسد برابر با صفر می‌شود و محاسبه زمان مجدداً از آن ایستگاه آغاز می‌شود. قسمت آخر نیز بیانگر این موضوع است که متغیر  $\varphi_{ajp}$  زمانی مقدار می‌گیرد که هواپیما در مرحله‌ی قبل از  $p$  حتماً از یکی از شهرها به سمت شهر  $j$  عزیمت کرده باشد.

$$\sum_{a \in A} \sum_{p \in P} z_{aip} \leq 0 \quad \forall i \notin M \quad (12)$$

رابطه (۱۲): این محدودیت مکمل محدودیت‌های (۹) و (۱۰) می‌باشد و تضمین می‌کند که هواپیما تنها در هاب‌های مشخص شده توسط شرکت هوایی می‌تواند تحت عملیات نت قرار گیرد.

$$\varphi_{ajp} \leq H \quad \forall a \in A, p \in P, j \in N \quad (13)$$

رابطه (۱۳): زمانی که یک هواپیما طی می‌کند تا در  $p$  امین حرکت خود به شهر  $j$  برسد، نباید از حداکثر زمان مجاز بیشتر شود. (در واقع هواپیما تنها مجاز است حداکثر  $H$  دقیقه را بدون عملیات نت پرواز کند)

$$\sum_{(i,j) \in F'} x_{aijp} \leq 1 \quad \forall a \in A, p \in P \quad (14)$$

$$\sum_{(i,j) \in F'} y_{cijp} \leq 1 \quad \forall c \in C, p \in P \quad (15)$$

رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) تضمین می‌کنند که هر خدمه و هواپیما در یک مرتبه‌ی پروازی حداکثر می‌توانند یک پرواز را انجام دهند.

$$x_{aijp} \leq A'_{ia} \quad \forall a \in A, i \in N, j \in N, p = 1 \quad (16)$$

$$y_{cijp} \leq C'_{ia} \quad \forall a \in A, i \in N, j \in N, p = 1 \quad (17)$$

رابطه‌های (۱۷) و (۱۶) تضمین می‌کنند که اولین پرواز برای هر خدمه و هواپیما نمی‌تواند از هر شهری آغاز شود و باید از ایستگاهی شروع شود که هواپیما و خلبانان در آنجا مستقر می‌باشند.

$$\{0, 1\} = \text{are Binary } z_{aip}, y_{cijp}, x_{aijp} \\ \{0, \text{inf}\} = \text{negative Non is } \varphi_{ajp} \quad (18)$$

رابطه (۱۸) نوع متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

از آنجا که مسئله مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه یک مسئله سخت (NP-Hard) است، برای حل آن در ابعاد بزرگ باید از روش‌های ابتکاری و یا فراابتکاری استفاده کرد. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده شده است. همچنین برای حل مدل در ابعاد کوچک، نرم افزار گمز مورد استفاده قرار گرفته است.

### حل مدل و پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که از علم زیست‌شناسی الهام گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک که به‌عنوان یکی از روشهای تصادفی بهینه‌سازی شناخته شده، توسط جان‌هالند در سال ۱۹۶۷ ابداع شده است (فالکو، ۲۰۰۲). روش حل فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در این مقاله از ۳ فاز اصلی تشکیل می‌شود. در فاز نخست تخصیص هواپیماهای در دسترس به پروازها صورت می‌گیرد؛ به عبارت دیگر مشخص می‌شود که هر پرواز توسط کدام هواپیما صورت می‌گیرد. در فاز دوم، پس از مشخص شدن پروازهای هر هواپیما، مسیریابی پروازهای مختلف برای هواپیما صورت می‌گیرد؛ به عبارت دیگر مشخص

می‌شود که هر هواپیما پروازهای مربوط به خود را به چه ترتیبی (طی چه مسیری) انجام می‌دهد. نهایتاً، در فاز سوم مسئله، تخصیص خدمه به پروازهای هر هواپیما صورت می‌گیرد؛ به عبارت دیگر مشخص می‌شود که هر خدمه مسئولیت کدام یک از پروازها را بر عهده می‌گیرد. به منظور بکارگیری الگوریتم ژنتیک باید ۶ بخش مهم مشخص شوند (لی، ۲۰۰۷). اول آنکه نمایش جواب به چه صورت است، دوم آنکه جواب اولیه به چه صورت تعیین می‌گردد و مقدار پارامترهای GA به چه صورت است (مقداردهی اولیه)، سوم آنکه برازندگی جواب‌ها به چه صورت محاسبه می‌گردد، چهارم آنکه جستجوی در فضای حل و تغییر و تنوع در جواب‌ها به وسیله عملگرهای ادغام و جهش و جهش به چه صورت انجام می‌شود، پنجم آنکه عملگر انتخاب جواب‌ها (انتخاب برای جهش و ادغام، انتخاب برای تکرار/نسل بعد جواب‌ها) به چه صورت انجام می‌شود. و نهایتاً، ششم آنکه شرط توقف الگوریتم چگونه اعمال می‌شود. بر اساس سه فاز فوق‌الذکر (I-تخصیص هواپیماها به پروازها، II-مسیریابی هر هواپیما طی پروازهای مربوط به آن، و III-تخصیص خدمه به پروازهای هواپیماها)، سه کروموزوم مجزا برای نمایش جواب‌های مسئله استفاده می‌شود.

فرض کنید تعداد کل پروازهای برنامه‌ریزی شده برابر با  $F$  باشد و تعداد کل هواپیماهای در دسترس برابر با  $A$  باشد. بخش اول نمایش جواب یک ماتریس باینری  $M1$  با اندازه  $A * F$  است  $(M1(a, f))_{A * F}$  که داریه  $m1(a, f)$  نشان می‌دهد پرواز  $f$  توسط هواپیمای  $a$  انجام می‌شود  $(m1(a, f) = 1)$  یا خیر  $(m1(a, f) = 0)$ . به عنوان مثال در جدول (۲) پرواز از  $f = n1 \rightarrow n2$  با هواپیما  $a = a2 \in A$  انجام می‌شود و پرواز  $f = n4 \rightarrow n3$  با هواپیما  $a = a1 \in A$  انجام می‌شود و الی آخر.

جدول ۲. بخش اول نمایش جواب در GA (تخصیص هواپیماها به پروازها)

	$f = n_1$ $\rightarrow n_2$	$f = n_2$ $\rightarrow n_1$	$f = n_3$ $\rightarrow n_4$	$f = n_4$ $\rightarrow n_3$	$f = n_5$ $\rightarrow n_4$	$f = n_4$ $\rightarrow n_1$	$f = n_3$ $\rightarrow n_5$
$a = a_1$ $\in A$	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱
$a = a_2$ $\in A$	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰
$a = a_3$ $\in A$	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
$a = a_4$ $\in A$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

در نمایش کروموزوم اول نمایش جواب بر اساس جدول (۲)، باید توجه شود که در هر ستون باید لااقل یک مقدار ۱ باشد و این به آن معناست که هر پرواز برنامه‌ریزی شده باید توسط لااقل یک هواپیما انجام شود. پس از مشخص شدن پروازهای مربوط به هر هواپیما بر اساس کروموزوم اول، این بار نوبت به مسیریابی هر هواپیما در پروازهای مربوط به آن می‌شود. برای این منظور، ابتدا برای هر هواپیما یک رشته به اندازه تعداد پروازهای مربوط به آن تعریف می‌کنیم (برای مثال، در جدول (۲)، برای هواپیما  $a = a_1 \in A$  سه پرواز برنامه‌ریزی شده است لذا اندازه رشته تعداد پروازهای آن برابر با ۳ می‌شود). سپس، بدون آنکه از کلیت مطلب کاسته شود هر یک از پروازهای آن شماره گذاری می‌شود (برای مثال، ۳ پرواز هواپیمای  $a = a_1 \in A$  به صورت  $1 \equiv f = n_4 \rightarrow n_3$ ،  $2 \equiv f = n_5 \rightarrow n_4$  و  $3 \equiv f = n_3 \rightarrow n_5$  شماره‌گذاری می‌شود. نهایتاً، شماره پروازهای هر هواپیما در رشته پروازهای مربوط به آن درج می‌شود (برای مثال، جدول (۳) برای پروازهای هواپیمای  $a = a_1 \in A$  نشان می‌دهد که ترتیب پروازها به صورت  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  است).

جدول ۳. بخش دوم نمایش جواب در GA (مسیریابی پروازهای هر هواپیما)

	پرواز اول	پرواز دوم	پرواز سوم	پرواز چهارم	پرواز پنجم	....
$a$ $= a_1$ $\in A$	۳	۲	۱	-	-	-

آنچه در فاز دوم GA و نمایش جواب پیشنهادی مهم است این است که ترتیب پیشنهادی به صورت ایده‌آل و با فرض شدنی بودن آن است. برای توضیح بیشتر فرض کنید که پس از پرواز  $n^4 \rightarrow f = n^5$  برای هواپیمای  $a = a_1 \in A$ ، با توجه به قید حداکثر مدت زمان پرواز بدون نت، امکان پرواز  $n^3 \rightarrow f = n^4$  وجود نداشته باشد؛ در این صورت، دو حالت رخ می‌دهد؛ حالت اول آنکه در شهر  $n^4$  (مقصد پرواز ۲ یا مبدا پرواز ۱) امکان نت وجود داشته باشد و حالت دوم آنکه در این شهر امکان نت وجود نداشته باشد. در حالت اول، مسیر پرواز همان است. اما در حالت دوم، به یک پرواز بدون بلیت از شهر  $n^4$  به شهری با امکان نت نیاز است و از آنجا که این پرواز رفت و برگشت می‌شود، دوبرابر هزینه پروازهای برنامه‌ریزی نشده به هزینه پروازهای مسیر تعریف شده جدول (۳) اضافه می‌شود. حال فرض کنید که در شهر  $n^4$  امکان نت وجود نداشته باشد ولی در شهر  $n^5$  امکان نت وجود داشته باشد، در این صورت اگر مسیر پرواز به صورت  $2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$  بگردد، هزینه اضافه برای پروازهای بدون بلیت حذف می‌شود. پس از آنکه مشخص شد هر هواپیما چه پروازهایی را انجام می‌دهد و مسیر پروازهای هر هواپیما به چه صورت است (پس از فاز ۱ و ۲ روش GA پیشنهادی بر اساس کروموزوم‌های مربوط به آنها)، نوبت به تعیین خدمه هر پرواز می‌شود. به عبارت دیگر باید مشخص شود هر پرواز از هواپیما توسط چه خدمه‌ای انجام می‌شود. برای نمایش جواب این فاز؛ از چند رشته ستونی استفاده می‌کنیم که اندازه ستون به اندازه کل مسیرها است (مثلاً، بر اساس جدول (۲)، تعداد مسیرها برابر با ۳ است که مسیر اول

مربوط به پروازهای هواپیما  $a = a_1 \in A$  است، مسیر دوم مربوط به پروازهای هواپیمای  $a = a_2 \in A$  و مسیر سوم نیز مربوط به پروازهای  $a = a_3 \in A$  است و توجه داشته باشید که برای  $a = a_4 \in A$  هیچ خدمه‌ای نیاز نیست چراکه پروازی انجام نمی‌دهد. فرض کنید که  $R$  برابر با تعداد کل مسیرها باشد و  $L$  بزرگترین طول مسیر باشد بخش سوم نمایش جواب یک ماتریس با اندازه  $R \times L$  است  $(M^3(r, l))$  که درایه  $m^3(r, l)$  نشان می‌دهد که در مسیر شماره  $r$  پرواز شماره ۱ توسط کدام خدمه انجام می‌شود. برای مثال جدول (۴) نشان می‌دهد که پرواز اول مسیر مربوط به هواپیما  $a = a_1 \in A$  توسط خدمه  $r_2$  انجام می‌شود پرواز دوم این مسیر نیز توسط همین خدمه انجام می‌شود و پرواز آخر آن توسط خدمه  $r_5$  انجام می‌شود.

جدول ۴. بخش سوم نمایش جواب در GA (تعیین خدمه هر پرواز)

	۱	۲	۳
$a = a_1$ $\in A$	$r_2$	$r_2$	$r_4$
$a = a_2$ $\in A$	$r_1$	$r_3$	$r_5$
$a = a_3$ $\in A$	$r_6$	-	-

در بخش سوم نمایش جواب و تعیین خدمه هر پرواز باید به این مهم توجه داشت که در صورتی می‌توان خدمه‌ای را به پروازی تخصیص داد که آن خدمه در شهر مبدا پرواز حضور داشته باشد و مدت زمان پرواز آن کمتر از حد مجاز  $U$  باشد. به عنوان مثال، اگر فرض کنیم مسیر پرواز هواپیمای  $a = a_1 \in A$  همان مسیر  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  باشد، آنگاه بر اساس جدول (۴) که خدمه  $r_2$  به پرواز اول آن اختصاص یافته است، باید خدمه  $r_2$  در مبدا پرواز اول (  $3 \equiv f = n_3 \rightarrow n_5$  ) یعنی شهر  $n_3$  حضور داشته باشد و مدت زمان پرواز آن از مقدار

$U$  بیشتر نباشد. لازم به ذکر است که بعد از هر پرواز  $n_j \rightarrow n_i = f$ ، توسط هواپیما  $a$  و خدمه  $c$ ، به مدت زمان پرواز خدمه و هواپیما به مقدار  $t_{ij}$  اضافه می‌شود. اگر مدت زمان پرواز خدمه  $C$  از حد مجاز و از پیش تعریف شده  $U$  بیشتر شود، آنگاه این خدمه از لیست خدمه‌های موجود در  $n_j$  حذف می‌شود و پرواز دیگری با این خدمه انجام نمی‌شود.

### مقداردهی اولیه (جواب اولیه)

کروموزوم اول نمایش جواب (تخصیص هواپیماها به پروازها): از ستون اول جدول (۲) به صورت تصادفی درایه یکی از سطرها برابر با ۱ می‌شود. به ستون بعدی رفته می‌شود و عمل قبلی تکرار می‌شود. این فرآیند تا آنجا ادامه می‌یابد که در هر ستون یک مرتبه مقدار ۱ قرار گرفته باشد و در واقع هر پرواز (ستون) به لااقل یک هواپیما (سطر) تخصیص می‌یابد. کروموزوم دوم نمایش جواب (مسیریابی هر هواپیما): بر اساس کروموزوم اول نمایش جواب مشخص می‌شود که هر هواپیما چه پروازهایی را انجام می‌دهد. پروازهای هر هواپیما شماره-گذاری می‌شود و یک رشته از این اعداد بدست آمده می‌شود که یک جایگشت تصادفی از آنها در نظر گرفته می‌شود.

کروموزوم سوم نمایش جواب (تعیین خدمه هر پرواز): برای هر پرواز اول مسیر هر هواپیما، یک خدمه از مجموعه خدمه‌های موجود در شهر مبدا آن پرواز به تصادف انتخاب می‌شود. برای پرواز دوم نیز از مجموع خدمه‌های موجود در شهر مبدا پرواز دوم و همچنین خدمه پرواز اول، یک خدمه دیگر به تصادف انتخاب می‌شود. این فرآیند تا آخر پرواز هر مسیر هر هواپیما انجام می‌شود. به طوری کلی مجموعه خدمه‌های بالقوه برای پرواز شماره  $t$  هر هواپیما عبارتند از مجموعه خدمه‌های حاضر در مبدا پرواز شماره  $t$ ، و خدمه پرواز شماره  $t - 1$ . لازم به ذکر است که یک خدمه نمی‌تواند به طور همزمان در دو پرواز حضور داشته باشد، لذا خدمه پروازهای هر هواپیما به ترتیب هواپیماها مشخص می‌شوند.

### محاسبه برازندگی هر جواب

پس از آنکه پروازهای هر هواپیما و مسیر آنها و خدمه مربوط به هر مسیر مشخص شدند. هزینه کل بدست آورده می شود. توجه کنید که در روش پیشنهادی هیچ مقداری تحت عنوان جریمه<sup>۱</sup> به تابع هدف اضافه نمی شود چراکه هر جواب بدست آمده ترمیم<sup>۲</sup> می شود و در هنگام ترمیم جواب هزینه هایی مثل پرواز بدون بلیت اعمال می شود. پس از محاسبه هزینه کل (Cost) مربوط به هر جواب (sol)، مقدار برازندگی جواب از فرمول زیر محاسبه می شود (بیزلی، ۱۹۹۶):

$$Fitness(sol) = \frac{1}{Cost(sol)} \circ$$

### عملگر ادغام و جهش

در الگوریتم پیشنهادی به منظور انجام دادن عملیات ادغام، از روش تک نقطه ای استفاده شده است (لی، ۲۰۰۷). این عملگر بر روی کروموزوم های بخش اول و دوم صورت می گیرد. کروموزوم بخش سوم (تعیین خدمه هر پرواز) نیز به تبع تغییرات رخ داده در کروموزوم های دو بخش قبل تغییر می کند. برای انجام جهش از ۳ عملگر: I-تعویض<sup>۳</sup> II-انعکاس<sup>۴</sup> و III-حذف و انتقال<sup>۵</sup> استفاده می کنیم (بک، ۱۹۹۳). عملگرهای پیشنهادی برای جهش را نیز با نرخ معینی بر روی کروموزوم بخش اول و بخش دوم نمایش جواب اعمال می کنیم. لازم به ذکر است که همچون عملگر ادغام، کروموزوم سوم به تبع کروموزوم های اول و دوم تغییر می کند و جهش می یابد. نکته ای که باید به آن اشاره داشته باشیم این است که بعد از عملگرهای ادغام و جهش ممکن است کروموزوم اول از حالت موجه خود خارج شود (یعنی برخی از

1 -Penalty

2 -Repair

3 Swap

4 -Reversion

5- Insertion



ستون‌ها مقدار ۱ نداشته باشند و برخی از ستون‌ها بیشتر از یک مقدار ۱ داشته باشند. به عبارت دیگر همه پروازها به هواپیماها تخصیص داده نشده باشد درحالی‌که برخی از پروازها توسط بیش از یک هواپیما انجام می‌شود. در اینصورت از ستونی که بیش از یک مرتبه مقدار ۱ دارد، مقادیر اضافه را حذف می‌کنیم و از ستونی که مقدار ۱ ندارد روی یکی از سطرهاى آن به تصادف مقدار ۱ قرار می‌دهیم.

### عملگر انتخاب

در اینجا، دو نوع عملگر انتخاب در نظر می‌گیریم؛ برای مورد اول از انتخاب تصادفی انتخاب می‌کنیم به این معنا که به طور تصادفی دو جواب برای ادغام و یا یک جواب برای جهش انتخاب می‌شوند. برای مورد دوم از انتخاب بر اساس چرخه رولت استفاده می‌شود که بر اساس آن هر جواب با برازندگی بیشتر شانس بیشتری برای رفتن به نسل/تکرار بعد را دارد (هالند، ۱۹۷۵). برای انتخاب بر اساس چرخه رولت، ابتدا برازندگی هر جواب را بر مجموع برازندگی‌ها تقسیم می‌کنیم و عدد حاصل شده را به عنوان شانس آن جواب در نظر می‌گیریم.

### شرط توقف

شرط توقف را طی شدن تعداد مشخصی تکرار تعریف می‌کنیم؛ یعنی پارامتر MaxIt را از قبل برای تعداد تکرارهای الگوریتم تعریف می‌کنیم و مادامی که تعداد تکرارها به این مقدار رسید الگوریتم متوقف می‌شود و بهترین جواب گزارش می‌شود.

### تنظیم پارامترهای الگوریتم

در ژنتیک چهار پارامتر اصلی وجود دارد که عبارتند از تعداد جمعیت (N\_POP)، درصد جهش (PM)، درصد ادغام (PC) و حداکثر تکرار (MaxIt). در این تحقیق برای تنظیم این پارامترها از یک شیوه سیستماتیک مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها به نام الگوریتم تاگوچی (تاگوچی، ۱۹۸۷)، استفاده شده است که بر اساس آن مقدار ۰/۲۵ برای نرخ جهش، ۰/۸ برای نرخ تقاطع، ۱۰۰ برای تعداد جمعیت و ۱۵۰ برای تعداد تکرار در نظر گرفته شده است.

### تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

برای ارزیابی روش حل پیشنهادی، چندین مسئله آزمایشی در ابعاد مختلف تعریف می‌شود. بعد/اندازه مسئله تعریف شده در این تحقیق توسط مجموعه‌هایی مثل تعداد شهرهای مبدا-مقصد (N)، تعداد پروازهای برنامه‌ریزی شده (F)، تعداد خدمه (C) و هواپیماها (A) برای پرواز، تعداد شهرها با امکان نت ( $N^{mt}$ ) مشخص می‌شود. برای آنکه سنجش دقیق‌تری روی روش حل پیشنهادی صورت گیرد، ۱۵ مسئله به صورت زیر تعریف شده‌اند که ۵ مسئله اول در اندازه کوچک، ۵ مسئله دوم در اندازه متوسط، و نهایتاً ۵ مثال عددی آخر در اندازه بزرگ می‌باشند. جدول (۵) ابعاد هر یک از این مسائل آزمایشی را نشان می‌دهد. در جدول (۶) نیز نحوه مقداردهی به پارامترهای هر یک از این مسائل آزمایشی مشخص شده است. به منظور اطمینان از بدست آوردن جواب‌های مطلوب و نزدیک به بهینه توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی، ابتدا برای چند مسئله‌ی کوچک و متوسط که امکان حل آنها توسط نرم افزار گمز وجود دارد، جواب‌های دو فاز مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه با توجه به رعایت قوانین و مقررات در نظر گرفته شده برای آنها با هدف کمینه کردن هزینه کل خطوط هوایی (پروازهای بدون بلیت، هزینه انجام پروازها توسط خدمه و هواپیماها) محاسبه شده و با جواب‌های ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مقایسه شده است. در جدول (۷) نتایج بدست آمده از حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و نرم افزار گمز مشخص شده است.

جدول ۵. ابعاد مسائل آزمایشی

مسئله آزمایشی	N	F	A	C	$N^{mt}$
۱	۳	۲	۲	۲	۱
۲	۴	۸	۳	۲	۱
۳	۵	۱۴	۳	۳	۲
۴	۶	۱۷	۳	۴	۲
۵	۷	۲۰	۴	۴	۳

۶	۸	۳۵	۵	۵	۳
۷	۹	۴۰	۴	۷	۳
۸	۱۰	۴۵	۶	۵	۳
۹	۱۱	۴۵	۷	۸	۴
۱۰	۱۲	۵۰	۸	۸	۴
۱۱	۱۵	۸۰	۱۰	۱۰	۵
۱۲	۱۷	۹۰	۱۲	۱۵	۵
۱۳	۱۹	۱۰۰	۱۵	۱۵	۷
۱۴	۲۰	۱۱۰	۱۷	۲۰	۷
۱۵	۲۰	۱۲۰	۲۰	۲۵	۸

جدول ۶. نحوه مقدار دهی به پارامترهای مسائل آزمایشی

پارامتر	نحوه تولید تصادفی
هزینه هواپیما	$\text{uniform}(5000, 10000)$
هزینه خدمه	$\text{uniform}(700, 1500)$
مدت زمان پرواز	$\text{uniform}(40, 120)$
مدت زمان مجاز پرواز هواپیما بدون نیاز به نت	$\text{uniform}(300, 500)$
مدت زمان پرواز خدمه	$\text{uniform}(600, 1080)$
هزینه/جریمه پروازهای برنامه‌ریزی نشده برای هواپیماها	$\text{uniform}(15000, 20000)$
هزینه/جریمه پروازهای برنامه‌ریزی نشده برای هواپیماها	$\text{uniform}(2000, 3000)$

جدول ۷. نتیجه حل مسائل آزمایشی با روش‌های حل پیشنهادی

مسئله آزمایشی	GAMS		GA	
	هزینه	زمان اجرا (sec)	هزینه	زمان اجرا (sec)
۱	۳۹۱۳۴	۷	۳۹۱۳۴	۱۵
۲	۶۸۵۳۸	۱۵	۶۸۵۳۸	۲۲
۳	۱۱۱۰۸۳	۳۴	۱۱۱۹۵۱	۴۳
۴	۱۴۳۵۲۳	۶۷	۱۴۳۵۲۳	۷۵
۵	۱۷۲۱۳۱	۸۰	۱۷۳۷۴۱	۸۱
۶	۲۲۵۶۹۱	۸۲۰	۲۲۵۶۹۱	۲۸۷
۷	۳۰۶۸۲۱	۱۵۳۰	۳۱۰۰۳۴	۳۵۶
۸	۳۵۲۱۳۹	۳۹۲۱	۳۵۳۷۳۱	۵۱۲
۹	۳۴۳۱۴۵	۴۰۳۵	۳۴۳۱۴۵	۸۵۲
۱۰	۳۸۵۹۰۱	۴۵۳۴	۳۸۵۹۰۱	۹۴۳
۱۱	۶۳۹۱۰۳	۱۰۰۰۰	۵۷۸۴۰۱	۱۳۹۵
۱۲	۷۴۶۹۰۱	۱۰۰۰۰	۶۵۹۰۳۳	۱۴۷۱
۱۳	NA	۱۰۰۰۰	۷۲۰۴۱۴	۱۶۹۰
۱۴	NA	۱۰۰۰۰	۷۹۷۸۵۹	۱۹۰۴
۱۵	NA	۱۰۰۰۰	۸۶۰۵۸۱	۲۲۶۵

مقدار تابع هدف و مدت زمان اجرا به عنوان دو معیار ارزیابی روش‌های حل در نظر گرفته شده‌اند. لازم به توضیح است که در تمامی مسائل فوق، سقف زمان حل توسط نرم افزار GAMS برابر ۱۰۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد در ۱۰ مسئله اول، GAMS در کمتر از سقف زمانی به جواب بهینه رسیده اما در مسائل شماره ۱۱ و

۱۲، جواب ارائه شده در مقاله بهترین جوابی است که GAMS در ۱۰۰۰۰ ثانیه به دست آورده است که لزوماً بهینه نیست. در مسائل ۱۳ الی ۱۵ نیز GAMS در طی ۱۰۰۰۰ ثانیه به هیچ جواب موجهی دست پیدا نکرده است. بر اساس نتایج حاصل شده مشاهده می‌شود که در مسائل بعد کوچک (مسائل آزمایشی شماره ۱ تا ۵)، حل مسئله به صورت بهینه و بدست آوردن پاسخ بهینه سراسری با استفاده از گمز در زمان قابل قبول امکان پذیر است. همچنین مشاهده می‌شود که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نیز، همچون گمز، در مسائل آزمایشی بعد کوچک، جواب بهینه یا نزدیک به بهینه را بدست می‌آورد و زمان اجرای آن نیز قابل قبول است. با افزایش بعد مسئله، در مسائل متوسط، گرچه با استفاده از گمز می‌توان باز هم جواب بهینه مسئله را بدست آورد و یا به آن خیلی نزدیک شد، اما زمان حل به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این در صورتی است که پاسخ الگوریتم پیشنهادی در مسائل بعد متوسط نیز بسیار نزدیک به گمز است درحالی‌که زمان حل مسئله بسیار کمتر شده است. نهایتاً در مسائل بعد بزرگ ملاحظه می‌شود که حل مسئله توسط گمز در یک زمان معقول، غیر ممکن است؛ درحالی‌که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مسئله را در این ابعاد نیز حل کرده است و با توجه به کیفیت جواب آن در ابعاد کوچک و متوسط می‌توان اطمینان داشت در ابعاد بزرگ نیز جواب‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی از مقدار بهینه سراسری انحراف چندانی نداشته باشند.

### بحث و نتیجه گیری

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یک مسئله مدیریتی مهم در تمام صنایع است که با حل بهینه آن می‌توان هزینه‌های سیستم را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. در این تحقیق به مسئله مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه پرواز با در نظر گرفتن تنوع ناوگان‌ها و هاب‌های تعمیرات پرداخته شده است. بیان کلی مسئله مورد نظر این تحقیق به این صورت است که: یک شرکت هواپیمایی مجموعه‌ای از پروازها بین چندین شهر مختلف را با استفاده از هواپیماها و خدمه در دسترس خود پوشش می‌دهد. این شرکت به دنبال شیوه‌ای مناسب برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت پروازهاست به گونه‌ای که مجموعه هزینه پروازها توسط هواپیما و خدمه مختلف کمینه

گردد. برای این منظور ابتدا لیست تمام پروازها مشخص می‌شود و وضعیت موجود ناوگان‌ها و خدمه این شرکت مشخص می‌شود (به این معنا که مشخص می‌شود که هر کدام از خدمه و هواپیماها در حال حاضر در کدام شهر قرار دارند). پس از مشخص شدن لیست پروازها و وضعیت اولیه هواپیماها و شبکه، هزینه هر پرواز توسط هواپیما و خدمه مختلف برآورد می‌شود. سپس سوالات اصلی تحقیق به این صورت بیان می‌شود:

- هر پرواز توسط کدام هواپیما انجام شود؟
- هر پرواز توسط کدام خدمه انجام می‌شوند؟
- مسیر پرواز هواپیماها به چه صورت باشد؟

که هزینه کل کمینه شود و قیود مسئله برقرار باشد. مهمترین قیود مسئله مرتبط به محدودیت حداکثر زمان پرواز بدون نت هواپیماها و حداکثر زمان در دسترس بودن خدمه در کوتاه مدت است. بر اساس این قیود، هر هواپیما قبل از مدت زمان مشخصی از پروازها، باید حتما در مکان/شهری با قابلیت نت قرار گیرد تا بتواند پس از عملیات نت مجددا پرواز کند. همچنین نمی‌توان از خدمه به مدت زمان دلخواه استفاده کرد بلکه در کوتاه مدت می‌توان آنها را به اندازه‌ای مشخص در اختیار داشت. از دو رویکرد مختلف برای حل مسئله در این مقاله استفاده شده است. در رویکرد اول، یک مدل برنامه‌ریزی خطی ۰ و ۱ مخلوط برای حل مسئله توسعه داده شده است که هدف مسئله (کمینه‌سازی مجموعه هزینه‌های پروازهای برنامه‌ریزی شده و پروازهای برنامه‌ریزی نشده) و قیود مسئله به صورت روابط ریاضی خطی بیان شده‌اند. در رویکرد دوم نیز از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک (به اختصار GA) استفاده شده است. برای حل مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، از CPLEX Solver در نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۴,۷,۱ استفاده شده است و روش فراابتکاری GA نیز روی نرم‌افزار MATLAB نسخه b۲۰۱۴ کد شده است. روش حل فراابتکاری مبتنی بر ژنتیک از ۳ فاز اصلی تشکیل می‌شود. در فاز نخست تخصیص هواپیماهای در دسترس به پروازها صورت می‌گیرد؛ در فاز دوم، پس از مشخص شدن پروازهای هر هواپیما، مسیریابی پروازهای مختلف برای هواپیما صورت می‌گیرد؛ نهایتاً، در فاز سوم مسئله، تخصیص خدمه به پروازهای هر

هواپیما صورت می‌گیرد. برای بکارگیری الگوریتم ژنتیک باید ۶ بخش مهم، I-نمایش جواب، II- نحوه بدست آوردن جواب‌های اولیه، III- تابع برازندگی جواب‌های بدست آمده، IV- نحوه جستجوی در فضای حل با عملگرهای جهش و ادغام، V- عملگر انتخاب جواب‌ها (انتخاب برای جهش و ادغام، انتخاب برای تکرار/نسل بعد جواب‌ها) و نهایتاً، VI- شرط توقف الگوریتم به طور کارا معین گردند. بعلاوه، پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توسط روش تاگوچی تنظیم شده است که نتایج حاصل شده به بهترین حالت خود میل کند. برای ارزیابی بیشتر رویکردهای حل پیشنهادی و اعتبار سنجی الگوریتم ژنتیک، ۱۵ مسئله آزمایشی در ابعاد مختلف کوچک، بزرگ و متوسط به تصادف تولید شده و با روش‌های حل پیشنهادی حل شده‌اند. مقدار تابع هدف و مدت زمان اجرا به عنوان دو معیار ارزیابی برای روش‌های حل در نظر گرفته شده‌اند. مشاهده شد که در مسائل بعد بزرگ حل مسئله توسط گمز در یک زمان معقول، غیر ممکن است؛ درحالی‌که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مسئله را در این ابعاد حل کرده است و با توجه به کیفیت جواب آن در ابعاد کوچک و متوسط می‌توان اطمینان داشت در ابعاد بزرگ نیز جواب‌های آن از مقدار بهینه سراسری انحراف چندانی نداشته باشند.

### پیشنهادات آتی

در این تحقیق برای پروازها پنجره زمانی در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر ما فرض کرده‌ایم که پروازها فقط باید انجام شوند و برای آنها قید پنجره زمانی در نظر گرفته نشده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی این قیود در بیان مسئله و مدلسازی لحاظ گردد. در این تحقیق، مکان/شهرها با قابلیت امکان نت هواپیماها از پیش تعیین شده و مشخص بودند. پیشنهاد می‌شود، در تحقیقات آتی مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های نت هواپیما نیز مورد توجه قرار گیرد و به مدیران شرکت هواپیمایی در تصمیم‌گیری مکان بهینه آنها کمک کند. همچنین محدودیت نگهداری و تعمیرات برای هواپیما را می‌توان بر اساس نوع ناوگان متفاوت در نظر گرفت.

همچنین می‌توان مدل ارائه شده را با در نظر گرفتن این موضوع که هر خدمه (خلبان) توانایی پرواز با یک هواپیمای مشخص را دارد و تخصیص آن‌ها به هواپیماهایی که توانایی پرواز با آن‌ها را دارند و همچنین در نظر گرفتن محدودیتی برای حداکثر زمان دوری خدمه از پایگاه (یعنی خدمه بعد از چند روز مشخص به مکانی که روز اول از آن پرواز کرده است بازگردد) توسعه داد.



## منابع

حسینی ، سید زمان . علیرضا ، رشیدی کمیجان (۱۳۹۵) ، ارائه مدل ریاضی و روش حل برای زمان بندی مجدد پروازها در شرایط مجاز بودن امکان جابجائی فرودگاه قطب و کمبود ناوگان هواپیمائی ، مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت پایدار اصفهان، شماره ۱۱۲۵ .

علیرضا ، رشیدی کمیجان . مهسا ، شبانکاره (۱۳۹۶) ، مدل ریاضی تخصیص ناوگان، همراه با زمان بندی فعالیت‌های تعمیر ، نگهداری و رمپینگ هواپیما ، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۲۵ ، شماره ۱.

ناصر علوی ، سید صابر (۱۳۸۸)، برنامه ریزی پرواز با روش‌های بهینه یابی جستجویی ، پژوهشنامه حمل و نقل ، سال ششم ، شماره دوم .

Abara, J. 1989. Applying integer linear programming to the fleet assignment problem .*Interfaces* 19.۲۱۱-۲۳۲,

Barnhart, C. et al. (1998). Flight strings models for aircraft fleetting and routing .*Transportation Science*.(۳)۳۲ ,

Bazargan,M.,(2010“(Airline Operations and Scheduling ۲ ,”ND Edition ,Embry-Riddle Aeronautical University, USA,Burlington, ASHGATE Publication.

Cordeau, J., Stojkovic, G., Soumis, F ,.Desrosiers, J., 2001. Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling . *Transportation Science*.۳۷۵-۳۸۸ ,(۴) ۳۵

De Falco , A. Della Cioppa , E. Tarantino ,Mutation-based genetic algorithm: performance evaluation , *Applied Soft Computing* 1 (۲۰۰۲) . ۲۸۵-۲۹۹

Dunbar, M., Froyland, G., Wu ,C.-L., 2012. Robust airline schedule planning: minimizing propagated delay in an integrated routing and crewing framework .*Transportation Science* 46 (2.۲۰۴-۲۱۶ ,(

J.E. Beasley , RC. Chu, A genetic algorithm for the set covering problem ,*European Journal of Operational Research* 94-۳۹۲ (۱۹۹۶) .۴۰۴

Jenny Díaz - Ramírez Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base. *Computers & Industrial Engineering* 75 (2014). ۶۸-۷۸ (

Juan-José Salazar-González , Approaches to solve the fleet-assignment, aircraft-routing, crew-pairing and crew-rostering problems of a regional carrier , *Omega* 43 (2014). ۷۱-۸۲ (

Loo Hay Lee, Chul Ung Lee ,Yen Ping Tan, A multi-objective genetic algorithm for robust flight scheduling using simulation , *European Journal of Operational Research* 177 (۲۰۰۷) ۹۴۸-۹۶۸ (

Nadia Souai , Jacques Teghem ,Genetic algorithm based approach for the integrated airline crew-pairing and rostering problem , *European Journal of Operational Research* 199. ۶۷۴-۶۸۳ (۲۰۰۹)

Papadakos, N. (2009). (Integrated airline scheduling. *Computers & Operations Research*, 36(1). ۱۷۶-۱۹۵ ,(

Sandhu, R & ,Klabjan, D. (2007). (Integrated airline fleet and crew pairing decisions. *Operations Research*. ۴۳۰-۴۳۸ ,۵۵ ,

Shao, S., Sherali, H.D., Haouari, M., 2015. A novel model and decomposition approach for the integrated airline fleet assignment, aircraft routing, and crew pairing problem. *Transportation Science* 51(۱), ۱۷

Chiu-Hung Chen, Jyh-Horng Chou , Optimization of short-haul aircraft schedule recovery problems using a hybrid multiobjective genetic algorithm , *Expert Systems with Applications* 37 (2012-۲۳۰۷) ( ۲۳۱۵ .

Valentina Cacchiani , A heuristic approach for an integrated fleet-assignment, aircraft-routing and crew-pairing problem , *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 41 (2013 . ۳۹۱-۳۹۸ (

Xiaoge Zhang, Sankaran Mahadevan , Aircraft re-routing optimization and performance assessment under uncertainty , *Decision Support Systems* 96 (2017 . ۶۷-۸۲ (

Hüseyin Gürkan , Sinan Gürel , M. Selim Aktürk, An integrated approach for airline scheduling, aircraft fleet and routing with cruise speed control , *Transportation Research Part C* 68 (2016) . ۵۷-۳۸ (

J.H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press ,*Ann Arbor, 1975.*

Taguchi G, Konishi S ,Taguchi Methods ,orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute ,*American Supplier Institute; 1987*] p. 8-35.[

Jamili, A., A robust mathematical model and heuristic algorithms for integrated - aircraft routing and scheduling, with consideration of fleet assignment problem ,*Journal of Air Transport Management* 58 (۲۰۱۶) . ۳۰ - ۲۱

Mohamed Ben Ahmed , Wisal Ghroubi , Mohamed Haouari , Hanif Sherali , A hybrid optimization-simulation approach for robust weeklyaircraft routing and retiming , *Transportation Research Part C* 84 . ۲۰-۱ (۲۰۱۷)

Yuzhen Hu , Hong Liao , Song Zhang , Yan Song, Multiple objective solution approaches for aircraft rerouting under the disruption of multi-aircraft , *Expert Systems With Applications* 83 (2017)283-299