فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ٤، تابستان ۱٤۰۲، ص. ۳۰٤٤-۳۰۲۱

مقاله علمی-پژوهشی

ارائه مدل بهینه‌سازی استوار دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی یکپارچه مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه تحت ریسک اختلال در پروازها

خلیل الله معمارزاده، دانشجوی دکترا، گروه صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد فلاح، دانشیار، گروه صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

حامد کاظمی پور (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

E-mail: H.kazemipoor@iauctb.ac.ir

بابک فرهنگ مقدم، دانشیار، موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی

دریافت: ۱٤۰۰/۰۹/۲۷ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۲/۱۱

چکیده

پس از طراحی شبکه و برنامه زمانی پروازها، مسائل مسیریابی و نگهداری‌وتعمیرات (نت) هواپیما و همچنین زمانبندی خدمه پرواز، از جملات تصمیمات مهم و تاثیرگذار بر هزینه‌های شرکت‌های هواپیمایی است. در تصمیم‌گیری پیرامون هریک از این مسائل، قیود و محدودیت‌های عملیاتی و قوانین و مقررات مشخصی حاکم است که باید ارضاء گردند. در صورت یکپارچه‌سازی این تصمیمات و یافتن پاسخ بهینه آن، کاهش قابل توجه‌ای در هزینه خطوط هوایی رخ می‌دهد. در این پژوهش، با فرض آنکه یک شرکت هواپیمایی طراحی برنامه زمانی پروازها را در سطح استراتژیک انجام داده است، به نحوه اجرای بهینه این برنامه پرداخته می‌شود؛ برای این منظور، یکپارچه‌سازی بهینه تصمیات مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه(تیم پرواز) مورد توجه قرار گرفته است. مسئله مورد نظر برای یک شرکت هواپیمایی، با تنوع پایگاه نت و خدمه، با هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌ها حل می‌شود. یکی از مهمترین چالش‌ها در حل این مسئله، اختلالات محتمل در برنامه اولیه است که موجب می‌شود برنامه ریزی هواپیما و خدمه، در عمل کارایی مناسبی نداشته باشد. بنابراین، در این تحقیق، اختلالات ممکن در برنامه اولیه را به صورت چندین سناریو مختلف تعریف کرده و با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور دومرحله‌ای، یک پاسخ استوار برای مسئله یکپارچه‌سازی تصمیمات مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه، ارائه می‌دهیم. در مدل استوار پیشنهادی، علاوه بر آنکه یکپارچه‌سازی تصمیمات صورت می‌پذیرد، متغیرهای تعدیل پذیر مرحله دوم از جمله تصمیم در خصوص لغو پرواز در اختلال نیز دیده می‌شود تا مدل با سناریوهای مختلف اختلال، تطبیق‌پذیر باشد. نتایج عددی اجرای مدل پیشنهادی تصدیق‌کننده کارپردپذیری مدل پیشنهادی برای ارائه یک پاسخ یکپارچه و استوار برای مسئله مورد نظر تحقیق است.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی پرواز، مسیریابی-نت هواپیما، برنامه‌ریزی خدمه، تصمیم‌گیری یکپارچه، بهینه‌سازی استوار سناریومحور

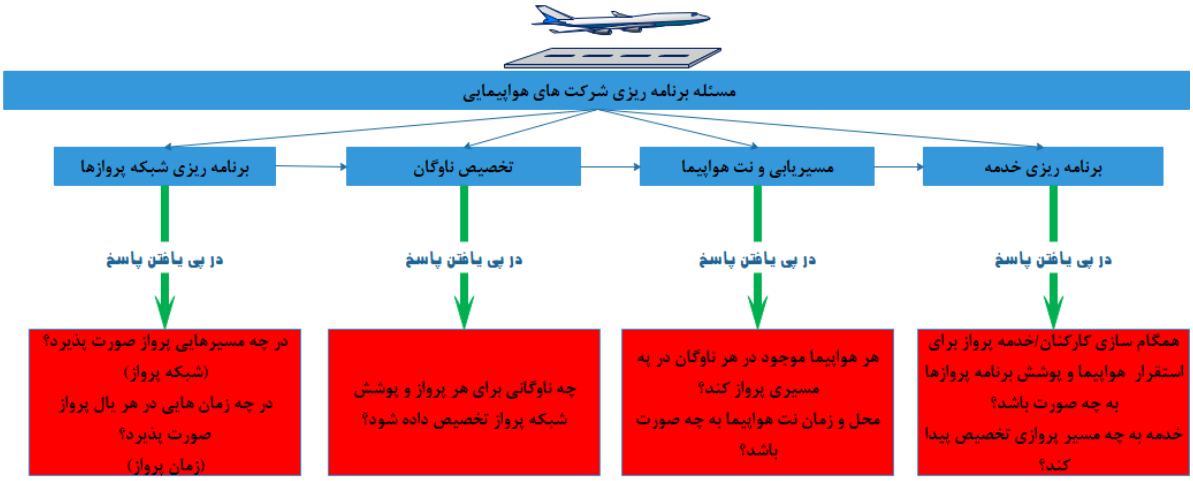
۱. مقدمه

صنعت هواپیمایی با مشخصه‌های همچون هزینه‌های عملیاتی بالا، تقاضای متغیر، ترافیک سنگین و قوانین و مقررات زیاد و پیچیده شناخته می‌شود. از اوایل دهه ۸۰ میلادی، با تصویب قانون آزاد سازی خطوط هوایی، فضای رقابتی سنگین بین شرکت‌های هواپیمایی نیز جزء لاینفک مشخصه‌های این صنعت شده است [Eltoukhy et al. 2017]. در این شرایط، شرکت‌های هواپیمایی باید مدیریت کارایی را روی منابع خود (شبکه پروازها، هواپیماها، خدمه) داشته باشند. برای مدیریت این منابع، مسئله طراحی شبکه و زمانبندی خطوط هوایی باید حل شود درحالی‌که، شمار زیادی از قیود و مقررات مرتبط با خدمه و هواپیماها ارضاء گردد.

مسئله طراحی شبکه و زمانبندی خطوط هوایی (یا برنامه‌ریزی شرکت‌های هواپیمایی) را می‌توان در ٤ زیرمسئله اصلی تقسیم-بندی کرد. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، زیرمسئله اول، که معمولا در سطح استراتژیک صورت می‌پذیرد، طراحی شبکه یا برنامه پروازها[1] است؛ پس از آن به ترتیب زیرمسائل تخصیص ناوگان[2] و مسیریابی-نت هواپیماها[3] مطرح می‌شود؛ زیر مسئله مهم پایانی نیز معمولا برنامه‌ریزی/زمانبندی خدمه[4] هست که این مسئله نیز معمولا به علت پیچیدگی خود به دو زیرمسئله کوچک‌تر همگام‌سازی[5] و تخصیص/ماموریت[6] خدمه افراز می‌شود [Abdelghany & Abdelghany, 2018; Barnhart, Belobaba, & Odoni, 2003; Etschmaier & Mathaisel, 1985].

طراحی شبکه و برنامه زمانی پروازها نقطه شروع تمامی برنامه-ریزی‌ها و عملیات خطوط هوایی است [Barnhart et al. 2009; Bazargan, 2016]. برنامه پرواز یک جدول زمانی است که نشان می‌دهد پرواز به چه شهری و در چه زمانی باید انجام شود و از طریق آن شبکه پرواز نیز مشخص می‌شود. تصمیمات یک شرکت هواپیمایی برای ارائه خدمات پروازی به‌طور عمده به پیش‌بینی‌های تقاضای بازار، خصوصیات عملکرد هواپیماهای کنونی، نیروی انسانی در دسترس، مقررات و همچنین رفتار شرکت‌های هواپیمایی رقیب بستگی دارد.

از نتایج بدست آمده از طراحی شبکه و برنامه زمانی پروازها، در تخصیص بهینه ناوگان استفاده می شود. اطلاعات ورودی در این مرحله شامل تعداد و نوع ناوگان و همچنین برنامه پروازی مشخص شده در سطح استراتژیک است. هدف از این بخش، تخصیص ناوگان به پروازهای برنامه‌ریزی‌شده و پوشش آنها با حداقل هزینه و یا سایر اهداف است [Barnhart et al., 2009; Gao, Johnson, & Smith, 2009; Sa, et al. 2019]. همراه و یا بعد از تخصیص ناوگان؛ مسیریابی هواپیماها با توجه به محدودیت‌ها و قوانین مرتبط نت هواپیماها صورت می‌پذیرد. این مرحله، که بخشی از مدل ارائه‌شده در این پژوهش را تشکیل می‌دهد، اطلاعات ورودی، تعداد و نوع هواپیماها ، هزینه های عملیاتی هر نوع هواپیما، شبکه پرواز، قوانین حاکم بر نت را نیاز دارد. پس از حل این زیرمسئله، مشخص می‌شود که هر زنجیره پروازی باید توسط کدام هواپیما انجام شود تا علاوه بر رعایت قوانین نت، هزینه-های عملیاتی هواپیماها حداقل گردد و یا سایر اهداف شرکت هواپیمایی تحقق یابد [Al-Thani et al. 2016; Başdere & Bilge, 2014; Gopalan & Talluri, 1998; N. Safaei & Jardine, 2018; Sarac et al. 2006]. نهایتا برنامه‌ریزی خدمه به عنوان آخرین زیرمسئله در برنامه‌ریزی خطوط هوایی مطرح می‌شود و با توجه به سهم بالای آن در هزینه‌های عملیاتی، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [Antunes et al. 2019; Barnhart et al., 2003; Kasirzadeh et al. 2017; Schaefer et al. 2005; Nemhauser].



شکل ۱. زیرمسائل اصلی در برنامه‌ریزی پرواز شرکت‌های هواپیمایی

مدل‌ها و تکنیک‌های تحقیق در عملیات، تاثیر چشمگیری بر عملیات برنامه‌ریزی و مدیریت خطوط هوایی داشته‌اند. پیشرفت‌های عرصه فناوری کامپیوتری و مدل‌های بهینه‌سازی، به شرکت‌های هوایی کمک کرده است که بتوانند پاسخ بهینه یا نزدیک به بهینه برای هر یک از مسائل فوق‌الذکر را بدست آورند و کارایی عملیات خود را بهبود دهند. نقش گسترده این مدل‌ها، موجب تأسیس واحدهای تحقیق در عملیات در خطوط هوایی زیادی شده است که به میلیون‌ها دلار صرفه‌جویی اقتصادی کمک کرده است [Barnhart et al., 2003]. این واحدها در شکل‌گیری مجمع حرفه‌ای مهمی به نام «*گروه خطوط هواپیمایی در فدراسیون بین‌المللی مجامع تحقیق در عملیات*[۷]» سهیم بوده‌اند که به دنبال پیشرفت، توسعه و کاربرد علم تحقیق در عملیات در صنعت هواپیمایی است[۸].

گرچه حل هر یک از زیر مسائل چهارگانه ذکر شده در برنامه-ریزی خطوط هوایی، موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره-وری شرکت‌های هواپیمایی می‌شود، اما تحقیقات جدید به منظور دست‌یابی به بهینگی سراسری معمولا دو یا چند زیرمسئله را به صورت یکپارچه حل می‌کنند [Cacchiani et al. 2016, 2019; Gao et al., 2009; Papadakos, 2009]. به عبارت دیگر، علاوه بر اجتناب از راه حل‌های نشدنی بین حل‌های سلسله‌مراتبی ، روش و رویکرد یکپارچه سازی[۹] می تواند شرکت هواپیمایی را به سمت پاسخ بهینه سراسری میل دهد.

همچنین، طراحی شبکه و تدوین برنامه بهینه پرواز، بر روی مدیریت درآمدهای شرکت‌های هواپیمایی نیز بسیار تاثیرگذار است. با حفظ درآمد بیشینه، در صورتی که برنامه‌ریزی تاکتیکی تصمیمات تخصیص ناوگان و مسیریابی-نت هواپیما و همچنین برنامه‌ریزی خدمه به درستی صورت پذیرد، مجموع هزینه‌ها نیز کمینه می‌گردد و در نتیجه بیشینه سودآوری حاصل می‌شود. با تخصیص و مسیریابی بهینه هواپیماهای هر ناوگان، می‌توان هزینه‌های سوخت، که بیشینه هزینه شرکت‌های هواپیمایی را در بر می‌گیرد، را کاهش کرد.

پس از سوخت، هزینه خدمه پرواز بیشترین سهم در هزینه کل را دارد [Bazargan, 2016]؛ لذا برنامه‌ریزی بهینه خدمه پرواز نیز می‌تواند کاهش چشم‌گیری در هزینه کل داشته باشد. بر این اساس، در صورتی که برنامه‌ریزی یکپارچه ناوگان و هواپیماها و خدمه پرواز به صورت بهینه صورت پذیرد، کمینه هزینه اجرای برنامه پروازی رخ می‌دهد. این مهم، این انگیزه را ایجاد کرده است که، محققان مختلفی به این زیرمسائل از برنامه‌ریزی شرکت‌های هواپیمایی بپردازند.

در این پژوهش، با فرض آنکه یک شرکت هواپیمایی، طراحی برنامه زمانی پروازها را در سطح استراتژیک انجام داده است، به

نحوه اجرای بهینه این برنامه پرداخته می‌شود؛ برای این منظور، بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه مسیریابی-نت هواپیما و زمانبندی و پوشش برنامه پروازها، برای یک شرکت هواپیمایی که ناوگان و پایگاه‌های نت و خدمه متنوع دارد، مورد توجه قرار گرفته است. در مسئله مورد نظر این تحقیق، اختلال در برنامه اولیه و ایجاد تاخیرات قبل از هر پرواز نیز در نظر گرفته می‌شود و برنامه‌ریزی یکپارچه مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه، با در نظر گرفتن ریسک اختلالات محتمل آتی صورت می‌پذیرد. این مسئله، با استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی استوار سناریومحور دومرحله‌ای حل می‌شود که در مرحله اول، یک برنامه یکپارچه برای ناوگان و تیم‌های پروازی بدست آورده می‌شود و در مرحله دوم، با توجه به سناریو اختلال رخ داده، تصمیماتی از جمله لغو پرواز، تاخیرات و امثالهم دیده می‌شوند که امکان تعدیل در پاسخ اولیه و تطبیق آن با سناریو اختلال رخ‌داده، وجود داشته باشد. به طور خلاصه، هدف اصلی این تحقیق، ارئه یک مدل برنامه‌ریزی استوار سناریومحور برای برنامه‌ریزی یکپارچه مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه، با در نظر گرفتن ریسک اختلالات محتمل که در آن عدم‌قطعیت در زمان‌های اختلال پرواز به صورت سناریومحو در نظر گرفته می‌شود. در همین راستا، مهمترین سوالاتی که این تحقیق در پی پاسخ به آن است عبارت است از، ۱) مهمترین پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری در توسعه مدل مذکور چه مواردی هستند؟ ۲) یکپارچه‌سازی تصمیمات مسیریابی-نت و برنامه سفر خدمه پرواز چه مزیت‌هایی دارد؟ و ۳) ارزش در نظر گرفتن سناریوهای اختلال و کنترل آن با رویکرد بهینه‌سازی استوار پیشنهادی چیست؟

محتوای این تحقیق به صورت زیر سازماندهی شده است؛ در بخش ۲ به مرور منابع و ارائه شکاف تحقیقاتی پرداخته شده است، در بخش ۳ مسئله مورد نظر این تحقیق به طور دقیق تبیین می‌شود و جزییات آن توضیح داده می‌شود. در بخش ٤ به ارائه مدل بهینه‌سازی استوار سناریومحور تعدیل پذیر برای حل مسئله پرداخته می‌شود. در بخش ۵، با استفاده از یک مطالعه عددی، به ارزیابی مدل و خروجی آن از منظر استواری پرداخته می‌شود و نهایتا جمع‌بندی تحقیق در بخش ٦ انجام می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق

همانطور که در مقدمه تحقیق اشاره شد، در این پژوهش زیرمسائل مرتبط با برنامه‌ریزی مسیریابی و نت هواپیماها و همچنین زمانبندی خدمه به صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در ادامه برخی از پژوهش‌های مرتبط در این زمینه مرور می‌شود و در ادامه خلاء های تحقیقاتی و نوآوری پژوهش جاری تبیین می‌گردد. خواننده برای مرور منابع کامل در زمینه برنامه‌ریزی پرواز به منابع [Abdelghany et al. 2018; Barnhart, et al. 2003; Eltoukhy et al., 2017] ارجاع داده می‌شود.

تا کنون پژوهش‌های زیادی در زمینه مسیریابی-نت هواپیماها و زمانبندی خدمه صورت گرفته است. در یکی از نخستین پژوهش‌ها در این زمینه، [Cordeau et al. 2001] مسائل مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه را به صورت همزمان در نظر گرفتند و یک مدل و رویکرد حل برای تصمیم گیری همزمان مسیریابی و زمانبندی ارائه دادند. هدف در این تحقیق کمینه کردن زمانی بود که شرکت های هواپیمایی بعد از نشستن هواپیما فرصت داشتند تا هواپیما را برای پرواز بعدی آماده کنند بطوریکه هر دو پرواز توسط یک هواپیما انجام شود. آنها برای حل مدل خود از رویکرد تجزیه بندرز استفاده کردند. در پژوهش [Weid et al. 2010] مسائل مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه را به صورت همزمان بررسی کردند و محدودیت‌هایی از قبیل بازگشت خدمه در آخرین پرواز به پایگاهی که اولین پرواز را از آنجا آغاز کرده بودند، و همچنین حداقل زمان مورد نیاز برای انجام دو پرواز متوالی توسط یک خدمه را در نظر گرفتند. آنها برای حل مدل خود یک الگوریتم ابتکاری تکرارشونده ارائه کردند.

برای یکپارچه سازی تصمیمات ناوگان و خدمه، [Sandhu et al. 2007] یک مدل یکپارچه برای مسیریابی هواپیما و تخصیص ناوگان و زمانبندی خدمه به همراه محدودیت‌های تعداد هواپیما ها ارائه دادند. آنها محدودیت‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات هواپیماها را نادیده گرفتند و برای حل مدل 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. همچنین، [Papadakos, 2009] به بررسی مسائل مربوط به زمانبندی خدمه و تخصیص ناوگان و مسیریابی هواپیماها پرداخت. وی پس از بررسی تمام مدل-های ارائه شده در این حوزه‌ی پژوهشی یک مدل کامل انتخاب کرد و یک الگوریتم جدید مبتنی بر تجزیه بندرز و تولید ستون برای حل آن ارائه داد.

در پژوهش [Souai & Teghem, 2009] به بررسی زیرمسائل زمانبندی خدمه پرداخته شده است. آنها در مدل خود محدودیت‌هایی از قبیل بازگشت خدمه به پایگاه بعد از سه روز پرواز، حداکثر زمان مجاز پرواز در یک روز و استراحت مورد نیاز قانونی در یک بازه زمانی بین دو پرواز متوالی را در نظر گرفتند. همچنین، [Salazar-González, 2014] به توسعه مدل اخیر پرداختند. آنها از یک رویکرد برای حل مسایل تخصیص خدمه و مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه و تخصیص آنها استفاده کردند و رویکرد خود را در یک مسئله واقعی پیاده‌سازی کردند . آنها در رویکرد خود تمامی موارد ذکر شده را فقط برای پرواز در طول یک روز بررسی کردند. تفاوت رویکرد آنها با رویکردهای پیشین این بود که هیچ محدودیتی را برای نت هواپیماها در طی طول روز در نظر نگرفته بودند.

در یکی از مقالات مرتبط با پژوهش جاری، بدون در نظر گرفتن تنوع ناوگان و پایگاه خدمه و نت، [Díaz et al. 2014] مدلی برای مسیریابی هواپیماها به همراه زمانبندی خدمه را با در نظر گرفتن یک نوع ناوگان و پایگاه نت ارائه دادند. آنها محل اقامت خدمه و محل نت را یکجا در نظر گرفته بودند و برای حل از رویکرد تجزیه بندرز استفاده کردند. در انتها نتایج خود را با مدل سلسله‌مراتبی مقایسه کردند و نشان دادند که مدل آنها در مقایسه با روش سلسله-مراتبی کارایی بیشتری دارد.

در رویکردهای مبتنی بر تجزیه برای یکپارچه‌سازی تصمیمات خطوط هوایی، [Shao, Sherali, & Haouari, 2015] یک مدل ریاضی برای مسائل یکپارچه‌سازی تخصیص ناوگان و مسیریابی هواپیما ها و زمانبندی خدمه با در نظر گرفتن میزان تقاضا برای سفر ارائه کردند. آنها برای حل مدل خود از رویکرد تجزیه بندرز، به همراه چندین استراتژی که زمان رسیدن به جواب را تسریع می بخشید، استفاده کردند. همچنین، (Zhang & Mahadevan, 2017) با ارائه یک الگوریتم دو مرحله‌ای ابتکاری به مسئله بازیابی برنامه‌ریزی خدمه پرواز و هواپیما پرداختند. از مهمترین موارد در نظر گرفته شده در تحقیق آنها می‌توان به مدیریت کردن پروازهای تاخیری، ظرفیت فرودگاه برای پذیرش هواپیماها، زمان استراحت و پرواز برای هر خدمه اشاره کرد. در پژوهش [Cacchiani et al. 2013] یک نگرش جدید برای زیرمسائل جفت‌سازی خدمه، مسیریابی هواپیما و تخصیص ناوگان به صورت یکپارچه ارائه شده است. آنها برای مسئله خود مفروضات خاصی را در نظر گرفتند. این مفروضات شامل موضوعاتی نظیر اینکه در خلال شب پروازی وجود نداشته باشد، و بازگشت خدمه به پایگاه شروع پرواز باشد، می گردد. آنها مدل ریاضی خود را بر اساس مفروضات تعیین‌شده ارائه کردند و برای حل آن از الگوریتم تولید ستونی استفاده کردند.

در پژوهش [جلیلی و همکاران، ۱۳۹۷] بر اساس مدل رگرسیون خطی چندگانه به پیش‌بینی تقاضای مسافر و بار در صنعت هوایی ایران پرداخته شده است. همچنین، [میرابی، غیاثوند و توکلی مقدم، ۱۳۹۸] به ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای حل مساله مکان‌یابی-تخصیص هاب در

فرودگاه های ایران پرداخته شده است و با توجه به NP-Hard بودن مسئله، الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی در کنار روش اپسیلون محدودیت پیشنهاد شده است. در مقاله [رشیدی کمیجان و گردانی، ۱۳۹۸]، به ارائه یک مدل یکپارچه برای تصمیمات مسیریابی-نت و زمانبندی خدمه پرداخته شده است و روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای آن بکار گرفته شده است. در طراحی مثال عددی این تحقیق، فرض برابری تعداد هواپیما با تیم پرواز، از نتایج عددی مقاله مذکور مورد استفاده قرار گرفته شده است.

در ارتباط با مسئله اصلی این تحقیق، یعنی مسئله مسیریابی-نت هواپیما، در پژوهش مروری [Temucin et al. 2021] که اخیرا به انتشار رسیده است، تحقیقات مرتبط با مسئله مسیریابی-نت تا سال ۲۰۲۰ مرور شده است. در این پژوهش، زیرمسائل تحت بررسی، روش‌های حل، و اهمیت این مسائل برای صنعت هواپیمایی و فرصت‌های تحقیقاتی به طور مفصل مرور شده است. در توسعه کاربردهای یادگیری ماشین و به طور خاص تکنیک‌های یادگیری تقویتی، پژوهش [Ruan et a. 2021] به ارائه یک الگوریتم حل مبتنی بر یادگیری تقویتی برای مسئله مسیریابی-نت هواپیما پرداخته است که در آن محدودیت ظرفیت ناوگان و محدودیت ساعت کاری هر هواپیما موردتوجه قرار گرفته است. رویکرد پیشنهادی آنها برای حل مسائل ابعاد متوسط و بزرگ روی مسائل آزمایشی عملکرد قابل قبولی را نشان داده است.

در بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل سریع‌تر مسئله مسیریابی-نت هواپیما، در پژوهش [Kowalski et al. 2021] الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در یک پژوهش دیگر [Ahmed et al. 2022] به یکپارچه‌سازی مسئله تخصیص ناوگان به مسئله مسریابی-نت پرداخته‌اند و علاوه بر توسعه یک مدل غیرخطی و خطی‌سازی تقریبی آن، به ارائه یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله مذکور پرداخته‌اند که در آن استواری پاسخ در کنترل عدم‌قطعیت نیز در نظر گرفته می‌شود. نهایتا، می‌توان به پژوهش اخیر [Deng & Santos 2022] اشاره کرد که در آن تمرکز اصلی روی مسئله کنترل یا چک‌کردن نت هواپیما طی مسیرهای حرکت روزانه و هفتگی آن است. رویکرد پیشنهادی آن برای کنترل برنامه زمانی نت هواپیما، برنامه‌ریزی پویا است که در آن پارامترهای تصادفی مدل نیز با رویکرد Lookahead تخمین زده می‌شود. در جدول ۱، برخی از جدیدترین تحقیقات خلاصه شده است و ویژگی های این پژوهش با آنها مقایسه شده است. مقایسه از پنج منظر صورت گرفته است I) تصمیم ها در برنامه‌ریزی هواپیما، II) تصمیم ها در برنامه‌ریزی خدمه، III) در نظر گرفتن اختلال و عدم قطعیت در مدلسازی، IV) تضمین استواری، و V) متدلوژی.

جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر با پژوهش‌های مرتبط اخیر

پژوهش	استواری	عدم قطعیت و اختلال	برنامه‌ریزی خدمه پرواز	برنامه‌ریزی هواپیما		متدلوژی
				MP	TAR	
(Shao et al. 2017)			✓	✓	✓	BD
(Ahmed et al. 2017)	✓			✓	✓	بهینه‌سازی-شبیه‌سازی
(Safaei et al. 2018)				✓	✓	MILP
(Eltoukhy et al. , 2018)				✓	✓	برنامه‌ریزی دو سطحی
(Ahmed et al. 2018)	✓		✓		✓	برنامه‌ریزی غیرخطی
(Eltoukhy et al. 2018)				✓	✓	MILP
(Haouari et al. 2019)			✓			MILP, RTL

پژوهش	استواری	عدم قطعیت و اختلال	برنامه‌ریزی خدمه پرواز	برنامه‌ریزی هواپیما		متدلوژی
				MP	TAR	
(Antunes et al., 2019)	✓		✓			MILP
(Wen et al. 2020)	✓	✓	✓			روش تولید ستون
(Parmentier et al. 2020)			✓	✓	✓	روش تولید ستون
(Sanchez et al. 2020)				✓	✓	MILP
(Bulbul et al 2021)				✓	✓	روش آزادسازی لاگرانژ
(Rashidi Komijan et al. 2021)			✓		✓	فراابتکاری
(Ruan et al. 2021)				✓	✓	MILP
پژوهش ما	✓	✓	✓	✓	✓	**بهینه‌سازی استوار سناریومحور**

TAR: Tail Assignment and Routing; MR: Maintenance Planning; BD: Benders Decomposition; MILP: Mixed Integer Linear programming; Reformulation-Linearization Technique (RLT)

با مطالعه منابع و پژوهش‌های منتشر شده در زمینه مسیریابی-نت هواپیما و برنامه‌ریزی خدمه، می‌توان به شکاف‌های تحقیقاتی زیر اشاره کرد:

- تصمیم های مسیریابی-نت در کنار برنامه سفر خدمه به صورت متوالی حل شده است و کمتر یکپارچه‌سازی صورت گرفته است. (در این تحقیق یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی ناوگان هواپیمایی یعنی مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه صورت می‌پذیرد)
- در اکثر پژوهش‌های ذکر شده یک مرکز برای پایگاه نت و خدمه در نظر گرفته شده است. (در این تحقیق، تنوع در ایستگاه‌ها نت و پایگاه خدمه لحاظ می‌شود)
- سناریوهای اختلال در برنامه اولیه کمتر دیده شده است. در این تحقیق، سناریوهای اختلال با شدت های مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد و رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور دومرحله‌ای برای استوای تصمیم ها و تعدیل‌پذیری آن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. تشریح مسئله و جزییات آن

در این تحقیق، مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه مسریابی-نت هواپیما و برنامه زمانی سفر خدمه (به اختصار مسئله IAMRCP[۱۰]) تحت شرایط عدم قطعیت مورد توجه قرار گرفته است. خدمه معمولاً از محل پایگاه مشخص شده خود، یعنی جایی که پروازهای آنها شروع و به پایان می‌رسد، فعالیت می‌کنند. به یک سری متوالی از مجموعه پروازهایی که در یک روز توسط خدمه انجام می‌شود، ماموریت خدمه، گفته می‌شود. زمان استراحت بین دو پرواز در حین انجام ماموریت خدمه را، زمان نشستن می‌نامند، در حالی که به وقفه‌های طولانی بین دو ماموریت خدمه، زمان استراحت گفته می‌شود، که معمولاً، با در طول شب ماندن‌های خدمه ارتباط مستقیم دارد. جانشینی متناوب ماموریت‌ها و دوره های استراحت، سفرنامه هر خدمه را مشخص می‌کند که شکل ۲ یک نمونه از آن را نشان می‌دهد، که شامل دو ماموریت و شش پرواز برای خدمه پرواز، می‌باشد.

مسئله IAMRCP موردنظر تحقیق برای خطوط هواپیمایی به نحوی در نظر گرفته می‌شود که خطوط هوایی دارای تنوع پایگاه نت هواپیما و خدمه باشند. فرض می‌شود که طراحی شبکه و برنامه زمانی پروازها مشخص شده است و این

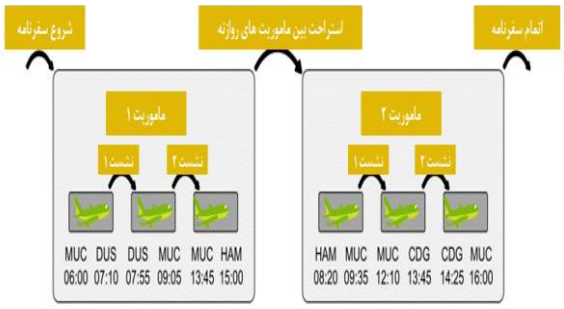
شرکت‌های هواپیمایی در پی آن هستند که در طی یک افق زمانی کوتاه مدت، با توجه به قوانین ، مقررات و محدودیت های مرتبط با زمان مجاز ماموریت خلبانان و الزام های فنی هواپیماها، تصمیم‌گیری پیرامون مسیریابی-نت هواپیماها و برنامه سفر خدمه را به گونه‌ای انجام دهند که علاوه بر پوشش تمام پروازهای برنامه‌ریزی شده، هزینه کل حداقل شود. هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه استفاده از هر هواپیما (سرمایه، سوخت و ...) ، هزینه تیم پرواز ، در کنار هزینه نت هواپیما طی مسیر پرواز است. همچنین در صورت لغو پرواز و یا تاخیر در پرواز نیز به ترتیب هزینه‌های فروش از دست رفته و جریمه لحاظ می‌شوند.

بر اساس قوانین و مقررات حاکم و همچنین برخی از سیاست-های شرکت‌های هواپیمایی، هر خلبان نباید بیشتر از حداکثر زمان در نظر گرفته شده در افق برنامه‌ریزی ، پرواز کند. این بازه در نظر گرفته شده، مستقل از نوع خلبانان است. همچنین از دیگر قوانین می‌توان به این مهم اشاره کرد که تمامی هواپیماها بدون در نظر گرفتن نوع آنها، حداکثر تا یک زمان مشخصی می‌توانند بدون آنکه تحت عملیات نت قرار گیرند، پرواز کنند.

همانطور که اشاره شد، مسئله IAMRCP موردنظر این تحقیق، به اختلالات محتمل (آب و هوایی، فنی و ...) که موجب تاخیر در شروع پروازها می‌شود و برنامه زمانی اولیه را تحت تاثیر قرار می‌دهد، توجه دارد. ۱ حالت عادی و ۵ سناریو اختلال در پرواز به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

- سناریو ۰) طی یک افق زمانی کوتاه مدت مشخص، هیچ اختلالی در برنامه اولیه رخ نمی‌دهد.
- سناریو ۱) یک اختلال بسیار خفیف در برنامه اولیه رخ می‌دهد که موجب تاخیرات کمتر از ۱۰ دقیقه در پرواز می‌شود.
- سناریو ۲) یک اختلال خفیف در برنامه اولیه رخ می‌دهد که موجب تاخیرات بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه در پرواز می‌شود.
- سناریو ۳) یک اختلال معمولی در برنامه اولیه رخ می‌دهد که موجب تاخیرات حدود ۳۰ دقیقه در پرواز می‌شود.
- سناریو ٤) یک اختلال شدید در برنامه اولیه رخ می‌دهد که موجب تاخیرات حدود ٦٠ دقیقه (۱ ساعت) در پرواز می‌شود.
- سناریو ٥) یک اختلال بسیار شدید در برنامه اولیه رخ می‌دهد که موجب تاخیرات بیشتر از ۱ ساعت در پرواز می‌شود.

در توضیح سناریوهای تعریف شده باید اشاره کرد که، بر اساس مطالعه میدانی و پرسش و پاسخ از کارشناسان واحد برنامه‌ریزی خطوط هواپیمایی، معمولا از هر دو پرواز انتظار می‌رود که یک پرواز بدون اختلال در برنامه اولیه شروع به پرواز کند. بنابراین، ما نیز ابتدا یک سناریو 0 با احتمال ۵۰٪ برای شرایط معمول تعریف کرده‌ایم. همچنین معمولا در هفتاد درصد پروازها اختلال در برنامه اولیه پرواز حداکثر ۲۰ دقیقه است. بنابراین دو سناریو با احتمال ۱۰٪ نیز تعریف کرده‌ایم که در آنها احتمال ۱۰ و ۲۰ دقیقه تاخیر در پروازها آورده شده است. برای سایر موارد نیز، اختلال معمولی، شدید و خیلی شدید را به ترتیب به تاخیر ۳۰ دقیقه، ٦٠ دقیقه و بیشتر از ٦٠ دقیقه در پرواز تعریف کرده‌ایم و برای این موارد نیز شانس وقوع سناریوها به صورت برابر (۱۰٪) در نظر گرفته شده است که پوشش مناسبی بر تمام سناریوهای ممکن صورت پذیرد.



شکل ۲. اجزای اصلی یک سفرنامه و برنامه سفر/ماموریت‌ها خدمه پرواز (Dück, 2010)

حال مسئله موردنظر این تحقیق (یعنی تصمیات مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه) باید به گونه ای مشخص و حل شود که متوسط عملکرد سیستم (یعنی متوسط هزینه) تحت سناریوهای مختلف بهینه باشد.

لازم به توضیح است که مفروضات زیر برای مدلسازی و حل این مسئله در نظر گرفته شده است:

- برنامه اولیه پرواز طراحی شده است و ورودی این مدل است.
- اندازه ناوگان و تیم‌های پروازی و محل استقرار اولیه آنها (پایگاه نت و خدمه) مشخص است.
- برنامه هر هواپیما (یعنی مسیر آن طی پروازهای مختلف و مکان نت) باید قبل از تمام سناریوها مشخص شود.
- برنامه سفر هر خدمه (یعنی ماموریت‌ها، نشست‌ها و ...) باید قبل از تمام سناریوها مشخص شود.
- در شرایط اختلال، امکان لغو برخی پروازها و یا تاخیر در انجام آنها وجود دارد (ولی هزینه دارد).
- یک نوع ناوگان هوایی در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود تمام تیم پرواز صلاحیت/گواهی‌نامه پرواز با این ناوگان هواپیمایی را دارند.
- در پایان افق زمانی برنامه‌ریزی، هر هواپیما و خدمه، باید در پایگاه اولیه خود قرار داشته باشد. (چراکه فرض می‌شود این برنامه کوتاه مدت به صورت دوره‌ای تکرار می‌شود.)

٤. مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی

در این بخش، به ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار دومرحله‌ای، برای مسئله IAMRCP تعریف‌شده در بخش قبل، می‌پردازیم. با توجه به آنکه فرض شده بود، اختلال‌های ممکن به صورت چندین سناریو تصادفی، با احتمال وقوع مشخص تعریف می‌شوند، رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور برای کنترل عدم‌قطعیت و استواری مدل بکارگرفته می‌شود. برای این منظور، در بخش بعدی، نخست به توضیح این رویکرد پرداخته می‌شود و سپس مدل پیشنهادی مسئله بر اساس آن ارائه می‌شود.

در خصوص چرایی استفاده از این رویکرد باید اشاره کنیم که از آنجا که اختلال‌های محتمل در برنامه اولیه پرواز به صورت سناریو بیان شده است، پس رویکردهای برنامه‌ریزی سناریومحور مورد استفاده قرار گرفته است (لازم به توضیح است که سناریومحور کردن موجب می‌شود که از پیچیدگی مدل‌های تصادفی با توزیع‌های احتمالی پیوسته پیچیده کاسته شود). در خصوص دومرحله‌ای بودن نیز باید اشاره کنیم از آنجا که در مدل پیشنهادی این تحقیق، امکان تغییر در برنامه اولیه پرواز و حتی کنسل کردن برخی از پروازها با تاخیر زیاد، در نظر گرفته شده است و این تصمیمات پس از مشخص شدن سناریو اختلال قابل اتخاذ است، پس این تصمیمات اصطلاحا تصمیمات مرحله دوم نامیده می‌شود و مزیت این متغیرها آن است که موجب تعدیل در تصمیمات اولیه می‌شود و موجب می‌شود که برنامه جدید با شرایط رخ داده تطبیق بیشتری داشته باشد. نهایتا در خصوص استواری رویکرد پیشنهادی باید اشاره شود که در آن نه تنها متوسط عملکرد بلکه نوسان مقدار هدف نیز کنترل می‌شود تا تحت سناریوهای مختلف تغییرات مقدار هدف کمتر باشد یا به عبارت دیگر ریسک تصمیمات کمتر شود.

٤-١ رویکرد بهینه‌سازی استوار دومرحله‌ای

در صورتی که در برخی از پارامترهای یک مسئله عدم‌قطعیت به صورت تصادفی سناریومحور وجود داشته باشد، رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار، یک رویکرد مناسب برای کنترل عدم‌قطعیت و تضمین بهینگی است. در حالت کلی، رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور (SSP[11]) دومرحله‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \text{Min } E(Z) = \sum_{s\in S} \pi_s . z_s \\ z_s = c_s^I . x_s + d_s^I y \ \ \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s \ \ \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y , x_s \geq 0 \end{cases} \quad (۱)$$

که در آن z_s مقدار هدف تحت سناریو $s \in S$ ، x_s متغیرهای وابسته به سناریو (معمولا متغیر پیوسته و نامنفی) و y متغیرهای مستقل از سناریو (معمولا متغیر باینری)، $(c_s, d_s, A_s, K_s, b_s)$ مقدار پارامترهای مسئله تحت سناریو $s \in S$، (R, q) مقدار پارامترهای قطعی، و نهایتا π_s احتمال وقوع سناریو $s \in S$ است [Salehi, Mahootchi, & Husseini, 2017; Yu & Li, 2000]. در رویکرد SSP متوسط هدف در سناریوهای مختلف مورد توجه قرار گرفته می‌شود و تمام سناریوهای محتمل باید به طور کامل موجه باشند. در واقع، در یک مسئله SSP متغیر y^* و x_s^* به باید به گونه‌ای تعیین شود که هر سناریو $s \in S$ از مسئله موجه باشد و متوسط مقادیر هدف در سناریوهای مختلف کمینه باشد.

در توسعه رویکرد SSP، مالوی و همکارانش [Mulvey, Vanderbei, & Zenios, 1995]، مجموع متوسط عملکرد سیستم و انحراف معیار آن را به عنوان استواری حل[۱۲] یا استواری بهینگی[۱۳] در نظر گرفتند. مدل "بهینه‌سازی استوار سناریو محور (SRO)[۱۴] " مالوی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \text{Min } E(Z) + \text{Var}(Z) + \text{Penalty} = \sum_{s\in S} \pi_s . z_s + \\ \lambda \sum_{s\in S} \pi_s . \left(z_s - \sum_{s'\in S} \pi_{s'} . z_{s'} \right)^2 + \omega \sum_{s\in S} \pi_s . \xi_s^2 \\ z_s = c_s^I . x_s + d_s^I y \ \ \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s \ \ \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y , x_s \geq 0 \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن ξ_s متغیر کمبود/مازاد در سناریو $s \in S$ ، ω ضریب استواری مدل و λ ضریب اهمیت به واریانس جواب‌ها در سناریوهای مختلف است. سایر نمادها در مدل SSP توضیح داده شده است. مدل RSSP پیشنهادی مالوی یک مسئله بهینه‌سازی کوادراتیک است. یو و لی [Yu & Li, 2000] با جایگذاری تابع قدرمطق به جای توان‌دوم، حالت خطی، مدل مالوی را توسعه داده‌اند، که مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \text{Min } E(Z) + \text{Var}(Z) + \text{Penalty} = \\ \sum_{s\in S} \pi_s . z_s + \lambda \sum_{s\in S} \pi_s . \left| \left(z_s - \sum_{s'\in S} \pi_{s'} . z_{s'} \right) \right| \\ +\omega \sum_{s\in S} \pi_s |\xi_s| \\ z_s = c_s^I . x_s + d_s^I y \ \ \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s \ \ \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y , x_s \geq 0 \end{cases} \quad (۳)$$

و به صورت زیر خطی‌سازی می‌شود:

$$\begin{cases} \text{Min } E(Z) + \text{Var}(Z) + \text{Penalty} = \sum_{s\in S} pr_s . z_s + \\ \lambda \sum_{s\in S} \pi_s . \left(z_s - \sum_{s'\in S} \pi_{s'} . z_{s'} + 2\theta_s \right) + \\ \omega \sum_{s\in S} \pi_s (\xi_s^+ + \xi_s^-) \\ z_s - \sum_{s'\in S} \pi_{s'} . z_{s'} + \theta_s \geq 0 \ \forall s \in S \\ z_s = c_s^I . x_s + d_s^I y \ \ \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s + (\xi_s^+ - \xi_s^-) \ \ \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y , x_s \geq 0 \\ \xi_s^+ , \xi_s^- , \theta_s \geq 0 \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن $\theta_s \geq 0$ یک متغیر کمکی برای خطی سازی است و مقدار انحراف نسبت به میانگین در هر سناریو را محاسبه میکند. در این تحقیق، از رویکرد SRO فوق‌الذکر برای مدلسازی مسئله IAMRCP استفاده می‌شود.

۲-٤ مدل بهینه‌سازی پیشنهادی مسئله IAMRCP مبتنی بر رویکرد SRO

برای بکارگیری رویکرد SRO در مسئله موردنظر تحقیق، فرض می‌کنیم، در مرحله اول، باید برنامه‌ریزی هواپیما و خدمه صورت پذیرد (مسیریابی-نت هواپیما و برنامه‌ریزی سفر تیم‌های پروازی). در مرحله دوم نیز، با توجه به آنکه سناریوهای اختلال ممکن است رخ دهند، تصمیم‌گیری در خصوص لغو پروازها صورت می‌پذیرد. پر واضح است که متغیرهایی همچون زمان واقعی شروع یک پرواز و تاخیر در رسیدن هر پرواز متغیرهای وابسته به سناریو هستند. مسئله با

توجه به رویکرد سناریو محور این تحقیق ، SRO به صورتی مدل می‌شود که متوسط عملکرد سیستم بهینه‌سازی و انحراف معیار تابع هدف تحت سناریوهای مختلف نیز کنترل شود.

مدل پیشنهادی این تحقیق به صورت زیر است:

- نماد و علائم ریاضی

مجموعه‌ها و اندیس‌ها	
$(F : f)$	مجموعه پروازها (اندیس‌گذاری با f)
$f = 0$	یک پرواز مجازی (با زمان شروع و مدت زمان ۰)
$F^0 = F \cup \{0\}$	مجموعه پروازها و پرواز مجازی 0
$(N : n)$	مجموعه شهرها(گره‌های) شروع/پایان هر پرواز (اندیس‌گذاری با n)
$FI_n \subseteq F$	مجموعه پروازهای ورودی به گره n
$FO_n \subseteq F$	مجموعه پروازهای خروجی از گره n
$(C : c)$	مجموعه خدمه/تیم پرواز
$M \subseteq N$	مجموعه شهرهایی که امکان نت هواپیما وجود دارد (پایگاه‌های نگهداری و تعمیرات)
$\Xi = \{0,1,2,\xi,\dots,\lvert\Xi\rvert = 5\}$	مجموعه سناریوهای اختلال (اندیس-گذاری با ξ)، سناریو $\xi = 0$ یعنی شرایطی که طی افق برنامه‌ریزی مورد نظر اختلالی در برنامه اولیه پروازها رخ ندهد.
پارامترها / داده‌های مسئله	
dt_f	زمان عزیمت پرواز f طبق برنامه زمانی اولیه
at_f	زمان رسیدن پرواز f طبق برنامه زمانی اولیه
lt_f	طول/مدت‌زمان معمول پرواز f
o_{fn}	اگر مبداء پرواز f گره n است برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
d_{fn}	اگر مقصد پرواز f گره n است برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
r_f	زمان لازم برای آماده‌سازی هواپیما قبل از شروع پرواز
fc_{fac}	هزینه انجام پرواز f با هواپیما a و تیم پرواز c
cc_f	هزینه لغو (کنسل کردن) پرواز f
pc_f	هزینه واحد جریمه تاخیر بیش از حد در شروع پرواز f
mc_a	هزینه هر مرتبه نت هواپیما a
md_f	حداکثر تاخیر مجاز در پرواز f
IC_{nc}	ماتریس باینری وضعیت اولیه حضور خدمه در شهرهای مختلف (برابر با ۱ اگر خدمه c در آغاز افق برنامه‌ریزی در گره n باشد)
IA_{na}	ماتریس باینری وضعیت اولیه حضور هواپیما در شهرهای مختلف (برابر با ۱ اگر هواپیما a در آغاز افق برنامه‌ریزی در گره n باشد)
$\mathcal{MC}$	حداکثر مدت زمان پرواز هر تیم پرواز طی افق زمانی موردنظر
$\mathcal{MA}$	حداکثر مدت زمان پرواز هر هواپیما پرواز طی افق زمانی موردنظر
$\mathcal{MU}$	حداکثر مدت زمان مجاز پرواز هر هواپیما بدون نت هر هواپیما قبل از شروع پرواز جدید
$\mathcal{L}_{f\xi}$	مدت زمان تاخیر ایجادشده قبل از شروع پرواز f تحت سناریو اختلال ξ,
π_ξ	احتمال وقوع سناریو ξ
$bigM$	یک عدد مثبت بزرگ (برای بیان خطی بعضی از روابط)
متغیرهای تصمیم‌گیری	
x_{fa}	اگر پرواز f توسط هواپیما a انجام شود، برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
y_{fc}	اگر پرواز f در برنامه سفر خدمه c قرار گیرد، برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰

	است.
$g_{af'f}$	اگر در مسیر پرواز هواپیما a پرواز f' قبل از پرواز f قرار گیرد برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
$v_{af'f}$	اگر هواپیما a بین پرواز f' تا f در یک گره مشخص (از پایگاه‌های نگهداری و تعمیرات) مورد عملیات نت قرار برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
BC_{fc}	اگر قبل از شروع پرواز f خدمه c در مبداء پرواز در دسترس باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
BA_{fa}	اگر قبل از شروع پرواز f هواپیما a در مبداء پرواز در دسترس باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
$e_{f\xi}$	اگر پرواز f تحت سناریو اختلال ξ, کنسل شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
$st_{f\xi}$	زمان شروع پرواز f تحت سناریو اختلال ξ,
$del_{f\xi}$	مدت زمان تاخیر در شروع پرواز f تحت سناریو اختلال ξ,
$cost_{\xi}$	هزینه کل تحت سناریو اختلال ξ,

$$\begin{cases} \min \sum_{\xi} \pi_{\xi} cost_{\xi} + \\ \lambda \sum_{\xi} \pi_{\xi} \left(2\theta_{\xi} - \left(cost_{\xi} - \sum_{\xi'} \pi_{\xi'} cost_{\xi'} \right) \right) \\ cost_{\xi} = \sum_{f} \sum_{a} \sum_{c} fc_{fac} \frac{(x_{fa} + y_{fc})}{2} \\ + \sum_{a} \sum_{f} \sum_{f'} mc_a v_{af'f} + \sum_{f} cc_f e_{f\xi} + \sum_{f} pc_f del_{f\xi} \end{cases} \quad (۵)$$

$$\theta_{\xi} \geq cost_{\xi} - \sum_{\xi'} \pi_{\xi'} cost_{\xi'} \quad \forall \xi \quad (۶)$$

$$\sum_{a} x_{fa} = 1 - e_{f\xi} \quad \forall f, \xi \quad (۷)$$

$$\sum_{c} y_{fc} = 1 - e_{f\xi} \quad \forall f, \xi \quad (۸)$$

$$x_{fa} = \sum_{f' \in F^0} g_{af'f} \quad \forall f, a \quad (۹)$$

$$g_{af'f} + g_{aff'} = 1 \quad \forall f, f', a \quad (۱۰)$$

$$g_{af'f} + g_{af''f'} \leq g_{af''f} \quad \forall f, f', a \quad (۱۱)$$

$$y_{fc} \leq BC_{fc} \quad \forall f, c \quad (۱۲)$$

$$BC_{fc} = \sum_{n} IC_{nc} o_{fn} + \sum_{n} \sum_{a} \sum_{f' \in FI_n} o_{fn} y_{f'c} g_{af'f} - \sum_{n} \sum_{a} \sum_{f' \in FO_n} d_{f'n} y_{f'c} g_{aff'} \quad \forall f, c \quad (۱۳)$$

$$x_{fa} \leq BA_{fa} \quad \forall f, a \quad (۱۴)$$

$$BA_{fa} = \sum_{n} IA_{na} o_{fn} + \sum_{n} \sum_{a} \sum_{f' \in FI_n} o_{fn} g_{af'f} - \sum_{n} \sum_{a} \sum_{f' \in FO_n} d_{f'n} g_{aff'} \quad \forall f, a \quad (۱۵)$$

$$st_{f\xi} \geq \sum_{f'} \left(lt_{f'} + r_{f'} + \mathcal{L}_{f'\xi} \right) g_{af'f} + \left(r_{f'} + \mathcal{L}_{f\xi} \right) x_{fa} \quad \forall f, a, \xi \quad (۱۶)$$

$$del_{f\xi} \geq st_{f\xi} + lt_f - at_f - bigMe_{f\xi} \quad \forall f, \xi \quad (۱۷)$$

$$del_{f\xi} \leq md_f + bigMe_{f\xi} \quad \forall f, \xi \quad (۱۸)$$

$$\sum_{f} lt_f y_{fc} \leq \mathcal{MU} \quad \forall c \quad (۱۹)$$

$$\sum_{f} lt_f x_{fa} \leq \mathcal{MA} \quad \forall a \quad (۲۰)$$

$$\sum_{f''} lt_{f''} g_{af'f''} - \sum_{f''} lt_{f''} g_{aff''} \leq \mathcal{MU} + bigM \quad \forall f, f', a \quad (۲۱)$$

$$v_{af'f} \leq \sum_{n \in M} \sum_{f''} o_{f''n} g_{af'f''} - \sum_{n \in M} \sum_{f''} o_{f''n} g_{aff''} \quad \forall f, f', a \quad (۲۲)$$

$$\begin{cases} if \sum_{f'} g_{aff'} = 0 \ then \ IA_{na} = d_{fn} \quad \forall f, a, n \\ \Downarrow \text{Linear} \\ A_{na} - d_{fn} \leq bigM \sum_{f'} g_{aff'} \quad \forall f, a, n \end{cases} \quad (۲۳)$$

$$\begin{cases} if \sum_{a} \sum_{f'} g_{aff'} = 0 \ and \ y_{fc} = 1 \ then \ IC_{nc} = d_{fn} \quad \forall f, c, n \\ \Downarrow \text{Linear} \\ IC_{nc} - d_{fn} \leq bigM \left(1 - y_{fc} + \sum_{f'} g_{aff'} \right) \ \forall f, a, n \end{cases} \quad (۲۴)$$

$$\begin{cases} x_{fa}, y_{fc}, g_{af'f}, v_{af'f}, BC_{fc}, BA_{fa}, e_{f\xi} \in \{0,1\} \\ st_{f\xi}, del_{f\xi}, cost_{\xi}, \theta_{\xi} \geq 0 \end{cases} \quad (۲۵)$$

در رابطه (۵) تابع هدف مسئله محاسبه می‌شود که بر اساس رویکرد SRO، متوسط عملکرد سیستم (کمینه‌سازی متوسط هزینه) در کنار کمینه‌سازی انحراف معیار آورده شده است. هزینه، همانطور که ملاحظه می‌شود، شامل هزینه های مرتبط با هواپیما و خدمه هر پرواز، هزینه نت، هزینه پروازهای کنسل‌شده و نهایتا هزینه تاخیر در پروازها است. در رابطه (٦) نیز انحراف معیار در هر سناریو اختلال محاسبه می‌شود. از رابطه (۷) تا (۲۵) قیود مسئله آورده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

رابطه (۷) و (۸) به ترتیب بیان می‌کنند که برای هر پرواز باید یک هواپیما و یک تیم پرواز در نظر گرفت. البته در صورتی که پرواز کنسل شده باشد، این تخصیص نیاز نیست. رابطه (۹) بیان می‌کند که اگر هواپیمایی به پروازی تخصیص داده شده است، پیش از آن پرواز دیگری (لااقل پرواز مجازی) را انجام داده است. رابطه (۱۰) و (۱۱) به ترتیب خاصیت ترتیب و تعددی بین پروازهای صورت گرفته توسط هر هواپیما را تضمین می‌کند. به این ترتیب که، اولا بین هر دو پرواز متمایز، یک پرواز قبل از پرواز دیگر صورت می‌پذیرد و اگر پرواز f' قبل از f باشد و پرواز f'' قبل از f' باشد، پس باید پرواز f'' نیز قبل از f باشد. رابطه (۱۲) بیان می‌کند که قرار گرفتن یک پرواز در برنامه سفر یک خدمه مستلزم آن است که خدمه در شهر مبداء پرواز حضور داشته باشد. همچنین رابطه (۱۳) بیان می‌کند در چه صورتی یک خدمه در شهر مبداء پرواز حضور دارد (یا در ابتدا آنجا بوده است و یا توسط پروازی به شهر مبداء آورده شده است و از آنجا خارج نشده است). رابطه (١٤) و (١٥) این تضمین را به طور مشابه برای وجود هواپیما در شهر مبداء هر پرواز نشان می‌دهد. رابطه (١٦) زمان شروع واقعی هر پرواز تحت هر سناریو اختلال را بدست می‌آورد. رابطه (۱۷) تاخیر در هر پرواز تحت سناریوهای مختلف را محاسبه می‌کند و رابطه (۱۸) تضمین می‌کند که تاخیر در هر پرواز نباید از یک مقدار مشخصی بیشتر شود وگرنه آن پرواز کنسل می‌شود. روابط (۱۹) و (۲۰) به ترتیب حداکثر مدت زمان فعالیت هر خدمه و هر هواپیما طی افق زمانی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) تضمین می‌کند که اگر بین پروازهای f' تا f عملیات نت صورت نگرفته باشد،کل مدت پرواز بین این دو پرواز، نباید از یک حد مشخص بیشتر فراتر رود. در رابطه (۲۲) نیز تضمین می‌شود که فقط در شهرهایی که پایگاه‌ها نت هستند امکان نت هواپیماهایی که به آنجا سفر کرده باشند، وجود دارد. رابطه (۲۳) تضمین می‌کند که هر هواپیما در پایان سفرهایش طی افق زمانی موردنظر، باید در شهر مبداء اولیه حضور داشته باشد و رابطه (٢٤) نیز همین تضمین را برای خدمه پرواز ایجاد می‌کند. لازم به توضیح است که این دو شرط به صورت رابطه خطی بیان شده است که پیچیدگی مدل پیشنهادی حداقل شود. نهایتا در رابطه (۲۵) متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله آورده شده است.

مدل SRO فوق‌الذکر برای مسئله IAMRCP موردنظر این تحقیق یک مدل خطی آمیخته است که توسط CPLEX در نرم‌افزار GAMS قابل اجرا است. در بخش بعدی، به اجرای این مدل و تحلیل استواری آن پرداخته می‌شود.

۵. اجرای مدل، نتایج عددی و ارزیابی

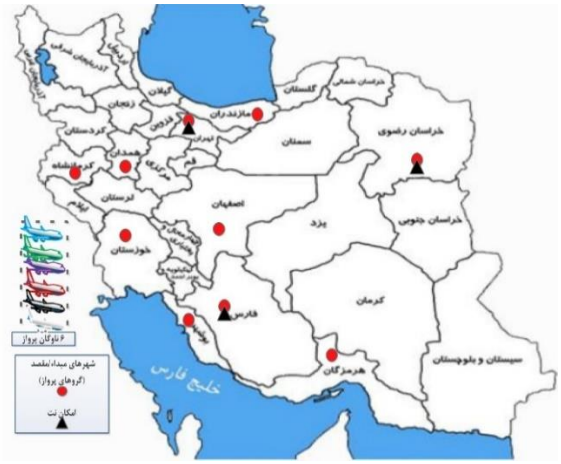
در این بخش، برای ارزیابی مدل پیشنهادی ، یک مطالعه عددی در ابعاد متوسط از مسئله IAMRCP آورده می‌شود و مدل SRO پیشنهادی حل می‌شود. سپس به تحلیل استواری پرداخته می‌شود و ارزش پرداختن به عدم‌قطعیت در آن ارزیابی می‌شود.

یک مطالعه عددی از مسئله IAMRCP روی یک شبکه حمل و نقل هوایی فرضی در بخشی از استان‌های کشور بررسی می‌شود و فرض می‌شود که بخشی از شبکه حمل‌ونقل هوایی یک شرکت هواپیمایی است. همانطور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، در این شبکه، ۱۰ شهر مبداء-مقصد (اندازه گره‌های شبکه (N))، ٤٢ پرواز از مجموعه ۹۰ پرواز شدنی ($N*(N-1)=90, F=42$) ، ۵ خدمه(تیم پرواز)

پرواز (C)، و ٦ ناوگان هواپیما (A)، ۳ شهر/مرکز نت هواپیماها (M) ، برای انجام پروازها در نظر گرفته شده است. شکل ۳ شماتیک شبکه این مثال عددی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. اندازه شبکه در مطالعه عددی مسئله IAMRCP

N	F	A	C	M
10	42	6	5	3



شکل ۳. بیان شماتیک شبکه حمل‌ونقل مطالعه عددی

جدول ۳ مجموع پروازهای برنامه‌ریزی شده در این شبکه را نشان می‌دهد. در جدول ٤ نیز وضعیت اولیه/فعلی خدمه و ناوگان هوایی ملاحظه می‌شود. در این مطالعه عددی، افق برنامه‌ریزی به صورت دو روزه در نظر گرفته می‌شود، که در پایان ماموریت دوروزه هر خدمه و هواپیما باید در پایگاه اولیه مستقر شده باشد. $\mathcal{MU} = 480$ دقیقه برای حداکثر مدت زمان مجاز پرواز بدون نت، $\mathcal{MC} = 500$ دقیقه به عنوان حداکثر مدت زمان پرواز خدمه (طی افق مذکور)، و $\mathcal{MA} = 600$ دقیقه برای حداکثر زمان پرواز هر هواپیما طی افق مذکور در نظر گرفته شده است. پیش از اجرای مدل *SRO* پیشنهادی، ابتدا ضریب استواری بهینگی و کنترل نوسانات مقدار تابع هدف تحت سناریوهای مختلف (λ) باید تنظیم شود. همانطور که در جدول ۵ آورده شده است، برای $\lambda \geq 1.6$ تغیری در مقدار انحراف معیار جواب‌ها و متوسط عملکرد سیستم (متوسط هزینه) رخ نمی‌دهد. در این حالت، متوسط هزینه ($EC=2956.12$) است و انحراف معیار هزینه ($DC=347.54$) است که به ترتیب بیشترین مقدار EC و کمترین مقدار DC رخ می‌دهد. در مقابل، با $\lambda = 0$ مقادیر این دو به $EC=2347.23$ و $DC=984.54$ تغییر می‌کند که گرچه متوسط هزینه کمینه است ولی انحراف معیار یا نوسان مقدار تابع هدف تحت سناریوهای مختلف بسیار زیاد است. بنابراین، با افزایش ضریب استواری بهینگی تا $\lambda = 0.8$ ملاحظه می‌شود که حدود ۵۸٪ نوسانات (DC) کم می‌شود و متوسط هزینه (EC) و مقدار قابل اغماض یعنی کمتر از ٤٪ افزایش داشته است. برای مقادیر $\lambda > 0.8$ ، اولا کاهش قابل ملاحظه‌ای در نوسانات رخ نمی‌دهد، و در ثانی افزایش قابل ملاحظه‌ای در متوسط هزینه ایجاد می‌شود. بنابراین، در مدل *SRO* پیشنهادی، $\lambda = 0.8$ تنظیم مناسبی است. در شکل‌های ٤ و ۵ نیز این مهم را، به وضوح نشان می‌دهند. در مقایسه پاسخ رویکرد *SRO* پیشنهادی و رویکرد اسمی (که اختلالات محتمل در برنامه اولیه را در نظر نمی‌گیرد)، ملاحظه می‌شود که در پاسخ رویکرد استوار پیشنهادی تحت برخی از سناریوها اجازه داده می‌شود برخی از پروازها کنسل شود و یا تخصیص هواپیما و خدمه به پروازها و مسیریابی هواپیما به صورتی انجام می‌شود که تحت سناریوهای مختلف اختلال، کمینه تاخیر از برنامه اولیه زمانبندی پروازها رخ دهد.

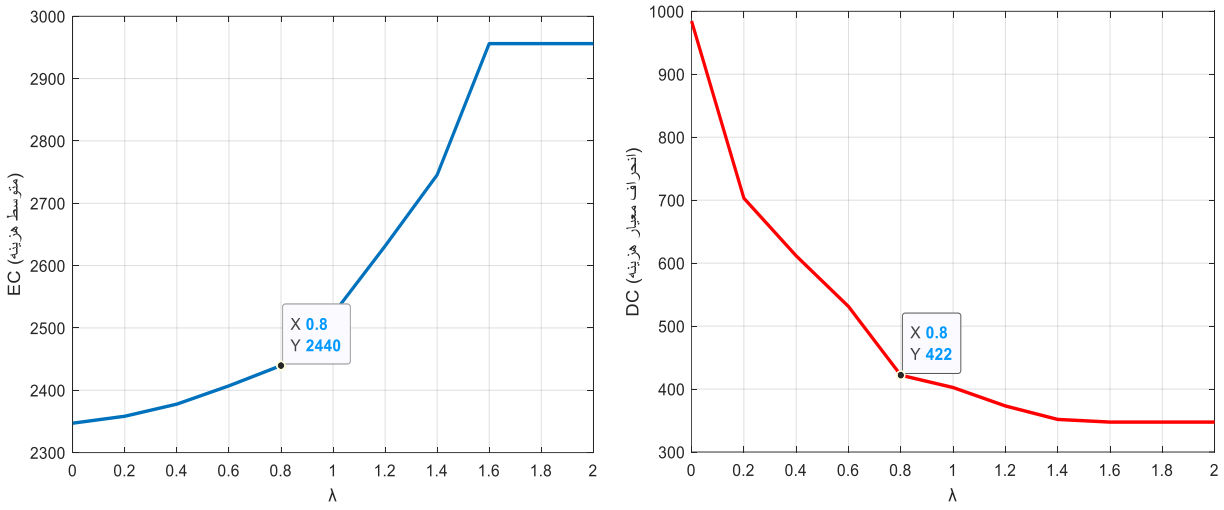
جدول ۳. پروازهای برنامه‌ریزی‌شده در مطالعه عددی مسئله IAMRCP

	THR	IFN	SYZ	MHD	SRY	KER	AHV	HAM	BAN	BUR
THR	-	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
IFN	☑	-	☑	☑		☑	☑			
SYZ	☑	☑	-		☑	☑	☑		☑	
MHD	☑	☑	☑	-		☑			☑	☑
SRY	☑	☑	☑	☑	-					
KER	☑	☑	☑			-	☑			

	THR	IFN	SYZ	MHD	SRY	KER	AHV	HAM	BAN	BUR
AHV	☑	☑	☑	☑			-			
HAM	☑	☑	☑	☑		☑		-	☑	
BAN	☑	☑	☑	☑		☑	☑		-	
BUR	☑	☑	☑	☑	☑		☑		☑	-

جدول ٤. وضعیت اولیه/فعلی شبکه (دسترسی اولیه به خدمه و هواپیماها) در مطالعه عددی مسئله **AMRSC**

	THR	IFN	SYZ	MHD	SRY	KER	AHV	HAM	BAN	BUR
هواپیما	a1,a3,a4	-	a2	a5,a6	-	-	-	-	-	-
تیم پرواز	c1,c3,c4	-	c2	c5	-	-	-	-	-	-



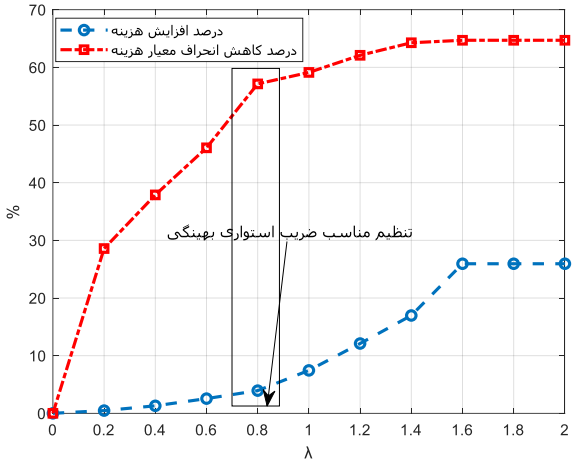
(a) (b)

شکل ٤. تحلیل حساسیت مقدار متوسط (**a**) و انحراف معیار هزینه (**b**) نسب به مقادیر ضریب استواری مدل*جدول ۵. تغییر مقادیر متوسط و انحراف معیار هزینه نسب به مقادیر ضریب استواری مدل*

ضریب استواری بهینگی (λ)	EC	DC	درصد افزایش متوسط هزینه	درصد کاهش انحراف معیار هزینه
0	2347.23	984.54	0.00	0.00
0.2	2358.36	703.19	0.47	28.58
0.4	2377.81	611.58	1.30	37.88
0.6	2407.12	531.19	2.55	46.05
0.8	2439.63	422.03	3.94	57.13
1	2522.03	402.45	7.45	59.12
1.2	2631.41	373.18	12.11	62.10
1.4	2745.54	351.78	16.97	64.27
1.6	2956.12	347.54	25.94	64.70
1.8	2956.12	347.54	25.94	64.70
2	2956.12	347.54	25.94	64.70

در ادامه، ما جواب به دست آمده از مدل SRO پیشنهادی را ارزیابی می کنیم. برای این منظور، دو معیار را برای اعتبارسنجی مدل SRO و مقایسه آن با رویکرد اسمی تعریف می کنیم. ابتدا شبیه‌سازی یا واقع‌سازی[۱۵] پارامتر تاخیر ایجاد شده قبل از پرواز تحت سناریوهای مختلف صورت می‌پذیرد. در مسئله IAMRCP موردنظر تحقیق، هر واقع سازی، به

معنای قرار گرفتن در یک سناریو اختلال است (البته سناریو ۰ عدم اختلال را نشان می‌دهد). برای اعتبارسنجی رویکرد SRO مورد نظر این تحقیق، در حالت کلی، فرض کنید که مسئله با استفاده از رویکرد "M" حل شده است و z_ξ^M مقدار تابع هدف متناظر با این رویکرد تحت سناریو تحت سناریوی $\xi \in \Xi$ باشد.



شکل ۵. تنظیم مناسب ضریب استواری مدل

همچنین مقدار z_ξ^* را به عنوان مقدار بهینه هر سناریو در نظر می‌گیریم. واضح است که رویکرد M زمانی ارزشمندتر است که z_ξ^M نسبت به z_ξ^* انحراف کمتری داشته باشد. به عبارت دیگر، مقادیر کمتراز $|z_\xi^M - z_\xi^*|$ نشان دهنده ارزش بالاتر رویکرد M هستند. بنابراین، ما می‌توانیم از دو معیار اعتبارسنجی به ترتیب متوسط عملکرد و عملکرد در سناریوی بدبینانه، به شرح زیر استفاده کنیم:

$$Cr1 = \sum_{\xi \in \Xi} \pi_\xi \left(\left| z_\xi^M - z_\xi^* \right| \right) + \Psi$$

$$Cr2 = \max_{\xi \in \Xi} \pi_\xi \left(\left| z_\xi^M - z_\xi^* \right| \right) + \Psi$$

که Ψ جریمه نقض قیود در هر سناریو است. در مدل پیشنهادی این تحقیق، Ψ با هزینه جریمه تاخیر یا لغو پرواز معادل است که در واقع با $\sum_f cc_f\, e_{f\xi} + \sum_f pc_f\, del_{f\xi}$ است. در جدول ٦، دو معیار فوق برای رویکرد SRO پیشنهادی و همچنین رویکرد اسمی محاسبه شده است. مطابق معیارهای تعریف شده، جواب روش پیشنهادی SRO از راه حل اسمی بسیار با ارزش تر است، زیرا در هر دو معیار اعتبار سنجی آن (متوسط عملکرد و عملکرد) ، در حالت بدبینانه، بسیار بهتر از رویکرد اسمی است و در دو معیار فوق، به ترتیب ٪۵,۷٦ و ٪۹,۳۸ نسبت به حالت اسمی، استواری بیشتری دارد.

علاوه بر معیارهای فوق، یک معیار معروف تحت عنوان ارزش پاسخ تصادفی (VSS[16]) نیز در ادامه برای اعتبارسنجی رویکرد استوار دو مرحله‌ای پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع، معیار VSS ما را در تعیین ارزش راه حل ، درمرحله‌ی تصادفی پیشنهادی، در مقایسه با مقدار اسمی، یاری می کند. معمولاً VSS به عنوان اختلاف بین نتیجه استفاده از جواب تصادفی و جواب اسمی تعریف می شود و اگر VSS بالاتر باشد ، رویکرد تصادفی با ارزش تر است. و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$VSS = |E(Z_{stochstic}) - E(Z_{nominal})|$$

جدول ٦. مقایسه رویکرد SRO پیشنهادی نسبت به مدل اسمی در دو معیار متوسط عملکرد و عملکرد در حالت بدبینانه

رویکرد	(Cr1)		(Cr2)	
		بهبود (%)		بهبود (%)
اسمی	۲۵۱,۰۸	–	۲۸۹,۱۲	–
SRO پیشنهادی	٤٤٨,۱۳	۳۵,۷٦	۵۵٤,۰۲	۳۹,۳۸

جدول ۷. مقایسه رویکرد SRO پیشنهادی نسبت به مدل اسمی در سناریوهای مختلف اختلال در شبکه پرواز

سناریو	شانس وقوع π_ξ	پاسخ با رویکرد SRO	پاسخ اسمی (بدون رویکرد SRO پیشنهادی)
$\xi = 0$	$\pi_\xi = \frac{1}{2}$	۲۳۹۵,۱۹	۲۰۱۳,۹۱
$\xi = 1$	$\pi_\xi = \frac{1}{10}$	۲٤٦۷,٤۹	۲۵۲۱,٦۷
$\xi = 2$	$\pi_\xi = \frac{1}{10}$	۲۵٦۵,٤۲	۳۰۱٦,٦۱
$\xi = 3$	$\pi_\xi = \frac{1}{10}$	۲٦۹۰,۵٤	۳٤۱۲,۵۳
$\xi = 4$	$\pi_\xi = \frac{1}{10}$	۲۷۸۱,٤۵	۳۹۳۱,٤۳
$\xi = 5$	$\pi_\xi = \frac{1}{10}$	۲۹۱۵,۸۹	٤٦۱۲,۷۹
میانگین		۲۵۳۹,٦۷	۲۷۵٦,٤۵

همانطور که اشاره شد، ۵ سناریو اختلال و یک سناریو عدم‌اختلال برای مسئله IAMRCP این تحقیق تعریف شده است. جدول ۷ نشان می‌دهد که پاسخ رویکرد اسمی (غیراستوار) در هر سناریو چه نتیجه‌ای می‌دهد و همچنین پاسخ رویکرد SRO پیشنهادی چه عملکری دارد. سپس، با توجه به احتمال در نظر گرفته شده برای هر سناریو، VSS رویکرد پیشنهادی محاسبه شده است، که برابر با $\text{VSS} = 2756.45 - 2539.67 = 216.78$ است.

به طور خلاصه در خصوص ارزش افزوده رویکرد بهینه‌سازی سناریومحور پیشنهادی باید اشاره کرد که رویکرد پیشنهادی ما با در نظر گرفتن سناریوهای اختلال، ایجاد متغیرهای مرحله دوم تعدیل‌پذیر و نهایتا کنترل نوسان، توانسته است رویکرد اسمی را در هر دو معیار مذکور به ترتیب بیش از ۵٪ و بیش از ۹٪ بهبود دهد. بعلاوه، همانطور که در معیار VSS ملاحظه می‌شود، مقدار این معیار مهم برای رویکرد پیشنهادی تحقیق $\text{VSS} = 216.78$ است که با توجه به نامنفی بودن آن، ارزش رویکرد پیشنهادی در مقابل با عدم استفاده از آن به وضوح مشخص می‌شود.

همانطور که اشاره شد، در راستای هدف پژوهش، سه سوال اصلی تحقیق به صورت ۱) مهمترین پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری؟ ۲) مزیت یکچارچه‌سازی تصمیمات مسیریابی-نت و برنامه سفر خدمه پرواز؟ و ۳) ارزش در نظر گرفتن سناریوهای اختلال و کنترل آن با رویکرد بهینه‌سازی استوار پیشنهادی؟ مورد توجه قرار گرفته است. در توضیحات فوق، به مقایسه رویکرد بهینه‌سازی استوار پیشنهادی با رویکرد اسمی پرداخته‌ایم که بر اساس دو معیار Cr1 و Cr2 و همچنین معیار VSS، ملاحظه می‌شود که رویکرد پیشنهادی با کنترل سناریوهای اختلال در پرواز به طور قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش هزینه و بهبود رویکرد اسمی می‌شود و سوال ۳ تحقیق پاسخ داده می‌شود. در تکمیل نتایج عددی و اعتبارسنجی بیشتر مدل، به پاسخ به سوال ۱ و ۲ پژوهش به صورت زیر می‌پردازیم.

در پاسخ به سوال ۱ تحقیق، به تحلیل دو پارامتر مهم هزینه کنسل کردن پرواز (cc_f) و هزینه واحد جریمه تاخیر پرواز (pc_f) پرداخته‌ایم و نتیجه آن تحلیل می‌شود. برای این منظور، مقادیر زیر جاگزین پارامترهای مذکور شده است:

$$cc_f^{\text{new}} = (1 + \frac{\Delta}{100}) cc_f$$

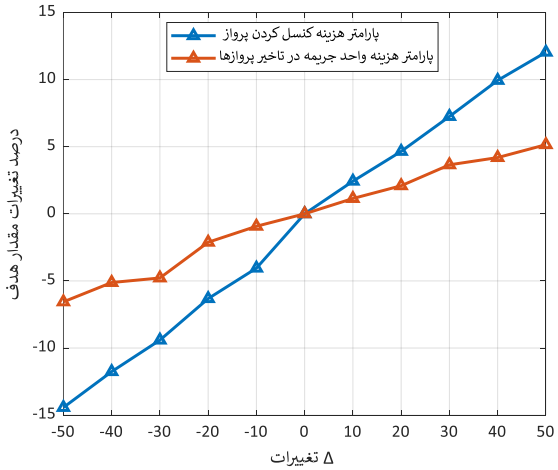
$$pc_f^{\text{new}} = (1 + \frac{\Delta}{100}) pc_f$$

که در آن، $-50 \leq \Delta \leq 50$ درصد تغییرات را نشان می‌دهد (به عنوان مثال $\Delta = 20$ و $\Delta = -10$ به ترتیب نشان‌دهنده

۲۰٪ بیشتر از مقدار فعلی و ۱۰٪ کمتر از مقدار فعلی هستند). در جداول ۸ و ۹ به ترتیب تحلیل حساسیت مقدار هزینه نسبت به تغییرات Δ برای cc_f و pc_f آورده شده است. همانطور که در نتایج عددی ملاحظه می‌شود، مقدار تابع هدف نسبت به تغییرات هر دو پارامتر مذکور رابطه مستقیم دارد و با افزایش آنها هزینه کل افزایش می‌یابد. همچنین شکل ٦ نشان می‌دهد که حساسیت مقدار تابع هدف به پارامتر هزینه جریمه تاخیر در پروازها (pc_f) کمتر از هزینه کنسل کردن پرواز (cc_f) است. دلیل این امر می‌تواند متغیرهای مرحله دوم مرتبط با کنسل کردن یک پرواز برنامه‌ریزی شده باشد؛ چراکه در صورت افزایش یا کاهش cc_f این متغیر بشدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد و در نتیجه مقدار تابع هدف حساسیت بیشتری به مقدار cc_f پیدا می‌کند.

جدول ۸. تحلیل حساسیت مقدار تابع هدف نسبت به پارامتر هزینه کنسل کردن پرواز (cc_f)

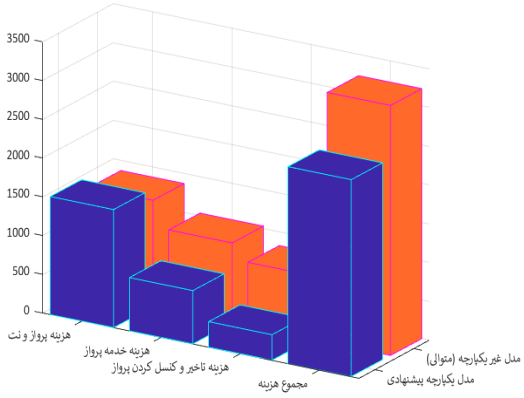
درصد تغییرات هدف	مقدار جدید	مقدار تابع هدف قبلی	تغییرات Δ
-۱٤,٤۳	۲۱۷۳,۲۰	۲٥۳۹,٦۷	-٥۰
-۱۱,۷٦	۲۲٤۱,۰۰	۲٥۳۹,٦۷	-٤۰
-۹,٤۱	۲۳۰۰,٦۹	۲٥۳۹,٦۷	-۳۰
-٦,۳۲	۲۳۷۹,۱٦	۲٥۳۹,٦۷	-۲۰
-٤,۰٥	۲٤۳٦,۸۱	۲٥۳۹,٦۷	-۱۰
۰,۰۰	۲٥۳۹,٦۷	۲٥۳۹,٦۷	۰
۲,٤۳	۲٦۰۱,۳۸	۲٥۳۹,٦۷	۱۰
٤,٦٥	۲٦٥۷,۷٦	۲٥۳۹,٦۷	۲۰
۷,۲٥	۲۷۲۳,۸۰	۲٥۳۹,٦۷	۳۰
۹,۹٤	۲۷۹۲,۱۱	۲٥۳۹,٦۷	٤۰
۱۲,۰٤	۲۸٤٥,٤٥	۲٥۳۹,٦۷	٥۰



شکل ٦. تحلیل حساسیت درصد تغییرات هدف نسبت به پارمترها هزینه کنسل کردن و تاخیری در پرواز

بعلاوه، در پاسخ به سوال ۲ تحقیق (مزیت یکپارچه‌سازی تصمیمات مسیریابی–نت و برنامه سفر خدمه پرواز)، بجای تصمیم‌گیری یکپارچه در تصمیمات مسیریابی–نت هواپیما و برنامه‌ریزی خدمه پرواز، به‌صورت متوالی یا سلسله‌مراتبی به حل مسئله پرداخته‌ایم، برای این منظور، ابتدا با حذف قیود مرتبط با خدمه پرواز، تصمیمات مسیریابی–نت هواپیما را بدست آورده‌ایم، و سپس پاسخ بدست آمده را به عنوان ورودی مسئله تخصیص پرواز به خدمه و برنامه سفر آنها در نظر گرفته‌ایم؛ به این ترتیب، ارزش یکپارچه‌سازی تصمیمات در مقایسه با حالت حل متوالی مقایسه شده است و نتایج مذکور تحلیل شده است. برای ارزیابی اهمیت یکپارچه‌سازی تصمیمات مسیریابی–نت هواپیما و برنامه سفر خدمه، ما هزینه کل را به سه قسمت افراز کرده‌ایم. ۱) هزینه مرتبط با پرواز و نت هواپیماها، ۲) هزینه کارکنان پرواز، و ۳) هزینه‌های جریمه تاخیر یا کنسل کردن پرواز نسبت به برنامه اولیه. مقادیر هر یک از این اجزاء هزینه و همچنین هزینه کل برای مدل یکپارچه پیشنهادی در مقایسه با مدل متوالی/سلسله‌مراتبی در شکل ۷ با هم مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در مدل یکپارچه پیشنهادی هزینه کل به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است و این ارزش مدل پیشنهادی در یکپارچه‌سازی

تصمیمات مرتبط با مسیریابی-نت هواپیما با تصمیمات برنامه سفر خدمه پرواز را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه هزینه در مدل یکپارچه پیشنهادی نسبت به مدل غیریکپارچه (متوالی)

۶. جمع‌بندی و پیشنهاد تحقیقات آتی

دو مسئله عملیاتی مهم در صنعت حمل و نقل هوایی، مسئله مسیریابی-نت هواپیما و مسئله برنامه‌ریزی خدمه پرواز است که بعد از هزینه‌های سوخت، بیشترین هزینه های یک خط هوایی را به خود اختصاص می‌دهند. یکپارچه‌سازی تصمیمات مرتبط با این دو مسئله و همچنین کنترل اختلالات محتمل در برنامه اولیه پرواز، از جمله چالش‌های مهم برای خطوط هوایی در حل این مسئله است. در این تحقیق، مسئله IAMRCP موردتوجه قرار گرفته است که در آن اولا یکپارچه‌سازی تصمیم های مسیریابی-نت هواپیما و برنامه سفر خدمه به طور همزمان دیده می‌شوند و ثانیا، قوانین و مقررات حاکم بر مسیر پرواز هر هواپیما و خدمه (از جمله محدودیت حداکثر پرواز بدون نت، حداکثر فعالیت هر تیم پرواز در یک افق زمانی مشخص) و ... در یک شبکه حمل‌ونقل هوایی متشکل از چندین پایگاه خدمه و پایگاه نت، در نظر گرفته شده است.

برای حل این مسئله IAMRCP رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور (SRO) دو مرحله‌ای بکارگرفته شده است که در مرحله اول، بر اساس برنامه های اولیه پرواز ، ناوگان پرواز و تیم‌های پروازی در دسترس، برنامه پرواز هر هواپیما و برنامه سفر هر خدمه، با رعایت قوانین و مقررات حاکم بر صنعت هواپیمایی، مشخص می‌شود؛ و در مرحله دوم، با توجه به متغیرهای مرحله اول و سناریو اختلال رخ داده‌شده (که موجب تاخیرهای قبل از هر پرواز می‌شوند)، تصمیماتی در خصوص انجام/لغو پروازها صورت می‌پذیرد. نهایتا مدل SRO پیشنهادی با هدف کمینه‌سازی متوسط هزینه و کنترل انحراف معیار هزینه توسط CPLEX حل شده است. نتیجه عددی، بر اساس دو معیار متوسط عملکرد و عملکرد در سناریو بدبینانه، نشان می‌دهد که پاسخ روش رویکرد SRO پیشنهادی، از راه حل اسمی بسیار با ارزش تر است؛ زیرا هم متوسط عملکرد آن و هم عملکرد آن در حالت بدبینانه بسیار بهتر بوده و در دو معیار مذکور به ترتیب ۳۵,۷۶٪ و ۳۹,۳۸٪ نسبت به حالت اسمی، استواری بیشتری دارند. همچنین $VSS = 216.78$ و مثبت شدن آن نشان می‌دهد که ارزش رویکرد SRO دو مرحله‌ای پیشنهادی در مقایسه با حالتی که سناریوهای اختلال در نظر گرفته نمی‌شود، ملموس است.

در این تحقیق فرض شده است که تمام ظرفیت یک خط هوایی در طراحی برنامه اولیه پرواز به کار گرفته شده و ظرفیت مازاد برای پشتیبانی در شرایط اختلال وجود ندارد. حال آنکه ممکن است برخی از خطوط هوایی بخشی از ظرفیت ناوگان یا خدمه خود را در حالت پشتیبان قرار دهند و در شرایط اختلال، جهت جذب تاخیرات، مورد استفاده قرار دهند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی این استراتژی در مدلسازی و حل مسئله مورد توجه قرار گیرد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Network / Schedule Planning
2. Fleet Assignment
3. Aircraft Maintenance Routing
4. Crew Scheduling
5. Pairing
6. Rostering/Assignment

7. Airline Group of the International Federation of Operational Research Societies (AGIFORS)
8. WWW.agifors.org
9. Integrated Approaches
10. Integrated Airline Maintenance Routing and Crew Planning
11. Scenario-based Stochastic Programming
12. Solution Robustness
13. Optimality Robustness
14. Scenario-based Robust Optimization
15. Realization
16. Value of Stochastic Solution

۸ مراجع

– جلیلی، مجید، منطقی، منوچهر. (۱۳۹۷). تحلیل پیش بینی تقاضای مسافر و بار در صنعت هوایی ایران .فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۰۱-۷۵.

– رشیدی کمیجان, علیرضا, گردانی, امین. (۱۳۹۸). مدل ریاضی یکپارچه مسیریابی هواپیماها و زمانبندی خدمه برای خطوط هوایی با تنوع ناوگان و هاب تعمیرات .مطالعات مدیریت صنعتی .

– میرابی، محمد، غیاثوند محمدخانی، هانیه، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۸). مدل‌سازی ریاضی و حل مساله مکان‌یابی- تخصیص هاب در فرودگاه های ایران .فصلنامه مهندسی حمل و نقل.

- Abdelghany, A., & Abdelghany, K. (2018). Airline Network Planning and Scheduling: John Wiley & Sons.

- Ahmed, M. B., Ghroubi, W., Haouari, M., & Sherali, (2017). A hybrid optimization-simulation approach for robust weekly aircraft routing and retiming. 84, 1-20.

- Ahmed, M. B., Mansour, F. Z., & Haouari, M. (2018). Robust integrated maintenance aircraft routing and crew pairing. Journal of Air Transport Management, 73, 15-31.

- Ahmed, M. B., Hryhoryeva, M., Hvattum, L. M., & Haouari, M. (2022). A matheuristic for the robust integrated airline fleet assignment, aircraft routing, and crew pairing problem. Computers & Operations Research, 137, 105551.

- Al-Thani, N. A., Ahmed, M. B., & Haouari, M. (2016). A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 72, 29-44.

- Antunes, D., Vaze, V., & Antunes, A. P. (2019). A Robust Pairing Model for Airline Crew Scheduling. Transportation Science, 53(6), 1751-1771.

- Barnhart, C., Belobaba, P., & Odoni, A. R. (2003). Applications of operations research in the air transport industry. Transportation Science, 37(4), 368-391.

- Barnhart, C., Cohn, A. M., Johnson, E. L., Klabjan, D., Nemhauser, G. L., & Vance, P. H. (2003). Airline crew scheduling. In Handbook of transportation science (pp. 517-560): Springer.

- Barnhart, C., Farahat, A., & Lohatepanont, M. (2009). Airline fleet assignment with enhanced revenue modeling. Operations research, 57(1), 231-244.

- Başdere, M., & Bilge, Ü. (2014). Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration. European Journal of Operational Research, 235(1), 315-328.

- Bazargan, M. (2016). Airline operations and scheduling: Routledge.

- Bulbul, K. G., & Kasimbeyli, R. (2021). Augmented Lagrangian based hybrid subgradient method for solving aircraft maintenance routing problem. Computers & Operations Research, 132, 105294.

- Cacchiani, V., & Salazar-González, J.-J. (2013). A heuristic approach for an integrated fleet-assignment, aircraft-routing and crew-pairing problem. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 41, 391-398.

- Cacchiani, V., & Salazar-González, J.-J. (2016). Optimal solutions to a real-world integrated airline scheduling problem. Transportation science, 51(1), 250-268.

- Cacchiani, V., & Salazar-González, J.-J. (2019). Heuristic approaches for flight retiming in an integrated airline scheduling problem of a regional carrier. Omega.

- Cordeau, J.-F., Stojković, G., Soumis, F., & Desrosiers, J. (2001). Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling. Transportation Science, 35(4), 375-388.

- Deng, Q., & Santos, B. F. (2022). Lookahead approximate dynamic programming for stochastic aircraft maintenance check scheduling optimization. European Journal of Operational Research, 299(3), 814-833.

- Díaz-Ramírez, J., Huertas, J. I., & Trigos, F. (2014). Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base. Computers & Industrial Engineering, 75, 68-78.

- Dück, V. (2010). Increasing stability of aircraft and crew schedules. Framework(July), 1-157.

- Eltoukhy, A., Wang, Z. X., Chan, F. T. S., & Chung, S. H. (2018). Joint optimization using a leader–follower Stackelberg game for coordinated configuration of stochastic operational aircraft maintenance routing and maintenance staffing. Computers & Industrial Engineering, 125, 46-68.

- Eltoukhy, A. E., Chan, F. T., & Chung, S. H. (2017). Airline schedule planning: a review and future directions. Industrial Management & Data Systems, 117(6), 1201-1243.

- Eltoukhy, A. E., Chan, F. T., Chung, S. H., Niu, B. J. C., & Engineering, I. (2018). A model with a solution algorithm for the operational aircraft maintenance routing problem. 120, 346-359.

- Etschmaier, M. M., & Mathaisel, D. F. (1985). Airline scheduling: An overview. Transportation Science, 19(2), 127-138.

- Gao, C., Johnson, E., & Smith, B. (2009). Integrated Airline Fleet and Crew Robust Planning. Transportation Science, 43(1), 2-16. doi:10.1287/trsc.1080.0257

- Gopalan, R., & Talluri, K. T. (1998). The aircraft maintenance routing problem. Operations research, 46(2), 260-271.

- Haouari, M., Zeghal Mansour, F., & Sherali, H. D. (2019). A new compact formulation for the daily crew pairing problem. Transportation Science, 53(3), 811-828.

- Kasirzadeh, A., Saddoune, M., & Soumis, F. (2017). Airline crew scheduling: models, algorithms, and data sets. EURO Journal on Transportation and Logistics, 6(2), 111-137.

- Kowalski, M., Izdebski, M., Żak, J., Gołda, P., & Manerowski, J. (2021). Planning and management of aircraft maintenance using a

- Salazar-González, J.-J. (2014). Approaches to solve the fleet-assignment, aircraft-routing, crew-pairing and crew-rostering problems of a regional carrier. Omega, 43, 71-82.

- Salehi, F., Mahootchi, M., & Husseini, S. M. M. (2017). Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: A possible earthquake in Tehran. Annals of Operations Research, 1-25.

- Sanchez, D. T., Boyacı, B., & Zografos, K. G. (2020). An optimisation framework for airline fleet maintenance scheduling with tail assignment considerations. Transportation Research Part B: Methodological, 133, 142-164.

- Sandhu, R., & Klabjan, D. (2007). Integrated airline fleeting and crew-pairing decisions. Operations research, 55(3), 439-456.

- Sarac, A., Batta, R., & Rump, C. M. (2006). A branch-and-price approach for operational aircraft maintenance routing. European Journal of Operational Research, 175(3), 1850-1869.

- Schaefer, A. J., Johnson, E. L., Kleywegt, A. J., & Nemhauser, G. L. (2005). Airline crew scheduling under uncertainty. Transportation Science, 39(3), 340-348.

- 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(1), 233-249.

- Shao, S., Sherali, H. D., & Haouari, M. (2017). A novel model and decomposition approach for the integrated airline fleet assignment, aircraft routing, and crew pairing problem. Transportation Science, 51(1), 233-249.

genetic algorithm. Eksploatacja i Niezawodność, 23(1).

- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. Operations research, 43(2), 264-281.

- Papadakos, N. (2009). Integrated airline scheduling. Computers & Operations Research, 36(1), 176-195.

- Parmentier, A., & Meunier, F. (2020). Aircraft routing and crew pairing: Updated algorithms at Air France. Omega, 93, 102073.

- Rashidi Komijan, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Dalil, S. A. (2021). A mathematical model for an integrated airline fleet assignment and crew scheduling problem solved by vibration damping optimization. Scientia Iranica, 28(2), 970-984.

- Ruan, J., Wang, Z., Chan, F. T., Patnaik, S., & Tiwari, M. K. J. E. S. w. A. (2021). A reinforcement learning-based algorithm for the aircraft maintenance routing problem. 169, 114399.

- Temucin, T., Tuzkaya, G., & Vayvay, O. (2021). Aircraft Maintenance Routing Problem–A Literature Survey. Promet-Traffic&Transportation, 33(4), 491-503.

- Sa, C. A. A., Santos, B. F., & Clarke, J.-P. B. (2019). Portfolio-based airline fleet planning under stochastic demand. Omega, 102101.

- Safaei, N., & Jardine, A. K. (2018). Aircraft routing with generalized maintenance constraints. Omega, 80, 111-122.

- Safaei, N., & Jardine, A. K. S. (2018). Aircraft routing with generalized maintenance constraints. Omega, 80, 111-122.

- Souai, N., & Teghem, J. (2009). Genetic algorithm based approach for the integrated airline crew-pairing and rostering problem. European Journal of Operational Research, 199(3), 674-683.

- Talluri, K. T. (1998). The four-day aircraft maintenance routing problem. Transportation Science, 32(1), 43-53.

- Weide, O., Ryan, D., & Ehrgott, M. (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. Computers & Operations Research, 37(5), 833-844.

- Wen, X., Ma, H.-L., Chung, S.-H., Khan, W. A. J. T. R. P. E. L., & Review, T. (2020). Robust airline crew scheduling with flight flying time variability. 144, 102132.

- Yu, C.-S., & Li, H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. International Journal of Production Economics, 64(1-3), 385-397.

- Zhang, X., & Mahadevan, S. (2017). Aircraft re-routing optimization and performance assessment under uncertainty. Decision support systems.

خلیل الله معمارزاده دانشجوی دکتری، گروه صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی و همچنین دکترای مدیریت پروژه POST-MBA و فاینانس پروژه ها است. ایشان طی سال ها در حوزه مختلف حمل و نقل هوایی کشور مدیریت کرده اند. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مسیریابی و زمان بندی مجدد پرواز شرکت های هواپیمایی تحت اختلال و عدم قطعیت می باشد.

دکتر محمد فلاح، دانشیار، مدیرگروه صنایع و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی می باشند. ایشان بیش از دو دهه سابقه تدریس در گرایش های مختلف مهندسی صنایع را دارند و طی این مدت ده ها پژوهش علمی در ژورنال های معتبر داخلی و بین المللی توسط ایشان ارائه شده است.

دکتر حامد کاظمی پور، استادیار و عضو هیئت علمی گروه صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی می باشند. ایشان بیش از پانزده سال سابقه تدریس در گرایش های مختلف مهندسی صنایع را دارند و طی این مدت ده ها پژوهش علمی در ژورنال های معتبر داخلی و بین المللی توسط ایشان ارائه شده است.

دکتر بابک فرهنگ مقدم، دانشیار و عضو موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی می باشند. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم بهینه اجرا جهت پروژه‌ها و مدل سازی ریاضی مساله مسیر یابی می باشد.