

A Multi-Objective Mathematical Formulation for the Airline Crew Scheduling Problem: MODE and NSGA-II Solution Approaches

Vahid Baradaran^{*}, Amir Hossein Hosseinian^{}**

Abstract

In this research, a multi-objective mathematical model is proposed for the airline multi-skilled crew scheduling problem. The multi-skilled crew can be assigned to flights and airplanes according to their skills. The objective functions of the proposed model are: (1) Maximizing the number of leave days planned according to the days announced by the flight crew, and (2) Minimizing the penalty costs associated with violation of minimum and maximum working hours. Several test problems have been designed based on the data acquired by the airline studied in this research. Due to the NP-hard essence of the model, we have employed two meta-heuristics, namely the multi-objective differential evolution (MODE) and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). These algorithms are calibrated using the Taguchi method. The algorithms have been compared based on several multi-objective performance measures. Each algorithm has been more successful in terms of some metrics. The comparisons between algorithms and sensitivity analysis show that the proposed model and algorithms can produce appropriate schedules for the airline crew scheduling problem.

Keywords: Flight planning; Crew scheduling; Multi-objective optimization; Meta-heuristic algorithms.

Received: Agu. 02, 2019; Accepted: Apr. 17, 2021.

^{*} Associate Professor, Islamic Azad University, Tehran North Branch (Corresponding author)

Email: v_baradaran@iau-tnb.ac.ir

^{**} Ph.D, Industrial Engineering, Islamic Azad University, Tehran North Branch.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال یازدهم، شماره ۴۱، بهار ۱۴۰۰، صص ۲۴۷ - ۲۶۹ (نوع مقاله: پژوهشی)

DOI: [10.52547/JIMP.11.1.247](https://doi.org/10.52547/JIMP.11.1.247)

توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز و حل آن توسط روش‌های MODE و NSGA-II

وحید برادران*، امیرحسین حسینیان**

چکیده

در این پژوهش، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز چندمهارته ارائه شده است. در این مسئله، خدمه دارای دو مهارت سرهمانداری و مهمانداری هستند و هر یک با توجه به تجربه‌ای که دارند، امکان تخصیص یافتن به پروازها و یا انواع هواپیما را پیدا می‌کنند. اهداف مدل پیشنهادی عبارت‌اند از: ۱. بیشینه‌سازی مجموع انطباق روزهای مرخصی بر روزهای درخواستی افراد و ۲. کمینه‌سازی مجموع جریمه انحرافات از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز. با توجه به NP-Hard بودن مسئله زمان‌بندی خدمه، برای حل مدل پیشنهادی از دو الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی چندهدفه (MODE) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب نسخه دوم (NSGA-II) استفاده شده است. پارامترهای دو الگوریتم توسط روش تاگوچی تنظیم شده‌اند. دو الگوریتم بر اساس چند معیار سنجش عملکردی چندهدفه مورد مقایسه قرار گرفتند. هر کدام از الگوریتم‌ها توانستند از نظر برخی از معیارهای سنجش عملکردی موفق‌تر عمل کنند. نتایج مقایسات الگوریتم‌ها و تحلیل حساسیت نشان داد که الگوریتم NSGA-II در زمان کمتر (حدود ۱۸ درصد) و کیفیت جواب‌های بهتری می‌تواند زمان‌بندی‌های مناسب‌تری برای مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز ارائه کند.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی پرواز؛ زمان‌بندی نیروی انسانی؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ الگوریتم‌های فراابتکاری.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸.

* دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال (نویسنده مسئول).

Email: v_baradaran@iau-tnb.ac.ir

** دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.

۱. مقدمه

امروزه صنعت هواپیمایی یکی از رقابتی‌ترین صنایع موجود در دنیا است. زمان‌بندی پروازها و کادر پرواز از جمله جنبه‌های اثرگذار بر عملکرد شرکت‌های هواپیمایی هستند. مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز^۱ (ACSP) یکی از مسائل حائز اهمیت در زمینه تحقیق در عملیات است که با گسترش صنعت هواپیمایی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. هزینه‌های عملیاتی بالا (نظیر هزینه مرتبط با خدمه پرواز)، به توجه روزافزون به مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز منجر شده است [۲۵]. مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز با توجه به پیچیدگی بالایی که دارد، در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد [۲۶]. هدف این مسئله، تخصیص کارکنان به سفرهای از پیش تعیین شده است؛ به طوری که هزینه‌های تخصیص کارکنان کمینه شود. زمان‌بندی بهینه کادر پرواز به کاهش هزینه‌های عملیاتی گروه پرواز و افزایش کارایی کادر پرواز کمک می‌کند. فواصل زمانی مناسب بین پروازها، اثر مثبت زیادی بر کارایی و بهره‌وری کادر پرواز دارد که افزایش رضایت‌مندی مسافران را در پی خواهد داشت. با افزایش تعداد سفرها، پیچیدگی مسئله زمان‌بندی خدمه افزایش می‌یابد؛ در نتیجه امکان حل مسائل با ابعاد بزرگ توسط روش‌های دقیق^۲ در زمان محاسباتی معقول وجود ندارد [۲۰]. از این حیث، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری^۳ متنوعی برای یافتن جواب‌های بهینه و یا نزدیک به بهینه در زمان محاسباتی معقول توسعه یافته‌اند.

در این پژوهش بر اساس محدودیت‌ها و شرایط شرکت‌های هواپیمایی، یک مدل ریاضی شامل تخصیص مسیرها به هواپیماها و زمان‌بندی خدمه ارائه شده است. در مسئله مورد مطالعه، فرض می‌شود که تعداد n خدمه موجود است که می‌توانند در نقش سرمهماندار، مهماندار و یا به صورت جانشین^۴ به یک پرواز تخصیص یابند. در این مسئله، تعداد k هواپیما برای انجام انواع پروازها موجود هستند. پروازها به دو دسته پروازهای داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌شوند. هر یک از پروازهای داخلی و خارجی می‌توانند دو حالت «اقامتی» و «رفت و برگشتی» داشته باشند. پرواز اقامتی به پروازی اطلاق می‌شود که مدت زمان آن از حد مجاز موظفی کادر پرواز بیشتر است. در این گونه پروازها، گروه پرواز باید در کشور مقصد توقف کنند و برای انجام پرواز بعدی (مسیر بعد یا به قصد برگشت) استراحت کافی داشته باشند. در پروازهای رفت و برگشت، مدت زمان پرواز از حد مجاز موظفی کادر پرواز بیشتر نیست. در مدل پیشنهادی این پژوهش، خدمه پرواز در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، تاریخ‌هایی را که ترجیح می‌دهند در آن روزها به مرخصی بروند، اعلام می‌کنند. به این ترتیب سعی خواهد شد تا تاریخ‌های اعلام شده در فرآیند

۱. Airline crew scheduling problem (ACSP)

۲. Exact

۳. Meta-heuristics

۴. Standby

برنامه‌ریزی لحاظ شوند تا رضایت شغلی خدمه فراهم شود. افزایش رضایت شغلی خدمه به افزایش بهره‌وری آن‌ها و در نتیجه افزایش رضایت‌مندی مشتریان شرکت هواپیمایی منجر خواهد شد. مدل پیشنهادی دارای دو تابع هدف مرتبط با خدمه پرواز است. هدف نخست، بیشینه‌سازی مجموع انطباق روزهای مرخصی بر روزهای درخواستی افراد است. این هدف به‌منظور افزایش رضایت‌مندی خدمه پرواز در نظر گرفته شده است. به‌منظور الزام شرکت هواپیمایی برای رعایت ساعات کاری مجاز خدمه، به‌ازای هر واحد زمانی تخطی از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز، جریمه‌ای برای شرکت هواپیمایی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین در مدل پیشنهادی، هدف دوم به‌صورت کمینه‌سازی مجموع جریمه انحرافات از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز تعریف شده است. از آنجاکه مدل‌های زمان‌بندی و زمان‌بندی خدمه در دسته مسائل NP-Hard قرار دارد [۲۶]، دو الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی چندهدفه^۱ (MODE) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب نسخه دوم^۲ (NSGA-II) برای حل مسئله، توسعه‌یافته‌اند. نتایج حاصل از الگوریتم‌ها از نظر چند معیار سنجش عملکرد چندهدفه مقایسه می‌شوند؛ همچنین بهترین جواب‌های به‌دست‌آمده توسط روش‌های MODE و NSGA-II، با جواب‌های بهینه‌ای که توسط نرم‌افزار GAMS به‌دست آمده‌اند، مقایسه شده است. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، مدل‌سازی ریاضی زمان‌بندی خدمه بر اساس محدودیت‌های حاکم در شرکت‌های هواپیمایی بر اساس یک مطالعه موردی و همچنین ارائه الگوریتم فراابتکاری مناسب برای حل مدل پیشنهادی است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

موضوع زمان‌بندی یک از مسائلی است که در حوزه‌های مختلف مانند خدمات موردتوجه قرار گرفته است [۱۷، ۳، ۱]. در این بخش با توجه به مطالعه موردی این پژوهش که در ارتباط با صنعت هواپیمایی است، پژوهش‌های پیشین در زمینه برنامه‌ریزی نیروی انسانی در خدمات عمومی بررسی می‌شود. کاربرد مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز در شرکت‌های هواپیمایی آمریکای شمالی در پژوهش‌های اِشنايدر و هال^۳ (۱۹۹۰) و آنبیل و همکاران^۴ (۱۹۹۱)، مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۹، ۲]. استاجکویچ و همکاران^۵ (۱۹۹۸)، بهینه‌سازی عملیاتی سفرهای خدمه پرواز را بررسی کردند [۳۲]. کلابجان و همکاران^۶ (۲۰۰۲)، مدلی برای بهبود قانونمندی مسیرهای

۱. Multi-objective differential evolution (MODE)

۲. Non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

۳. Schneider and Hull

۴. Anbil et al.

۵. Stojkovic et al.

۶. Klabjan et al.

سفر در طی یک افق زمانی هفتگی پیشنهاد دادند [۱۹]. گواو و همکاران^۱ (۲۰۰۶)، زمان‌بندی خدمه را در حالتی که خدمه به‌طور غیریکنواخت بین پایگاه‌ها به ماموریت فرستاده می‌شوند، بررسی کردند [۱۴]. زقال و مینوکس^۲ (۲۰۰۶)، رویکرد جدیدی برای مسئله تخصیص خدمه خطوط هوایی به مسیرهای کوتاه و متوسط پیشنهاد دادند [۳۸]. ژو و همکاران^۳ (۲۰۰۶) از یک الگوریتم جستجوی ممنوع^۴ (TS) مبتنی بر همسایگی پویا برای حل مسئله چندهدفه زمان‌بندی مریدان پرواز بهره‌گرفتند [۳۷]. گاماچی و همکاران^۵ (۲۰۰۷)، مسئله زمان‌بندی ماهیانه خدمه پرواز را مورد مطالعه قرار دادند و از یک روش‌شناسی جدید بر اساس مدل رنگ‌آمیزی گراف^۶ و الگوریتم جستجوی ممنوع برای حل مدل استفاده کردند [۱۳]. مرسی‌یر و سومیز^۷ (۲۰۰۷)، یک مدل یکپارچه برای مسیریابی هواپیما، زمان‌بندی خدمه و زمان‌سنجی مجدد پرواز ارائه کرده و ترکیبی از تکنیک تجزیه^۸، تولید ستونی^۹ و یک فرآیند تولید محدودیت پویا^{۱۰} برای حل مسئله پیشنهاد کردند [۲۴]. سوآی و تگهم^{۱۱} (۲۰۰۹)، مسئله سفرهای دوطرفه خدمه خطوط هوایی و زمان‌بندی خدمه خطوط هوایی را ادغام کرده و از یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک^{۱۲} (GA) برای حل آن استفاده کردند [۳۱]. وید و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۰)، یک رویکرد تکراری برای حل مسئله ادغام‌شده مسیریابی هواپیما و زمان‌بندی خدمه به‌کار گرفتند [۳۵]. هو و لیونگ^{۱۴} (۲۰۱۰)، یک مدل ریاضی برای مسئله زمان‌بندی نیروی انسانی در تأمین مواد غذایی و سایر ملزومات برای خطوط هوایی ارائه کردند [۱۵]. هونگ-تسو و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی^{۱۶} (GP) برای مسئله ACSP در تخصیص مأموریت‌ها به خدمه پرواز پیشنهاد دادند [۱۶]. تاکنون روش‌های دقیق، ابتکاری و فراابتکاری فراوانی برای حل مسئله زمان‌بندی خدمه در سیستم‌های حمل و نقل عمومی ارائه شده‌اند. برای مثال، لورنکو و همکاران^{۱۷} (۲۰۰۱)، با استفاده

-
۱. Guo et al.
 ۲. Zeghal and Minoux
 ۳. Xu et al.
 ۴. Tabu search (TS)
 ۵. Gamache et al.
 ۶. Graph coloring
 ۷. Mercier and Soumis
 ۸. Decomposition
 ۹. Column generation
 ۱۰. Dynamic constraint generation procedure
 ۱۱. Souai and Teghem
 ۱۲. Genetic algorithm (GA)
 ۱۳. Weide et al.
 ۱۴. Ho and Leung
 ۱۵. Hung-Tso et al.
 ۱۶. Goal programming (GP)
 ۱۷. Lourenco et al.

از روش‌های جست‌وجوی محلی^۱ مختلف به زمان‌بندی رانندگان اتوبوس پرداختند [21]. ازمت و ویدمر^۲ (۲۰۰۴)، یک الگوریتم ابتکاری سه مرحله‌ای برای تخصیص کار روزانه به نیروهای کار تمام وقت پیشنهاد کردند [4]. ارنست و همکاران^۳ (۲۰۰۴)، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۴ (SA) برای برنامه‌ریزی خدمه قطار بهره‌گرفتند [10]. پیترز و همکاران^۵ (۲۰۰۷)، روشی برای تولید زمان‌بندی‌های کم‌هزینه برای رانندگان اتوبوس در هند تعمیم دادند و عوامل مؤثر بر بهره‌وری رانندگان را بررسی کردند. آن‌ها از یک روش ترکیبی متشکل از الگوریتم شاخه‌وهزینه^۶ (B&P)، آزادسازی لاگرانژین^۷ و الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای حل مسئله بهره‌گرفتند [27]. در پژوهش‌های اریمیو^۸ (۱۹۹۹)، مارکیوری و استینییک^۹ (۲۰۰۰) و اُزدِمیر و موهان^{۱۰} (۲۰۰۱)، از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله زمان‌بندی کارکنان بهره‌گرفته شده است [9, 22, 26]. فولر و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۸)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای زمان‌بندی نیروی کار ارائه کردند و از یک الگوریتم ژنتیک برای حل مدل پیشنهادی بهره‌گرفتند [12]. چین و همکاران^{۱۲} (۲۰۰۸) و سوای و تگهم^{۱۳} (۲۰۰۹)، از انواع الگوریتم‌های ژنتیک در حل مسائل گوناگون زمان‌بندی کارکنان استفاده کردند [5, 31]. راجاگوپالان و صیدام^{۱۴} (۲۰۰۹)، یک الگوریتم جست‌وجوی ابتکاری برای کمینه‌سازی مدت زمان پاسخگویی خدمه پیشنهاد دادند [28]. کشیرزاده و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۷)، انواع مدل‌ها، الگوریتم‌ها و نمونه‌های استاندارد مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز را بررسی کردند [18]. دویچی و دیمیرل^{۱۶} (۲۰۱۸)، در یک مطالعه مروری در زمینه مسئله زمان‌بندی خدمه پرواز، به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از روش‌های حل ارائه‌شده در مبانی نظری موضوع پرداختند [7].

در مطالعات انجام‌شده، تاکنون انطباق روزهای مرخصی بر روزهای درخواستی افراد و جریمه انحرافات از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز مورد مطالعه قرار نگرفته و در مدل‌سازی لحاظ

-
۱. Local search
 ۲. Azmat and Widmer
 ۳. Ernst et al.
 ۴. Simulated annealing (SA)
 ۵. Peters et al.
 ۶. Branch and Price (B&P)
 ۷. Lagrangian relaxation
 ۸. Ereemeev
 ۹. Marchiori and Steenbeek
 ۱۰. Ozdemir and Mohan
 ۱۱. Fowler et al.
 ۱۲. Chien et al.
 ۱۳. Souai and Teghem
 ۱۴. Rajagopalan and Saydam
 ۱۵. Kasirzadeh et al.
 ۱۶. Deveci and Demirel

نشده‌اند. در مدل پیشنهادی این پژوهش، برخی محدودیت‌های موجود در زمان‌بندی خدمه پرواز شرکت‌های هواپیمایی گنجانده شده است. از آنجا که مدل پیشنهادی بر اساس اطلاعات یک مطالعه موردی واقعی توسعه یافته است، می‌تواند نتایج قابل‌اطمینانی برای زمان‌بندی خدمه پرواز شرکت‌های هواپیمایی به‌دست دهد؛ همچنین در این مطالعه از الگوریتم‌های MODE و NSGA-II برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است. بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده، تاکنون کارایی الگوریتم MODE در زمان‌بندی خدمه پرواز موردسنجش قرار نگرفته است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در مسئله موردبررسی، شرکت هواپیمایی دارای n خدمه و k هواپیما است. خدمه موجود به سه دسته سرمهماندار، مهماندار و جانشین تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به تخصص و تجربه کاری خود، به هواپیماها و پروازها تخصیص می‌یابند. خدمه شرکت هواپیمایی در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، روزهایی را که تمایل به مرخصی دارند، اعلام می‌کنند تا در برنامه‌ریزی لحاظ شود. در صورتی که نظر خدمه در تعیین روزهای مرخصی در برنامه زمانی لحاظ شود، رضایت شغلی آن‌ها فراهم خواهد شد. مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، دو تابع هدف دارد که عبارت است از: ۱. بیشینه‌سازی مجموع انطباق روزهای مرخصی با روزهای درخواستی توسط کادر پرواز و ۲. کمینه‌سازی مجموع جریمه انحرافات از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز. مفروضات مسئله به ترتیب زیر است:

- انواع هواپیماهای شرکت هواپیمایی از پیش مشخص است؛
 - تعداد مهماندار، سرمهماندار و جانشین موردنیاز با توجه به هر نوع هواپیما مشخص است؛
 - کارکنان هم‌زمان نمی‌توانند در حالت «انجام وظیفه» و «جانشین» باشند.
 - مدت‌زمان پروازها از پیش مشخص است. این مدت‌زمان از زمان خروج هواپیما از باند تا زمان ورود به باند است؛
 - تعداد مجاز پروازهای رفت‌وبرگشت برای انواع هواپیما مشخص است؛
 - تعداد مجاز اقامت برای انواع هواپیما مشخص است؛
 - تعداد روزهای مجاز برای مرخصی هر فرد مشخص است؛
 - فواصل زمانی بین دو روز مرخصی مشخص است؛
 - کادر پرواز، روزهایی که تمایل دارند به مرخصی بروند را در اختیار برنامه‌ریز قرار می‌دهند.
 - حداقل و حداکثر ساعات مجاز پرواز برای خدمه مشخص است. عدم‌رعایت حداقل و حداکثر ساعات مجاز پرواز، مشمول جریمه برای شرکت است.
- در ادامه این بخش، مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مدل ریاضی ارائه خواهند شد.

مجموعه‌ها:

- Λ : مجموعه انواع هواپیماها $(k, k' = 1, \dots, K)$ ،
 Ω : مجموعه خدمه پرواز $(n = 1, \dots, N)$ ،
 S : مجموعه مهارت‌ها (مهماندار و سرمهماندار) $(s = 1, 2)$ ،
 I : مجموعه انواع پروازها (داخلی و خارجی) $(i, i' = 1, 2)$ ،
 Γ : مجموعه دوره‌های زمانی $(t, t' = 1, 2, \dots, T)$ ،
 E : مجموعه پروازها $(f, f' = 1, 2, \dots, F)$ ،

پارامترهای مدل:

- δ_i^f : مدت زمان پرواز f ام که از نوع i است.
 D_{ki}^{fs} : تعداد خدمه موردنیاز با مهارت s در هواپیمای نوع k ، زمانی که قرار است پرواز f ام از نوع i انجام شود.
 $hmin_n$: حداقل ساعات مجاز پرواز برای خدمه n ام.
 $hmax_n$: حداکثر ساعات مجاز پرواز برای خدمه n ام.
 φ_{ki}^f : تعداد خدمه جانشین موردنیاز برای هواپیمای نوع k در پرواز f ام از نوع i ام.
 η_k : حداکثر تعداد پروازهای رفت و برگشتی برای هواپیمای نوع k .
 π_k : حداکثر تعداد پروازهای اقامتی برای هواپیمای نوع k .
 τ_{ki} : مدت زمان اقامت هواپیمای نوع k در پرواز نوع i ام در یک پرواز اقامتی.
 g_{kit}^f : زمان شروع پرواز f ام از نوع i ام با هواپیمای نوع k در دوره t ام.
 Pen_1 : جریمه هر یک ساعت انحراف از حداقل ساعات مجاز پرواز برای هر خدمه.
 Pen_2 : جریمه هر یک ساعت انحراف از حداکثر ساعات مجاز پرواز برای هر خدمه.
 DT_n : مقدار ساعت موظفی برای خدمه n ام.
 p_{ki}^f : اگر هواپیمای نوع k اجازه انجام پرواز f ام از نوع i ام را داشته باشد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.
 ω_{kin}^{fs} : اگر بتوان خدمه n ام را برای انجام مهارت s به هواپیمای نوع k در نوع پرواز i تخصیص داد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

λ_{nt} : اگر خدمه n درخواست مرخصی در روز t داشته باشد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

متغیرهای تصمیم مدل:

X_{kit}^s : اگر خدمه n در روز t برای انجام مهارت نوع s به هواپیمای نوع k در پرواز نوع t تخصیص یابد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

Y_{kit} : اگر خدمه n در روز t به هواپیمای نوع k در پرواز نوع t به صورت جانشین تخصیص یابد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

V_{kit}^f : اگر هواپیمای نوع k در روز t به پرواز f از نوع i تخصیص یابد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

W_{kit}^f : اگر هواپیمای نوع k در روز t به پرواز f از نوع t برای رفت و برگشت تخصیص یابد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

M_{kit}^f : اگر هواپیمای نوع k در روز t به پرواز f از نوع t برای پرواز اقامتی تخصیص یابد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

$Q_{kk'ii'n}^{ff'tt'}$: اگر خدمه n به هواپیمای نوع k' برای پرواز f' از نوع i' در روز t' ، بلافاصله بعد از پرواز f از نوع t توسط هواپیمای نوع k در روز t تخصیص یابد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

U_n : اگر ساعات موظفی خدمه n بالای ۱۴ ساعت باشد، برابر ۱ است؛ در غیر این صورت، صفر است.

dev_n^+ : مقدار انحراف از حداقل ساعات مجاز پرواز برای خدمه n .

dev_n^- : مقدار انحراف از حداکثر ساعات مجاز پرواز برای خدمه n .

مدل ریاضی

Maximize $Z_1 =$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S (1 - X_{kit}^s - Y_{kit}) \cdot \lambda_{nt} \quad \text{رابطه (۱)}$$

هدف اول عبارت است از: بیشینه‌سازی مجموع انطباق روزهای مرخصی بر روزهای درخواستی افراد. در این تابع اگر خدمه‌ای در یک روز معین درخواست مرخصی داشته باشد و به پروازی

تخصیص یابد، رضایت وی جلب نمی‌شود؛ بنابراین در رابطه ۱، مقدار صفر به تابع تحمیل می‌شود. با حداکثرکردن این تابع تلاش می‌شود تخصیص به‌گونه‌ای صورت گیرد که رضایت کارکنان تأمین شود.

$$\text{Minimize } Z_r = \sum_{n=1}^N \left(dev_n^1 \cdot Pen_r + dev_n^2 \cdot Pen_r \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

هدف دوم عبارت است از: کمینه‌سازی مجموع جریمه انحرافات از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز. در رابطه ۲، انحراف از ساعت مجاز هر خدمه جریمه‌ای به تابع هدف تحمیل می‌کند.

$$X_{kint}^s \leq \omega_{kin}^{fs} \quad \forall k, f, i, n, s, t \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$Y_{kint} \leq \omega_{kin}^{fs} \quad \forall k, f, i, n, s, t \quad \text{رابطه (۴)}$$

محدودیت‌های ۳ و ۴، نشان می‌دهند در صورتی می‌توان خدمه n م را برای انجام مهارت‌های موردنیاز به هواپیمای نوع k و پرواز نوع n م تخصیص داد که فرد موردنظر توانایی انجام کار موردنیاز را داشته باشد.

$$X_{kint}^s \leq P_{ki}^f \cdot V_{kit}^f \quad \forall k, f, i, n, s, t \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Y_{kint} \leq P_{ki}^f \cdot V_{kit}^f \quad \forall k, f, i, n, s, t \quad \text{رابطه (۶)}$$

محدودیت‌های ۵ و ۶ تضمین می‌کنند در صورتی می‌توان یک خدمه را به یک هواپیما در یک پرواز تخصیص داد که آن هواپیما به پرواز موردنظر تخصیص یافته باشد.

$$\sum_{n=1}^N X_{kint}^s \leq D_{ki}^{fs} \quad \forall k, f, i, n, s, t \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_{n=1}^N Y_{kint} \leq \phi_{ki}^f \quad \forall k, f, i, t \quad \text{رابطه (۸)}$$

محدودیت‌های ۷ و ۸، تضمین می‌کنند که تعداد خدمه موردنیاز به پروازها تخصیص داده می‌شوند.

$$X_{kit}^s + Y_{kit} \leq 1 \quad \forall k, i, n, s, t \quad \text{رابطه (۹)}$$

محدودیت ۹، نشان می‌دهد که یک خدمه نمی‌تواند هم‌زمان هر دو حالت «انجام وظیفه» و «جانشین» را داشته باشد.

$$W_{kit}^f \leq p_{ki}^f \times V_{kit}^f \quad \forall k, f, i, t \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$M_{kit}^f \leq p_{ki}^f \times V_{kit}^f \quad \forall k, f, i, t \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، نشان می‌دهند که در صورتی یک هواپیما به پرواز رفت و برگشتی یا اقامتی تخصیص می‌یابد که مجاز به انجام آن نوع پرواز بوده و نیز برای انجام آن نوع پرواز برنامه‌ریزی شده باشد.

$$W_{kit}^f + M_{kit}^f \leq 1 \quad \forall k, f, i, t \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

محدودیت ۱۲، تضمین می‌کند که یک هواپیما در یک پرواز نمی‌تواند هم‌زمان دو حالت اقامتی و رفت و برگشتی داشته باشد.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{f=1}^F W_{kit}^f \leq \eta_k \quad \forall k \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{f=1}^F M_{kit}^f \leq \pi_k \quad \forall k \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴، تضمین می‌کنند که تعداد پروازهای رفت و برگشتی و اقامتی برای انواع هواپیماها از حد مجاز تجاوز نکنند.

$$\sum_{t=t'}^{t'+\lambda} (X_{kit}^s + Y_{kit}) \leq \gamma \quad \forall k, i, n, s, t, \quad t' = 1, \dots, 22 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

محدودیت ۱۵، تضمین می‌کند که فاصله بین دو مرخصی متوالی برای هر خدمه بیشتر از γ روز نشود.

$$Q_{kk'ii'n}^{ff't'} \left(g_{kit}^f + \left(\delta_i^f \cdot W_{kit}^f + \left(\delta_i^f + \tau_{ki} \right) \cdot M_{kit}^f \right) - g_{k't't'}^{f'} \right) \geq 12 \times (1 - U_n) + U_n \cdot DT_n \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\forall (k \neq k'), (i \neq i'), (f \neq f'), (t \neq t'), n$$

$$Q_{kk'ii'n}^{ff't'} \left(g_{kit}^f + \left(\delta_i^f \cdot W_{kit}^f + \left(\delta_i^f + \tau_{ki} \right) \cdot M_{kit}^f \right) - g_{k't't'}^{f'} \right) \leq U_n \cdot DT_n \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\forall (k \neq k'), (i \neq i'), (f \neq f'), (t \neq t'), n$$

محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷، نشان می‌دهند که اگر ساعات موظفی بالای ۱۴ ساعت باشد، مقدار استراحت و موظفی با هم برابر است؛ در غیر این صورت، حداقل باید ۱۲ ساعت بعد از پرواز استراحت در نظر گرفته شود.

$$dev_n^1 = \min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^F \sum_{s=1}^F (X_{k \text{ int}}^s + Y_{k \text{ int}}) \times \left(\delta_i^f \cdot W_{kit}^f + M_{kit}^f \cdot (\delta_i^f + \tau_{ki}) \right) - h \min_n, \cdot \right) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\forall k, f, i, n, s, t$$

رابطه ۱۸، مقدار انحراف از حداقل ساعات مجاز پرواز برای خدمه n م را محاسبه می‌کند.

$$dev_n^2 = \max \left(\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^F \sum_{s=1}^F (X_{k \text{ int}}^s + Y_{k \text{ int}}) \times \left(\delta_i^f \cdot W_{kit}^f + M_{kit}^f \cdot (\delta_i^f + \tau_{ki}) \right) - h \max_n, \cdot \right) \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\forall k, f, i, n, s, t$$

رابطه ۱۹، مقدار انحراف از حداکثر ساعات مجاز پرواز برای خدمه n م را محاسبه می‌کند.

$$X_{k \text{ int}}^s, Y_{k \text{ int}}, V_{kit}^f, W_{kit}^f, M_{kit}^f, Q_{kk'ii'n}^{ff't'}, U_n \in \{0, 1\} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$dev_n^1, dev_n^2 \geq 0 \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱، نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

روش‌های حل مدل. در این پژوهش برای حل مدل از الگوریتم‌های فراابتکاری تکامل تفاضلی چندهدفه (MODE) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب نسخه دوم (NSGA-II) استفاده می‌شود. در ادامه این بخش، ساختار این دو الگوریتم بصورت اجمالی شرح داده خواهد شد.

ساختار نمایش جواب. ساختار نمایش جواب در مسئله موردنظر متشکل از سه ماتریس است:

- ماتریس اول: این ماتریس دوبعدی بوده که مرتبه آن برابر $N \times T$ است. سطرها و ستون‌های این ماتریس به ترتیب نشان‌دهنده خدمه پرواز و روزهای دوره برنامه‌ریزی است. درایه‌های ماتریس نوع هواپیمایی را نشان می‌دهد که خدمه به آن هواپیما برای انجام مهارت‌های سرمهمانداری و مهمانداری، تخصیص می‌یابند. برای مثال، اگر مقدار درایه (۳,۵) برابر با ۲ باشد، این بدان معنا است که نیروی کار سوم در روز پنجم به هواپیمای نوع دوم اختصاص داده شده است.

- ماتریس دوم: این ماتریس دوبعدی بوده که مرتبه آن برابر $N \times T$ است. سطرها و ستون‌های این ماتریس به ترتیب نشان‌دهنده خدمه پرواز و روزهای دوره برنامه‌ریزی است. درایه‌های ماتریس نوع هواپیمایی را نشان می‌دهد که خدمه به آن در حالت جانشین تخصیص داده شده‌اند. برای مثال، اگر مقدار درایه (۳,۵) برابر با ۲ باشد، این بدان معنا است که نیروی کار سوم در روز پنجم در حالت جانشین به هواپیمای نوع دوم اختصاص داده شده است.

- ماتریس سوم: این ماتریس دوبعدی بوده که مرتبه آن برابر $K \times T$ است. سطرها و ستون‌های این ماتریس به ترتیب نشان‌دهنده نوع هواپیما و روزهای دوره برنامه‌ریزی است. درایه‌های این ماتریس نوع پروازی را نشان می‌دهد که هواپیماها به آن تخصیص داده شده‌اند. اگر مقدار درایه برابر با ۱ باشد، یعنی هواپیما به صورت رفت و برگشت و اگر مقدار درایه برابر با ۲ باشد، یعنی هواپیما به صورت اقامتی به آن روز تخصیص یافته است.

نحوه تولید جواب‌های اولیه. در این پژوهش برای تولید جواب‌های اولیه باکیفیت برای هر دو الگوریتم MODE و NSGA-II از روش جست‌وجوی همسایگی متغیر چندشروع استفاده شده است [23].

الگوریتم تفاضل تکاملی چندهدفه (MODE). الگوریتم تفاضل تکاملی (DE) یک الگوریتم فراابتکاری قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی است که توسط استورن و پرایس^۱ (۱۹۹۷)، پیشنهاد شده است [۳۳]. این الگوریتم، فرآیند بهینه‌سازی را مبتنی بر جمعیتی از جواب‌ها انجام می‌دهد. یکی از ویژگی‌های اصلی الگوریتم DE، این است که میزان اکتشاف این روش در ناحیه شدنی رابطه مستقیم با اندازه جمعیت دارد. به این ترتیب هرچه اندازه جمعیت بزرگ‌تر باشد، اکتشاف ناحیه شدنی بیشتر خواهد بود. این امر اثر زیادی بر همگرایی الگوریتم دارد. الگوریتم DE از سه عملگر جهش^۲، تقاطع^۳ و انتخاب^۴ بهره می‌برد. در این روش، بردارهای جدیدی توسط عملگرهای جهش و تقاطع تولید می‌شوند و به روزرسانی جمعیت توسط عملگر انتخاب صورت می‌پذیرد. جمعیت اولیه جواب‌ها $C_l^G, l=1,2,\dots,Npop$ برابر تعداد جواب‌های جمعیت C_l^G برابر جواب l^m جمعیت در تکرار صفرام است. توسط روش جست‌وجوی همسایگی متغیر چندشروعی ایجاد خواهند شد. در ادامه، نحوه کار عملگرهای جهش، تقاطع و انتخاب تشریح می‌شود. شرط توقف این الگوریتم، رسیدن به حداکثر تعداد تکرار ($MaxIt$) از پیش تعیین شده است.

عملگر جهش در MODE. با فرض آنکه G نشانگر تعداد تکرار است، الگوریتم DE به‌ازای هر جواب C_l^G در جمعیت، یک جواب جهش‌یافته M_l^G به ترتیب زیر تولید می‌کند [۱۱]:

$$M_l^G = C_l^G + A \times rand(0,1) \times (C_{l_r}^G - C_{l_p}^G) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

در رابطه ۲۲، l_1, l_2 و l_3 به صورت تصادفی در بازه $[1, Npop]$ تولید می‌شوند؛ به گونه‌ای که $l_1 \neq l_2 \neq l_3 \neq l$. A یک عدد مثبت بزرگ‌تر یا مساوی یک است که نرخ یا سرعت تکامل جمعیت را کنترل می‌کند. $rand(0,1)$ یک عدد تصادفی حقیقی در بازه $[0,1]$ است.

عملگر تقاطع در MODE. همان‌طور که در بخش قبلی توضیح داده شد، جواب C_l^G جهش می‌یابد و جوابی جهش‌یافته با عنوان M_l^G به دست خواهد آمد. جواب M_l^G با جواب C_l^G تحت تقاطع قرار می‌گیرند و یک بردار جدید به نام T_l^G به دست می‌آید. طریقه کارکرد عملگر تقاطع در رابطه ۲۳، نشان داده شده است [۳۶]:

۱. Storn and Price

۲. Mutation

۳. Crossover

۴. Selection

$$T_{l,j}^G = \begin{cases} M_{l,j}^G & \text{if } r_j \leq CR \\ C_{l,j}^G & \text{if otherwise} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (23) \text{ رابطه}$$

در رابطه بالا، $T_{l,j}^G$ نشان‌دهنده زامین بعد از جواب l ام است. CR ، فاکتور تقاطع بوده که مقدار آن در بازه $(0, 1)$ قرار دارد. r_j ، یک مقدار تصادفی در بازه $(0, 1)$ است. D برابر تعداد بعد مسئله بهینه‌سازی است. عملگر تقاطع با مقایسه فاکتور تقاطع (CR) با مقدار تصادفی r_j ، عناصر بردار $T_{l,j}^G$ را تعیین می‌کند.

عملگر انتخاب در MODE. این عملگر، جواب ایجادشده حاصل از تقاطع (T_l^G) را با والد خود (C_l^G) مقایسه می‌کند. در صورتی که جواب T_l^G مقدار برازندگی بهتری داشته باشد، برای تکرار بعدی جواب T_l^G جایگزین C_l^G در جمعیت خواهد شد. در غیراین صورت، جواب C_l^G در جمعیت باقی می‌ماند.

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب نسخه دوم (NSGA-II).

الگوریتم NSGA-II، یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری تکاملی چندهدفه است که توسط دب و همکاران^۱ (۲۰۰۰) معرفی شد [۶]. این روش از یک رویکرد مرتب‌سازی غیرمغلوب سریع با پیچیدگی $O(m \cdot Npop)$ استفاده می‌کند (m و $Npop$ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد توابع هدف و تعداد جواب‌های جمعیت است). علاوه بر رویکرد مرتب‌سازی غیرمغلوب اشاره‌شده، الگوریتم NSGA-II از فرآیند تخمین فاصله ازدحامی^۲ جواب‌ها نیز بهره می‌برد. برای حفظ تنوع جواب‌های جمعیت در هر تکرار، جواب‌های جمعیت بر اساس شاخص‌های تسلط و فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند [۸]. دب و همکاران (۲۰۰۰)، شاخصی با عنوان «فاصله ازدحامی» به منظور تخمین چگالی جواب‌های اطراف یک نقطه مشخص در جمعیت ارائه کردند. فاصله ازدحامی یک جواب نظیر γ به صورت میانگین فاصله دو جواب مجاور در یک مرز یکسان تعریف می‌شود. عملکرد یک الگوریتم ژنتیک به میزان زیادی به عملگرهای تقاطع و جهش بستگی دارد که برای تولید جواب‌های نسل‌های آینده به کار می‌روند. عملگر تقاطع با ترکیب ویژگی‌های دو والد، دو کروموزوم فرزند تولید می‌کند. در این مطالعه، به منظور انتخاب والدین، از عملگر انتخاب مسابقه‌ای استفاده شده است. هدف انتخاب، تعیین بهترین والدین برای تولید فرزندان با برازندگی بالا است. یکی دیگر از عملگرهای NSGA-II، عملگر جهش است که به صورت تصادفی یک

۱. Deb et al.

۲. Crowding distance

یا چند ویژگی (ژن) از یک کروموزوم را تغییر می‌دهد. عملگر جهش به منظور جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم در بهینه محلی به کار می‌رود و تنوع جواب‌ها را در تکرارهای مختلف حفظ می‌کند. شرط توقف این الگوریتم، رسیدن به حداکثر تعداد تکرار (*MaxIt*) از پیش تعیین شده است. **عملگر تقاطع در NSGA-II**. در این پژوهش در هر تکرار، یک عدد صحیح در بازه [۱,۲] به صورت تصادفی تولید می‌شود. در صورتی که عدد «۱» ظاهر شود، از عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای^۱ استفاده خواهد شد. در صورت ظاهر شدن عدد «۲»، عملگر تقاطع دونقطه‌ای^۲ به کار می‌رود. نحوه عملکرد عملگرهای تقاطع تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای در مطالعه دینگ و همکاران^۳ (۲۰۱۸) ارائه شده است [۸].

عملگر جهش در NSGA-II. در این پژوهش، عملگر جهش به کاررفته در NSGA-II، همانند عملگر جهش استفاده برای الگوریتم MODE است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در پژوهش حاضر، دو الگوریتم فراابتکاری MODE و NSGA-II در محیط نرم‌افزار Matlab R2017b برنامه‌نویسی شده‌اند و اجرای برنامه آن‌ها توسط یک رایانه شخصی با مشخصات (2.33 GHz Intel Quad Core CPU, 4-GB RAM) صورت گرفته است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، مسئله مطالعه موردی با نرم‌افزار گمز و با روش اپسیلون محدودیت حل شد. در ادامه این بخش، توضیحات تفصیلی در ارتباط با مسئله مطالعه موردی، تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها، اعتبارسنجی مدل و روش‌های حل، نتایج حاصل از حل مسئله و تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی آورده شده است.

مورد مطالعه: مدل پیشنهادی در این پژوهش برای زمان‌بندی خدمه پرواز یک شرکت هواپیمایی ارائه شده است. مسئله یادشده برای زمان‌بندی خدمه در دوره برنامه‌ریزی ۲۸ روزه انجام شده است. حداکثر تعداد پروازهای رفت و برگشتی و اقامتی برای انواع مختلف هواپیماها برابر ۲۰ پرواز است. مقدار ساعت موظفی هر خدمه، ۱۴ ساعت است. مقادیر Pen_1 و Pen_2 برابر ۵۰۰ واحد پولی است. $hmax_n$ و $hmin_n$ به ترتیب برابر ۵۵ و ۹۰ ساعت است. سایر مشخصات مسئله در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

۱. Single-point crossover

۲. Two - point crossover

۳. Ding et al.

جدول ۱. مشخصات مسئله مورد مطالعه

پارامتر	نوع هواپیما					
	۱۰۰F	BMD	۳۲۰A	۳۲۱A	۳۰۰A	۳۱۰A
D_{ki}^{fs}	۲۵۰	۲۵۰	۱۲۰	۱۲۰	۴۰۰	۱۲۰
ϕ_{ki}^f	۱۵	۱۵	۸	۸	۱۵	۸

تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها. در این پژوهش، تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم‌ها توسط روش تاگوچی انجام شده [۳۴] و سه سطح برای پارامترهای الگوریتم‌های MODE و NSGA-II در نظر گرفته شده است. جدول ۲، پارامترهای اثرگذار بر الگوریتم‌ها، نماد هر پارامتر، سطوح مختلف هر پارامتر و مقدار مناسب هر پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. سطوح مختلف پارامترهای برای الگوریتم‌های NSGA-II و MODE

الگوریتم‌ها	پارامترها	نمادها	مقدار مناسب	سطوح پارامترها		
				سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
NSGA-II	نرخ تقاطع	pc	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۹۰
	نرخ جهش	pm	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۲۵
	اندازه جمعیت	$Npop$	۲۰۰	۱۵۰	۷۰	۲۰۰
	تعداد تکرار	$MaxIt$	$۳ \times Npop$	$۴ \times Npop$	$۲ \times Npop$	$۳ \times Npop$
MODE	اندازه جمعیت	$Npop$	۲۰۰	۱۵۰	۷۰	۲۰۰
	تعداد تکرار	$MaxIt$	$۳ \times Npop$	$۴ \times Npop$	$۲ \times Npop$	$۳ \times Npop$
	تعداد تکرار جست‌وجوی همسایگی	NES	۱۵	۱۰	۵	۱۵

معیارهای سنجش عملکرد. برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های MODE و NSGA-II از ۶ معیار سنجش عملکرد استفاده شده است. این معیارها عبارت است از: تعداد جواب‌های غیرمغلوب^۱ (NOS) [۳۹]؛ فاصله از جواب ایده‌آل^۲ (MID) [۴۰]؛ معیار فاصله‌گذاری^۳ (SM)

۱. Non-dominated Solutions (NOS)

۲. Mean ideal distance (MID)

۳. Spacing metric (SM)

[۳۰]: شاخص پوشش مجموعه^۱ (C-Metric) [۳۹]: شاخص تنوع^۲ (DM) [۳۹] و زمان محاسبات^۳ (CPU time). هرچه مقادیر شاخص‌های SM ، MID و DM و زمان محاسبات کمتر باشد، روش حل عملکرد بهتری داشته است؛ درحالی‌که هرچه مقادیر NOS ، C -metric و DM بیشتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم است.

مقایسه نتایج. جدول ۳، نتایج مقایسه دو الگوریتم $MODE$ و $NSGA-II$ را از نظر معیارهای NOS ، MID ، SM ، DM و زمان محاسبات برای مسئله مطالعه موردی (برای داده‌های جدول ۱) نشان می‌دهد. الگوریتم‌های حل برای مسئله یادشده، ۱۰ مرتبه اجرا شده‌اند و میانگین نتایج در جدول ۳، گزارش شده است. با توجه به نتایج، الگوریتم $MODE$ توانسته است از نظر معیارهای MID و DM عملکرد بهتری داشته باشد. مقایسه زمان حل دو الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم $NSGA-II$ نسبت به الگوریتم $MODE$ سریع‌تر است و نیاز به زمان کمتری برای حل مسئله دارد. الگوریتم $NSGA-II$ از نظر شاخص NOS نیز عملکرد قوی‌تری داشته است. سطح معناداری آزمون برابری میانگین‌های شاخص‌ها در جوامع راه‌حل‌های دو الگوریتم در سطر آخر جدول ۳، ارائه شده که نمایانگر اختلاف معنادار آن‌ها در سطح ۰/۰۵ است.

جدول ۳. مقایسه الگوریتم‌ها از نظر NOS ، MID ، SM ، DM و زمان محاسبات

معیار سنجش عملکرد					الگوریتم
NOS	MID	SM	DM	CPU time (ثانیه)	
۳۶/۷۱	۸۶/۱۱۹۲	۹۹۵/۰	۵۳/۶۶۸	۱۴۶/۲۳	MODE
۴۱/۷۸	۵۴/۱۳۴۶	۵۷۱/۰	۱۲/۳۰۱	۹۳۳/۱۸	NSGA-II
۰/۰۷۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	P_Value

جدول ۴، مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها را از نظر شاخص پوشش مجموعه (C-Metric) نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، جواب‌های غیرمغلوب ارائه‌شده توسط الگوریتم $NSGA-II$ ، توانسته‌اند در مغلوب‌ساختن جواب‌های الگوریتم $MODE$ ، موفق‌تر عمل کنند.

جدول ۴. مقایسه الگوریتم‌ها از نظر پوشش مجموعه

مقدار شاخص (%)	مقایسه الگوریتم‌ها
٪۲۴	$C(MODE, NSGA-II)$
٪۴۱	$C(NSGA-II, MODE)$

۱. Set coverage (C-metric)

۲. Diversification metric (DM)

۳. Computational time (CPU time)

تحلیل حساسیت. در این بخش به منظور انجام تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی برای داده‌های مطالعه موردی، پارامترهای مهم و اثرگذار بر مقادیر توابع هدف تغییر خواهند یافت و نتایج حاصل از الگوریتم‌ها مقایسه می‌شوند. به این ترتیب از برنامه‌ریزان مطالعه موردی خواسته شد تا مقادیر محتمل دیگری برای هر یک از پارامترها (مقادیر آن‌ها در جدول ۱، معرفی شد) ارائه کنند. تعداد ۵ ترکیب مختلف از پارامترها که هر یک نشانگر یک سناریو محتمل برای مسئله است، طراحی شده است. هر ردیف در جدول ۵، یک سناریو برای مسئله مطالعه موردی است (با تغییر پارامترهای مسئله اول) که خود می‌تواند به عنوان یک مسئله جدید برای ارزیابی عملکرد روش‌های حل پیشنهادی باشند.

جدول ۵. مشخصات پارامترها در مسائل نمونه

پارامترها						مسئله
D_{ki}^{fs}	Pen_{η}	Pen_{η}	$hmax_n$	$hmin_n$	ϕ_{ki}^f	
۱	۵۰۰	۵۰۰	۹۰	۵۵	۱۱	۱
۲	۵۵۰	۵۵۰	۹۵	۶۰	۱۲	۲
۳	۶۰۰	۶۰۰	۱۰۰	۶۵	۱۳	۳
۴	۶۵۰	۶۵۰	۱۰۵	۷۰	۱۴	۴
۵	۷۰۰	۷۰۰	۱۱۰	۷۵	۱۵	۵

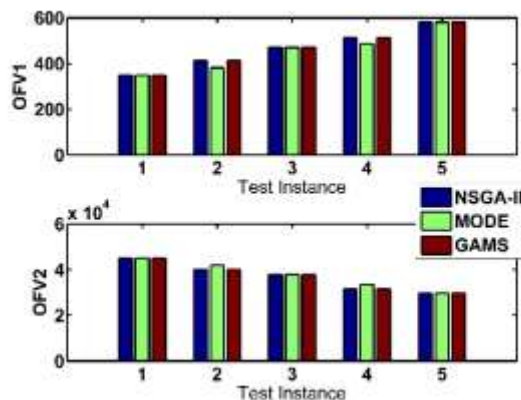
میانگین نتایج حاصل از ۱۰ مرتبه اجرای الگوریتم‌های MODE و NSGA-II، از نظر معیارهای عملکردی *NOS*، *MID*، *SM* و *DM* در جدول ۶ گزارش شده است. نتایج مقایسه‌ای در جدول ۶، نشان می‌دهد که الگوریتم MODE از نظر شاخص‌های *MID* و *DM* بهتر عمل کرده است؛ درحالی‌که الگوریتم NSGA-II از نظر شاخص‌های *NOS* و *SM* جواب‌های بهتری ارائه کرده است. با توجه به این جدول، الگوریتم NSGA-II از نظر مدت زمان، قوی‌تر عمل کرده است.

جدول ۶. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها از نظر معیارهای سنجش عملکردی

معیار سنجش عملکرد					الگوریتم	مسئله
<i>NOS</i>	<i>MID</i>	<i>SM</i>	<i>DM</i>	CPU time (ثانیه)		
۱۰/۱۱۶	۳۲/۱۹۹۱	۹۱/۰	۵۴/۱۴۶۵	۲۵۱/۱۹	MODE	۱
۳۶/۱۲۱	۱۴/۲۳۴۵	۶۸/۰	۶۳/۱۲۳۸	۳۶۲/۱۵	NSGA-II	
۱۳/۱۲۷	۱۳/۲۰۰۸	۷۳/۰	۱۰/۱۷۰۵	۰۵۸/۱۸	MODE	۲
۱۵/۱۳۱	۶۱/۲۵۵۲	۴۲/۰	۱۵/۱۴۱۲	۰۱۹/۱۷	NSGA-II	
۷۷/۸۴	۱۵/۱۸۱۲	۶۲/۱	۴۷/۲۹۶۵	۶۳۲/۲۰	MODE	۳

۶۵/۹۶	۶۷/۲۳۸۲	۸۷/۰	۸۲/۱۶۶۴	۱۱۷/۱۷	NSGA-II	۴
۴۹/۱۰۵	۳۱/۱۷۳۵	۸۱/۰	۱۶/۱۹۵۶	۳۸۵/۲۰	MODE	
۷۴/۱۱۰	۰۴/۲۸۵۴	۷۱/۰	۹۶/۱۵۲۳	۱۴۹/۱۸	NSGA-II	۵
۷۷/۱۱۰	۰۹/۲۱۸۴	۸۷/۰	۱۲/۳۰۶۴	۷۲۱/۲۱	MODE	
۵۵/۱۱۷	۱۳/۲۵۲۰	۴۱/۰	۴۰/۲۸۰۵	۲۲۷/۱۸	NSGA-II	

شکل ۱، مقایسه بهترین نتایج به دست آمده توسط الگوریتم‌های حل و جواب‌های بهینه حاصل شده از نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۴،۱،۲ (جواب هر یک از مسائل با روش اپسیلون محدودیت) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، الگوریتم NSGA-II توانسته است با یافتن جواب بهینه در تمامی مسائل نمونه، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم MODE داشته باشد.



شکل ۱. مقایسه مقادیر توابع هدف برای ۵ مسئله تحلیل حساسیت

اعتبارسنجی مدل و الگوریتم‌های حل. نزدیکی مقدار توابع هدف مسئله در مطالعه موردی در روش‌های فراابتکاری پیشنهادی و روش دقیق در شکل ۱ و همچنین نزدیکی راه‌حل‌های ارائه شده توسط الگوریتم‌های فراابتکاری و روش دقیق گواهی بر اعتبار الگوریتم‌های پیشنهادی است. از طرفی راه‌حل‌های پیشنهادی با نتایج رویه‌های سنتی برنامه‌ریزی مقایسه شده و از موجه بودن آن‌ها اطمینان حاصل شده است و خبرگان برنامه‌ریزی قابلیت اجرایی بودن خروجی‌های مدل‌ها را برای مسئله با داده‌های جدول ۱، تأیید کرده‌اند؛ همچنین مسئله آزمونی با ابعاد مطالعه موردی طراحی شده و پارامترهای آن طوری تعیین شده که نتایج آن برای برنامه‌ریزان و پژوهشگران مشخص بوده است. پس از حل مسئله با روش‌های دقیق و ابتکاری نتایجی به دست آمد که نمایانگر دقت و موجه بودن جواب‌های حاصل از مدل و الگوریتم‌های پیشنهادی است.

یافته‌های مدیریتی. زمان‌بندی خدمه پرواز با هدف رعایت خواسته‌های خدمه به ارتقای رضایت شغلی و افزایش ایمنی پروازها کمک می‌کند. استفاده از مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش در زمان قابل قبول می‌تواند جایگزینی برای روش‌های سنتی زمان‌بندی خدمه باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله زمان‌بندی خدمه چندمهارته پرواز ارائه شد. در مسئله مورد مطالعه، تعداد N خدمه و K هواپیما موجود است و هر کدام از خدمه با توجه به مهارتی که دارند، به هواپیماها و پروازها تخصیص می‌یابند. خدمه پرواز در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، روزهایی را که تمایل به مرخصی دارند، اعلام می‌کنند و سعی می‌شود که در برنامه‌ریزی لحاظ گردد تا رضایت شغلی خدمه فراهم شود. از آنجاکه مسئله مورد مطالعه در دسته مسائل NP-Hard قرار دارد، برای حل مدل پیشنهادی از دو الگوریتم تفاضل تکاملی چندهدفه (MODE) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب نسخه دوم (NSGA-II) استفاده شده است. کارایی دو الگوریتم توسط ۶ معیار سنجش عملکرد چندهدفه، مورد آزمون قرار گرفت. برای حل مدل پیشنهادی، ابتدا یک مسئله واقعی زمان‌بندی خدمه بررسی و حل شد؛ سپس در قالب انجام تحلیل حساسیت برای مدل پیشنهادی، برخی پارامترهای مهم و اثرگذار تغییر یافتند و به این ترتیب، ۵ مسئله نمونه دیگر نیز تولید و حل شد. با استناد به نتایج، الگوریتم MODE از نظر شاخص‌های MID و DM بهتر از الگوریتم NSGA-II عمل کرده است، در حالیکه الگوریتم NSGA-II موفق به کسب نتایج بهتری نسبت به روش MODE از نظر شاخص‌های NOS ، SM و زمان محاسبات شده است. از نظر شاخص پوشش مجموعه نیز روش NSGA-II موفق‌تر عمل کرده است. مهم‌ترین پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی عبارت است از: ۱. بررسی کاربردی بودن مسئله برای سایر شرکت‌های هواپیمایی؛ ۲. توسعه الگوریتم‌هایی با عملکرد بهتر و مقایسه آن‌ها با طراحی مسائلی با مقیاسه‌های مختلف؛ ۳. لحاظ کردن غیبت، استعفا و ترک کار در طی دوره زمان‌بندی؛ (۴) لحاظ کردن استخدام و تعدیل کارکنان.

منابع

1. Alinezhad, A., Sabet, S. & Ekhtiari, M. (2014). Solving Fuzzy Multiple Objective Dynamic Cellular Manufacturing System Problem using a Hybrid Algorithm of NSGA-II and Progressive Simulated Annealing. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(3), 131-156.
2. Anbil, R., Gelman, E., Patty, B., & Tanga, R. (1991). Recent Advances in Crew-Pairing Optimization at American Airlines, *Interfaces*, 21(1), 62-74.
3. Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H. & Dorri Nokarani, B. (2014). Job Rotation Scheduling in a New Arranged Lean Cell, a Genetic Algorithm Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(3), 33-59.
4. Azmat, C.S., & Widmer, M. (2004). A case study of single shift planning and scheduling under annualized hours: A simple three-step approach. *European Journal of Operational Research*, 153(1), 148-175.
5. Chien C.F., Tseng, F.P., & Chen, C.H. (2008). An evolutionary approach to rehabilitation patient scheduling: A case study. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 1234-1253.
6. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S., & Meyarivan, T. (2000). A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
7. Deveci, M., & Demirel, N.C. (2018). A Survey of the literature on airline crew scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 74, 54-69.
8. Ding, S., Chen, C., Xin, B., & Pardalos, P.M. (2018). A bi-objective load balancing model in a distributed simulation system using NSGA-II and MOPSO approaches. *Applied soft computing*, 63, 249-267.
9. Eremeev, A.V (1999). A genetic algorithm with a none-binary representation for the set covering problem. *In Proceedings of Operation Research*, 98, 175.181.
10. Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, 153(1), 3-27.
11. Fan, Q., & Yan, X. (2015). Multi-objective modified differential evolution algorithm with archive-base mutation for solving multi-objective p-xylene oxidation process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(1), 35-49.
12. Fowler J.W., Wirojanagud, P., & Gel, P.S. (2008). Heuristics for workforce planning with worker differences. *European Journal of Operational Research*, 190(3), 724-740.
13. Gamache, M., Hertz, A., & Ouellet, J.O. (2007). A graph coloring model for a feasibility problem in monthly crew scheduling with preferential bidding. *Computers & Operations Research*, 34(8), 2384-2395.
14. Guo Y., Mellouli, T., Suhl, L., & Thiel, M.P. (2006). A partially integrated airline crew scheduling approach with time-dependent crew capacities and multiple home bases, *European Journal of Operational Research*, 171(3), 1169-1181.
15. Ho, S.C., & Leung, J.M.Y. (2010). Solving a manpower scheduling problem for airline catering using metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 903-921.

16. Hung-Tso, L., Yen-Ting, C., Tsung-Yu, C., & Yi-Chun, L. (2012). Crew rostering with multiple goals: An empirical study. *Computers and Industrial Engineering*, 63(2), 483-493.
17. Imani Imanlu, M. & Atighehchian, A. (2017). Daily Operating Rooms Scheduling under Uncertainty using Simulation based Optimization Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(2), 53-82.
18. 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.
19. Klabjan, D., Johnson, E., & Nemhauser, G. (2002). Airline crew scheduling with regularity. *Transportation Science*, 35(4), 359-374.
20. Komilakis, H., & Stamatopoulos, P. (2002). Crew pairing optimization with genetic algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, 1(1), 109-120.
21. Lourenco H., Paixao, J., & Portugal, R. (2001). Multiobjective metaheuristics for the bus-driver scheduling problem. *Transportation Science*, 35(3), 331-341.
22. Marchiori, E. & Steenbeek, A. (2000). An evolutionary algorithm for large scale set covering problem with application to airline crew scheduling. *In Real World Application of Evolutionary Computing, LNCS (1803)*, 367-381.
23. Masri, H., Krichen, S., & Guitouni, A. (2015). A multi-start variable neighborhood search for solving the single path multicommodity flow problem. *Applied Mathematics and Computation*, 251, 132-142.
24. Mercier A., & Soumis, F. (2007). An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Computers & Operations Research*, 34(8), 2251-2265.
25. Mora-Camino, F. (2001). A bi-criterion approach for the airline crew rostering problem. *Lecture Notes in Computer Science*, 1(1), 93-102.
26. Ozdemir, H., & Mohan, C. (2001). Flight graph based genetic algorithm for crew scheduling in airlines. *Information Sciences*, 133(3-4), 165-173.
27. Peters E., De-Matta, R., & Boe, W. (2007). Short-term work scheduling with job assignment flexibility for a multi-fleet transport system. *European Journal of Operational Research*, 180(1), 82-98.
28. Rajagopalan H.K., & Saydam, C. (2009). A minimum expected response model: Formulation, heuristic solution, and application. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43(4), 253-262.
29. Schneider, J., & Hull, W. (1990). Airline Crew Scheduling: Supercomputers and Algorithms. *SIAM*, 23(6), 165-176.
30. Schott, J.R. (1995). Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithms optimization. Master's thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, (1995), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
31. 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.
32. Stojkovic M., Soumis, F., & Desrosiers, J. (1998). The operational airline crew scheduling problem. *Transportation Science*, 32(3), 232-245.
33. Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359.

34. Toledo, R., Aznárez, J.J., Greiner, D., & Maeso, O. (2017). A methodology for the multi-objective shape optimization of thin noise barriers. *Applied Mathematical Modelling*, 50, 656-675.
35. Weide O., Ryan, D., & Ehtgott, M. (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(5), 833-844.
36. Wu, X., & Che, A. (2019). A memetic differential evolution algorithm for energy-efficient parallel machine scheduling. *Omega*, 82, 155-165.
37. Xu J., Sohoni, M., McCleery, M., & Bailey, T.G. (2006). A dynamic neighborhood based tabu search algorithm for real-world flight instructor scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 169(3), 978-993.
38. Zeghal F.M., & Minoux, M. (2006). Modeling and solving a Crew Assignment Problem in air transportation. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 187-209.
39. Zitzler, E. (1999). Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications. PhD. Thesis, Dissertation ETH No. 13398, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland.
40. Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). Multi-objective optimization using evolutionary algorithms a comparative case study. In: A.E. Eiben, T. Back, M. Schoenauer, H.P. Schwefel (Eds.), Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-V), Berlin, Germany, 292-301.