

Meta-Heuristic Algorithms for Multi-Objective Home Health Care Routing and Scheduling Problem Considering Time Windows and Workload Balance of Nurses

Fahimeh Ghiasvand Ghiasi^{*}, Mehdi Yazdani^{}, Behnam Vahdani^{***}, Abolfazl Kazemi^{****}**

Abstract

Home Healthcare provides a wide range of home care services from prevention to rehabilitation and primary care to professional nursing services. This research presents a two-objective mathematical model based on the mixed integer linear programming approach for the home healthcare routing and scheduling problem (HHC-RSP) with the objectives of minimization of the total travel distance and the maximum time difference among nurses. Considering the multimodal transportation, several initial health centers and one final health center and patient and nurse time windows are important features of the studied mathematical model. Small-sized problems are solved by the ϵ -constraint method on GAMS software. Also, due to the NP-hardness of the problem, MOPSO and NSGA-II algorithms have used to solve the medium and large-sized problems. The statistical results showed that the NSGA-II performed better than the MOPSO for medium and large sizes of problems in both MID and NOS performance metrics. Overall, Results of the performance metrics on different sizes of problems indicate the efficient and effective performance of NSGA-II in solving the understudied problem.

Keywords: Home Health Care Problem; Routing And Scheduling; Mixed Integer Linear Programming; ϵ -Constraint Method; Multi-Objective Optimization, Multi-Objective Meta-Heuristic Algorithms.

Received: Apr. 18, 2020; Accepted: Oct. 03, 2021.

^{*} Ph.D Candidate, Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

^{**} Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran (Corresponding author).
Email: m_yazdani@qiau.ac.ir.

^{***} Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

^{****} Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی مراقبت سلامت خانگی چندهدفه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و تعادل بار کاری پرستاران

فهمیه غیاثوند غیائی*، مهدی یزدانی**، بهنام وحدانی***،

ابوالفضل کاظمی****

چکیده

مراقبت سلامت خانگی، ارائه مجموعه‌ای از خدمات مراقبتی در منزل از پیشگیری تا توان‌بخشی و از مراقبت‌های اولیه تا خدمات حرفه‌ای پرستاری است. در این پژوهش یک مدل ریاضی دوهدفه بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی مراقبت سلامت خانگی با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های سفر پرستاران و حداقل‌سازی حداکثر تفاوت‌های زمان کاری بین پرستاران ارائه شده است. در نظر گرفتن حالت‌های دوگانه حمل‌ونقل عمومی و خصوصی، مراکز درمانی آغازین و پایانی و پنجره‌های زمانی بیمار و پرستار از ویژگی‌های مهم مدل ریاضی مسئله مورد مطالعه است. پس از ارائه مدل ریاضی، مسائل اندازه کوچک با استفاده از روش محدودیت اِپسیلون و با بهره‌گیری از نرم‌افزار گمز حل شد؛ همچنین با توجه به پیچیدگی بالای مسئله از دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه برای حل مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ بهره گرفته شد. نتایج آماری حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب در دو شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل و تعداد جواب‌های پارتو نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در مسائل متوسط و بزرگ است. در مجموع نتایج شاخص‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب دارای عملکردی کارا و اثربخش در حل مسائل با اندازه‌های مختلف است.

کلیدواژه‌ها: مسئله مراقبت سلامت خانگی؛ مسیریابی و زمان‌بندی؛ برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط؛ روش محدودیت اِپسیلون؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱.

* دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

** استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول).

Email: m_yazdani@qiau.ac.ir

*** استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

**** استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۱. مقدمه

امروزه با افزایش بی‌رویه آلودگی‌های صنعتی و آلاینده‌های حاصل از سیستم‌های حمل‌ونقل درون‌شهری و همچنین شیوع بیماری‌های مختلف، مراجعه به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی دائماً در حال افزایش است. در این شرایط، محدودیت امکانات، نیروی انسانی و تخصص موردنیاز و برخی مسائل مربوط به حوزه حمل‌ونقل مشکلات زیادی را برای پاسخگویی به بیماران ایجاد کرده است. مسئله مهم دیگر، وجود گروه‌های آسیب‌پذیر نظیر سالمندان و افراد دارای بیماری‌های مزمن و نیاز آنان به مراقبت‌های سلامت است. در این حالت علاوه بر مشکلات مربوط به ناتوانی برخی بیماران در مراجعات و نحوه انتقال آنان، حضور در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی برای این دسته از بیماران برای دریافت خدمات درمانی اولیه احتمال ابتلا به عفونت‌ها را افزایش داده و به بدتر شدن وضعیت بیمار و طولانی شدن مدت بستری منجر شده است. با گذشت زمان یکی از بهترین راهکارها برای مواجهه با چنین وضعیتی، ایده مراقبت سلامت خانگی^۱ (HHC) است. مراقبت سلامت خانگی، مجموعه‌ای از خدمات مراقبتی از پیشگیری تا توان‌بخشی و از مراقبت‌های اولیه تا خدمات پرستاری تخصصی ویژه است که قابل ارائه در منزل است. امروزه، ظهور و شیوع بیماری‌های خطرناک و همه‌گیر نظیر کرونا و ویروس (کووید ۱۹)^۲ در به‌اثبات‌رساندن نیاز به استفاده از خدمات مراقبت در منزل برای ایمن و سالم نگه‌داشتن سالمندان و سایر افراد آسیب‌پذیر کمک شایانی کرده است؛ به‌خصوص به دلیل ظرفیت محدود بیمارستان‌ها و وجود خطرات ابتلا در مکان‌های شلوغ در شرایط این بیماری خطرناک، انجام برخی مراقبت‌های بهداشتی موردنیاز در منزل، در صورتی که قابلیت ارائه آن وجود داشته باشد، بیشتر توصیه می‌شود.

با فراگیر شدن خدمات HHC، سازمان‌هایی که خدمات مراقبت سلامت خانگی ارائه می‌دهند، تمایل به بهینه‌سازی فعالیت‌های خود به‌منظور پاسخگویی به تقاضای فزاینده مشتریان خود دارند. در این حالت به‌دلیل محدودیت منابع در دسترس برای شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات پرستاری، مسائلی نظیر مسئله مسیریابی و زمان‌بندی مراقبت سلامت خانگی^۳ (HHCRSP) برای پاسخگویی مناسب به بیماران در زمان‌های تعیین‌شده پراهمیت‌تر می‌شود. در پژوهش حاضر، مسئله HHCRSP دو هدفه با در نظر گرفتن چندین نقطه شروع (مراکز درمانی آغازین)، حالت‌های دوگانه حمل‌ونقل عمومی و خصوصی، پنجره زمانی بیمار و پرستار و امکان تخصیص پرستاران به بیماران با توجه به صلاحیت و سطح مهارتی موردنیاز بررسی شده است. بخش‌های مختلف مسئله ارائه‌شده شامل زیرمسائل تخصیص پرستاران به بیماران، انتخاب نقاط شروع

1. Home Health Care (HHC)

2. Coronavirus disease 2019 (COVID-19)

3. Home Health Care Routing and Scheduling Problem (HHCRSP)

حرکت پرستاران، توالی ویزیت بیماران توسط پرستاران و تعیین حالت حمل‌ونقل حرکت پرستاران است. یکی از جنبه‌های مهم مسئله HHCRSP توجه به ایجاد تعادل و توازن بارکاری برای پرستاران به‌منظور جلوگیری از تخصیص حجم کاری غیرمتعارف به آن‌ها در طول دوره مدت‌زمان خدمت‌دهی است [۷، ۱۲]. بارکاری می‌تواند تعاریف متفاوتی داشته باشد؛ زیرا کار مراقبان سلامت می‌تواند از بخش‌های متفاوتی تشکیل شده باشد. ازجمله این وظایف می‌توان به زمان سفر، زمانی که صرف ارائه خدمت به بیمار می‌شود و زمان بیکاری اشاره کرد. در این پژوهش، مدل ریاضی مسئله موردنظر با درنظرگرفتن اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های سفر پرستاران و حداقل‌سازی حداکثر تفاوت‌های زمان بار کاری بین پرستاران توسعه یافته است. در پژوهش حاضر پس از ارائه مدل ریاضی، مسائل اندازه کوچک با استفاده از روش محدودیت افسیلون و با بهره‌گیری از نرم‌افزار گمز حل شده و نتایج آن گزارش شده است. در این مقاله با توجه به NP-hard بودن مسئله HHCRSP و همچنین متناقض بودن اهداف، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر رویکرد پارتو، یعنی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب^۱ (NSGA-II) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^۲ (MOPSO)، مسئله HHCRSP دوهدفه بهینه‌سازی و حل شده و مجموعه جواب‌های پارتوی به‌دست‌آمده با استفاده از شاخص‌های عملکردی بررسی و تحلیل شده است [۱۵]. نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- درنظرگرفتن مسئله به‌صورت دوهدفه با درنظرگرفتن اهدافی با رویکرد اقتصادی و اجتماعی؛
 - درنظرگرفتن توازن و تعادل بار کاری میان پرستاران در مدل مسئله مورد مطالعه؛
 - توسعه مسئله دوهدفه در حالت چندانباره با چند مرکز درمانی آغازین و یک مرکز درمانی پایانی؛
 - درنظرگرفتن حالت‌های حمل‌ونقل عمومی و خصوصی برای جابه‌جایی پرستاران در مدل دوهدفه؛
 - ارائه یک شیوه نمایش مناسب برای جواب مسئله حاصل از خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده و انطباق عملگرهای جهش و تقاطع برای اعمال تغییرات بر روی آن‌ها.
- ادامه مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش شرح داده می‌شود. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش بیان خواهد شد. در بخش چهارم، یافته‌های پژوهش و نتایج محاسبات عددی ارائه می‌شود. بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی اختصاص دارد.

1. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
2. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مراقبت‌های درمانی حوزه سلامت یکی از نگرانی‌های رو به افزایش دولت‌ها و سازمان‌های بهداشتی وابسته به آن، به‌خصوص در دوران شیوع بیماری‌های خطرناک و همه‌گیر است. در این حالت محدودبودن امکانات و ظرفیت نیروی انسانی مراکز درمانی و بیمارستان‌ها برای پاسخگویی به مراجعات بیماران، مشکلات را دوچندان می‌کند؛ بنابراین در این شرایط استفاده از نیروهای درمانی در منزل برای انجام برخی مراقبت‌های حوزه سلامت موجبات آرامش خاطر خانواده‌ها، کمک به سلامت سریع‌تر بیمار، جلوگیری از ابتلا به بیماری‌های همه‌گیر دیگر، عدم اتلاف وقت برای همراهی بیمار و حذف هزینه‌های رفت‌وآمد شهروندان و هزینه‌های بستری را فراهم می‌سازد. طبیعی است که هر چه تعداد بیماران در مراکز درمانی کمتر شود، پرستاران می‌توانند بهتر به بیماران هر بخش رسیدگی کنند؛ همچنین برای افراد سالمند، ناتوان و معلول، بیماران مزمن و به‌خصوص افرادی که دوره نقاهت بیماری خود را طی می‌کنند، انجام برخی مراقبت‌های بهداشتی در محیط منزل نسبت به مراکز درمانی، احساس آسایش و امنیت بیشتری را به همراه خواهد داشت [۲۷]. با توجه به مطالب بالا، بسیاری از بیماران ترجیح می‌دهند به‌جای دریافت خدمات مراقبت در مکان‌های تخصصی درمانی و در صورت امکان ارائه این خدمات در منزل، در محیط زندگی خود باقی بمانند و شیوه زندگی معمول خود را حفظ کنند. لِف^۱ و همکاران (۲۰۰۶)، در پژوهشی در حوزه سلامت به این نتیجه رسیدند که در ارتباط با برخی از خدمات درمانی، نسبت رضایت‌مندی بیماران تحت مراقبت در منزل از نظر شاخص‌های کیفیت کادر درمانی تخصیص‌داده‌شده، آسایش و راحتی فرآیند مراقبت، روند مراحل پذیرش و میزان کیفیت مراقبت بیشتر از بیمارانی بود که از بیمارستان به شکل مستقیم خدمات دریافت می‌کردند و این اختلاف از لحاظ محاسبات آماری معنادار بود. انجام مراقبت‌های سلامت در منزل ویژگی‌های خاصی از جمله بهبود دسترسی به خدمات و کاهش صف انتظار برای بیماران در وضعیت نامناسب را دارا است. برخی از خدمات قابل‌ارائه توسط شرکت‌های مراقبت سلامت خانگی عبارت‌اند از: معاینه بیمار در منزل؛ تزریقات و پانسمان؛ ارائه خدمات کاردرمانی و توان‌بخشی؛ نگهداری از بیماران ناتوان و معلول حرکتی؛ انجام انواع آزمایش‌ها و نمونه‌گیری خون و تهیه داروهای تجویز شده که تمام این اقدامات باید توسط پرستاران و تحت نظر و دستور پزشک انجام شود و نتایج و بازخوردهای آن باید به مراکز درمانی به اطلاع داده شود. به این ترتیب پرستاران با وسایل نقلیه، دارو و برخی ملزومات و وسایل مراقبتی موردنیاز مجهز می‌شوند و خدمات لازم را در خانه‌های بیماران ارائه می‌دهند [۲۵].

1. Leff

با افزایش تقاضای بیماران برای استفاده از خدمات HHC و درخواست آنان مبنی بر دریافت این‌گونه خدمات به شکل منظم و در یک زمان ازپیش‌تعیین‌شده، تمرکز بر مدیریت منابع انسانی و امکانات در دسترس و همچنین توجه به مسیریابی و زمان‌بندی مناسب پرستاران به ارائه خدمات کارآمدتری برای شرکت‌های متولی این امر منجر شده است. در این راستا نسبت هزینه و منفعت خدمات مراقبتی ارائه‌شده توسط این شرکت‌ها باید کنترل شود؛ بنابراین هدف کلی در این شرکت‌ها ارائه خدمات مراقبتی با کیفیت بالا در منزل است؛ درحالی‌که از صرفه اقتصادی آن اطمینان حاصل شود [۶]. علاوه بر توجه به اهداف اقتصادی نظیر کاهش هزینه‌های سفر پرستاران، توجه به حجم کاری تخصیص‌داده‌شده به پرستاران و برنامه‌ریزی آن نیز به‌عنوان یک هدف اجتماعی باید در دستور کار این مراکز ارائه خدمات درمانی قرار گیرد؛ زیرا جلوگیری از تخصیص بار کاری غیرمعارف به پرستاران در طول دوره خدمت‌دهی با تمرکز بر شاخص‌های حفظ سلامت کارکنان و مباحث ارگونومیک می‌تواند در افزایش بهره‌وری کارکنان و عملکرد بهتر آنان تأثیر بسزایی داشته باشد. توجه به ترجیحات بیمار و پرستار نیز می‌تواند در تقویت دستیابی به اهداف اجتماعی مؤثر باشد. با در نظر گرفتن گستره وسیعی از محدودیت‌های قانونی و عملیاتی، برنامه‌ریزان HHC پرستاران را به بیماران تخصیص می‌دهند و فعالیت‌های مربوط به آن‌ها را مسیریابی و زمان‌بندی می‌کنند. اگرچه این نوع برنامه‌ریزی بسیار پیچیده است، اما مسیریابی و زمان‌بندی خدمات HHC اغلب به‌صورت دستی انجام می‌شود که این امر به کاهش دقت و عدم دستیابی به راه‌حل بهینه، علی‌رغم صرف انرژی زیاد کارکنان، منجر می‌شود [۳۴]. در چنین شرایطی لزوم توجه به مسئله مسیریابی و زمان‌بندی پرستاران در حوزه مراقبت سلامت خانگی با عنوان «HHCRSP» و بهینه‌سازی آن با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و اجتماعی اشاره‌شده و محدودیت‌های موجود بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

مسئله HHCRSP در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. فرناندز^۱ (۱۹۷۴)، از اولین پژوهشگرانی است که به مطالعه پیرامون مسئله HHCRSP پرداخت [۱۸]. از آنجا که مسئله HHCRSP ارائه خدمات به بیمار را از طریق ارائه بهترین مسیر ممکن و برنامه دقیق کارکنان تسهیل می‌کند، سیستم حمل‌ونقل نقشی اساسی در این حوزه دارد [۵، ۱۴]. با مطالعه پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان مسائل حوزه HHCRSP را به دو دسته مسائل مسیریابی خودرو^۲ (VRP) با یک انبار و مسائل VRP با چندین انبار تقسیم کرد [۸، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۳۱، ۳۲]. در حالت تک‌انبار، پرستاران از یک مرکز بهداشتی به خانه بیماران حرکت می‌کنند؛ اما در حالت چندانبار به توجه به وجود چند مرکز درمانی، امکان تخصیص پرستاران به نقاط تعیین‌شده و شروع حرکت پرستاران از یکی از این نقاط برای ارائه خدمت به

1. Fernandez

2. Vehicle Routing Problem (VRP)

بیماران وجود دارد که موجبات پراکندگی و تنوع بیشتر در امر خدمت‌دهی را فراهم خواهد کرد. این موضوع به‌ویژه در کلان‌شهرها که باید امکان سرویس‌دهی به نقاط مختلف شهر را فراهم کرد، می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در زمینه چندانبار، دو رویکرد در مبانی نظری وجود دارد. در رویکرد نخست، خانه هر پرستار به‌عنوان یک انبار عمل می‌کند و در رویکرد دوم، پرستاران از چندین مرکز HHC (انبارهای آغازین) به خانه بیماران منتقل می‌شوند و انبار مقصد به‌عنوان انبار پایانی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت انبار نهایی بسته به مطالعه انجام‌شده می‌تواند وضعیت متفاوتی داشته باشد. در برخی موارد مرکز پایانی منزل پرستاران است؛ به این معنی که پس از بازدید به مرکز درمانی باز نمی‌گردند و مستقیماً به منزل خود می‌روند و در برخی موارد مرکز پایانی همان محل شروع است؛ همچنین در مواردی می‌تواند مرکز نهایی یک آزمایشگاه یا بیمارستان باشد که پرستاران با مراجعه به آنجا نمونه‌های خون، آزمایش‌ها و غیره را تحویل می‌دهند.

بیشتر مسائل مطرح‌شده در مبانی نظری مسئله HHCRSP از یک نوع وسیله حمل‌ونقل برای دسترسی به بیمار استفاده کرده‌اند [۷، ۹]؛ اما برخی از پژوهشگران نظیر هیرمن^۱ و همکاران (۲۰۱۵) از حمل‌ونقل چندوسیله‌ای بهره گرفته‌اند [۲۰]. آن‌ها یک مدل تک‌هدفه با بازه زمانی روزانه را توسعه دادند. رست و هیرش^۲ (۲۰۱۶)، گزینه‌های بیشتری از انواع حمل‌ونقل عمومی را نیز به مسئله افزودند و از روش جست‌وجوی ممنوع^۳ برای حل آن استفاده کردند. آن‌ها کمینه‌سازی مجموع زمان‌های سفر و انتظار پرستاران را در مدل ریاضی مسئله خود در نظر گرفتند [۲۶]. یادآوری این نکته لازم است که در هر دو پژوهش انجام‌شده، تعادل بارکاری میان پرستاران موردتوجه قرار نگرفته است؛ همچنین مدل‌های ارائه‌شده چندانباره نیستند [۲۰، ۲۶].

در مسائل کاربردی دنیای واقعی، عموماً بیش از یک هدف برای بهینه‌سازی مدنظر قرار می‌گیرد. در این مسائل که مسائل بهینه‌سازی چندهدفه^۴ (MOO) نامیده می‌شوند، رویکردهای مبتنی بر پارتو می‌توانند به شکل مؤثری برای بهینه‌سازی مسئله مورد استفاده قرار گیرند. هدف از حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه یافتن جواب‌های نامغلوب یا پارتو است. هر یک از این پاسخ‌ها، دستیابی به یک یا چند هدف را در سطح قابل‌قبولی امکان‌پذیر می‌سازند؛ درحالی‌که توسط هیچ جواب دیگری به‌صورت کامل موردغلبه قرار نمی‌گیرند. از نظر ریاضی مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه به‌صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$\min F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)\}$$

Subject to:

-
1. Hiermann
 2. Rest and Hirsch
 3. Tabu search
 4. Multi-objective optimization (MOO)

$$\begin{aligned} g_i(X) &\leq 0, & i &= 1, 2, \dots, m \\ h_j(X) &= 0, & j &= 1, 2, \dots, p \\ X &\in S, \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

جایی که S فضای تصمیم یا ناحیه قابل قبول برای جواب‌ها است. معمولاً مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب به شکل مجموعه پارتو، خروجی حل این مسائل چندهدفه است که با یک سری از شاخص‌ها ارزیابی می‌شود. ارائه‌دهندگان خدمات HHC اغلب با توابع هدف چندگانه و در برخی موارد متضاد مواجه هستند. با توجه به مطالعات پیشین، در بیشتر پژوهش‌ها از تابع هدف وزنی برای نشان دادن اهداف مختلف تصمیم‌گیرندگان استفاده شده است؛ اما براکرز^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، به مسئله چندهدفه زمان‌بندی مراقبت سلامت خانگی پرداختند و از روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر رویکرد پارتو برای حل آن بهره گرفتند. نمونه‌های کوچک با استفاده از رویکرد محدودیت اسیلون حل شدند و برای حل مسائل در ابعاد بزرگ از الگوریتم فراابتکاری که الگوریتم ابتکاری جست‌وجوی بزرگ همسایگی را در یک چارچوب جست‌وجوی محلی چندجهته قرار می‌داد، استفاده شد. پژوهش آن‌ها نخستین تحقیق چندهدفه در حوزه HHCRSP محسوب می‌شود که در آن با یک رویکرد چندهدفه به حل مسئله پرداخته شده است؛ اما مدل موردنظر چند انباره نیست؛ همچنین در این پژوهش به ایجاد تعادل بار کاری برای پرستاران توجه ای نشده است [۸]. دکرل^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، یک مسئله چندهدفه HHCRSP با در نظر گرفتن توازن بار کاری و هم‌زمانی ویزیت یک بیمار توسط چند پرستار و وجود چند انبار (مراکز درمانی) را ارائه کردند. آن‌ها از یک الگوریتم ممیتیک^۳ چندهدفه برای حل مسئله بهره گرفتند و مجموعه جواب‌های پارتو به دست آمده از آن را با استفاده از چهار شاخص ارزیابی با نتایج الگوریتم‌های NSGA-II و جست‌وجوی محلی چندجهته^۴ (MDLS) مقایسه کردند؛ با این حال در پژوهش ذکر شده رویکرد چندوسيله‌ای در نظر گرفته نشده است [۱۳].

از آنجاکه روش‌های فراابتکاری در حل مسائل پیچیده ترکیباتی بسیار مؤثر و کارا عمل کرده‌اند [۳]، اخیراً از این رویکرد در حل مسائل زمان‌بندی و مسیریابی استفاده زیادی شده است؛ بنابراین در بیشتر پژوهش‌های موجود در مبنای نظری HHCRSP، روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله به کار رفته است. لی و همکاران (۲۰۲۱)، با در نظر گرفتن محدودیت‌های پنجره زمانی، نیازمندی‌های مهارتی و مقررات کار، یک مدل برنامه‌ریزی محدب و غیرخطی عدد صحیح مختلط با هدف حداقل کردن هزینه‌های سفر و جریمه‌های زمان انتظار ارائه کردند. آن‌ها برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی بهره گرفتند [۲۳]. از جمله روش‌های

-
1. Braekers
 2. Decerle
 3. Memetic algorithm
 4. Multi-Directional Local Search (MDLS)

فراابتکاری دیگر به‌کاررفته برای مسئله HHCRSP می‌توان به روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ممتیک و همچنین روش‌های جستجوی محلی نظیر جست‌وجوی محلی چندجهته اشاره کرد [۲، ۴، ۱۳، ۸]. لیو و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله HHCRSP ارائه کردند که در این مسئله، چهار الگوریتم فراابتکاری ترکیبی ارائه شده است [۲۴].

با توجه به مطالعات انجام‌شده و بررسی‌های به‌عمل‌آمده، در این پژوهش یک مدل ریاضی برای مسئله HHCRSP دوهدفه با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی و اجتماعی، چندین انبار (چند مرکز درمانی)، دو حالت حمل‌ونقل (عمومی و خصوصی)، تفاوت در صلاحیت پرستاران برای انجام خدمات درمانی و ترجیحات زمانی ویزیت بیمار و پرستار (پنجره‌های زمانی) توسعه داده شده و سپس مسائل مربوطه با روش دقیق محدودیت اسیلون و دو الگوریتم‌های فراابتکاری حل شده‌است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع توسعه‌ای کاربردی است که هدف آن ارائه یک مدل ریاضی دوهدفه بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله HHCRSP با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های سفر پرستاران و حداقل‌سازی حداکثر تفاوت‌های زمان کاری بین پرستاران و حل آن با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مسائل چندهدفه مبتنی بر رویکرد پارتو است. در این پژوهش کمی ابتدا با بررسی میانی نظری و پیشینه مسئله پژوهش، مطالعه منابع و مراجع معتبر و شناسایی خلأهای موجود در آن، ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و متغیرهای مسئله شناسایی (تعریف مسئله) و بر مبنای آن یک مدل ریاضی مناسب برای مسئله مورد مطالعه ارائه شد. برای حل ابعاد کوچک مسئله، روش محدودیت اسیلون به کار رفت؛ همچنین به علت Np -Hard مسئله برای حل آن در ابعاد متوسط و بزرگ از رویکردهای فراابتکاری بهره گرفته شد. برای مقایسه نتایج روش‌های به‌کارگرفته‌شده از شاخص‌های عملکردی معتبر مرتبط با ابزارهای چندهدفه استفاده شدند. این پژوهش به دنبال پاسخگویی به این سؤال‌های اساسی است که چگونه می‌توان یک مدل ریاضی دوهدفه مناسب برای مسئله HHCRSP با در نظر گرفتن اهداف، محدودیت‌ها و مشخصات اشاره‌شده ارائه کرد؟ و ابزارها و روش‌های حل مناسب برای مسئله دوهدفه مورد نظر کدام‌اند؟ در این بخش ابتدا تعریف مسئله با ذکر جزئیات کامل ارائه شده و سپس شرح مدل ریاضی بیان می‌شود. در ادامه روش‌های حل مسئله مورد مطالعه معرفی می‌شوند.

شرح مسئله. مسئله دوهدفه HHCRSP بر نمودار جهت‌دار $G = (V, Q)$ توسعه یافته است که مجموعه گره‌ها و $Q = \{(i, j, n) / i \in V \setminus V_e, j \in V \setminus V_s, n \in N, i \neq j, V = \{V_p \cup V_s \cup V_e\}\}$ مجموعه $q_{in}=1, q_{jn}=1$ تمامی کمان‌های (مسیرها) ممکن در فضای مسئله است. مجموعه V_p نشان‌دهنده بیماران، مجموعه V_s نشان‌دهنده مراکز درمانی آغازین و مجموعه V_e نشان‌دهنده مرکز درمانی پایانی است. هر پرستار $n \in N$ باید به تعدادی از بیماران تخصیص داده شود و به مدت مشخص (st_i) به هر بیمار تخصیص داده شده خدمت ارائه دهد. در این مسئله فرض می‌شود که تعدادی بیمار خواهان دریافت خدمات درمانی توسط درمانگران در منزل هستند. هر بیمار i می‌تواند خدمت موردنیاز خود را از یک پرستار n از میان پرستارانی که صلاحیت موردنیاز و سطح مهارت انجام آن کار را دارند، دریافت کند که امکان این امر به وسیله پارامتر q_{in} نشان داده می‌شود. اگر پرستار n بتواند به بیمار i اختصاص یابد و صلاحیت موردنیاز انجام آن خدمت را داشته باشد، پارامتر $q_{in} = 1$ و در غیر این صورت، $q_{in} = 0$ ؛ همچنین به منظور اینکه تمام پرستاران بتوانند از مراکز آغازین مبدأ خارج شده و به مرکز پایانی وارد شوند، $q_{on} = q_{fn} = 1$ در نظر گرفته می‌شود. برای راحتی بیمار i ام از نظر تسهیل در دریافت خدمت، پنجره زمانی $[e_i, l_i]$ برای زمان خدمت‌دهی به آن تعریف شده است. در این پژوهش دو حالت حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود که حالت اول از آن وسایل حمل‌ونقل خصوصی است که هزینه سفر بالاتر و زمان پیمایش کمتری نسبت به حالت دوم، یعنی وسایل حمل‌ونقل عمومی دارد. مجموعه $K = \{K_1, K_2, \dots, K_{k_{max}}\}$ نشان‌دهنده وسایل حمل‌ونقل در دسترس برای پرستاران است و مجموعه $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{k_{max}}\}$ حالت‌های حمل‌ونقل عمومی یا خصوصی را برای هر یک از این وسایل نقلیه در دسترس نشان می‌دهد. هر پرستار در طول مسیر خدمت‌رسانی خود در برنامه روزانه از یک وسیله نقلیه با نوع خصوصی یا عمومی استفاده می‌کند. مسیر خدمت‌رسانی هر وسیله $k \in K$ از یکی از مراکز درمانی آغازین شروع شده و به مرکز درمانی نهایی ختم می‌شود. زمان شروع به کار و اتمام کار هر پرستار به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله در نظر گرفته می‌شود. پارامتر $d = [d_{i,j}]$ ماتریس فاصله بین نقاط یا گره‌ها است. در حالت حمل‌ونقل خصوصی (m_1) و حالت حمل‌ونقل عمومی (m_2) ، ماتریس هزینه‌های سفر در میان گره‌ها به ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳، به دست می‌آیند:

$$[c_{i,j,m_1}] = [d_{i,j}] \cdot [cc_{i,j,m_1}] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$[c_{i,j,m_2}] = [d_{i,j}] \cdot [cc_{i,j,m_2}] \quad \text{رابطه (۳)}$$

در عبارات بالا $[CC_{i,j,m_1}]$ و $[CC_{i,j,m_2}]$ به ترتیب ماتریس ضرایب هزینه حالات حمل و نقل خصوصی و عمومی هستند. در این پژوهش، مقادیر ضرایب هزینه به صورت یک عدد تصادفی از یک بازه با توزیع یکنواخت انتخاب شده است که در جدول ۱، نشان داده شده است؛ همچنین ماتریس زمان‌های سفر میان گره‌ها در حالت‌های حمل و نقل خصوصی و عمومی به ترتیب از طریق روابط ۴ و ۵، به دست می‌آیند:

$$[t_{i,j,m_1}] = [d_{i,j}] \cdot [ct_{i,j,m_1}] \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$[t_{i,j,m_2}] = [d_{i,j}] \cdot [ct_{i,j,m_2}] \quad \text{رابطه (۵)}$$

در عبارات بالا $[ct_{i,j,m_1}]$ و $[ct_{i,j,m_2}]$ به ترتیب ماتریس ضرایب زمانی حالات حمل و نقل خصوصی و عمومی هستند. نحوه ایجاد ضرایب مربوط به زمان در جدول ۱، نشان داده شده است.

با استفاده از اطلاعات بالا مقدار $c_{i,j,u(k)}$ که برابر است با هزینه سفر از گره i به گره j توسط وسیله k در حالت حمل و نقل $u(k)$ و مقدار $t_{i,j,u(k)}$ که برابر است با زمان سفر از گره i به گره j توسط وسیله k در حالت حمل و نقل $u(k)$ با استفاده از روابط ۶ و ۷، محاسبه می‌شوند:

$$c_{i,j,u(k)} = d_{ij} \cdot CC_{i,j,u(k)} \quad \forall i, j, k \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$t_{i,j,u(k)} = d_{ij} \cdot ct_{i,j,u(k)} \quad \forall i, j, k \quad \text{رابطه (۷)}$$

در روابط بالا $u(k)$ با توجه به شماره ماشین انتخابی (k) ، یکی از حالت‌های حمل و نقل خصوصی m_1 یا عمومی m_2 است.

جدول ۱. ضرایب هزینه و زمانی حالت‌های حمل و نقل خصوصی و عمومی

بازه تعیین مقدار ضرایب	نماد	ضرایب هزینه و زمانی
$\sim U(2,3)$	CC_{m_1}	ضرایب هزینه حالت حمل و نقل خصوصی
$\sim U(1,2)$	CC_{m_2}	ضرایب هزینه حالت حمل و نقل عمومی
$\sim U(1,2)$	ct_{m_1}	ضرایب زمانی حالت حمل و نقل خصوصی
$\sim U(2,3)$	ct_{m_2}	ضرایب زمانی حالت حمل و نقل عمومی

در مسئله HHCRSP ارائه شده، برنامه‌ریزی پرستاران با توجه به افق برنامه‌ریزی زمانی روزانه صورت می‌گیرد. در این برنامه‌ریزی، بنا بر وضعیت موجود مسئله پیش رو، تعداد نقاط مراکز درمانی آغازین، تعداد و مکان بیماران، تعداد پرستاران در دسترس و وسایل نقلیه خصوصی موجود مشخص می‌شود؛ سپس هر پرستار مسیر خود را توسط وسیله نقلیه تخصیص داده شده (عمومی یا خصوصی) و بنا بر توالی تعیین شده آغاز می‌کند و در طول برنامه زمانی برای تعدادی از بیماران که به او تخصیص یافته‌اند، مراقبت‌های درمانی لازم را انجام می‌دهد و سپس به نقطه نهایی وارد می‌شود. در این پژوهش، مشتری اساساً بیماری است که به خدمات پرستاری و پزشکی تخصصی نیاز دارد. این خدمات می‌تواند شامل تزریقات، تعویض بانداز، کشیدن بخیه و دیگر خدمات ضروری پزشکی باشد. چندین مرکز آغازین و یک مرکز پایانی وجود دارد. در این مسئله مراکز آغازین، مراکز درمانی هستند که پرستاران به آن نقاط تخصیص داده می‌شوند و از آن نقاط حرکت خود را آغاز می‌کنند و مرکز درمانی نهایی و اصلی یک بیمارستان است. تمامی مراکز درمانی به‌عنوان شعبات فرعی مرکز اصلی که بیمارستان است، در نظر گرفته شده‌اند. پرستاران مسیر خود را از یکی از مراکز درمانی آغاز می‌کنند و در نهایت به بیمارستان بازمی‌گردند تا نمونه خون، آزمایش‌ها، ضایعات عفونی نظیر سرسوزن و گزارش‌های فعالیت‌های درمانی خود را تحویل دهند. هدف اصلی مسئله پیدا کردن بهترین زمان بندی و مسیر حرکت برای هر پرستار برای خدمت‌دهی با در نظر گرفتن زیر مسئله‌های زیر است:

۱. تعیین تخصیص پرستاران به بیماران؛

۲. انتخاب مراکز آغازین برای پرستاران؛

۳. تعیین توالی ویزیت بیماران برای هر پرستار؛

۴. تعیین حالت حمل و نقل مورد استفاده برای هر پرستار.

اهداف دوگانه مسئله نیز عبارت‌اند از: حداقل‌سازی هزینه‌های سفر پرستاران و حداقل‌سازی حداکثر تفاوت‌های زمان کاری بین پرستاران. تابع هدف اول از دیدگاه اقتصادی و کاهش هزینه و تابع هدف دوم از دیدگاه اجتماعی و ایجاد تعادل بارکاری جهت جلوگیری از خستگی و اعمال فشار کاری بیش از اندازه بر روی پرستاران در برنامه زمان بندی در نظر گرفته شده است. فرضیه‌های پژوهش به شرح زیر است:

- پرستاران می‌توانند خدمت‌دهی خود را از مراکز درمانی آغازین متفاوتی شروع کنند؛ ولی در پایان به یک مرکز درمانی اصلی (بیمارستان) بازمی‌گردند؛

- پرستاران بیماران تخصیص داده شده را ویزیت می‌کنند و سرانجام برای تحویل نمونه خون، آزمایش‌ها، ضایعات عفونی و گزارش‌های فعالیت‌های درمانی خود به مرکز درمانی اصلی (بیمارستان) بازمی‌گردند؛

- هر وسیله نقلیه به یکی از حالت‌های حمل و نقل خصوصی یا عمومی متعلق است؛

- هر پرستار تنها به یک حالت حمل‌ونقل تخصیص داده می‌شود و از یک وسیله نقلیه استفاده می‌کند؛
- پرستاران از نظر صلاحیت انجام خدمات درمانی متفاوت هستند؛ به این صورت که هر پرستار توانایی ارائه خدمات به تعدادی از بیماران را با توجه به نوع خدمت درخواستی و سطح مهارت خود دارد و توانایی انجام خدمت‌دهی به برخی از بیماران را ندارد؛
- هر بیمار با توجه به نوع خدمت موردنیاز خود به یک پرستار از میان پرستاران موجود که دارای صلاحیت انجام خدمت موردنظر است، تخصیص داده می‌شود؛
- زمان کار و مواد موردنیاز هر بیمار، قبل از بازدید برآورد می‌شود؛
- مکان مراکز و شعبات درمانی از پیش تعیین شده و ثابت است؛
- بیماران خدمات خود را در پنجره زمانی $[e_i, l_i]$ دریافت می‌کنند؛
- پنجره زمانی دوره خدمت‌دهی برای پرستاران $[a_n, b_n]$ در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی ریاضی. در این بخش مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله دو هدفه HHCRSP با ویژگی‌ها و فرض‌های ذکر شده شرح داده می‌شود.

اندیس‌ها:

- n, \hat{n} : اندیس پرستار
- k : اندیس وسیله نقلیه
- i, j : اندیس تمام گره‌ها
- f : اندیس مرکز درمانی پایانی (بیمارستان)

پارامترها:

- ns : تعداد مراکز درمانی آغازین
- np : تعداد بیماران
- n_{max} : تعداد پرستاران
- k_{max} : تعداد وسایل نقلیه
- St_i : زمان سرویس‌دهی به بیمار i
- $[e_i, l_i]$: حدود بالایی و پایینی پنجره زمانی بیمار i
- $[a_n, b_n]$: حدود بالایی و پایینی پنجره زمانی پرستار n
- M : عدد بزرگ
- d_{ij} : مسافت بین گره i و گره j

$c_{i,j,u(k)}$: هزینه سفر از گره i به گره j توسط وسیله k تحت حالت حمل و نقل $u(k)$

$t_{i,j,u(k)}$: زمان سفر از گره i به گره j توسط وسیله k تحت حالت حمل و نقل $u(k)$

مجموعه‌ها:

N : مجموعه پرستاران؛ $N = \{N_1, N_2, \dots, N_{n_{max}}\}$

K : مجموعه وسایل نقلیه؛ $K = \{K_1, K_2, \dots, K_{k_{max}}\}$

U : مجموعه حالت‌های حمل و نقل ماشین‌های در دسترس؛ $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{k_{max}}\}$

V : $V = \{V_p \cup V_s \cup V_e\}$

V_p : مجموعه گره‌های بیمارستان؛ $V_p = \{V_{p_1}, V_{p_2}, \dots, V_{p_{np}}\}$

V_s : مجموعه مراکز درمانی آغازین؛ $V_s = \{V_{s_1}, V_{s_2}, \dots, V_{s_{ns}}\}$

V_e : مجموعه مرکز درمانی پایانی (مجموعه تک‌عضوی)

Q : مجموعه کلیه کمان‌های (مسیرها) ممکن در فضای مسئله

متغیرهای تصمیم:

$Y_{i,j,n}$: اگر پرستار n به مسیر ij اختصاص یابد، مقدار ۱؛ در غیر این صورت صفر

$X_{i,j,n,k}$: اگر وسیله نقلیه k پرستار n را در مسیر ij جابه‌جا کند، مقدار ۱؛ در غیر این صورت صفر

$Z_{n,k}$: اگر وسیله نقلیه k به پرستار n تخصیص یابد، مقدار ۱؛ در غیر این صورت صفر

T_i : زمان رسیدن به گره i

$T_{i,n}$: زمان ترک مرکز درمانی آغازین توسط پرستار n

$T_{f,n}$: زمان برگشت به مرکز درمانی پایانی توسط پرستار n

W_n : مدت زمان فعالیت پرستار n در طول دوره خدمت‌دهی

توابع هدف:

$$\text{Min } F_1 = \sum_{(i,j,n) \in Q} \sum_{k \in K} c_{i,j,u(k)} X_{i,j,n,k} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\text{Min } F_2 = \max_{n, n' \in N, n \neq n'} (W_n - W_{n'}) \quad \text{رابطه (۹)}$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{i,n | (i,j,n) \in Q} Y_{i,j,n} = 1 \quad \forall j \in V_p \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_{i \in V_s} \sum_{j | (i,j,n) \in Q} Y_{i,j,n} = 1 \quad \forall n \in N \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_{i|(i,f,n) \in Q} Y_{i,f,n} = 1 \quad \forall n \in N \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_{j|(i,j,n) \in Q} Y_{i,j,n} = \sum_{j|(i,j,n) \in Q} Y_{j,i,n} \quad \forall n \in N; i \in V_p \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$Y_{i,j,n} = \sum_{k \in K} X_{i,j,n,k} \quad \forall (i,j,n) \in Q \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_{n \in N} Z_{n,k} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{k \in K} Z_{n,k} \leq 1 \quad \forall n \in N \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$X_{i,j,n,k} \leq Z_{n,k} \quad \forall (i,j,n) \in Q; k \in K \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$T_i + st_i + \sum_{n|(i,j,n) \in Q} t_{i,j,u(k)} \cdot X_{i,j,n,k} \leq T_j + M \left(1 - \sum_{n|(i,j,n) \in Q} X_{i,j,n,k} \right) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\forall i, j \in V_p; k \in K$$

$$T_{i,n} + t_{i,j,u(k)} \leq T_j + M(1 - X_{i,j,n,k}) \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\forall (i,j,n) \in Q; i \in V_s; j \neq f; k \in K$$

$$T_i + st_i + t_{i,f,u(k)} \leq T_{f,n} + M(1 - X_{i,f,n,k}) \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\forall (i,f,n) \in Q; i \notin V_s; k \in K$$

$$T_j \leq T_{i,n} + t_{i,j,u(k)} + M(1 - X_{i,j,n,k}) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\forall i \in V_s; j \in V_p; k \in K$$

$$T_{f,n} \leq T_i + st_i + t_{i,f,u(k)} + M(1 - X_{i,f,n,k}) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\forall (i,f,n) \in Q; k \in K$$

$$e_i \leq T_i \leq l_i \quad \forall i \in V_p \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$a_n \leq T_{f,n} \leq b_n \quad \forall n \in N \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$a_n \leq T_{i,n} \leq b_n \quad \forall i \in V_s; n \in N \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$W_n = T_{f,n} - T_{i,n} \quad \forall (i,f,n) \in Q \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$Y_{i,j,n}, X_{i,j,n,k}, Z_{n,k} \text{ (متغیرهای باینری)} \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\text{و } T_i, T_{i,n}, T_{f,n}, W_n \geq 0 \text{ (متغیرهای پیوسته)}$$

معادله ۸، نخستین تابع هدف است که مجموع هزینه‌های کل سفر پرستاران را کمینه می‌کند. معادله ۹، تابع هدف دوم مدل است که حداکثر مقدار تفاوت‌های زمان کاری بین پرستاران را کمینه می‌کند. این تابع هدف به منظور ایجاد توازن و تعادل برای بار (حجم) کاری تخصیص داده شده به پرستاران در نظر گرفته شده است. از آنجاکه تابع هدف دوم مسئله از نوع *Min-Max* است، به منظور خطی‌سازی به صورت زیر بازنویسی می‌شود. تابع هدف دوم، یعنی معادله ۹، با معادله ۲۸، جایگزین شده و محدودیت ۲۹، به مدل اضافه می‌شود:

رابطه (۲۸) $Min Dev$

رابطه (۲۹) $Dev \geq W_n - W_{n'} \quad \forall n, n' \in N, n \neq n'$

محدودیت ۱۰، تضمین می‌کند که هر بیمار تنها یک مرتبه و توسط یکی از پرستارانی که توانایی ارائه خدمت به آن بیمار را داشته باشد، ملاقات شود. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲، تضمین می‌کنند که مسیر حرکت هر پرستار از مراکز درمانی آغازین شروع شده و به مرکز درمانی پایانی ختم شود. محدودیت ۱۳، پیوستگی مسیر را نشان می‌دهد. بر اساس این محدودیت، اگر پرستار n از گره i به گره j منتقل شود، باید از گره j خارج شود و به گره بعدی برود تا پیوستگی جریان حفظ شود؛ بنابراین اگر پرستار n بیماری را ویزیت کند باید از گره آن بیمار خارج شده و به منزل بیمار بعد وارد شود و یا اینکه اگر در منزل بیمار آخر است باید از آنجا خارج شود و به مرکز نهایی برود. محدودیت ۱۴، رابطه بین متغیرهای تصمیم Y_{ijn} و X_{ijnk} را نشان می‌دهد. این محدودیت نشان می‌دهد که هر پرستار دقیقاً توسط یک وسیله نقلیه بین گره‌های i و j جابه‌جا می‌شود. محدودیت‌های ۱۵ و ۱۶، تضمین می‌کنند که هر پرستار تنها از یک وسیله نقلیه استفاده خواهد کرد و هر وسیله نقلیه تنها به یک پرستار تخصیص داده می‌شود. محدودیت ۱۷، ارتباط بین متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۸، زمان رسیدن به هر بیمار توسط هر پرستار را محاسبه می‌کند. بر اساس این محدودیت زمان رسیدن به بیمار j برابر با مجموع زمان رسیدن به گره i ، زمان سرویس‌دهی در گره i و زمان طی مسیر ij است. محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۲، زمان شروع به کار و اتمام کار هر پرستار را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۹، نشان می‌دهد که زمان رسیدن به منزل بیمار j بزرگ‌تر مساوی زمان ترک مرکز درمانی i توسط پرستار n به علاوه زمان طی مسیر از گره i به گره j است. لازم به توضیح است که در محدودیت ۱۹، بیمارستان نهایی در نظر گرفته نمی‌شود ($j \neq f$). در واقع محدودیت ۱۹، مانع حرکت مستقیم از مرکز آغازین به بیمارستان نهایی می‌شود. محدودیت ۲۰، نشان می‌دهد که زمان رسیدن به گره آخر توسط پرستار n بزرگ‌تر مساوی زمان رسیدن به گره بیمار i به علاوه زمان خدمت‌دهی در منزل بیمار i ام و زمان حرکت از بیمار i به مرکز پایانی f است؛ همچنین محدودیت در زمانی که

پرستار n از گره i به گره پایانی f حرکت کند، فعال شده و در غیر این صورت به کمک مقدار بزرگ M محدودیت غیرفعال می‌شود. محدودیت ۲۰، تنها برای ارتباط دادن منزل آخرین بیمار ویزیت شده توسط پرستار و مرکز درمانی نهایی (بیمارستان) تعریف شده است ($i \notin V_S$). محدودیت ۲۱، نشان می‌دهد که اگر پرستار n بین انبار اولیه i ($i \in V_S$) و گره j ($j \in V_P$) توسط وسیله نقلیه k تحت حالت حمل و نقل $u(k)$ جابه‌جا شود، حداکثر زمان رسیدن به گره j برابر با زمان خروج از مرکز درمانی اولیه به علاوه زمان سفر بین دو گره است. محدودیت ۲۲، نشان می‌دهد که حداکثر زمان رسیدن به انبار نهایی برابر با زمان رسیدن به آخرین گره بیمار به علاوه زمان ارائه خدمات در آن گره و همچنین زمان سفر بین آخرین بیمار و بیمارستان نهایی است. معادله ۲۳، محدودیت پنجره زمانی بیماران را نشان می‌دهد. بر اساس این محدودیت زمان رسیدن هر پرستار باید در بازه زمانی تعیین شده توسط بیمار باشد. محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵، پنجره زمانی پرستاران را نشان می‌دهند. محدودیت ۲۶، طول کل مدت زمان فعالیت هر پرستار جهت خدمت‌دهی به بیماران را محاسبه می‌کند. $T_{f,n}$ نشان‌دهنده زمان ورود پرستار n به مرکز درمانی نهایی (بیمارستان) بوده و $T_{i,n}$ زمان خروج پرستار n از اولین مرکز درمانی است؛ بنابراین کل زمان خدمت‌دهی پرستار شماره n در طول دوره برنامه‌ریزی از اختلاف زمان وارد شدن پرستار به گره نهایی و زمان خروج از مرکز درمانی آغازین قابل محاسبه است. در نهایت محدودیت ۲۷، نوع متغیرهای تصمیم مدل را نشان می‌دهد.

روش‌های حل. هنگامی که یک مسئله دارای چند تابع هدف باشد و اهداف با همدیگر سازگاری نداشته باشند، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر رویکرد پارتو برای حل مسئله چندهدفه یک گزینه مناسب است. در این گونه مسائل برخلاف مسائل تک‌هدفه، حل مسئله به یک جواب منجر نخواهد شد؛ بلکه به مجموعه‌ای از جواب‌ها می‌رسد که به عنوان «مجموعه جواب‌های پارتو» شناخته می‌شوند. در حل مسائل با استفاده از رویکردهای مبتنی بر پارتو هدف این است که علاوه بر حرکت به سمت جواب‌های پارتو بهینه، گوناگونی و تنوع نیز در بین جواب‌ها وجود داشته باشد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی، حل مسئله HHCRSP و دستیابی به یک جواب مناسب در اندازه‌های متوسط و بزرگ، توسط روش‌های دقیق در یک زمان منطقی امکان‌پذیر نیست؛ همچنین با در نظر گرفتن دو هدف متناقض کمینه‌سازی هزینه‌های سفر و کمینه‌سازی حداکثر مقدار تفاوت‌های زمان کاری بین پرستاران در مسئله مورد مطالعه نیاز به استفاده از روش‌های مبتنی بر رویکرد پارتو جهت دستیابی به مجموعه جواب‌های پارتوی تقریبی ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین در این پژوهش برای حل مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر رویکرد پارتو، یعنی NSGA-II و MOPSO استفاده شده است [۱۱، ۱۰]. در ادامه الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO شرح داده شده‌اند؛ سپس

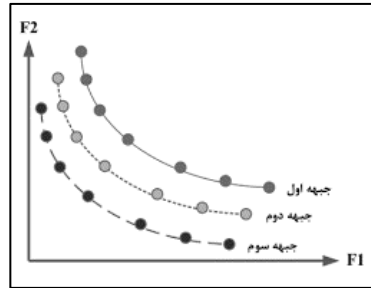
شیوه نمایش جواب ارائه شده است و در مرحله بعد از آن به ترتیب عملگرهای جهش و تقاطع بیان می‌شوند. در نهایت معیارهای مقایسه کارایی الگوریتم‌های چندهدفه به‌طور کامل عنوان شده است.

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II). یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم NSGA-II است که توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) معرفی شده است [۱۱]. از آنجاکه در بیشتر مواقع در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه نمی‌توان به یک حل بهینه منحصر به فرد دست یافت، این حوزه با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نامغلوب مؤثر همراه است. راه‌حل قابل قبول، راه‌حلی است که عملکرد مناسبی نسبت به تمام اهداف داشته باشد؛ بنابراین به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها در الگوریتم NSGA-II دو عملگر به الگوریتم ژنتیک اضافه شده و آن را به الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب تبدیل کرده است. این دو عملگر عبارت‌اند از: عملگر فاصله ازدحامی و عملگر مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها.

در هر نسل از الگوریتم NSGA-II، ابتدا با استفاده از جمعیت والد P_t با اندازه N و عملگرهای تقاطع و جهش، جمعیت فرزندان Q_t با اندازه مشابه ایجاد می‌شود. پس از آن دو جمعیت با یکدیگر ترکیب می‌شوند و جمعیت جدید R_t را با اندازه $2*N$ تشکیل می‌دهند که این جمعیت جواب‌ها به دسته‌های غیرمغلوب مختلف طبقه‌بندی و رتبه‌بندی می‌شود (t : شماره تکرار الگوریتم). در فرآیند مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها^۱، رتبه‌بندی جمعیت با استفاده از مفهوم غلبه بر اساس نامغلوب‌ها انجام می‌شود. در این روش هر جواب با تمام جواب‌های دیگر مقایسه می‌شود تا مغلوب بودن یا نبودن آن مشخص شود. در این میان تعدادی از جواب‌ها مشخص می‌شود که مغلوب یکدیگر نیز نیستند؛ اما بر تمام جواب‌های دیگر غلبه می‌کنند. چنین مجموعه جواب‌هایی «جبهه نامغلوب رتبه اول» نامیده می‌شوند. برای دستیابی به جواب‌های برتر سطح بعدی، جواب‌های فعلی موقتاً نادیده گرفته می‌شوند و مشابه جبهه اول، سطوح نامغلوب بعدی به ترتیب مشخص می‌شوند. نمایی از جبهه‌های پارتو با رتبه‌های مختلف برای یک مسئله فرضی در شکل ۱، نشان داده شده است.

پروژه نگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Fast non-dominated sorting procedure



شکل ۱. جبهه‌های پارتو

پس از رتبه‌بندی راه‌حل‌ها با توجه به روش مرتب‌سازی سریع نامغلوب، اندازه فاصله ازدحامی^۱ برای راه‌حل‌های دارای رتبه‌های برابر مربوط به هر جبهه فعلی محاسبه می‌شود. یک جواب با مقدار کمتر فاصله ازدحامی نشان‌دهنده تراکم بیشتر در اطراف آن جواب است. بنابراین مطلوب است برای مرحله بعد جواب‌هایی انتخاب شوند که دارای فاصله ازدحامی بیشتر هستند؛ زیرا با این کار تنوع و پراکندگی در جواب‌های به‌دست‌آمده بیشتر می‌شود.

پس از محاسبه، جواب‌های به‌دست‌آمده هر جبهه بر اساس اندازه‌گیری فاصله ازدحامی، به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند. در ادامه رویکرد انتخاب برای تولید جمعیت اصلی بعدی P_{t+1} با اندازه N انجام می‌شود. در این مرحله، اعضای جمعیت بعدی بر اساس رتبه بهتر و فاصله ازدحامی بیشتر انتخاب می‌شوند؛ سپس مجدداً عملیات‌های مربوط به تقاطع، جهش و انتخاب در نسل بعدی نیز تکرار می‌شوند. NSGA-II تا برآورده شدن شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد. به محض توقف روند الگوریتم، راه‌حل‌های مربوط به نخستین جبهه پارتو از آخرین جمعیت والدین به‌عنوان یک مجموعه جواب پارتو تقریبی و خروجی الگوریتم تعیین می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO). الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ به‌عنوان یک تکنیک جست‌وجو با الگوبرداری از حرکات جمعی و گروهی ذرات ارائه شده است [۲۱]. الگوریتم MOPSO به‌عنوان یک رویکرد چندهدفه مبتنی بر پارتو از عملگرهای الگوریتم PSO استفاده می‌کند [۱۰، ۲۸]. در این الگوریتم بهترین جواب‌های نامغلوب در یک حافظه خارجی نگهداری می‌شود. نحوه نمایش جواب در این الگوریتم مشابه الگوریتم NSGA-II است؛ با این تفاوت که در این الگوریتم به‌جای واژه کروموزوم از ذره استفاده می‌شود. در این الگوریتم پس از تولید جمعیت اولیه، تابع هدف هر ذره محاسبه می‌شود. پس از محاسبه هدف، اعضای نامغلوب جمعیت محاسبه شده و در آرشیو ذخیره می‌شود؛ سپس هر ذره با الگوبرداری از

1. Crowding Distance
2. Particle Swarm Optimization (PSO)

اعضای آرشیو حرکت خود را انجام می‌دهد. پس از آن بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذرات به‌روزرسانی می‌شود. در مرحله بعد اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه شده و اعضای مغلوب از آرشیو حذف می‌شوند. اگر تعداد اعضای آرشیو بیش از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی حذف می‌شوند و این روند در تکرارهای بعدی ادامه می‌یابد. در صورتی که شرط توقف محقق شده باشد، الگوریتم پایان می‌یابد و در غیر این صورت مجدداً اعضای نامغلوب جمعیت جدا شده و در آرشیو ذخیره می‌شوند تا فرایند حل ادامه یابد. گام‌های الگوریتم MOPSO به شرح زیر است [۱]:

۱. ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی ذرات جمعیت؛
۲. جداکردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره‌کردن آن‌ها در آرشیو؛
۳. جدول‌بندی فضای هدف کشف‌شده؛
۴. انتخاب یک رهبر^۱ برای هر ذره از میان آرشیو و انجام حرکت جدید؛
۵. بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذرات به‌روز می‌شود (به این صورت که اگر موقعیت جدید بهترین قبلی را مغلوب کند آنگاه: $Pbest_i^{n+1} = X_i^{n+1}$ ؛ اما اگر موقعیت جدید مغلوب شد، تغییری صورت نمی‌گیرد و بهترین خاطره قبلی حفظ می‌شود: $Pbest_i^{n+1} = Pbest_i^n$ و در نهایت اگر هیچ‌کدام مغلوب دیگری نباشند، یکی از آن‌ها به تصادف انتخاب می‌شود)؛
۶. اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه می‌شود (وجود این مرحله موجب می‌شود تا بعضی از اعضای آرشیو مغلوب شوند و یا اینکه برخی از اعضای جدید توسط اعضای قبلی مغلوب شوند. پس باید غربالگری صورت گیرد)؛
۷. اعضای مغلوب آرشیو حذف می‌شوند؛
۸. اگر تعداد اعضای آرشیو بیش از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی حذف می‌شوند؛
۹. در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است به قدم ۳ برگردید و در غیر این صورت پایان.

شیوه نمایش جواب. در شیوه نمایش جواب ارائه شده، تخصیص پرستاران به بیماران، ترتیب بازدید بیماران توسط پرستار، مراکز آغازین حرکت پرستاران و وسایل حمل‌ونقل تخصیص داده شده تعیین می‌شود. در این پژوهش، هر جواب در یک فرمت چندرشته‌ای ارائه شده است؛ به این صورت که یک رشته برای تخصیص و توالی ویزیت هر پرستار و یک رشته نیز برای تخصیص وسایل نقلیه در آن تعبیه شده است. روش نمایش جواب برای یک مسئله فرضی در شکل ۲، مشاهده می‌شود. در مثال ارائه شده، دو مرکز درمانی آغازین، ۳ پرستار، ۳ وسیله نقلیه و ۹ بیمار در نظر گرفته شده است. روش نمایش جواب شامل ۴ رشته، سه رشته برای ۳

پرستار موجود (رشته‌های پرستاران) و یک رشته برای تخصیص وسیله نقلیه (رشته وسیله نقلیه) است. دو سلول اول از رشته پرستار نشان‌دهنده دو مرکز درمانی آغازین است و مقدار بزرگ‌تر به‌عنوان مرکز آغازین پرستار انتخاب می‌شود. سلول‌های سوم، چهارم و پنجم مربوط به بیماران تخصیص داده شده به پرستاران هستند. در حالت از کُد خارج شده، ویزیت بیماران به ترتیب چینش صعودی این اعداد انجام می‌شود. برای مثال در نخستین رشته از نمایش جواب، پرستار N_1 مسیر خود را از مرکز درمانی آغازین V_{s1} شروع کرده، به ترتیب بیماران V_{p6} ، V_{p2} و V_{p4} را ویزیت می‌کند و در نهایت به مرکز درمانی نهایی (V_e) بازمی‌گردد. مسیرهای حرکت پرستاران برای این مثال به صورت رشته‌های مجزا در شکل ۳، نشان داده شده است؛ همچنین رشته وسیله نقلیه نشان می‌دهد که پرستار اول به ماشین شماره ۳، پرستار دوم به ماشین شماره ۱ و پرستار سوم به ماشین شماره ۲ تخصیص داده شده است. با توجه به نحوه تخصیص پرستاران به بیماران، طول رشته‌های پرستاران در نمایش جواب می‌تواند متفاوت باشد.

N_1	V_{s1}	V_{s2}	V_{p2}	V_{p4}	V_{p6}
	0.682	0.571	0.671	0.864	0.548
N_2	V_{s1}	V_{s2}	V_{p5}	V_{p9}	V_{p1}
	0.726	0.391	0.371	0.561	0.455
N_3	V_{s1}	V_{s2}	V_{p3}	V_{p7}	V_{p8}
	0.341	0.554	0.265	0.487	0.514
N_1	N_2		N_3		
3	1		2		

شکل ۲. نمایش جواب

N_1	V_{s1}	\rightarrow	V_{p6}	\rightarrow	V_{p2}	\rightarrow	V_{p4}	\rightarrow	V_e
N_2	V_{s1}	\rightarrow	V_{p5}	\rightarrow	V_{p1}	\rightarrow	V_{p9}	\rightarrow	V_e
N_3	V_{s2}	\rightarrow	V_{p3}	\rightarrow	V_{p7}	\rightarrow	V_{p8}	\rightarrow	V_e

شکل ۳. مسیرهای حرکت پرستاران

عملگرهای جهش. برای بهبود کیفیت جواب از عملگرهای جهش بر روی جواب‌ها برای ایجاد جواب‌های همسایگی استفاده شده است. در این پژوهش از پنج عملگر جهش شامل عملگر تعویض-رشته پرستار^۱، عملگر توالی مجدد-رشته پرستار^۲، عملگر تخصیص بیمار - رشته پرستار^۳، عملگر تعویض - رشته وسیله نقلیه^۴ و عملگر چینش مجدد - رشته وسیله نقلیه^۵ برای

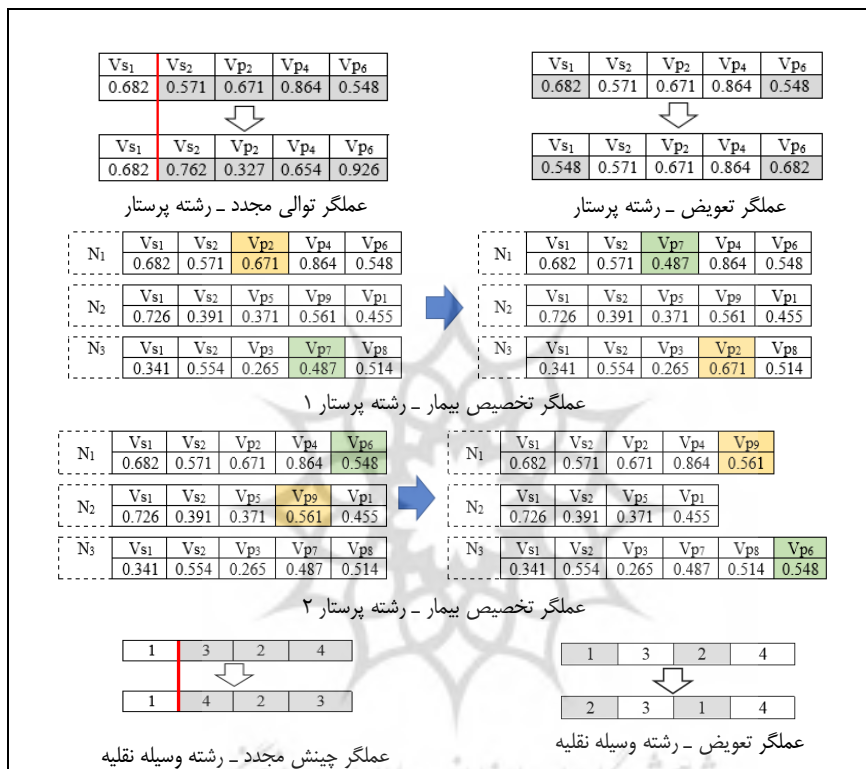
1. Swap-Nurse string operator
2. Resequencing-Nurse string operator
3. Patient assignment-Nurse string operator
4. Swap-Vehicle string operator
5. Reordering-Vehicle string operator

ایجاد جواب‌های همسایگی بهره گرفته شده است. برای انجام فرآیند جهش مرتبط با رشته پرستار توسط عملگرهای تعویض و توالی مجدد، ابتدا یکی از رشته‌های پرستاران به تصادف انتخاب می‌شود. در عملگر تعویض، دو سلول از رشته پرستار موردنظر به دلخواه انتخاب می‌شوند و مقادیر آن نقاط تعویض می‌شود. در عملگر توالی مجدد، یک نقطه از رشته پرستار به دلخواه انتخاب می‌شود؛ سپس مقادیر عددی در سمت راست یا چپ نقطه انتخابی تا انتها مجدداً تولید می‌شوند؛ بنابراین مرکز آغازین پرستار و ترتیب ویزیت بیماران می‌تواند توسط این دو عملگر تغییر داده شود. در عملگر تخصیص بیمار - رشته پرستار، دو رویکرد وجود دارد. در رویکرد نخست (عملگر تخصیص بیمار - رشته پرستار ۱) دو بیمار از دو رشته پرستار مختلف انتخاب و جایگاهشان با یکدیگر تعویض می‌شود؛ اما در رویکرد دوم (عملگر تخصیص بیمار - رشته پرستار ۲) دو بیمار از دو رشته پرستار انتخاب و هر کدام به یک پرستار دیگر از میان پرستارهای موجود تخصیص داده می‌شوند. در عملگر تعویض - رشته وسیله نقلیه، دو سلول از رشته وسیله نقلیه انتخاب می‌شوند و مقادیر آن‌ها، یعنی شماره ماشین‌ها، با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. علاوه بر آن در عملگر چینش مجدد - رشته وسیله نقلیه، برای رشته وسیله نقلیه یک نقطه انتخاب می‌شود و از آن نقطه به بعد دوباره چیده می‌شود. این عملگر می‌تواند سمت راست یا چپ نقطه موردنظر را به تصادف تحت تأثیر قرار دهد. فرآیند پنج عملگر بیان شده در شکل ۴، نشان داده شده است. برای نمایش فرآیند عملگرهای مربوط به رشته پرستاران، رشته‌های جواب مثال شکل ۳، در نظر گرفته شده است؛ همچنین برای ارائه فرآیند عملگرهای مربوط به رشته وسیله نقلیه، یک مثال فرضی با چهار وسیله نقلیه برای پرستاران در نظر گرفته شده است.

عملگر تقاطع. در این پژوهش از عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای^۱ استفاده شده که این عملگر برای تغییر توالی ویزیت بیماران در رشته‌های مربوط به پرستاران طراحی شده است. با استفاده از یک مثال، نحوه عملکرد این عملگر شرح داده می‌شود. ابتدا دو جواب (والد) در نظر گرفته شده که در شکل ۵، نمایش داده شده است؛ سپس رشته مربوط به مسیر هر پرستار در یک والد، با رشته نظیر خود در والد دوم در صورت دارابودن طول یکسان، تقاطع خواهند داشت. مراحل فرآیند تقاطع در شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود. در بخش بالایی شکل ۶، رشته‌های پرستار والد اول و دوم به صورت سطری نشان داده شده است. به این ترتیب که رشته مربوط به هر پرستار از والد اول در مقابل رشته پرستار نظیر از والد دوم قرار داده می‌شود. در هر رشته پرستار، یک نقطه به تصادف انتخاب شده و از آن نقطه به بعد ارقام سلول‌های آن رشته از والد اول با رشته مشابه در والد دوم تعویض می‌شود و به این ترتیب جواب‌های (فرزندان) جدید ایجاد می‌شود. یادآوری این

1. Single point crossover

نکته لازم است که جواب شماره ۱ ایجادشده از تقاطع (فرزند اول)، بیماران و وسایل نقلیه تخصیص داده شده خود را از والد اول و جواب شماره ۲ (فرزند دوم) از والد دوم دریافت می‌کند. در فرآیند عملگر تقاطع ارائه شده، در رشته مربوط به تخصیص وسیله نقلیه جواب‌ها تغییری ایجاد نشده و رشته مربوطه از هر والد به فرزند نظیر منتقل می‌شود. همان‌طور که در بخش پایینی شکل ۴ مشاهده می‌شود، سطر اول، رشته پرستارهای اول تا سوم فرزند اول و سطر دوم، رشته پرستارهای اول تا سوم فرزند دوم را نشان می‌دهد. در نهایت جواب‌های حاصل شده از تقاطع به تفکیک فرزند اول و دوم در شکل ۷، نمایش داده شده است.



شکل ۴. فرآیند عملگرهای جهش

Parent 1						Parent 2					
N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P1}	V _{P3}	V _{P5}	N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P2}	V _{P4}	V _{P6}
	0.682	0.571	0.671	0.864	0.548		0.524	0.842	0.357	0.574	0.654
N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P4}	V _{P7}	V _{P9}	N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P5}	V _{P9}	V _{P1}
	0.726	0.391	0.371	0.561	0.455		0.254	0.954	0.386	0.571	0.435
N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P6}	V _{P2}	V _{P8}	N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P3}	V _{P7}	V _{P8}
	0.341	0.554	0.265	0.487	0.514		0.985	0.512	0.675	0.125	0.845
	N ₁	N ₂	N ₃				N ₁	N ₂	N ₃		
	2	1	3				3	2	1		

شکل ۵. نمایش دو جواب (والد)

Parent 1	N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P1}	V _{P3}	V _{P5}	N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P4}	V _{P7}	V _{P9}	N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P6}	V _{P2}	V _{P8}		
		0.682	0.571	0.671	0.864	0.548	0.726	0.391	0.371	0.561	0.455	0.254	0.954	0.386	0.571	0.435	0.985	0.512	0.675	0.125
Parent 2	N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P2}	V _{P4}	V _{P6}	N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P5}	V _{P9}	V _{P1}	N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P3}	V _{P7}	V _{P8}		
		0.524	0.842	0.357	0.574	0.654	0.254	0.954	0.386	0.571	0.435	0.985	0.512	0.675	0.125	0.845	0.341	0.554	0.265	0.487
Offspring 1	N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P1}	V _{P3}	V _{P5}	N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P4}	V _{P7}	V _{P9}	N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P6}	V _{P2}	V _{P8}		
		0.682	0.571	0.671	0.574	0.654	0.726	0.954	0.386	0.571	0.435	0.254	0.954	0.386	0.571	0.435	0.985	0.512	0.675	0.487
Offspring 2	N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P2}	V _{P4}	V _{P6}	N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P5}	V _{P9}	V _{P1}	N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P3}	V _{P7}	V _{P8}		
		0.524	0.842	0.357	0.864	0.548	0.254	0.391	0.371	0.561	0.455	0.985	0.512	0.675	0.125	0.845	0.341	0.554	0.265	0.487

شکل ۶. فرآیند عملگر تقاطع

Offspring 1						Offspring 2					
N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P1}	V _{P3}	V _{P5}	N ₁	V _{S1}	V _{S2}	V _{P2}	V _{P4}	V _{P6}
	0.682	0.571	0.671	0.574	0.654		0.524	0.842	0.357	0.864	0.548
N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P4}	V _{P7}	V _{P9}	N ₂	V _{S1}	V _{S2}	V _{P5}	V _{P9}	V _{P1}
	0.726	0.954	0.386	0.571	0.435		0.254	0.391	0.371	0.561	0.455
N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P6}	V _{P2}	V _{P8}	N ₃	V _{S1}	V _{S2}	V _{P3}	V _{P7}	V _{P8}
	0.985	0.512	0.675	0.487	0.514		0.341	0.554	0.265	0.125	0.845
	N ₁	N ₂	N ₃				N ₁	N ₂	N ₃		
	2	1	3				3	2	1		

شکل ۷. جواب‌های (فرزندان) جدید به‌دست‌آمده از عملگر تقاطع

معیارهای مقایسه کارایی روش‌های چندهدفه. در این پژوهش برای مقایسه کارایی روش‌های حل و مقایسه نتایج مربوط به مجموعه جواب‌های پارتو تقریبی به‌دست‌آمده از آن‌ها از چهار شاخص عملکردی متفاوت بهره گرفته شده است. این شاخص‌ها عبارت‌اند از: تعداد اعضای جبهه پارتو^۱ (NOS)؛ متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل^۲ (MID)؛ شاخص پراکندگی^۳؛ شاخص یکنواختی فضا^۴. در ادامه شرح این معیارهای عملکردی بیان شده است.

1. Number of Pareto Solutions (NOS)
2. Mean Ideal Distance (MID)
3. Diversity
4. Spacing

شاخص تعداد اعضای جبهه پارتو. شاخص NOS، تعداد اعضای مربوط به جبهه اول مجموعه جواب‌های پارتو به دست آمده از روش‌های حل چندهدفه را مقایسه می‌کند [۳۵].

شاخص پراکندگی. شاخص پراکندگی، دامنه توزیع جواب‌های آرشیو پارتو را اندازه می‌گیرد و پراکندگی جواب‌های به دست آمده را به عنوان یک معیار تعیین میزان تنوع‌گرایی محاسبه می‌کند [۳۵، ۳۶]. شاخص پراکندگی با استفاده از رابطه ۳۰، محاسبه می‌شود.

$$\text{Diversity} = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\max_{i=1}^{NOS} f_m^i - \min_{i=1}^{NOS} f_m^i)^2} \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

شاخص یکنواختی فضا. شاخص یکنواختی فضا که یک شاخص مبتنی بر پراکندگی است، ابتدا توسط اسکات^۱ (۱۹۹۵) توسعه داده شد [۳۰]. این شاخص یکنواختی توزیع جواب‌های پارتو را در فضای حل نشان می‌دهد [۳۳، ۳۵]. مقدار این شاخص به صورت رابطه ۳۱، محاسبه می‌شود:

$$\text{Spacing} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NOS} (d_i - \bar{d})^2}{NOS-1}} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

d_i برابر با کمینه مجموع فاصله اهداف نقطه پارتو \bar{d} از هر یک از نقاط پارتو مجاور و \bar{d} میانگین مقادیر d_i است. هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، نشان‌دهنده فاصله کمتر جواب‌های مجموعه پارتو از یکدیگر و یکنواختی بیشتر جواب‌ها است.

شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل. شاخص MID به طرز گسترده‌ای در پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر به کار رفته است [۲۹، ۳۶]. با استفاده از شاخص MID، فاصله نزدیکی بین جواب‌های پارتو و نقطه ایده‌آل آن جواب‌ها محاسبه می‌شود. نحوه محاسبه این شاخص در رابطه ۳۲، ارائه شده است:

$$\text{MID} = \frac{\sum_{i=1}^{NOS} C_i}{NOS} \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

هرچه مقدار شاخص MID به عنوان یک معیار ارزیابی کیفی الگوریتم، کمتر باشد، الگوریتم به دلیل تولید جواب‌هایی با متوسط فاصله کمتر از نقطه ایده‌آل، کارایی و کیفیت جواب بالاتری دارد. در این رابطه، C_i فاصله توابع هدف نقطه پارتو \bar{d} از توابع هدف نقطه ایده‌آل است که در این پژوهش با توجه به وجود دو تابع هدف کمینه‌سازی، توابع هدف دوگانه نقطه ایده‌آل

برابر با مختصات (۰،۰) در نظر گرفته شده است. شکل کامل محاسبه این شاخص برای یک مسئله دو هدفه در قالب رابطه ۳۳، بیان می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{NOS} \sqrt{(f_1^i)^2 + (f_2^i)^2}}{NOS} \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

در این پژوهش برای نرمال‌سازی نتایج MID حاصل از روش‌های به‌کاررفته از شاخص درصد انحراف نسبی^۱ (RPD) به‌صورت رابطه ۳۴، استفاده شده است:

$$RPD = \frac{alg(MID) - Best(MID)}{Best(MID)} \times 100\% \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

در رابطه بالا $alg(MID)$ MID حاصل از روش موردنظر و $Best(MID)$ بهترین MID به‌دست‌آمده از میان روش‌های موجود برای مسئله مورد مطالعه است. درحقیقت با استفاده از شاخص RPD میزان انحراف نتایج MID روش‌های به‌کارگرفته‌شده نسبت به بهترین جواب موجود اندازه‌گیری می‌شود [۲۲].

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش نتایج اجرای روش‌های حل ارائه‌شده از طریق چهار شاخص عملکردی بر روی نمونه مسائل تصادفی ایجادشده بررسی و ارزیابی شده است. به‌منظور انجام محاسبات عددی و تحلیل نتایج تعداد ۳۵ مسئله در ابعاد کوچک (۱۰ مسئله)، متوسط (۱۰ مسئله) و بزرگ (۱۵ مسئله) ایجاد و طراحی شده است که ویژگی‌های این مسائل در جدول ۲، مشاهده می‌شود. در تمام مسائل، تعداد بیماران از پرستاران بیشتر بوده است. در نماد مسئله به‌ترتیب از چپ به راست، تعداد نقاط شروع (مراکز درمانی آغازین)، تعداد پرستاران، تعداد وسیله نقلیه خصوصی و تعداد بیماران نشان داده می‌شود. واضح است که از تفاضل تعداد پرستاران معادل با تعداد وسایل نقلیه لازم (به ازای هر پرستار یک وسیله نقلیه لازم است) و تعداد وسایل حمل‌ونقل خصوصی، تعداد پرستارانی که باید از وسیله حمل‌ونقل عمومی استفاده کنند، مشخص می‌شود. مسائل اندازه کوچک در قالب مدل ریاضی ارائه‌شده تنظیم شده و در نرم‌افزار گمز کدنویسی و حل شده است؛ همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOPSO توسعه‌داده‌شده بر روی نرم‌افزار MATLAB R2014a برای تمامی اندازه‌های مسائل کدنویسی شده است. گدهای موردنظر روی یک رایانه با حافظه داخلی ۴ گیگابایت و پردازنده مرکزی Core i3 اجرا شده است. با توجه به آزمون و بررسی مقادیر مختلف برای پارامترهای الگوریتم‌ها، حل مسائل و محاسبه نتایج،

1. Relative percentage deviation (RPD)

پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی تنظیم شد. مقادیر پارامترهای تنظیم‌شده برای الگوریتم‌های MOPSO و NSGA-II در جدول ۳، مشاهده می‌شود. در الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده، شرط توقف، رسیدن به زمان محاسباتی خاصی در نظر گرفته شده است. این زمان محاسباتی به صورت تجربی پس از چندین بار اجرای الگوریتم‌ها در ابعاد مختلف مسئله و تحلیل مراحل همگرایی آن‌ها به دست آمد. در این پژوهش شرط توقف الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد کوچک ۲۰۰ ثانیه، ابعاد متوسط ۴۰۰ ثانیه و برای مسائل با ابعاد بزرگ ۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

ابتدا نتایج مسائل اندازه کوچک، یعنی مسائل شماره ۱ تا ۱۰، بررسی شد. با توجه به ارائه مسئله دوهدفه و تضاد اهداف، مسائل اندازه کوچک توسط نرم‌افزار گمز در قالب روش محدودیت افسیلون^۱ حل شد که در این روش یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شود و مسئله چندهدفه به یک مسئله یک هدفه تبدیل می‌گردد. سایر توابع هدف به محدودیت با یک حد بالای ϵ تبدیل می‌شوند. فرمت کلی این روش به صورت معادله ۳۵، است:

$$\begin{aligned} & \min Z_h(X) \\ & \text{Subject to:} \\ & Z_j(X) \leq \epsilon_j; \quad j = 1, 2, \dots, h-1, h+1, \dots, k \\ & X \in S \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

در این روش برای پیدا کردن هرچه بیشتر جواب‌های پارتو باید مقادیر ϵ ها را برای توابع هدف موجود در محدودیت‌ها تغییر داده و مسئله را دوباره حل کرد؛ همچنین در ادامه هر ۱۰ مسئله اندازه کوچک توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO بهینه‌سازی شدند. نتایج حاصل از روش محدودیت افسیلون و الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسائل اندازه کوچک با توجه به چهار شاخص عملکرد MID، پراکندگی، یکنواختی و NOS در جدول ۴، ارائه شده است. به دلیل خاصیت تصادفی بودن الگوریتم‌های فراابتکاری، هر نمونه مسئله ۳ بار توسط الگوریتم‌ها اجرا شده و مقدار متوسط شاخص‌ها برای الگوریتم و مسئله مورد نظر در جدول ۴، ارائه شده است. با توجه به میانگین نتایج شاخص‌ها در مسائل اندازه کوچک، بهترین نتیجه در معیار عملکرد MID توسط روش محدودیت افسیلون، بیشترین پراکندگی توسط الگوریتم NSGA-II، بهترین یکنواختی توسط روش محدودیت افسیلون و بالاترین تعداد NOS توسط الگوریتم NSGA-II به دست آمده است. همان‌طور که گفته شد، روش محدودیت افسیلون تنها می‌تواند در مسائل با ابعاد کوچک در زمان منطقی به یک پارتوی بهینه تقریبی برسد و در ابعاد متوسط و بزرگ مسئله با توجه به NP-hard بودن آن، کارایی خود را با توجه به زمان محاسباتی از دست می‌دهد؛

1. ϵ -Constraint

در نتیجه این روش برای حل مسائل متوسط و بزرگ مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد و از نتایج آن فقط برای اعتبارسنجی مدل و صحت کارایی الگوریتم‌ها در بخش حل مسائل کوچک استفاده می‌شود.

در ادامه، نتایج دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOPSO در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، یعنی مسئله شماره ۱۱ تا ۳۵، با در نظر گرفتن شاخص‌های چهارگانه ذکر شده، در جدول ۵، نشان داده شده است. نتایج ارائه شده برای الگوریتم‌های فراابتکاری حاصل میانگین نتایج ۳ بار اجرای هر نمونه مسئله توسط الگوریتم مورد نظر است. با توجه به میانگین نتایج شاخص‌ها در مسائل اندازه متوسط و بزرگ، بهترین نتیجه در شاخص MID توسط روش NSGA-II، بیشترین پراکندگی توسط الگوریتم NSGA-II، بهترین یکنواختی فضا توسط الگوریتم NSGA-II و بالاترین تعداد NOS توسط الگوریتم NSGA-II به دست آمده است.

جدول ۲. مشخصات مسائل نمونه ایجاد شده در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ

شماره مسئله	تعداد بیماران	تعداد وسایل نقلیه		تعداد مراکز درمانی آغازین	نماد مسئله
		عمومی	خصوصی		
P _۱	۵	۱	۱	۱	۱/۲/۱/۵
P _۲	۵	۱	۱	۲	۲/۲/۱/۵
P _۳	۶	۱	۱	۱	۱/۲/۱/۶
P _۴	۶	۱	۱	۲	۲/۲/۱/۶
P _۵	۷	۱	۱	۱	۱/۲/۱/۷
P _۶	۷	۱	۱	۲	۲/۲/۱/۷
P _۷	۸	۱	۱	۱	۱/۲/۱/۸
P _۸	۸	۱	۱	۲	۲/۲/۱/۸
P _۹	۱۰	۱	۱	۱	۱/۲/۱/۱۰
P _{۱۰}	۱۰	۱	۱	۲	۲/۲/۱/۱۰
P _{۱۱}	۱۲	۲	۱	۲	۲/۳/۱/۱۲
P _{۱۲}	۱۲	۱	۲	۲	۲/۳/۲/۱۲
P _{۱۳}	۱۴	۲	۱	۳	۲/۳/۱/۱۴
P _{۱۴}	۱۴	۱	۲	۳	۲/۳/۲/۱۴
P _{۱۵}	۱۶	۳	۱	۳	۳/۴/۱/۱۶
P _{۱۶}	۱۶	۲	۲	۳	۳/۴/۲/۱۶
P _{۱۷}	۲۰	۳	۱	۳	۳/۴/۱/۲۰
P _{۱۸}	۲۰	۲	۲	۳	۳/۴/۲/۲۰
P _{۱۹}	۲۴	۵	۱	۳	۳/۶/۱/۲۴
P _{۲۰}	۲۴	۴	۲	۳	۳/۶/۲/۲۴
P _{۲۱}	۲۸	۳	۳	۳	۳/۶/۳/۲۸
P _{۲۲}	۲۸	۲	۴	۴	۴/۶/۴/۲۸
P _{۲۳}	۳۴	۵	۱	۴	۴/۶/۱/۳۴
P _{۲۴}	۳۴	۴	۲	۴	۴/۶/۲/۳۴
P _{۲۵}	۴۰	۵	۳	۴	۴/۸/۳/۴۰
P _{۲۶}	۴۰	۴	۴	۴	۴/۸/۴/۴۰
P _{۲۷}	۴۶	۵	۳	۴	۴/۸/۳/۴۶
P _{۲۸}	۴۶	۴	۴	۴	۴/۸/۴/۴۶

شماره مسئله	تعداد بیماران	تعداد وسایل نقلیه		تعداد مراکز درمانی آغازین	نماد مسئله
		عمومی	خصوصی		
P _{۲۹}	۵۴	۵	۵	۴	۴/۱۰/۵/۵۴
P _{۳۰}	۵۴	۴	۶	۵	۵/۱۰/۶/۵۴
P _{۳۱}	۶۲	۵	۵	۵	۵/۱۰/۵/۶۲
P _{۳۲}	۶۲	۴	۶	۵	۵/۱۰/۶/۶۲
P _{۳۳}	۷۰	۷	۳	۵	۵/۱۰/۳/۷۰
P _{۳۴}	۷۰	۴	۶	۵	۵/۱۰/۶/۷۰
P _{۳۵}	۷۸	۵	۷	۵	۵/۱۲/۷/۷۸

جدول ۳. سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO

پارامتر	اندازه مسئله		
	کوچک	متوسط	بزرگ
سایز جمعیت (N)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
درصد عملگر جهش (Pm)	۰/۳	۰/۵	۰/۶
درصد عملگر تقاطع (Pc)	۰/۷	۰/۵	۰/۴

جدول ۴. نتایج محاسباتی مسائل اندازه کوچک از نظر شاخص‌های عملکردی

شماره مسئله	نماد مسئله	الگوریتم NSGA-II				الگوریتم MOPSO				E-Constraint		
		Diversity	SP	MID	NOS	Diversity	SP	MID	NOS	Diversity	SP	
P _۱	۱/۲/۱/۵	۴۶/۸۵	۹۷/۴۶	۰/۱۹	۵/۶۷	۴۶/۸۵	۸۸/۴۸	۱۰/۸۱	۳/۰۰	۳۷۲/۴۰	۶/۸۵	۶/۰۹
P _۲	۲/۲/۱/۵	۲۰۳/۷۹	۲۴/۴۱	۰/۰۰	۵/۳۳	۲۵/۹۳	۱۶۳/۶۰	۵/۴۹	۵/۰۰	۴۰۶/۰۸	۱۲۶/۶۳	۵/۲۲
P _۳	۱/۲/۱/۶	۳۱۰/۴۱	۴۵/۶۹	۵/۵۵	۵/۶۷	۲۵۳/۹۹	۵۲/۱۹	۱/۶۱	۳/۰۰	۳۱۵/۵۵	۱۲/۴۸	۴/۵۸
P _۴	۲/۲/۱/۶	۵۷۳/۱۴	۱۱۴/۶۴	۷/۹۴	۵/۶۷	۵۱۲/۴۶	۱۱۱/۲۱	۹/۰۳	۵/۰۰	۶۰/۳۸	۱۰/۱۶	۳/۵۹
P _۵	۱/۲/۱/۷	۶۲۴/۸۳	۸۶/۱۳	۸۶/۱۳	۷/۵۰	۳۳۵/۴۱	۲۶/۴۸	۰/۷۰	۵/۰۰	۳۰۷/۶۱	۱۳/۷۲	۴/۷۷
P _۶	۲/۲/۱/۷	۴۳۱/۱۹	۱۹/۲۵	۱۹/۲۵	۱۰/۶۷	۴۰۸/۳۳	۳۴/۰۸	۳/۳۹	۳/۰۰	۱۵۵/۱۴	۵۶/۴۳	۱/۴۳

E-Constraint				الگوریتم MOPSO				الگوریتم NSGA-II				نماد مسئله	شماره مسئله
MID	SP	Diversity	NOS	MID	SP	Diversity	NOS	MID	SP	Diversity	NOS		
۰/۰۰	۳۱/۸۰	۱۹۱/۸۰	۶/۰۰	۹/۳۷	۲۵/۴۲	۲۵۹/۱۰	۹/۳۳	۶/۴۱	۷۰/۴۲	۴۵۳/۳۴	۱۱/۳۳	۱/۲/۱/۸	P _۷
۰/۰۰	۶/۱۰	۱۰۷/۶۶	۴/۰۰	۳۷/۵۶	۱۱۲/۰۲	۵۴۸/۶۱	۶/۰۰	۱۱/۹۰	۶۴/۰۴	۲۶۲/۹۹	۱۰/۶۷	۳/۲/۱/۸	P _۸
۰/۰۰	۳۷/۹۰	۷۷/۶۲	۴/۰۰	۳۴/۳۳	۴۰/۸۹	۳۰۳/۰۸	۶/۶۷	۲۲/۰۷	۴۱/۳۰	۴۲۹/۵۶	۸/۰۰	۱/۲/۰/۱/۱۰	P _۹
۳/۰۶	۳۴/۸۰	۱۰۶/۴۵	۶/۰۰	۳۳/۹۱	۱۷۴/۴۲	۷۳۴/۷۴	۵/۰۰	۶/۳۰	۶۸/۳۲	۶۹/۰۰	۱۱/۰۰	۲/۲/۱/۱۰	P _{۱۰}
۲/۸۷	۵۵/۳۹	۳۱۰/۰۷	۴/۴۰	۱۳/۵۸	۶۸/۱۱	۳۸۷/۰۲	۶/۷۰	۶/۸۳	۶۳/۱۵	۴۶۳/۰۰	۸/۹۰		میانگین

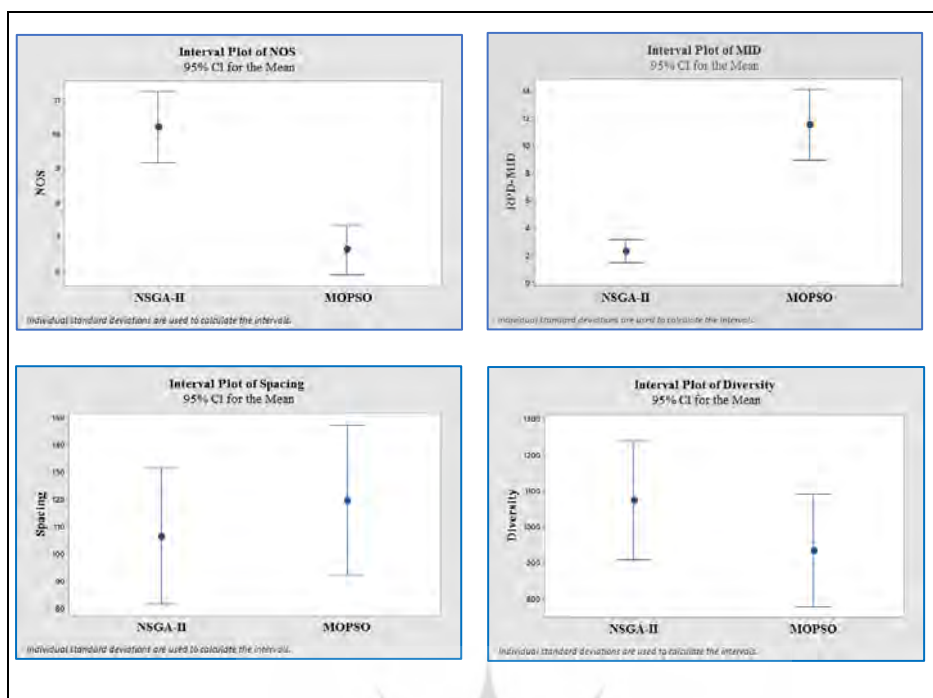
به منظور تحلیل آماری نتایج الگوریتم‌ها از نرم‌افزار Minitab 19 استفاده شده است. مقایسه آماری نتایج دو الگوریتم با استفاده از آزمون T-student و با توجه به چهار شاخص موردنظر در جدول ۶ مشاهده می‌شود؛ همچنین نمودار های فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای نتایج شاخص‌های مربوط به حل مسائل ابعاد متوسط و بزرگ در شکل ۸، قابل مشاهده است. بنا بر مقایسات آماری انجام شده و در نظر گرفتن $\alpha = 0.05$ ، الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری از خود نسبت به الگوریتم MOPSO از نظر دو شاخص MID و NOS نشان داده است؛ اما در ابعاد متوسط و بزرگ نتایج شاخص‌های پراکندگی و یکنواختی برای دو الگوریتم تفاوت معناداری نشان نمی‌دهد. روند نتایج اجرای دو الگوریتم با توجه به ۲۵ مسئله بهینه‌سازی شده در ابعاد متوسط و بزرگ در شکل ۹، نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج محاسباتی مسائل اندازه متوسط و بزرگ از نظر شاخص‌های عملکردی

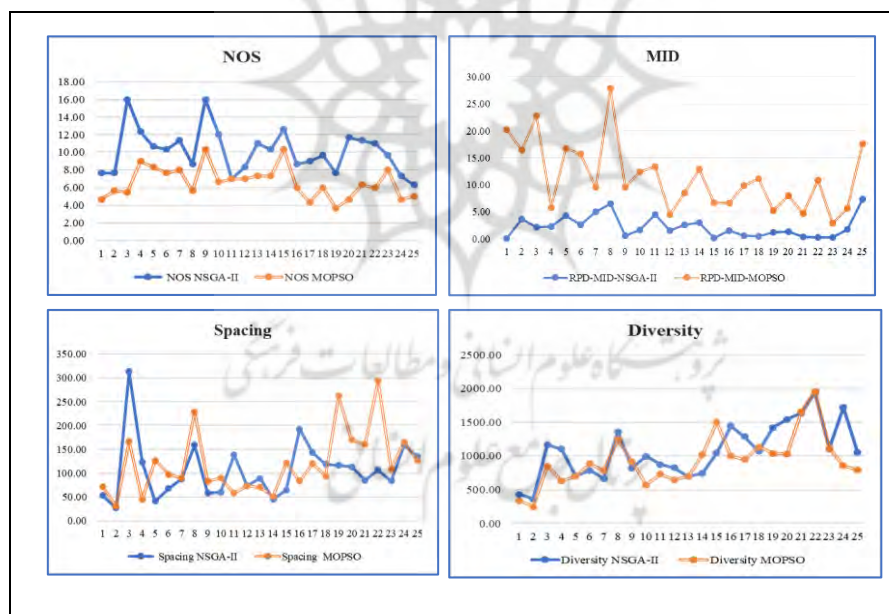
شماره مسئله	نماد مسئله	MID MOPSO	Spacing MOPSO	Diversity MOPSO	NOS MOPSO	MID NSGA-II	Spacing NSGA-II	Diversity NSGA-II	NOS NSGA-II
P ₁₁	۲/۳/۱/۱۲	۲۰/۲۰	۷۲/۲۹	۳۳۶/۴۹	۴/۶۷	۰/۰۷	۵۳/۱۸	۴۲۹/۲۹	۷/۶۷
P ₁₂	۲/۳/۲/۱۲	۱۶/۴۷	۲۹/۸۴	۲۵۰/۵۸	۵/۶۷	۳/۶۷	۲۶/۴۰	۳۶۱/۲۳	۷/۶۷
P ₁₃	۲/۳/۱/۱۴	۲۲/۸۲	۱۶۶/۶۱	۸۴۷/۴۳	۵/۵۰	۲/۱۸	۳۱۳/۲۷	۱۱۶۶/۴۶	۱۶/۰۰
P ₁₄	۲/۳/۲/۱۴	۵/۷۴	۴۴/۷۳	۶۲۹/۷۰	۹/۰۰	۲/۲۳	۱۲۳/۳۰	۱۱۰۵/۱۴	۱۲/۳۳
P ₁₅	۳/۴/۱/۱۶	۱۶/۸۱	۱۲۶/۸۰	۶۹۵/۴۹	۸/۳۳	۴/۲۸	۴۰/۹۹	۷۰۴/۰۷	۱۰/۶۷
P ₁₆	۳/۴/۲/۱۶	۱۵/۶۶	۹۷/۴۴	۸۸۸/۹۱	۷/۶۷	۲/۶۳	۶۷/۵۸	۷۸۷/۲۲	۱۰/۳۳
P ₁₇	۳/۴/۱/۲۰	۹/۶۰	۸۹/۷۰	۷۸۰/۹۵	۸/۰۰	۴/۹۸	۸۷/۸۶	۶۶۶/۹۹	۱۱/۳۳
P ₁₈	۳/۴/۲/۲۰	۳۷/۹۷	۲۲۸/۶۸	۱۲۴۲/۱۳	۵/۶۷	۶/۵۰	۱۵۸/۷۸	۱۳۶۱/۶۷	۸/۶۷
P ₁₉	۳/۶/۱/۲۴	۹/۶۱	۸۳/۱۵	۹۱۷/۹۰	۱۰/۳۳	۰/۶۲	۵۸/۲۱	۸۲۱/۰۲	۱۶/۰۰
P ₂₀	۳/۶/۲/۲۴	۱۲/۴۴	۸۹/۶۵	۵۶۸/۱۳	۶/۶۷	۱/۷۰	۵۹/۶۱	۹۹۵/۱۷	۱۲/۰۰
P ₂₁	۳/۶/۳/۲۸	۱۳/۴۱	۵۸/۰۴	۷۲۹/۸۲	۷/۰۰	۴/۵۵	۱۳۸/۲۹	۸۷۲/۱۰	۷/۰۰
P ₂₂	۴/۶/۴/۲۸	۴/۵۲	۷۳/۴۸	۶۴۹/۹۶	۷/۰۰	۱/۵۱	۷۴/۰۶	۸۲۶/۳۶	۸/۳۳
P ₂₃	۴/۶/۱/۳۴	۸/۵۵	۷۰/۰۸	۶۹۷/۸۲	۷/۳۳	۲/۶۱	۸۹/۲۵	۶۹۴/۴۳	۱۱/۰۰
P ₂₄	۴/۶/۲/۳۴	۱۲/۸۹	۵۱/۶۶	۱۰۱۵/۷۹	۷/۳۳	۳/۰۴	۴۵/۳۰	۷۴۴/۹۲	۱۰/۳۳
P ₂₅	۴/۸/۳/۴۰	۶/۷۵	۱۲۱/۳۲	۱۵۰۳/۰۱	۱۰/۳۳	۰/۱۴	۶۴/۲۹	۱۰۴۴/۰۸	۱۲/۶۷
P ₂₆	۴/۸/۴/۴۰	۶/۶۳	۸۳/۴۳	۹۹۸/۲۶	۶/۰۰	۱/۵۹	۱۹۲/۳۶	۱۴۴۰/۹۱	۸/۶۷
P ₂₇	۴/۸/۳/۴۶	۹/۹۰	۱۲۰/۱۶	۹۴۶/۱۰	۴/۳۳	۰/۵۵	۱۴۳/۳۶	۱۲۸۴/۱۹	۹/۰۰
P ₂₈	۴/۸/۴/۴۶	۱۱/۱۵	۹۳/۸۴	۱۱۳۴/۱۷	۶/۰۰	۰/۴۵	۱۱۸/۶۱	۱۰۶۷/۳۷	۹/۶۷
P ₂₉	۴/۱۰/۵/۵۴	۵/۲۱	۲۶۲/۵۱	۱۰۳۸/۱۳	۳/۶۷	۱/۲۴	۱۱۶/۱۹	۱۴۲۰/۱۰	۷/۶۷
P ₃₀	۵/۱۰/۶/۵۴	۸/۰۱	۱۶۹/۸۷	۱۰۲۹/۰۳	۴/۶۷	۱/۳۸	۱۱۳/۳۷	۱۵۴۲/۶۳	۱۱/۶۷
P ₃₁	۵/۱۰/۵/۶۲	۴/۶۷	۱۶۱/۰۰	۱۶۵۳/۴۵	۶/۳۳	۰/۴۰	۸۵/۲۶	۱۶۳۹/۸۵	۱۱/۳۳
P ₃₂	۵/۱۰/۶/۶۲	۱۰/۸۷	۲۹۳/۸۶	۱۹۶۱/۴۸	۶/۰۰	۰/۲۶	۱۰۶/۷۵	۱۹۳۲/۲۲	۱۱/۰۰
P ₃₃	۵/۱۰/۳/۷۰	۲/۸۸	۱۰۸/۲۱	۱۱۱۷/۷۵	۸/۰۰	۰/۲۵	۸۳/۳۰	۱۱۰۹/۲۶	۹/۶۷
P ₃₄	۵/۱۰/۶/۷۰	۵/۶۴	۱۶۵/۷۷	۸۵۵/۵۸	۴/۶۷	۱/۷۲	۱۵۹/۱۵	۱۷۲۰/۱۴	۷/۳۳
P ₃₅	۵/۱۲/۷/۷۸	۱۷/۶۶	۱۲۶/۷۶	۷۹۱/۴۴	۵/۰۰	۷/۳۸	۱۳۵/۰۰	۱۰۵۲/۶۳	۶/۳۳
میانگین		۱۱/۴۴	۱۱۹/۵۶	۹۳۱/۱۸	۶/۶۱	۲/۲۴	۱۰۶/۱۵	۱۰۷۱/۶۰	۱۰/۱۷

جدول ۶. مقایسات آماری با استفاده از آزمون T-student در مسائل اندازه متوسط و بزرگ

تفاوت معنادار	نتیجه	P-value	شاخص	الگوریتم
✓	رد فرض H ₀	۰/۰۰۰	MID	NSGA-II VS MOPSO
×	پذیرش فرض H ₀	۰/۴۵۹	Spacing	NSGA-II VS MOPSO
×	پذیرش فرض H ₀	۰/۲۰۸	Diversity	NSGA-II VS MOPSO
✓	رد فرض H ₀	۰/۰۰۰	NOS	NSGA-II VS MOPSO



شکل ۸: نمودار فاصله اطمینان ۹۵ درصد نتایج NSGA-II و MOPSO در مسائل اندازه متوسط و بزرگ



شکل ۹: مقایسه نتایج شاخص‌های الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در مسائل اندازه متوسط و بزرگ

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، یک مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی مراقبت سلامت خانگی با اهداف دوگانه حداقل‌سازی هزینه‌های سفر پرستاران و حداقل‌سازی حداکثر تفاوت‌های زمان کاری بین پرستاران ارائه شد. در نظر گرفتن چندین نقطه شروع، حالت‌های دوگانه حمل‌ونقل عمومی و خصوصی، پنجره زمانی بیمار و پرستار از ویژگی‌های مهم مسئله مورد مطالعه است. بخش‌های مختلف مسئله مسیریابی و زمان‌بندی ارائه شده شامل زیر مسائل تخصیص پرستاران به بیماران، انتخاب نقاط شروع حرکت پرستاران، توالی ویزیت بیماران توسط پرستاران و تعیین حالت حمل‌ونقل حرکت پرستاران بود. با توجه به اینکه توابع هدف هزینه و توازن زمان کاری پرستاران دارای تضاد هستند، برای دستیابی به یک مجموعه جواب کارا و مجموعه پارتو تقریبی مناسب از روش‌های مبتنی بر رویکرد پارتو شامل روش محدودیت افسیلون و دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II برای حل مسائل استفاده شد. برای مقایسه عملکرد روش‌های ارائه شده، چهار شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل، شاخص یکنواختی فضا، شاخص پراکندگی و تعداد اعضا جبهه پارتو به کار رفت. با توجه به میانگین نتایج شاخص‌ها در مسائل اندازه کوچک، مسائل شماره ۱ تا ۱۰، بهترین نتیجه در شاخص عملکرد MID توسط روش محدودیت افسیلون، بیشترین پراکندگی توسط الگوریتم NSGA-II، بیشترین یکنواختی فضا توسط الگوریتم MOPSO و بالاترین تعداد NOS توسط الگوریتم NSGA-II به دست آمد. در ادامه با ازدست‌دادن کارایی روش محدودیت افسیلون در حل مسائل ابعاد متوسط و بزرگ در یک زمان منطقی، مسائل شماره ۱۱ تا ۳۵ تنها توسط دو الگوریتم فراابتکاری حل شدند. نتایج آماری حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم NSGA-II در دو شاخص MID و NOS نسبت به الگوریتم MOPSO بود؛ اما در معیارهای عملکردی شاخص یکنواختی فضا و پراکندگی تفاوت معنادار آماری بین عملکرد الگوریتم‌ها در مسائل ابعاد متوسط و بزرگ مشاهده نشد. نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II دارای عملکردی کارا و اثربخش در حل مسائل HHCRSP با اندازه‌های مختلف کوچک، متوسط و بزرگ است.

هدف اصلی از انجام این پژوهش، دستیابی به یک مدل ریاضی دوهدفه کارا برای مسئله زمان‌بندی و مسیریابی مراقبت سلامت خانگی با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی و اجتماعی کسب‌وکار شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات پرستاری بود؛ همچنین شناسایی روش‌های حل که با استفاده از آن‌ها بتوان مجموعه جواب‌های پارتو مناسبی را با توجه به حالت چندهدفه مسئله به دست آورد، از دیگر اهداف مهم این پژوهش به شمار می‌رود. با توجه به خروجی پژوهش و دستیابی به مدل و روش‌های حل شرح داده شده در مقاله، می‌توان خروجی این پژوهش را در مسائل دنیای واقعی مراقبت سلامت خانگی به کار گرفت؛ در نتیجه می‌توان از به‌کارگیری نتایج این پژوهش به صورت عملی انتظارات زیر را در نظر داشت:

- افزایش بهره‌وری اقتصادی مراکز ارائه‌دهنده خدمات مراقبت خانگی با توجه به کاهش هزینه‌ها؛

- جلوگیری از تخصیص بار کاری غیرمتعارف به پرستاران و توجه به تعادل بار کاری کارکنان که در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت به بهره‌وری بالاتر و همچنین عدم فرسودگی و از کارافتادگی پرستاران منجر خواهد شد؛

- پاسخگویی مناسب به تقاضای مردم در زمان مناسب در خصوص مراقبت‌های پرستاری در منزل؛

- افزایش بهره‌وری و کاهش بار بستری بیمارستان‌ها در صورت توجه کافی به مبحث مراقبت درمان خانگی.

به‌منظور توسعه پژوهش‌ها در آینده، پیشنهاد می‌شود عدم قطعیت در پارامترهای پژوهش در نظر گرفته شود. از پارامترهایی که می‌تواند موضوع عدم قطعیت در آن وارد شود، تعداد تقاضای بیماران و زمان انجام ویزیت بیمار توسط پرستاران است که می‌توانند به‌عنوان اعداد غیرقطعی و تصادفی در نظر گرفته شوند؛ همچنین توجه به جنبه زیست‌محیطی در مبحث توسعه پایدار در کنار اهداف اقتصادی و اجتماعی می‌تواند برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد شود.



منابع

1. Adelli, M., & Zandieh, M. (2013). Multiobjective Simulation-Optimization Approach for Integrated Sourcing and Inventory Decisions. *Journal of Industrial management perspective*, 3(3), 89-110. (In Persian)
2. Akjiratikar, C., Yenradee, P., & Drake, P. R. (2007). PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK. *Computers & Industrial Engineering*, 53(4), 559-583.
3. Akbari, M., Dorri Nokarani, B., & Zandieh, M. (2012). Scheduling Working Shifts for Multi-skilled Workforces with Genetic algorithm Approach. *Journal of Industrial Management Perspectives*, 2(3), 87-102 (In Persian).
4. Algethami, H., Landa-Silva, D., & Martínez-Gavara, A. (2017). Selecting Genetic Operators to Maximise Preference Satisfaction in a Workforce Scheduling and Routing Problem. In *ICORES*, 416-423.
5. Asghari, M., & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2019). A green delivery-pickup problem for home hemodialysis machines; sharing economy in distributing scarce resources. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 134, 101815.
6. Becker, C. A., Lorig, F., & Timm, I. J. (2018). Multiagent Systems to Support Planning and Scheduling in Home Health Care Management: A Literature Review. In *International Workshop on Artificial Intelligence in Health*, Springer, Cham, 13-28.
7. Begur, S. V., Miller, D. M., & Weaver, J. R. (1997). An integrated spatial DSS for scheduling and routing home-health-care nurses. *Interfaces*, 27(4), 35-48.
8. Braekers, K., Hartl, R. F., Parragh, S. N., & Tricoire, F. (2016). A bi-objective home care scheduling problem: Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 428-443.
9. Cappanera, P., & Scutellà, M. G. (2015). Joint assignment, scheduling, and routing models to home care optimization: A pattern-based approach. *Transportation Science*, 49(4), 830-852.
10. Coello, C. A. C., Pulido, G. T., & Lechuga, M. S. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 8(3), 256-279.
11. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
12. Decerle, J., Grunder, O., El Hassani, A. H., & Barakat, O. (2017). Impact analysis of workload balancing on the home health care routing and scheduling problem. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, IEEE, 0096 -0101.
13. Decerle, J., Grunder, O., El Hassani, A. H., & Barakat, O. (2019). A hybrid memetic-ant colony optimization algorithm for the home health care problem with time window, synchronization and working time balancing. *Swarm and Evolutionary Computation*, 46, 171-183.
14. Erdem, M., & Koç, Ç. (2019). Analysis of electric vehicles in home health care routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1471-1483.
15. Euch, J., Zidi, S., & Laouamer, L. (2020). A hybrid approach to solve the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits in-home health care. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(12), 10637-10652.

16. Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., Goodarzian, F., & Cheikhrouhou, N. (2020). A bi-objective home healthcare routing and scheduling problem considering patients' satisfactinn in a zzzzy evvinnment. *Applied soft computing*, 93, 106385.
17. Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). A bi-objective green home health care routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 200, 423-443.
18. Fernandez, A., Gregory, G., Hindle, A., & Lee, A. C. (1974). A model for community nursing in a rural county. *Journal of the Operational Research Society*, 25(2), 231-239.
19. Grenouilleau, F., Legrain, A., Lahrichi, N., & Rousseau, L. M. (2019). A set partitioning heuristic for the home health care routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 295-303.
20. Hiermann, G., Prandtstetter, M., Rendl, A., Puchinger, J., & Raidl, G. R. (2015). Metaheuristics for solving a multimodal home-healthcare scheduling problem. *Central European Journal of Operations Research*, 23(1), 89-113.
21. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks, IEEE*, 4, 1942-1948.
22. Khishtandar, S., Zandieh M., Dorri Nokarani, B., & Ranaei Siadat, S. O. (2016). Evolutionary Algorithms for Location Allocation Biomethane Supply Chain Problem. *The Journal of Industrial Management Perspectives*, 6(3), 29-54 (In Persian).
23. Li, Y., Xiang, T. & Szeto, W. Y. (2021). Home health care routing and scheduling problem with the consideration of outpatient services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102420.
24. Liu, W., Dridi, M., Fei, H., & El Hassani, A. H. (2021). Hybrid Metaheuristics for Solving a Home Health Care Routing and Scheduling Problem with Time Windows, Synchronized Visits and Lunch Breaks. *Expert Systems with Applications*, 115307.
25. Leff, B., Burton, L., Mader, S., Naughton, B., Burl, J., Clark, R., Greenough, W.B., Guido, S., Steinwachs, D., & Burton, J. R. (2006). Satisfaction with hospital at home care. *Journal of the American Geriatrics Society*; 54(9), 1355-1363
26. Rest, K. D., & Hirsch, P. (2016). Daily scheduling of home health care services using time-dependent public transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(3), 495-525.
27. Rest, K. D., Trautsamwieser, A. and Hirsch, P. (2012). Trends and risks in home health care. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 2(1), 34-53.
28. Reyes-Sierra, M., & Coello, C. C. (2006). Multi-objective particle swarm optimizers: A survey of the state-of-the-art. *International journal of computational intelligence research*, 2(3), 287-308.
29. Salehi, M., & Rezaei, H. (2019). A fuzzy multi-objective model for allocating orders to suppliers under shortfall and price-quantity discounts: An mpso and nsga-ii with tuned parameters. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 30(2), 225-239.

30. Schott, J. R. (1995). Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithms optimization. Master's thesis Department of Aeronautics and Astronautics, *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge*.
31. Tohidifard, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Navazi, F., & Partovi M. (2018). A Multi-Depot Home Care Routing Problem with Time Windows and Fuzzy Demands Solving by Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 358-363.
32. Trautsamwieser, A., & Hirsch, P. (2011). Optimization of daily scheduling for home health care services. *Journal of Applied Operational Research*, 3(3), 124-136.
33. Verma, A., & Kaushal, S. (2017). A hybrid multi-objective particle swarm optimization for scientific workflow scheduling. *Parallel Computing*, 62, 1-19.
34. Wirmitzer, J., Heckmann, I., Meyer, A. & Nickel, S. (2016). Patient-based nurse rostering in home care. *Operations Research for Health Care*, 8, 91-102.
35. Yazdani, M., M. Zandieh & Tavakkoli-Moghaddam, (R. 2019). Evolutionary algorithms for multi-objective dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem. *OPSEARCH*, 56(3), 983-1006.
36. Zitzler, E. (1999). Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications, *Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zuerich, Switzerland, Dissertation ETH No. 1339*.

