زمان‌بندی پرستاران و مسیریابی تک‌دپویی با پنجره‌های زمانی و جریمه‌های خدمات در مراقبت‌های بهداشتی در منزل (مدلسازی و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر)

مقاله علمی – پژوهشی

مهدیه شیخی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
*جواد بهنامیان (**نویسنده مسئول**)، استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
***پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Behnamian@basu.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
صفحه ۲۳۲-۲۱۵

چکیده

خدمات پرستاری و مراقبت در منزل بخشی رو به رشد در نظام‌های سلامت است که نیازمندی‌های جدید و دقیق‌تری را در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و عملیات ایجاد می‌کند. این مقاله به مسئله ترکیبی زمان‌بندی و مسیریابی می‌پردازد که در آن یک ارائه‌دهنده خدمات بهداشتی باید درمانگران خود را برای پاسخ به درخواست‌های روزانه بیماران به منازل آنها اعزام کند. هر درخواست دارای مدت‌زمان خدمت، پنجره زمانی نرم و جریمه‌های اولویت‌بندی روزانه است؛ همچنین هر بیمار ممکن است ترجیحاتی برای درمانگر خاص داشته باشد. از سوی دیگر، شیفت‌های کاری درمانگران دارای ظرفیت زمانی مشخص بوده و هر درمانگر تنها قادر به ویزیت بیمارانی است که با تخصص وی متناسب باشند. مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده است که محدودیت‌های زمانی، ظرفیتی، تخصصی و ترجیحی را یکپارچه می‌کند و تعادل‌های عملی میان کیفیت خدمت، بار کاری درمانگران و میزان سفر را روشن می‌سازد. برای تحلیل عملکرد مدل، آزمایش‌های عددی بر سناریوهای نماینده انجام شده و نشان می‌دهد که الگوهای تقاضا، سختی پنجره‌های زمانی و ساختار شیفت‌ها چگونه بر کارایی مسیرها و مجموع زمان سفر تأثیر می‌گذارند. نتایج حاکی از آن است که یکپارچه‌سازی تصمیم‌های زمان‌بندی و مسیریابی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی زمان سفر را کاهش داده و کارایی عملیاتی را بدون کاهش پوشش خدمات بهبود بخشد. افزون بر مدل ریاضی و حل دقیق نمونه‌های کوچک، برای نمونه‌های بزرگ‌تر یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر طراحی و پیاده‌سازی شده است که با بهره‌گیری از ساختارهای همسایگی متنوع و مکانیزم‌های جستجوی محلی، در زمان‌های عملیاتی پاسخ‌هایی با کیفیت بالا تولید می‌کند. مقایسه نتایج حل دقیق و خروجی‌های جستجوی همسایگی متغیر نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار عملی برای مراکز ارائه‌دهنده خدمات پرستاری در منزل مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌ها بینش‌های کاربردی برای برنامه‌ریزان حمل‌ونقل و مدیران خدمات بهداشتی فراهم می‌آورد و زمینه‌ساز پژوهش‌های آتی در زمینه‌های مرتبط مانند درخواست‌های پویا و تخصیص نیروی کار چندمهارتی است.

واژه‌های کلیدی: خدمات پرستاری در منزل، مسیریابی وسایل نقلیه، زمان‌بندی کارکنان، تخصیص منابع عملیاتی، جستجوی همسایگی متغیر، مدلسازی ریاضی

۱- مقدمه

خدمات پرستاری و مراقبت در منزل در سال‌های اخیر به‌سرعت گسترش یافته و اکنون به‌عنوان بخشی حیاتی از نظام‌های سلامت مطرح است. این خدمات امکان ارائه مراقبت‌های بالینی و حمایتی در محیط آشنای بیمار را فراهم می‌آورد، بار بستری در بیمارستان‌ها را کاهش می‌دهد و به بهبود کیفیت زندگی بیماران مزمن، سالمندان و افراد دارای نیازهای ویژه کمک می‌کند. در

عین حال، ماهیت توزیع‌شده و مبتنی بر جابه‌جایی این خدمات، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق در تخصیص نیروی انسانی، زمان‌بندی و مدیریت حمل‌ونقل است تا هم هزینه‌ها کنترل شود و هم کیفیت و تداوم مراقبت تضمین گردد. ویژگی‌های عملی ارائه خدمات در منزل—از جمله پراکندگی جغرافیایی بیماران، تغییرات روزانه در تقاضا، تفاوت در مدت زمان و نوع خدمات مورد نیاز، وجود پنجره‌های زمانی برای حضور در محل و محدودیت‌های شیفت کارکنان—مسئله را به یک چالش عملیاتی چندبعدی تبدیل می‌کند (یازیر و همکاران ۲۰۲۳). تصمیم‌گیری‌های مرتبط با تعیین ترتیب بازدیدها، زمان شروع ویزیت‌ها، تخصیص پرستاران با مهارت‌های مناسب و رعایت محدودیت‌های زمانی شیفت‌ها باید به‌صورت هم‌زمان و سازگار انجام شوند تا از تداخل‌ها، تأخیرها و افزایش هزینه‌های سفر جلوگیری شود. از منظر مدیریتی و اقتصادی، ناکارآمدی در زمان‌بندی و مسیریابی می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی داشته باشد (موریاتموکو و همکاران ۲۰۲۵): افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و استهلاک ناوگان، کاهش تعداد ویزیت‌های قابل انجام در هر شیفت، افزایش بار کاری و فرسودگی کارکنان، کاهش رضایت بیماران و در نهایت افت کیفیت مراقبت. علاوه بر این، تأخیر یا عدم حضور به‌موقع در ویزیت‌ها می‌تواند پیامدهای بالینی جدی برای بیماران آسیب‌پذیر به همراه داشته باشد که از منظر اخلاقی و حرفه‌ای نیز غیرقابل‌قبول است. از منظر سیاست‌گذاری شهری و زیست‌محیطی نیز بهینه‌سازی این عملیات می‌تواند به کاهش ترافیک و انتشار آلاینده‌ها کمک کند و بهره‌وری شبکه حمل‌ونقل محلی را افزایش دهد. از نظر محاسباتی، مسائل زمان‌بندی و مسیریابی در خدمات در منزل از پیچیدگی بالایی برخوردارند و بسیاری از آنها در زمره مسائل NP-hard قرار می‌گیرند؛ بنابراین یافتن جواب بهینه برای نمونه‌های بزرگ در زمان چندجمله‌ای عملاً غیرممکن است. این واقعیت ضرورت استفاده از مدل‌سازی دقیق برای تحلیل ساختاری و نیز ابزارهای محاسباتی مناسب برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری عملی را دوچندان می‌سازد. به‌ویژه، وجود پنجره‌های زمانی نرم، محدودیت‌های شیفت و تفاوت مهارت‌ها و ترجیحات بیمار–درمانگر، نیازمند مدلی است که بتواند این جنبه‌ها را به‌صورت یکپارچه و قابل‌تحلیل دربرگیرد (عرب زاده همکاران، ۲۰۲۳). در این پژوهش، مسئله ارائه خدمات پرستاری در منزل به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تک‌دپویی فرموله می‌شود. مدل پیشنهادی به‌طور هم‌زمان تصمیم‌های مربوط به ترتیب بازدیدها و زمان‌های شروع ویزیت‌ها، تخصیص درمانگران بر اساس مهارت و حضور شیفتی، و مدیریت پنجره‌های زمانی نرم را در بر می‌گیرد. تابع هدف مدل ترکیبی از کمینه‌سازی مجموع زمان سفرها، کاهش جریمه‌های ناشی از تعویق ویزیت به روزهای کم‌اولویت‌تر، جریمه زودکرد یا تأخیر نسبت به پنجره زمانی، و در نهایت لحاظ سود تطابق بیمار–درمانگر است. محدودیت‌های عملیاتی شامل ظرفیت زمانی شیفت درمانگران، قابلیت تخصصی هر درمانگر برای ویزیت بیماران، الزام پوشش درخواست‌ها و سازگاری زمانی بین بازدیدهای متوالی در نظر گرفته شده‌اند. این مقاله سهم علمی خود را در ارائه یک چارچوب ریاضی یکپارچه و دقیق برای مسئله ترکیبی زمان‌بندی و مسیریابی در خدمات پرستاری در منزل متمرکز می‌سازد. نوآوری‌های اصلی عبارت‌اند از: وارد کردن متغیرهای زودکرد و تأخیر برای مدل‌سازی پنجره‌های زمانی نرم، گنجاندن صریح محدودیت‌های ظرفیت زمانی شیفت‌ها و قابلیت تخصصی درمانگران، و ترکیب معیارهای عملیاتی و کیفیت خدمت در یک تابع هدف واحد. این ترکیب امکان تحلیل کمی و ارائه معیارهای مرجع با استفاده از حلگرهای دقیق برای نمونه‌های کوچک را فراهم می‌آورد و ابزار تحلیلی قابل اتکایی برای سنجش اثر ساختار تقاضا و محدودیت‌های شیفت بر کارایی عملیاتی ارائه می‌دهد. برای پوشش نیازهای عملیاتی مسائل با اندازه واقعی، علاوه بر حل دقیق نمونه‌های کوچک، در این پژوهش یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر طراحی و پیاده‌سازی شده است تا نمونه‌های بزرگ‌تر را در زمان‌های عملیاتی حل کند. نسخه پیشنهادی جستجوی همسایگی متغیر از چندین ساختار همسایگی متغیر، مکانیزم‌های جستجوی محلی برای بهبود سریع راه‌حل‌ها و استراتژی‌های بازآرایی مسیر بهره می‌برد تا تعادل مناسبی میان کیفیت راه‌حل و زمان اجرا برقرار سازد. اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: تدوین و تشریح مدل ریاضی جامع برای مسئله تک‌دپویی خدمات پرستاری در منزل، تحلیل ساختاری محدودیت‌ها و پیامدهای عملیاتی مدل، فراهم آوردن معیارهای مرجع از طریق حل دقیق نمونه‌های کوچک، و ارائه بینش‌های کاربردی برای مدیران و برنامه‌ریزان جهت بهبود تخصیص منابع و زمان‌بندی. انتظار می‌رود نتایج پژوهش بتواند مبنایی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در مراکز ارائه‌دهنده خدمات پرستاری در منزل فراهم کند.

۲- پیشینه تحقیق

تقسیم‌بندی مرور ادبیات به سه بخش به‌منظور روشن‌سازی نقش هر رویکرد و تسهیل مقایسه میان آنها انجام شده است. بخش نخست به فرمول‌بندی‌های ریاضی و روش‌های دقیق می‌پردازد تا پایه‌های نظری، کران‌های بهینه و قابلیت اثبات‌پذیری مدل‌ها را نشان دهد. بخش دوم متمرکز بر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری است تا راه‌حل‌های عملی، مقیاس‌پذیری و عملکرد در نمونه‌های واقعی و بزرگ بررسی شود. بخش سوم شامل مطالعات مروری و مفهومی است که چشم‌انداز کلی، شکاف‌های پژوهشی و جهت‌گیری‌های آینده را ترسیم می‌کند تا پیوند میان نظریه، الگوریتم و کاربردهای عملی به‌روشنی نمایان گردد.

مدل‌سازی ریاضی و الگوریتم‌های دقیق. در این دسته، پژوهش‌های متعددی تلاش کرده‌اند با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی، ترکیب زمان‌بندی و مسیریابی را در قالبی یکپارچه پوشش دهند. نصیر و کوئو (۲۰۲۰) چارچوبی برای پشتیبانی تصمیم معرفی کردند که همزمان زمان‌بندی کارکنان و مسیریابی وسایل نقلیه را در نظر می‌گرفت و الزامات هم‌زمانی میان ملاقات‌ها، چندین ملاقات بیماران در طول روز و تقدم و تأخر وظایف تحویل و دریافت را پوشش داد. این چارچوب علاوه بر ارائه فرمول‌بندی ریاضی، نشان داد چگونه اطلاعات عملیاتی مانند محدودیت‌های زمانی و وابستگی‌های ترتیبی می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری روزانه وارد شود و به مدیران کمک کند تا سناریوهای مختلف را مقایسه و انتخاب کنند. اولادزاد-عباس‌آبادی و همکاران (۲۰۲۳) مدلی دوهدفه ارائه کردند که پنجره‌های زمانی سخت بیماران و پنجره‌های زمانی نرم درمانگران را در نظر می‌گرفت و پنج نوع قید وابستگی زمانی نرم را تعریف نمود. این مطالعه با ارائه نمونه‌های عددی و تحلیل حساسیت نشان داد که تفکیک سخت و نرم بودن پنجره‌های زمانی چگونه بر تعارض‌های برنامه‌ریزی و رضایت ذی‌نفعان تأثیر می‌گذارد و راهکارهایی برای تنظیم وزن اهداف پیشنهاد کرد. پارِنیو-تورِس و همکاران (۲۰۲٤) به مسئله مراقبت‌های تسکینی پرداختند و یک مدل ریاضی یکپارچه با توجه به مهارت مراقبین، تداوم مراقبت و افق چنددوره‌ای طراحی کردند و نشان دادند که فرمول‌بندی متوازن بار کاری بهترین عملکرد را دارد. تحلیل‌های این پژوهش نشان داد که در شرایطی که بیماران خوشه‌ای هستند یا نیازهای تخصصی متفاوتی دارند، فرمول‌بندی متوازن می‌تواند از ایجاد بار کاری نامتوازن جلوگیری کند و کیفیت خدمات را در طول دوره برنامه‌ریزی حفظ نماید. رئولا و همکاران (۲۰۲۵) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط انعطاف‌پذیر معرفی کردند که قابلیت انطباق با گونه‌های خاص‌تر مسئله را دارد و توانست راه‌حل‌های بهینه بیشتری و کران‌های پایین قوی‌تری ارائه کند. این کار همچنین ابزارهایی برای تولید نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده فراهم آورد تا ارزیابی مقایسه‌ای فرمول‌بندی‌های مختلف در سناریوهای نزدیک به واقعیت ممکن شود و نشان داد کدام اجزاء مدل بیشترین تأثیر را بر کران‌ها و زمان حل دارند.

روش‌های ابتکاری و فراابتکاری. این دسته شامل پژوهش‌هایی است که برای حل مسائل پیچیده و بزرگ از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری بهره برده‌اند. بلهور و همکاران (۲۰۲۳) مدلی دوهدفه برای کاهش زمان خدمت‌رسانی و تأخیرها ارائه کردند و الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه را با خوشه‌بندی ترکیب کردند. این رویکرد ترکیبی امکان تولید مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌ها را فراهم ساخت تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند بین راه‌حل‌های با اولویت‌های متفاوت انتخاب کنند و نشان داد که خوشه‌بندی می‌تواند همگرایی الگوریتم‌های تکاملی را تسریع نماید. فتح‌الهی‌فرد و همکاران (۲۰۲۰) مدلی چنددوره‌ای و چندمخزنی در محیط فازی طراحی کردند و نسخه‌ای جدید از الگوریتم بهینه‌سازی با حافظه تطبیقی توسعه دادند. استفاده از چارچوب فازی در این مطالعه به محققان امکان داد تا عدم قطعیت‌های عملی مانند زمان سفر و رضایت بیماران را به‌صورت صریح وارد مدل کنند و الگوریتم پیشنهادی در نمونه‌های آزمایشی عملکرد مناسبی از خود نشان داد. دو و ژانگ (۲۰۲۲) مدلی با زمان‌های خدمت‌رسانی تصادفی ارائه کردند و از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ترکیبی و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده کردند. این ترکیب روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی به آن‌ها اجازه داد تا هزینه‌های ناشی از عدم قطعیت را برآورد کنند و راه‌حل‌هایی مقاوم در برابر تغییرات زمانی پیشنهاد دهند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) در جوامع پرجمعیت، ترجیحات اجتماعی و آشنایی‌های متقابل را وارد مدل کردند و از روش‌های یادگیری تقویتی و بهینه‌سازی کلونی مورچگان بهره بردند. این مطالعه نشان داد که در محیط‌های شهری متراکم، در نظر گرفتن جنبه‌های اجتماعی و ترجیحات محلی می‌تواند به کاهش زمان انتظار و افزایش رضایت منجر شود و روش‌های مبتنی بر یادگیری توانایی سازگاری با الگوهای پیچیده تقاضا را دارند.

حاج‌طایب و همکاران (۲۰۲۵) مدلی دوهدفه برای خودروهای برقی ارائه کردند که ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را همزمان در نظر گرفت. این پژوهش علاوه بر مدل‌سازی شارژ و مسیرهای بهینه، اثرات زیست‌محیطی و نارضایتی بیماران را نیز کمّی‌سازی کرد تا تصمیم‌گیری چندمعیاره در سطح عملیاتی ممکن شود. اردِم و همکاران (۲۰۲۲) مسئله‌ای با پنجره‌های زمانی و ایستگاه‌های شارژ سریع معرفی کردند و روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی توسعه دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند مسیرهای عملیاتی برای ناوگان برقی در مناطق پراکنده تولید کند و هزینه‌های کلی شامل انرژی شارژ و زمان سفر را کاهش دهد. رکابی و همکاران (۲۰۲٤) مدلی دوهدفه برای کاهش هزینه‌ها و اولویت‌بندی بیماران با روش‌های روش بهترین–بدترین و روش شباهت به راه‌حل ایده‌آل ارائه کردند. این مطالعه چارچوبی برای تعیین اولویت‌ها بر اساس معیارهای چندگانه فراهم آورد و نشان داد چگونه اولویت‌بندی می‌تواند تخصیص منابع را بهبود بخشد. حسینی و همکاران (۲۰۲٦) چارچوبی با قیود احتمالی برای تضمین رسیدن به‌موقع معرفی کردند و الگوریتم شاخه و بررسی را به کار گرفتند. این رویکرد احتمالی با استفاده از مجموعه‌ای از سناریوها احتمال تحقق زمان‌های ورود را برآورد می‌کرد و راه‌حل‌هایی قابل اعتماد برای محیط‌های نامطمئن ارائه نمود. لیو و همکاران (۲۰۲۱) علاوه بر پنجره‌های زمانی، محدودیت‌های عملی مانند همزمانی مراقبین و استراحت ناهار را در نظر گرفتند و چهار الگوریتم فراابتکاری ترکیبی توسعه دادند. تحلیل حساسیت در این پژوهش نشان داد که مقررات استراحت و سیاست‌های شروع کار می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ساختار مسیرها و بار کاری داشته باشد. گُو و بارد (۲۰۲۳) الگوریتم سه‌مرحله‌ای طراحی کردند که شامل خوشه‌بندی، حل مسئله فروشنده دوره‌گرد اصلاح‌شده و جستجوی محلی بود و توانست برنامه‌های هفتگی کارآمدتری نسبت به برنامه‌های واقعی ارائه دهد. این روش با ترکیب خوشه‌بندی برای تخصیص اولیه و بهینه‌سازی مسیر روزانه، نشان داد که می‌توان تعادل میان معیارهای عملیاتی مختلف مانند مسافت، عدالت و نیازهای تخصصی را بهبود داد.

مطالعات مروری و مفهومی. این دسته شامل پژوهش‌هایی است که به مرور ادبیات و تحلیل مفهومی پرداخته‌اند. گودرزیان و همکاران (۲۰۲۳) مرور جامع و نظام‌مند مدل‌ها و کاربردهای تحقیق در عملیات در مراقبت‌های درمانی در منزل ارائه کردند و به فرمول‌بندی مسائل و روش‌های حل شامل رویکردهای ابتکاری و دقیق پرداختند. این مرور شکاف‌های پژوهشی را شناسایی کرد و پیشنهادهایی برای جهت‌گیری‌های آتی پژوهش، از جمله ادغام ملاحظات پایداری و تعامل با سیاست‌گذاران ارائه نمود. آنّا و همکاران (۲۰۲۵) مرور مختصری از اهداف، محدودیت‌ها، روش‌های حل و چالش‌های این حوزه ارائه کردند و فناوری‌های نوظهور مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند را بررسی نمودند. آن‌ها بر ضرورت توجه به قابلیت توضیح‌پذیری روش‌های هوشمند و یکپارچگی داده‌ها برای پیاده‌سازی عملی تأکید کردند.

پناد آگویار و همکاران (۲۰۲۳) با تمرکز بر مراقبت‌های اجتماعی در منزل، مفاهیم همزمانی مراقبین و تداوم مراقبت روزانه را وارد مدل کردند و پنجره‌های زمانی پویا برای هماهنگی تیم‌ها تعریف نمودند. این مطالعه نشان داد که انعطاف‌پذیری زمانی و هماهنگی تیمی می‌تواند به کاهش زمان سفر و افزایش کارایی خدمات منجر شود و راهکارهایی برای پیاده‌سازی در سازمان‌های خدمات اجتماعی پیشنهاد کرد. جدول ۱ خلاصه از مقالات مرور شده را ارائه کرده است.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در فرمول‌بندی‌های ریاضی و روش‌های ابتکاری، شکاف‌های پژوهشی مهمی همچنان باقی است. نخست، بسیاری از مطالعات یا بر فرمول‌بندی‌های دقیق برای نمونه‌های کوچک تمرکز کرده‌اند یا بر روش‌های فراابتکاری برای نمونه‌های بزرگ؛ پیوند میان اثبات‌پذیری ریاضی و مقیاس‌پذیری عملی هنوز ناکافی است. دوم، مدیریت عدم قطعیت به‌صورت جامع در همه مطالعات پوشش نیافته است؛ اگرچه برخی کارها قیود احتمالی یا چارچوب‌های فازی را وارد کرده‌اند، اما ترکیب همزمان عدم قطعیت سفر، زمان خدمت و تقاضای پویا به‌طور کامل حل نشده باقی مانده است. سوم، مسائل عملی‌تر مانند تخصیص چندمهارتی نیروی کار، نیاز به حضور همزمان چند مراقب، و تعامل با محدودیت‌های عملیاتی ناوگان برقی و ایستگاه‌های شارژ در بسیاری از مدل‌ها یا به‌صورت جزئی مطرح شده یا به‌طور کامل مدل‌سازی نشده‌اند. چهارم، جنبه‌های اجتماعی، عدالت در تخصیص و قابلیت توضیح‌پذیری روش‌های هوشمند برای پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و ارزیابی‌های میدانی و مقایسه‌ای با داده‌های واقعی محدود است. با توجه به این شکاف‌ها، پژوهش جاری ضرورت

روشنی دارد. مسئله پیشنهادی زمان‌بندی پرستاران و مسیریابی تک‌دپویی با پنجره‌های زمانی و جریمه‌های خدمات، با ادغام صریح تصمیم‌های زمان‌بندی و مسیریابی، دقیقاً به یکی از خلأهای اصلی—یعنی نیاز به مدل‌های یکپارچه که هم کیفیت خدمت و هم کارایی ناوگان را هم‌زمان بهینه کنند—پاسخ می‌دهد. استفاده از حل دقیق برای نمونه‌های کوچک و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای نمونه‌های بزرگ، تلاشی برای پیوند اثبات‌پذیری ریاضی و مقیاس‌پذیری عملی است و می‌تواند راهنمایی عملی برای مدیران مراکز خدمات پرستاری فراهم آورد. افزون بر این، تحلیل‌های عددی پیشنهادی که اثر الگوهای تقاضا، سختی پنجره‌های زمانی و ساختار شیفت‌ها را بررسی می‌کنند، به پر کردن خلأهای مربوط به ارزیابی حساسیت و انتقال نتایج به محیط واقعی کمک می‌کند و زمینه‌ساز توسعه‌های بعدی مانند در نظر گرفتن درخواست‌های پویا، تخصیص چندمهارتی و ملاحظات پایداری خواهد بود.

جدول ۱. خلاصه مرور ادبیات

مرجع (سال)	هدف مسئله	نوع مدل و قیود کلیدی	روش حل	نتایج کلیدی
نصیر و کوئو (۲۰۲۰)	ادغام زمان‌بندی کارکنان و مسیریابی برای پشتیبانی تصمیم	مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود هم‌زمانی ملاقات‌ها و تقدم‌وتأخر	حل‌کننده ریاضی و تحلیل سناریو	ورود اطلاعات عملیاتی به تصمیم‌گیری روزانه و امکان مقایسه سناریوها
اولادزاد–عباس‌آبادی و همکاران (۲۰۲۳)	تفکیک پنجره‌های زمانی سخت و نرم برای بهبود رضایت	مدل دوهدفه عدد صحیح مختلط با پنج قید وابستگی زمانی نرم	جستجوی محلی تکرارشونده و تحلیل حساسیت	تأثیر تفکیک سخت/نرم بر تعارض‌ها و پیشنهاد تنظیم وزن اهداف
پارِنیو–تورِس و همکاران (۲۰۲٤)	زمان‌بندی و مسیریابی در مراقبت‌های تسکینی با تداوم مراقبت	مدل ریاضی یکپارچه چنددوره‌ای با مهارت مراقبین و تداوم مراقبت	مقایسه فرمول‌بندی‌ها و تحلیل عددی	فرمول‌بندی متوازن بار کاری بهترین تعادل کیفیت و توزیع بار کاری
رئولا و همکاران (۲۰۲۵)	انعطاف‌پذیری مدل برای تیم‌های تخصصی و سناریوهای متنوع	مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جدید با قابلیت تولید نمونه	حل دقیق نمونه‌های کوچک و تولیدکننده نمونه شبیه‌سازی	کران‌های پایین قوی‌تر و ابزار شبیه‌سازی برای ارزیابی فرمول‌بندی‌ها
بلهور و همکاران (۲۰۲۳)	کاهش زمان خدمت و تأخیر نسبت به ترجیحات بیماران	مدل ریاضی دوهدفه ترکیبی زمان‌بندی و مسیریابی با پنجره زمانی	روش ترتیبی برای جواب اولیه و الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه با خوشه‌بندی	تولید جبهه‌ای متنوع از راه‌حل‌ها و تسریع همگرایی با خوشه‌بندی
فتح‌الهی‌فرد و همکاران (۲۰۲۰)	کاهش هزینه‌های لجستیکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و رضایت بیماران	مدل چنددوره‌ای و چندمخزنی در چارچوب فازی برای پارامترهای نامطمئن	الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه با حافظه تطبیقی و فراابتکاری‌ها	ورود عدم قطعیت به مدل و عملکرد مناسب الگوریتم در نمونه‌ها
دو و ژانگ (۲۰۲۲)	زمان‌بندی و مسیریابی با زمان‌های خدمت‌رسانی تصادفی	مدل عدد صحیح مختلط یک‌روزه با زمان‌های تصادفی و قیود واقعی	شبیه‌سازی تبرید ترکیبی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو	برآورد هزینه‌های ناشی از عدم قطعیت و ارائه راه‌حل‌های مقاوم
ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)	مسیریابی و زمان‌بندی در جوامع پرجمعیت با توجه به جنبه‌های اجتماعی	مدل با اهداف کاهش سفر و توجه به کیفیت زندگی و ترجیحات محلی	روش‌های یادگیری تقویتی بدون مدل و بهینه‌سازی کلونی مورچگان	کاهش زمان انتظار و افزایش رضایت با در نظر گرفتن ترجیحات اجتماعی
حاج‌طایب و همکاران (۲۰۲۵)	مسیریابی پایدار با استفاده از خودروهای برقی و ملاحظات اجتماعی	مدل دوهدفه با ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی و امکان شارژ	بهینه‌سازی چندمعیاره و تحلیل عددی	کمّی‌سازی اثرات زیست‌محیطی و امکان تصمیم‌گیری چندمعیاره عملیاتی
اردِم و همکاران (۲۰۲۲)	مسیریابی ناوگان برقی با پنجره‌های زمانی و ایستگاه‌های شارژ سریع	مسئله با قیود انرژی و زمان و پنجره‌های زمانی	روش ابتکاری جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی	تولید مسیرهای عملیاتی برای ناوگان برقی و کاهش هزینه‌های انرژی و سفر

رکابی و همکاران (۲۰۲۴)	کاهش هزینه‌های لجستیکی و اولویت‌بندی بیماران چنددوره‌ای	مدل دوهدفه چنددوره‌ای و تعیین اولویت‌ها با معیارهای چندگانه	روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تعیین اولویت‌ها	بهبود تخصیص منابع از طریق اولویت‌بندی مبتنی بر معیارها
حسینی و همکاران (۲۰۲۶)	تضمین برنامه‌های قابل اعتماد در حضور عدم قطعیت تصادفی	چارچوب بهینه‌سازی با قیود احتمالی و مجموعه سناریوهای گسسته	الگوریتم شاخه و بررسی همراه با برنامه‌ریزی قیودی برای زیرمسائل	برآورد احتمال رسیدن به‌موقع و تولید راه‌حل‌های قابل اعتماد
لیو و همکاران (۲۰۲۱)	در نظر گرفتن همزمانی مراقبین، استراحت ناهار و شروع کار انعطاف‌پذیر	مدل عدد صحیح مختلط با پنجره‌های زمانی و قیود همزمانی و استراحت	چهار الگوریتم فراابتکاری ترکیبی با جستجوی همسایگی متغیر	تحلیل حساسیت نشان‌دهنده تأثیر مقررات استراحت و شروع کار بر مسیرها
گُو و بارد (۲۰۲۳)	ساخت برنامه‌های هفتگی برای بیماران بستری یا نیازمند ملاقات‌های هفتگی	چارچوب سه‌مرحله‌ای شامل خوشه‌بندی، حل مسئله فروشنده دوره‌گرد اه و جستجوی محلی	الگوریتم سه‌مرحله‌ای ترکیبی با جستجوی محلی برای بهبود	برنامه‌های هفتگی کارآمدتر و تعادل بهتر میان مسافت، عدالت و نیازهای تخصصی
پنا د آگویار و همکاران (۲۰۲۳)	مسیریابی و زمان‌بندی در مراقبت‌های اجتماعی با تمرکز بر همزمانی مراقبین	مدل با پنجره‌های زمانی پویا، همزمانی مراقبین و تداوم مراقبت روزانه	فرمول‌بندی ریاضی و تحلیل عددی برای هماهنگی تیم‌ها	انعطاف‌پذیری زمانی و هماهنگی تیمی منجر به کاهش زمان سفر و افزایش کارایی شد
بیسواس و همکاران (۲۰۲۴)	تخصیص و مسیریابی در خدمات خانگی برخط با معیارهای پایداری سه‌گانه	مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندمعیاره با معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی	حل عددی و تحلیل چندمعیاره برای تخصیص متخصصان	کاهش نقض پنجره‌های زمانی، کنترل انتشار آلاینده‌ها و توجه به عدالت در تخصیص
پژوهش حاضر	زمان‌بندی پرستاران و مسیریابی تک‌دپویی با پنجره‌های زمانی و جریمه‌های خدمات	مدل بهینه‌سازی ترکیبیاتی با قیود زمانی، ظرفیتی و نیروی انسانی و پنجره‌های زمانی	حل دقیق برای نمونه‌های کوچک و الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر برای نمونه‌های بزرگ	یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و مسیریابی مسافت‌ها را کاهش می‌دهد و الگوریتم پیشنهادی پاسخ‌های با کیفیت در زمان عملیاتی تولید می‌کند

۳- تشریح مساله و مدلسازی

خدمات پرستاری و مراقبت در منزل شامل اعزام درمانگران از یک پایگاه مرکزی به منازل بیماران برای ارائه انواع خدمات بالینی و حمایتی است. در این پژوهش مسئله به‌صورت یک مسئله ترکیبی زمان‌بندی و مسیریابی تک‌دپویی مدل‌سازی می‌شود که هدف آن تعیین مسیرها و زمان‌بندی ویزیت‌ها برای مجموعه‌ای از بیماران در یک دوره زمانی مشخص است. معیارهای بهینه‌سازی شامل کمینه‌سازی مجموع زمان سفر درمانگران، کاهش جریمه‌های ناشی از تعویق یا زودکردن شروع ویزیت‌ها و لحاظ سود ناشی از تطابق بیمار با درمانگر موردنظر است. پنجره‌های زمانی نرم برای شروع ویزیت‌ها، محدودیت‌های شیفت درمانگران و قابلیت تخصصی هر درمانگر برای ویزیت بیماران در مدل لحاظ شده است. مفروضات کلیدی به شرح ذیل است:

-*شروع و پایان از دپو*: تمامی درمانگران از مرکز خدمت‌رسانی (دپو) حرکت کرده و در پایان به همان مرکز بازمی‌گردند.
-*شیفت‌های مشخص*: هر درمانگر دارای ظرفیت زمانی محدود در هر روز است.
-*قابلیت تخصصی*: هر درمانگر تنها بیماران متناسب با تخصص خود را می‌تواند ویزیت کند.
-*ترجیحات بیمار*: بیمار می‌تواند ترجیحاتی نسبت به درمانگر داشته باشد که در تابع هدف لحاظ می‌شود.
-*پوشش یک‌بار برای هر بیمار*: هر بیمار در طول افق برنامه‌ریزی دقیقاً یک‌بار ویزیت می‌شود.
-*پنجره زمانی نرم*: زمان شروع ویزیت هر بیمار باید در بازه مشخصی قرار گیرد؛ خروج از بازه مجاز است اما با جریمه همراه خواهد بود.
-*قابلیت تعویق*: امکان به تعویق انداختن برخی ویزیت‌ها وجود دارد که با جریمه مدل می‌شود.

مجموعه‌ها و پارامترها

مجموعه ها

A مجموعه گره ها $\{0,1,\dots,n\}$ (گره صفر دپو است)

N مجموعه بیماران $A\backslash\{0\}$

K مجموعه درمانگران (k)

T مجموعه روزهای برنامه ریزی(t)

پارامترها

C_{ij} زمان سفر از i به j $(i,j \in A)$

Cap_k حداکثر ظرفیت زمانی درمانگر k ام در هر روز

r_i زمان خدمت‌رسانی به بیمار i $(i \in N)$؛ $r_0 = 0$

e_i زودترین زمان مجاز شروع خدمت برای بیمار i

l_i دیرترین زمان مجاز شروع خدمت برای بیمار i

g ضریب جریمه برای هر واحد دیرکرد یا زودکرد

sk_{ik} اگر درمانگر k تخصص لازم برای بیمار i را داشته باشد ۱ در غیر این صورت ۰ $(i \in N, k \in K)$

p_{it} اگر بیمار i در روز t درخواست خدمت داشته باشد ۱ در غیر این صورت ۰ $(i \in N, t \in T)$

d_{it} جریمه (عدم مطلوبیت) ویزیت بیمار i در روز t $(i \in N, t \in T)$

ex_{kt} باینری، اگر درمانگر k در روز t حاضر باشد ۱؛ در غیر این صورت ۰ $(k \in K, t \in T)$

prf_{ik} سود (ترجیح) ناشی از تطابق بیمارi با درمانگر k $(i \in N, k \in K)$

M عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم

x_{ijkt} متغیر باینری که اگر درمانگر k از گره i به jدر روز t حرکت کند ۱؛ در غیر این صورت ۰

v_{it} متغیر باینری که اگر بیمار i در روزt ویزیت شود ۱؛ در غیر این صورت ۰

b_i متغیر باینری زمان شروع خدمت‌رسانی در گره i $(b_0 = 0)$

la_i متغیر باینری میزان تأخیر در شروع خدمت بیمار i

er_i متغیر باینری میزان زودکرد در شروع خدمت بیمار i

با توجه به متغیرها و پارامترهای تعریف شده مدل ریاضی به شکل زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$min\ Z = \sum_{i\in A}\sum_{j\in A}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} C_{ij}\, x_{ijkt} + \sum_{i\in A}\sum_{t\in T} d_{it}V_{it} + \sum_{i\in A} g(la_i + er_i) - \sum_{i\in A}\sum_{j\in A}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} prf_{ik}\, x_{ijkt} \quad (۱)$$

s.t:

$$\sum_{j\in A} x_{ojkt} \le 1 \qquad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (۲)$$

$$x_{ijkt} \le ex_{kt} \qquad \forall i,j \in A, \forall t \in T, \forall k \in K \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in A} x_{ijkt} = \sum_{i\in A} x_{jikt} \qquad \forall j \in A, \forall t \in T, \forall k \in K \quad (۴)$$

$$\sum_{i\in A}\sum_{j\in A} (C_{ij} + r_i) x_{ijkt} \le Cap_k \qquad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_{j\in A} x_{ijkt} \le sk_{ik} \qquad \forall i \in N, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (۶)$$

$$\sum_{j\in A}\sum_{k\in K} x_{ijkt} = v_{it} \qquad \forall i \in N, \forall t \in T \qquad (۷)$$

$$\sum_{t\in T} v_{it} = 1 \qquad \forall i \in N \qquad (۸)$$

$$v_{it} \le p_{it} \qquad \forall i \in N, \forall t \in T \qquad (۹)$$

$$b_i + c_{ij} + r_i \le b_j + M(1 - \sum_{k\in K}\sum_{t\in T} x_{ijkt}) \qquad \forall i,j \in A \qquad (۱۰)$$

$$b_i - la_i \le l_i \qquad \forall i \in N \qquad (۱۱)$$

$$e_i \le b_i + er_i \qquad \forall i \in N \qquad (۱۲)$$

$$b_o = 0 \qquad (۱۳)$$

$$x_{ijkt}, v_{it} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in A, \forall t \in T, \forall k \in K \qquad (۱۴)$$

$$b_i, er_i, la_i \ge 0, \qquad \forall i \in N \qquad (۱۵)$$

تابع هدف (۱)، مجموع زمان سفر، جریمه‌های تعویق روزانه، جریمه‌های زودکرد و تأخیر، و سود تطابق بیمار–درمانگر (با علامت منفی) را به‌طور هم‌زمان کمینه می‌کند. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که هر درمانگر در هر روز حداکثر یک بار از دپو خارج شود. محدودیت (۳) بیان می‌کند که تخصیص هر حرکت یا مسیر تنها در صورتی مجاز است که آن درمانگر در آن روز حاضر باشد؛ این قید از اختصاص کار به درمانگرانی که در آن روز غایب یا خارج از دسترس‌اند جلوگیری می‌کند. محدودیت (٤) پیوستگی مسیرها را برقرار می‌سازد؛ یعنی اگر یک درمانگر وارد یک گره (بیمار یا دپو) شود باید از همان گره خارج شود. محدودیت (۵) ظرفیت زمانی شیفت را کنترل می‌کند؛ مجموع زمان‌های سفر و زمان‌های سرویس که یک درمانگر در طول یک روز انجام می‌دهد نباید از ظرفیت زمانی تعیین‌شده برای آن درمانگر فراتر رود تا شیفت‌ها قابل اجرا و واقع‌گرایانه باقی بمانند. محدودیت (٦) تضمین می‌کند که درمانگر فقط به بیمارانی تخصیص یابد که تخصص لازم برای آنها را دارد؛ این قید از تخصیص نادرست بیماران به درمانگرانی که توانایی ارائه خدمت مورد نیاز را ندارند جلوگیری می‌کند. محدودیت (۷) رابطه بین متغیرهای مسیر و متغیر نشان‌دهنده ویزیت را برقرار می‌سازد؛ به‌عبارت دیگر وجود یک مسیر ورودی به یک بیمار در یک روز معادل انجام ویزیت آن بیمار در آن روز در نظر گرفته می‌شود. محدودیت (۸) الزام می‌کند که هر بیمار در طول افق برنامه‌ریزی دقیقاً یک‌بار ویزیت شود، بنابراین برنامه‌ریزی تکراری یا عدم پوشش بیماران در افق مورد نظر مجاز نیست. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که ویزیت تنها در روزهایی انجام شود که درخواست بیمار ثبت شده است؛ این قید از برنامه‌ریزی ویزیت در روزهای نامناسب یا بدون تقاضا جلوگیری می‌کند. محدودیت (۱۰) ترتیب زمانی بین دو بازدید متوالی را شرطی می‌کند؛ اگر درمانگری از گره i به گره j حرکت کند، زمان شروع سرویس در j نمی‌تواند کمتر از زمان پایان سرویس در i به‌اضافه زمان سفر بین آن دو باشد. این قید از هم‌پوشانی زمانی و بازگشت به عقب جلوگیری می‌کند، در حالی که امکان انتظار درمانگر پیش از شروع سرویس در j را به‌طور کامل حفظ می‌کند. محدودیت (۱۱) پنجره زمانی نرم را برای تأخیر مدل می‌کند؛ اگر زمان شروع سرویس از کران بالای مجاز l_i فراتر رود، متغیر la_i مقدار مثبت گرفته و میزان تأخیر را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۲) پنجره زمانی نرم را برای زودکرد مدل می‌کند؛ اگر زمان شروع سرویس کمتر از کران پایین e_i باشد، متغیر er_i مثبت شده و زودکرد را ثبت می‌کند. محدودیت (۱۳) مرجع زمانی را تعیین می‌کند و زمان شروع در دپو را برابر صفر قرار می‌دهد تا کلیه محاسبات زمان‌بندی بر مبنای آن انجام شود.

در پایان، محدودیت (۱٤–۱۵) دامنه متغیرها را مشخص می‌کند.

٤- الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS) در سال ۱۹۹٦ توسط برمبرگ و ملادنویچ معرفی شد. این الگوریتم از خانواده فراابتکاری‌هاست و با تغییر نظام‌مند ساختار همسایگی در حین جستجو، هم قابلیت رسیدن به نقاط حداقل محلی را دارد و هم توانایی فرار از بهینه‌های محلی را افزایش می‌دهد. ایده محوری VNS این است که با جابه‌جایی بین همسایگی‌های مختلف یک جواب، فضای جستجو به‌صورت سیستماتیک کاوش شود: ابتدا جستجو از یک جواب اولیه آغاز می‌شود، سپس با انتخاب تصادفی یک همسایه از ساختار همسایگی جاری، جستجوی محلی حول آن انجام شده و نقطه حداقل محلی متناظر به‌دست می‌آید؛ در صورت بهبود، این جواب جایگزین می‌شود و جستجو از همان همسایگی ادامه می‌یابد، و در غیر این صورت به همسایگی با مرتبه بالاتر منتقل می‌گردد تا زمانی که به بیشترین مرتبه همسایگی برسیم. ساختار کلی الگوریتم بر پایه دو موتور

جستجو است: ارتعاش و جستجوی محلی. فرایند ارتعاش به‌عنوان عامل تنوع‌ساز عمل می‌کند و با تولید یک جواب تصادفی در همسایگی جاری، حلقه جستجوی محلی را تازه می‌سازد؛ در مقابل، جستجوی محلی مسئول بهبود دقیق و یافتن حداقل محلی در ناحیه تولیدشده است. کارایی VNS تا حد زیادی به انتخاب و طراحی ساختارهای همسایگی بستگی دارد؛ این ساختارها معمولاً تو در تو تعریف می‌شوند و با افزایش مرتبه همسایگی، دامنه تغییرات بزرگ‌تر می‌شود. سه ویژگی نظری مهم الگوریتم عبارت‌اند از (مسمودی و همکاران، ۲۰۲۵): (۱) نقطه حداقل محلی نسبت به یک ساختار همسایگی ممکن است با نقطه حداقل محلی ساختار دیگری متفاوت باشد؛ (۲) نقطه حداقل مطلق، حداقل نسبت به مجموعه تمام ساختارهای همسایگی است؛ (۳) در بسیاری از مسائل، نقاط حداقل محلی حاصل از همسایگی‌های مختلف نسبتاً به هم نزدیک‌اند.

الگوریتم ۱. شبه‌کد کلی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

۱. پارامترها را مقداردهی کنید.
۲. یک جواب اولیه (s) انتخاب کنید و $s \leftarrow s_{best}$
۳. $l \leftarrow 1$
۴. تا زمانی که شرط توقف برقرار نباشد، تکرار کنید:
- $s \leftarrow s_{best}$
- ارتعاش: یک جواب تصادفی s' از همسایگی $N_l(s)$ تولید کنید.
- جستجوی محلی: حول (s') جستجوی محلی انجام دهید تا (s'') به‌دست آید.
- اگر $f(s'') < f(s_{best})$ آنگاه $s_{best} \leftarrow s''$ و $l \leftarrow 1$ ؛ در غیر این صورت $l \leftarrow l+1$
۵. جواب نهایی s_{best} را گزارش کنید.

این الگوریتم در عمل دو رویکرد احتمالی و قطعی را ترکیب می‌کند: مجموعه‌ای از ساختارهای همسایگی $(N_1, N_2 \dots)$ تعریف می‌شود که هر یک مجموعه‌ای از جواب‌های همسایه یک جواب معین را تولید می‌کنند. در هر تکرار، با استفاده از ساختار همسایگی فعلی، یک ارتعاش تصادفی ایجاد می‌شود و سپس جستجوی محلی برای یافتن حداقل محلی در ناحیه جدید اجرا می‌گردد. اگر بهبود حاصل شود، جستجو از همان همسایگی ادامه می‌یابد؛ در غیر این صورت به همسایگی بعدی منتقل می‌شود. این تغییر نظام‌مند همسایگی‌ها باعث می‌شود الگوریتم نواحی مختلف فضای جواب را کاوش کند و از افتادن در دام بهینه‌های محلی جلوگیری نماید.

٤-١-روش نمایش جواب

در این مسئله چندین بیمار وجود دارند که با توجه به روز ملاقات از پیش تعیین شده شان امکان تاخیر در این روز پنجره زمانی مربوط به هر کدام و همچنین در نظر گیری ظرفیت درمانگران به مسیرهای آن ها تخصیص می‌یابند. نحوه نمایش جواب در این مسئله یا به عبارت دیگر رشته جواب مدل شامل تورهای درمانگران ، به ترتیب شماره آنها و شماره روزها است و همچنین توالی بیماران نیز در این بخش مشخص می‌باشد. نحوه نمایش جواب در شکل ۱ آمده است.

۱	۱	۱	۱۲	۱۱	۲	۰	۲	۱	۹	۸	۶	۱۵	۰	۱	۲	۷	۱۴	۱۳	۰	۲	۲	۳	۴	۱۰	۵

شکل ۱. نمایش جواب

طبق این روش نمایش، هر بیمار فقط در یک مسیر و در یک روز از بازه زمانی وجود دارد. در شکل بالا بازه زمانی دو روز، دو درمانگر و ۱۵ بیمار در نظر گرفته شده است. خانه اول از هر قسمت مربوط به شماره درمانگر؛ خانه دوم مربوط به شماره روز و بقیه خانه ها تا صفر بعدی مربوط به توالی بیماران است. به طور مثال درمانگر ۱ در روز اول کار خود را از دپو آغاز می‌کند و بیماران ۱و ۱۲و۱۱و ۲ را به ترتیب ملاقات نموده و در آخر نیز به همان دپو باز می‌گردد.

٤-۲-جزییات پیاده‌سازی الگوریتم

گام اول — تولید جواب اولیه

یک روش ابتکاری دومرحله‌ای برای ساخت جواب شروع به‌کار می‌رود. در مرحله نخست، بیمارانی که روز ملاقاتشان قطعی است و امکان تعویق ندارند، با اولویت نزدیکی به دپو و سپس نزدیکی به یکدیگر، و با رعایت ظرفیت درمانگران و تخصص آن‌ها، به مسیرها تخصیص می‌یابند. در مرحله دوم، بیمارانی که قابلیت تعویق دارند به‌گونه‌ای میان روزهای مجاز و درمانگران توزیع می‌شوند که مجموع زمان سفر و جریمه تعویق روزانه به کمترین مقدار ممکن برسد. این فرایند روزبه‌روز تکرار می‌شود تا تمام بیماران در یک برنامه موجه جای گیرند.

گام دوم — ارتعاش

هدف ایجاد یک تغییر ناگهانی در جواب جاری است تا جستجو از ناحیه فعلی خارج شود. در این پژوهش از چند ساختار همسایگی استفاده می‌شود که از ساده‌ترین تا پیچیده‌ترین به‌کار گرفته می‌شوند؛ پس از هر تکان، جستجو محلی (Opt-۲) روی مسیرهای تغییر یافته اعمال می‌شود. در صورت عدم بهبود، تکان بعدی اجرا می‌گردد و در صورت بهبود، الگوریتم به تکان اول بازمی‌گردد.

ساختارهای همسایگی

جابجایی: در این اپراتور معمولاً یک گره (بیمار) از یک تور برداشته و در تور دیگر درج می‌شود یا دو گره بین دو تور با هم جابجا می‌شوند. هدف تعدیل بار مسیرها یا بهبود هزینه/زمان است. در این مثال نمونه‌ای ساده ازعملگر *جابجایی* موضعی نشان داده می‌شود: دو مقدار مجاورِ سربرگ (مقادیر ۷ و ٤) با هم جابجا می‌شوند تا مکانیزم جابجایی روشن شود. در پیاده‌سازی واقعی، انتخاب گره‌ها بر اساس معیارهایی مانند کاهش هزینه سفر یا رعایت پنجره‌های زمانی انجام می‌شود و تغییر تنها در صورت عدم نقض محدودیت‌ها پذیرفته می‌شود.

۰	۲	۱	۹	۸	۶	۱۵	۰	۱	۲	۷	۱۴	۱۳	۰	۲	۲	۳	۱	۱	۴	۱۰	۵

۰	۲	۱	۹	۸	۶	۱۵	۰	۱	۲	۴	۱۴	۱۳	۰	۲	۲	۳	۱	۱	۷	۱۰	۵

شکل ۲. عملگر جابجایی

تبادل متقابل : در اینجا دو قوس (زیررشته متوالی) از دو تور مختلف را انتخاب و به‌صورت ضربدری با هم تعویض می‌شود. این عمل می‌تواند بخش‌های بزرگی از دو مسیر را بازآرایی کند و اثر قابل‌توجهی بر توزیع بار و زمان سفر داشته باشد. در مثال زیر، قوس اندیس‌های (۲,۲) از بخش اول با قوس اندیس‌های (٦,۱۵) از بخش دوم تعویض می‌شوند. پیش از پذیرش باید بررسی شود که تعویض باعث نقض پنجره‌های زمانی یا ظرفیت نشود.

۰	۲	۱	۹	۸	۶	۱۵	۰	۱	۲	۷	۱۴	۱۳	۰	۲	۲	۳	۱	۱	۴	۱۰	۵

۰	۲	۱	۹	۸	۲	۲	۰	۱	۲	۷	۱۴	۱۳	۰	۶	۱۵	۳	۱	۱	۴	۱۰	۵

شکل ۳. عملگر تبادل متقابل

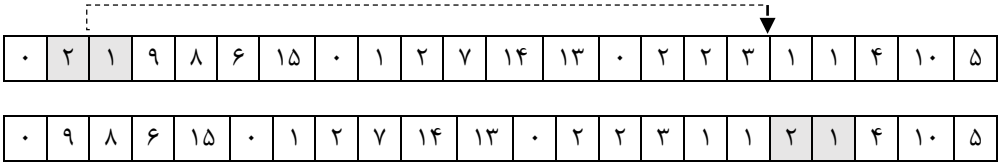
اسکان مجدد: این روش یک گره (یک بیمار) را از یک موقعیت برداشته و در مکان دیگری در همان مسیر درج می‌کند. این عمل برای بهبود محلی ترتیب بازدید و کاهش هزینه سفر مفید است و معمولاً کم‌هزینه‌تر از تعویض‌های بزرگ است. در مثال زیر مقدار ۹ از جایگاه خود برداشته و در اندیس ٤ درج می‌شود؛ عناصر بین این دو موقعیت به‌تناسب جابجا می‌شوند. پس از جابجایی باید پنجره‌های زمانی و سازگاری شیفت‌ها بررسی شود.

۰	۲	۱	۹	۸	۶	۱۵	۰	۱	۲	۷	۱۴	۱۳	۰	۲	۲	۳	۱	۱	۴	۱۰	۵

۰	۲	۱	۸	۶	۱۵	۰	۱	۲	۷	۱۴	۱۳	۰	۲	۲	۳	۱	۱	۹	۴	۱۰	۵

شکل ٤. عملگر اسکان مجدد

انتقال: این ساختار یک قوس (زیررشته متوالی) را از یک مسیر حذف و در موقعیتی از مسیر دیگر درج می‌کند. این عمل تغییرات ساختاری بزرگ‌تری ایجاد می‌کند و می‌تواند توزیع بیماران بین تورها را به‌طور چشمگیری تغییر دهد. در مثال زیر قوس (۲,۱) حذف و بعد از خانه ۳ درج می‌شود؛ پس از حذف، انتهای رشته با ۰ پایان می‌یابد یا بسته به قالب ممکن است کوتاه‌تر شود. پس از اعمال عملگر انتقال باید همه محدودیت‌ها بازبینی شوند.



شکل ۵. عملگر انتقال

در روند پیاده سازی عملگرها، علاوه بر ظرفیت و پنجره‌های زمانی، تطابق تخصص درمانگر با بیمار و مجاز بودن روز ویزیت نیز پیش از پذیرش هر جواب جدید بررسی می‌گردد و در صورت ناشدنی بودن، جواب متناظر نادیده گرفته شده و مجدد با استفاده از همان عملگر جواب جدید تولید و بررسی می‌شود.

گام سوم — جستجوی محلی

جواب حاصل از فاز ارتعاش وارد مرحله جستجوی محلی می‌شود تا به یک حداقل محلی بهبود یابد. این مرحله تنها بر روی مسیرهایی که در فاز ارتعاش تغییر یافته‌اند اعمال می‌شود. در این پژوهش از Opt -۲ برای بهبود مسیرها استفاده می‌شود.

گام چهارم — شرط توقف

پس از هر جستجوی محلی، اگر جواب جدید بهتر از بهترین جواب فعلی باشد، بهترین جواب به‌روزرسانی شده و شمارنده همسایگی به یک بازمی‌گردد؛ در غیر این صورت، همسایگی به سطح بعدی افزایش می‌یابد. الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که به انتهای آخرین همسایگی رسیده و تعداد تکرارها به سقف تعیین‌شده از طریق آنالیز تاگوچی برسد.

نتایج عددی

ابتدا مسائل با ابعاد کوچک و روش حل دقیق توسط حل کننده *CPLEX* نرم افزار *GAMS* مدلسازی و حل می‌شوند. سپس مسائل با ابعاد بزرگتر با استفاده الگوریتم پیشنهادی در نرم افزار *MATLAB* حل شوند و نهایتا نتایج مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

نتایج عددی در ابعاد کوچک

در این قسمت ابتدا داده‌ها مساله تشریح می‌شود. به این منظور برای نقاط مربوط به بیماران یک مجموعه ۱۰ عضوی درنظر می‌گیریم به طوریکه $i=\{0,1,2,...,10\}$ باشد. برای مجموعه K یا تعداد درمانگران که با اندیس k نشان داده می‌شوند، $K=\{1,2,3\}$. برای مجموعه T یا تعداد روزهای دوره که با اندیس t نشان داده می‌شوند ، $T=\{1,2,3,...,7\}$. پس از تعریف تمام پارامترها مطابق با مدل ریاضی و اندیس‌های تعریف شده برای مدل به شرح جدول ۲ است. در این آزمایش‌ها، ضریب جریمه تأخیر/زودکرد (g) و جریمه تعویق روزانه (d_{it}) هر دو برابر ۵ در نظر گرفته شده‌اند تا تأثیر یکسانی از هر دو منبع هزینه‌ای در تابع هدف منعکس شود و امکان مقایسه مستقیم مؤلفه‌های جریمه فراهم آید.

جدول ۲. پارامترهای استفاده شده در مثال عددی

پارامتر	مقدار
مدت زمان سرویس دهی به بیمار i: r_i	توزیع یکنواخت بین ۲ و ۵
زودترین زمان ممکن شروع فعالیت برای بیمار i	یک ساعت پس از اعلام درخواست
دیرترین زمان ممکن برای شروع فعالیت برای بیمار i	شش ساعت پس از اعلام درخواست
جریمه دیرکرد و زور کرد در رسیدن به بیمار i: g (به صورت مثبت و منفی در مدل)	۵
جریمه دیرکرد ملاقات بیمار i در روز t	۵
عدد بزرگ M	۱۰۰۰

نکته اینکه در برای محاسبه زمان سفر بین دونقطه از رابطه فاصله بین آن دو نقطه به صورت مختصات هندسی استفاده می‌شود. جدول ۳ نشان دهنده توانایی و برنامه درمانگران برای خدمت‌رسانی به بیماران است در صورت خدمت‌رسانی عدد ۱ و در غیر این صورت عدد ۰ وارد می‌شود. در این قسمت هر بیمار درخواست متفاوتی دارد مثلا یکی درخواست آزمایش خون دارد یکی درخواست تزریق سرم با در نظر گرفتن این درخواست‌ها تخصیص درمانگر صورت می‌گیرد.

جدول ۳. توانایی و برنامه درمانگران برای خدمت‌رسانی به بیماران

	بیمار ۱	بیمار ۲	بیمار ۳	بیمار ٤	بیمار ٥	بیمار ٦	بیمار ۷	بیمار ۸	بیمار ۹	بیمار ۱۰
درمانگر ۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱
درمانگر۲	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱
درمانگر ۳	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰

در این مدل میزان ترجیح بیماران برای استفاده از خدمات یک درمانگر خاص هم وارد می‌شود که به صورت جدول ٤ است که در آن عدد ۳ نشان دادن بیشترین میزان ترجیح و عدد ۱ نشان دهنده کمترین ترجیح است.

جدول ٤. میزان ترجیح بیماران برای استفاده از خدمات یک درمانگر خاص

	بیمار ۱	بیمار ۲	بیمار ۳	بیمار ٤	بیمار ٥	بیمار ٦	بیمار ۷	بیمار ۸	بیمار ۹	بیمار ۱۰
درمانگر ۱	۱	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۲	۱
درمانگر۲	۲	۲	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۲
درمانگر۳	۳	۱	۱	۳	۲	۳	۳	۱	۱	۳

برنامه حضور درمانگران درروزهای مختلف هفته طبق جدول ٥ است (۱ برای حضور و ۰ برای عدم حضور).

جدول ٥. برنامه حضور درمانگران

	روز ۱	روز ۲	روز۳	روز ٤	روز ٥	روز ٦	روز ۷
درمانگر ۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	تعطیل
درمانگر ۲	۰	۱	۰	۱	۱	۰	تعطیل
درمانگر ۳	۱	۰	۰	۱	۰	۰	تعطیل

برنامه درخواست بیماران برای روزهای مختلف از دوره هفت روزه به شرح ٦ زیر است.

جدول ٦. برنامه درخواست بیماران برای روزهای مختلف

	روز ۱	روز ۲	روز۳	روز ٤	روز ٥	روز ٦	روز ۷
بیمار ۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	تعطیل
بیمار ۲	۱	۱	۱	۱	۰	۱	تعطیل
بیمار ۳	۰	۰	۱	۱	۱	۱	تعطیل
بیمار ٤	۰	۱	۱	۱	۱	۰	تعطیل
بیمار ٥	۱	۱	۰	۰	۱	۱	تعطیل
بیمار٦	۱	۰	۱	۰	۱	۰	تعطیل
بیمار۷	۱	۱	۱	۱	۰	۱	تعطیل
بیمار۸	۰	۰	۱	۱	۱	۱	تعطیل
بیمار۹	۰	۱	۰	۱	۱	۱	تعطیل
بیمار ۱۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	تعطیل

باتوجه به توضیحات و تعریف پارامترها، نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از GAMS در جدول ٦ به شکل خلاصه بیان شده است.

جدول ٦. نتایج حل مسئله در ابعاد کوچک

تعداد بیماران	تعداد درمانگران	تعداد روزهای خدمت‌رسانی	مقدار تابع هدف	زمان حل مدل به ثانیه	خطا ٪
٥	٣	٧	٣٦٩	٠,٢	٠٪
٦	٣	٧	٣٨٣	٠,٦	٠٪
٨	٣	٧	٥٢١	١,٢	٠٪
٨	٥	٧	٥٠٣	١,٣	٠٪
١٠	٣	٧	٦٣٥	١٠,٩	٠٪
١٠	٥	٧	٦٢٢	٨,٦	٠٪
١٢	٣	٧	٣١٢٩	٨٤,٠	٠٪
١٢	٥	٧	٧٧٦	٢٧٨,٨	٠٪
١٥	٣	٧	٤٥٣٢	١٠٠٠	١٧٪
١٥	٥	٧	١٩٨٨	١٠٠٠	٩٪

نتایج عددی در ابعاد بزرگ

در ادامه جدول مربوط به نتایج عددی حاصل از مقادیر مختلف برای تعداد درمانگران و بیماران و روزها برای ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم پیشنهادی گزارش شده است. همان طور که در این جدول هم مشاهده می‌گردد زمان حل مسئله با افزایش ابعاد تغییر کرده و افزایش می‌یابد.

جدول ۷. نتایج حل مسئله در ابعاد بزرگ

تعداد بیماران	تعداد درمانگران	تعداد روزهای دوره خدمت‌رسانی	تابع هدف	زمان حل مدل به ثانیه
٥	٢	٢	٤٦٠,٢	٠,٥٢
٧	٤	٢	٦٦١,٠	٠,٧١
٨	٤	٢	٧١١,٣	٠,٩
١٠	٥	٢	٧٧٦,٢	٥٩٣
٦	٣	٣	٦٢٧,١	١,٠٦
٩	٤	٣	٨١٥,٨	١١٤
١١	٤	٣	٩٧٦,٤	١٦٢٩
١٢	٤	٣	١١٠٨,١	٢٠٦٨
١٢	٥	٣	١١٠٣,٥	٣٥٩٨
١٠	٤	٤	٨٨٦,٣	١٠٢٦
١٠	٦	٤	٨٨٢,٨	١٥٠٠
١١	٦	٤	٩٧٢,٧	١٨٩٧
١٢	٥	٤	١١٠٢,٠	٢٢٤٣
١٣	٦	٤	١١٥٨,٩	١٩٦٠
١٤	٥	٤	١٢١٩,٦	١٥٦٠
١٤	٧	٤	١٢١٩,٤	٣٦٦٠
١٦	٨	١١	١٦١٣,٢	٥٢٦٠
١٦	٩	١١	١٧٢٤,٥	٧٤٢٥
١٧	٩	١٤	١٩٢٣,٨	٩٥٦٢
١٧	١٠	١٤	٢٥٤٣,٢	٩٨٤٥

آنالیز حساسیت

در این بخش در ابتدا نتایج حل مسئله با سه درمانگر در جدول ۸ گزارش شده است.

جدول ۸. اطلاعات حاصل از حل مدل با سه درمانگر

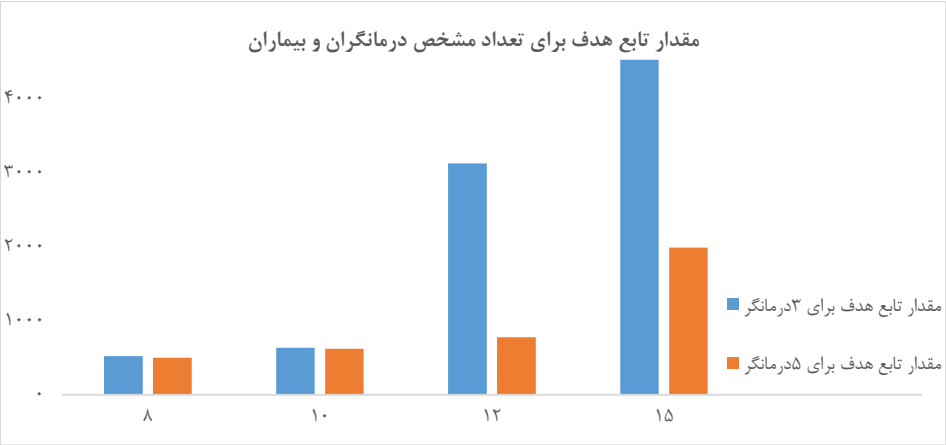
تعداد بیماران	تعداد درمانگران	تعداد روزهای دوره خدمت‌رسانی	مقدار تابع هدف	زمان حل مدل به ثانیه
۸	۳	۷	۵۲۱	۱,۲
۱۰	۳	۷	٦۳۵	۱۰,۹
۱۲	۳	۷	۳۱۲۹	۸٤
۱۵	۳	۷	٤٥۳۲	۱۰۰۰

با توجه به این مدل مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد بیماران یا همان گره‌ها در مدل اصلی، زمان حل مدل نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین در برنامه‌ریزی برای دنیای واقعی و هنگام حل مدل با زمان‌های واقعی و مشتریان واقعی، باید این افزایش زمان حل متناسب با افزایش ابعاد مسئله مدنظر قرار داده شود. با توجه به نسخه محدود نرم‌افزار گمز، حل مدل در ابعاد بالا با استفاده از فرمول‌بندی ریاضی در این نرم‌افزار امکان‌پذیر نبود و به‌طور کلی حل مدل‌های با ابعاد زیاد بسیار زمان‌بر است.در نتیجه، برای یافتن جواب در مسائل با ابعاد بزرگ و در شرایط زمان واقعی، لازم است بسته به نوع مسئله از الگوریتم‌های پیشنهادی استفاده شود تا کارایی مناسب از نظر تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب حاصل گردد؛ همچنین با این رویکرد زمان حل مسئله در ابعاد بزرگ کاهش یافته و به کارایی مطلوب‌تری دست یافته خواهد شد.

با توجه به نمودار، مقدار تابع هدف در تمام موارد با افزایش تعداد درمانگران از سه به پنج کاهش یافته است که نشان می‌دهد تخصیص درمانگران بیشتر، با توزیع مناسب‌تر بار کاری و کاهش زمان‌های سفر و جریمه‌ها، به بهبود جواب بهینه می‌انجامد. همچنین همان‌طور که در نمودار مقایسه‌ای مشاهده می‌شود، این روند کاهشی در اکثر اجراها مشهود است. در ابعاد کوچک، مقادیر جواب‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک است. از طرف دیگر، هنگامی که تعداد درمانگران ثابت باشد — برای مثال سه نفر — با افزایش تعداد بیماران، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد؛ یعنی جواب بهینه بدتر می‌شود، زیرا مجموع زمان‌های سفر و خدمت‌رسانی بیشتر شده و احتمال وقوع جریمه دیرکرد افزایش و رضایت بیماران کاهش می‌یابد.

جدول ۹. اطلاعات حاصل از حل مدل با پنج درمانگر

تعداد بیماران	تعداد درمانگران	تعداد روزهای دوره خدمت‌رسانی	مقدار تابع هدف	زمان حل مدل به ثانیه
۸	۵	۷	۵۰۳	۱,۳
۱۰	۵	۷	٦۲۲	۸,٦
۱۲	۵	۷	۷۷٦	۲۷۸,۸
۱۵	۵	۷	۱۹۸۸	۱۰۰۰



شکل ۵. تحلیل حساسیت در شرایط تغییر تعداد درمانگران

با توجه به نمودار بالا، میزان تابع هدف در مجموع در حالت سه درمانگر کمتر از حالت پنج درمانگر است؛ زیرا برای پنج درمانگر هزینه و زمان رفت‌وآمد نسبت به سه درمانگر افزایش می‌یابد. همچنین، همان‌طور که در نمودار مقایسه‌ای مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف برای یک تعداد معین از بیماران در یک تعداد ثابت روز کاری، در اکثر اجراهای انجام‌شده با افزایش تعداد درمانگران کاهش یافته است. در ابعاد کوچک، مقادیر جواب‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک است. از طرف دیگر، هنگامی که تعداد درمانگران ثابت باشد—برای مثال سه نفر—با افزایش تعداد بیماران، مقدار تابع هدف تا حدی افزایش می‌یابد؛ یعنی جواب بهینه بدتر می‌شود، زیرا مجموع زمان‌های طی مسیر و زمان‌های خدمت‌رسانی افزایش می‌یابد و در نتیجه احتمال وقوع جریمه دیرکرد بیشتر و رضایت بیماران کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی قطعی برای مسیریابی و تخصیص سیستم مراقبت در منزل ارائه شد که هدف آن مینیمم‌سازی کل زمان طی‌شده توسط درمانگران، کاهش جریمه‌های ناشی از تأخیر یا تقدم در ملاقات بیماران، و افزایش سود حاصل از در نظر گرفتن ترجیحات بیمار–درمانگر بود. مسئله در قالب یک مدل تک‌دپویی تعریف شد؛ به این معنا که تمامی درمانگران سفر خود را از یک دپو آغاز کرده و پس از ارائه خدمات به بیماران به همان دپو بازمی‌گردند. در مدل، محدودیت‌های زمانی درمانگران لحاظ گردید؛ هر درمانگر در هر روز تنها یک بازه کاری مشخص دارد و حضور یا عدم حضور او در روزهای مختلف هفته در افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شد. همچنین هر بیمار باید دقیقاً یک بار در طول دوره ملاقات شود و نوع خدمت مورد نیاز او با تخصص درمانگر و میزان ترجیح بیمار برای انتخاب درمانگر خاص ترکیب گردید تا واقعیت‌های عملی سیستم مراقبت در منزل بهتر منعکس شود.

با توجه به NP-Hard بودن مسئله، استفاده از روش‌های دقیق در ابعاد بزرگ عملاً غیرممکن یا بسیار زمان‌بر است. به همین دلیل، الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر به‌عنوان رویکرد پیشنهادی برای حل مسئله در ابعاد بزرگ‌تر به کار گرفته شد. نتایج حاصل از حل دقیق مدل در ابعاد کوچک با نرم‌افزار گمز و حل‌کننده سیپلکس اعتبار مدل را تأیید کرد. سپس در ابعاد بزرگ‌تر، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در محیط متلب اجرا شد و نشان داد که می‌تواند در زمان حل کوتاه‌تر به جواب‌های با کیفیت دست یابد. مقایسه نتایج عددی نشان داد که با افزایش تعداد بیماران و درمانگران، زمان حل مدل ریاضی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، در حالی که الگوریتم فراابتکاری توانست این زمان را کاهش دهد و همچنان جواب‌های نزدیک به بهینه ارائه کند. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که افزایش تعداد درمانگران در بسیاری از موارد موجب کاهش مقدار تابع هدف و بهبود کیفیت خدمات می‌شود، هرچند در برخی حالت‌ها هزینه‌های رفت‌وآمد بیشتر می‌تواند این مزیت را تعدیل کند. پیشنهادات مطالعات آتی به شرح ذیل است:

–گسترش مدل به حالت چنددپویی :در دنیای واقعی ممکن است درمانگران از چند مرکز یا پایگاه مختلف شروع به کار کنند. توسعه مدل به حالت چنددپویی می‌تواند کارایی و انعطاف‌پذیری بیشتری ایجاد کند.

–در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها :پارامترهایی مانند زمان سفر، زمان سرویس‌دهی یا حضور درمانگران ممکن است با عدم

قطعیت همراه باشند. استفاده از مدل‌های احتمالی یا استوار می‌تواند نتایج عملی‌تری ارائه دهد.

-ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری :بررسی ترکیب جستجوی همسایگی متغیر با سایر الگوریتم‌ها مانند الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچگان یا الگوریتم‌های ترکیبی می‌تواند کیفیت جواب‌ها را بهبود دهد و سرعت همگرایی را افزایش دهد.

-مدل‌سازی ترجیحات چندسطحی بیماران :در این پژوهش ترجیحات بیماران به‌صورت عددی ساده لحاظ شد. توسعه مدل به‌گونه‌ای که ترجیحات چندسطحی یا چندمعیاره بیماران (مانند جنسیت درمانگر، تجربه، یا نوع تخصص) را در نظر بگیرد، می‌تواند واقعیت‌های عملی را بهتر منعکس کند.

-کاربرد در محیط‌های واقعی :پیاده‌سازی مدل در یک سیستم واقعی مراقبت در منزل و مقایسه نتایج با داده‌های عملی می‌تواند اعتبار و کارایی الگوریتم پیشنهادی را در شرایط واقعی نشان دهد.

-توسعه مدل به حالت پویا :در شرایط واقعی درخواست‌های بیماران ممکن است به‌صورت پویا و در طول زمان وارد سیستم شوند. توسعه مدل به حالت پویا و آنلاین می‌تواند ارزش عملی بالایی داشته باشد.

به‌طور کلی، این تحقیق نشان داد که استفاده از مدل ریاضی قطعی برای ابعاد کوچک و الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر برای ابعاد بزرگ می‌تواند رویکردی کارآمد برای حل مسئله مسیریابی و تخصیص در سیستم مراقبت در منزل باشد. نتایج عددی و تحلیل حساسیت تأیید کردند که الگوریتم پیشنهادی قادر است زمان حل را کاهش دهد و کیفیت جواب‌ها را در ابعاد بزرگ حفظ کند. با توجه به پیشنهادات مطالعات آتی، مسیرهای متنوعی برای توسعه و بهبود این مدل وجود دارد که می‌تواند به ارتقای کیفیت خدمات مراقبت در منزل و افزایش رضایت بیماران منجر شود.

٦-مراجع

-Arabzadeh, E., Fatemi Ghomi, S. and Karimi, B. (2023). Multi-period home health care routing and scheduling problem with the medical grouping of patients. *Scientia Iranica*, 30(5), 1781-1795.

-Atta, S., Basto-Fernandes, V., & Emmerich, M. (2025). A concise review of the home health care routing and scheduling problem. *Operations Research Perspectives, 15*, 100347.

-Belhor, M., El-Amraoui, A., Jemai, A., & Delmotte, F. (2023). Multi-objective evolutionary approach based on K-means clustering for home health care routing and scheduling problem. *Expert Systems with Applications, 213*, 119035.

-Biswas, D., Alfandari, L., & Archetti, C. (2024). A triple bottom line optimization model for assignment and routing of on-demand home services. *Computers & Operations Research, 167*, 106644.

-Du, G., & Zhang, J. (2022). Cross-regional manpower scheduling and routing problem with stochastic service times in home health care. *Computers & Industrial Engineering, 173*, 108668.

-Erdem, M., Koç, Ç., & Yücel, E. (2022). The electric home health care routing and scheduling problem with time windows and fast chargers. *Computers & Industrial Engineering, 172*(A), 108580.

-Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., Goodarzian, F., & Cheikhrouhou, N. (2020). A bi-objective home healthcare routing and scheduling problem considering patients' satisfaction in a fuzzy environment. *Applied Soft Computing, 93*, 106385.

-Goodarzian, F., Shokri Garjan, H., & Ghasemi, P. (2023). A state-of-the-art review of operation research models and applications in home healthcare. *Healthcare Analytics, 4*, 100228.

-Guo, J., & Bard, J. F. (2023). A three-step optimization-based algorithm for home healthcare delivery. *Socio-Economic Planning Sciences, 87*(A), 101517.

-HadjTaieb, S., Cheikh, M., Hani, Y., El Mhamedi, A., & Moalla Loukil, T. (2025). Towards sustainable home (health)-care: Bi-objective formulation for electric vehicle routing. *Computers & Industrial Engineering, 205*, 111165.

-Hosseini, S.-S., Adulyasak, Y., & Rousseau, L.-M. (2026). Consistent home health care routing and scheduling problem under time uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 205*, 104509.

scheduling problem with teams' synchronization. *Socio-Economic Planning Sciences, 86*, 101503.

-Parreño-Torres, C., Reula, M., Alvarez-Valdes, R., & Parreño, F. (2024). Solving the palliative home health care routing and scheduling problem with an integer linear programming model. *Expert Systems with Applications, 249*, 123728.

-Rekabi, S., Moradi, B., Salamian, F., Fadavi, N., Zokaee, M., & Aghsami, A. (2024). A home healthcare routing-scheduling optimization model considering time-balancing and outsourcing. *Supply Chain Analytics, 7*, 100077.

-Reula, M., Parreño-Torres, C., Lamas-Fernandez, C., & Martinez-Sykora, A. (2025). A flexible mathematical model for home health care problems. *European Journal of Operational Research, 327*(3), 791–807.

-Ting Zhang, Liu, Y., Yang, X., Chen, J., & Huang, J. (2023). Home health care routing and scheduling in densely populated communities considering complex human behaviours. *Computers & Industrial Engineering, 182*, 109332.

-Yazır, O.A., Koç, Ç. & Yücel, E. (2023) .The multi-period home healthcare routing and scheduling problem with electric vehicles. *OR Spectrum 45*, 853–901.

-Liu, W., Dridi, M., Fei, H., & Hajjam El Hassani, A. (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, 183*, 115307.

-Masmoudi, M., Borchani, R., & Jarboui, B. (2025). Generalized variable neighborhood search algorithm for vehicle routing problem with time windows and synchronization. *Computers & Operations Research, 183*, 107193.

-Muriyatmoko, D., Djunaidy, A., & Muklason, A. (2025). An integrated optimization approach to cross-domain scheduling and routing. *Decision Analytics Journal, 17*, 100654.

-Nasir, J. A., & Kuo, Y.-H. (2020). A decision support framework for home health care transportation with simultaneous multi-vehicle routing and staff scheduling synchronization. *Decision Support Systems, 138*, 113361.

-Oladzad-Abbasabady, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M., & Vahedi-Nouri, B. (2023). A bi-objective home care routing and scheduling problem considering patient preference and soft temporal dependency constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 119*, 105829.

-Pena de Aguiar, A. R., Pereira Ramos, T. R., & Gomes, M. I. (2023). Home care routing and

Nurse Scheduling and Single-Depot Routing with Time Windows and Service Penalties in Home Health Care (Modeling and Variable Neighborhood Search Algorithm)

Mahdieh Sheikhi, Ph.D., Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Javad Behnamian, *Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.*

E-mail: Behnamian@basu.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Home health care services are a rapidly growing sector within health systems, creating more precise and novel requirements for transportation and operations planning. This paper addresses a combined scheduling and routing problem in which a healthcare provider must deploy therapists from a central depot to patients' homes to meet daily requests. Each request has a service duration, a soft time window, and daily prioritization penalties; moreover, patients may have preferences for particular therapists. Therapist shifts have specified time capacities, and each therapist is only allowed to visit patients that match their skills. The problem is formulated as a mixed-integer programming model that integrates temporal, capacity, skill, and preference constraints and reveals the practical trade-offs among service quality, therapist workload, and travel volume. To analyze the model's performance, numerical experiments are conducted on representative scenarios, demonstrating how demand patterns, time window tightness, and shift structures affect route efficiency and total travel time. The results indicate that integrating scheduling and routing decisions can significantly reduce travel time and improve operational efficiency without compromising service coverage. In addition to the mathematical model and exact solution of small instances, a metaheuristic algorithm based on Variable Neighborhood Search (VNS) is designed and implemented for larger instances; exploiting diverse neighborhood structures and local search mechanisms, it produces high-quality solutions within operational time frames. Comparisons between exact solutions and VNS outcomes show that the proposed method can serve as a practical tool for home health care service centers. The findings offer actionable insights for transportation planners and health service managers and lay the groundwork for future research on related topics such as dynamic requests and multi-skilled workforce allocation.

Keywords: Home Nursing, Vehicle Routing; Staff Scheduling, Operational Resource Allocation, Variable Neighborhood Search, Mathematical Modeling