نگرشی جدید در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه سیار با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در پاسخگویی به تقاضای غیرقطعی

مقاله علمی – پژوهشی

امین فرح بخش، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
جواد بهنامیان*، استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Behnamian@basu.ac.ir

دریافت: ۱٤۰٤/۰٤/۰۸– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۸/۰۲
صفحه ۹٤-۸۳

چکیده

پیشرفت تکنولوژی و ارتباطات بستری بوجود آورده است که شبکه‌های سیار بتوانند خدمات موثری را در بحث خدمات اجتماعی ایجاد کنند. یکی از این شبکه‌های سیار مربوط به انجام خدمات پزشکی در محل برای مشتریان می‌باشد. مبحث مربوط به مسیریابی وسائل نقلیه جزءِ جدانشدنی این نوع از سازمان‌ها می‌باشد. این تحقیق با مطرح کردن یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه مبتنی بر شبکه سیار خدمات پزشکی و در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در پاسخ به تقاضاهای غیرقطعی نگرش جدیدی را در این زمینه مطرح می‌کند. حل مدل در دو حالت معمول و حالت مربوط به مدل این تحقیق و مقایسه نتایج مربوطه به وضوح نشان می‌دهد که این مدل علاوه بر خدمت‌رسانی بهتر و سریعتر به مشتریان که رضایت‌مندی هر چه بیشتر مشتریان را در پی دارد؛ باعث کاهش چشمگیر هزینه‌ها نیز می‌گردد. کاهش هزینه‌ها همزمان با افزایش سطح خدمت‌رسانی هدف بالقوه همه شرکت‌ها می‌باشد و این امر در درجه اهمیت بسیار بالایی قرار دارد که این تحقیق به آن به طور ویژه می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه، شبکه سیار، انعطاف‌پذیری

۱- مقدمه

زمینه‌های علمی در صورتی برای جوامع انسانی مفید هستند که بتوانند برای مشکلات واقعی و عملی راهکارهای موثری ایجاد کنند. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از شناخته شده‌ترین مسائل بهینه‌سازی به حساب می‌آید که هدف آن طراحی مجموعه بهینه‌ای از مسیرها با کمترین هزینه برای سرویس‌دهی به مشتریان است بگونه‌ای که با محدودیت‌های موجود سازگار باشد (توث و ویگو، ۲۰۰۲). در طی زمان پیشرفت های زیادی در این زمینه ازمسائل شده است و بسیار قابل توجه محققین قرار گرفته است. از جمله کاربردهای عملی این مسئله می‌توان به جمع‌آوری زباله‌های جامد شهری (فرحبخش و فرقانی، ۲۰۱۹)، حمل و نقل سوخت و مواد خطرناک (پوپوویچ و همکاران، ۲۰۱۲)، جمع‌آوری نامه‌ها از صندوق‌های پستی، دوره‌های بازرسی جهت نگهداری پیشگیرانه ماشین‌آلات و یا برنامه‌ریزی مربوط به انتقالات کالاها و خدمات امدادی در شرایط بحران اشاره کرد (الذیب و موری، ۲۰۱۷). امروزه خدمت رسانی یکی از مهم ترین موضوعات در زمینه تولید کالا و خدمات می‌باشد. این به این معنی است که امروزه حتی تولید کنندگان کالا و قطعات نیز برای حضور در بازارهای رقابتی و ایجاد یک مزیت رقابتی نیاز ملزم دارند که سرمایه گذاری زیادی

در زمینه خدمت رسانی انجام دهند. در نتیجه این امر باید سطح خدمت رسانی در همه حوزه‌های مربوط به تولید کالا و خدمات که یکی از مهمترین و اثرگذارترین آن‌ها ارسال کالا و یا نیروی خدماتی است، به طور موثری افزایش یابد. انعطاف پذیری یکی از موارد کلیدی مهم در زمینه خدمت رسانی است. از طرفی یکی از مفاهیم پایه‌ای و پرتکرار در حوزه علوم مرتبط با استراتژی تولید و خدمات مفهوم انعطاف پذیری است.

با توجه به توضیحات فوق در نظر گرفتن تاثیر مبحث مهم انعطاف پذیری بر مسئله کاربردی مسیریابی می‌تواند پژوهشی سودمند باشد. با فرض بررسی مسیریابی مسائل کاربردی جدیدی مانند سیستم توزیع فروشگاه‌های اینترنتی، سیستم‌های سلامتی که تیم پزشکی را برای معاینات غیر اورژانسی و گرفتن نمونه آزمایش به محل منتقل می‌کنند و تاکسی‌های اینترنتی در سطح شهر می‌توان انعطاف پذیری را در بین مسیر در نظر گرفت.

۲- پیشینه تحقیق

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه اولین بار توسط دانتزیگ و رامسِر در سال ۱۹۵۹ مطرح شد. این مسئله که حالت ترکیبی از دو مسئله فروشنده دوره‌گرد و بسته‌بندی است، سعی در طراحی بهینه مجموعه‌ای از مسیرها برای ناوگان حمل و نقل در جهت خدمت‌رسانی به تعداد معینی از مشتری‌ها با وجود محدودیت‌های جانبی مختلف دارد (دانتزیگ و رامسِر، ۱۹۵۹). بررسی تحقیقات در این زمینه نشان دهنده این است که برخی از محققین به دنبال بهبود روش‌های حل از نظر کمی و کیفی بوده و برخی دیگر به دنبال نزدیک کردن شرایط مسئله به شرایط واقعی هستند. در این بین تحقیقات زیادی وجود دارد که هر دو این موارد را مد نظر قرار داده‌اند. انعطاف‌پذیری عامل بسیار مهمی در نزدیک کردن شرایط مسئله به شرایط واقعی است که در ادامه به تعدادی از تحقیقاتی که به این مفهوم پرداخته‌اند اشاره می‌گردد. تاش و همکاران (۲۰۱٤) مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی انعطاف پذیر را معرفی کردند. که در آن وسایل نقلیه مجاز به انحراف از پنجره‌های زمانی مشتری هستند. محققان نشان دادند که این انعطاف پذیری موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی مربوطه می‌شود. در این تحقیق مسیرهای امکان پذیر وسیله نقلیه از طریق الگوریتم جستجوی تابو ساخته می‌شوند. در تحقیقی که در سال ۲۰۱۵ توسط هِنک و همکاران (۲۰۱۵) صورت گرفته است مسئله مسیریابیِ وسایل نقلیه ظرفیت‌دار در زمینه جمع‌آوری انواع زباله‌های شیشه‌ای مطرح شده است. انواع مختلفی از زباله‌های شیشه‌ای (شیشه با رنگ‌های مختلف) در موقعیت‌های مشتریان وجود دارد که باید با حداقل هزینه به یک انبار مرکزی منتقل شوند. میزان مربوط به انواع مختلف زباله‌ها با یک نوع وسیله نقلیه با اندازه محفظه انعطاف‌پذیر مربوط به انواع زباله‌ها حمل می‌شوند، و این در حالی است که در هنگام حمل و نقل آنها نباید مخلوط شوند. همچنین این نویسندگان در تحقیقی دیگر برای حل مسئله بازیافت شیشه‌های رنگی با چندین وسیله نقلیه که بارگیری شیشه‌های مختلف در یک ماشین به شرط عدم اختلاط آن‌ها صورت می‌گیرد، یک روش شاخه و کران ارائه دادند (هِنک و همکاران، ۲۰۱۵).

دفرین و همکاران (۲۰۱٦) یک مسئله مسیریابی انتخابی وسیله نقلیه را مطرح کردند که در آن مشتریان متعلق به شرکای مختلف در یک گروه لجستیکی واحد با چندین وسیله نقلیه سرویس دهی می‌شوند. هر یک از شرکا هزینه عدم تحویل را برای هر یک از مشتریان خود تعیین می‌کنند و یک الگوریتم مرکزی برای اجرای یک برنامه عملیاتی ایجاد می‌کنند. لی و همکاران (۲۰۱٦) نوع جدیدی از مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره با وجود پنجره‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. در این نوع از مسئله انبار نهایی که وسیله نقلیه بعد از پیمودن مسیر خود به آن برمی‌گردد انعطاف پذیر است، یعنی لزوما همان انباری نیست که از آن شروع به حرکت کرده است. محققین برای حل مدل یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی با جستجوی محلی تطبیقی پیشنهاد دادند. آتاسوی و همکاران (۲۰۱٦) مفهوم جدیدی به نام حمل و نقل با تحرک انعطاف پذیر بر روی تقاضا، که خدمات شخصی سازی شده‌ای را به مسافران ارائه می‌دهد، عنوان کردند. حمل و نقل با تحرک انعطاف پذیر بر روی تقاضا یک سیستم پاسخگو به تقاضا است که در آن لیستی از گزینه های سفر برای هر درخواست مسافر در زمان واقعی ارائه می‌شود. این سیستم انعطاف‌پذیری در انتخاب خدمات را هم برای مسافران و هم اپراتورها از طریق انتخاب خدماتی که در یک مجموعه‌ای بهینه شده‌اند فراهم می‌کند. در این تحقیق تخصیص‌های موجود به این سه سرویس بصورت پویا انجام شده

و براساس تقاضا و عرضه صورت می‌گیرد. هوآنگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی مساله انتخاب مسیر در شبکه جاده‌ای به عنوان یک تصمیم یکپارچه در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه وابسته به زمان، که به عنوان انعطاف‌پذیری مسیر تعریف شده است، پرداختند. در این مسئله تصمیم‌گیری‌های انجام شده نه تنها شامل تصمیمات مربوط به مسیریابی بلکه شامل تصمیم‌گیری برای انتخاب مسیر وابسته به زمان ارسال و میزان ازدحام در شبکه جاده‌ای مربوطه نیز هست. آرکتی و همکاران (۲۰۱۷) مسئله مسیریابی وسایل نقلیه دوره‌ای انعطاف پذیر را مطرح کردند که در این مسئله یک شرکت حمل و نقل مجبور است یک برنامه توزیع برای ارائه خدمات به مشتریان خود در طی یک افق برنامه‌ریزی ارائه دهد. هر مشتری یک تقاضای کل دارد که باید در دوره مورد نظر تحویل داده شود و محدودیتی برای حداکثر مقدار قابل تحویل در هر بازدید وجود ندارد. این مسئله را می توان تعمیم مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایل نقلیه دانست که دارای فرکانس‌ها و برنامه‌های سرویس متغیر ولی مقدار تحویل در هر بازدید ثابت است. همین نویسندگان در سال ۲۰۱۸ یک تعمیم از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه دوره ای که در آن محدودیت برنامه زمانی ثابت است و مقدار ارائه شده به هر مشتری در هر بازدید متغیر ارائه دادند. این انعطاف پذیری منجر به صرفه جویی قابل توجهی در کل هزینه‌ها شده است (آرکتی و همکاران، ۲۰۱۷).

درویش و همکاران (۲۰۱۹) یک مسئله مسیریابی پیوسته را در شبکه تامین دو سطحی که در آن کالاها ابتدا برای مراکز توزیع ارسال شده و سپس برای مشتریان ارسال می‌گردد ارائه دادند. در این تحقیق دو نوع از انعطاف‌پذیری که یکی مربوط به طراحی شبکه است و دیگری مربوط به زمان‌های تحویل است مطرح می‌گردد. این درحالی است که امکان اجاره تسهیلات مربوط به مراکز توزیع در تمام دوره‌های زمانی وجود ندارد. این مسئله توسط یک الگوریتم شاخه و حد حل شده است. روتنباخر (۲۰۱۹) یک الگوریتم دقیق شاخه و قیمت و برش برای مسئله مسیریابی دوره‌ای وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی و با برنامه‌های انعطاف پذیر ارائه داد. در این مسئله مشتریان در طی یک افق برنامه‌ریزی برای چندین دوره به یک یا چند بازدید نیاز دارند. برنامه‌های بازدید احتمالی برای هر مشتری محدود است. در مسئله مسیریابی دوره‌ای وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی کلاسیک، فرض بر این است که هر مشتری به یک تناوب بازدید خاص نیاز دارد و کلیه برنامه‌های مربوطه را با فواصل منظم بین بازدیدها ارائه می‌دهد.

در استرادا–مورنو و همکاران (۲۰۱۹)، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه چند دوره‌ای با این رویکرد که در آن شرکت حمل و نقل تخفیف قیمت را در ازای انعطاف پذیری در موعد تحویل ارائه می‌دهد، معرفی شد. هدف شرکت حمل و نقل به حداقل رساندن کل هزینه‌ها، که شامل هزینه‌های توزیع و تخفیف‌های پرداخت شده است می‌باشد. محققین یک الگوریتم جستجوی محلی تکرار شونده برای حل مسئله مورد نظر پیشنهاد دادند.

بررسی انجام شده در ادبیات موضوع مورد نظر اهمیت موضوع انعطاف‌پذیری در زمینه مسائل مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه را به وضوح روشن می‌سازد. محققین با نگرش‌های متفاوتی سعی در در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در مسائل کاربردی و وسیع مسیریابی داشته‌اند. این نگرش‌ها همگی در جهت نزدیک کردن شرایط مسئله به شرایط واقعی می‌باشد. امروزه مسائل مسیریابی یک بخش اعظم جدیدی را با پیشرفت‌های اینترنت و تکنولوژی به خود اختصاص داده‌اند. در بستر شبکه‌های سیار شرکت‌هایی بوجود آمده‌اند که با استفاده از فضای مجازی سعی در ارائه خدماتی متنوع و مفید برای مشتریان دارند. از جمله این شرکت‌ها می‌توان به تاکسی‌های اینترنتی، فروشگاه‌های مجازی و موسسات ارائه دهنده خدمات پزشکی در محل اشاره کرد که هیچ یک از این‌ها برای انجام خدمات بهتر بی‌نیاز از اجرای مسائل مسیریابی نیستند. این تحقیق با توجه به شکاف تحقیقاتی موجود در این زمینه به بررسی مسئله مسیریابی مربوط به شبکه‌های سیار با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مربوط به پاسخگویی به تقاضا می‌پردازد.

۳- مدلسازی و بیان مسئله

در این بخش پس از تشریح دقیق مسئله، نمادهای مورد نیاز معرفی و پس از آن مدل مسئله ارائه خواهد شد.

۳-۱- تشریح مسئله

مسئله مطرح شده در این تحقیق مربوط به یک سیستم خدمات پزشکی سیار است که بر اساس شبکه‌های سیار به انجام امور خدمت‌رسانی به مشتریان در محل می‌پردازد. این سیستم سلامت

سیار دارای یک مرکز اصلی برای برنامه‌ریزی و انجام امور اداری بوده که در اول هر روز درخواست‌های مربوط به روز جاری را برای انجام خدمات مربوطه برنامه‌ریزی کرده و برای انجام امور به تیم‌های پزشکی مربوطه ابلاغ می‌کند. حال اگر در روز مورد نظر بعد از برنامه‌ریزی و ارسال تیم‌های مربوطه، درخواست جدیدی واصل شود که می‌تواند یک نیاز فوری پزشکی باشد و یا غیر فوری؛ رویکرد معمولی مواجه با این درخواست؛ ثبت درخواست برای برنامه روز بعد می‌باشد. لزوما این راه ساده بهترین راه نمی‌باشد زیرا اولا امکان دارد درخواست به علت تاخیر در پاسخ از دست رود؛ ثانیا امکان دارد با توجه به موقعیت درخواست پاسخگویی به آن در حال حاضر مقرون به صرفه‌تر باشد. لذا این تحقیق با دو رویکرد به درخواست‌های رسیده در طول دوره برخورد می‌کند. در رویکرد اول درخواست با قبول ریسک از دست رفتن به روز بعد منتقل می‌گردد و در رویکرد دوم درخواست با توجه به هزینه‌های تغییر در برنامه‌ریزی در همان روز صورت پذیرد.برای بررسی این موضوع عوامل زیادی باید بررسی گردند. از جمله این عوامل می‌توان به هزینه تغییر در برنامه، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های مربوط به تاخیر بوجود آمده در زمان خدمت‌رسانی به نقاطی که از قبل برنامه‌ریزی شده‌اند؛ اشاره کرد. همچنین بعد از انتخاب نحوه رویکرد مواجه با درخواست باید تعیین کنیم که پاسخگویی به این درخواست را به کدام تیم و با چه ترتیبی صورت گیرد. از آنجایی که صدور درخواست جدید دارای عدم قطعیت هم در صدور درخواست و همچنین در زمان صدور درخواست می‌باشد. لذا، با نقاطی که به صورت بالقوه امکان صدور درخواست دارند به صورت احتمالی برخورد می‌گردد.

این تحقیق پیرو خدمت رسانی سیار در زمینه خدمات پزشکی می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های موجود مدل به صورت یک مدل عدد صحیح مختلط خطی بیان گردیده است. در مدل مورد نظر به صورت همزمان علاوه بر تعیین برنامه مسیر بهینه حرکت تیم‌های پزشکی و سطح خدمت بهینه مورد نظر با توجه به ظرفیت تیم‌های پزشکی سیار؛ نحوه برخورد با تقاضاهای احتمالی نیز تعیین می‌گردد. نحوه تعیین نوع برخورد با تقاضاهای رسیده در ادامه تشریح می‌شود. مجموعه نقاط مربوط به مسئله شامل دو نوع مشتری می‌باشند که گروه اول نقاط مواردی هستند که درخواست آن‌ها از قبل مشخص و ثبت شده است و حتما باید برنامه‌ریزی گردد. اما نوع دوم مشتریان گروهی هستند که با توجه به دوره‌ای بودن درخواست‌هایشان و همچنین این موضوع که قبلا هم مشتری این شرکت بوده‌اند می‌توان پیش‌بینی کرد که با یک احتمالی این مشتریان درخواست جدیدی را صادر می‌کنند. مدل با توجه به این درخواست‌ها و موقعیت آن‌ها به حل مدل می‌پردازد و در نهایت به دو گروه این نقاط را تقسیم می‌کند. دسته اول مواردی هستند که اگر درخواستی از آن‌ها برسد قطعا باید آن‌ها برای روز بعد برنامه‌ریزی کرد و دسته دوم نقاطی هستند که مدل برای آن‌ها یک بازه زمانی تعیین می‌کند که اگر درخواست مربوطه در این بازه زمانی رسید در همان روز و طبق برنامه مشخص شده پاسخ داده می‌شود و در غیر این صورت پاسخ به آن به روز بعد منتقل می‌گردد. لازم به ذکر است که مدل با توجه به تعریف سرعت متوسط برای تیم‌های پزشکی بازه‌های زمانی را بر اساس زمان‌های واقعی تعریف می‌کند. عمده مفروضاتی که در مراحل مدل‌سازی و تحلیل و ارزیابی درنظرگرفته خواهند شد عبارتند از:

-زمان انجام خدمات پزشکی مورد نظر برای هر مشتری از زمان حمل و نقل مربوط به مسیر جدا می‌باشد.

-همه نقاطی که در برنامه‌ریزی به آن‌ها خدمت‌رسانی می‌گردد باید تقاضایشان به صورت کامل برطرف گردد.

-تیم‌های پزشکی همگی از یک نوع بوده و دارای ظرفیت محدود و معین می‌باشند.

-مسئله به صورت یک مرحله‌ای حل می‌گردد.

-موقعیت مشتریان ثابت و معین است.

- راه‌اندازی تیم‌های پزشکی باعث تحمیل هزینه ثابت به سیستم می‌شود.

- تقاضای مشتریان معلوم و ثابت است و هر مشتری بایستی فقط یک بار و توسط یک تیم ویزیت گردد.

-هر تیم در هر روز فقط یک مرتبه می‌تواند راه‌اندازی گردد.

-مسیر های ایجاد شده از نوع مسیر بسته می‌باشند.

-برای تیم‌های پزشکی سرعتی متوسط در نظر گرفته شده است.

۲-۳- مدل مسئله

قبل مدلسازی مسئله لازم است نمادهای استفاده شده در آن تشریح گردد.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه‌ها و اندیس‌های مورد استفاده در مدل به شرح جدول (۱) است.

جدول ۱. مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل

نماد	تعریف
N	مجموعه کل گره‌های شبکه $N = Np \cup Ns$
Np	مجموعه گره‌های مبدا (مراکز برنامه ریزی)
Ns	مجموعه مشتریانی که درخواست آن‌ها از قبل رسیده و قطعا پاسخ داده می‌شوند.
Nt	مجموعه مشتریانی که احتمال دارد درخواست آنان در روز جاری برسد.
$j \;\&\; i$	اندیس‌های شمارنده هر یک از گره‌های شبکه اعم از مبدا و مقصد
K	اندیس شمارنده تیم پزشکی

پارامترهای مدل

پارامترهای موجود در مدل و تعریف آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترها (مقادیر ورودی) مدل

پارامتر	تعریف
P_d	جریمه مربوط به تاخیر در پاسخگویی به نقاط
P_s	جریمه مربوط به عدم سرویس‌دهی به مشتری در روز جاری
Cv	مقدار ظرفیت پاسخگویی هر تیم پزشکی
m	تعداد تیم پزشکی موجود
Vc	هزینه ثابت راه‌اندازی هر تیم پزشکی
$E(j)$	احتمال صدور درخواست توسط مشتری j
V	سرعت متوسط تیم‌های پزشکی
$w(j)$	زمان سرویس‌دهی مورد نیاز به مشتری j
d_{ij}	هزینه حمل و نقل از گره i تا گره j
$r(j)$	تقاضای خدمات درمانی مشتری j

متغیرهای مدل

جدول (۳) نشان دهنده متغیرهای مدل و تعریف هر یک از آنهاست.

جدول ۳. متغیرهای مدل

متغیر	تعریف
Z_1	تابع هدف اول
y_j	اگر مشتری jدر روز جاری برنامه‌ریزی شود مقدار یک و اگر به روز بعد موکول شود مقدار صفر
T_{ijk}	زمان رسیدن تیم پزشکی سیار k به مشتری jکه از گره i حرکت کند
X_{ijk}	اگر مسیر از گره i به گره jتوسط تیم پزشکی سیار k تخصیص داده شود مقدار یک، در غیر این صورت مقدار صفر
Q_{ijk}	میزان ظرفیت پاسخگویی تخصیص داده شده به تیم پزشکی k در مسیر از گره i به گره j

مدل ریاضی مسئله

مدل نهایی در قالب یک تابع هدف و ۱۶ محدودیت و توضیحات مربوط به آن در ادامه ارائه می‌گردد.

$$MIN\ Z_1 = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{i\neq j}\sum_{k} d_{ij}.X_{ijk} + \sum_{i\in N_p}\sum_{j\in N}\sum_{k} Vc.X_{ijk} + \sum_{j\in N_t}(P_d.y_j + P_s.(1-y_j)) \quad (۱)$$

$$\sum_{j\in N} X_{ijk} \le m \qquad \forall i \in N_p \quad (۲)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{i\neq j}\sum_{k} X_{ijk} = 1 \qquad \forall j \in \{N - N_p\} \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{i\neq j}\sum_{k} X_{jik} = 1 \qquad \forall j \in \{N - N_p\} \quad (۴)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{i\neq j}\sum_{k} Q_{ijk} - \sum_{i\in N}\sum_{i\neq j}\sum_{k} Q_{jik} = r_j \qquad \forall j \in \{N - N_p\} \quad (۵)$$

$$Q_{ijk} \le CV \cdot X_{ijk} \quad \forall i \in N \ , j \in N, \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \ , k \tag{٦}$$

$$\sum_{j \in \{N - N_p\}} X_{ijk} \le 1 \quad \forall i \in N \ , k \tag{٧}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in N_p} X_{iik} = 0 \tag{٨}$$

$$Y_j = 1 \qquad \forall \mathrm{j} \in \mathrm{N}_s \tag{٩}$$

$$T_{ijk} = \frac{d_{ij} \cdot X_{ijk}}{V} + w(j) \cdot X_{ijk} \qquad \forall i \in N \ , j \in N, \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \ , k \tag{١٠}$$

$$\mathrm{X}_{ijk} = 0 \qquad \forall i \in N_p \ , j \in N_t \ , k \tag{١١}$$

$$\sum_{i \in N \ \mathrm{i} \neq \mathrm{j}} \sum_{k} Q_{ijk} = 0 \quad \forall \mathrm{j} \in N_p \tag{١٢}$$

$$\sum_{i \in N, \mathrm{i} \neq \mathrm{j}} X_{ijk} = \sum_{i \in N, \mathrm{i} \neq \mathrm{j}} X_{jik} \quad \forall k \ , \mathrm{j} \in N \tag{١٣}$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \tag{١٤}$$

$$\mathrm{y}_j \in \{0,1\} \tag{١٥}$$

$$Q_{ijk} \ge 0 \tag{١٦}$$

$$\mathrm{T}_{ijk} \ge 0 \tag{١٧}$$

در رابطه شماره (۱) تابع هدف مجموع هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ثابت مربوط به راه‌اندازی تیم‌های پزشکی و همچنین هزینه مربوط به جریمه‌ها را حداقل می‌کند. رابطه (۲) تضمین می‌کند که تعداد تیم‌های پزشکی که راه‌اندازی می‌شود نباید بیشتر از تعداد تیم‌های پزشکی موجود باشد. رابطه (۳) نشان می‌دهد که تعداد مسیر وارد شده به هر نقطه مربوط به مشتری‌ها، حتما باید یکی باشد. رابطه (٤) نشان می‌دهد که تعداد مسیر خارج شده از هر نقطه مربوط به مشتری‌ها، حتما باید یکی باشد. رابطه (۵) تضمین می‌کند که تمام تقاضای هر مشتری باید توسط تیم پزشکی که به آن مشتری تخصیص داده می‌شود پوشش داده شود. همچنین این رابطه از تشکیل حلقه جلوگیری می‌کند. رابطه (٦) نشان می‌دهد که مجموع میزان تقاضای مورد نیاز هر مشتری در هر مسیر نباید بیشتر از ظرفیت خدمت‌رسانی تیم پزشکی مربوطه باشد. رابطه (۷) تضمین می‌کند که هر تیم پزشکی حداکثر یک بار می‌تواند تخصیص داده شود. رابطه (۸) مانع از ایجاد مسیر بین یک گره با خودش می‌شود. رابطه (۹) تضمین کننده این است که نقاطی که تقاضای آن‌ها قبلا رسیده است باید حتما در روز جاری برنامه‌ریزی شوند. رابطه (۱۰) زمان رسیدن به هر منطقه را که مجموع زمان حرکت تیم پزشکی بین دو گره و زمان انجام خدمات در نقطه قبل است را مشخص می‌کند. رابطه (۱۱) نشان دهنده این است که در برنامه‌ریزی روز جاری اولین مشتری که خدمت‌رسانی می‌شود باید از مشتریانی باشد که درخواست آن‌ها قبلاً رسیده است. رابطه (۱۲) مشخص می‌کند که تیم پزشکی باید به اندازه مجموع تقاضای مشتریانی که پوشش می‌دهد بارگذاری شود. رابطه (۱۳) تضمین می‌کند که تعداد تیم‌های پزشکی سیار وارد شونده و خارج شونده مربوط به هر گره باید برابر باشند و روابط (۱٤)، (۱۵)، (۱٦) و (۱۷) نشان دهنده نوع متغیرهای مسأله می‌باشد.

٤- نتایج عددی

برای بررسی مدل ارائه شده در این تحقیق و نتایج حاصل از آن؛ از مثال‌های استاندارد کتابخانه‌ای CVRPLIB استفاده شده است. البته در نمونه‌های مورد نظر تغییراتی ایجاد شده است تا مطابق با مسئله مورد نظر مربوط به این تحقیق باشند. یعنی پارامترهای مربوط به موقعیت مشتریان و مرکز توزیع و همچنین ظرفیت مربوط به تیم‌های پزشکی و تقاضای مربوط به مشتریان برگرفته از نمونه‌های کتابخانه‌ای است و سایر پارمترها مانند متوسط سرعت و تعداد تیم‌های پزشکی و همچنین مدت زمان خدمت‌رسانی به مشتریان به نمونه‌ها اضافه گردیده شده است. پس از تعیین و تعریف کلیه ورودی‌ها و پارامترهای مدل مطابق با آنچه که بیان شد، مساله در نرم‌افزار گمز نسخه ۲۵,۱,۲ کدنویسی شده است. در ادامه ابتدا یک نمونه از مسئله برای بررسی و تجزیه و تحلیل دقیق نتایج حاصل از مدل ارائه می‌گردد و پس از آن چندین نمونه در دو حالت بدون در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری و با در نظر گرفتن آن در نتایج و زمان حل با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

جدول ٤ ویژگی‌های نمونه حل شده و نتایج مربوط به آن را نمایش می‌دهد. لازم به توضیح است که در نمونه ارائه شده در این مسئله ۵۳ نقطه وجود دارد که ۷ عدد از آن‌ها دپو بوده و مابقی نقاط تقاضا هستند. اما در این تحقیق برای تطابق مسئله ۵۱ نقطه اول انتخاب شده‌اند که یک نقطه به عنوان مرکز توزیع و برنامه‌ریزی، ۲۵ نقطه به عنوان برنامه‌ریزی قطعی و ۲۵ نقطه به عنوان برنامه‌ریزی غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند.

همانطور که در جدول ٤ مشاهده می‌گردد در نمونه ذکر شده تنها تعداد ۲۵ نقطه درخواست خود را در روزهای قبل ارسال کرده‌اند و در برنامه‌ریزی مربوط به روز جاری در شرایط عادی حضور دارند و ۲۵ نقطه دیگر پیش‌بینی می شود که درخواستی در روز جاری ارسال کنند. این نقاط در شرایط عادی درخواستشان به روز بعد منتقل می‌گردد. اما در نتیجه حل مربوط به این مدل با توجه به کاهش هزینه های مربوطه مدل تنها پاسخ‌گویی به ۷ مشتری از ۲۵ مشتری را به روز بعد منتقل می‌کند و اعلام می‌کند که بسته به زمان ارسال درخواست مشتری در روز می‌توان پاسخگویی به آن را امروز انجام داده و یا به روز بعد منتقل کرد. این مسئله به این گونه مشخص می‌گردد که برای هر یک از این مشتری‌ها با توجه به نوبت و تیم پاسخگویی که در آن برنامه‌ریزی شده است و با توجه به زمان انتقال بین مشتریان و زمان خدمت‌رسانی به آن‌ها یک زمان تعیین می‌گردد که عنوان می‌کند اگر مشتری در این زمان عنوان شده در روز جاری درخواست خود را صادر کرد که در روز جاری و طبق برنامه به آن خدمت‌رسانی می‌گردد و در غیر این صورت یعنی اگر بعد از زمان تعیین شده درخواست داد مشتری مورد نظر از برنامه حذف شده و در برنامه روز بعد قرار خواهد گرفت. برنامه‌ریزی انجام شده برای نمونه حل شده فوق و زمان مجاز مربوط به ارسال درخواست مشتریانی که می‌توانند در روز جاری خدمت‌رسانی گردند در جدول ۵ قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است از تعداد ۱۱ برنامه مربوط به تیم‌های پزشکی به اختصار ۵ برنامه ارائه شده است.

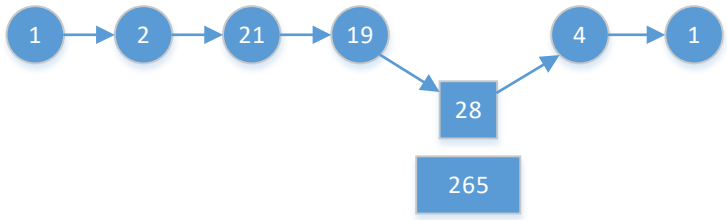
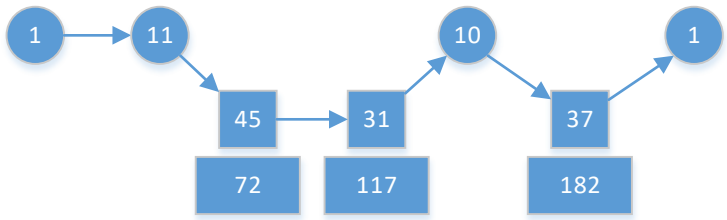
جدول ٤. ویژگی‌ها و نتایج مربوط به نمونه حل شده

نام نمونه	تعداد کل نقاط	تعداد دپو	تعداد نقاط با برنامه ریزی قطعی	تعداد نقاط با برنامه ریزی غیرقطعی	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تعداد نقاط پوشش داده شده غیرقطعی	تعداد تیم مورد نیاز	تعداد کل نقاط برنامه ریزی شده
A-n53-k7	۵۱	۱	۲۵	۲۵	۳۳۳۰	۷۲۰۰	۱۸	۱۱	٤۳

در شـــکل ۵ تعدادی از برنامه‌های مربوط به حل مدل مربوط به نمونه ذکر شـده به صـورت نمادین ارائه شـده اسـت. در این برنامه‌ها حرکت تیم‌های پزشـکی از گره ۱ که همان مرکز توزیع و برنامه‌ریزی است شروع شده و ترتیب اولویت خدمت‌رسانی به مشـتریان را بیان کرده و در انتها برگشـت تیم‌ها نیز به گره ۱ می‌باشد. مشتریانی که با نماد دایره مشخص گردیده‌اند آن دسته از مشـتریانی هسـتند که برنامه‌ریزی آن‌ها قطعی بوده و باید به همه آن‌ها خدمت‌رسـانی گردد. اما نقاطی که با مربع مشـخص گردیده‌اند دسـته‌ای از مشـتریان هسـتند که برنامه ریزی آن‌ها قطعی نیسـت. این نقاط اگر در برنامه‌ها وجود نداشـته باشـند به این معنی اسـت که به هیچ عنوان به این مشـتریان در روز جاری خدمت‌رسـانی نمی‌گردد و پاسـخگویی به آن‌ها قطعا به روز بعد موکول می شود. اما آن گروه از مشتریانی که در این برنامه‌ها حضور دارند به شرط اینکه درخواست آن‌ها در زمان تعیین شـده در مدل که در کادر مسـتطیل شـکل در زیر هر یک نوشته شده است صادر شود مطابق برنامه تعیین شده در روز جاری پاسـخ داده می‌شـوند و در غیر این صـورت یعنی اگر در زمان تعیین شـده درخواسـتی ارسـال نکنند برنامه ریزی آن‌ها به روز بعد موکول می‌گردد. به عنوان نمونه همانطور که در شـکل ۵ قابل مشاهده است در برنامه مربوط به تیم ۱ اگر دو مشتری با شـماره ۳۳ و ٤۹ به ترتیب تا دقیقه ۱٦٤ و ۲۲۳ از زمان شـروع حرکت درخواست خود را ارسال کنند این تیم موظف است که طبق برنامه تعریف شده به آن‌ها خدمت‌رسانی کند و در غیر این صـورت برنامه‌ریزی مربوط به آن‌ها به روز بعد موکول خواهد شـد. مشـخص اسـت که برنامه تیم ٤ فقط یکی از این نوع مشـتریان را و برنامه‌های ۲ و ۵ هریک سـه مشـتری را تحت پوشـش خود قرار داده‌اند. همانطور که از نتایج مشـخص اسـت بعضـی از برنامه‌ها مانند برنامه ۳ هیچ یک از نقاط مربوط به این نوع از مشـتریان را تحت پوشـش خود ندارد. این به این معنی است که تیم پزشکی شماره ۳ یک برنامه ثابت و مشخص دارد و در طول روز جاری چه درخواست جدیدی برسد و چه نرسد این تیم هیچ تغییری در برنامه خود نمی‌دهند.

جدول ۵. مختصری از برنامه‌های مربوط به جواب نمونه حل شده

برنامه۱	1 → 9 → 29 → 33 (164*) → 20 → 49 (223) → 8 → 1
برنامه۲	1 → 26 → 47 (115) → 7 → 25 → 30 (245) → 51 (323) → 1
برنامه۳	1 → 12 → 24 → 13 → 21 → 1

برنامه ٤	
برنامه ٥	

* حداکثر زمان صدور درخواست مشتری شماره ۳۳ برای پاسخگویی در روز جاری (دقیقه)

این تحقیق با توجه به دو عدد جریمه که در بخش مربوط به مدل مسئله به آن‌ها اشار شده است به حل می‌پردازد. این جریمه‌ها یکی مربوط به پاسخ‌دهی به مشتریان جدید در روز جاری ا ست که ریشه در تاخیر در خدمت‌ر سانی به سایر نقاط دارد و دیگری مربوط به عدم پا سخ‌دهی به این مشتریان در روز جاری می‌باشد که موجب هزینه‌هایی شامل ازدست رفتن مشتری، تاخیر در پاسخگویی، احتمال خالی ماندن ظرفیت تیم‌ها در روز جاری و احتمال عدم پوشش کامل مشتریان به دلیل محدودیت ظرفیت تیم‌ها می‌شود. در ادامه برای نشان دادن اختلاف بین این نگاه به مسئله یعنی در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در پاسخ به تقاضا با حالت معمول مسئله که تمامی درخواست‌های جدید را به روز بعد موکول می‌کند؛ جدول ٦ ارائه می‌گردد که در آن تعداد ۵ نمونه حل شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به توضیح ا ست که در تمامی نمونه‌های حل شده نقطه اول مربوط به مرکز توزیع و بقیه نقاط مشتریان هستند که نیمه اول این تعداد از مشتریان نیاز به پاسخگویی قطعی داشته و نیمه دوم آن‌ها از نوع دیگر هستند.

جدول ٦. مقایسه نتایج مربوط به نمونه‌های حل شده

نام نمونه	تعدادکل نقاط	مسئله در حالت با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری				مسئله در حالت بدون درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری			
		تعداد مشتریان قابل پوشش	هزینه کل	زمان حل (ثانیه)	GAP	هزینه کل	زمان حل (ثانیه)	GAP
A-n53-k7	٥١	١٨	٣٣٣٠	٧٢٠٠	٤٣٥	٣٩٩٨	٧٥٠	٣٧٥
A-n44-k7	٤١	١٥	٢٧٥١	٣٦٢٠	٣٣٢	٣٢٨٥	٦٦٥	٢٦٣
A-n32-k5	٣١	٨	٢٠٣١	١٧٠٦	٢٣٧	٢٥٣٩	٤٣٢	١٩٦
P-n23-k8	٢١	٨	١٣٢٣	٣٨٧	١٤٨	١٦٥٢	٢٢٣	٨٤
P-n16-k8	١٥	٧	١٠٦٠	١٨٦	١٠٩	١٢٦٨	١٠٧	٨٣

با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ٦ به وضوح می‌توان تاثیر موثر در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در مدل را بر روی کاهش هزینه‌های کل مدل مشاهده کرد. در این مقایسات به دلیل زمانبر بودن حل نمونه‌های بزرگتر از ۵۱ نقطه ارائه نشده است ولی با توجه به نمونه‌های ارائه شده می‌توان دریافت که در نمونه‌های بزرگتر می‌توان بهبود بسیار بیشتری را در تابع هدف مشاهده کرد. البته در این حالت از مدل زمان حل بسیار بیشتر نسبت به حالت معمول است که این امر به دلیل تعداد نقاط مربوطه است. یعنی به عنوان مثال در نمونه اول که ۵۰ مشتری برای آن تعریف شده است در حالت معمول مدل این نمونه را برای ۲۵ مشتری حل می‌کند. بعنی ۲۵ مشتری که غیرقطعی هستند اصلاً برنامه‌ریزی نشده و به روز بعد موکول می‌گردند.

۵- نتیجه‌گیری

رشد روزافزون شبکه‌های سیار در جوامع کنونی برای خدمت‌رسانی در زمینه‌های مختلف اعم از فروش کالا، خدمات نظافتی، خدمات پزشکی و سایر خدمات چشمگیر است. می‌توان گفت مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یک جزء جدا نشدنی در این نوع از شرکت‌ها می‌باشد که به دنبال بهترین راه برای پاسخگویی به درخواست مشتریان از دو منظر هزینه و سرعت است. همچنین امروزه یکی از ارکان اصلی موفقیت شرکت‌ها وجود مزیت رقابتی انعطاف‌پذیری می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده این تحقیق به بررسی مسئله مسیریابی مربوط به یک سیستم شبکه سیار پزشکی که خدمات پزشکی را در محل به مشتریان ارائه می‌دهد می‌پردازد. در این تحقیق با یک نگرش جدید به مبحث انعطاف‌پذیری مربوط به پاسخ تقاضای مشتریان و نحوه خدمت‌رسانی به آن‌ها ارائه شده است. در روال معمول این سیستم‌ها برنامه‌ریزی مربوط به پاسخگویی به تقاضا به این صورت است که در روز جاری که برنامه ریزی برای آن صورت می‌گیرد، صرفاً درخواست‌های واصله از قبل برنامه‌ریزی می‌گردند ولی این تحقیق مدلی ارائه می‌کند که طی آن با شرایطی می‌توان برنامه مربوط به درخواست‌های واصله را در همان روز پاسخ داد. این امر در شرایطی اتفاق می‌افتد که نه تنها باعث از دست رفتن مشتریان نمی‌شود بلکه هزینه‌های مربوطه را نیز کاهش می‌دهد. این نگاه باعث می‌گردد که بتوان رویه مناسب‌تری در پاسخ به تقاضای رسیده اتخاذ کرد. این نوع از پاسخگویی می‌تواند باعث شود که پاسخگویی به مشتریان با سرعت بیشتری انجام گردد که موجب رضایت بیشتر مشتریان می‌گردد. همچنین در بخش‌های نهایی این تحقیق به تفصیل بیان گردید که صرفه‌جویی حاصل از این مدل نسبت به مدل در شرایط عادی چه میزان چشمگیری دارد. با توجه به اهمیت و کاربرد موضوع مطرح شده در این تحقیق محققان می‌توانند این موضوع را با در نظر گرفتن اهداف دیگر مانند کاهش زمان خدمت‌رسانی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی گسترش دهند. همچنین در نظر گرفتن یک سیستم صف برای درخواست‌های واصله می‌تواند گام موثری را در پیشبرد این مسئله بردارد.

٦-مراجع

-Atasoy, B., T. Ikeda, and M.E. Ben-Akiva, (2016). Optimizing a Flexible Mobility on Demand System. *Transportation Research Record,* 2563(1): 76-85.

-Archetti, C., E. Fernández, and D.L. Huerta-Muñoz, (2017). *The Flexible Periodic Vehicle Routing Problem.* Computers & Operations Research, 85: 58-70.

-Archetti, C., E. Fernández, and D.L. Huerta-Muñoz, (2018). A two-phase solution algorithm for the Flexible Periodic Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research,* 99: 27-37.

-Al Theeb, N. and C. Murray, (2017). Vehicle routing and resource distribution in postdisaster humanitarian relief operations. *International Transactions in Operational Research,* 24(6): 1253-1284.

-Dantzig, G.B. and J.H. Ramser, (1959). The truck dispatching problem. *Management Science,* 6(1): 80-91.

-Henke, T., M.G. Speranza, and G. Wäscher, *A. (2019).* branch-and-cut algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *Annals of Operations Research,* 275(2): 321-338.

-Li, J., Y. Li ,and P.M. Pardalos, (2016). Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. *Journal of Combinatorial Optimization,* 31(2): 515-532.

-Rothenbächer, A. K., (2019). Branch-and-price-and-cut for the periodic vehicle routing problem with flexible schedule structures. *Transportation Science,* 2019. 53(3): 850-866.

-Popović, D., M. Vidović, and G. Radivojević, (2012). Variable neighborhood search heuristic for the inventory routing problem in fuel delivery. *Expert Systems with Applications,* 39(18): 13390-13398.

-Toth, P. and D. Vigo, (2002). The vehicle routing problem. *SIAM.*

-Taş, D., O. Jabali, and T. Van Woensel, (2014). A vehicle routing problem with flexible time windows. *Computers & Operations Research,* 52: 39-54.

-Defryn, C., K. Sörensen, and T. Cornelissens, (2016). The selective vehicle routing problem in a collaborative environment. *European Journal of Operational Research,* 250(2): 400-411.

-Darvish, M., et al., (2019). Flexible two-echelon location routing problem. *European Journal of Operational Research,* 277(3):1124-1136.

-Estrada-Moreno, A., et al., (2019). Biased-randomized iterated local search for a multiperiod vehicle routing problem with price discounts for delivery flexibility. *International Transactions in Operational Research,* 26(4): 1293-1314.

-Farahbakhsh, A. and M.A. Forghani, (2019). Sustainable location and route planning with GIS for waste sorting centers, case study: Kerman, Iran. *Waste Management & Research,* 37(3): 287–300.

-Huang, Y., et al., (2017). Time-dependent vehicle routing problem with path flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological,* 95: 169-195.

-Henke, T., M.G. Speranza, and G. Wäscher, (2015). The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *European Journal of Operational Research,* 246(3): 730-743.

A New Approach in the Vehicle Routing in Mobile Networks with Flexibility in Response to Uncertain Demand

Amin Farahbakhsh, Ph.D., Grad., 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: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

The advancement of technology and communications has provided the platform for the mobile networks to create the effective services in the social services debate. One of these mobile networks is about providing on-site medical services to the clients. The topic of the vehicle routing is an integral part of this type of organization. This research proposes a new approach in addressing the problem of vehicle routing based on the mobile medical services network and considering flexibility in responding to uncertain demands. Solving the model in both the traditional and the corresponding models of this study and comparing the results clearly shows that this model, in addition to the better and faster customer service, leads to more and more customer satisfaction and a significant reduction in the costs. Cost reduction is a potential goal of all companies as service levels increase, and this is of the particular importance to this research.

Keywords: Vehicle Routing, Mobile Networking, Flexibility