

مدل بهینه سازی چند دوره ای تخصیص - مسیریابی پرسنل پزشکی به منظور ارائه خدمات سلامت

سیدمحمد تقی فاطمی قمی،* احسان عرب زاده،** بهروز کریمی***

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۱

چکیده

سرویس دهی خدمات پزشکی در منزل از اهمیت بالایی در جوامع امروزی برخوردار است. در اکثر موسسات فعال این حوزه در ایران از دیدگاه سنتی برای برنامه ریزی و مدیریت پرسنل پزشکی و تعیین ترتیب ویزیت بیماران استفاده می شود که این امر در غالب اوقات باعث افزایش هزینه ها و کاهش رضایت بیماران می گردد. در این تحقیق یک مدل برنامه ریزی ریاضی چند دوره ای مسیریابی - تخصیص پرسنل پزشکی به منظور ویزیت بیماران و ارائه خدمات پزشکی به آنها بررسی شده است. در نظر گرفتن ارتباط و عدم ارتباط ویزیت های یک بیمار به یکدیگر، چند مبدای فرض کردن مدل در کنار چند دوره ای بودن آن از جمله نوآوری های این مقاله است. هدف مدل پیشنهادی حداقل سازی هزینه های کل موسسه است. مدل در مقیاس کوچک با نرم افزار گمز حل شده است. برای حل مدل در مقیاس بزرگ الگوریتم توسعه داده شده جستجوی همسایگی متغیر پیشنهاد شده است و عملکرد آن با دو الگوریتم شبیه سازی تبرید و سیستم کلونی مورچگان مقایسه شده است. نتایج نشان از کاهش هزینه ها و عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی دارد.

کلمات کلیدی: مسیریابی، تخصیص، مراقبت های پزشکی در منزل، مدل ریاضی، الگوریتم فرا ابتکاری

* استاد گروه تولید صنعتی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (نویسنده مسئول)

Fatemi@aut.ac.ir

** کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

*** استاد گروه تولید صنعتی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مقدمه

امروزه به دلیل کاهش نرخ تولد و افزایش امید به زندگی در افراد، تعداد افراد مسن و نیازمند به مراقبت‌های پزشکی افزایش یافته است. برای مثال در کشورهای اتحادیه اروپا، سهم جمعیتی افراد مسن تر از ۶۰ سال، از ۱۷ درصد به ۲۲ درصد رسیده است و انتظار می‌رود این میزان به ۳۲ درصد در سال ۲۰۳۰ برسد (بریکر و همکاران، ۲۰۱۶). تنوع نیازهای این گروه از افراد، تخصصی و حساس بودن برخی از این مراقبت‌ها در کنار مشغله‌های مختلف اطرافیان بیماران سبب روی آوردن به پزشکان و افراد خبره در این عرصه شده است. برای موسساتی که مسئول ارائه خدمات پزشکی و بالینی به بیماران هستند، بسیار حیاتی است که تخصیص پرسنل پزشکی به بیماران و تعیین ترتیب ویزیت هر یک از بیماران به گونه‌ای باشد که هم هزینه‌های عملیاتی سیستم حداقل شود و هم کیفیت سرویس‌دهی به بیماران به صورت مستمر بهبود یابد تا از این طریق بتوانند بیشترین سهم را از بازار رو به رشد این صنعت کسب نمایند. بنابراین توجه به این امر مهم و لزوم برنامه‌ریزی صحیح در این حوزه بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. این موسسات که وظیفه ارائه طیف گسترده‌ای از خدمات را به صورت حضوری در منزل بیماران برعهده دارند، از تعدادی پرسنل با سطوح توانمندی متفاوت بهره می‌برند که هر یک از این پرسنل بنا بر سطح تحصیلات، تجربه و مدت زمانی که می‌توانند در اختیار موسسه باشند، به ویزیت و مداوای بیماران می‌پردازند. بیماران مختلف نیز در کنار نیازمندی‌های پزشکی خود همچون تعداد ویزیت مورد درخواست، ترجیحات متفاوتی دارند که باید تا حد ممکن به آنها پاسخ داده شود. برای مثال برخی از بیماران به دلایل مختلف، خواستار ویزیت شدن توسط پرسنل خانم می‌باشند و یا امکان ویزیت شدن در ساعات مشخصی از روز را دارند که این ترجیحات می‌بایستی در برنامه‌ریزی موسسه مورد توجه قرار گیرد (کارلو و همکاران، ۲۰۱۴، چاهد و همکاران، ۲۰۰۹، کرگوسین و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر در نظر گرفتن کلیه شرایط موجود در ادبیات موضوع، در این مقاله به عنوان نوآوری فرض شده است که هر یک از پرسنل از منزل خود شروع به حرکت نموده و در نهایت به

منزل خود باز می گردد (مدل چندمبدایی^۱). مقالات پیشین فرض تک مبدایی بودن را برای مدل خود ارائه نموده اند. آنها فرض کرده اند که تمامی پرسنل از مرکز ارائه دهنده خدمات پزشکی شروع به حرکت می کنند و در نهایت به آنجا باز می گردند. در حالی که این فرض بیانگر شرایط واقعی نیست. فرض اساسی دیگری که از دیگر نوآوری های این مقاله محسوب می شود، تقسیم ویزیت های روزانه بیماران به دو دسته ویزیت مرتبط و نامرتبط به ویزیت قبلی بیمار است. یک بیمار ممکن است در یک روز به بیش از یک ویزیت نیاز داشته باشد و ویزیت دوم به دلایلی می بایستی با وقفه زمانی مشخصی از ویزیت اول انجام گیرد (ویزیت های مرتبط به هم). برای مثال ممکن است بیماری در شیفیت صبح نیاز به ویزیت به منظور گرفتن آزمایش خون داشته باشد و می بایستی در فاصله حداقل ۳ ساعت بعد از این ویزیت و حداکثر ۴ ساعت بعد از ویزیت اول، ویزیت دوم به منظور دادن دارو به بیمار انجام شود. همچنین ممکن است نیازهای درمانی روزانه بیمار به یکدیگر وابسته نباشند و با هر وقفه زمانی از یکدیگر که انجام شوند مشکلی برای بیمار به وجود نیاید (ویزیت های نامرتبط به هم). اجتماع نوآوری های این مقاله با فرضیات موجود در این حوزه، سبب نزدیک شدن مدل نهایی به فضای واقعی، کاهش هزینه های سیستم و افزایش رضایتمندی بیماران خواهد شد.

طرح کلی مطالب ارائه شده در مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲ تحقیقات انجام شده در این حوزه بررسی شده است. مدل ریاضی پیشنهادی در بخش ۳ آورده شده است. بخش ۴ به توضیح روش حل پیشنهادی پرداخته است. نتایج عددی و تحلیل آن به همراه مقایسه روش حل پیشنهادی با دو الگوریتم شبیه سازی تبرید^۲ و کلونی مورچگان^۳ نیز در بخش ۵ آمده است و نهایتاً بخش ۶ مقاله، به نتیجه گیری و پیشنهادات برای مطالعات و پژوهش های آتی اختصاص یافته است.

1. Multi depot
2. Simulated annealing
3. Ant colony system

مروری بر مطالعات پیشین

بررسی در این حوزه برای اولین بار به سال ۱۹۹۷ بر می‌گردد که (بگور و همکاران، ۱۹۹۷) مدلی را به منظور برنامه‌ریزی و مسیریابی حرکت پرستاران در موسسات ارائه دهنده خدمات پزشکی در آمریکا بدون در نظر گرفتن پنجره زمانی ارائه دادند. (بریکر و همکاران، ۲۰۱۶) در مقاله خود که به مساله تخصیص و مسیریابی پرسنل پزشکی پرداخت، این مساله دو هدف حداقل کردن کل هزینه‌ها شامل هزینه‌های حمل و نقل پرسنل و هزینه اضافه کاری، و حداقل کردن نارضایتی بیماران که از تخصیص نامناسب پرسنل به بیماران و انحراف از پنجره زمانی خواسته شده توسط بیماران را بدست می‌آورد مورد توجه قرار دادند. (هیرمن و همکاران، ۲۰۱۵) در مقاله خود که با هدف تخصیص بهینه پرسنل پزشکی به بیماران ارائه شده است، رویکردی دو مرحله‌ای را پیشنهاد نمودند. راه حل تصادفی تولید شده در مرحله اول، در مرحله دوم با بکارگیری هر یک از ۴ الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید، ممتیک، جستجوی پراکنده و جستجوی همسایگی متغیر بهبود می‌یابد و در نهایت در زمان مناسبی به جوابی با کیفیت دست می‌یابد. (مانکوسکا و همکاران، ۲۰۱۴) در مقاله‌ای که به بررسی مساله تخصیص و مسیریابی پرسنل پزشکی می‌پردازد، بیماران را به دو دسته تقسیم بندی نمودند: (۱) بیمارانی که نیازمند کار تک پرستاری هستند و (۲) آنهایی که نیاز به حضور دو پرستار دارند. دسته اخیر خود نیز به دو زیر دسته تقسیم می‌شود، آنهایی که به حضور همزمان دو پرستار در منزل خود نیازمند هستند و بیمارانی که به حضور دو پرستار با یک وقفه زمانی بین آنها، نیازمندند. (راموس و همکاران، ۲۰۱۴) یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح را به منظور تخصیص دوره‌ای پرستاران و خدمه و نیز مسیریابی ویزیت بیماران ارائه نمودند. مدل آنها که برای سه گروه پزشکان، پرستاران و فیزیوتراپان ارائه شده است، با هدف حداقل نمودن زمان صرف شده برای ویزیت بیماران طرح‌ریزی شده است. (نوواک و همکاران، ۲۰۱۳) در مقاله خود با تاکید بر این مطلب که ایجاد یک رابطه مداوم بین پرستار با بیماران سبب بهبود در فرآیند درمانی آن بیمار می‌شود، شرایطی را مهیا نمودند که تا حد ممکن بیمار به یک پرستار مشخص تخصیص یابد تا بدین ترتیب هم بیمار شرایط بهتری را تجربه کند و

هم پرستار به طور کامل به روند درمانی بیمار احاطه داشته باشد. همچنین آنها در مقاله خود فرض کردند که مدت زمان ویزیت رابطه عکس با تعداد ویزیت در هفته دارد و بیماری که به دفعات بیشتری در یک هفته ویزیت می شود، مدت زمان کمتری ویزیت خواهد شد. هیچ یک از تحقیقات پیشین، فرضیات ذکر شده در این مقاله را به صورت توامان در نظر نگرفته اند. به ویژه بررسی امکان چند ویزیت برای یک بیمار در یک روز (ویزیت های وابسته به هم) متناسب با نوع بیماری و شدت آن، در نظر گرفتن پرسنل تمام وقت و نیمه وقت موسسه، میزان تجربه و تبحر هر یک از این پرسنل، در کنار چند مبدایی فرض کردن مدل، فضای جدیدی را برای طرح مساله مسیریابی تخصیص ارائه خدمات سلامت در منزل ایجاد می کند که در زیر توضیح داده شده است.

مساله ارائه خدمات پزشکی در منزل

تشریح مساله

مدل ارائه شده در این مقاله بر روی گراف $G = (V, A)$ پیاده سازی شده است که $V = \{0_w, 1, 2, 3, \dots, n_w\}$ شامل منازل پرسنل و منازل بیماران گره های این گراف هستند و $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$ مسیرهای ارتباطی این گره ها یا همان کمان های گراف می باشد. بیماران در هر روز به یک یا دو ویزیت نیاز دارند و نهایتاً در بازه زمانی مورد بررسی به تعداد مشخصی ویزیت نیازمند خواهند بود که این تعداد با f_i نشان داده می شود. برنامه درمانی هر یک از بیماران در آغاز هفته مشخص است و بنا بر فرآیند درمانی بیمار، برنامه ریزی انجام می شود. پارامترهای مرتبط با پرسنل در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱). پارامترهای مربوط به پرسنل درمانی موسسه

هزینه جابجایی پرسنل W با توجه به وسیله حمل و نقلی او و فاصله دو گره I و J	C_{ij}^w
هزینه ویزیت بیمار I توسط پرسنل W	Ca_i^w
هزینه هر واحد زمانی اضافه کاری پرسنل W	Cf_w
برابر ۱ است اگر پرسنل W در روز d در اختیار موسسه باشد. و برابر صفر است اگر در روز d پرسنل حاضر نباشد.	γ_w^d
برابر ۱ است اگر پرسنل W بتواند بیمار I را ویزیت نماید. و در غیر این صورت برابر صفر می باشد.	β_i^w
پرسنل W مجاز است فعالیت خود در روز d را پس از این زمان شروع نماید.	q_w^d
پرسنل W می بایستی فعالیت خود در روز d را قبل از این زمان به اتمام برساند.	q'_w^d
زمان مجاز فعالیت هر یک از پرسنل در یک روز	LT
مدت زمانی که یک پرسنل مجاز به اضافه کاری در یک روز است	PT

پارامترهای مربوط به بیماران نیز در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲). پارامترهای مربوط به بیمار i

برابر ۱ است اگر بیمار i در روز d به سرویس نوع b نیاز داشته باشد و در غیر این صورت برابر صفر است	S_{ib}^d
زودترین زمان مورد درخواست بیمار i در روز d	e_i^d
مجموعه بیمارانی که در یک روز به بیش از یک ویزیت نیاز دارند	δ
دیرترین زمان مورد درخواست بیمار i در روز d	l_i^d
مدت زمان ویزیت بیمار I توسط پرسنل W	TS_i^w
مدت زمان جابجایی از منزل بیمار I به منزل بیمار J توسط پرسنل W	h_{ij}^w
حداقل فاصله زمانی بین دو ویزیت بیمار i (I و J دو گره ظاهرا متفاوت در یک نقطه جغرافیایی هستند، یعنی بیانگر منزل یک بیمار هستند)	V_{ij}^{min}

<p>حداکثر فاصله زمانی بین دو ویزیت بیمار i</p> <p>تعداد ویزیت نوع b مورد نیاز بیمار i در دوره زمانی برنامه ریزی شده</p> <p>($b = 1$: چکاب هفتگی، $b = 2$: گرفتن آزمایش، $b = 3$: تزریقات و دادن دارو)</p>	<p>V_{ij}^{max}</p> <p>f_i^b</p>
---	--

همچنین جدول (۳) متغیرهای تصمیم گیری مدل را بیان می کند:

جدول (۳). متغیرهای تصمیم گیری

<p>برابر ۱ است اگر پرسنل w در روز d از منزل بیمار i به منزل بیمار j برود و در غیر این صورت برابر صفر است.</p> <p>زمان شروع ویزیت بیمار i توسط پرسنل w در روز d</p> <p>مدت زمان اضافه کاری پرسنل w در روز d</p>	<p>x_{ij}^{wd}</p> <p>t_i^{wd}</p> <p>Ot_w^d</p>
---	---

مدل ریاضی مساله

مدل ریاضی مساله به شرح زیر است:

$$Min \sum_i \sum_j \sum_w \sum_d c_{ij}^w x_{ij}^{wd} \quad (1)$$

$$+ \sum_i \sum_{j \in V - \{0_w\}, \{n_w\}} \sum_w \sum_d x_{ij}^{wd} Ca_j^w$$

$$+ \sum_w \sum_d C_{f_w} Ot_w^d$$

$$\sum_{i \in \{0_w\}} \sum_j x_{ij}^{wd} = 1 \quad \forall w, d(2)$$

$$\sum_i \sum_{j \in \{n_w\}} x_{ij}^{wd} = 1 \quad \forall w, d(3)$$

$$\sum_i x_{ik}^{wd} = \sum_j x_{kj}^{wd} \quad \forall k \in V - \{0_w\}, \{n_w\}, w, d(4)$$

$$\sum_j x_{ij}^{wd} \leq \gamma_w^d \beta_i^w S_{ib}^d \quad \forall i \in V$$

$$\sum_j \sum_w x_{ij}^{wd} \leq 1 \quad \forall i \in V$$

$$e_i^d \leq t_i^{wd} \leq l_i^d \quad \forall i \in V$$

$$q_w^d \leq t_i^{wd} \leq q_w^d \quad \forall i \in V$$

$$t_i^{wd} + (h_{ij}^w + TS_j^w)x_{ij}^{wd} \leq t_j^{wd} + M(1 - x_{ij}^{wd}) \quad \forall (i, j) \in V$$

$$e_i^d + \sum_w t_i^{wd} + V_{ij}^{min} \leq \sum_w t_j^{wd} \quad \forall (i, j) \in \delta \quad d(10)$$

$$\sum_w t_j^{wd} \leq e_j^d + \sum_w t_i^{wd} + V_{ij}^{max} \quad \forall (i, j) \in \delta \quad d(11)$$

$$x_{ij}^{wd} = 0 \quad \forall i, j (i = j) \quad w \quad d(12)$$

$$\sum_j \sum_d \sum_w x_{ij}^{wd} S_{ib}^d = f_i^b \quad \forall i \quad b(13)$$

$$\sum_i \sum_j TS_{ij}^w x_{ij}^{wd} - LT = Ot_w^d \quad \forall w \quad d(14)$$

$$Ot_w^d \leq PT \quad \forall w \quad d(15)$$

$$x_{ij}^{wd} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, w \quad d(16)$$

$$t_i^{wd} \cdot Ot_w^d \geq 0 \quad \forall i, w \quad d(17)$$

بخش اول تابع هدف به محاسبه هزینه جابجایی بین گره‌های موجود می‌پردازد. نظر به اینکه پرسنل مختلف با وسایل حمل و نقل مختلف به ویزیت بیماران می‌پردازند، هزینه انتقال بین دو گره متفاوت است. جمله دوم تابع هدف هزینه ویزیت هر یک از بیماران را محاسبه می‌کند

که در آن مشخصات بیمار (شدت بیماری و تخصصی بودن نوع درمان) و میزان تخصص هر یک از پرسنل مورد توجه قرار می گیرد و در نهایت جمله سوم تابع هدف هزینه اضافه کاری پرسنل را در دوره برنامه ریزی شده محاسبه می نماید. محدودیت (۲) و (۳) شروع حرکت و پایان حرکت یک پرسنل را مشخص می کند. هر پرسنل حرکت را از منزل خود آغاز می کند و در انتها به منزل خود باز می گردد. محدودیت (۴) تعادل جریان را نشان می دهد؛ به این معنا که اگر پرسنلی به منزل یک بیمار وارد شد، پس از ویزیت بیمار از منزل او خارج می شود. محدودیت (۵) تضمین می کند که یک پرسنل به یک بیمار در یک روز خاص، زمانی تخصیص می یابد که سه شرط زیر به صورت هم زمان برقرار باشند: (۱) اینکه در آن روز بیمار به ویزیت نیاز داشته باشد (۲) در آن روز پرسنل مرخصی نباشد و در اختیار موسسه باشد و (۳) آن پرسنل توانایی کیفی لازم برای درمان آن بیمار را داشته باشد. محدودیت شماره (۶) بیانگر آن است که بیمار در روزی که نیاز به ویزیت دارد، توسط پرسنل موسسه ویزیت خواهد شد. محدودیت (۷) زمان رسیدن پرسنل درمانی به منزل بیمار را مشخص می کند. پنجره زمانی در نظر گرفته شده برای بیمار با توجه به اهمیت درمان، پنجره زمانی سخت در نظر گرفته شده است. محدودیت (۸) زمان شروع سرویس دهی و پایان سرویس دهی به بیمار را توسط هر یک از پرسنل نشان می دهد. این محدودیت موجب می شود که بتوانیم پنجره زمانی پرسنل را نیز مورد توجه قرار دهیم. محدودیت (۹) زمان دو ویزیت متوالی توسط یک پرسنل در یک روز را نشان می دهد. این محدودیت از ایجاد زیرتور در مسیر هر یک از پرسنل جلوگیری می نماید. محدودیت (۱۰) و (۱۱) مربوط به دو ویزیت متوالی مرتبط به یکدیگر در یک روز برای یک بیمار است. برخی از بیماران به دو ویزیت در یک روز نیاز دارند که این دو ویزیت می بایستی با یک حداقل و حداکثر وقفه زمانی از یکدیگر انجام شوند. محدودیت (۱۲) تضمین می کند که جابجایی از منزلی به همان منزل صورت نگیرد. محدودیت (۱۳) مشخص می کند که موسسه می بایستی به تعداد دفعات ویزیتی که هر یک از بیماران به آن نیاز دارد، جوابگو باشد. این محدودیت هر دو نوع ویزیت مرتبط و نامرتب به هم را در نظر می گیرد. محدودیت (۱۴) و (۱۵) نیز به محاسبه میزان اضافه کاری

پرسنل و محدودیت زمانی اضافه کاری هر یک از پرسنل می‌پردازد. محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) نیز نوع متغیرهای تصمیم‌گیری را مشخص می‌نماید.

روش حل

به منظور حل مدل در این مقاله، برای مسایل در سائز کوچک از نرم‌افزار گمز و برای حل در مقیاس متوسط و بزرگ از الگوریتم سیستم کلونی مورچگان که از دسته الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت است، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید که از الگوریتم‌های تک‌جوابی می‌باشد و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر استفاده شده است.

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پیشنهادی

این مقاله به ارائه یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پایه‌ای پرداخته است. مراحل این الگوریتم عبارتند از: آغاز و آماده‌سازی برای شروع، جستجوی محلی و نمایش جواب‌ها.

آغاز و آماده‌سازی برای شروع

در مرحله اول، به منظور آغاز و آماده‌سازی برای شروع الگوریتم یک سری جواب اولیه شامل مسیر اولیه و زمان خروج هریک از پرسنل از منزل انتخاب می‌شوند. مسیر اولیه: مسیر اولیه براساس روش کلارک و رایت (لسگارد، ۱۹۹۷) بدست آورده شده است. به منظور استفاده از این الگوریتم، برای هر روز از فعالیت موسسه، گام‌های زیر تکرار می‌شود:

گام ۱. با توجه به تعریف پارامترها و مجموعه‌های موجود در مدل، پرسنل w که دارای کوچکترین اندیس در بین پرسنل‌های حاضر در آن روز می‌باشد، مسیر خود را از گره 0_w (منزل پرسنل w) شروع می‌نمایند. سپس به ازای هر گره $i \in V$ ، زیرتوره‌های $0_w - i - 0_w$ تشکیل می‌گردد.

گام ۲. برای هر جفت گره $i \in V$ و $j \in V$ به شرط اینکه $i \neq j$ و $i \neq 0_w$ و $j \neq 0_w$ باشد، مقدار صرفه جویی در هزینه که از طریق رابطه (۱۸) قابل محاسبه است، به دست می آید. محاسبه صرفه جویی ها به منظور ادغام جفت زیرتورهای $0_w - i - 0_w$ و $0_w - j - 0_w$ و تبدیل آن به یک تور $0_w - i - j - 0_w$ انجام می شود.

$$S_{ijk} = c_{i0_p}^w + c_{0_pj}^w - c_{ij}^w \quad \forall w. i, j \in V. i \neq j. i \neq 0_w. j \neq 0_w \quad (18)$$

گام ۳. مقادیر صرفه جویی برای هر منطقه به ترتیب نزولی مرتب می شود.

گام ۴. عمل ادغام زیرتورها به ترتیب نزولی صرفه جویی ها، برای یال های $0_w - j$ و $i - 0_w$ در صورتی انجام خواهد شد که دو شرط زیر به صورت همزمان برقرار باشد: اولاً پرسنل w توانایی کیفی لازم برای ویزیت بیماران j و i را داشته باشد، ثانیاً، مجموع زمان ویزیت هر یک از گره های موجود در مسیر و زمان جابجایی پرسنل در مسیر از مجموع زمان قانونی و اضافه کاری آن پرسنل بیشتر نشود. در جواب اولیه فرض شده است که کلیه پرسنل حداکثر به اندازه مجموع مدت زمان قانونی و اضافه کاری می توانند به سرویس دهی پردازند.

گام ۵. در صورت باقی ماندن تعدادی از گره ها، مدل پرسنل بعدی که دارای کوچکترین اندیس در بین پرسنل های باقیمانده در آن روز می باشد را انتخاب کرده و به گام ۴ برمی گردد. رویه فوق تا زمانی ادامه می یابد که کلیه پرسنل موجود در آن روز تخصیص یابند یا کلیه بیماران خدمت دهی شوند.

جواب بدست آمده تاکنون (S_0) به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته ($S = S_0$) و مقدار تابع هدف $f_d(S)$ برای آن محاسبه می شود. سپس مرحله بعد آغاز می گردد.

$$f_d(s) = \sum_p \sum_{(i,j) \in V} d_{ij} x_{ij}^{wd} \quad (19)$$

جستجوی محلی

در الگوریتم پیشنهادی و در مرحله جستجوی محلی، به منظور بهبود جواب‌ها از چهار عملگر داخل مسیری و دو عملگر بین مسیری استفاده شده است. ترتیب اعمال عملگرها به این صورت است که ابتدا به صورت تصادفی یکی از عملگرهای اول و دوم بین مسیری اجرا می‌شوند و سپس یکی از دو ترکیب توضیح داده شده برای عملگر داخل مسیری برای هر مسیر اعمال می‌شود.

عملگر تولید همسایگی بین مسیری اول: از یک مسیر یک گره به طور تصادفی برای جابجایی انتخاب می‌شود. از بین سایر مسیرها، مسیری که بیشترین مقدار عبارت زیر را دارد به عنوان مسیر مقصد انتخاب می‌شود:

$$\sum_{i \in R} [(l_i^d - (t_i^w d + [TS]_{ij}^w))] \quad R \text{ مسیر انتخابی} \quad (20)$$

گره انتخابی از مسیر مبدا (مثلاً گره a) پیش از نزدیک‌ترین گره مسیر مقصد وارد می‌شود. در صورتی که تعداد ساعت ویزیت بیماران این مسیر از میزان مجاز فعالیت پرسنل (تعداد ساعات قانونی به اضافه ساعات اضافه کاری) تجاوز کرد، یکی از گره‌های مسیر مقصد (مثلاً گره b) به طور تصادفی برای انتقال به مسیر مبدا به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اضافه ویزیت مسیر مقصد رفع شده و نیز محدودیت میزان فعالیت هر یک از پرسنل مسیر مبدا نقض نگردد. گره b پیش از نزدیک‌ترین گره مسیر مبدا وارد می‌شود تا مشکل اضافه کاری مسیر فعلی رفع گردد.

عملگر تولید همسایگی بین مسیری دوم: از هر یک از مسیرهای تشکیل شده یک گره به طور تصادفی انتخاب می‌شود (مثلاً گره a). از بین مسیرهایی که به اندازه مدت ویزیت مورد درخواست بیمار a ظرفیت خالی دارند، یک مسیر به طور تصادفی انتخاب می‌شود و گره a قبل از نزدیک‌ترین گره مسیر مقصد به خود، جایگذاری می‌شود. همچنین چهار عملگر درون مسیری استفاده شده عبارتند از: 1-Move، Exchange I، Exchange II و 2-Opt که در جدول (۴) تعریف و در شکل (۱) نمایش داده شده است.

جدول (۴). تعریف عملگرهای مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی

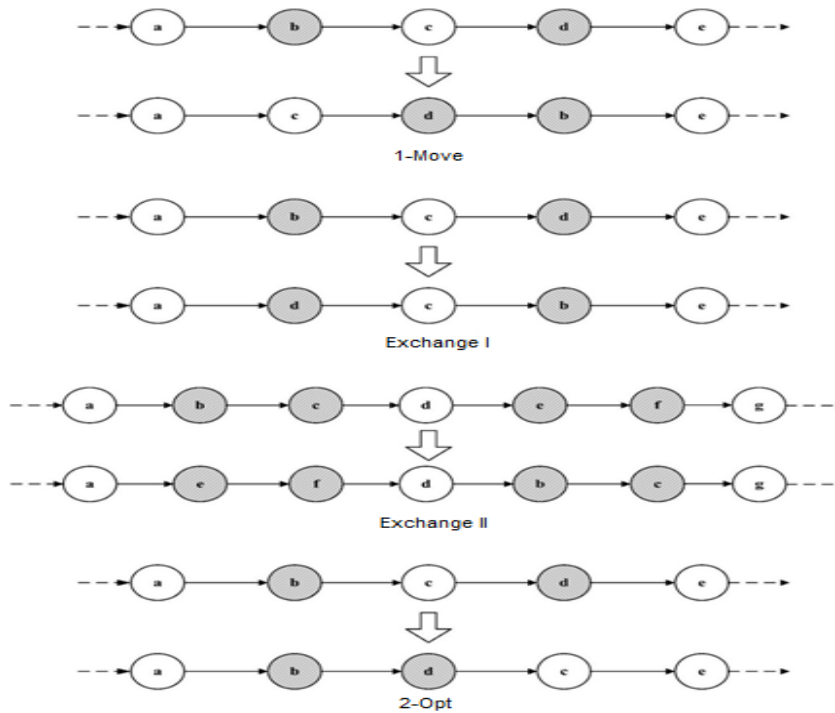
اپراتور	تعریف
1-Move	برای دو گره مشخص، گره اول از مکان فعلی خود حذف و به مکان بعد از گره دوم منتقل می شود (شکل ۱)
Exchange I	دو گره مشخص، مکان قرار گرفتن خود را با هم تعویض می کنند (شکل ۱)
Exchange II	برای دو گره مشخص، مکان گره اول و پس نیاز آن، با مکان گره دوم و پس نیاز آن تعویض می شود (شکل ۱)
2-Opt	برای دو گره مشخص، کمان واصل این دو گره و پس نیازهای آن‌ها حذف می شود و آن دو گره نیز به هم متصل می شوند. سپس گره‌های پس نیاز نیز به هم متصل می شوند و در انتها زنجیره بین پس نیاز گره اول و پس نیاز گره دوم برعکس می شود (شکل ۱)

دو ترکیب بهینه مورد استفاده عملگرها نیز در جدول (۵) نشان داده شده است که به صورت احتمالی در هر تکرار از یکی از آنها استفاده شده است.

جدول (۵). معرفی ترکیب‌های مختلف جستجوی محلی

ترکیب	جزئیات
C 1	در این ترکیب، ابتدا الگوریتم یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۴ تولید می کند و پس از آن: (۱) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۱ باشد، اپراتور 1-Move اجرا می شود. (۲) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۲ باشد، اپراتور 2-Opt اجرا می شود. (۳) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۳ باشد، اپراتور Exchange I اجرا می شود. (۴) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۴ باشد، اپراتور Exchange II اجرا می شود.
C 2	در این ترکیب، ابتدا الگوریتم یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۴ تولید می کند و پس از آن: (۱) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۱ باشد، فقط اپراتور Exchange I اجرا می شود. (۲) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۲ باشد، ابتدا Exchange II و پس از آن 1-Move اجرا می گردد.

- ۳) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۳ باشد، به ترتیب اپراتورهای Exchange I، Move و 2-Opt اجرا می‌شوند.
- ۴) در صورتی که عدد تولید شده برابر با ۴ باشد، به ترتیب اپراتورهای Exchange I، Move، 2-Opt و Exchange II اجرا می‌شوند.



شکل (۱). نمایش اپراتورها

در هر تکرار از الگوریتم، تابع هدف محاسبه شده با مقدار بهترین تابع هدف بدست آمده مورد مقایسه قرار می‌گیرد و در صورت بهتر بودن تابع هدف جدید، مقدار بهترین جواب به دست آمده به‌روزرسانی می‌شود. در غیر این صورت، مقدار بهترین جواب به دست آمده تغییر نمی‌یابد. جواب بدست آمده پس از این مرحله را S' نامیده. سپس مقدار $f_a(S')$ را

محاسبه نموده، اگر $f_d(S) \geq f_d(S')$ همسایگی بدست آمده جایگزین جواب فعلی شود:

$$S = S' \text{ اگر } F^* > f_d(S) \text{ و } F^* = f_d(S)$$

در صورتی که تعداد تکرارهای الگوریتم از حداکثر تعداد تکرارهای تعریف شده برای آن تجاوز نماید الگوریتم به پایان رسیده و بهترین جواب‌های پیدا شده به نمایش گذاشته می‌شوند.

نمایش جواب

نحوه نمایش در الگوریتم پیشنهادی برای پرسنل شماره ۱ (سطر اول) و پرسنل شماره ۲ (سطر دوم جدول) صورت زیر است:

روز اول		روز دوم		روز سوم		روز چهارم													
۱	۷	۱	۶	۱	۱	۱	۹	۱	۱	۴	۹	۱	۱	۱	۵	۷	۱	۱	
		۴		۵		۰		۵				۵		۰			۲	۵	
۲	۴	۹	۱	۲	۸	۹	۱	۱	۲	۳	۱	۶	۱	۲	۳	۱	۹	۱	
			۶			۳	۶			۴		۶				۱		۶	

شکل (۲). نحوه نمایش جواب در الگوریتم جست و جوی همسایگی متغیر پیشنهادی

این نحوه نمایش نمایانگر جواب زیر است: این مساله شامل ۲ پرسنل و ۱۳ بیمار است. اعداد ۱ و ۲ نشان دهنده نقطه شروع حرکت هر یک از پرسنل و اعداد ۱۲ و ۱۳ بیان کننده نقطه پایانی حرکت آنها و انتهای آن روز کاری می‌باشد (هر یک از پرسنل از منزل خود شروع به حرکت نموده و در نهایت به همان جا باز می‌گردند، محدودیت‌های (۲) و (۳)). اعداد ۳ تا ۱۱ نیز نشان دهنده منازل هر یک از بیماران می‌باشد. به عنوان مثال پرسنل شماره یک پس از حرکت از منزل خود، ابتدا به ویزیت بیمار شماره ۷ پرداخته، سپس بیمار شماره ۱۴ و در نهایت بیمار شماره ۶ را ویزیت می‌کند. (محدودیت شماره (۴) و (۱۱)) و به منزل خویش باز می‌گردد. بیمار شماره ۹ در مدت ۴ روز نشان داده شده به ۵ نوبت ویزیت نیاز داشته که سه نوبت آن غیر وابسته و دو نوبت آن به یکدیگر وابسته بوده اند که این ویزیت‌ها در روز دوم

انجام شده است. ابتدا پرسنل شماره ۲ این بیمار را ویزیت نموده است و پس از مدت مشخصی از ویزیت اول، توسط پرسنل شماره ۱ ویزیت دوم انجام شده است (محدودیت شماره (۱۰) و (۱۲)). درحالی که بیمار شماره ۱۳ تنها به یک ویزیت در روز دوم نیازمند بوده است که توسط پرسنل شماره ۲ انجام شده است. پرسنل شماره ۲ قابلیت ویزیت بیمار شماره ۱۰ را ندارد، به همین دلیل این بیمار در دوره ۴ روزه نشان داده شده فقط توسط پرسنل اول ویزیت شده است (محدودیت شماره (۵)). زمان شروع سرویس دهی به هر یک از بیماران نیز در قالب مشابه نمایش داده می شود.

الگوریتم سیستم کلونی مورچگان

این الگوریتم اولین بار توسط (مارکو دوریگو و همکاران، ۱۹۹۷) در حل مسائل سخت بهینه سازی ترکیبی و بر مساله فروشنده دوره گرد اجرا شد. در این الگوریتم از نحوه عملکرد مورچه های واقعی در طبیعت برای یافتن غذا الهام گرفته شده است. مورچه ها می توانند توسط ماده ای به نام فرومون، اطلاعات مسیرهای منتهی به منبع غذایی را با یکدیگر رد و بدل کنند. این مورچه ها هنگام عبور از یک مسیر، آن مسیر را متناسب با طول مسیر توسط فرومون نشانه گذاری می کنند. سایر مورچه ها نیز این مسیر فرومون را دنبال کرده و فرومون ریزی می کنند. در نتیجه به تدریج مورچه های بیشتری به این مسیر جذب می شوند. همچنین فرومون به مرور زمان تبخیر می شود. بنابراین مسیرهایی با طول کوتاهتر تا منبع غذایی، به تدریج مورچه های بیشتری را به خود جذب می کنند و مسیرهای نامطلوب به مرور زمان با تبخیر فرومون ناپدید می شوند. الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته شده از این رفتار مورچگان به این صورت عمل می کند که مجموعه ای از مورچه های مصنوعی که در فضای جواب، با در نظر داشتن حافظه ای که شامل مسیرهای طی شده و فرومون های آنهاست، به جستجوی جواب های خوب می پردازند. این الگوریتم به طور کلی شامل دو گام تکرار شونده است: ساخت جواب و به روز کردن فرومون. جدول پارامترهای الگوریتم سیستم کلونی مورچگان استفاده شده در این مقاله در زیر آورده شده است:

جدول (۶). پارامترهای الگوریتم سیستم کلونی مورچگان

بیان کننده میزان اهمیت نسبی پراکندگی جستجو در مقابل تشدید جستجو	$q_0 \quad (0 \leq q_0 \leq 1)$
مقدار اولیه فرومون	τ_0
بیان کننده اهمیت نسبی رد فرومون	α
بیان کننده اهمیت نسبی هیوریستیک پدیداری	β
بیان کننده اهمیت نسبی هیوریستیک مختص مساله	λ
نرخ تبخیر فرومون	ρ
تعداد مورچه‌ها	m
تعداد تکرارهای الگوریتم	<i>Iterations</i>

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

این الگوریتم که نخستین بار توسط (کیک پاتریک و همکاران، ۱۹۸۳) بکار برده شد، الگوریتم تکراری و تصادفی است که به‌طور گسترده در حل مسایل بهینه‌سازی ترکیبی بکار برده می‌شود. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تغییرات انرژی یک سیستمی که تحت سردسازی قرار گرفته تا همگرایی به یک حالت تعادل را شبیه‌سازی می‌کند. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید از یک جواب اولیه شروع می‌کند و چندین تکرار ادامه می‌یابد. در هر تکرار یک همسایگی تصادفی تولید می‌شود. جابجایی‌هایی که تابع هزینه را بهبود می‌دهند همیشه پذیرفته می‌شوند. در غیر این صورت (جابجایی‌هایی که تابع هزینه را بهبود نمی‌دهند) همسایگی با یک احتمال مشخصی که بستگی به دمای فعلی و اختلاف توابع هدف ΔE دارد، پذیرفته می‌شود. ΔE بیانگر اختلاف بین مقدار تابع هدف فعلی و تابع هدف همسایگی تولید شده است. همچنین از یک پارامتر کنترلی به نام دما (T) نیز برای تعیین احتمال پذیرش جواب‌های غیر بهبود دهنده استفاده می‌شود. به تدریج با پیشروی الگوریتم، احتمال پذیرفتن اینگونه جابجایی‌ها کاهش می‌یابد. شرط توقف الگوریتم نیز رسیدن به دمای پایانی و یا اتمام تعداد تکرار مورد نظر می‌باشد. پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به شرح جدول زیر است:

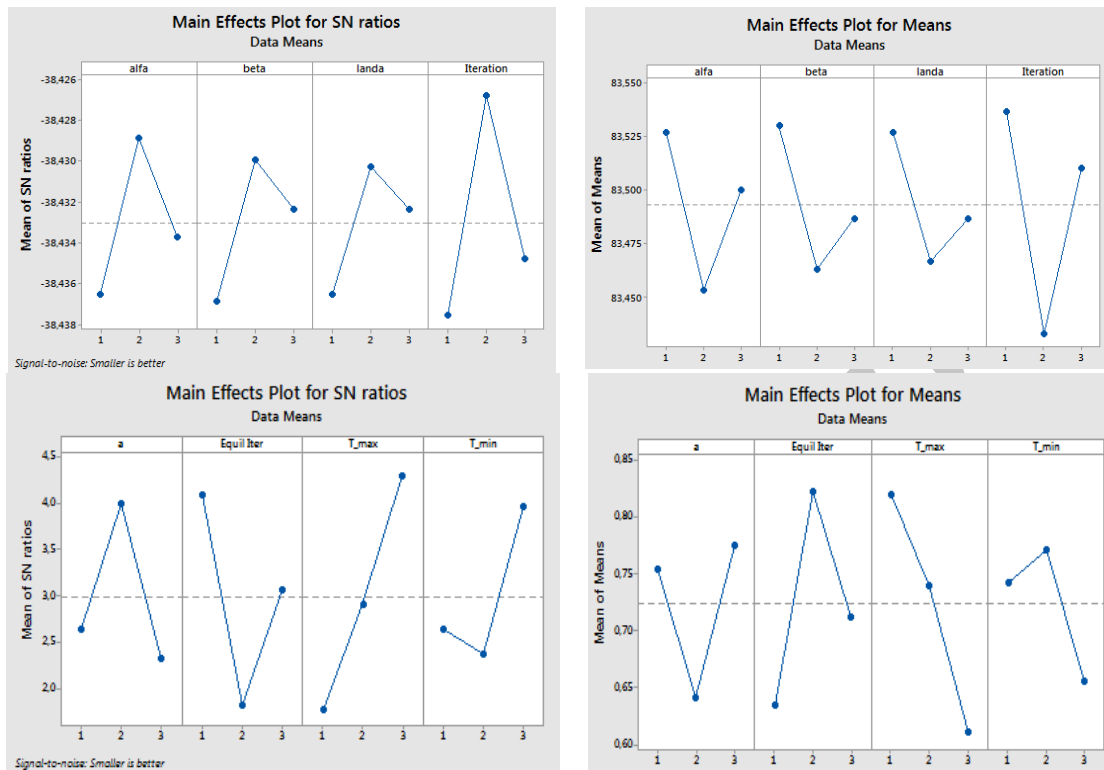
جدول (۷). پارامترهای الگوریتم شبیه سازی تبرید

دمای فعلی	T
دمای اولیه	T_{max}
دمای پایانی	T_{min}
تعداد تکرارها در هر دما (حالت تعادل)	$Equil\ Iter$
ضریب سردسازی	a
پارامتر تصمیم گیری احتمال پذیرش جواب غیر بهبود دهنده	P

پارامترهای الگوریتم

الگوریتم‌های ارائه شده به جز الگوریتم پیشنهادی، هر یک شامل تعدادی پارامتر هستند که مقادیر آنها در عملکرد الگوریتم تاثیر بسزایی داشته و باید بهترین مقدار آنها تعیین شود. برای حل ابتدا تنظیم پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش تاگوجی در نرم افزار مینی تب انجام شده و نتایج بدست آمده که بر اساس دو معیار سیگنال به نویز (S/N) و میانگین‌ها می‌باشد در شکل (۳) نشان داده شده است. به این ترتیب که برای الگوریتم سیستم کلونی مورچگان پارامتر بیان کننده اهمیت نسبی رد فرمون (α)، پارامتر بیان کننده اهمیت نسبی هیوریستیک پدیداری (β)، پارامتر بیان کننده اهمیت نسبی هیوریستیک مختص مساله (λ) و نرخ تبخیر فرمون (ρ) و برای الگوریتم شبیه سازی تبرید پارامترهای ضریب سردسازی (a)، تعداد تکرارها در هر دما^۱، دمای اولیه (T_{max}) و دمای پایانی (T_{min}) در نظر گرفته شده است.

1. $Equil\ Iter$



شکل (۳). مقایسه سطوح پارامترهای الگوریتم‌های سیستم کلونی مورچگان و شبیه سازی تبرید

محاسبات مربوطه به الگوریتم شبیه سازی تبرید برای نمونه آورده شده است. در الگوریتم شبیه سازی تبرید تعداد پارامترهای تاثیر گذار و تعداد سطوح هر یک در جدول (۸) مشخص شده است. مساله بررسی شده با تعداد ۴ عامل و ۳ سطح، ارائه متعامد ویا (جدول ۹) را برای طراحی آزمایشات در نظر می گیرد که این امکان را فراهم می کند که بتوان ۴ عامل را در سطوح مختلفشان در ۹ آزمایش بررسی نمود.

جدول (۸). پارامترهای موثر الگوریتم SA

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
T_{max}	۱۵۰۰	۱۷۵۰	۲۰۰۰
T_{min}	۲۵	۵۰	۱۰۰
a	۰,۶۵	۰,۷۵	۰,۸۰
Equil Iter	۱۵	۲۰	۳۰

جدول (۹). ارائه متعادل L_0

آزمایش	T_{max}	T_{min}	a	Equil Iter
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

مقادیر نشان داده شده در جدول (۱۰) بهترین ترکیب را مبتنی بر شکل (۳) تشکیل می دهند:

جدول (۱۰). سطح بهینه پارامترهای الگوریتم شبیه سازی تبرید

عامل	سطح بهینه بدست آمده
دمای اولیه	۲۰۰۰
دمای پایانی	۱۰۰
ضریب سردسازی	۰,۷۵
تعداد تکرارها در هر دما	۱۵

مثال عددی

نظر به اینکه مجموعه داده مناسب به منظور مقایسه در مرور ادبیاتی حوزه مطالعه شده یافت نشده است، در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد مدل ابتدا مثال عددی آورده شده است و سپس تحلیلی بر نتایج حاصله انجام شده است که درستی عملکرد مدل را نشان می‌دهد. سعی شده است که مثال عددی تمام حالاتی که در مدل مورد توجه است را در برگیرد. از این رو در این مثال زنجیره تامینی شامل موسسه ارائه خدمات سلامت در منزل با ۴ پرسنل و ۳۰ بیمار در نظر گرفته شده است و مدل به مدت یک هفته برنامه‌ریزی شده است. برخی از پارامترهای ورودی مساله حل شده، در قالب جداول (۱۱) و (۱۲) آورده شده است. سپس در راستای ارزیابی کیفیت مدل و الگوریتم ارائه شده، ۲۴ مساله نمونه به صورت تصادفی تولید شده است. در بخش بعد این مسایل بررسی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

جدول (۱۱). پارامترهای ورودی مساله (برای ۷ نفر از بیماران)

i	مدت ویزیت (دقیقه)	نوع ویزیت	زمان ویزیت بیمار	پنجره زمانی درخواستی
۱	۱۵	مستقل	شنبه، سه شنبه	[۱۱:۰۵ - ۱۳]
۲	۲۰	مستقل	یک شنبه	[۱۰ - ۱۱:۱۵]
۳	۱۰	مستقل	جمعه	[۱۱:۳۰ - ۱۳]
۴	۲۵	مستقل	یک شنبه، جمعه	[۸:۴۵ - ۰۹:۳۰]
۵	۲۰	وابسته	شنبه	[۰۸:۱۵ - ۰۹]
	۱۵		شنبه	[۱۱:۱۵ - ۱۲]
۶	۲۵	مستقل	چهارشنبه	[۱۱ - ۱۱:۳۰]
۷	۲۰	مستقل	چهارشنبه، جمعه	[۰۹ - ۱۰:۳۰]

جدول (۱۲). پارامترهای ورودی مسأله (پرسنل پزشکی)

W	cf_w	روزهای حضور در موسسه	عدم توانایی در ویزیت بیمار i	شیوه حمل و نقل
۱	۳۵	کل ایام هفته بجز شنبه	توانایی کیفی ویزیت کلیه بیماران	وسیله شخصی
۲	۳۲	شنبه، دوشنبه، چهارشنبه، جمعه	همه بیماران بجز {۳، ۸، ۱۹}	وسیله شخصی
۳	۳۰	کل ایام هفته بجز دوشنبه و جمعه	همه بیماران بجز {۴، ۸، ۱۴، ۱۹، ۲۶}	ناوگان عمومی
۴	۳۰	کل ایام هفته	همه بیماران بجز {۳، ۸، ۱۷، ۱۹، ۲۳}	پیاده

جدول (۱۳) نیز جزئیات حل مدل برای پرسنل شماره ۳ در هر یک از هفت روز هفته را ارائه می دهد.

جدول (۱۳). نتایج حل مدل برای پرسنل شماره ۳

W	روز هفته	زمان حرکت از منزل	زمان برگشت به منزل	مسیر طی شده
۳	شنبه	۰۷:۳۷	۱۳:۲۶	۰-۳۰-۵-۲۴-۱۷-۵-۱-۰
	یکشنبه	۰۹:۱۹	۱۴:۱۶	۰-۹-۲-۱۱-۲۲-۰
	دوشنبه	عدم حضور در موسسه	عدم حضور در موسسه	-
	سه شنبه	-	-	-
	چهارشنبه	۰۹:۰۶	۱۱:۳۳	۰-۱۳-۷-۱۲-۶-۰
	پنجشنبه	-	-	-
	جمعه	عدم حضور در موسسه	عدم حضور در موسسه	عدم حضور در موسسه

همانگونه که این جدول بیان می کند پرسنل شماره ۳ در هر روز مسیر خود را از منزل خود آغاز نموده و توسط وسایط حمل و نقل عمومی و با توجه به سطح کیفی و تبحر خود که منجر به ویزیت برخی از بیماران و عدم ویزیت برخی دیگر می شود، تعدادی از بیماران را ویزیت نموده و در نهایت به منزل خود باز می گردد.

ارائه تحلیل و نتایج محاسباتی مدل

مدل ارائه شده با استفاده از نرم افزار گمز ۲۴,۱,۲ و بر کامپیوتر Intel(R) Core i3-2328M CPU with 2.2 GHz and 4 GB of RAM اجرا شده است. برای اندازه‌های متوسط و بزرگ مساله که گمز در مدت زمان تعیین شده به جواب نمی‌رسد (به دلیل NP-Hard بودن ذات مساله تخصیص و مسیریابی) از سه الگوریتم مختلف استفاده شده است و عملکرد الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم دیگر مقایسه شده است. مقدار تابع هدف بدست آمده از حل مدل، زمان حل و کارایی الگوریتم‌های ارائه شده در جدول (۱۴) آورده شده است. تعداد ۲۴ مساله بررسی شده که با توجه به ابعاد به سه دسته مسایل گروه a، مسایل گروه b و مسایل گروه c دسته بندی شده اند.

جدول (۱۴). نتایج حل مدل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ

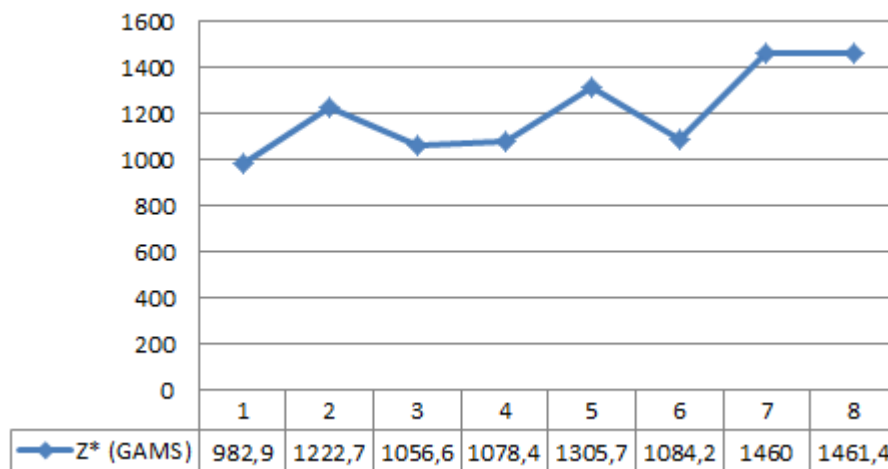
N	GAMS		SA		ACS			VNS*		
	Z	Z	CPU(s)	GAP	Z	CPU(s)	GAP	Z	CPU(s)	GAP
۱a	۹۲۸,۹	۹۲۸,۹	۵	۰	۹۸۵,۷	۳	۰,۳	۹۸۲,۹	۵	۰
۲a	۱۲۲۲,۷	۱۲۲۲,۷	۴	۰	۱۲۲۲,۷	۵	۰	۱۲۲۲,۷	۷	۰
۳a	۱۰۵۶,۶	۱۰۵۶,۶	۲	۰	۱۰۵۶,۶	۲	۰	۱۰۵۶,۶	۸	۰
۴a	۱۰۷۸,۴	۱۰۷۸,۴	۵	۰	۱۰۷۸,۴	۲	۰	۱۰۷۸,۴	۴	۰
۵a	۱۳۰۵,۷	۱۳۰۵,۷	۳۵	۰	۱۳۰۵,۷	۴	۰	۱۳۰۵,۷	۴	۰
۶a	۱۰۸۴,۲	۱۰۸۴,۲	۳	۰	۱۰۸۴,۲	۳	۰	۱۰۸۴,۲	۳	۰
۷a	۱۴۶۰,۰	۱۴۶۰,۰	۸	۰	۱۴۶۰,۰	۲	۰	۱۴۶۰,۰	۳	۰
۸a	۱۴۶۱,۴	۱۴۷۶,۱	۸	۰,۱	۱۴۶۱,۴	۲	۰	۱۴۶۱,۴	۱۲	۰
۱b	-	۳۰۲۵,۵	۵	-	۳۰۱۶,۹	۶۹	-	۳۰۱۶,۲	۴۳	-
۲b	-	۳۴۶۰,۴	۱۶	-	۳۴۰۳,۹	۳۷	-	۲۳۴۷,۹	۱۷	-
۳b	-	۳۲۶۰,۱	۱۳	-	۳۲۳۹,۱	۹۱	-	۳۲۵۱,۱	۲۱	-
۴b	-	۳۴۸۲,۹	۷۵	-	۳۴۱۷,۹	۶۵	-	۳۴۰۸,۹	۲۷	-
۵b	-	۳۰۱۷,۹	۲۶۱	-	۲۹۵۱,۹	۵۸	-	۲۹۷۷,۷	۴۰	-
۶b	-	۴۶۹۶,۶	۴۱	-	۴۵۸۰,۸	۲۱۰	-	۴۵۶۶,۴	۹۹	-

۷b	-	۴۴۹۱,۱	۳۹	-	۴۴۶۳,۳	۱۴۹	-	۴۴۵۸,۶	۶۳	-
۸b	-	۴۸۲۳,۴	۵۷	-	۴۷۹۴,۷	۱۱۶	-	۴۷۷۹,۸	۶۰	-
۱c	-	۱۵۰۳۰,۳	۲۱۱	-	۱۴۷۳۹,۴	۴۰۱	-	۱۴۸۱۴,۲	۲۹۷	-
۲c	-	۱۵۶۳۳,۸	۱۲۲۲	-	۱۵۵۰۴,۰	۶۲۷	-	۱۵۶۹۱,۵	۶۵۰	-
۳c	-	۱۴۰۴۷,۲	۳۷۶	-	۱۳۸۷۶,۱	۶۹۷	-	۱۳۷۹۸,۹	۱۹۹	-
۴c	-	۱۵۲۲۳,۹	۳۲۶	-	۱۴۸۷۳,۲	۷۸۴	-	۱۴۸۰۶,۷	۱۹۲	-
۵c	-	۱۴۵۷۵,۱	۱۶۸	-	۱۴۴۰۴,۹	۷۸۸	-	۱۴۲۹۰,۴	۱۶۸	-
۶c	-	۲۲۱۳۹,۳	۳۹۳	-	۲۱۷۰۶,۷	۱۳۹۴	-	۲۱۶۲۰,۳	۵۸۳	-
۷c	-	۲۱۵۷۸,۶	۶۱۵	-	۲۱۴۷۲,۳	۱۲۲۸	-	۲۱۳۸۶,۸	۹۴۴	-
۸c	-	۲۱۳۶۹,۴	۶۲۳	-	۲۱۷۹۰,۵	۶۷۹	-	۲۰۹۵۵,۱	۴۱۳	-

به منظور بررسی رفتار مدل، مسائل گروه a انتخاب و تحلیل شده است. جدول (۱۵) مشخصات کامل این دسته از مسایل را نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف این گروه از مسایل در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول (۱۵). مشخصات مسایل گروه a

N	تعداد پرسنل	تعداد بیمار	تعداد ویزیت‌های مرتبط به هم	تعداد ویزیت‌های نامرتبط به یکدیگر	مقدار تابع هدف
۱a	۲	۸	۱۲	۲۳	۹۸۲,۹
۲a	۲	۱۵	۱۹	۴۵	۱۲۲۲,۷
۳a	۳	۱۵	۲۲	۴۹	۱۰۵۶,۶
۴a	۳	۲۰	۳۵	۸۱	۱۰۷۸,۴
۵a	۴	۳۰	۴۳	۱۰۱	۱۳۰۵,۷
۶a	۳	۳۰	۳۹	۱۲۲	۱۰۸۴,۲
۷a	۵	۴۵	۷۲	۱۸۸	۱۴۶۰,۰
۸a	۵	۵۰	۸۳	۱۹۱	۱۴۶۱,۴



شکل (۴). رفتار تابع هدف مسایل گروه a

افزایش هزینه‌ها از مساله ۱a به مساله ۲a به دلیل افزایش تعداد بیمارها و به خصوص افزایش هزینه‌های اضافه کاری پرسنل می‌باشد. در واقع تصمیم بهینه در شرایط موجود در مساله ۲a استخدام پرسنل جدید و به تعادل رسیدن بار کاری موجود می‌باشد که همین موضوع در مساله ۳a دیده می‌شود. با وجود ثابت ماندن تعداد بیماران در مسایل ۲a و ۳a هزینه‌ها کاهش یافته است. افزایش هزینه‌ها از مساله ۳a به مساله ۴a به سبب افزایش تعداد بیماران می‌باشد، اما در این حالت مشخص است که تعداد ۳ پرسنل برای ویزیت تعداد ۲۰ بیمار مناسب بوده است و هزینه‌های اضافه کاری افزایش چشمگیری نداشته اند. افزایش هزینه‌ها از مساله ۴a به مساله ۵a به دلیل افزایش هم زمان تعداد پرسنل و تعداد بیماران می‌باشد. کاهش هزینه‌ها از مساله ۵a به مساله ۶a به دلیل عدم نیاز به یک پرسنل جدید برای ویزیت بیماران موجود است. در مساله ۵a، ۴ پرسنل به ویزیت ۳۰ بیمار مشغول شده اند، حال آنکه در مساله ۶a تعداد ۳ پرسنل به ویزیت ۳۰ بیمار پرداخته اند. در واقع کاهش تعداد پرسنل که سبب کاهش هزینه‌ها می‌شود تصمیم بهینه در مساله ۶a است. به عبارت دیگر در این حالت موسسه اندک هزینه اضافه کاری را بر هزینه زیاد استخدام یک پرسنل جدید ترجیح می‌دهد. مسائل ۷a و ۸a نیز افزایش هزینه‌ها به دلیل افزایش توان تعداد پرسنل و تعداد بیماران را بیان می‌کند.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده، در ابتدا مساله در اندازه کوچک (مسایل گروه a) به طور بهینه حل شده و نتایج اجرای الگوریتم‌ها با مقادیر بهینه مقایسه شده است که در ستون‌های ۵، ۸ و ۱۱ جدول (۱۴) نشان داده شده است که شکاف جواب‌های بدست آمده نیز مطابق رابطه (۲۱) محاسبه شده است که در آن $f_{algorithm}$ مقدار بدست آمده توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی (میانگین حاصل از ده بار اجرای الگوریتم برای هر آزمایش) و f_{best} جواب بهینه خروجی از نرم افزار گمز می‌باشد.

$$GAP(\%) = \frac{f_{algorithm} - f_{best}}{f_{best}} * 100 \quad (21)$$

مسائل گروه b و c به دلیل اینکه در زمان تعیین شده توسط نرم افزار گمز به جواب نرسیده‌اند، جواب بهینه نداشته و در این گروه از مسایل مقایسه عملکرد سه الگوریتم به شرح زیر بوده است:

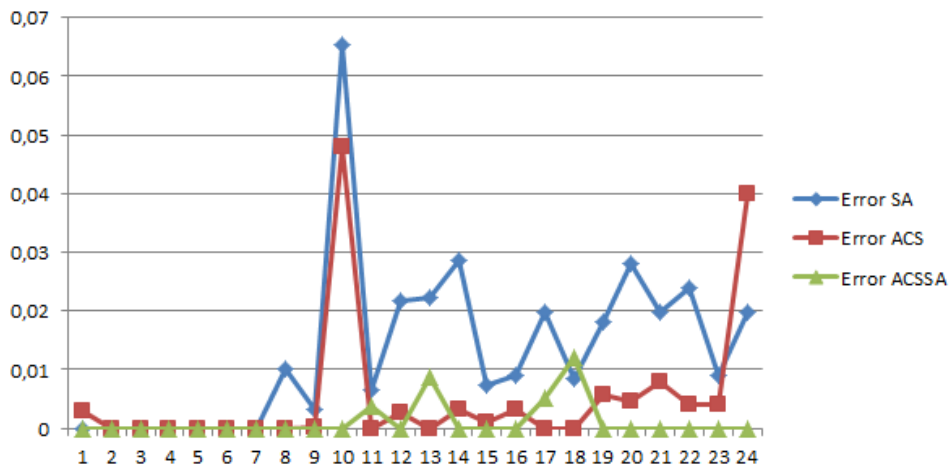
ابتدا مجموعه مرجع که شامل کمترین مقدار تابع هدف بدست آمده در هر آزمایش بین سه الگوریتم مختلف می‌باشد تشکیل شده (مقادیر آن با f_R^{best} نشان داده شده است) و سپس خطای عملکرد هر کدام از سه الگوریتم به صورت زیر محاسبه شده است.

$$Error(\text{algorithm}) = \frac{f_{algorithm} - f_R^{best}}{f_R^{best}} \quad (22)$$

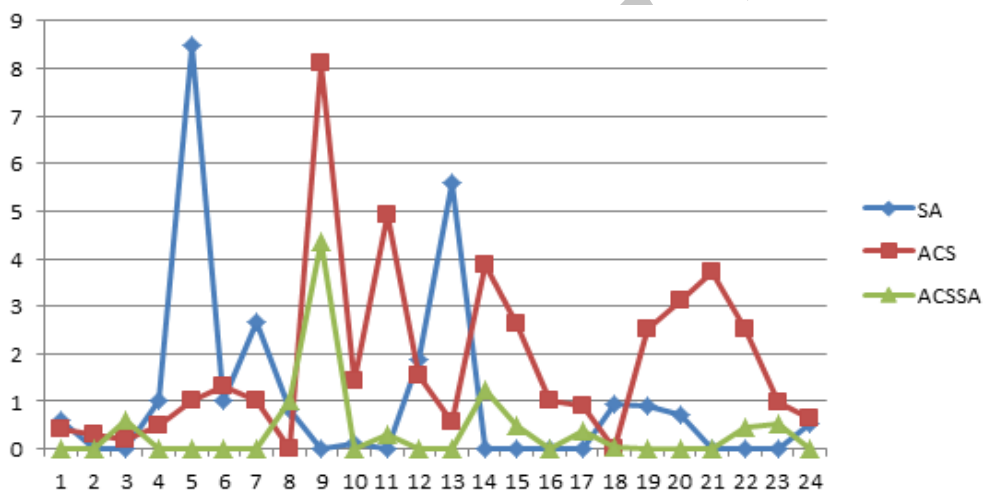
مقدار خطای هر الگوریتم نسبت به مقدار مرجع در جدول (۱۶) و به منظور امکان مقایسه بهتر در شکل (۵) نمایش داده شده است. همچنین به منظور مقایسه این الگوریتم‌ها، نمودار متوسط زمان حل برای ۲۴ مساله حل شده پس از بی مقیاس سازی در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول (۱۶). مقادیر خطای هر الگوریتم نسبت به مقدار مرجع

N	مقدار بدست آمده			مقدار مرجع	Error(algorithm)		
	SA	ACS	VNS*		SA	ACS	VNS*
۱a	۹۲۸,۹	۹۸۵,۷	۹۸۲,۹	۹۸۲,۹	۰	۰,۰۰۲	۰
۲a	۱۲۲۲,۷	۱۲۲۲,۷	۱۲۲۲,۷	۱۲۲۲,۷	۰	۰	۰
۳a	۱۰۵۶,۶	۱۰۵۶,۶	۱۰۵۶,۶	۱۰۵۶,۶	۰	۰	۰
۴a	۱۰۷۸,۴	۱۰۷۸,۴	۱۰۷۸,۴	۱۰۷۸,۴	۰	۰	۰
۵a	۱۳۰۵,۷	۱۳۰۵,۷	۱۳۰۵,۷	۱۳۰۵,۷	۰	۰	۰
۶a	۱۰۸۴,۲	۱۰۸۴,۲	۱۰۸۴,۲	۱۰۸۴,۲	۰	۰	۰
۷a	۱۴۶۰,۰	۱۴۶۰,۰	۱۴۶۰,۰	۱۴۶۰,۰	۰	۰	۰
۸a	۱۴۷۶,۱	۱۴۶۱,۴	۱۴۶۱,۴	۱۴۶۱,۴	۰,۰۱	۰	۰
۱b	۳۰۲۵,۵	۳۰۱۶,۹	۳۰۱۶,۲	۳۰۱۶,۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۰	۰
۲b	۳۴۶۰,۴	۳۴۰۳,۹	۲۳۴۷,۹	۲۳۴۷,۹	۰,۰۶۵	۰,۰۴۸	۰
۳b	۳۲۶۰,۱	۳۲۳۹,۱	۳۲۵۱,۱	۳۲۳۹,۱	۰,۰۰۶	۰	۰,۰۰۳
۴b	۳۴۸۲,۹	۳۴۱۷,۹	۳۴۰۸,۹	۳۴۰۸,۹	۰,۰۲۱	۰,۰۰۲	۰
۵b	۳۰۱۷,۹	۲۹۵۱,۹	۲۹۷۷,۷	۲۹۵۱,۹	۰,۰۲۲	۰	۰,۰۰۸
۶b	۴۶۹۶,۶	۴۵۸۰,۸	۴۵۶۶,۴	۴۵۶۶,۴	۰,۰۲۸	۰,۰۰۳	۰
۷b	۴۴۹۱,۱	۴۴۶۳,۳	۴۴۵۸,۶	۴۴۵۸,۶	۰,۰۰۷	۰,۰۰۱	۰
۸b	۴۸۲۳,۴	۴۷۹۴,۷	۴۷۷۹,۸	۴۷۷۹,۸	۰,۰۰۹	۰,۰۰۳	۰
۱c	۱۵۰۳۰,۳	۱۴۷۳۹,۴	۱۴۸۱۴,۲	۱۴۷۳۹,۴	۰,۰۱۹	۰	۰,۰۰۵
۲c	۱۵۶۳۳,۸	۱۵۵۰۴,۰	۱۵۶۹۱,۵	۱۵۵۰۴,۰	۰,۰۰۸	۰	۰,۰۱۲
۳c	۱۴۰۴۷,۲	۱۳۸۷۶,۱	۱۳۷۹۸,۹	۱۳۷۹۸,۹	۰,۰۱۷	۰,۰۰۵	۰
۴c	۱۵۲۲۳,۹	۱۴۸۷۳,۲	۱۴۸۰۶,۷	۱۴۸۰۶,۷	۰,۰۲۸	۰,۰۰۴	۰
۵c	۱۴۵۷۵,۱	۱۴۴۰۴,۹	۱۴۲۹۰,۴	۱۴۲۹۰,۴	۰,۰۱۹	۰,۰۰۸	۰
۶c	۲۲۱۳۹,۳	۲۱۷۰۶,۷	۲۱۶۲۰,۳	۲۱۶۲۰,۳	۰,۰۲۴	۰,۰۰۳	۰
۷c	۲۱۵۷۸,۶	۲۱۴۷۲,۳	۲۱۳۸۶,۸	۲۱۳۸۶,۸	۰,۰۰۸	۰,۰۰۳	۰
۸c	۲۱۳۶۹,۴	۲۱۷۹۰,۵	۲۰۹۵۵,۱	۲۰۹۵۵,۱	۰,۰۱۹	۰,۰۳۹	۰



شکل (۵). نمودار مقادیر خطای هر الگوریتم نسبت به مقدار مرجع



شکل (۶). نمودار بی مقیاس شده متوسط زمان حل

همان طور که مشاهده می شود الگوریتم پیشنهادی نسبت به دو الگوریتم شبیه سازی تبرید و سیستم کلونی مورچگان در زمان کمتر به جوابی با کیفیت بهتر همگرا شده است.

نتیجه گیری و پیشنهاد برای مطالعات آتی

این مقاله مدلی ریاضی جدیدی را به منظور بهینه سازی مساله مسیریابی_تخصیص پرسنل درمانی مراکز ارائه دهنده خدمات پزشکی در منزل ارائه نمود. در واقع این مقاله به حل مدلی با هدف یافتن بهترین توالی ویزیت بیماران با حفظ شرایط پرسنل پزشکی و بیماران و هدف کمینه نمودن هزینه های موسسه با تعداد پرسنل و تعداد بیمار مختلف برای ۲۴ مساله نمونه پرداخته است. حل مدل به دلیل Np-hard بودن فضای مساله، بسیار مشکل است و زمان حل برای مسائل با ابعاد بزرگ که متغیرها و محدودیت های زیادی دارند به صورت نمایی افزایش پیدا می کند. از این رو برای حل مسائل در مقیاس کوچک از نرم افزار گمز و در مقیاس بزرگ از الگوریتم های فراابتکاری استفاده گردید. الگوریتم پیشنهادی که به منظور حل مدل در این مقاله پیشنهاد شده بود به نسبت الگوریتم های شبیه سازی تبرید و سیستم کلونی مورچگان عملکرد بهتری را نشان داد. نتایج بدست آمده از این الگوریتم کیفیت مطلوب و زمان حل مناسب آن را دلالت نمود. تمامی داده های ورودی مساله در این مدل به صورت قطعی فرض شده اند، لذا بررسی مدل های جدید با انواع داده های فازی می تواند از موضوعات مناسب برای تحقیقات آتی به حساب رود. همچنین پیشنهاد می شود که در پژوهش های بعدی علاوه بر کاهش هزینه ها اهداف دیگری مانند افزایش سطح رضایت بیماران نیز مطالعه گردد و با استفاده از دیگر الگوریتم های فراابتکاری کارایی رویکرد حل بهبود بخشیده شود.

منابع

- 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.
- 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.
- Carello, G., & Lanzarone, E. (2014). *A cardinality-constrained robust model for the assignment problem in home care services*. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 748-762.
- Chahed, S., Marcon, E., Sahin, E., Feillet, D., & Dallery, Y. (2009). *Exploring new operational research opportunities within the home care context: the chemotherapy at home*. *Health Care Management Science*, 12(2), 179-191.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). *Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem*. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1), 53-66.
- 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.
- Kergosien, Y., Ruiz, A., & Soriano, P. (2014). *A routing problem for medical test sample collection in home health care services*. In *Proceedings of the International Conference on Health Care Systems Engineering* (pp. 29-46). *Springer International Publishing Switzerland*.
- Mankowska, D. S., Meisel, F., & Bierwirth, C. (2014). *The home health care routing and scheduling problem with interdependent services*. *Health care management science*, 17(1), 15-30.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). *Optimization by simulated annealing*. *science*, 220(4598), 671-680.
- Lysgaard, J. (1997). *Clark & Wright's Savings Algorithm*. Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business, 44.
- Nowak, M., Hewitt, M., & Nataraj, N. (2013). *Planning strategies for home health care delivery*.
- Torres-Ramos, A. F., Alfonso-Lizarazo, E. H., Reyes-Rubiano, L. S., & Quintero-Araújo, C. L. (2014). *Mathematical Model for the Home Health Care Routing and Scheduling Problem with Multiple Treatments and Time Windows*. In *Proceedings of the 1st International Conference on Mathematical Methods & Computational Techniques in Science & Engineering (MMCTSE 2014)* (pp. 140-145).