چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۲۶ ـ تابستان ۱۳۹۶
ص‌ص ۸۲ – ۵۳

زمان‌بندی روزانه اتاق‌های عمل در شرایط عدم‌قطعیت با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

مرضیه ایمانی ایمانلو*، آرزو عتیقه‌چیان**

چکیده

زمان‌بندی اتاق‌های عمل نقش مهمی در افزایش بهره‌وری آن‌ها و کاهش هزینه‌های بیمارستان‌ها دارد. به‌علت عدم‌قطعیت‌های مختلفی که در فعالیت‌های اتاق عمل وجود دارد، این مسئله می‌تواند بسیار چالش‌برانگیز باشد. در این پژوهش مسئله زمان‌بندی روزانه اعمال جراحی در ۳ مرحله آماده‌سازی جراحی، جراحی و ریکاوری و با درنظرگرفتن کلیه محدودیت‌های واقعی بیمارستان‌های آموزشی– درمانی بررسی شده است. این مسئله به تعیین توالی، زمان شروع هر یک از اعمال جراحی و تخصیص منابع موردنیاز در هر مرحله با هدف کمینه‌کردن مجموع زمان بیکاری و اضافه‌کاری اتاق‌های عمل در شرایط عدم‌قطعیت در مدت‌زمان عمل‌های جراحی می‌پردازد. با توجه به عدم‌کارایی روش‌های حل دقیق در حل مسائل برنامه‌ریزی احتمالی بزرگ، در این پژوهش یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای رویارویی با عدم‌قطعیت ارائه شده است. بدین منظور یک الگوریتم مورچگان دوسطحی با شبیه‌سازی ترکیب شده است. الگوریتم ارائه‌شده در حل تعداد متعددی از مسائل واقعی از بیمارستان آموزشی ـ درمانی هاشمی‌نژاد تهران با مجموعه‌ای از سناریوهای تصادفی تولیدشده، آزمون شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد در شرایط عدم‌قطعیت، ارزش جواب حاصل از روش ترکیبی پیشنهادی بیش از ۷۵ درصد است. نتایج نمایانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل دنیای واقعی است.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی اتاق عمل؛ بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی؛ الگوریتم مورچگان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۵/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۳۰

* کارشناس ارشد، دانشگاه اصفهان.
** استادیار، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول).
E-mail: a.atighehchian@ase.ui.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه بیمارستان‌ها از یک سو در تلاش برای کاهش هزینه‌ها و افزایش دارایی‌های مالی خود و از سوی دیگر، به دنبال حداکثرکردن سطح رضایت بیماران هستند. اتاق‌های عمل به‌عنوان حیاتی‌ترین منبع بیمارستان شناخته می‌شود و زمان‌بندی آن‌ها برای بهبود بهره‌وری عملیات و همچنین افزایش کیفیت خدمات مهم است. زمان‌بندی اتاق عمل (زمان‌بندی اعمال جراحی)، توالی و زمان انجام اعمال جراحی در تخصص‌های مختلف و منابع تخصیص‌یافته به آن‌ها را طی یک دوره زمانی مشخص می‌کند [۲۳].

مسائل زمان‌بندی اتاق عمل از جنبه‌های مختلف دسته‌بندی می‌شوند [۶]؛ مانند:

۱. بیماران انتخابی یا غیرانتخابی: بیماران انتخابی از قبل برنامه‌ریزی شده‌اند؛ درحالی‌که بیماران غیرانتخابی معمولاً به‌طور غیرمنتظره در طول روز وارد شده و به برنامه موجود اضافه می‌شوند.

۲. سطوح زمان‌بندی اعمال جراحی: سه سطح برای زمان‌بندی اعمال جراحی در نظر گرفته می‌شود:

ـ سطح راهبردی: این مرحله به تعیین تعداد و نوع اتاق‌های عمل، ساعات کاری اتاق‌ها و ظرفیت تخصیص‌داده‌شده به تخصص‌های مختلف جراحی، جراحان انفرادی و یا گروه‌های جراحی می‌پردازد.

ـ سطح میانی (تاکتیکی): در این سطح تخصیص تخصص‌های مختلف جراحی به اتاق‌های عمل در یک پنجره زمانی انجام می‌شود که «مسئله زمان‌بندی جراحی اصلی»[1] نیز نامیده می‌شود.

ـ سطح عملیاتی: در این مرحله، هر مورد جراحی در اتاق‌های عمل برنامه‌ریزی می‌شود. این فرآیند به دو زیرمرحله برنامه‌ریزی عمل‌های جراحی در بازه هفتگی و اختصاص موارد جراحی به بلوک‌های اتاق‌های عمل و زمان‌بندی روزانه اتاق‌های عمل تقسیم می‌شود.

۳. راهبردهای زمان‌بندی اتاق‌های عمل:

ـ راهبرد بلوکه: در این راهبرد یک بلوک زمانی اتاق عمل برای یک فرد جراح یا گروه جراحی حفظ می‌شود. جراح مفروض ممکن است چندین بلوک زمانی مختلف را در طی یک هفته نگه دارد و از هفته‌ای به هفته دیگر ثابت باقی بماند.

ـ راهبرد باز: در این راهبرد هیچ اتاق عملی برای جراح خاصی نگه داشته نمی‌شود؛ هرچند ممکن است یک برنامه هفتگی برای جراح وجود داشته باشد.

ـ راهبرد بلوکه اصلاح‌شده: ترکیبی از دو راهبرد باز و بلوکه است که در آن چند بلوک زمانی باز گذاشته می‌شود با این کار انعطاف‌پذیری راهبرد بلوکه افزایش می‌یابد.

فرآیند جراحی شامل سه مرحله آمادگی قبل از جراحی، جراحی و ریکاوری است که هر

1. Master Surgical Scheduling Problem (MSS)

مرحله نیاز به منابع مختلفی دارد. در این مقاله با درنظرگرفتن هر سه مرحله فرآیند جراحی و منابع تخت قبل از عمل، اتاق عمل، جراح، تجهیزات، کمک جراح و تخت ریکاوری به زمان‌بندی روزانه اعمال جراحی انتخابی در سطح عملیاتی و با راهبرد باز پرداخته می‌شود. عدم‌قطعیت‌های مختلفی در فرآیند انجام عمل‌های جراحی وجود دارد که حل مسئله زمان‌بندی آن‌ها را با چالش‌های مختلفی روبه‌رو می‌سازد. در این پژوهش، عدم‌قطعیت در مدت‌زمان عمل‌های جراحی در نظر گرفته شده و الگوریتم ترکیبی مناسبی برای حل این مسئله در ابعاد واقعی و بزرگ پیشنهاد شده است. بدین منظور از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده‌شده و یک الگوریتم ترکیبی مورچگان و شبیه‌سازی توسعه داده شده است.

در ادامه مبانی نظری زمان‌بندی اتاق عمل مرور شده و مجموعه‌ای از مرتبط‌ترین مقاله‌ها به این مقاله آورده شده است. بخش ۳، به روش پژوهش می‌پردازد. در این بخش پس از تعریف مسئله و مفروضات آن، مدل ریاضی مساله آورده شده است. سپس الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی شبیه‌سازی که ترکیبی از روش فراابتکاری مورچگان و شبیه‌سازی مونت کارلو است، ارائه شده است. در بخش ۴ آزمایش‌های عددی برای ارزیابی روش ارائه شده انجام‌شده و در قسمت نهایی نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده آورده شده است.

.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زمان‌بندی و برنامه‌ریزی اتاق‌های عمل از سال ۱۹۷۷ توسعه یافت؛ اما در طی سده گذشته تعداد مقاله‌های چاپ‌شده در این حوزه به‌صورت فزاینده‌ای افزایش یافته است. کاردوئون و همکاران (۲۰۱۰)، مرور کاملی از مسائل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل همراه با دسته‌بندی آن‌ها از جوانب مختلف انجام دادند. پس از آن‌ها، سامودرا و همکاران (۲۰۱۶)، مروری بر مقاله‌های منتشرشده در حوزه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل بین سال‌های ۲۰۰۰ ـ ۲۰۱۴ داشتند و به بیان چالش‌ها و مشکلاتی پرداختند که پژوهشگران این حوزه با آن روبه‌رو هستند. بعضی از پژوهشگران مسئله را در حالت قطعی در نظر گرفته‌اند. برای مثال، زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، سه مرحله فرآیند جراحی را در حالت قطعی در نظر گرفتند و پس از ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله، الگوریتم فراابتکاری ACO را برای حل آن توسعه دادند. در دنیای واقعی، عدم قطعیت‌های مختلفی در فرآیند زمان‌بندی اتاق‌های عمل وجود دارد. زمان‌بندی اتاق‌های عمل به دو دلیل مسئله‌ای چالش‌برانگیز است: ۱. تخصیص منابع (اتاق‌های عمل، جراح و غیره) به کارها (عمل‌های جراحی) و تعیین توالی آن‌ها، یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی است؛ ۲. عدم‌قطعیت‌های مهمی در بسیاری از فعالیت‌های این بخش، مانند مدت‌زمان هر جراحی، وجود دارد [۸]. در سال‌های اخیر تلاش شده است تا با درنظرگرفتن این عدم‌قطعیت‌ها نتیجه پژوهش‌ها به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر و کاربردی‌تر شود.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۴)، عدم‌قطعیت را در مدت‌زمان‌های اعمال جراحی در نظر گرفتند و برای مدل‌سازی مسئله، مدل برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای را ارائه کردند. ساگنول و همکاران (۲۰۱۶)، عدم‌قطعیت را هم در زمان‌های اعمال جراحی و هم در ورود بیماران اورژانسی در نظر گرفتند و مسئله را با استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی چندمرحله‌ای مدل و با استفاده از روش صفحه برشی[1] حل کردند.

هنگامی که مسئله با احتمالات زیادی روبه‌رو است و یا زمانی که روابط پیچیده‌ای بین متغیرها وجود دارد، استفاده از شبیه‌سازی، انعطاف‌پذیری زیادی برای مدل‌سازی دارد و جزئیات زیادی را می‌توان در آن مدنظر قرار داد. در برخی از پژوهش‌ها از شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری مستقل برای تعیین ظرفیت مناسب اتاق عمل، زمان‌بندی مجدد و بهبود عملکرد منابع استفاده شده است [۱۵]. در تعدادی از پژوهش‌ها روش شبیه‌سازی را به‌عنوان ابزار ارزیابی روش حل مسئله به‌کار برده‌اند [۲۱] و [۲۵].

روش‌های بهینه‌سازی معمولاً از روش‌های تحلیلی برای رسیدن به جواب بهینه (نزدیک به بهینه) استفاده می‌کنند. این روش‌ها در برابر مسائل پیچیده و واقعی با مشکل روبه‌رو می‌شوند و اغلب بر عناصری از سیستم متمرکز شده و یا اینکه سیستم را بیش‌ازحد ساده‌سازی می‌کنند. از دیگر سو روش‌های شبیه‌سازی توانایی پرداختن به سیستم‌های پیچیده را دارند و می‌توانند برای سیستم‌های چندمرحله‌ای با محدودیت‌های متفاوت به‌کار برده شوند. با این حال رویکردهای شبیه‌سازی وقت‌گیر هستند و اغلب یک راهبرد بهینه‌سازی رقابتی ارائه نمی‌دهند؛ بنابراین یک شکاف در مبانی نظری برای روش‌های مؤثر و کارآمد برای مقابله با چالش‌های برنامه‌ریزی جراحی وجود دارد [۲۰]؛ ازاین‌رو در سال‌های اخیر از تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی که مزایای هر دو روش را داشته باشد و تا حدی معایب هر یک را پوشش دهد، در حل مسائل مختلف بهینه‌یابی استفاده شده است. عادلی و زندیه (۱۳۹۲) یک رویکرد چند هدفه بهینه‌سازی شبیه سازی برای حل مساله یکپارچه منبع یابی و سیاست موجودی در شرایط احتمالی ارائه داده‌اند. در این رویکرد از روش‌های فراابتکاری چندهدفه NSGA-II و MOPSO استفاده شده است. در ادامه فقط به مطالعاتی که از این رویکرد در حل مساله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل استفاده کرده‌اند، می‌پردازیم.

چو و همکاران (۲۰۱۰)، باندیتوری و همکاران (۲۰۱۳) و ازکان و همکاران (۲۰۱۶)، از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در حوزه برنامه‌ریزی اتاق‌های عمل استفاده کردند. چو و همکاران (۲۰۱۰)، رویکرد بهینه‌سازی ـ شبیه‌سازی را مطرح کردند که ترکیبی از شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است و به زمان‌بندی اعمال جراحی با هدف

1. Cutting-plane

کاهش شلوغی بخش پرداختند. رویکرد ارائه‌شده توسط باندیتوری و همکاران (۲۰۱۳)، شامل سه مرحله است:

۱. بهینه‌سازی: مدل بهینه‌سازی با تنظیمات مختلف (زمان و تخت در دسترس) اجرا می‌شود؛

۲. شبیه‌سازی: هر جوابی که در گام قبلی به‌دست‌آمده طی چندین تکرار شبیه‌سازی با درنظر-گرفتن تعداد تخت و زمان واقعی دردسترس شبیه‌سازی می‌شود. تعداد بیماران لغوشده، عمل‌های انجام‌شده و اضافه‌کاری، خروجی‌های هر تکرار شبیه‌سازی هستند؛

۳. تحلیل: نتایج شبیه‌سازی تجزیه‌وتحلیل می‌شود تا راه‌حل قابل‌قبولی از لحاظ استحکام حاصل شود.

هدف از پژوهش ازکان و همکاران (۲۰۱۶)، ایجاد توازن بین برآوردن نیازهای بیمار و استفاده بهینه از تخت و اتاق عمل است. برای این منظور ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی اجزا مهم سیستم و گلوگاه‌های فرآیند شناسایی و در ادامه از بهینه‌سازی یکپارچه که در یک نرم‌افزار شبیه‌سازی فراهم شده است، برای ارزیابی بهترین تنظیمات منابع برای بهبود عملکرد استفاده شده است. در این پژوهش از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تدریجی (SA)[1] برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

لیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، به زمان‌بندی اتاق‌های عمل با استفاده از این رویکرد پرداختند و فقط مرحله انجام عمل جراحی را در نظر گرفتند. آن‌ها برنامه زمان‌بندی را بر اساس ترکیبی از سه قانون زمان‌بندی ساده، یعنی کوتاه‌ترین زمان پردازش[2]، نرخ بحرانی[3] و خدمت به ترتیب ورود[4]، ارائه کرده‌اند. با استفاده از روش سطح پاسخ، وزن‌های بهینه هر کدام از قوانین به‌دست‌آمده است. نتایج برای بهبود به مدل شبیه‌سازی داده شده است. درنهایت جواب‌های به‌دست‌آمده از رویکرد ترکیبی را با الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه (TS)[5] مقایسه کرده‌اند.

صارمی و همکاران (۲۰۱۳)، گرنجا و همکاران (۲۰۱۴) و بیسلر و همکاران (۲۰۱۵)، هر سه مرحله فرآیند جراحی (قبل از جراحی، عمل جراحی و ریکاوی) را در نظر گرفتند. گرنجا و همکاران (۲۰۱۴)، مسئله را به‌صورت چندمرحله‌ای و چند خدمت‌دهنده در نظر گرفتند و روشی برای حل آن ارائه کردند: تعریف جریان کار، جمع‌آوری داده و شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با الگوریتم SA. توالی اولیه بیماران با استفاده از یک روش تخصیص پویا فراهم شده و از الگوریتم SA برای بهینه‌کردن توالی پذیرش بیمار استفاده شده است. بیسلر و همکاران (۲۰۱۵)، برنامه زمان‌بندی بیماران را به روش تصادفی ایجاد و برای سنجش عملکرد آن از شبیه‌سازی استفاده

1. Simulated Anealing (SA)
2. Shortest processing Time (SPT)
3. Critical Rate (CR)
4. First Come First Serve (FCFS)
5.Tabu Search

کردند. نتایج شبیه‌سازی با هدف پیداکردن زمان‌بندی جدید به الگوریتم SA داده شده و زمان‌بندی جدید مجدداً به پلتفرم شبیه‌سازی داده می‌شود. این چرخه تا زمانی که به شرط اختمام برسد تکرار می‌شود. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به درنظرنگرفتن منابع انسانی (جراحان، پرستاران و دستیاران و غیره) اشاره کرد.

صارمی و همکاران (۲۰۱۳)، برای حل مسئله سه روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی مطرح کردند. روش نخست، شبیه‌سازی گسسته پیشامد را با الگوریتم جست‌وجوی ممنوع ترکیب می‌کند. در روش‌های دوم و سوم جواب اولیه الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح و صفر و یک به‌دست می‌آید، جواب‌ها رتبه‌بندی شده و در فهرست کاندیدهای شبیه‌سازی قرار داده می‌شوند. شبیه‌سازی با تصادفی درنظرگرفتن پارامترها بهترین جواب‌ها را انتخاب می‌کند و مجدداً به الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه می‌فرستد و این فرآیند تا زمان رسیدن به‌شرط اختتام تکرار می‌شود.

اسکندری و بهرامی (۱۳۹۶)، مسئله زمان‌بندی اتاق عمل را با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی و با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های اضافه‌کاری و خالی‌ماندن اتاق‌های عمل و کمینه‌کردن روزهای انتظار بیماران برای جراحی بررسی کردند. آن‌ها از دو الگوریتم NSGA-II و FastPGA که روش‌های چندهدفه مبتنی بر قواعد الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه است، برای ترکیب با شبیه‌سازی استفاده کرده و عملکرد آن‌ها را با مدل برنامه ریاضی و با یکدیگر مقایسه کردند.

در این پژوهش تنها مرحله انجام عمل جراحی و تنها منابع اتاق عمل و جراح در نظر گرفته شده‌اند و سایر منابع مانند تجهیزات و تخت‌های ریکاوری و غیره دردسترس فرض شده‌اند. جدول ۱، مشخصات تعدادی از مرتبط‌ترین پژوهش‌ها در حوزه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل را نشان می‌دهد که از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند.

جدول ۱. مرتبط‌ترین مقالات در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

نویسنده	نوع استراتژی		نوع داده ها		نوع بیمار		روش حل	محدودیت درنظرگرفته شده					هدف	سطح		
	باز	بلوکه	واقعی	تولیدشده	اورژانسی	انتخابی		ظرفیت منابع قبل از عمل	ظرفیت منابع حین عمل: تجهیزات	ظرفیت منابع حین عمل: اتاق عمل	ظرفیت منابع حین عمل: منابع انسانی	ظرفیت منابع بعد از عمل		برنامه ریزی	زمان‌بندی	یکپارچه
cho et al. (2010)		*	*		*		مدل MIP + شبیه‌سازی			*		*	کاهش شلوغی بخش	*		
Saremi et al. (2013)	*		*		*		TS + شبیه‌سازی	*		*	*	*	کمینه‌کردن دامنه عملیات و زمان انتظار بیماران			*
Banditori et al. (2013)		*	*		*		MIP + شبیه‌سازی	*	*	*	*		بیشینه‌کردن ظرفیت پذیرش بیمار	*		
Granja et al. (2014)	*		*		*		SA + شبیه‌سازی	*		*	*	*	کمینه‌کردن دامنه عملیات و زمان انتظار بیماران		*	
Baseler (2015)	*		*		*		SA + شبیه‌سازی	*		*		*	کمینه‌کردن دامنه عملیات		*	
Liang et al. (2015)	*		*		*		قواعد هیوریستیک + روش سطح پاسخ + شبیه‌سازی			*	*		کمینه‌کردن زمان انتظار بیماران و بیشینه کردن عملکرد بیمارستان		*	
Ozkan et al.(2016)		*	*		*	*	SA + شبیه‌سازی	*		*			برآوردن نیازهای بیمار و استفاده بهینه از تخت و اتاق عمل	*		
اسکندری و بهرامی	*		*	*	*		NSGA-II FastPGA + شبیه سازی			*	*		کمینه‌کردن هزینه اضافه‌کاری و خالی ماندن اتاق و روزهای انتظار بیماران		*	
پژوهش حاضر	*		*		*		ACO+ شبیه‌سازی	*	*	*	*	*	کمینه‌کردن زمان بیکاری و اضافه‌کاری اتاق‌های عمل		*	

با توجه به جدول ۱، از نظر روش حل، روش ترکیبی ACO و شبیه‌سازی تاکنون در هیچ مطالعه‌ای ارائه نشده است؛ از طرفی درنظرگرفتن هم‌زمان تمام محدودیت‌های منابع قبل از عمل، منابع حین عمل، شامل تجهیزات، اتاق عمل، نیروی انسانی (جراح، کمک جراح، پرستاران و تکنسین‌ها) و منابع بعد از عمل در مسئله زمان‌بندی اتاق‌های عمل در حالت احتمالی تاکنون در هیچ پژوهشی بررسی نشده است.

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی روزانه اعمال جراحی در هر سه مرحله، قبل از جراحی، حین جراحی و ریکاوری و با درنظرگرفتن منابع سه مرحله (تخت قبل از جراحی، اتاق عمل، جراح، کمک جراح، تجهیزات و تخت ریکاوری) مدل‌سازی شده است. رویکرد ارائه‌شده برای حل مسئله، ترکیبی از الگوریتم کلونی مورچگان و شبیه‌سازی مونت کارلو است که با توجه به مطالعات انجام‌شده تاکنون در هیچ پژوهشی مطرح نشده است؛ همچنین این پژوهش به حل

مسائل یک نمونه واقعی از بیمارستان‌های آموزشی درمانی ایران (بیمارستان هاشمی نژاد تهران)، با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی می‌پردازد که در آن محدودیت‌های واقعی سیستم، ازجمله محدودیت اتاق عمل، جراح، کمک جراح و تجهیزات، لحاظ شده است. استفاده از قواعد ابتکاری مربوط به زمان‌بندی ماشین‌های موازی در طراحی الگوریتم مورچگان و مقایسه کارایی آن‌ها جنبه دیگری از نوآوری پژوهش حاضر است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی روزانه بیماران انتخابی در نظر گرفته شده است. به این صورت که شب قبل از عمل، فهرست بیماران آماده است. در بسیاری از بیمارستان‌های آموزشی، عمل‌های جراحی توسط رزیدنت‌های سال‌های مختلف و تحت نظارت استاد مربوطه انجام می‌شود. رزیدنت‌های سال‌های مختلف بر حسب تجربه و آموزشی که در این دوران کسب کرده‌اند، توانایی انجام عمل‌های مختلفی را دارند. برخی از عمل‌های جراحی به کمک‌جراح یا دستیار نیز نیاز دارند. معمولاً عملیات جراحی شامل سه مرحله قبل از عمل (آماده‌سازی)، حین عمل (جراحی) و بعد از عمل (ریکاوری) است.

در مرحله قبل از عمل یک پرستار وظیفه آماده‌سازی بیمار را بر عهده دارد. بعد از این مرحله اگر همه منابع لازم برای جراحی در دسترس بود، بیمار مستقیماً به اتاق جراحی فرستاده می‌شود؛ در غیر این صورت باید منتظر بماند. در مرحله جراحی، اگر همه منابع لازم در دسترس بود، جراحی انجام می‌شود و بعد از آن بیمار به بخش ریکاوری منتقل می‌شود. هر یک از سه مرحله به منابعی نیاز دارد که اگر هر یک از این منابع در دسترس نباشد، عمل جراحی به تعویق می‌افتد. منابع درنظرگرفته‌شده برای این پژوهش شامل تخت قبل از عمل، پرستار، اتاق عمل، دستیار، جراح، تجهیزات و تخت ریکاوری است. تخت قبل از عمل، تخت‌های ریکاوری و پرستاران برای همه بیماران یکسان هستند؛ ولی برای سایر منابع با توجه به نوع عمل، گروه خاصی از منابع لازم است. اولویتی بین انتخاب بیماران وجود ندارد و عملکرد همه منابع از یک نوع، یکسان در نظر گرفته شده است.

مدل پیشنهادی این پژوهش بر اساس مدل ارائه‌شده در پژوهش زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، طراحی شده و توسعه داده شده است. مفروضات مدل ریاضی به شرح زیر است:

۱. هر بلوک زمانی به اندازه ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است. زمان کاری اتاق عمل از ساعت ۸ صبح تا ۴ بعدازظهر، هشت ساعت، یعنی ۳۲ بازه زمانی در نظر گرفته شده است و درصورتی‌که عمل جراحی در این بازه زمانی به اتمام نرسد، اضافه‌کاری اتاق عمل محسوب می‌شود؛

۲. راهبرد زمان‌بندی، راهبرد باز است؛

۳. طول زمان عمل جراحی از قبل معلوم است؛

۴. یک عمل جراحی در یک زمان تنها به یک جراح می‌تواند تخصیص یابد؛
۵. توالی سه مرحله باید رعایت شود؛
۶. هیچ مرحله‌ای نمی‌تواند قطع یا متوقف شود؛
۷. برای همه اعمال جراحی اولویت یکسان در نظر گرفته شده است؛
۸. زمان انتقال لحاظ نشده است؛
۹. تعداد و وضعیت منابع از قبل مشخص است؛
۱۰. سرعت عملکرد جراحان یکسان در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی ریاضی مسئله. در این بخش، نمادهایی که برای مدل‌سازی مسئله لازم است، آورده شده‌اند.

مجموعه‌ها

I: مجموعه اعمال جراحی، $i \in I$
J: مجموعه مراحل جراحی ;$j \in J$
S: مجموعه تخصص‌های جراحی، $s \in S$
C: مجموعه انواع منابع، $c \in C$
M_C: مجموعه منابع از نوع منبع c، $c \in M_c$
Ck_{ij}: مجموعه انواع منابع موردنیاز برای مرحله j از جراحی i ; $i \in I; j \in J; c \in Ck_{ij}$
R: مجموعه اتاق‌های عمل، $r \in R$
U_{cm}: مجموعه مراحل جراحی که می‌تواند با منبع m از نوع c انجام شوند. $m \in M_c; c \in C;$

پارامترها

n_{ij}^c: تعداد منبع موردنیاز از نوع c در مرحله j از جراحی i. $i \in I; j \in J; c \in Ck_{ij}$
T_{ij}: مدت‌زمان مرحله j از عمل جراحی i. $i \in I; j \in J$
D_w: پنجره زمانی روز کاری w، $D_w = [T_{Sw}, T_{EW}]$، T_{Sw} و T_{Ew} به‌ترتیب زمان شروع و زمان پایان روز کاری w است. $w \in N^+$
H: عدد خیلی بزرگ مثبت
P_{ij}^{cm}: امکان‌پذیربودن منبع mام از نوع cام در طول مرحله jام از عمل جراحی i.
$P_{ij}^{cm} = 1$ اگر منبع امکان‌پذیر باشد. در غیر این صورت، $P_{ij}^{cm} = 0$. $i \in I; j = 1, 2, 3; c \in C_{ij}; m \in M_c$
L: طول زمان نرمال روز کاری

B_1, B_2: به‌ترتیب ضرایب هزینه اضافه‌کاری و بیکاری اتاق‌های عمل.

متغیرهای تصمیم

X_{ij}^{cm}: اگر منبع m از نوع c به مرحله j از جراحی i تخصیص یابد، مقدار یک و در غیر این صورت، $X_{ij}^{cm}=0$ ،i∈ I; j∈J; c ∈ CK_{ij}; m ∈ M_c

ST_{ij}: زمان شروع مرحله j از جراحی i ∈ I, j∈ J; i

ET_{ij}: زمان پایان مرحله j از عمل جراحی i ∈ I; j∈ J ;i

Z_{elik}^{cm}: اگر مرحله lام جرحی e بر مرحله kام ج حی i روی منبع m از نوع c مقدم شود، مقدار یک و در غیر این صورت $Z_{elik}^{cm}=0$. l,k=1, 2 ,3 ،i,e ∈ I, c ∈ CK_{ij};m ∈ M_c

$Omax_r$: زمان اتمام آخرین عمل جراحی در اتاق عمل r. r ∈ R

$OverOR_r$: زمان اضافه‌کاری اتاق عمل r.r ∈ R

$IdleOR_r$: زمان بیکاری اتاق عمل r ∈ R.r

بر اساس نمادهای تعریف‌شده، مدل ریاضی مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\text{Minimize } Z= B_1 * \sum_{r=1}^{R} IdleOR_r + B_2 * \sum_{r=1}^{R} OverOR_r \qquad (۱)$$

St:

$$ET_{ij} = ST_{ij} + T_{ij} \qquad \forall i,j \qquad (۲)$$

$$ST_{i(j+1)} \geq ET_{ij} \qquad i \in I, j = 1,2 \qquad (۳)$$

$$ET_{ik} - ET_{el} + H(1-Z_{elik}^{cm}) \geq T_{ik} - H(1-X_{el}^{cm}) - H(1-X_{ik}^{cm}) \qquad ik, el \in U_{cm},\ e,i \in I, i \neq e \qquad (۴)$$

$$T_{sw} \leq ST_{i1} \leq T_{EW} - T_{i1} - T_{i3} - T_{i2} \qquad \forall i \qquad (۵)$$

$$X_{ij}^{cm} \leq P_{ij}^{cm} \qquad \forall i,j,c,m \qquad (۶)$$

$$\sum_{m \in M_c} X_{ij}^{cm} = n_{ij}^{c} \qquad \forall i,j,c \qquad (۷)$$

$$Z_{elik}^{cm} + Z_{ikel}^{cm} \leq X_{ik}^{cm} \qquad ik, el \in U_{cm},\ i,e \in I, i \neq e \qquad (۸)$$

$$Z_{elik}^{cm} + Z_{ikel}^{cm} \leq X_{el}^{cm} \qquad ik, el \in U_{cm},\ i,e \in I, i \neq e \qquad (۹)$$

$$Z_{elik}^{cm} + Z_{ikel}^{cm} \geq X_{ik}^{cm} + X_{el}^{cm} - 1 \qquad ik, el \in U_{cm};\ i,e \in I, i \neq e \qquad (۱۰)$$

$$Omax_r \geq ET_{i2} - H(1 - X_{i2}^{Rr}) \qquad r \in R, i \in I \qquad (۱۱)$$

$$OverOR_r \geq \sum_i T_{i2}.X_{i2}^{Rr} - L \qquad r \in R \qquad (۱۲)$$

$$IdleOR_r \geq Omax_r - \sum_i T_{i2}.X_{i2}^{Rr} \qquad r \in R \qquad (۱۳)$$

$$X_{ij}^{cm} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,c,m \qquad (۱۴)$$

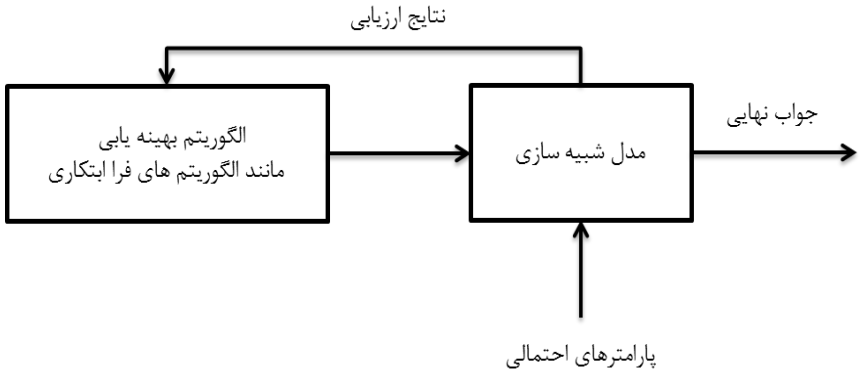
$$Z_{elik}^{cm} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,c,m \qquad (۱۵)$$

در رابطه ۱، تابع هدف به‌صورت کمینه‌کردن مجموع هزینه اضافه‌کاری و بیکاری اتاق‌های عمل، تعریف شده است. محدودیت ۲، زمان پایان مرحله j از جراحی i را معین می‌کند. محدودیت ۳، تضمین می‌کند که مرحله $j+1$ پس از پایان مرحله j می‌تواند شروع شود. رابطه ۴، رابطه زمانی دو عمل متوالی روی یک منبع را نشان می‌دهد. محدودیت ۵، زمان جراحی را به روز کاری محدود می‌کند. این محدودیت، نشان می‌دهد که زمان شروع هر عمل جراحی باید پس از زمان شروع روز کاری باشد و به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که تا قبل از پایان روز کاری به اتمام برسد. محدودیت ۶، امکان‌پذیری منبع را تضمین می‌کند.

محدودیت ۷، تضمین می‌کند که دقیقاً تعداد منبع موردنیاز از نوع c به مرحله j از جراحی i تخصیص یابد. محدودیت‌های ۸ و ۹ و ۱۰ دو عمل متوالی روی یک منبع را مشخص می‌کنند. محدودیت‌های ۸ و ۹، نشان می‌دهند که در صورتی متغیر Z_{elik}^{cm} یا Z_{ikel}^{cm} که توالی دو عمل جراحی روی یک منبع را نشان می‌دهد، می‌تواند مقدار بگیرد که هر یک از دو عمل به آن منبع تخصیص یافته باشند. محدودیت ۱۰، نیز نشان می‌دهد که اگر دو عمل به یک منبع تخصیص یافته باشند یا متغیر Z_{elik}^{cm} و یا متغیر Z_{ikel}^{cm} حتماً باید مقدار بگیرند. رابطه ۱۱، زمان اتمام آخرین عمل جراحی در اتاق عمل r را تعیین می‌کند. روابط ۱۲ و ۱۳، به‌ترتیب زمان اضافه‌کاری و بیکاری اتاق‌های عمل را محاسبه می‌کنند. روابط ۱۴ و ۱۵، صفر و یک بودن متغیرها را نشان می‌دهند.

رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی. برای حل مسئله از رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شده است. در رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، یک روش بهینه‌یابی مانند روش‌های دقیق یا الگوریتم‌های جست‌وجوی فراابتکاری به یک مدل شبیه‌سازی متصل می‌شود. این رویکرد روش مناسبی برای یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه برای مسائل پیچیده و احتمالی است.

در این رویکرد، یک جواب اولیه از روش بهینه‌یابی به‌دست می‌آید. این جواب اولیه، برای ارزیابی عملکرد به مدل شبیه‌سازی داده می‌شود، الگوریتم شبیه‌سازی با درنظرگرفتن پارامترهای احتمالی و شبیه‌سازی سیستم، ارزیابی عملکردی از جواب انجام می‌دهد و نتیجه این ارزیابی را به روش بهینه‌یابی برمی‌گرداند و این فرآیند تا زمان رسیدن به یک جواب بهینه یا نزدیک بهینه مطلوب تکرار می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

مزیت اصلی استفاده از روش های فرا ابتکاری در حل مسائل بهینه یابی، وجود مفروضات محدود در فرموله کردن مدل است، در حالی که این امر در برنامه‌ریزی ریاضی مصداق ندارد. برخی از مسائل بهینه یابی را نمی‌توان با نمادهای تحلیلی ریاضی بدون ابهام فرموله کرد [۱۶]. الگوریتم‌های فراابتکاری دارای خصوصیت جست‌وجوی تصادفی و موازی هستند؛ ولی معمولاً در آن‌ها فرض بر این است که ورودی‌های مسئله، قطعی هستند. این در حالی است که عدم‌قطعیت در دنیای اطراف وجود دارد که باعث می‌شود مدل‌های قطعی حالت بسیار ساده‌سازی‌شده‌ای از دنیای واقعی باشند. رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به تحلیل‌گران امکان رویارویی با عدم‌قطعیت‌های دنیای واقعی را می‌دهد [۱۳].

از الگوریتم‌های فراابتکاری متعددی برای جست‌وجو و ترکیب با روش شبیه‌سازی می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش از الگوریتم کلونی مورچگان برای جست‌وجو استفاده شده است. الگوریتم کلونی مورچه‌ها (ACO) نخستین بار توسط دوریگو (۱۹۹۱)، به‌عنوان یک راه‌حل چندعامله برای مسائل مشکل بهینه‌سازی ارائه شد و سپس توسط دوریگو و همکاران (۱۹۹۶)، توسعه داده شد. الگوریتم ACO از رفتار مورچه‌های واقعی برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر به منبع غذا الهام گرفته شده است. مورچه‌ها در هنگام یافتن غذا در مسیر خود ماده‌ای به نام فرومون بر جای می‌گذارند که به سایر مورچه‌ها برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر کمک می‌کند. مسیری که

مورچه‌های بیشتری از آن عبور کرده باشد، فرومون بیشتری دارد و احتمال انتخابش بیشتر است. لازم به ذکر است که فرومون به‌مرور تبخیر می‌شود. افزایش فرومون روی یک مسیر و تبخیر آن باعث می‌شود که مقدار فرومون به‌صورت پویا تغییر کند.

مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل با عدم‌قطعیت‌های مختلفی روبه‌رو است و یک مسئله زمان‌بندی پویا در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم کلونی مورچگان به‌دلیل داشتن دو ویژگی بازخورد مثبت[1] و خودسازماندهی[2]، تطابق بیشتری برای خودیادگیری[3] محیط پیچیده و احتمالی اتاق‌های عمل دارد [۲۳]. الگوریتم مورچگان یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر مدل است که به ساخت یک مدل احتمالی برای تولید جواب می‌پردازد. در این مدل، قابلیت استفاده از اطلاعات ابتکاری مسئله در حین ساخت جواب به‌خوبی دیده می‌شود و این امر کارایی آن را در مسائلی که اطلاعات ابتکاری خوبی از نحوه ساخت جواب وجود دارد، بالا می‌برد؛ به‌علاوه با توجه به ماهیت روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی توجه به زمان محاسباتی روش دارای اهمیت بسیاری است. در صورت استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر نمونه، مانند الگوریتم ژنتیک، به ازای هر کروموزوم باید شبیه‌سازی صورت گیرد و زمان محاسباتی روش بسیار افزایش و درنتیجه کارایی روش کاهش می‌یابد؛ ازاین‌رو در این پژوهش از الگوریتم ACO برای بهینه‌سازی استفاده شده است. در ادامه ابتدا روش ACO استفاده‌شده در این پژوهش و سپس رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی پیشنهادی تشریح شده است.

در پژوهش حاضر، الگوریتم ACO دوسطحی که توسط زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، برای حل مسئله زمان‌بندی اتاق عمل در حالت قطعی ارائه‌شده، توسعه داده شده است. در این الگوریتم، یک شبکه دوسطحی به‌کار می‌رود که در سطح اول به تعیین توالی اعمال جراحی و در سطح دوم به تخصیص منابع به هر مرحله از عمل جراحی پرداخته می‌شود.

هر عمل جراحی را می‌توان به‌عنوان یک کار و هر منبع در هر مرحله از فرآیند را به‌عنوان یک ماشین در نظر گرفت. هر کار در هر مرحله از فرآیند جراحی، می‌تواند روی زیرمجموعه‌ای از منابع آن مرحله از فرآیند پردازش شود. در این پژوهش، تعدادی از قواعد ابتکاری که در زمینه مسئله ماشین‌های موازی وجود دارد، در طراحی قواعد ابتکاری الگوریتم مورچگان به‌کار رفته است. طبق قاعده کم‌انعطاف‌ترین کار (LFJ)[4]، هر زمان که ماشینی بیکار شود، از میان کارهای دردسترس، کاری انتخاب می‌شود که می‌تواند روی کمترین تعداد ماشین‌ها پردازش شود. قاعده دیگر، قاعده کم‌انعطاف‌ترین ماشین (LFM)[5] است که مطابق این قاعده در زمان دردسترس‌بودن

1. Positive Feedback
2. Self-Organizing
3. Self-Learning
4. Least Flexible Job(LFJ)
5. Least Flexible Machine(LFM)

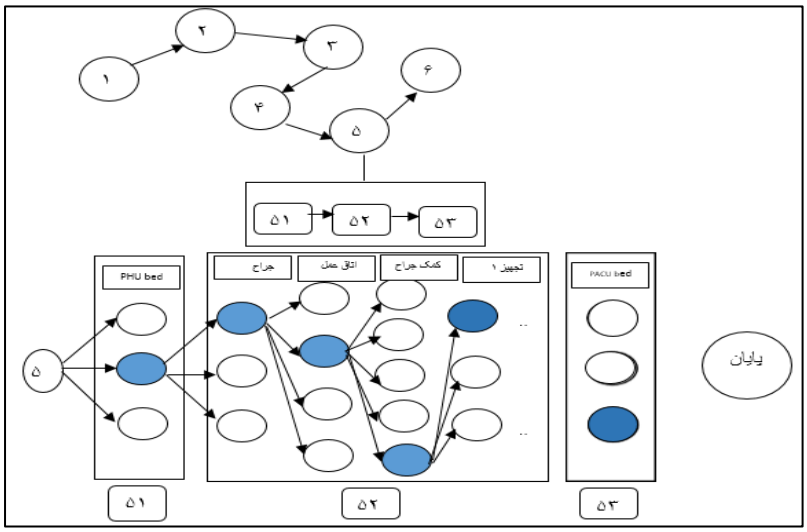
چند ماشین برای انجام یک فعالیت، ماشینی انتخاب می‌شود که تعداد کارهای باقیمانده‌ای که می‌تواند روی آن پردازش شود، کمتر باشد. در این پژوهش، این دو قاعده همراه با قواعد طولانی‌ترین زمان پردازش (LPT)[1] و زودترین زمان شروع[2] منابع (ES) در طراحی قواعد ابتکاری در دو سطح الگوریتم مورچگان به‌کار رفته و موردارزیابی قرار گرفته‌اند.

در سطح اول شبکه، هر گره نماد یک عمل جراحی و هر مسیر روی گره‌ها نشان‌دهنده توالی اعمال جراحی است. در این پژوهش، برای انتخاب عمل جراحی بعدی، دو نوع اطلاعات ابتکاری در نظر گرفته شده و در قسمت آزمایش‌های عددی بهترین حالت انتخاب شده است:

ـ بر اساس قاعده طولانی‌ترین زمان پردازش (LPT)[3]: هر عمل جراحی که زمان پردازش بیشتری داشته باشد، احتمال بیشتری برای انتخاب دارد.

ـ بر اساس قاعده کم‌انعطاف‌ترین کار (LFJ): هر عمل جراحی که تعداد جراح امکان‌پذیرش کمتر باشد، احتمال انتخاب بیشتری دارد.

در سطح دوم شبکه به تخصیص منبع به هر مرحله از عمل جراحی پرداخته می‌شود. در این سطح از شبکه، گره‌های یک ستون نمایانگر منابع دردسترس از یک نوع منبع، هر گره نمایانگر منابع موردنیاز برای تکمیل آن مرحله از عمل جراحی و مسیر در شبکه، منابع انتخاب‌شده برای هر مرحله از عمل جراحی است (شکل ۲).



شکل ۲. شبکه دوسطحی برای زمان‌بندی اعمال جراحی [۲۳]

1. Longest Processing Time(LPT)
2. Earliest Start
3. Longest Processing Time(LPT)

در این پژوهش، در سطح دوم، دو نوع اطلاعات ابتکاری زیر برای تخصیص منابع به هر عمل جراحی درنظرگرفته‌شده و در قسمت آزمایش‌های عددی بهترین حالت انتخاب شده است:
ـ تخصیص منابع بر اساس زودترین زمان شروع[1] منابع (ES): منبعی که زمان شروع روی آن زودتر است (زمان دردسترس آن زودتر است)، احتمال انتخاب بیشتری دارد.
ـ تخصیص منابع بر اساس قاعده کم‌انعطاف‌ترین ماشین (LFM)[2]: مهم‌ترین منبع که با محدودیت بیشتری روبه‌رو است، پزشک جراح است. طبق این حالت هر پزشک جراحی که تعداد عمل جراحی امکان‌پذیرش کمتر است، شانس بیشتری برای انتخاب دارد.

روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی پیشنهادی. در این پژوهش برای درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در زمان‌های جراحی، شبیه‌سازی مونت کارلو با الگوریتم مورچگان دوسطحی، ترکیب شده است. گام‌های الگوریتم پیشنهادی به‌صورت زیر است:
ـ ماتریس فرومون دو سطح داخلی و خارجی را مقداردهی اولیه کن؛
ـ یک عدد طبیعی دلخواه به‌عنوان ریشه تولید اعداد تصادفی در نظر بگیرید و آن را init بنامید؛
ـ تا زمان دستیابی به شرایط توقف گام‌های زیر را اجرا کن؛
ـ برای هر مورچه یک جواب امکان‌پذیر بساز (S) و ارزش آن را محاسبه کن:
ـ کلیه عمل‌ها را در مجموعه عمل‌های منتظر برنامه‌ریزی (I) قرار بده؛
ـ تا زمانی که $I \neq \emptyset$ گام‌های زیر را انجام بده:
ـ با استفاده از اطلاعات فرومون ماتریس خارجی و اطلاعات ابتکاری یک عمل را از مجموعه I انتخاب کن و آن را از مجموعه I حذف کن. عمل منتخب را i نامگذاری کن؛
ـ بر اساس مجموعه منابع امکان‌پذیر برای هر مرحله از عمل i، اطلاعات ماتریس فرومون داخلی و اطلاعات ابتکاری، منابع لازم برای اجرای فرآیند جراحی عمل i را تخصیص بده؛
ـ جواب ساخته‌شده برای مورچه (S) را با اضافه‌کردن منابع تخصیص‌داده‌شده به عمل i بهنگام کن؛
ـ زمان‌های دردسترس‌بودن منابع را بر اساس متوسط زمان پردازش عمل i روی هر یک، بهنگام کن؛
ـ مقدار تابع هدف برای جواب S را محاسبه کن (اجرای شبیه‌سازی):
ـ ریشه تولید اعداد تصادفی را برابر با init قرار بده؛
ـ تا زمان انجام تعداد تکرار شبیه‌سازی تعیین‌شده گام‌های زیر را انجام بده:
ـ به ازای هر عمل منابع تخصیص داده‌شده را از S بخوان و گام‌های زیر را انجام بده:

1. Earliest Start
2. Least Flexible Machine(LFM)

ـ به ازای هر منبع تخصیص داده‌شده به هر عمل، مدت‌زمان پردازش را به‌صورت تصادفی از تابع توزیع احتمال آن عمل روی آن منبع تولید کن؛
ـ بر اساس زمان‌های تولیدشده، برنامه زمان‌بندی عمل روی منابع تخصیص‌داده‌شده را بهنگام کن؛
ـ زمان‌های دردسترس‌بودن منابع را بر اساس زمان پردازش عمل i روی هر یک در این تکرار شبیه‌سازی، بهنگام کن؛
ـ مقدار تابع هدف را بر اساس برنامه زمان‌بندی عمل‌ها محاسبه کن و آن را مقدار تابع هدف این تکرار شبیه‌سازی قرار بده (Obj_i مقدار تابع هدف برنامه زمان‌بندی بر اساس سناریوی تعریف‌شده در تکرار iام شبیه‌سازی است)
ـ متوسط مقادیر تابع هدف به‌دست‌آمده در تکرارهای مختلف شبیه‌سازی را حساب کن و برابر با ارزش جواب متناظر با مورچه قرار بده ($Avg_i(Obj_i)$)
ـ بهترین مورچه را انتخاب کن و ماتریس‌های فرومون داخلی و خارجی را مطابق با روابط پژوهش زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، بهنگام کن:
ـ مورچه دارای بهترین مقدار ارزش را پیدا کن؛
ـ بر اساس ترتیب عمل‌ها در جواب متناظر با مورچه منتخب، ماتریس فرومون خارجی را بهنگام کن؛
ـ بر اساس منابع تخصیص‌داده‌شده در جواب باارزش‌ترین مورچه، ماتریس فرومون داخلی را بهنگام کن.
ـ بهترین جواب جست‌وجوشده را گزارش کن؛
ـ پایان.

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این پژوهش، «بیمارستان آموزشی ـ درمانی هاشمی‌نژاد» به‌عنوان مورد مطالعه انتخاب شده است. مرکز فوق‌تخصصی بیماری‌های کلیه و مجاری ادرار شهید هاشمی‌نژاد، مرکزی آموزشی- درمانی است که از سال ۱۳۸۱ با تغییر در سیستم مدیریتی آن به مسیر تعالی قدم گذاشته و سبب تحول همه‌جانبه در آن شده است. این مرکز به‌عنوان مرکز کشوری درمان بیماری‌های کلیوی تحت پوشش «دانشگاه علوم پزشکی ایران» مشغول خدمت‌رسانی به جامعه بوده و نخستین و بزرگ‌ترین مرکز همودیالیز و پیوند کلیه در کشور به شکل مستمر است و بیش از ۳۰ سال است که به تربیت ارولوژیست و نفرولوژیست اشتغال دارد. این مرکز دارای نشان درجه یک عالی در رتبه‌بندی بیمارستان‌ها از سوی وزارت بهداشت است؛ همچنین به‌عنوان واحد خدماتی نمونه برتر با اخذ جایزه ملی کیفیت از «مؤسسه استاندارد» بوده و برای نخستین بار در

حوزه بهداشت و درمان، موفق به دریافت جایزه تعالی کیفیت با نشان تندیس بلورین از «مؤسسه مطالعات بهره‌وری و منابع انسانی» شده است. به همین دلیل این بیمارستان به‌عنوان مورد مطالعه برای افزایش بهره‌وری بخش اتاق عمل، انتخاب شد. در این بیمارستان ۴ نوع عمل جراحی ارولوژی، اندوسکوپیک، عروق و لاپراسکوپ انجام می‌شود. مرکز جراحی شامل ۷ اتاق عمل است که از این اتاق‌ها، ۳ اتاق مخصوص عمل‌های اندوسکوپیک هستند. سایر اعمال جراحی در همه اتاق‌های عمل می‌توانند انجام شوند.

در این پژوهش عمل‌های جراحی اندوسکوپیک در نظر گرفته نشده‌اند. در این بیمارستان ۱۲ رزیدنت و ۲ فلوشیپ حضور دارند که بسته به سال تحصیلی و تجربه کسب‌شده، توانایی انجام عمل‌های خاصی را دارند. هر عمل جراحی علاوه بر جراح، به گروه تکنسین (پزشک بیهوشی، تکنسین بیهوشی و تکنسین اتاق عمل) نیز نیاز دارد. در برخی از اعمال جراحی علاوه بر جراح به کمک جراح نیز نیاز است. علاوه بر منابع انسانی منابع کاربردی مانند تخت پیش از جراحی، تخت ریکاوری و همچنین تجهیزات پزشکی مربوط به هر نوع عمل نیز درنظر گرفته شده است. داده‌های واقعی بیمارستان از عتیقه‌چیان (۱۳۹۰) گرفته شده است [۲].

در آن مطالعه، داده‌های همه عمل‌های انجام شده در اتاق‌های عمل «بیمارستان هاشمی‌نژاد» در دو سال از پایگاه داده بیمارستان جمع‌آوری شده است. این داده‌ها عبارت‌اند از: فهرست بیماران در هر تاریخ، کُد عمل، نام عمل، زمان شروع و پایان عمل، نام جراح و کمک‌جراح. بخشی از اطلاعات نیز از خبرگان جمع‌آوری شده است که عبارت‌اند از:

ـ داده‌های مربوط به جراح: عمل‌های جراحی که هر جراح توانایی انجام آن را دارد، برنامه آموزشی رزیدنت‌ها (دربردارنده عمل‌هایی که در هر دوره باید انجام دهند)، عمل‌هایی که هر جراح می‌تواند به‌عنوان کمک‌جراح در آن حضور داشته باشد، برنامه کاری هر جراح، نوع جراح از نظر رزیدنت، فلوشیپ، استاد و نوع تخصص هر جراح (ارولوژی، اندو، لاپاراسکوپ و غیره)؛

ـ مربوط به تجهیزات: انواع تجهیزات موجود و موجودی آن‌ها، نوع و تعداد تجهیزات مورداستفاده برای هر عمل؛

ـ مربوط به عمل جراحی: نوع عمل جراحی (ارولوژی، لاپاراسکوپ و غیره)، عمل‌های جراحی که نیاز به کمک‌جراح دارند؛

ـ مربوط به اتاق عمل: تعداد اتاق‌های عمل، اتاق‌های مجهز به تجهیزات خاص، عمل‌های جراحی که در هر اتاق می‌توانند انجام شوند؛

ـ مربوط به گروه‌های تکنسین: تعداد گروه‌های تکنسین در هر نوبت کاری در هر روز؛

همچنین به‌دلیل نداشتن برخی داده‌های موردنیاز پژوهش برای ارزیابی مدل در عمل و به‌دست‌آوردن توزیع واقعی مدت‌زمان عمل‌ها، نمونه فرمی (فرم ICR۱) نیز در [۱۱] طراحی شده و طی یک دوره زمانی چندماهه توسط کارکنان اتاق عمل تکمیل شده است. با استفاده از

1. Intelligent Character Recognition

داده‌های جمع‌آوری‌شده و نمودار فراوانی، مدت‌زمان عمل‌های مختلف، توزیع احتمال گسسته مدت‌زمان هر نوع عمل تقریب خورده شده است. توزیع مدت‌زمان عمل‌های مختلف، کاملاً متفاوت است.

داده‌های واقعی مربوط به ۱۵ روز «بیمارستان شهید هاشمی‌نژاد» برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی استفاده شده است. اطلاعات هر مسئله، اطلاعات مربوط به عمل‌های جراحی یک روز واقعی بیمارستان است. این اطلاعات شامل فهرست عمل‌های جراحی در هر روز، نوع هر عمل، جراحان امکان‌پذیر برای هر عمل جراحی، تعداد اتاق عمل موجود، تعداد گروه تکنسین موجود، تعداد تخت موجود در بخش قبل از عمل و بخش ریکاوری، تجهیزات موردنیاز برای هر عمل جراحی، تعداد موجود از هر تجهیز و دستیاران جراح امکان‌پذیر برای هر عمل هستند. برای مدت‌زمان اعمال جراحی در حالت قطعی از میانگین زمان عمل جراحی و برای حالت احتمالی از تابع توزیع احتمال زمان‌های هر یک از اعمال جراحی استفاده شده است.

ابتدا مسئله با درنظرگرفتن میانگین مدت‌زمان اعمال جراحی در حالت قطعی با استفاده از الگوریتم مورچگان دوسطحی حل شده است. در این الگوریتم تعداد مورچه‌ها در هر تکرار برابر با ۱۰، شرط توقف الگوریتم دست‌نیافتن به جواب بهتر در ۱۰۰ تکرار متوالی، ضریب تبخیر برابر ۰/۰۳، ضریب تأثیر اطلاعات فرومون برابر ۱ و ضریب تأثیر اطلاعات ابتکاری برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. پارامترهای الگوریتم با اجرای الگوریتم روی نمونه مسائل مختلف و با استفاده از روش تنظیم هم‌زمان پارامترها با استفاده از شبکه‌های عصبی خودسازمانده [۲۲] تنظیم شده‌اند.

تابع هدف، مجموع هزینه‌های اضافه‌کاری اتاق‌های عمل و بیکاری بین اعمال جراحی است. ضرایب هزینه بیکاری و اضافه‌کاری به ترتیب ۲/۲۸ و ۴/۴۱ درنظرگرفته‌شده که بر اساس اطلاعات هزینه‌ای بیمارستان تخمین زده شده است.

برای انتخاب کاراترین اطلاعات ابتکاری در طراحی الگوریتم مورچگان، بر اساس انواع اطلاعات ابتکاری در نظر گرفته شده در سطح اول و دوم، ۷ سناریو زیر طراحی شده است:

سناریو ۱: انتخاب عمل جراحی بعدی و همچنین تخصیص منابع به هر مرحله از عمل جراحی، بدون درنظرگرفتن اطلاعات ابتکاری و صرفاً بر اساس مقدار فرومون صورت گیرد.

سناریو ۲: اطلاعات ابتکاری سطح اول بر اساس LPT و اطلاعات ابتکاری سطح دوم بر اساس ES باشد.

سناریو ۳: اطلاعات ابتکاری سطح اول بر اساس LPT و اطلاعات ابتکاری سطح دوم برای انتخاب جراح بر اساس LFM و برای سایر منابع بر اساس ES باشد.

سناریو ۴: اطلاعات ابتکاری سطح اول بر اساس LFJ و اطلاعات ابتکاری سطح دوم بر اساس ES باشد.

سناریو ۵: اطلاعات ابتکاری سطح اول برای نخستین عمل جراحی بر اساس LFJ و برای سایر اعمال جراحی بر اساس LPT باشد و اطلاعات ابتکاری سطح دوم برای انتخاب جراح نخستین عمل جراحی بر اساس LFM و برای سایر اعمال جراحی بر اساس ES باشد.
سناریو ۶: اطلاعات ابتکاری سطح اول برای انتخاب دو عمل جراحی اول بر اساس LFJ و برای سایر اعمال جراحی بر اساس LPT باشد و اطلاعات ابتکاری سطح دوم در انتخاب جراح مربوط به دو عمل جراحی اول بر اساس LFM و برای سایر اعمال جراحی بر اساس ES باشد.
سناریو ۷: اطلاعات ابتکاری سطح اول بر اساس LFJ و اطلاعات ابتکاری سطح دوم برای انتخاب جراح بر اساس LFM و برای سایر منابع بر اساس ES باشد.

داده‌های مربوط به ۱۵ نمونه واقعی در جدول ۲، آورده شده است. هر نمونه طی ۱۰ تکرار حل شده و میانگین تابع هدف تحت سناریوهای مختلف در جدول ۲، آورده شده است.

جدول ۲. نتایج سناریوهای مختلف از ترکیبات مختلف قواعد ابتکاری در طراحی الگوریتم ACO

شماره نمونه	تعداد جراحی	تعداد جراح	تعداد اتاق عمل	میانگین تابع هدف						
				سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶	سناریو ۷
۱	۱۴	۵	۴	۴/۳۲	۴/۱	۲/۰۵	۰/۶۸	۰/۲۲	۰	۰
۲	۱۹	۸	۴	۵۳/۷۸۴	۵۸/۰۴	۴۳/۵۱	۴۴/۹۱	۰/۲۲	۳/۳۱	۰
۳	۲۴	۹	۴	۱۴۱/۳۹	۲۹/۱	۲۹/۸۱	۳۴/۵۳	۱۹/۸۵	۲۳/۴۷	۰
۴	۱۹	۷	۴	۷/۱۸	۰/۹۱	۳/۸۷	۰	۰/۴۵	۲/۲۲	۰
۵	۱۳	۹	۴	۰	۰/۲۲	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۲۴	۶	۴	۴۷/۷۱	۳/۴	۵/۶۷	۲/۹۴	۲/۷۵	۳/۶۴	۰
۷	۲۲	۶	۴	۹۳/۲۶	۷۷/۳۱	۸۷/۶۱	۱۰۳/۷۲	۲۲/۲۶	۱۹/۵۸	۰
۸	۱۵	۸	۴	۲/۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۱۵	۶	۴	۵۶/۰۷	۲۰/۰۶	۷۵/۴۹	۳۴/۳۹	۰	۰/۲۲	۰
۱۰	۱۹	۸	۴	۸۵/۶۳	۳۲/۸۶	۳۸/۱۶	۳۹/۵۲	۳۳/۰۹	۳۱/۰۶	۲۶/۴۶
۱۱	۱۸	۵	۴	۱۶/۲۳	۲/۶۹	۸/۲۸	۲/۴۹	۲/۴۹	۱/۳۶	۰
۱۲	۱۴	۶	۴	۴/۳۳	۰	۰	۰/۶۸	۰	۰	۰
۱۳	۱۷	۱۳	۵	۵/۸۳	۱۵/۶۸	۵/۹۳	۰	۰	۰	۰
۱۴	۱۹	۹	۴	۳/۱۳	۰/۲۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۱۶	۶	۵	۲۵/۹۵	۳/۱۹	۲۷/۳۶	۱۷/۵۵	۴/۷۸	۳/۱۹	۰
میانگین				۳۶/۴۷	۱۶/۵۱	۲۱/۸۴	۱۸/۷	۵/۷۴	۵/۸۷	۱/۷۶

جدول ۲، نشان‌دهنده تأثیر استفاده از قواعد ابتکاری در طراحی الگوریتم ACO است. اعداد ستون اول این جدول، حالت عدم‌استفاده از اطلاعات ابتکاری را نشان می‌دهند که به‌طور قابل‌توجهی از اعداد سایر ستون‌ها بالاتر هستند. ستون‌های بعدی هر یک ترکیبات مختلفی از قواعد ابتکاری درنظرگرفته‌شده را نشان می‌دهند. نتایج جدول ۲، نشان می‌دهد که سناریو ۷ کمترین میزان اضافه‌کاری و بیکاری را به‌همراه دارد؛ بنابراین سناریو ۷ در طراحی الگوریتم ACO به‌کار گرفته می‌شود.

در این پژوهش، عملکرد الگوریتم مورچگان در حالت قطعی با جواب بهینه مدل ریاضی و جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵) در حل مسائل واقعی مقایسه شده و پس از تأیید عملکرد آن، الگوریتم ترکیبی در حالت عدم‌قطعیت در مدت‌زمان عمل‌های جراحی، با مجموعه‌ای از سناریوهای تصادفی در حل مسائل واقعی موردآزمون قرار گرفته است [۲۳].

برای آزمون کارایی الگوریتم ACO طراحی‌شده، جواب به‌دست‌آمده از این الگوریتم در حالت قطعی در ۱۵ نمونه مسئله واقعی با جواب بهینه مسئله در حالت قطعی که از حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی مسئله در نرم‌افزار GAMS به‌دست‌آمده و جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، مقایسه شده است.

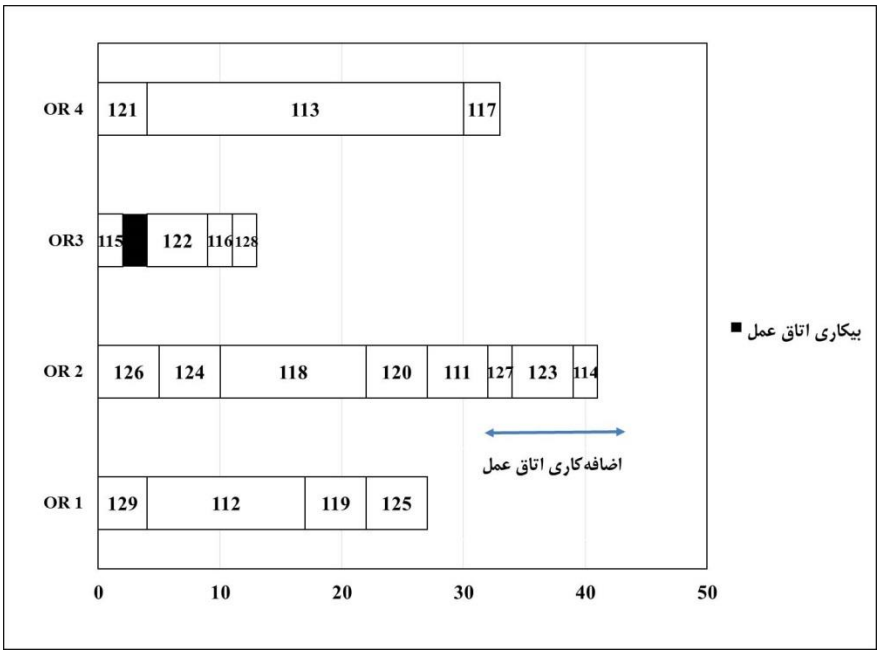
جدول ۳، بهترین جواب به‌دست‌آمده از روش ACO را با جواب بهینه به‌دست‌آمده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی مسئله در حالت قطعی و جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، مقایسه می‌کند.

جدول ۳. مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ACO با جواب بهینه مسئله در حالت قطعی و جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)

				جواب الگوریتم ACO پیشنهادی				ژیانگ و همکاران (۲۰۱۵) ـ محاسبات پژوهشگر			
شماره نمونه	تعداد عمل جراحی	تعداد جراح	تعداد اتاق عمل	زمان اضافه کاری (تعداد بلوک زمانی)	زمان بیکاری (تعداد بلوک زمانی)	تابع هدف	جواب بهینه	زمان اضافه کاری (تعداد بلوک زمانی)	زمان بیکاری (تعداد بلوک زمانی)	تابع هدف	جواب بهینه
۱	۱۴	۵	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱۹	۸	۴	۰	۰	۰	۰	۷	۰	۳۰/۸۷	۰
۳	۲۴	۹	۴	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۱۱/۱	۰
۴	۱۹	۷	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۳	۹	۴		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۲۴	۶	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲/۲۸	۰
۷	۲۲	۶	۴	۲	۰	۸/۸۲	۰	۱	۲۷	۶۵/۹۷	۰
۸	۱۵	۸	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۱۵	۶	۴	۰	۰	۰	۰	۷	۱۲	۵۸/۲۳	۰
۱۰	۱۹	۸	۴	۶	۰	۲۶/۴۶	۰	۶	۰	۲۶/۴۶	۰
۱۱	۱۸	۵	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۱۴	۶	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۱۷	۱۳	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۱۹	۹	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۱۶	۶	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۵	۱۱/۴	۰

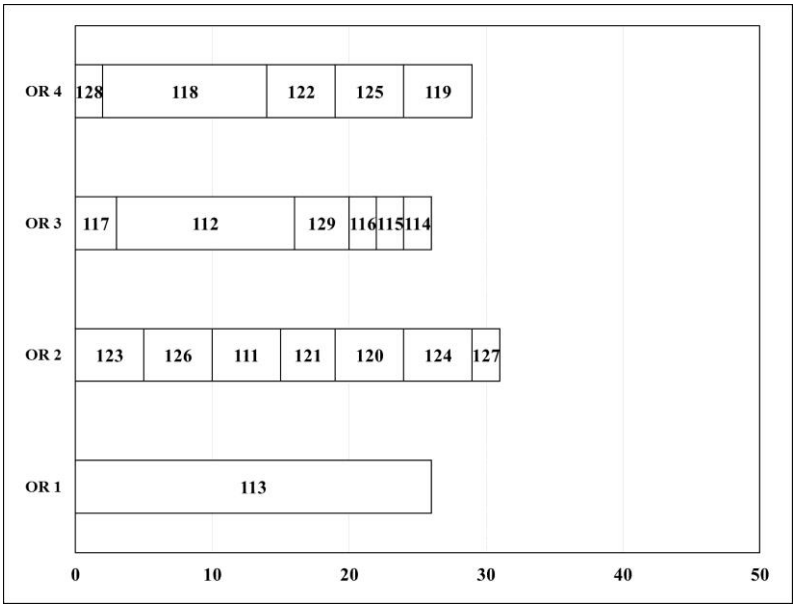
مقایسه نتایج ACO با جواب‌های بهینه کارایی الگوریتم ارائه‌شده را اثبات می‌کند. از ۱۵ مورد، الگوریتم در ۱۳ مورد به جواب بهینه رسیده است و در ۲ مورد با جواب بهینه تفاوت ناچیزی دارد؛ همچنین نتایج مقایسه الگوریتم ارائه‌شده با الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، نشان‌دهنده برتری الگوریتم ACO طراحی شده است. در همه مسائل یا هر دو الگوریتم به جواب یکسان رسیده‌اند و یا جواب الگوریتم طراحی‌شده در این پژوهش، به‌طور قابل‌توجهی بهتر است. برای بهترنشان‌دادن نتایج روش‌های مختلف در حالت قطعی، یک مسئله نمونه با ۱۹ عمل جراحی و ۴ اتاق عمل با روش‌های مختلف حل شده و نمودار گانت نتایج الگوریتم ACO ژیانگ و همکاران(۲۰۱۵)، ACO طراحی‌شده در این پژوهش و نتایج مدل ریاضی قطعی در شکل‌های

۳، ۴ و ۵ به تصویر کشیده شده است. اعداد نشان‌داده‌شده در هر مستطیل در این نمودارها، نشان‌دهنده کد هر عمل جراحی است.

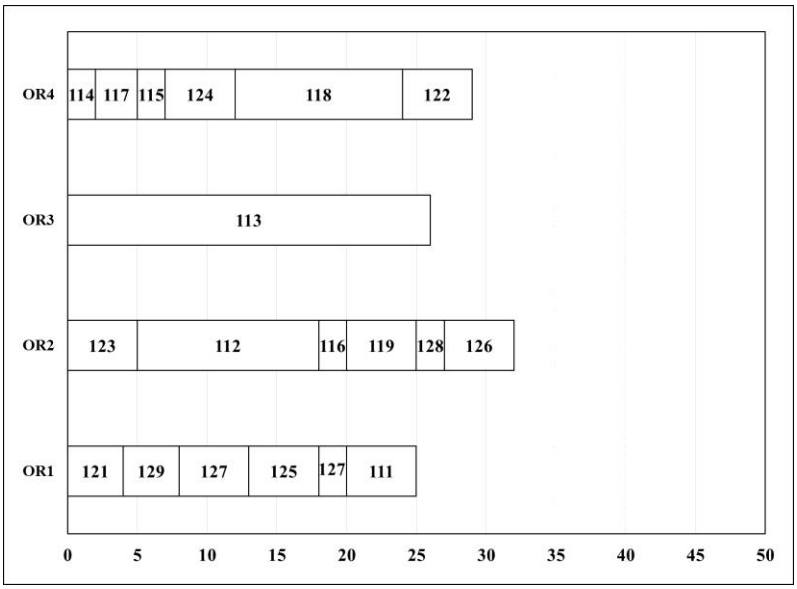


شکل ۳. نمودار گانت نتایج الگوریتم ژیانگ و همکاران در حل یک مسئله نمونه

طبق شکل ۳، در حل این مسئله نمونه با الگوریتم ژیانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۲۳]، اتاق عمل ۳، دو بلوک زمانی بیکاری بین عمل‌های جراحی دارد که به‌دلیل اشتراک در منبع پزشک جراح در اعمال جراحی ۱۲۱ و ۱۲۲ است؛ بدین معنی که به هر دو عمل جراحی ۱۲۱ و ۱۲۲ پزشک جراح شماره ۱ تخصیص‌یافته است؛ از طرفی همان‌طور که شکل ۳، نشان می‌دهد، به‌علت عدم‌توزیع بالانس عمل‌ها در اتاق‌های مختلف، در اتاق عمل ۲ اضافه‌کاری رخ داده است. این در حالی است که در اتاق عمل ۳، بازه زمانی استفاده‌نشده وجود دارد. شکل‌های ۴ و ۵، نمودار گانت نتایج الگوریتم ACO پیشنهادی در این پژوهش و نتایج مدل قطعی بهینه را نشان می‌دهند.



شکل ۴. نمودار گانت نتایج الگوریتم ACO پیشنهادی در این مقاله در حل یک مسئله نمونه



شکل ۵. نمودار گانت جواب بهینه مدل قطعی

شکل‌های ۴ و ۵، نشان می‌دهند که هرچند دو روش ACO پیشنهادی و مدل قطعی به جواب‌های متفاوتی منجر شده‌اند، ولی از نظر مقدار تابع هدف با یکدیگر تفاوت ندارند که این امر کارایی الگوریتم ACO پیشنهادی را نشان می‌دهد.

پس از تأیید عملکرد ACO طراحی‌شده در حالت قطعی، در این بخش به ارزیابی الگوریتم ترکیبی ACO و شبیه‌سازی پرداخته می‌شود؛ بدین منظور، ۱۵ مسئله واقعی با استفاده از این الگوریتم در شرایط احتمالی‌بودن مدت‌زمان عمل‌های جراحی حل شده‌اند. جدول ۴، نتایج حل هر مسئله طی ۱۰۰ تکرار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در نمونه مسائل مختلف

شماره نمونه	تعداد عمل جراحی	تعداد جراح	تعداد اتاق عمل	میانگین تابع هدف	زمان محاسباتی (دقیقه)
۱	۱۴	۵	۴	۰/۱۸۲۴	۱
۲	۱۹	۸	۴	۳/۵۲۶۸	۱۱
۳	۲۴	۹	۴	۲۶/۹۲	۳۷
۴	۱۹	۷	۴	۰	۲۰
۵	۱۳	۹	۴	۰	۱
۶	۲۴	۶	۴	۵/۰۸	۲۷
۷	۲۲	۶	۴	۵/۸۰۸	۱۶
۸	۱۵	۸	۴	۲/۶۳	۵
۹	۱۵	۶	۴	۰	۱
۱۰	۱۹	۸	۴	۴۱/۰۳۵	۲۶
۱۱	۱۸	۵	۴	۰/۹۵	۱۸
۱۲	۱۴	۶	۴	۰	۱
۱۳	۱۷	۱۳	۵	۰	۱
۱۴	۱۹	۹	۴	۰/۰۹	۳۱
۱۵	۱۶	۶	۵	۰	۱۷

برای هر یک از مسائل، جواب به‌دست‌آمده (شامل توالی اعمال جراحی و تخصیص منابع به هر مرحله) روی سناریوهای زیر آزمون شده و نتایج در جدول ۵، آورده شده است.

سناریو ۱: سناریوی بیشترین زمان جراحی: در این سناریو فرض شده است که همه اعمال جراحی در بیشینه زمان خود هستند و هدف به‌دست‌آوردن تابع هدف در بدترین حالت است.

سناریو ۲: سناریوی مقدار میانگین: در این سناریو، زمان اعمال جراحی برابر با مقدار میانگین آن‌ها قرار داده شده است.

سناریو ۳: سناریوی کمترین زمان جراحی: در این سناریو فرض شده است که همه اعمال جراحی در کمترین زمان خود هستند. هدف به‌دست‌آوردن تابع هدف در بهترین حالت است.

جدول ۵. ارزیابی جواب الگوریتم ترکیبی پیشنهادی روی سناریوهای متفاوت

شماره نمونه	تعداد عمل جراحی	بدترین سناریو			سناریو مقدار میانگین			بهترین سناریو		
		زمان اضافه کاری (بلوک زمانی)	زمان بیکاری(بلوک زمانی)	تابع هدف	زمان اضافه کاری (بلوک زمانی)	زمان بیکاری (بلوک زمانی)	تابع هدف	زمان اضافه کاری (بلوک زمانی)	زمان بیکاری (بلوک زمانی)	تابع هدف
۱	۱۴	۰	۴	۹/۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱۹	۶	۰	۲۶/۴۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۲۴	۲۰	۶	۱۰۱/۸۸	۲	۲	۱۳/۳۸	۰	۰	۰
۴	۱۹	۲	۰	۸/۸۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۲۴	۱۰	۱	۴۶/۳۸	۳	۰	۱۳/۲۳	۰	۰	۰
۷	۲۲	۸	۰	۳۵/۲۸	۲	۴	۱۷/۹۴	۰	۰	۰
۸	۱۵	۱	۰	۴/۴۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۱۹	۴۰	۰	۱۷۶/۴	۱۱	۰	۴۸/۵۱	۰	۰	۰
۱۱	۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۱۹	۶	۴	۳۵/۵۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۱۶	۰	۲	۴/۵۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵، بدترین، بهترین و حالت متوسط نتایجی را نشان می‌دهد که به ازای جواب به‌دست‌آمده از ACO در هر یک از مسائل، قابل‌حصول است. به‌منظور اعتبارسنجی روش ترکیبی پیشنهادی احتمالی از معیار ارزش استفاده از مدل احتمالی (VSS)[1] استفاده شده است. VSS، ارزش درنظرگرفتن عدم‌قطعیت با تعیین مقدار تابع هدف بهینه مسئله احتمالی و مقدار موردانتظار تابع هدف به‌ازای جواب بهینه مسئله مقدار میانگین است [۵].

مسئله مقدار میانگین، همان مسئله قطعی معادل مسئله با درنظرگرفتن میانگین مدت‌زمان هر عمل است؛ به‌عبارت‌دیگر این مقدار، ارزش استفاده از مدل احتمالی را به‌جای مدل قطعی نشان می‌دهد. برای تعیین ارزش روش ترکیبی پیشنهادی احتمالی در مقایسه با الگوریتم ACO، جواب روش ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم ACO به ازای مقدار میانگین مدت‌زمان عمل‌ها، در شرایط عدم‌قطعیت مقایسه شده‌اند. بدین منظور برای

1. Value of stochastic solution

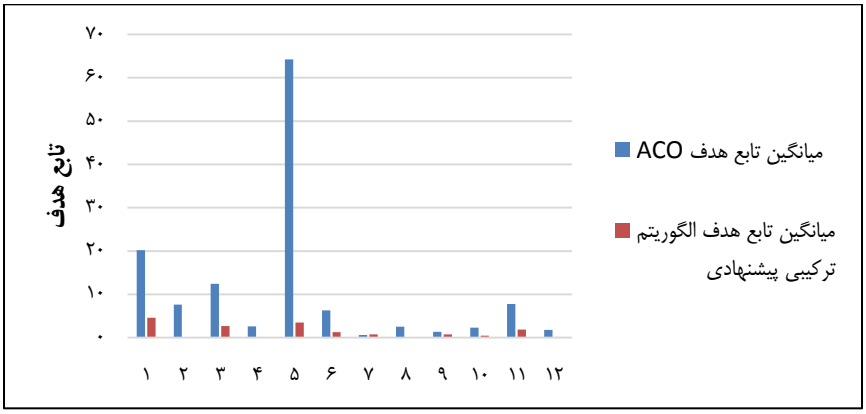
هر نمونه مسئله ابتدا جواب مسئله با درنظرگرفتن میانگین مدت‌زمان اعمال جراحی، با الگوریتم ACO به‌دست آمده است. در این نمونه‌ها برای هر عمل جراحی میانگین مدت‌زمان عمل در نظر گرفته شده است. در این آزمایش نمونه مسائلی در نظر گرفته شده‌اند که الگوریتم ACO در حالت قطعی به جواب بهینه دست یافته است. هر جواب شامل توالی اعمال جراحی و نحوه تخصیص منابع به آن‌ها است؛ سپس برای همین نمونه مسائل، جواب مسئله با اجرای الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی و با درنظرگرفتن شرایط غیرقطعی به‌دست آمده است.

به‌منظور مقایسه نتایج این دو روش، برای هر نمونه مسئله، ۵۰ سناریوی آزمون با اعداد تصادفی از تابع احتمال مدت‌زمان اعمال جراحی ایجاد شده است؛ به‌طوری‌که هر سناریو یک ترکیب ممکن از مدت‌زمان عمل‌های جراحی را نشان می‌دهد. جواب‌های الگوریتم ACO دوسطحی (شامل توالی اعمال جراحی و تخصیص منابع) و جواب الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی مربوط به ۱۲ مسئله، با این سناریوها اجرا و برای هر مسئله میانگین مقدار تابع هدف در ۵۰ سناریو محاسبه شده است. نتایج مقایسه میانگین تابع هدف در سناریوها به ازای جواب‌های الگوریتم ACO و الگوریتم ترکیبی در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۶. مقایسه الگوریتم ترکیبی پیشنهادی و الگوریتم ACO

شماره نمونه	تعداد اعمال جراحی	تعداد جراح	تعداد اتاق عمل	میانگین تابع هدف ACO در سناریوها	میانگین تابع هدف الگوریتم ترکیبی در سناریوها	درصد بهبود در میانگین جواب‌ها (VSS)
۱	۱۴	۵	۴	۲۰/۲۰۶	۴/۶۰۵	۷۲/۲
۲	۱۹	۸	۴	۷/۶۶۸	۰	۱۰۰
۳	۱۹	۷	۴	۱۲/۴۱	۲/۶۸۳	۷۸/۳۸
۴	۱۳	۹	۴	۲/۶۴۴	۰	۱۰۰
۵	۲۴	۶	۴	۶۴/۲۶۲	۳/۴۶۵	۹۴/۶
۶	۱۵	۸	۴	۶/۳۰۶	۱/۳۰۹	۷۹/۲۴
۷	۱۵	۶	۴	۰/۶۳۸	۰/۷۲۹	۰
۸	۱۸	۵	۴	۲/۵۳۶	۰	۱۰۰
۹	۱۴	۶	۴	۱/۳۶۸	۰/۷۲۹	۴۶/۷۱
۱۰	۱۷	۱۳	۵	۲/۲۸	۰/۴۶۵	۷۹/۶
۱۱	۱۹	۹	۴	۷/۷۹	۱/۸۹۷	۷۵/۶۴
۱۲	۱۶	۶	۵	۱/۸۲۴	۰/۱۸۲	۹۲/۰۲
			میانگین بهبود (درصد)			۷۵/۵۹

نتایج ارائه‌شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که در شرایط عدم‌قطعیت، جواب‌های به‌دست‌آمده از روش ترکیبی پیشنهادی در همه موارد از جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ACO بهتر است و تنها در یک مورد با اختلاف ناچیزی جواب ACO بهتر می‌باشد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد در شرایط عدم‌قطعیت، جواب‌های به‌دست‌آمده از روش ترکیبی پیشنهادی به‌طور متوسط ۷۵/۵۹ درصد از جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ACO بهتر است. نتایج مقایسه روش ترکیبی پیشنهادی و الگوریتم ACO در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶. مقایسه میانگین تابع هدف ACO با میانگین تابع هدف الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

شکل ۶ به‌خوبی برتری الگوریتم ترکیبی پیشنهادی را در مقایسه با الگوریتم ACO نشان می‌دهد. هرچند الگوریتم پیشنهادی در مسائلی با اندازه مسائل واقعی «بیمارستان هاشمی‌نژاد» آزمون شده‌اند، اما این الگوریتم توانایی حل مسائل با اندازه بزرگ‌تر را نیز دارد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مسئله زمان‌بندی روزانه کل فرآیند اعمال جراحی (شامل سه مرحله، قبل از جراحی، جراحی و ریکاوری) و با درنظرگرفتن منابع مختلف مراحل مختلف و شرایط واقعی بیمارستان‌های آموزشی بررسی شد. ابتدا مدل ریاضی مسئله در حالت قطعی ارائه شد و سپس با توجه به عدم‌کارایی روش‌های دقیق در حل مسائل احتمالی بزرگ و واقعی، رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به‌کار رفت؛ بدین منظور یک الگوریتم ترکیبی از الگوریتم مورچگان دوسطحی با شبیه‌سازی ارائه شد. تعدادی از قواعد ابتکاری در زمینه زمان‌بندی ماشین‌های موازی در طراحی الگوریتم ACO مقایسه شد و بهترین حالت در طراحی الگوریتم ACO به‌کار رفت. به‌منظور ارزیابی الگوریتم، مسائل واقعی از «بیمارستان آموزشی ـ درمانی هاشمی‌نژاد»

تهران استفاده شده است. ابتدا نتایج الگوریتم دوسطحی مورچگان در حل مسائل مختلف قطعی با جواب بهینه مدل ریاضی و جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، در حل مسائل واقعی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده کارایی الگوریتم ACO در دستیابی به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه است؛ همچنین نتایج مقایسه الگوریتم ارائه‌شده با الگوریتم زیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، برتری الگوریتم ACO طراحی‌شده را نشان می‌دهد. در همه مسائل یا هر دو الگوریتم، جواب یکسان به‌دست آمده است و یا جواب الگوریتم طراحی‌شده در این پژوهش، به‌طور قابل‌توجهی بهتر می‌باشد؛ سپس مسائل مختلف در شرایط عدم‌قطعیت در مدت‌زمان عمل‌ها با استفاده از رویکرد ترکیبی پیشنهادی حل شده‌اند. جواب به‌دست‌آمده برای هر مسئله در یک مجموعه از سناریوهای آزمون تصادفی آزمون شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط غیرقطعی‌بودن مدت‌زمان عمل‌ها، جواب‌های الگوریتم ترکیبی پیشنهادی بیش از ۷۵ درصد نسبت به جواب‌های الگوریتم ACO بهتر عمل می‌کنند.

هرچند الگوریتم ترکیبی پیشنهادی روی مسائلی با اندازه مسائل واقعی «بیمارستان هاشمی‌نژاد» آزمون شد، ولی این رویکرد توانایی حل مسائل با اندازه بزرگ‌تر را نیز دارد. از طرفی در این پژوهش، فقط پارامتر مدت‌زمان عمل‌های جراحی به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است که با توجه به چارچوب شبیه‌سازی، بدون اضافه‌شدن پیچیدگی خاصی به روش، سایر پارامترهای غیرقطعی نیز می‌توانند در این رویکرد دیده شوند. با توجه به کارایی الگوریتم در حل مسائل واقعی بیمارستان موردمطالعه، استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای توسعه سامانه نرم‌افزاری برنامه‌ریزی اتاق عمل توصیه می‌شود.

در رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی می‌توان ترکیبات مختلفی از روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی داشت. در این پژوهش از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است که می‌توان از انواع دیگر شبیه‌سازی مانند شبیه‌سازی مبتنی بر عامل نیز استفاده کرد. درنظرگرفتن سایر پارامترهای غیرقطعی مسئله، همچون عدم‌مراجعه بیمار، لغوشدن عمل، ورود بیماران اورژانسی، زمان ورود جراح، خرابی تجهیزات و ارائه ترکیبات کاراتری از بهینه‌یابی و شبیه‌سازی زمینه مطالعات آتی را تشکیل می‌دهند.

منابع

1. Adeli, M. & Zandieh, M. (1392). A multi-objective simulation optimization approach for integrated supplier selection and inventory decisions. *Journal of Industrial Management Perspective*, *11*, 89-110.

2. Atighehchian, A. (1390). Surgical case scheduling with uncertain duration of surgery. Ph.D. thesis, Department of Industrial Engineering, Factually of Engineering, Tarbiat Modares University.

3. Baesler, F., Gatica, J. & Correa, R. (2015). Simulation optimization for operating room scheduling, *Int j simul model*, *14 (2)*, 215-226.

4. Banditori, C., Cappanera, P. & Visintin, F. (2013). A combined optimization–simulation approach to the master surgical scheduling problem. *IMA Journal of Management Mathematics*, *24*(2), 155–187.

5. BIRGE, J. R. & LOUVEAUX, F. (1997). *Introduction to stochastic programming*, New York, Springer.

6. Cardoen, B., Demeulemeester, E. & Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, *201*(3), 921–932.

7. Chow, V. S., Puterman, M. L., Salehirad, N., Huang, W. & Atkins, D. (2011). Reducing Surgical Ward Congestion Through Improved Surgical Scheduling and Uncapacitated Simulation. *Production and Operations Management*, *20*(3), 418–430.

8. Denton, B .T., Miller, A .J., Balasubramanian, H. J. & Huschka, T. R. (2009) Optimal Allocation of Surgery Blocks to Operating Rooms Under Uncertainty. *Operations Research*. 58 (4).

9. Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*.

10. Eskandari, H. & Bahrami, M. (1396). Multi objective operating room scheduling using simulation based optimization. *Journal of industrial engineering*, *51(1)*, 1-13.

11. Ghazalbash, S., Sepehri, M. M., Shadpour, P. & Atighehchian, A. (2012). Operating Room Scheduling in Teaching Hospitals. *Advances in Operations Research*.

12. Granja, C., Almada-Lobo, B., Janela, F., Seabra, J. & Mendes, A. (2014). An optimization based on simulation approach to the patient admission scheduling problem using a linear programing algorithm. *Journal of Biomedical Informatics*, *52*, 427–437.

13. JUAN, A. A., FAULIN, J., GRASMAN, S. E., RABE, M. & FIGUEIRA, G. (2015). A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems. *Operations Research Perspectives*, 2, 62–72.

14. Liang, F., Guo, Y. & Fung, R. Y. (2015). Simulation-Based Optimization for Surgery Scheduling in Operation Theatre Management Using Response Surface Method. *J Med Syst*, *39*(11), 159.

15. López, J., López, C., Olguín, J., Camargo, C. & López, J. (2013). *Surgery Scheduling Using Simulation with Arena.* Paper presented at the Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology.

16. Mirghaderi, S. H. & Zandieh, M. (1390). Designing a new meta-heuristic algorithm based on the behavior of the mathematical functions xCos(x), tanh(x).

Journal of Industrial Management Perspective, *2*, 107-123.

17. Ozcan, Y. A., Tanfani, E. & Testi, A. (2016). Improving the performance of surgery-based clinical pathways: a simulation-optimization approach. *Health Care Management Science*, 20, 1, 1-15.

18. Sagnol, G., Barner, C., Borndörfer, R., Grima, M., Seeling, M., Spies, C. & Wernecke, K. (2016). Robust Allocation of Operating Rooms: a Cutting Plane Approach to handle Lognormal Case Durations and Emergency Arrivals. *ZIB Report* ,16-18

19. Samudra, M., Van Riet, C., Demeulemeester, E., Cardoen, B., Vansteenkiste, N. & Rademakers, F. E. (2016). Scheduling operating rooms: achievements, challenges and pitfalls. *Journal of Scheduling*, *19*(5), 493–525.

20. Saremi, A., Jula, P., ElMekkawy, T. & Wang, G. G. (2013). Appointment scheduling of outpatient surgical services in a multistage operating room department. *International Journal of Production Economics*, *141*(2), 646–658.

21. Sun, Y. & Li, X. (2011). Optimizing surgery start times for a single operating room via simulation. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*.

22. Tarkesh, H., Atighehchian, A, & Nookabadi, A. S.(2009).Facility layout design using virtual multi-agent system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *20(4)*, 347-357 .

23. Xiang, W., Yin, J. & Lim, G. (2015). An ant colony optimization approach for solving an operating room surgery scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, *85*, 335–345.

24. Zhang, Z., Xie, X. & Geng, N. (2012). Promise surgery start times and implementation strategies. *2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*.

25. Zhang, Z., Xie, X. & Geng, N. (2014). Simulation-based surgery appointment sequencing and scheduling of multiple operating rooms. In *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 399–404). IEEE.