

زمان بندی چندهدفه اتاق عمل با استفاده از بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی

حمیدرضا اسکندری^{۱*}، محمد بهرامی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، مرکز مطالعات مدیریت و توسعه فناوری، دانشگاه تربیت مدرس

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۵/۰۸/۲۹، تاریخ تصویب: ۹۵/۱۰/۲۹)

چکیده

نقش اتاق های عمل در سلامت جامعه و اقتصاد بیمارستان ها در سال های اخیر، توجه بسیاری از پژوهشگران را به مسئله زمان بندی اتاق عمل جلب کرده است، اما برای حل این مسئله، از قابلیت های روش بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی، استفاده چندانی نشده است. تعدادی جراح با تخصص های گوناگون و هریک با لیست انتظاری از بیماران وجود دارد که جراحی های آن ها باید در روزهای حضور جراحان در یکی از اتاق های عمل زمان بندی شود. برای این مسئله، دو هدف کمینه کردن هزینه های اضافه کاری و خالی ماندن اتاق های عمل، و کمینه کردن روزهای انتظار بیماران برای جراحی در نظر گرفته شد. حل این مسئله، به دو روش مدل سازی ریاضی و بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی صورت گرفت. مطابق نتایج، برای مسئله زمان بندی اتاق عمل، راهکار بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی، نه تنها در مسائل کوچک، به لحاظ کیفیت جواب قابل رقابت با مدل ریاضی است، بلکه این راهکار قابلیت آن را دارد که در مسائل بزرگ، جوابی مناسب در زمانی معقول پیدا کند.

واژه های کلیدی: اتاق عمل، بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی، زمان بندی، مدل سازی ریاضی.

مقدمه

تأمین شود که مهم ترین آن ها بالا رفتن سطح خدمت رسانی به بیماران و کاهش هزینه های بیمارستان است. احتمالی بودن وقایعی مانند زمان ورود بیماران، مدت عمل، در دسترس بودن کارکنان اتاق عمل و منابع دیگر، زمان آماده کردن اتاق عمل و... موجب پیچیده تر شدن مسئله نیز می شود.

ادبیات زمان بندی اتاق عمل، سابقه ای چنددهه ای دارد. با این حال، کاردئون و همکارانش ضمن دسته بندی پژوهش هایی که در این حوزه انجام شده است، نشان داده اند که چگونه در سال های اخیر تعداد مقالات مربوط به این موضوع افزایش یافته است [۴]. گرایش به استفاده از شبیه سازی و الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری، در تحقیقات اخیر قابل مشاهده است.

بسیاری از پژوهش ها، مسائل برنامه ریزی و زمان بندی اتاق های عمل را به مسائل مشهور بهینه سازی تشبیه کرده اند. تطبیق مسئله تخصیص جراحی ها با اتاق های عمل به مسئله بسته بندی [۵]، زمان بندی جراحی ها با در نظر گرفتن زمان آماده سازی به مسئله تخصیص کار به ماشین های موازی [۶] و زمان بندی با رویکرد باز به مسئله

اتاق های عمل، بیشترین سهم را در هزینه های هر بیمارستان و از سوی دیگر درآمدهای آن دارند [۱]. همچنین اتاق های عمل را می توان موتور بیمارستان قلمداد کرد [۲].

با وجود تفاوت هایی که در جراحی های گوناگون و نوع بیماران وجود دارد، فرایند کلی مراجعه بیماران بدین ترتیب است: ابتدا بیمار به صورت تصادفی (بیمار اورژانسی) یا با وقت قبلی (بیمار انتخابی) برای جراحی پذیرش می شود. سپس برای جراحی آماده می شود و پس از خالی شدن اتاق عمل تخصیص یافته به بیمار، او را به آن اتاق منتقل می کنند. با پایان یافتن جراحی، بیمار به اتاق ریکاوری و سپس به یکی از بخش های عمومی، مراقبت های ویژه یا اورژانس انتقال می یابد [۳].

منظور از زمان بندی اتاق های عمل، تعیین روز جراحی، توالی عمل های جراحی و زمان هریک از آن ها در یک روز و تخصیص منابع مورد نیاز (مانند جراحان، متخصصان بی هوشی، تجهیزات و...) با توجه به محدودیت های موجود است. در این میان، اهداف گوناگون و گاه متناقضی باید

نزدیکی کمتری با یکدیگر دارند، به صورت یک محدودیت در مسئله دربیابورند؛ اگرچه می توان این قرابت را به عنوان یک تابع هدف نیز تعریف کرد و هدف را بیشینه کردن نزدیکی اعضای هر تیم جراحی به یکدیگر قرار داد.

برای توصیف شکل های متنوع از مسئله زمان بندی اتاق های عمل، مدل های ریاضی مختلفی تهیه شده است؛ برای مثال، لمیری و همکارانش مدل ساده ای برای تخصیص عمل های جراحی در افق برنامه ریزی (برای مثال، یک هفته) به دوره های مختلف (برای نمونه، روزهای هفته) ارائه کرده اند [۱۰]. آرنقیری و همکارانش مدلی ساده برای تخصیص هم زمان اتاق های عمل به جراحان و بیماران آن ها با هدف کاهش هزینه های بیمارستان و انتظار بیماران ساخته اند [۱۱].

مدت عمل و ورود بیماران غیرانتخابی، دو پدیده تصادفی غیرقابل پیش بینی و مؤثر بر عملکرد اتاق های عمل هستند که مهم ترین راه مقابله با آن ها، استفاده از رویکردی درست در زمان بندی جراحی است. با آنکه عدم قطعیت های دیگری نیز در سیستم وجود دارد (مانند احتمال تأخیر بیماران انتخابی یا تیم جراحی)، اما این اتفاقات، از طرفی با روش های دیگری نیز قابل پیشگیری اند و از طرف دیگر، به طور معمول اثر زیادی بر فرایندها نمی گذارند. برخی از تحقیقات، این عوامل تصادفی را نیز در نظر گرفته اند؛ برای مثال، در تحقیقی درباره مسئله زمان بندی اتاق های عمل در حالتی که مدت عمل احتمالی است، بدون در نظر گرفتن بیماران غیرانتخابی و در یک اتاق عمل بحث شده است [۱].

پیچیدگی های مختلف مسئله به ویژه موضوع احتمالی بودن وقایع، سبب رونق استفاده از شبیه سازی در مواجهه با آن شده است. پیشینه استفاده از شبیه سازی گسسته-پیشامد در ادبیات به دهه ۹۰ برمی گردد. شبیه سازی به عنوان روشی برای مدل کردن درمانگاه ها، به دلیل پیچیدگی چنین سیستم هایی پیشنهاد شده است [۱۲-۱۳]. در سال های اخیر، این روش علاوه بر کاربرد در تحلیل سناریوهای مختلف، به صورت بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی نیز به کار رفته است. در تحقیقی با تطبیق مسئله تعیین توالی جراحی ها در چند اتاق مشابه با مسئله ماشین های موازی با استفاده از شبیه سازی، چند روش ابتکاری ساده برای تعیین توالی با یکدیگر مقایسه شده

تقسیم مجموعه [۷] نمونه هایی از این تشبیه ها هستند. عتیقه چیان تعداد بیشتری از این نوع رویکردها را در تحقیقات آورده است [۱]. با این همه از آنجا که به طور معمول این تطبیق ها با ساده سازی هایی در مسائل اتاق عمل همراه می شود، کاربردشان محدود است.

برای مسئله زمان بندی اتاق های عمل، توابع هدف مختلفی در نظر گرفته شده است. انتظار طولانی در نوبت عمل، یکی از پرتکرارترین شکایت های بیماران است. طولانی شدن صف انتظار برای دریافت خدمات درمانی در بیمارستان ها- از جمله برای جراحی- علاوه بر آنکه به خاطر فوریت نیاز به درمان ممکن است به بیمار آسیب بزند، احتمال دارد او را از دریافت خدمت منصرف و مشکل او را حادث تر کند [۸]. به همین دلیل، کمتر بودن زمان انتظار بیماران می تواند معیاری برای تشخیص یک زمان بندی بهتر باشد. همچنین بیمارستان برای تمامی ساعاتی که اتاق عمل و تیم جراحی آماده هستند، هزینه پرداخت می کند؛ بنابراین، اگر در بخشی از این ساعات این منابع بیکار بمانند، هزینه اضافه پرداخت شده است. پس حالت ایده آل آن است که این زمان بیکاری از بین برود. در عمل چنین چیزی ممکن نیست، زیرا از سویی احتمالی بودن ماهیت وقایع اجازه نمی دهد زمان بندی بدون تغییر باقی بماند و از سوی دیگر، برنامه ریزی تعداد زیاد عمل برای یک روز با هدف از بین بردن زمان های بیکاری، به ناتمام ماندن عمل ها در ساعات کاری منجر می شود که در نتیجه آن، منابع باید ساعات اضافه تری در بیمارستان بمانند. به طور معمول، اضافه کاری اتاق های عمل، به افزایش هزینه های بیمارستان منجر می شود. هزینه های ناشی از هردو زمان بیکاری و اضافه کاری، هزینه های سربار هستند. دستمزدی که بیمارستان برای ساعات جراحی به کارکنان می دهد، غیرقابل کاهش است، اما هزینه های ناشی از بیکار ماندن یا اضافه کاری اتاق های عمل را می توان با زمان بندی صحیح کاهش داد. پس کاهش زمان های بیکاری و اضافه کاری کارکنان اتاق های عمل، معیار مهمی در ارزیابی یک زمان بندی است. در نظر گرفتن احساس نزدیکی میان کارکنان اتاق عمل، معیار دیگری است که پیش از تحقیق [۹] کمتر در نظر گرفته شده است. آن ها سعی کرده اند با کمی سازی این قرابت ها، همکارانشان کارکنانی را که

و روش‌های حل دقیق آن، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری و نیز شبیه‌سازی، روش‌هایی هستند که برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی جراحی استفاده شده‌اند. مشخص است که با توجه به رویکرد تحقیق، باید روشی متناسب انتخاب کرد؛ برای نمونه، استفاده از شبیه‌سازی برای تحلیل سناریو به‌طور معمول مناسب‌تر است. همچنین امکان دارد در یک تحقیق، از بیش از یک رویکرد یا روش برای مسئله استفاده شود؛ برای مثال، به‌دلیل ماهیت احتمالی و پیچیدگی مدل ریاضی مسئله، استفاده از شبیه‌سازی در کنار روش‌های دیگر متداول است.

با این توضیحات، تعدادی از مقالاتی را که در سال‌های اخیر به موضوع زمان‌بندی اتاق‌های عمل پرداخته‌اند، می‌توان به‌صورت جدول ۱ دسته‌بندی کرد. این دسته‌بندی، با الهام از طبقه‌بندی [۴] انجام شده است. اگرچه این دسته‌بندی کامل نیست، تا حدی تفاوت تحقیق حاضر را با سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد. استفاده از روش‌های مخصوص حل مسائل بهینه‌سازی چندمعیاره برای زمان‌بندی اتاق عمل در سطحی نسبتاً ابتدایی است. علاوه‌براین، با آنکه تحقیقاتی هم‌زمان از شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کرده‌اند، به‌کارگیری این دو روش به‌صورت متعامل و در قالب بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی بسیار محدود بوده است و از میان تحقیقات معرفی‌شده در جدول ۱، تنها سارمی و همکاران از این رویکرد بهره برده‌اند که در این مطالعه هم به مقایسه عملکرد این رویکرد با عملکرد حل دقیق مدل ریاضی پرداخته نشده است.

به‌طور خلاصه، نوآوری‌های پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

۱. در نظر گرفتن تأثیر مهارت جراحان در مدت جراحی‌ها؛ چراکه مهارت جراحان پدیده‌ای قابل‌پیش‌بینی در هنگام زمان‌بندی است و تفاوت‌های زیادی در مدت فرایندها ایجاد می‌کند، اما مطابق بررسی‌ها، هیچ‌یک از تحقیقات قبلی این موضوع را در زمان‌بندی اتاق عمل در نظر نگرفته‌اند؛
۲. استفاده هم‌زمان از دو روش مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی و مقایسه این دو روش با یکدیگر در مسئله‌ی زمان‌بندی اتاق عمل.

است [۶]. این تحقیق در این مسئله، زمان آماده‌سازی اتاق‌های عمل را جدا از مدت عمل‌ها و وابسته به نوع عمل قبلی گرفته است. پژوهشی دیگر، یک ابزار بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با استفاده از روش فراابتکاری تبرید شبیه‌سازی‌شده ارائه داده است [۱۴]. در این پژوهش، مدل شبیه‌سازی یک مرکز جراحی بیماران سرپایی ساخته شد و هدف، کاهش زمان انتظار و انصراف بیماران تعیین شد. سپس سه بهینه‌ساز ساخته شد که همگی براساس الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده کار می‌کنند؛ با این تفاوت که جواب اولیه در دو مورد از آن‌ها از یک مدل ریاضی به‌دست می‌آید. پژوهشی دیگر یک زمان‌بندی دومرحله‌ای را شبیه‌سازی کرد. ابتدا جراحی‌ها به اتاق‌های یکسان تخصیص یافتند و سپس توالی این جراحی‌ها در هر اتاق مشخص شد [۱۵]. این زمان‌بندی نه براساس بهینه‌سازی، بلکه به‌صورت ابتکاری و متفاوت در سناریوهای مختلف انجام گرفت و نتیجه اجرای این سناریوها با یکدیگر مقایسه شد.

با دسته‌بندی رویکردهای مختلف به‌کاررفته در تحلیل مسئله‌ی زمان‌بندی اتاق عمل می‌توان دریافت که بهینه‌سازی (تک‌هدفه و چندهدفه)، تحلیل سناریوها و تحلیل پیچیدگی مسئله، مهم‌ترین رویکردها به‌شمار می‌روند. در رویکرد بهینه‌سازی، هدف یافتن پاسخی برای مسئله است که دقیقاً یا تقریباً تابع یا توابع هدف را به بهترین مقدار برساند. رویکرد تحلیل سناریو، تنها به‌دنبال مقایسه عملکرد چند حالت مختلف از سیستم است؛ برای مثال، پژوهشی با مطالعه یک بیمارستان در سوئد، تأثیر اجرای قانونی جدید را بر هزینه‌های مربوط به زمان‌بندی بررسی و با حالت پیش از اجرا مقایسه کرد [۱۶]. رویکرد تحلیل پیچیدگی نیز که در تعداد محدودی از تحقیقات وجود دارد، به بررسی میزان پیچیدگی مسائل زمان‌بندی اتاق عمل یا راه‌حل‌های ارائه‌شده می‌پردازد؛ برای مثال، پژوهشی با معرفی و فرمول‌بندی مسئله‌ای برای کاهش زمان انتظار بیماران اورژانسی نشان داد که این مسئله NP-hard است [۱۷].

روش حل مسئله، موضوع دیگری است که باید در روش‌شناسی تحقیقات به آن توجه شود. برنامه‌ریزی ریاضی

جدول ۱. دسته‌بندی برخی از مقالات بررسی شده

مقاله	سال	نوع بیمار		تابع هدف		نوع تصمیم‌گیری						روش						
		انتخابی	اورژانسی	زمان انتظار بیمار	بیکاری	اضافه‌کاری	سایر	تعیین روز	تخصیص اتاق	تعیین توالی	مدل ریاضی		الگوریتم ابتکاری	الگوریتم فراترکیاری	بهینه‌سازی چندهدفه	شبه‌سازی	عدم قطعیت	واقعی بودن داده‌ها
[۵]	۲۰۰۹	×			×			×			×	×					×	
[۱۰]	۲۰۰۹	×	×			×	×	×			×	×	×	×			×	×
[۱۶]	۲۰۰۹	×		×	×	×					×						×	×
[۷]	۲۰۱۱	×			×	×					×							
[۱۷]	۲۰۱۲	×	×					×	×	×	×	×	×				×	×
[۹]	۲۰۱۳	×			×	×					×	×	×					
[۱۴]	۲۰۱۳	×		×				×									×	×
[۱۵]	۲۰۱۴	×			×	×											×	×
[۱۱]	۲۰۱۵	×		×				×									×	×
		×		×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

پژوهش حاضر

بیان مسئله

همان‌طور که اشاره شد، مسئله زمان‌بندی اتاق عمل را می‌توان به شکل‌های مختلفی تعریف کرد. در این پژوهش، برای ارزشمندتر شدن تحقیق، یکی از بیمارستان‌های دولتی شهر تهران را برای مطالعه انتخاب کردیم تا مدل را براساس یک مسئله واقعی ایجاد کنیم. هریک از ۴۷ جراح این بیمارستان، در برخی از روزهای هفته در بیمارستان آماده جراحی است. آن‌ها تنها در این روزها جراحی‌هایی را که مدیریت اتاق عمل برای آن‌ها زمان‌بندی می‌کند، انجام می‌دهند. باین‌حال، اتاق خاصی در روز خاص به یک جراح مشخص تخصیص نیافته است. درحقیقت، در همه روزهای کاری هفته، ۸ اتاق عمل این بیمارستان به گروه‌های جراحی - که هریک چند جراح دارند - تخصیص یافته است.

پس از مراجعه بیمار به جراح و تشخیص نیاز به جراحی، اسم بیمار به مدیریت اتاق عمل اعلام می‌شود. اتاق عمل هر روز فهرست جراحی‌های روز بعد را نهایی و به جراحان اعلام می‌کند و به جراحی‌ها اتاق و نوبت تخصیص می‌دهد. در هر روز، جراحی‌ها براساس زمان‌بندی انجام

می‌گیرد و مراحل پس از جراحی طی می‌شود. شکل ۱ نمایی از این فرایند را نشان می‌دهد.

حال می‌خواهیم زمان‌بندی مجموعه اتاق‌های عمل این بیمارستان را به نحوی انجام دهیم که نخست هزینه‌های سربار ناشی از بیکاری و اضافه‌کاری کارکنان اتاق‌های عمل کاهش یابد و دوم اینکه زمان انتظار بیماران کمتر شود. اگر همه بیماران برای ما یکسان باشند، هدف دوم را می‌توان معادل این در نظر گرفت که تعداد جراحی‌ها در روز بیشینه شود. با این توضیحات، به سراغ تهیه مدل ریاضی مسئله می‌رویم.

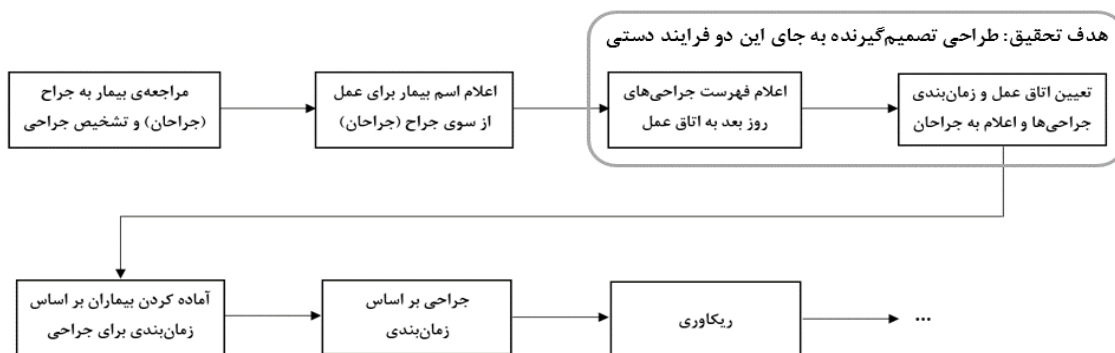
مدل ریاضی

برای تهیه مدل ریاضی این مسئله، فرض‌های زیر را به واقعیت‌های گفته‌شده اضافه می‌کنیم:

- مدیر اتاق عمل به‌عنوان تصمیم‌گیرنده حق دارد درباره جراحی‌شدن یا نشدن همه بیماران در یک روز تصمیم بگیرد؛
- برنامه‌ریزی و زمان‌بندی انجام‌شده به هیچ وجه تغییر نمی‌کند؛ یعنی لغو یا اضافه‌شدن و تغییر در اتاق یا ترتیب جراحی نداریم؛

ریکاوری و مراقبت های ویژه به اندازه کافی در دسترس است و جراحی به خاطر این منابع به تعویق نمی افتد؛
 ۶. مدت عمل (به علاوه فرایندهای مرتبطی که قبل و پس از آن در اتاق عمل انجام می شود) و ریکاوری، از قبل برای هر بیمار مشخص و ثابت است.

۳. بیماران و جراحان حتماً از ابتدای دوره زمان بندی (روز مشخص) در دسترس هستند؛
 ۴. هر جراحی به فقط یک جراح نیاز دارد که در کنار تیم بیهوشی و پرستاران جراحی می کنند؛
 ۵. به جز جراح و اتاق عمل، سایر منابع مانند تخت



شکل ۱. روند جراحی بیماران در اتاق عمل

جدول ۲. نمونه داده های مربوط به مدت جراحی ها

تعداد جراح	تخصص	نوع عمل	مدت عمل (دقیقه)
۲	گوش، حلق و بینی	پرده گوش	۹۰
۳	گوش، حلق و بینی	پرده گوش	۱۶۰
۲	گوش، حلق و بینی	انحراف بینی	۴۵
۳	گوش، حلق و بینی	انحراف بینی	۵۳
۵	ارتوپدی	شانه	۱۷۵
۶	ارتوپدی	شانه	۲۶۵

در باره فرض ۶ باید گفت که مدت هر جراحی، به میزان زیادی به مهارت جراح و نوع عمل بستگی دارد. جراحی ها از حدود ۲۰ دقیقه تا نزدیک به ۶ ساعت طول می کشند. مدت ریکاوری نیز به نوع عمل وابسته است. با توجه به آنکه جراح و نوع عمل از قبل مشخص است، طبیعتاً می توانیم این تنوع را از قبل در نظر بگیریم؛ در حالی که تمامی تحقیقات مبتنی بر داده های واقعی بررسی شده برای این پژوهش، این کار را نکرده اند. جدول ۲ نمونه ای از داده های جمع آوری شده برای این تحقیق را نشان می دهد. با این توضیحات، مدل ریاضی مسئله به صورت زیر است:

اندیس ها

$O \in \{1, \dots, O\}$: اتاق عمل؛

$S \in \{1, \dots, S\}$: جراح؛

$P \in \{1, \dots, P\}$: بیمار.

ثابت ها

T_o : هزینه مضاعف هر ساعت اضافه کاری اتاق o ؛

I_o : هزینه هر ساعت بیکاری اتاق o ؛

محدودیت‌ها

$$\sum_{o=1}^O x_{po} \leq A_s \quad \forall s \in \{1, \dots, S\}, p \in Pat_s \quad (3)$$

$$x_{po} \leq Pos_{po} \quad \forall p \in \{1, \dots, P\}, o \in \{1, \dots, O\} \quad (4)$$

$$\sum_{p \in Pat_s} \sum_{o=1}^O x_{po} t_p \leq H_s^{max} \quad \forall s \in \{1, \dots, S\} \quad (5)$$

$$\sum_{o=1}^O x_{po} = SS_{0p} + \sum_{p' \in Pat_s, p' \neq p} SS_{p'p} \quad \forall s \in \{1, \dots, S\}, p \in Pat_s \quad (6)$$

$$\sum_{o=1}^O x_{po} = \sum_{p' \in Pat_s, p' \neq p} SS_{pp'} + SS_{p,P+1} \quad \forall s \in \{1, \dots, S\}, p \in Pat_s \quad (7)$$

$$\sum_{p \in Pat_s} SS_{0p} + SS_{0,P+1,s} = 1 \quad \forall s \in \{1, \dots, S\} \quad (8)$$

$$SS_{0,P+1,s} + \sum_{p \in Pat_s} SS_{p,P+1} = 1 \quad \forall s \in \{1, \dots, S\} \quad (9)$$

$$x_{po} = \sum_{p'=0, p' \neq p}^P sr_{p'po} \quad \forall p \in \{1, \dots, P\}, o \in \{1, \dots, O\} \quad (10)$$

$$x_{po} = \sum_{p'=1, p' \neq p}^{P+1} sr_{pp'o} \quad \forall p \in \{1, \dots, P\}, o \in \{1, \dots, O\} \quad (11)$$

$$\sum_{p=1}^{P+1} sr_{0po} = 1 \quad \forall o \in \{1, \dots, O\} \quad (12)$$

A_s : در دسترس بودن (۱) یا نبودن (۰) جراح s
 Pos_{po} : ممکن (۱) یا غیرممکن بودن (۰) انجام شدن جراحی بیمار p در اتاق o
 t_p : مدت جراحی بیمار p
 r_p : مدت ریکاوری بیمار p
 H_o : ساعات کار عادی اتاق o
 H_s^{max} : سقف مدت جراحی برای جراح s در یک روز؛
 tar_o^{max} : سقف مدت اضافه کاری برای اتاق o در یک روز؛
 Pat_s : مجموعهٔ بیماران جراح s

متغیرهای تصمیم

tar_o : مدت اضافه کاری اتاق o
 idl_o : مدت بیکاری اتاق o
 x_{po} : بیمار p در اتاق o جراحی می شود (۰) یا نمی شود (۱)؛
 $SS_{p'p}$: بیمار p در توالی جراحی بلافاصله پس از بیمار p' جراحی می شود (۱) یا نمی شود (۰) (یعنی هردو بیمار مربوط به یک جراح هستند)؛
 $SS_{p,P+1} / SS_{0p}$: بیمار p در توالی جراح برای اولین/آخرین جراحی انتخاب می شود (۱) یا نمی شود (۰)؛
 $SS_{0,P+1,s}$: هیچ کدام از بیماران جراح s جراحی نمی شوند (۱) یا برخی جراحی می شوند (۰)؛
 $sr_{p'po}$: بیمار p در توالی اتاق o بلافاصله پس از بیمار p' جراحی می شود (۱) یا نمی شود (۰)؛
 $SS_{p,P+1,o} / SS_{0po}$: بیمار p در توالی اتاق o به عنوان اولین/آخرین جراحی قرار می گیرد (۱) یا نمی گیرد (۰)؛
 $SS_{0,P+1,o}$: هیچ بیماری در اتاق o جراحی نمی شود (۱) یا برخی جراحی می شوند (۰)؛
 ct_p : زمان اتمام جراحی بیمار p

توابع هدف

$$\min \sum_{o=1}^O (T_o tar_o + I_o idl_o) \quad (1)$$

$$\max \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O x_{po} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 & ss_{p,P+1,s} \in \{0,1\} \quad \forall s \in \{1,\dots,S\}, p \in Pat_s \quad (25) \\
 & \sum_{p=0}^P sr_{p,P+1,o} = 1 \quad \forall o \in \{1,\dots,O\} \quad (13) \\
 & ss_{0,P+1,s} \in \{0,1\} \quad \forall s \in \{1,\dots,S\} \quad (26) \\
 & ct_p \geq t_p + ct_{p'} + r_{p'} + (ss_{p'p} - 1)M \quad (14) \\
 & \quad \forall s \in \{1,\dots,S\}, p, p' \in Pat_s, p' \neq p \quad (27) \\
 & sr_{p'po} \in \{0,1\} \quad \forall p' \in \{0,\dots,P\}, p \in \{1,\dots,P+1\}, p' \neq p, o \in \{1,\dots,O\} \quad (15) \\
 & ct_p \geq t_p + (ss_{0ps} - 1)M \quad (28) \\
 & \quad \forall s \in \{1,\dots,S\}, p \in Pat_s \quad (16) \\
 & ct_p \geq 0 \quad \forall p \in \{1,\dots,P\} \quad (17) \\
 & ct_p \geq t_p + ct_{p'} + (sr_{p'po} - 1)M \quad \forall o \in \{1,\dots,O\}, p, p' \in \{1,\dots,P\}, p' \neq p \quad (18) \\
 & ct_p \geq t_p + (sr_{0po} - 1)M \quad \forall o \in \{1,\dots,O\}, p \in \{1,\dots,P\} \quad (19) \\
 & tar_o \geq ct_p + (x_{po} - 1)M - H_o \quad \forall p \in \{1,\dots,P\}, o \in \{1,\dots,O\} \quad (20) \\
 & idl_o \geq H_o + tar_o - \sum_{p=1}^P x_{po}t_p \quad \forall o \in \{1,\dots,O\} \quad (21) \\
 & tar_o, idl_o \geq 0 \quad \forall o \in \{1,\dots,O\} \quad (22) \\
 & tar_o \leq tar_o^{max} \quad \forall o \in \{1,\dots,O\} \quad (23) \\
 & x_{po} \in \{0,1\} \quad \forall p \in \{1,\dots,P\}, o \in \{1,\dots,O\} \quad (24) \\
 & ss_{p'p} \in \{0,1\} \quad \forall s \in \{1,\dots,S\}, p, p' \in Pat_s, p' \neq p \quad (25) \\
 & ss_{0ps} \in \{0,1\} \quad \forall s \in \{1,\dots,S\}, p \in Pat_s \quad (26)
 \end{aligned}$$

توابع هدف (۱) و (۲) به ترتیب کمینه‌کردن هزینه‌های سربار و بیشینه‌کردن جراحی‌های برنامه‌ریزی‌شده (معادل کمینه‌کردن زمان انتظار بیماران) هستند. در این مدل، زمان انتظار به ساده‌ترین شکل ممکن در نظر گرفته شده است؛ میان بیماران تفاوتی نیست و فرقی نمی‌کند که چند روز از ورود هر کدام به لیست انتظار گذشته است.

دسته محدودیت (۳) تضمین می‌کند هر جراحی تنها در صورتی برنامه‌ریزی شود که جراح در آن روز حضور داشته باشد. رابطه (۴) سبب می‌شود به هر جراحی اتاق مناسب تخصیص یابد. دسته محدودیت (۵) تجاوز نکردن ساعات جراحی برنامه‌ریزی‌شده برای هر جراح، از سقف مشخص H_s^{max} را تضمین می‌کند.

محدودیت‌های (۶) و (۷) به ترتیب موجب می‌شوند در توالی جراحی‌های برنامه‌ریزی‌شده برای هر جراح حاضر، قبل و بعد از هر جراحی، جراح دیگری مشخص شده باشد. محدودیت‌های (۸) و (۹) نیز سبب می‌شوند در ابتدا و انتهای توالی هر جراح، یک جراحی قرار گیرد؛ مگر آنکه هیچ جراحی‌ای زمان‌بندی نشود. محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۳) عملکرد مشابهی برای توالی جراحی‌ها در اتاق‌های عمل دارند.

نامعادله‌های (۱۴) تا (۱۷) زمان تکمیل جراحی‌های برنامه‌ریزی‌شده را تعیین می‌کنند که باید حداقل به اندازه مجموع مدت عمل و ریکاوری بعد از بیمار قبلی در توالی جراح و مدت عمل بعد از بیمار قبلی در توالی اتاق باشد. در این روابط، M یک عدد بزرگ است. دسته محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) برای محاسبه زمان‌های بیکاری و اضافه‌کاری

است که مجموعه جواب‌های ناچیره به دست آید. با توجه به کمبود اطلاعات درباره ارتباط میان دو تابع هدف تعریف شده (هزینه و انتظار)، به نظر می‌رسد این روش‌ها گزینه‌های مناسبی برای حل مسئله زمان‌بندی اتاق‌های عمل باشند. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت فراابتکاری، این روش‌ها می‌توانند ما را در دستیابی به جواب‌های مناسب در زمانی معقول کمک کنند. به علاوه، امکان استفاده از آن‌ها در کنار شبیه‌سازی میسر است.

NSGA-II روشی چندهدفه مبتنی بر قواعد الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه است، اما نحوه مرتب‌سازی مجموعه جواب‌ها که در حالت تک‌هدفه به سادگی با مقایسه یک عدد (تابع هدف) مربوط به هر جواب، با عدد یا تابع هدف متناظر با جواب دیگر قابل انجام است، در حالت چندهدفه ممکن نیست، زیرا در اینجا باید رشته توابع هدف با یکدیگر مقایسه شوند. در NSGA-II جواب‌های گوناگون براساس دو معیار رتبه - که با قاعده چیرگی جواب‌ها تعیین می‌شود - و فاصله ازدحامی پاسخ‌ها مرتب می‌شوند. توضیحات بیشتر درباره این دو معیار، در مقاله [۱۸] آمده است. روش FastPGA به کاررفته در این تحقیق هم عملکرد مشابهی دارد؛ با این تفاوت که تعداد جواب‌ها و همچنین تعداد فرزندان، در هر مرحله با توجه به تعداد جواب‌های ناچیره تعیین می‌شود [۱۹].

عنصر شبیه‌سازی را هم دقیقاً مطابق مدل ریاضی معرفی شده طراحی می‌کنیم؛ با این تفاوت که شبیه‌سازی در اینجا این قابلیت را دارد که به آسانی مدت جراحی و ریکاوری بیماران را احتمالی در نظر بگیرد.

تطبیق مدل ریاضی با شبیه‌سازی

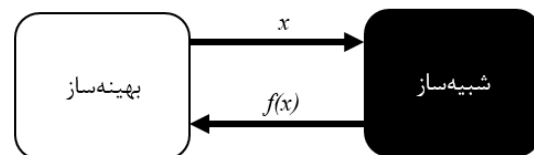
با توضیحاتی که در بخش‌های قبل داده شد، اگر مدت جراحی و ریکاوری بیماران در عنصر شبیه‌سازی اتاق عمل طراحی شده قطعی در نظر گرفته شود، شبیه‌سازی باید توابع هدف را مشابه مدل ریاضی محاسبه کند. برای اطمینان از این موضوع، پنج سناریو مختلف تعریف شد و با استفاده از مدل ریاضی و شبیه‌سازی، محاسبه توابع هدف برای این سناریوها صورت گرفت. همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، در همه این سناریوها، این دو رویکرد، مقدار توابع هدف را یکسان برآورد می‌کنند.

نوشته شده‌اند. در رابطه (۱۵)، زمان تکمیل جراحی فرضی بیمار 0 زمان صفر در نظر گرفته می‌شود تا اختلالی در سایر محاسبات صورت نگیرد. با توضیحات قبلی، محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۸) برای مشخص شدن نوع متغیرهای تصمیم، بدیهی به نظر می‌رسند.

ارائه روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

زمان‌بندی اتاق عمل پیچیدگی‌هایی دارد که همه آن‌ها در مدل ریاضی ارائه شده در نظر گرفته نشده‌اند. یکی از مهم‌ترین این پیچیدگی‌ها، احتمالی بودن مدت فرایندها (جراحی و ریکاوری) است؛ برای مثال، در بیمارستان مورد مطالعه، برای جراح ۱۸ ام با تخصص زنان، «برداشتن رحم از شکم» معمولاً بین ۳ تا ۵ ساعت طول می‌کشد، اما در روش ارائه شده در بخش قبل، همیشه مدت جراحی برای بیماران با این جراح - نوع، ۴ ساعت در نظر گرفته شده است. حال می‌خواهیم با استفاده از ابزار بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، این پیچیدگی را نیز در نظر بگیریم.

بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، دارای دو عنصر بهینه‌سازی و شبیه‌سازی است. عنصر بهینه‌سازی که ممکن است یک روش فراابتکاری باشد، سناریوها را یا جواب‌های مختلف (x) تولید و عنصر شبیه‌سازی توابع هدف ($f(x)$) را برای هر سناریو محاسبه می‌کند (شکل ۲). در این مطالعه، هر دو عنصر بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده‌اند تا به سادگی با یکدیگر تعامل داشته باشند. این فرایند رفت و برگشتی، تا رسیدن به شرایط توقف بهینه‌سازی ادامه می‌یابد.



شکل ۲. مفهوم بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

برای عنصر بهینه‌سازی، از میان روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی (MOEA)، از دو روش NSGA-II و FastPGA استفاده شد. در این نوع از روش‌ها، بدون داشتن اطلاعات قبلی درباره ارتباط میان توابع هدف، تلاش بر آن

جدول ۳. سناریوهای به‌کاررفته برای اعتبارسنجی انطباق مدل ریاضی و شبیه‌سازی در توصیف سیستم

سناریو	ویژگی‌های سناریو		کیفیت توابع هدف	
	تعداد اتاق	تعداد بیمار	مدل ریاضی	شبیه‌سازی
۱	۸	۳۲	(۳۲, ۳۳۰)	(۳۲, ۳۳۰)
۲	۵	۳۶	ناموجه*	ناموجه
۳	۳	۴۹	ناموجه**	ناموجه
۴	۳	۱۹	جواب بهینه‌ی مدل ریاضی	(۱۳, ۳۷)
۵	۵	۳۶	موجه	(۲۲, ۹۰)

* برنامه‌ریزی برای جراحان خارج از دسترس

** برنامه‌ریزی با نقض محدودیت زمان اضافه‌کاری

تولید شد. تعداد اتاق‌های موجود را در چهار سطح تعریف کردیم و در هر سطح از تعداد اتاق‌ها، با توجه به نرخ ورود بیماران برای هر جراح- نوع به لیست انتظار جراحی، به‌اندازه‌ی یک، دو و سه روز ورود بیماران به لیست خالی، بیمار تولید کردیم؛ بنابراین، چهار سطح اتاق و سه سطح بیمار در مسائل نمونه داریم.

جدول ۴. مقایسه‌ی زمان حل سه روش برحسب ثانیه

مسئله نمونه	تعداد اتاق	تعداد بیمار	مدل ریاضی	NSGA-II	FastPGA
۱	۱	۴	۰/۰۹	۱۲۷	۳۰
۲	۱	۶	۰/۰۸	۶۹	۱۶
۳	۳	۷	۰/۰۹	۱۱۹	۳۰
۴	۳	۱۳	۰/۶۷	۴۵۶	۱۲۸
۵	۳	۱۹	۰/۳۶	۳۵۷	۱۰۱
۶	۳	۴۹	۷۸۵۹	۶۷۵	۲۵۱
۷	۳	۱۶	۰/۲۶	۳۴۳	۹۶
۸	۳	۳۶	۷۳۱۳	۶۱۴	۲۶۲
۹	۳	۶۸	۷۲۰۰	۸۱۷	۴۷۰
۱۰	۳	۳۲	۴	۶۵۸	۱۸۴
۱۱	۳	۷۳	کمبود حافظه	۷۹۶	۳۰۱
۱۲	۳	۱۱۳	کمبود حافظه	۲۰۴۷	۹۰۰

مدل ریاضی و روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با دو الگوریتم NSGA-II و FastPGA را در نرم‌افزار MATLAB R2014b کدنویسی و با استفاده از رایانه‌ای با

مقایسه‌ی عملکرد مدل ریاضی و بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

اگر بخواهیم دو رویکرد حل دقیق مدل ریاضی و بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را با یکدیگر مقایسه کنیم، مشخص است که مدل ریاضی با وجود دقت بالا در پیدا کردن جواب بهینه، سرعت زیادی در حل مسائل بزرگ با پیچیدگی زیاد ندارد؛ درحالی‌که بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، با داشتن انعطاف‌پذیری بالا در استفاده از ویژگی‌های الگوریتم‌های فراابتکاری و شبیه‌سازی، جواب‌هایی قابل قبول برای مسائلی که هم‌زمان بزرگ و پیچیده‌اند، ارائه می‌کند. در یک تحقیق، میان حل دقیق مدل ریاضی و بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در حل مسئله‌ی زمان‌بندی کار کارگاهی- که ساده‌تر از مسئله‌ی تحقیق ماست- مقایسه‌ای صورت گرفته است [۲۰]. در این پژوهش، این موضوع در مسئله‌ی زمان‌بندی اتاق‌های عمل نشان داده می‌شود.

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، اگر از احتمالی بودن مدت جراحی و ریکاوری صرف‌نظر کنیم، عنصر شبیه‌سازی تهیه‌شده، توصیفی یکسان با مدل ریاضی از مسئله ارائه می‌کند. به‌علاوه، شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های بیشتری از سیستم (مدت احتمالی فرایندها)، توصیفی دقیق‌تر از اتاق عمل دارد؛ بنابراین، اگر با تعداد تکرارهای به‌اندازه‌ی کافی زیاد، جواب‌های مدل ریاضی را با شبیه‌سازی ارزیابی کنیم، توابع هدف واقعی‌تر ارزیابی شده‌اند.

با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از بیمارستان مورد مطالعه برای این تحقیق، ۱۲ مسئله نمونه مطابق جدول ۴

در رابطه (۲۹) mg_1 بازه تابع هدف اول و mg_2 بازه تابع هدف دوم را در دونقطه‌ای نشان می‌دهد که از حل دو مسئله (یکی با در نظر گرفتن تابع هدف اول و دیگری با تابع هدف دوم) به دست آمده است.

پس از حل مسائل نمونه به هر سه روش، جواب‌های هریک را با استفاده از شبیه‌سازی با ۱۰۰۰ بار تکرار ارزیابی کردیم. زمان حل و کیفیت جواب‌های ناچیره به دست آمده از سه روش به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

مشخصات CPU: AMD PhenomII x2 3.1GHz و Ram: 4GB DDR2 آن‌ها را اجرا کردیم. با توجه به دوهدفه بودن مسئله، مدل ریاضی را یک بار با تابع هدف اول و سپس با تابع هدف دوم حل کردیم. سپس در صورتی که الگوریتم حل مدل ریاضی در زمانی کمتر از یک ساعت به جوابی موجه رسید، مسئله سومی با استفاده از تابع هدف زیر حل کردیم:

$$\min \left[\frac{1}{mg_1} \times \sum_{o=1}^O (T_o tar_o + I_o idl_o) - \frac{1}{mg_2} \times \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O x_{po} \right] \quad (29)$$

جدول ۵. مقایسه کیفیت جواب‌های پارتو به دست آمده از سه روش با ۱۰۰۰ تکرار شبیه‌سازی

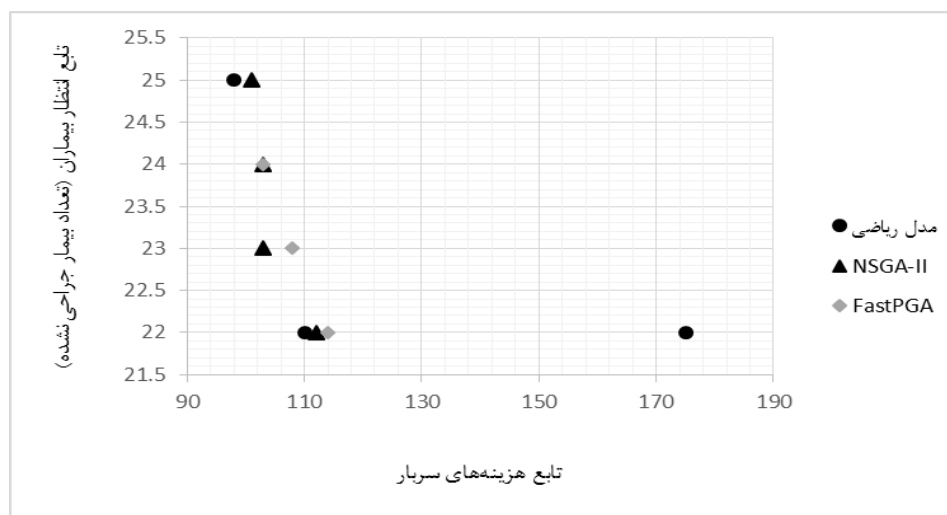
FastPGA	NSGA-II	مدل ریاضی	مسئله نمونه
(۱۸, ۲)	(۱۸, ۲)	(۱۸, ۲)	۱
(۲۸, ۵)	(۲۸, ۵)	(۲۸, ۵)	۲
(۳۰, ۵)	(۳۰, ۵)	(۳۰, ۵)	۳
(۴۸, ۴)	(۴۸, ۴)	(۴۸, ۴)	۴
(۶۹, ۱۲)	(۶۹, ۱۲)	(۷۰, ۱۲)	۵
(۲۴, ۳۶) (۲۷, ۳۵) (۳۱, ۳۴)	(۱۴, ۳۸) (۱۸, ۳۷) (۲۰, ۳۶) (۲۱, ۳۵) (۲۱, ۳۴)	(۳۳) (۲۵, (۱۸, ۳۶) (۲۷, ۳۳) (۸۲, ۳۳)	۶
(۱۶۲, ۹)	(۱۶۲, ۹)	(۱۶۲, ۹)	۷
(۲۴) (۲۳) (۲۲)	(۲۵) (۲۴) (۲۳) (۲۲)	(۲۲) (۲۲)	۸
(۱۰۳, (۱۰۸, (۱۱۴,	(۱۰۱, (۱۰۳, (۱۰۳, (۱۱۲,	(۹۸, ۲۵) (۱۱۰, (۱۷۵,	
(۵۸, ۵۱) (۶۰, ۵۰) (۶۲, ۴۹)	(۵۳, ۵۴) (۵۴, ۵۳) (۶۰, ۵۲) (۶۱, ۵۱)	(۶۶) (۱۸۹,	۹
(۱۹)	(۱۹)	(۱۹)	۱۰
(۲۳۹,	(۲۳۹,	(۲۳۹,	
(۵۷) (۵۶) (۵۵)	(۵۷) (۵۶) (۵۵) (۵۴) (۵۳)	کمبود حافظه	۱۱
(۱۹۴, (۲۰۰, (۲۰۶,	(۱۹۵, (۲۰۰, (۲۰۳, (۲۰۸, (۲۱۵,	کمبود حافظه	۱۲
(۸۹, ۸۳) (۹۶, ۷۶)	(۹۹, ۸۱) (۸۴, ۷۸) (۸۵, ۷۷) (۸۶, ۷۶)		

هزینه‌های سربار را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه جراحان برخی از بیماران در انتظار در روز زمان بندی حاضر نیستند، طبیعی است تعداد زیادی از بیماران جراحی نشوند. به همین دلیل، در بهترین جواب به دست آمده از جهت تابع

برای مثال، در شکل ۳ نموداری از جواب‌های به دست آمده از سه روش برای مسئله نمونه ۸ داده شده است. محور عمودی در این نمودار، تعداد بیمارانی را که در روز زمان بندی امکان عمل نیافته‌اند و محور افقی تابع

همان‌طور که در جدول‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود، در کل نیز روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، علاوه بر آنکه در مسائل کوچک جواب‌هایی با کیفیت نزدیک به مدل ریاضی تولید می‌کنند، قابلیت آن را دارند که مسائل بزرگ را هم در زمانی معقول حل کنند.

هدف انتظار بیماران، ۲۲ بیمار جراحی نشده‌اند. گذشته از این موضوع، با آنکه ابعاد این مسئله چندان بزرگ نیست (۵ اتاق و ۳۶ بیمار)، روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در مجموع برای این مسئله عملکرد بهتری داشته‌اند و توانسته‌اند جواب‌های ناچیره‌ی بیشتری در زمان کمتر تولید کنند.



شکل ۳. وضعیت جواب‌های به‌دست‌آمده برای مسئله نمونه

کاهش انتظار بیماران و هزینه‌های بیمارستان، این دو به‌عنوان توابع هدف مسئله در نظر گرفته شدند. سپس برای شناخت بهتر مسئله در یک بیمارستان واقعی و همچنین ارزیابی کارایی مدل‌سازی ریاضی، مدل ریاضی این مسئله معرفی شد. پس از آن، ساخت ابزار بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، به دو روش بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه‌ی NSGA-II و FastPGA صورت گرفت. تنها تفاوت مدل ریاضی و بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در توصیف اتاق، مدت فرایندها بود که در بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به‌صورت احتمالی در نظر گرفته شد. پس از اطمینان از عملکرد مشابه ابزارها در شرایطی که مدت فرایندها قطعی بود، مقایسه‌ی آن‌ها انجام گرفت. در نهایت، مشخص شد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، نه‌تنها در حل مسائل کوچک به اندازه‌ی مدل ریاضی کارآمد است، بلکه در مسائل بزرگ هم در زمانی معقول جواب‌هایی مناسب به دست می‌دهد.

این نتایج، در شرایطی به‌دست آمد که در این تحقیق، تنها یکی از پیچیدگی‌های اتاق عمل واقعی نسبت به مدل

همچنین در جدول ۵، یکی از جواب‌هایی که بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با استفاده از FastPGA به‌عنوان جواب ناچیره معرفی کرده، در شبیه‌سازی با ۱۰۰۰ تکرار به‌عنوان جوابی چیره شناخته شده است. این موضوع به تصادفی بودن شبیه‌سازی برمی‌گردد. در این پژوهش، با بالا بردن تعداد تکرارها، در ارزیابی نهایی جواب‌ها سعی کرده‌ایم تأثیر این عامل را کاهش دهیم؛ بنابراین، احتمالاً در حقیقت هم این جواب ناچیره نیست، اما در بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با توجه به آنکه زمان ارزیابی جواب‌ها برای ما مهم است، تعداد تکرارها را محدود در نظر گرفتیم؛ بنابراین، طبیعی است جوابی چیره به‌صورت تصادفی ناچیره ارزیابی شود.

نتیجه‌گیری

پیچیدگی مسئله‌ی زمان‌بندی اتاق عمل از یک سو و محدودیت زمانی برای حل آن از سوی دیگر، سبب استفاده از بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی شد. با توجه به اهمیت

این تحقیق - که بیمارستان بزرگی نیست - مسائلی در حد بزرگ‌ترین مسائل آزمایش شده برای این پژوهش دارد. افزودن واقعیت‌های بیشتر به شبیه‌سازی و همچنین استفاده از الگوریتم‌های دیگر را به‌عنوان بخش بهینه‌ساز می‌توان موضوعات مناسبی برای ادامه این پژوهش به‌شمار آورد.

ریاضی در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده بود؛ درحالی‌که می‌توان بدون کاهش قابل توجه در کارایی ابزار، پیچیدگی‌های بیشتری را از اتاق عمل در عنصر شبیه‌ساز در نظر گرفت. با وجود این، افزودن این پیچیدگی‌ها به مدل ریاضی، به‌راحتی و بدون کاهش سرعت امکان‌پذیر نیست. همچنین باید توجه داشت که بیمارستان مورد مطالعه در

مراجع

1. Denton, B., Viapiano, J. and Vogl, A. (2007). "Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty", *Health Care Management Science*, Vol. 10, No. 1, PP. 13–24.
2. Litvak, E. and Long, M. (2000). "Cost and quality under managed care: Irreconcilable differences", *The American Journal of Managed Care*, Vol. 6, No. 3, PP. 305–312.
3. Ateeghechian, A. (2011). "Surgery operations scheduling with stochastic times", PhD Thesis, Faculty of Industrial Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.
4. Cardeon, B., Demeulemeester, E. and Belien, J. (2010). "Operating room planning and scheduling: A literature review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 201, PP. 921–932.
5. Denton, B. T., Miller, A. J., Balasubramanian, H. J. and Huschka, T. R. (2009). "Optimal Allocation of Surgery Blocks to Operating Rooms under Uncertainty", *Operations Research*, Vol. 58, No.4, PP. 802–816.
6. Arnaout, J. P. M. and Kulbashian, S. (2008). "Maximizing the utilization of operating rooms with stochastic times using simulation", *A Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, PP. 1617–1623.
7. Liu, Y., Chu, C. and Wang, K. (2011). "New heuristic algorithm for the operating room scheduling problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 61, PP. 865–871.
8. Cochran, J. K. and Roche, K. (2009). "A multi-class queuing network analysis methodology for improving hospital emergency department performance", *Computers and Operations Research*, Vol. 36, No. 5, PP. 1497–1512.
9. Meskens, N., Duvivier, D. and Hanset, A. (2013). "Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the surgical team", *Decision Support Systems*, Vol. 55, PP. 650–659.
10. Lamiri, M., Grimaud, F. and XIE, X. (2009). "Optimization methods for a stochastic surgery planning problem", *Int. J. Production Economics*, Vol. 120, No. 2, PP. 400–410.
11. Aringhieri, A., Landab, P., Sorianoc, P., Tànfanib, E. and Testi, A., (2015). "A two level metaheuristic for the operating room scheduling and assignment problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 54, PP. 21–34.
12. Davies, R. and Davies, H. (1994). "Modeling patient flows and resource provision in health systems", *Omega*, Vol. 22, No. 2, PP. 123–131.
13. Lowery, J. C. (1998). "Getting started in simulation in health care", *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, PP. 31–35.
14. Saremi, A., Jula, P., Elmekawy, T. and Wang, G. G. (2013). "Appointment scheduling of outpatient surgical services in a multistage operating room department", *Int. J. Production Economics*, Vol. 141, No. 2, PP. 646–658.
15. M'hallah, R. and Al-roomi, A. H. (2014). "The planning and scheduling of operating rooms: A simulation approach", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 78, PP. 235–248.

16. Persson, M. J. and Persson, J. A. (2009). "Health economic modeling to support surgery management at a Swedish hospital", *Omega*, Vol. 37, No. 4, PP. 853–863.
 17. Van Essen, J. T., Hans, E. W., Hurink, J. L. and Oversberg, A. (2012). "Minimizing the waiting time for emergency surgery", *Operations Research for Health Care*, Vol. 1, No. 2, PP. 34–44.
 18. Deb, K., Pratap, A., Agarval, S. and Meyarivan, T. (2002). "A Fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGAII", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, PP. 182–197.
 19. Eskandari, H. and Geiger, C. D. (2008). "A fast Pareto genetic algorithm approach for solving expensive multiobjective optimization problems", *Journal of Heuristics*, Vol. 14, No. 3, PP. 203–241.
 20. Klemmt, A., Horn, S., Weigert, G. and Wolter, K. (2009). "Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 25, No. 6, PP. 917–925.
-