

زمان بندی اتاق عمل برای جراحی الکتیو با در نظر گرفتن واحدهای مراقبت

بعد از عمل به کمک برنامه ریزی آرمانی ناهید محمودیان^۱، سعیده کتابی^{۲*}، آرزو عتیقه چیان^۳

۱. کارشناس ارشد، گروه مدیریت، دانشگاه اصفهان

۲. دانشیار، گروه مدیریت، دانشگاه اصفهان

۳. استادیار، گروه مدیریت، دانشگاه اصفهان

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۶/۴/۲۷، تاریخ تصویب: ۹۶/۶/۲۴)

چکیده

در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی آرمانی با متغیرهای صحیح برای زمان بندی اتاق های عمل به صورت بلوکی ارائه شده که در آن زمان های مورد نیاز بستری بیماران تصادفی در نظر گرفته شده است. هدف برای زمان بندی اصلی جراحی، کمینه کردن هزینه های واحدهای مراقبت پایین دستی است. برای کاهش پیچیدگی محدودیت های ظرفیت، از مقادیر مورد انتظار و نیم انحراف معیار مثبت تعداد بیماران در واحدهای مراقبت پایین دستی استفاده، و مثال ها با کمک نرم افزار گمز حل شده است. نوآوری پژوهش در این است که اولاً به هر دو معیار کمبود ظرفیت و خالی ماندن تخت توجه شده و ثانیاً جراحان برای رسیدن به این اهداف، زمان بندی شده اند. با استفاده از مدل پیشنهادی می توان روز (های) مناسب برای هر جراح را به نحوی تعیین کرد که کارایی واحدهای مراقبت پایین دستی در حداکثر سطح ممکن باشد و برای این کار باید به سطح خدمت مورد نظر و محدودیت بلوک های تخصیصی به سرویس ها توجه شود.

واژه های کلیدی: زمان بندی اصلی جراحی، راهبرد زمان بندی بلوکی، واحدهای مراقبت پایین دستی جراحی، برنامه ریزی آرمانی با متغیرهای صحیح.

مقدمه

اقامت بیمار در واحد مراقبت های ویژه^۵ و در دسترس و آماده بودن این واحد، بر زمان بندی جراحی تأثیر می گذارد [۱]. گفتنی است طول مدت عمل های جراحی، به عمل مورد نظر بستگی دارد، در نتیجه گاهی تفاوت زیادی بین مدت برنامه ریزی شده و مدت واقعی مشاهده می شود [۲]؛ بنابراین، اعمال مدیریت صحیح در بیمارستان ها به منظور مصرف درست منابع و فراهم کردن خدمات مطلوب به بیماران، اهمیت بسزایی دارد. هر بهبود عملکرد در این زمینه سبب صرفه جویی و به دنبال آن افزایش درآمد می شود. افزایش کیفیت خدمات را نیز می توان نتیجه ای دیگر در نظر گرفت.

بیشتر بیمارستان ها هنگام برنامه ریزی جراحی ها از یک سیستم رزرو-بلوکی^۶ استفاده می کنند که در آن یک تخصص پزشکی مثل ارولوژی برای بلوک هایی^۷ که میزان زمان خاصی را نشان می دهند، در نظر گرفته می شود؛ برای مثال، یک روز در یک اتاق عمل.

این بلوک ها در برنامه دوره ای زمان بندی اصلی^۸ ترکیب می شوند که هر بلوک بعد از یک دوره ثابت تکرار می شود

به دلیل سالخورده بودن جامعه و پیشرفت فناوری، تقاضا برای خدمات سلامت در کشورهای صنعتی رو به افزایش است. به طور هم زمان، کم کردن هزینه و کمبود منابع انسانی سبب افزایش فشار بر منابع بیمارستانی می شود؛ بنابراین، اهمیت بهینه سازی استفاده از منابع کمیاب در بیمارستان ها آشکار است. از آنجا که بخش جراحی^۱ یکی از پرهزینه ترین بخش های بیمارستان و در عین حال درآمدزاترین آن هاست، زمان بندی^۲ بهینه جراحی ها با توجه به نوع و مدت هریک و محدودیت هایی از جمله تعداد اتاق ها، ساعات کاری و گروه های جراحی سبب صرفه جویی در این زمینه ها می شود. اتاق های عمل^۳، گران ترین منابع در بیمارستان ها هستند که به زمینه زمان بندی آن ها در بسیاری از مطالعات توجه شده است. کاردئون و همکاران در سال ۲۰۱۰ مقاله ای مروری بر مطالعات در این زمینه ارائه دادند. تحقیقات جانالاگادا و همکاران نشان می دهد که ۱۵ درصد کنسلی ها به دلیل نبود تخت در اتاق ریکاوری^۴ در بیمارستان مورد بررسی بوده است. طول مدت

نشان می‌دهد رویکرد حل ارائه‌شده برای استفاده بهینه از اتاق‌های عمل و تخت‌های مورد نیاز در واحدهای مراقبت پس از عمل، کارکرد خوبی دارد [۴]. کارتر و کتابی در مطالعه خود، مدلی از برنامه‌ریزی با متغیرهای صحیح برای زمان‌بندی اصلی جراحان ارائه دادند. بنا بر این فرض توسعه داده‌شده، هر جراح، بیماران و زمان‌های اقامت مربوط با توزیع تصادفی منطبق بر داده‌های تاریخی خواهد داشت [۵]. مین و یه در سال ۲۰۱۰ میلادی، زمان‌بندی عملیاتی جراحی‌های الکتیو را ارائه دادند که اطمینان‌نداشتن در مدت جراحی و محدودیت‌های ظرفیت واحدهای پایین‌دستی مانند واحد مراقبت جراحی در طول چند دوره را در نظر می‌گیرد. آن‌ها مسئله زمان‌بندی جراحی تصادفی را مدل‌سازی کردند که مجموع هزینه‌هایی که به‌طور مستقیم به بیماران مربوط می‌شود و هزینه‌های اضافه‌کاری مورد انتظار را حداقل می‌کند. در این مقاله، آن‌ها سطح برنامه‌ریزی جراحی عملیاتی را در نظر گرفتند [۲].

ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی جراحان با در نظر گرفتن واحدهای پایین‌دستی بر اساس بهینه‌سازی ازدحام ذرات در دو فاز پرداختند. فاز اول به تعیین این می‌پردازد که آیا بیماران در دوره برنامه‌ریزی می‌توانند عمل شوند سپس زمان جراحی آن‌ها با هدف حداکثر کردن رضایت بیماران مشخص می‌شود. در فاز دوم، برنامه زمانی جراحی شامل دنباله‌ای از جراحی‌ها و اتاق‌های عمل مربوط با در نظر گرفتن واحد مراقبت بعد از بیهوشی به‌عنوان یک واحد پایین‌دستی می‌شود. هدف پژوهش آن‌ها، حداقل کردن هزینه ثابت اتاق عمل، هزینه اضافه‌کاری و هزینه ریکاوری است. آن‌ها برای نشان دادن کارایی روش خود از داده‌های واقعی استفاده کردند و به نتایج نزدیکی به آنچه از روش CPLEX به‌دست آمده بود، رسیدند. با این تفاوت که زمان محاسباتی روش آن‌ها بسیار کمتر بود [۶].

اسکندری و بهرامی برای مسئله زمان‌بندی اتاق‌های عمل، یک مدل ریاضی با سه هدف حداقل کردن هزینه‌های سربار بیکاری، اضافه‌کاری و انتظار بیماران (افزایش تعداد بیماران برنامه‌ریزی‌شده) ارائه دادند سپس با تعامل بین بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی برای به‌دست آوردن جواب مناسب و شبیه‌سازی برای محاسبه مقدار تابع هدف مربوط، مجموعه جواب‌های ناچیره را به‌دست آوردند. آن‌ها احتمالی بودن

[۳]. تصمیم‌گیری در سیستم‌های رزرو بلوکی، به‌صورت سلسله‌مراتبی راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی است. در سطح راهبردی، تعداد بلوک‌های تعیین‌شده برای جراحان در طول یک دوره برنامه زمان‌بندی اصلی جراحی تعیین می‌شود. در سطح تاکتیکی، روزهای اتاق عمل به جراحان در یک برنامه زمان‌بندی اصلی جراحی اختصاص می‌یابد و در سطح عملیاتی، برای یک بلوک جراحی، بیماران الکتیو زمان‌بندی می‌شوند. در این مقاله، هدف بررسی مسئله تعیین برنامه زمان‌بندی اصلی جراحی به‌صورت تاکتیکی است. با توجه به اینکه برنامه زمانی فوق ممکن است بر ورود بیماران به واحدهای پایین‌دستی مراقبت از بیماران بستری و واحدهایی که بیمار پس از ترک اتاق عمل به آن‌ها نیاز دارد تأثیرگذار باشد، لازم است علاوه بر شرایط حاکم بر سیستم زمان‌بندی بلوکی، محدودیت‌های مربوط به واحدهای مراقبت‌های بعدی را هم در نظر گرفت. ظرفیت موجود در اتاق‌های عمل، ریکاوری، آی‌سی‌یو و بخش، به‌طور غیرمستقیم به انجام یک عمل مربوط می‌شوند که در صورت آماده‌نبودن هریک، مشکلاتی از قبیل عمل نکردن یا مراقبت کافی نداشتن پس از عمل به‌وجود می‌آید؛ بنابراین این موارد از محدودیت‌های مهمی به‌شمار می‌آید که توجه به آن‌ها در مدل‌سازی و زمان‌بندی ضروری است.

ادبیات پژوهش

با توجه به اهمیت اتاق‌های عمل در بخش خدمات پزشکی، در مطالعات زمان‌بندی به این حوزه توجه زیادی شده است. محققان بین رویکردهای راهبردی (بلندمدت)، تاکتیکی (میان‌مدت) و عملیاتی برای طبقه‌بندی مسائل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خود تفاوت قائل می‌شوند. ون اوستروم و همکاران در سال ۲۰۰۸ میلادی، زمان‌بندی اتاق‌های عمل را در سطح تاکتیکی برای بیماران الکتیو انجام دادند، به‌طورکلی این جراحی، در مقابل جراحی اورژانسی به اعمالی اطلاق می‌شود که می‌توان آن‌ها را برنامه‌ریزی کرد که در آن‌ها با استفاده از تولید ستون به مدل‌سازی ریاضی مسئله با هدف حداکثر کردن کارایی اتاق‌های عمل و با در نظر گرفتن تعداد تخت مورد نیاز در واحدهایی مانند واحد مراقبت ویژه و بخش پرداخته می‌شود. برای نشان دادن کارایی مدل از داده‌های یک مرکز پزشکی استفاده شده است که نتایج آن

جراحی صورت‌گرفته، مسیرهای مختلفی را از زمان جراحی تا ترخیص طی می‌کند. برای ساده‌سازی مسئله موردنظر فرض می‌شود که عموم بیماران پس از جراحی به بخش می‌روند یا مرخص می‌شوند و بعضی بیماران ابتدا به آی‌سی‌یو می‌روند سپس در بخش، بستری می‌شوند. مرحله پس از بخش هم ترخیص از بیمارستان است. ماندن یک بیمار در آی‌سی‌یو با نماد «I»، در بخش اگر بیمار مستقیماً از اتاق عمل آمده باشد با نماد «WO» و اگر از ICU به بخش منتقل شده باشد با نماد «WI» نشان داده می‌شود.

این مطالعه در سه مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول، توزیع تصادفی بیماران ریکاوری‌شده در آی‌سی‌یو و در بخش تخصصی مربوط برای یک بلوک اتاق عمل به‌دست می‌آید. این مرحله برای هر جراح اجرا می‌شود. در مرحله بعد توزیع‌های بیماران ریکاوری‌شده از زمان‌بندی دوره‌ای یک بلوک اتاق عمل محاسبه می‌شود. در مرحله آخر، تمام بلوک‌های به‌دست‌آمده از یک برنامه دوره‌ای ترکیب می‌شود تا توزیع تصادفی تعداد کل بیماران در آی‌سی‌یو و در بخش‌های بستری به‌دست آید. به‌منظور خلاصه‌سازی، مجموعه‌های به‌کاررفته در پژوهش در قالب جدول ۱ بیان شده است.

در اینجا با توجه به تعریف مجموعه‌های مدل، پارامترهای موجود در آن تعریف خواهد شد.

$a_j(p)$: احتمال اینکه $p \in \{0, \dots, P_j\}$ بیمار در طول یک بلوک جراحی توسط جراح j عمل شوند.

b_j : احتمال اینکه بیمار جراح j پس از عمل جراحی در آی‌سی‌یو بستری شود، در نتیجه $1 - b_j$ ، احتمال اینکه بیمار جراح j پس از عمل جراحی در بخش بستری شود، خواهد بود.

$c_j^I(n)$: احتمال اینکه یک بیمار جراح j پس از جراحی $n \in \{1, \dots, N_j^I\}$ روز در آی‌سی‌یو بماند.

$c_j^{WO}(n)$: احتمال اینکه یک بیمار جراح j پس از جراحی $n \in \{1, \dots, N_j^{WO}\}$ روز در بخش بماند.

$c_j^{WI}(u)$: احتمال اینکه یک بیمار جراح j پس از ترخیص از آی‌سی‌یو $u \in \{0, \dots, N_j^{WI}\}$ روز در بخش بماند، تعریف می‌شوند. صفر روز ماندن نشان‌دهنده این است که بیمار بلافاصله از آی‌سی‌یو ترخیص می‌شود.

مدت‌زمان جراحی و ریکاوری بیماران را در شبیه‌سازی منظور کردند [۷]. خطیابی و همکاران به شناسایی و رتبه‌بندی علل بروز وقفه در جراحی لاپاراسکوپی براساس شناسایی روابط علی میان این علت‌ها پرداختند. شناسایی این مزایایی نظیر افزایش بهره‌وری از امکانات و منابع اتاق عمل دارد. خطیابی و همکاران پس از استخراج روابط علی بین شاخص‌های مؤثر در وقفه، وزن هر شاخص را به کمک نظرسنجی از خبرگان تعیین، سپس شاخص‌ها را با روش تاپسیس فازی رتبه‌بندی کردند [۸].

فوجنر و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ که پایه پژوهش حاضر است، به زمان‌بندی دوره‌ای بلوکی از جراحان برای تخصص‌های مختلف پرداختند. آن‌ها گستره را به منابع پایین‌دستی مثل واحد مراقبت‌های ویژه و بخش‌های عمومی که بیماران بعد از ترک اتاق عمل به آن احتیاج دارند توسعه دادند، همچنین رویکردی تحلیلی-تصادفی ارائه دادند که توزیع تقاضای دقیق را برای منابع پایین‌دستی در برنامه زمان‌بندی اصلی جراحی مشخص محاسبه، و معیارهایی برای هزینه‌های پایین‌دستی حاصل از برنامه زمان‌بندی اصلی جراحی معرفی می‌کنند. درنهایت نیز، الگوریتم‌های ابتکاری برای کمینه‌سازی این هزینه‌ها ارائه می‌دهند [۹]. در مقاله حاضر، علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌های کمبود تخت در واحدهای مراقبت پایین‌دستی، هزینه‌های خالی‌ماندن تخت‌ها هم در نظر گرفته می‌شود، همچنین برنامه‌ریزی براساس جراحان انجام می‌گیرد که می‌توان فرض کرد بیماران مربوط زمان اقامت با توزیعی تصادفی دارند. نوآوری دیگر پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش فوجنر و همکاران این است که ضمن تغییراتی در طریقه به‌دست‌آوردن برخی احتمالات به‌منظور ساده‌سازی، به‌جای استفاده از واریانس تعداد بیماران در هر دو واحد آی‌سی‌یو و بخش و خطی‌سازی آن، به‌طور مستقیم نیم واریانس مثبت تعداد بیماران در هر روز هفته برای این واحدها به‌کار برده می‌شود.

مسئله زمان‌بندی اعمال جراحی الکتیو با در نظر گرفتن واحدهای مراقبت بعد از عمل

برای تدوین برنامه زمان‌بندی اعمال جراحی الکتیو، ابتدا لازم است علاوه بر تبیین متغیرهای مربوط به زمان‌بندی بلوک‌های جراحی، منابع مورد نیاز به‌عنوان محدودیت‌ها شناسایی شوند. هر بیمار با توجه به نوع بیماری و عمل

جدول ۱. مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$h \in H$	بخش‌ها
$r \in R$	اتاق‌های عمل
$s \in S$	تخصص‌های جراحی
$j \in J$	جراحان
$s \in S_h$	تخصص‌های جراحی مربوط به بخش h
$p \in \{0, \dots, P_j\}$	بیماران
$n \in \{1, \dots, N_j^I\}$	تعداد روزها در آی‌سی‌یو پس از جراحی
$n \in \{1, \dots, N_j^{WO}\}$	تعداد روزها در بخش پس از جراحی
$u \in \{0, \dots, N_j^{WI}\}$	تعداد روزها در بخش پس از آی‌سی‌یو
$l \in L$	روزها در یک دوره برنامه‌ی زمان‌بندی اصلی جراحی
$t \in T$	روزهای کاری هفته در یک دوره برنامه‌ی زمان‌بندی اصلی جراحی
$l \in L/T$	روزهای آخر هفته در یک دوره برنامه‌ی زمان‌بندی اصلی جراحی

$$e_{j,n}^I = b_j \sum_{t=n}^{N_j^I} c_{j,t}^I \quad n \in \{1, \dots, N_j^I\} \quad (1)$$

$$e_{j,n}^{WO} = (1 - b_j) \sum_{t=n}^{N_j^{WO}} c_{j,t}^{WO} \quad n \in \{1, \dots, N_j^{WO}\} \quad (2)$$

$$m \in \{1, \dots, N_j^{WI}\}, n \in \{0, \dots, N_j^{WI}\}$$

$$e_{j,m,n}^{WI} = b_j c_{j,m}^I \sum_{t=n-m}^{N_j^{WI}} c_{j,t}^{WI} \quad (3)$$

$$n = 1$$

$$n \in \{2, \dots, N_j^W\}$$

$$e_{j,n}^W = \begin{cases} e_{j,1}^{WO} \\ e_{j,n}^{WO} + \sum_{m=1}^{n-1} e_{j,m,n}^{WI} \quad \text{در غیر این صورت} \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

آخرین روز ممکن که یک بیمار در آی‌سی‌یو می‌ماند با N_j^I و آخرین روز در بخش با $N_j^W = \max(N_j^{WO}, N_j^I + N_j^{WI})$ نشان داده می‌شود.

حال توزیع‌های احتمالات برای هر روز n و تعداد بیماران ریکواری شده هر جراح z با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ به ترتیب در آی‌سی‌یو و بخش به دست می‌آید. احتمال اینکه از k بیمار جراح z که جراحی داشته‌اند، p بیمار در روز n در آی‌سی‌یو یا بخش بستری باشند، با استفاده از تابع توزیع دو جمله‌ای به صورت زیر تعیین می‌شوند.

توزیع‌های بیماران ریکواری شده بلوک اتاق عمل (مرحله یک)

در این مرحله ابتدا با استفاده از احتمال پذیرش در آی‌سی‌یو و طول تجربی توزیع‌های اقامت، مسیر یک بیمار در بیمارستان تحلیل، سپس از طریق فرمول‌های زیر به ترتیب احتمالات بودن هر بیمار جراح z در آی‌سی‌یو و بخش در n روز پس از جراحی محاسبه می‌شود.

$e_{j,n}^I$: احتمال اینکه بیمار جراح z در روز $n \in \{1, \dots, N_j^I\}$ ام پس از جراحی در آی‌سی‌یو باشد.

$e_{j,n}^{WO}$: احتمال اینکه بیمار جراح z در روز $n \in \{1, \dots, N_j^{WO}\}$ ام پس از جراحی در بخش باشد.

$e_{j,m,n}^{WI}$: احتمال اینکه بیمار جراح z بعد از $m \in \{0, \dots, N_j^{WI}\}$ روز ماندن در آی‌سی‌یو، در روز $n \in \{0, \dots, N_j^{WI}\}$ ام بعد از جراحی در بخش باشد.

$e_{j,n}^W$: احتمال اینکه بیمار جراح z در روز $n \in \{1, \dots, N_j^W\}$ ام در بخش باشد که برابر است با $e_{j,n}^{WO}$.

احتمال اینکه مستقیماً از اتاق عمل به بخش آمده باشد، به علاوه $e_{j,m,n}^{WI}$ ، احتمال اینکه پس از m روز ماندن در آی‌سی‌یو به بخش منتقل شده باشد.

حال با در نظر گرفتن تعاریف بالا هر یک از احتمالات به صورت رابطه‌های ۱ تا ۴ تعریف خواهند شد:

داده‌شده، اگر جراح z به بلوک (r,t) اختصاص یابد، متغیر مقدار $x_{j,t,r}$ مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. رابطه‌های ۹ و ۱۰ توابع توزیع تعداد بیماران تحت مراقبت را در روز l ام یک دوره زمان‌بندی اصلی جراحی به ترتیب در آی‌سی‌یو و بخش که از جراحی‌های انجام‌شده در اتاق عمل r و روز t یک دوره زمان‌بندی اصلی جراحی به‌دست آمده است، بیان می‌کنند.

$$\bar{F}_{r,t,l}^I(p) = \sum_{j \in J} F_{j,MOD(l-t+1,|L|)}^I * \sum_r x_{j,t,r} \quad (9)$$

$r \in R, t \in T, l \in L$

$$\bar{F}_{h,r,t,l}^W(p) = \sum_{j \in J_h} F_{j,MOD(l-t+1,|L|)}^W * \sum_r x_{j,t,r} \quad (10)$$

$h \in H, r \in R, t \in T, l \in L$

که در آن MOD تابع «باقیمانده تقسیم بر» است. در آخر، در رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ توابع توزیع تعداد کل بیماران (همه اتاق‌های عمل) تحت مراقبت در روز l ام یک دوره برنامه زمان‌بندی اصلی جراحی به ترتیب در آی‌سی‌یو و بخش نشان داده شده است. در $|r|=6$ تعداد اتاق‌های عمل و تعداد روزهای کاری هفته را در یک فضای جراحی فعال بیان می‌شود.

$$F_l^I = \bar{F}_{1,1,l}^I * \bar{F}_{1,2,l}^I * \dots * \bar{F}_{sup(R),sup(T),l}^I \quad (11)$$

$l \in L$

$$F_{h,l}^W = \bar{F}_{h,1,1,l}^W * \bar{F}_{h,1,2,l}^W * \dots * \bar{F}_{h,sup(R),sup(T),l}^W \quad (12)$$

$h \in H, l \in L$

حال اگر $E(F_{j,t,l-t+1}^I)$ بیانگر مقادیر مورد انتظار تعداد بیماران جراح z در آی‌سی‌یو در روز l ام دوره و $E(F_{j,t,l-t+1,h}^W)$ بیانگر مقادیر مورد انتظار تعداد بیماران جراح z در بخش بستری مربوط در روز l ام دوره باشند، به ترتیب به کمک روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شوند.

$$E(F_{j,t,l-t+1}^I) = \sum_p p \bar{F}_{r,t,l}^I(p) \quad (13)$$

$j \in J, r \in R, t \in T, l \in L$

$$E(F_{j,t,l-t+1,h}^W) = \sum_p p \bar{F}_{r,t,l}^W(p) \quad (14)$$

$h \in H, j \in J, r \in R, t \in T, l \in L$

$$f_{j,n}^I(p) = \sum_{k=p}^{p_j} \binom{k}{p} (e_{j,n}^I)^p (1-e_{j,n}^I)^{k-p} a_j(k) \quad (5)$$

$$f_{j,n}^W(p) = \sum_{k=p}^{p_j} \binom{k}{p} (e_{j,n}^W)^p (1-e_{j,n}^W)^{k-p} a_j(k) \quad (6)$$

توزیع بیماران ریکاوری‌شده حاصل از زمان‌بندی دوره‌های یک بلوک اتاق عمل (مرحله دو)

از آنجا که برنامه زمان‌بندی MSS دوره‌ای است، هر بلوک در هر دوره تکرار می‌شود؛ زیرا حداکثر زمان ریکاوری بیماران معمولاً از زمان چرخه تجاوز می‌کند، بیمارانی که در دوره‌های دیگر جراحی دارند، ممکن است در همان زمان ریکاوری شوند. تعداد دوره‌هایی که هم‌پوشانی می‌کنند به طول دوره $L=|L|$ و حداکثر طول ماندن N_j^I برای بیماران در آی‌سی‌یو و N_j^W برای بیماران در بخش بستگی دارد. با استفاده از روابط ۷ و ۸ توابع توزیع تعداد بیماران ریکاوری‌شده هر جراح z در روز l ام هفته به ترتیب در آی‌سی‌یو و بخش، که از یک بلوک جراحی دوره‌ای در روز t ام همه دوره‌های قبل و نیز دوره حاضر نتیجه می‌شوند به‌دست می‌آید، البته اگر جراح z در روز t ام بیمار خود را جراحی کرده باشد.

$$F_{j,t,l}^I(p) = \sum_{\sum p_j=p} f_{j,l-t+1}^I(p_0) * f_{j,l-t+1+|L|}^I(p_0) * \dots * f_{j,l-t+1+|L|}^I \left(\binom{N_j^I/|L|}{p} \right) \quad (7)$$

$$F_{j,t,l}^W(p) = \sum_{\sum p_j=p} f_{j,l-t+1}^W(p_0) * f_{j,l-t+1+|L|}^W(p_0) * \dots * f_{j,l-t+1+|L|}^W \left(\binom{N_j^W/|L|}{p} \right) \quad (8)$$

تعیین توزیع بیماران حاصل از زمان‌بندی دوره‌های تمام بلوک‌ها (مرحله سه)

برای محاسبه یک دوره زمان‌بندی اصلی جراحی، توزیع‌های بیماران که از هر بلوک r (اتاق عمل) و t (روز کاری) نتیجه می‌شود به‌دست می‌آید. برای یک زمان‌بندی اصلی جراحی

$$SD(F_l^I) = \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} SD^+(F_{j,t,l}^I) \sum_{r \in R} x_{j,t,r}, l \in L \quad (23)$$

$$SD(F_{l,h}^W) = \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} SD^+(F_{j,t,l,h}^W) \sum_{r \in R} x_{j,t,r} \quad (24)$$

$$h \in H, l \in L \quad (24)$$

$$E(F_l^I) + z^{cap,I} SD(F_l^I) + Gn_l^I - Gp_l^I = cap_l^I, l \in L \quad (25)$$

$$E(F_{l,h}^W) + z^{cap,W} SD(F_{l,h}^W) + Gn_{l,h}^W - Gp_{l,h}^W = cap_h^W, h \in H, l \in L \quad (26)$$

$$x_{j,t,r} \in \{0,1\} \quad j \in J, t \in T, r \in R \quad (27)$$

$$Gn_l^I, Gp_l^I, Gn_{l,h}^W, Gp_{l,h}^W \geq 0, h \in H, l \in L \quad (28)$$

که در آن‌ها $Gn_{l,h}^W$ و Gn_l^I به ترتیب انحراف منفی از ظرفیت آی‌سی‌یو و بخش، و $Gp_{l,h}^W$ و Gp_l^I به ترتیب انحراف مثبت از ظرفیت آی‌سی‌یو و بخش هستند، همچنین Cn_h^W و Cn^I به ترتیب هزینه خالی ماندن تخت در آی‌سی‌یو و بخش و Cp_h^W و Cp^I به ترتیب هزینه کمبود ظرفیت برای آی‌سی‌یو و بخش است. رابطه ۱۷، به عنوان تابع هدف برای کمینه‌سازی انحرافات مثبت و منفی از ظرفیت‌هاست؛ یعنی در بهینه‌سازی مسئله تلاش می‌شود تخت‌ها در واحدهای پایین‌دستی خالی نماند و هم‌زمان بیمار بیشتر از ظرفیت این واحدها هم بستری نشود.

در محدودیت ۱۸ می‌بینیم برای هر بلوک جراحی حداکثر یک جراح در نظر گرفته می‌شود. محدودیت ۱۹ برای تأمین تعداد بلوک جراحی در نظر گرفته شده متناسب با تقاضا برای هر جراح d_j ، با توجه به تعداد بلوک جراحی تعیین شده در سطح راهبردی است. در $N_{t,j}$ می‌بینیم که آیا جراح j در روز t برای جراحی حضور دارد یا خیر و امکان تخصیص بلوک به هر جراح در هر روز به کمک محدودیت ۲۰ کنترل می‌شود؟ محدودیت ۲۱ مقادیر مورد انتظار را برای تعداد بیماران در آی‌سی‌یو برای هر روز تعیین می‌کند. به طور مشابه، در محدودیت ۲۲ این مقادیر برای هر بخش به دست می‌آید. در محدودیت‌های ۲۳ و ۲۴ نیم‌انحراف معیار مثبت تعداد بیماران در روز l برای آی‌سی‌یو و بخش تعیین می‌شود. برای تعیین ظرفیت‌های مورد نیاز در هر یک از واحدهای پایین‌دستی از محدودیت‌های ۲۵ و ۲۶ استفاده

همچنین اگر $SD^+(F_{j,t,l}^I)$ نیم‌انحراف معیار مثبت تعداد بیماران جراح j در آی‌سی‌یو در روز l ام دوره و $SD^+(F_{j,t,l,h}^W)$ نیم‌انحراف معیار مثبت تعداد بیماران جراح j در بخش بستری مربوط در روز l ام دوره را نشان دهند (...+ ماکزیمم بین مقدار انحراف معیار و صفر است) به ترتیب به کمک روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه‌شدنی هستند.

$$SD^+(F_{j,t,l}^I) = \sum_{p > E(F_{j,t,l-t+l}^I)} (p - E(F_{j,t,l-t+l}^I)) \bar{F}_{r,t,l}^I(p) \quad (15)$$

$$j \in J, r \in R, t \in T, l \in L$$

$$SD^+(F_{j,t,l,h}^W) = \sum_{p > E(F_{j,t,l-t+l,h}^W)} (p - E(F_{j,t,l-t+l,h}^W)) \bar{F}_{h,r,t,l}^W(p) \quad (16)$$

$$h \in H, j \in J, r \in R, t \in T, l \in L$$

در نهایت با در نظر گرفتن $z^{cap,I}$ و $z^{cap,W}$ به ترتیب برای سطوح ظرفیت در آی‌سی‌یو و بخش، مدل پیشنهادی عبارت است از:

$$Min C(x) = \sum_l Gn_l^I Cn^I + Gp_l^I Cp^I + \sum_l \sum_h Gn_{l,h}^W Cn_h^W + Gp_{l,h}^W Cp_h^W \quad (17)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in J} x_{j,t,r} \leq 1, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{j,t,r} \geq d_j, j \in J \quad (19)$$

$$\sum_{r \in R} x_{j,t,r} \leq N_{tj}, t \in T, j \in J \quad (20)$$

$$E(F_l^I) = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{t=1}^l E(F_{j,t,l-t+1}^I) x_{j,t,r} + \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{t=1+L}^L E(F_{j,t,l-t+1+L}^I) x_{j,t,r}, l \in L \quad (21)$$

$$E(F_{l,h}^W) = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{t=1}^l E(F_{j,t,l-t+1,h}^W) x_{j,t,r} + \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{t=1+L}^L E(F_{j,t,l-t+1+L,h}^W) x_{j,t,r}, l \in L, h \in H \quad (22)$$

در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. مدل برنامه ریزی آرمانی با متغیرهای صحیح پیشنهادی در این مطالعه، به کمک نرم افزار GAMS 24.1.2 با حل کننده Couenne حل شد. مقادیر متغیرهای زمان بندی برای دو مثال در جداول ۴ و ۷ داده شده است. جداول ۵ و ۶ مقادیر کمبود و خالی ماندن تخت در بخش های مختلف را در روزهای گوناگون به تفکیک روزهای مختلف هفته منتج از زمان بندی حاصل از مثال ۱ نشان می دهند. جدول ۸ نیز مقدار تابع هدف، زمان حل، تعداد محدودیت ها و تعداد متغیرهای دو مدل را نشان می دهد.

جدول ۲. هزینه های مربوط به آی سی یو

کمبود تخت	۳۰
بیکاری	۱۰

جدول ۳. هزینه های مربوط به هر بخش

تخصص	قلب	اعصاب زنان و زایمان	ارتوپدی	اطفال
کمبود تخت	۲۰	۲۲	۱۸	۲۴
بیکاری	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

جدول ۴. زمان بندی به دست آمده برای جراحان در مثال ۱

روز	۱	۲	۳	۴	۵	۶
شنبه	۱۰	۲۰	۱۷	۱	۱۵	۵
یکشنبه	۱۰	۲	۳	۱۸	۷	۶
دوشنبه	۵	۱۶	۶	۱۹	۸	۱۴
سه شنبه	۱	۴	۸	۱۱	۹	۱۲
چهارشنبه	۷	۱۵	۱۲	۱۴	۱۳	۲۰

جدول ۵. میزان کمبود در هر واحد به تفکیک روزها

روز	واحد	آی سی یو	بخش یک	بخش دو	بخش سه	بخش چهار	بخش پنج
شنبه	-	-	-	-	-	۱/۱۷۶	-
یکشنبه	-	-	-	-	-	-	-
دوشنبه	۰/۶۰۳	-	-	-	۰/۳۵۵	۱/۹۷۵	۰/۹۹۸
سه شنبه	۲/۵۳۲	۴/۲	۲/۳۰۳	۵/۹۴۳	۰/۰۰۸	-	-
چهارشنبه	۳/۸۲۳	۱/۱۷۳	۲/۴۸۵	۱۶/۳۸۱	۳/۵۵۵	۳/۵۹۶	-
پنجشنبه	۱/۲۵۵	-	-	-	۱۲/۱۸۴	۰/۷۵۲	۱/۸۲۵
هزینه یک بیمار	۱۰	۱۲	۱۱	۱۰	۱۱	۱۲	۸
ظرفیت	۸	۱۰	۱۱	۹	۹	۸	۱۲

می شود. محدودیت ۲۷ نیز بر صفر و یک بودن متغیر مسئله، و محدودیت ۲۸ بر نامنفی بودن انحرافات تأکید دارد. متغیرهای تصمیم دوتایی مدل برابر حاصل ضرب تعداد جراحان در تعداد روزهای کاری هفته در تعداد اتاق های عمل و تعداد متغیرهای کمکی و پیوسته متناسب با این حاصل ضرب هستند. تعداد محدودیت های مدل متناسب با حاصل ضرب تعداد جراحان در تعداد روزهای کاری هفته و حاصل ضرب تعداد بخش های بستری در تعداد روزهای هفته خواهد بود. با ساده سازی تابع هدف اصلی مسئله (توزیع تجمعی تعداد بیماران) به انحرافات غیرمطلوب از مجموع متوسط تعداد بیماران و نیم انحراف معیار مثبت، پیچیدگی موجود در مدل حذف و مدل را می توان به طور دقیق با نرم افزارهای مناسب حل کرد.

نتایج محاسباتی

در مثال های موردی یک و دو، تعداد اتاق های عمل موجود شش است که از لحاظ تجهیزات و منابع موجود یکسان در نظر گرفته شده است. در مورد واحدهای مراقبت پایین دستی، دو بخش مراقبت های ویژه و بخش بستری در نظر گرفته شده است. تعداد آی سی یو نیز یک است و برای هر تخصص یک بخش جداگانه برای بستری وجود دارد. در مثال مورد نظر پنج تخصص شامل قلب، اعصاب، زنان و زایمان، ارتوپدی و اطفال موجود است، همچنین به پنج بخش بستری احتیاج، و تعداد جراحان هم بیست نفر است. تفاوت این دو مثال در میزان هزینه های کمبود و بیکاری و ظرفیت هریک از واحدهای پایین دستی است که

جدول ۶. میزان بیکاری در هر واحد به تفکیک روزها

روز	واحد	آی سی یو	بخش یک	بخش دو	بخش سه	بخش چهار	بخش پنج
شنبه		۳/۸۳۱	۴/۷۲۲	۱۱	۵/۲۷۶	-	۵/۹۵
یکشنبه		۰/۹۲۹	۰/۸۴	۴/۸۲۸	۲/۱۹۱	۱/۰۳۷	۱/۵۷۹
دوشنبه		-	۰/۱۸۴	۰/۳۵۴	-	-	-
سه‌شنبه		-	-	-	-	-	۰/۲۴۶
چهارشنبه		-	-	-	-	-	-
پنج‌شنبه		-	۰/۵۲۴	۰/۳۷۷	-	-	-
هزینه یک بیمار	۳۰	۱۷	۱۵	۱۵	۱۵	۱۶	۱۵
ظرفیت	۸	۱۰	۱۱	۹	۹	۸	۸

جدول ۷. زمان بندی به دست آمده برای جراحان در مثال ۲

روز	جراحان	۱	۲	۳	۴	۵	۶
شنبه	۲۰	۵	۱۱	۱۷	۱۳	۱۰	۱۰
یکشنبه	۱۵	۸	۶	۱۸	۴	۷	۷
دوشنبه	۱۶	۲۰	۱	۶	۵	۱۴	۱۴
سه‌شنبه	۱	۸	۷	۱۲	۹	۳	۳
چهارشنبه	۱۹	۱۲	۱۵	۱۴	۲	۱۰	۱۰

جدول ۸. نتایج و زمان حل مسئله

مثال	مقدار تابع هدف	زمان حل	تعداد محدودیت‌های ایجاد شده	تعداد متغیرهای ایجاد شده
۱	۱۴۴۵/۷۸۲	۰:۰:۱۴:۳۰۷	۲۵۹	۷۴۵
۲	۲۰۸۰/۱۴۱	۰:۰:۱۴:۹۵۷	۲۵۹	۷۴۵

در مثال ۲، تمام هزینه حاصل مربوط به بخش آی سی یو به دلیل بیکاری است. در واقع، در آی سی یو کمبود ظرفیت برای بستری بیمار و در بخش نیز، در تمامی تخصص‌ها به جز تخصص زنان و زایمان در روزهای ۴، ۵ و ۶ هزینه کمبود ظرفیت وجود ندارد. در مجموع، ۹۶۳/۱۸۵۶ واحد از هزینه کل، به هزینه بیکاری واحدهای پایین دستی و ۲۲۳/۱۷۸ واحد به هزینه کمبود ظرفیت برای این واحدها مربوط است.

تعیین شده است. نتایج حاصل از حل این مثال‌ها در جدول ۹ خلاصه مشاهده می‌شود.

هزینه کل حاصل در مثال‌های ۳ تا ۸ نشئت گرفته از هزینه بیکاری واحدهای پایین دستی است. کاهش تعداد بخش‌ها در مثال‌های ۹ و ۱۰ سبب افزایش هزینه‌های کمبود ظرفیت در واحدهای پایین دستی شده است. در مثال ۱۲ با توجه به افزایش اتاق‌های عمل و تعداد بلوک‌های در نظر گرفته شده برای جراحان، هزینه‌های کمبود ظرفیت در واحدهای پایین دستی از هزینه بیکاری در این واحدها بیشتر شده است، اما در مثال ۱۱ افزایش تعداد اتاق‌های عمل به‌تنهایی و با در نظر گرفتن بلوک‌های بیشتر برای جراحان، سبب تکرار نتیجه حاصل شده در مثال ۱۲ نشده است. در مثال ۱۳ نیز با کاهش تعداد اتاق‌های عمل و بلوک‌های تخصیص داده شده به جراحان، هزینه بیکاری در این واحدها از هزینه‌های کمبود ظرفیت بیشتر شده است.

بررسی اثر تغییرات پارامترها در مدل براساس مثال دو از طریق تغییر در پارامترهای تعداد روزهای اقامت بیماران در آی سی یو و بخش (مثال‌های ۳ الی ۸)، تعداد تخصص‌ها (مثال‌های ۹ و ۱۰) و تعداد اتاق‌ها (مثال‌های ۱۱ تا ۱۳) مثال‌های مختلفی ساخته و تأثیر این تغییرات بر مقدار تابع هدف بررسی شد. میزان تغییرات فوق هدفمند بوده و برای نشان دادن تأثیر بر مقدار هدف، و به صورت سعی و خطا

جدول ۹. نتایج حاصل از تغییرات پارامترها در مدل

شماره مثال	مقدار تابع هدف	زمان حل	تعداد محدودیت‌های ایجاد شده	تعداد متغیرهای ایجاد شده
۳	۲۴۱۷/۳۱۲	۰:۰:۱۳:۰۵۶	۲۵۹	۷۴۵
۴	۲۶۰۱/۴۴۴	۰:۰:۰۸:۸۸۷	۲۵۹	۷۴۵
۵	۲۱۴۹/۷	۰:۰:۱۳:۲۸۹	۲۵۹	۷۴۵
۶	۴۱۴۸/۲۴۵	۰:۰:۱۲:۹۰۴	۲۵۹	۷۴۵
۷	۲۴۷۲/۵۹۷	۰:۰:۱۲:۷۸۹	۲۵۹	۷۴۵
۸	۴۷۲۶/۲۷۶	۰:۰:۰۷:۷۸۱	۲۵۹	۷۴۵
۹	۴۹۸۷/۰۷۵	۰:۰:۱۰:۱۵۷	۲۴۱	۷۲۱
۱۰	۲۵۶۰/۱۶۱	۰:۰:۱۴:۵۳۹	۲۲۳	۶۹۷
۱۱	۱۹۰۶/۴۰۲	۰:۰:۱۴:۵۵۵	۲۶۹	۹۴۵
۱۲	۲۶۰۶/۷۰۴	۰:۰:۱۴:۲۹۳	۲۲۳	۶۹۷
۱۳	۲۸۴۱/۲۷۵	۰:۰:۱۴:۰۴۳	۲۴۹	۵۴۵

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی برای زمان‌بندی اتاق عمل با در نظر گرفتن زمان‌های تصادفی برای زمان‌های اقامت بیماران در واحدهای مراقبت پایین‌دستی (واحد مراقبت‌های ویژه و بخش بستری) به منظور حداقل کردن هزینه‌های کمبود و خالی ماندن تخت‌ها توسعه یافت. تفاوت مدل با مدل‌های مشابه [۹]. در محاسبه مؤثرتر توزیع‌های تصادفی و دیگری در منظور کردن هر دو معیار کمبود و بیکاری ظرفیت‌هاست. برای عملی کردن حل، از مقادیر متوسط تعداد بیماران به همراه نیم‌انحراف معیار مثبت استفاده شد. اعتبار مدل برای دو مثال حل و نتایج تشریح، سپس با ایجاد تغییرات در چهار پارامتر تعداد روزهای اقامت بیماران در آی‌سی‌یو و بخش، تعداد تخصص‌ها و تعداد اتاق‌ها، مثال‌هایی برای اجرای مدل ساخته شد. در دسته اول مثال‌ها، با انتخاب مناسب هزینه‌ها، کمبود ظرفیت در واحدهای پایین‌دستی اهمیت بیشتری دارد (و مدل نیز به همین نتیجه دست یافته است). کاهش تعداد بخش‌ها در مثال‌های دسته دوم به افزایش هزینه‌های کمبود ظرفیت در واحدهای پایین‌دستی منجر شده است. در مثال‌های دسته سوم، در صورت افزایش اتاق‌های عمل و تعداد بلوک‌های تخصیص داده شده به جراحان و در نتیجه افزایش عمل‌های جراحی و مراجعات به واحد پایین‌دستی نظیر واحد آی‌سی‌یو و بخش‌ها، هزینه‌های کمبود ظرفیت در واحدهای پایین‌دستی از هزینه

بیکاری در این واحدها بیشتر شده است. در مثال‌های دسته چهارم، با توجه به محدودیت ظرفیت و حداقل بلوک تخصیص یافته به پزشکان توسط هیئت‌مدیره، جواب حاصل به سمت کمبود ظرفیت سوق یافته است.

اجرای این مدل در یک بیمارستان ممکن است به برنامه‌ریزان بخش جراحی، دیدی کلی درباره شرایط موجود بدهد. در واقع، با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان با توجه به سطح خدمت مورد نظر و دلخواه تصمیم‌گیرنده (تصمیم‌گیرندگان) برای استفاده از ظرفیت واحدهای مراقبت پایین‌دستی و محدودیت امکانات مانند تعداد اتاق‌های عمل و هزینه آماده‌سازی اتاق‌ها برای هر عمل جراحی و مدت‌زمان احتمالی انجام هر عمل به بالاترین کارایی دست یافت. از سوی دیگر هنگام تصمیم‌گیری برای برنامه‌های توسعه‌ای بخش، این مدل اطلاعات مفیدی برای نشان دادن اهمیت بخش‌های مختلف جراحی و میزان تأثیری که این برنامه‌ها در رسیدن به هدف نهایی دارند به تصمیم‌گیرندگان این بخش ارائه دهد که این هدف نهایی همان حداقل هزینه‌های اضافه بر ظرفیت و کمتر از ظرفیت واحدهای مراقبت پایین‌دستی است. در نهایت به کاربردن این مدل با ملاحظاتی که تصمیم‌گیرندگان همواره با آن مواجه هستند، سبب بهبود فرایند تصمیم‌گیری در بخش بسیار مهم سلامت و به خصوص بخش اعمال جراحی می‌شود.

منابع

1. Cardeon, B., Demeulemeester, E. and Belien, J. (2010). "Operating room planning and scheduling", A literature review. *European Journal of Operational Research*, Vol. 201, No. 3, PP. 921-932.
2. Min, D. and Yih, Y. (2010). "Scheduling elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 206, No. 3, PP. 642-652.
3. Hans, E.W., van Houdenhoven, M., and Hulshof, P.J.H. (2011). "A framework for health care planning and control", In R. Hall (ED), *Handbook of health care systems scheduling, Springer international series in operations research and management science*, Vol. 168, PP. 303-320, New York: Springer.
4. Van Oostrum, J.M. et al., (2008). "A master surgery scheduling approach for cyclic scheduling in operating room departments", *OR Spectrum*, Vol. 30, No. 2, PP. 355-374.
5. Carter, M. and Ketabi, S. (2013). "Bed Balancing in Surgical Wards via Block Scheduling", *Journal of Minimally Invasive Surgical Sciences*. Vol. 2, No. 2, PP. 129-137.
6. Wang, Y. (2014). "Particle swarm optimization-based planning and scheduling for a laminar-flow operating room with downstream resource", *Soft Computing*, Vol. 19, No. 10, PP. 2913-2926.
7. Eskandari H. and Bahrami M. (2017). "Multi-Objective Operating Room Scheduling Using Simulation-based Optimization", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 51, No. 1, PP. 1-13.
8. Khatibi T., et al., (2015), "Prioritizing interrupt causes in minimally-invasive surgeries based on identifying causal relations between interrupt causes", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 49, No. 1, PP. 33-43.
9. Fugener, A., et al., (2014). "Master Surgery scheduling with consideration of multiple downstream units", *European Journal of Operational Research.*, Vol. 239, No. 1, PP. 227-236.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Surgical Department
2. Scheduling
3. Operating Room (OR)
4. Recovery room
5. Intensive Care Unit (ICU)
6. Block-Booking
7. Block
8. Master Surgery Scheduling (MSS)