

زمان‌بندی گردش شغلی در سیستم تولید تازه‌آرایش یافته به صورت سلول تولید ناب با رویکرد الگوریتم ژنتیک

اشکان عیوق*، مصطفی زندیه**، حسن فارس‌جانی***،

بهرز درّی****

چکیده

بسیاری از سیستم‌های تولید با تغییر چیدمان و به‌کارگیری اصول اولیه عملیاتی به‌شکل سلولی تغییر‌آرایش می‌یابند و در مرحله تبدیل به سلول تولید ناب قرار می‌گیرند. بهبود عملکرد سلول‌های تازه‌استقرار یافته به تخصیص مطلوب کارکنان به سلول و عملکرد مناسب آنان وابسته است. در این راستا، مقاله حاضر با تأکید بر اهمیت جنبه‌های انسانی و ضرورت گردش شغلی در سلول‌های تولید ناب، خستگی ناشی از تکرار وظایف در قالب سیکل‌های کاری متعدد را برای محیط سلول تولید ناب مفهوم‌سازی و مدل برنامه‌ریزی غیرخطی از سیستم سلول تولید ناب را طراحی کرده است. این مدل بهترین ترکیب از کارکنان معمولاً تک‌مهارته در سیستم تولید کنونی برای تخصیص به سلول مشخص و برنامه گردش شغلی آن‌ها طی افق برنامه‌ریزی هفتگی را تعیین می‌کند؛ به طوری که اهداف چندگانه عملکرد ناب محقق شود. با توجه به قرار گرفتن مسئله در زمره مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی و پیچیدگی الگوریتمی آن، هیچ‌یک از بسته‌های بهینه‌سازی معتبر در دسترس، مانند لینگو ۱۰ و گمز، نتوانستند جواب‌های موجه را ارائه دهند؛ بنابراین، مدل تحقیق با توسعه الگوریتم ژنتیک تحلیل شده است.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی گردش شغلی؛ خستگی؛ سلول تولید ناب یوشکل؛ برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی؛ الگوریتم ژنتیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۶/۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۹/۱۲.

* استادیار، مرکز مطالعات مدیریت ایران (نویسنده مسئول).

E-mail: Ayough@ICMS.ac.ir

** دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی.

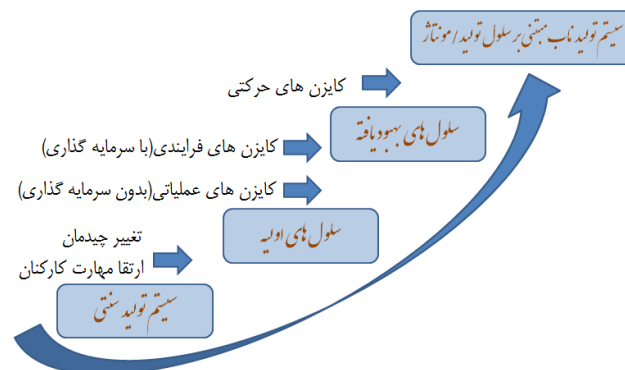
*** دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی.

**** دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی.

۱. مقدمه

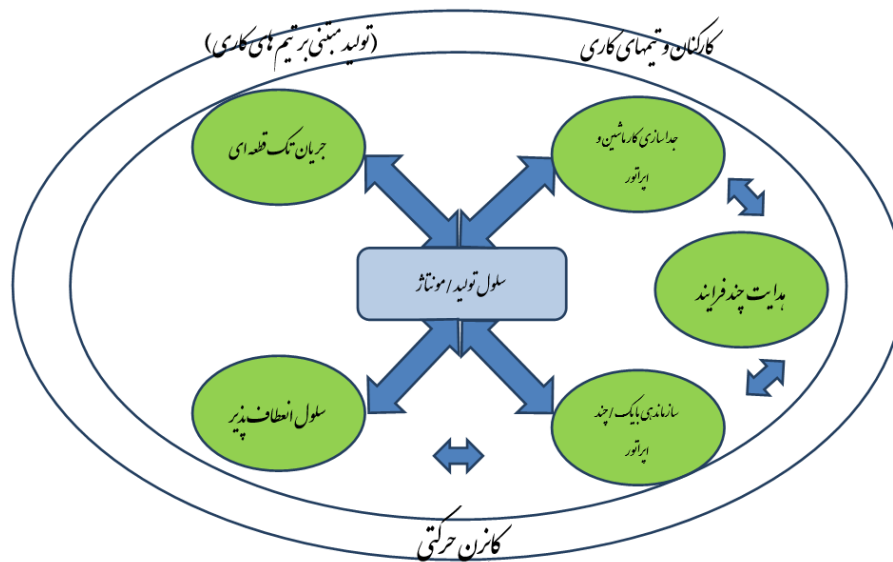
ویدیک (۲۰۰۸) در تز دکتری خود اشاره کرده است که تخصیص فرد به وظیفه یا ایستگاه کاری بر مبنای پویایی عملکرد فرد طی زمان انجام وظایف چندان بررسی نشده است [۳]. همچنین، در نظر گرفتن ابعاد انسانی در تحول سیستم‌های تولید و تبدیل آن‌ها به سیستم‌های متشکل از سلول‌های ناب ضروری است [۱۸]. در محیط ناب، سلول‌ها ماهیت بازمتعالی سازی دارند که به تطابق بیشتر با تقاضای مشتری بستگی دارد. همچنین، هدایت چندفرآیندی، افزایش سطح مهارت و توانایی حل مسئله در این محیط از اصول اساسی به‌شمار می‌آیند. به این ترتیب، گردش شغلی در سلول‌های تولیدی به‌کار می‌رود و برای تشریح عملکرد سلول ناب به بهترین نحو، باید ساختار مسئله متعالی سازی با تأکید بر مشخصه انسان و تأثیرپذیری او از محیط بازتعریف شود. همچنین، طبق الزامات محیط ناب، باید متعالی سازی ایستا به متعالی سازی پویا تبدیل شود. در این تحقیق، چگونگی سازماندهی سلول تازه‌استقرار یافته یا تخصیص افراد به سلول بررسی می‌شود. در ادامه، ابتدا مسئله در قالب شکل بیان و مفاهیم مرتبط با آن مطرح می‌شود، سپس ادبیات موضوع بررسی و در نهایت مدل تحقیق و روش حل آن به تفصیل بیان خواهد شد.

بیان مسئله. ناب شدن سیستم تولید تنها بخشی از فرآیند ناب شدن است که در آن مجموعه‌ای از اقدامات در قالب انواع کایزن‌های عملیاتی، فرآیندی و حرکتی در راستای تحول سیستم تولید سنتی صورت می‌گیرد. مبنای این تحول تشکیل سلول‌های اولیه ناب است. شکل ۱ سیر تحول سیستم تولید سنتی به سیستم تولید ناب بر اساس کایزن‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱: سیر تحول سیستم تولید سنتی به سیستم تولید ناب

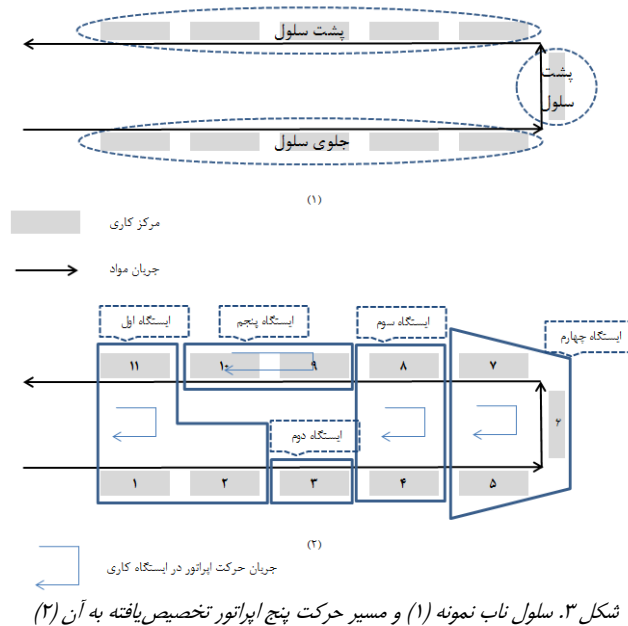
تعیین ترکیبی از کارکنان شاغل در سیستم تولید قبل از تشکیل سلول‌ها که باید در سلول‌ها و با خواسته‌های جدید کار کنند و عملیاتی کردن سلول‌ها از بحرانی‌ترین مراحل تحول سیستم تولید ناب به‌شمار می‌روند. این خواسته‌های جدید همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، اصول تولید ناب هستند که در سلول ناب متبلور می‌شوند.



شکل ۲. اصول تولید ناب در سلول ناب

در سلول یوشکل ماشین‌های از نظر کارکردی متفاوت به ترتیبی که عملیات تولید خانواده محصولات صورت می‌گیرد، روی یک خط یوماند چیده می‌شوند. جریان درون سلول تک‌قطعه است؛ یعنی اپراتور روی هر ماشین تخصیص یافته به خود، با اندازه انباشته یک کار می‌کند و در هر لحظه تنها یک واحد از موجودی در جریان پردازش میان هردو ماشین مجاور وجود دارد. به این ترتیب، اگر مشکلی در ماشین یا محصول به‌وجود آید، امکان متوقف کردن عملیات سلول وجود دارد. همچنین، اپراتور منتظر پایان عملیات ماشین نمی‌ماند و ماشین در حال عملیات را به حال خود می‌گذارد و به مرکز کاری دیگر برای انجام عملیات می‌رود؛ بنابراین، جداسازی کار ماشین و اپراتور محقق می‌شود. هدایت چندفرآیندی در این تحقیق به تخصیص چند مرکز کاری به اپراتور محدود است. انعطاف‌پذیری سلول به سطح چندمهارته شدن اپراتورها اشاره دارد که به هماهنگی بیشتر سلول با سرعت تقاضای مشتری منجر می‌شود. این کار با اضافه یا کم شدن تعداد اپراتورها به سلول صورت می‌گیرد. شکل ۱-۳ یک سلول یوشکل نمونه را نشان می‌دهد. در

این تحقیق، جناحی از سلول که به آن جریان مواد ورود پیدا می‌کند جلوی سلول و جناح دیگر پشت سلول در نظر گرفته می‌شود. همچنین، اگر تعداد مراکز کاری فرد باشد، مرکز مستقر بین دو جناح سلول جزو جلوی سلول در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲-۳ پنج ایستگاه کاری را که در اثر تخصیص پنج نفر به سلول ایجاد شده است، نشان می‌دهد. در این تحقیق، مسیر حرکت اپراتورها عکس جریان مواد و قطعات طراحی می‌شود [۶]. به چهار روش کلی زیر حرکت اپراتورها در سلول طرح‌ریزی می‌شود: حالت تعقیبی^۱، تعیین ناحیه^۲ یا ایستگاه کاری ثابت، حالت ترکیبی تعقیبی - منطقه‌ای (ایستگاهی) و گردش شغلی در منطقه متغیر.



اگر اپراتورها در همه عملیات سلول مهارت کافی نداشته نباشند، از حالت گردش شغلی در ایستگاه متغیر استفاده می‌شود؛ به این صورت که در هر دوره گردش به هر اپراتور مجموعه‌ای از عملیات تخصیص می‌یابد. برای نمونه، ممکن است به اپراتور ایستگاه اول در شکل ۲-۳، در دوره گردش بعدی مراکز کاری دیگری غیر از مراکز شماره ۱، ۲ و ۱۱ تخصیص یابد. عملکرد کلی سلول و عملکرد فرد از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده ایستگاه‌های کاری در هر دوره گردش هستند. در این تحقیق، می‌خواهیم شکل‌گیری یک سلول اولیه ناب در سیستم‌های سنتی را

1. Chase mode
2. Fixed zone(station)- based mode

از دیدگاه برنامه‌ریزی عملیاتی آن مطالعه کنیم. مدل این تحقیق از میان افراد موجود که از سطح مهارت کامل بهره‌مند نیستند، تعدادی را برمی‌گزیند و به سلول در دوره‌های گردش مختلف تخصیص می‌دهد؛ به طوری که عملکرد سلول بهینه شود. عملکرد سلول و فرد در این تحقیق دارای تأثیرات دوطرفه هستند و به همین دلیل رفتار انسان در مدل فرموله خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

نخستین بار هوانگ (۱۹۹۹) در تز دکتری خود، سازماندهی مجدد خطوط تولید جریان تکراری را به منظور ارتقای سطح انعطاف‌پذیری از طریق تخصیص و آموزش تیم‌های کاری چندمهارته مطالعه کرد [۸]. کانان و جنسن (۲۰۰۴) اشاره داشته‌اند که در محیط سلولی، پویایی عملکرد فرد موجب تغییرات جدی در عملکرد سلول می‌شود [۱۰]. در مطالعه نمبهارد و اوسوسسیلپ (۲۰۰۵) سیاست انتخاب اپراتورها برای دو نوع وظیفه با درجه پیچیدگی متفاوت، آزموده شد [۱۹]. نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌وری دو سیستم تحت بررسی با به‌کارگیری سیاست انتخاب مبتنی بر یادگیری و فراموشی (LFBS^۱) بهتر از بهره‌وری با به‌کارگیری سیاست انتخاب تصادفی است. ناکاده و نیشیواکی (۲۰۰۸) برای اولین بار تخصیص نیروی انسانی نامتجانس به سلول تولید یوشکل را با فعالیت‌های خودکار (ماشینی) مطالعه کردند [۱۷]. برای اولین بار نیز دکتر شوچاک لزوم مطالعه مسئله تخصیص نیروی انسانی به سلول‌های تولیدی و تفاوت آن با مسائل متعادل‌سازی سلول را مطرح کرد. تفاوت اساسی مسئله تخصیص به سلول شوچاک (۲۰۰۸) و مسئله تخصیص مبتنی بر انتخاب ناکاده و نیشیواکی (۲۰۰۸) در فرض درمورد تجانس نیروی انسانی است. شوچاک (۲۰۰۸) با ملاحظه خصوصیات و ضرورت‌های سلول تولید ناب، به‌خصوص اصل هدایت چند ماشین توسط یک اپراتور و همچنین تثبیت محل استقرار ماشین‌آلات روی خط یوشکل پس از طراحی اولیه سلول، مسئله تخصیص اپراتور به سلول یوشکل را به‌عنوان جایگزین مسئله متعادل‌سازی سلول یوشکل مطرح کرد. شوچاک (۲۰۰۸) با توجه به ارجحیت اپراتور بر ماشین و تأکید بر بهره‌برداری کامل از اپراتور^۲ در محیط ناب، تابع هدف مدل خود را پیشینه‌سازی سطح کار کامل^۳ در نظر گرفته است [۲۴]. لدری و همکاران (۲۰۰۹) در مقاله مروری خود، درمورد لزوم ملاحظه مشخصه‌های انسانی در مسائل تخصیص بحث کرده است که از مهم‌ترین آن‌ها اثرات یادگیری، فراموشی، مهارت و خستگی است [۱۲]. مک دونالد و همکاران (۲۰۰۹) در محیط سلول تولیدی، عملکرد سلول را که در آن سطح مهارت اپراتورها برای انجام فعالیت‌های مختلف متفاوت در نظر گرفته شده و همچنین هر فعالیت به سطح مهارت خاصی نیازمند است، ارزیابی

1. Learning-Forgetting Based Selection (LFBS)

2. Fully Utilized Workers

3. Full Work level Maximization

کردند [۱۳]. تنها مطالعه مرتبط با موضوع گردش شغلی در سلول‌های تولیدی، تحقیق این پژوهشگران است که در آن اپراتورها از این نظر که دارای سطح مهارت مختلف هستند، نامتجانس فرض شده‌اند. مدل ارائه‌شده توسط مک دونالد و همکاران بیشتر به ارتقای سطح مهارت اپراتورهای سلول‌های شکل معطوف بوده است؛ در نتیجه تطابق افق برنامه‌ریزی در آن با افق موردنظر در مدل‌هایی که ماهیت بازمتعادلسازی سلول‌های تولیدی ناب و پویایی‌های رفتار انسان را پوشش می‌دهند، اندک است.

احمد در تحقیق دیگری (۲۰۱۲)، عملکرد سلول ناب را مطالعه کرده است. او با رویکرد سیستم دینامیک شریط عدم اطمینان ناشی از تغییرات تقاضا و دسترسی به ماشین‌آلات در سلول را بررسی و شاخص کمبود را به‌عنوان معیار عملکرد سلول تجزیه و تحلیل کرده است [۲]. رهاب و احمد (۲۰۱۴) نیز با به‌کارگیری پویایی سیستم، ناب بودن شرکت تولیدی را ارزیابی و پویایی‌های مرتبط با جریان تک‌قطعه‌ای را از طریق تأثیرات زمان تکت تحلیل کرده‌اند [۲۱]. جیون لو و یانگ (۲۰۱۴) تکنیک‌های ناب در سیستم‌ها با سطح خودکارسازی بالا را به‌منظور بررسی تأثیرات تغییرات تقاضا و تغییرپذیری سیستم تولید اجرا کرده و نتیجه گرفته‌اند که توانش مرکز کاری سرعت‌ساز از طریق حل مسئله بافر کار در جریان ساخت بهبود یافته است [۹]. هیچ‌یک از این تحقیقات مشخصه‌های اصلی سلول ناب را در نظر نگرفته‌اند و واحد تحلیل و بررسی عملکرد در آن‌ها سیستم تولید است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق با توجه به استخراج موضوع از ادبیات موضوعی و تصدیق کاربرد صنعتی آن و همچنین ارائه مدل علمی از طریق توسعه و یکپارچه‌سازی مدل‌های کلاسیک موجود و تحلیل جواب‌های مدل با روش‌های بهینه‌سازی، از منظر روش‌شناسی تحقیق کمی در حوزه مدیریت عملیات در زمره تحقیقات بدیهی‌گرای تجویزی قرار داده می‌شود که به تحقق جهت‌گیری توسعه‌ای با رویکرد قیاسی اهتمام دارد.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

مدلسازی

ساختار و پیچیدگی مدل. فرآیند توسعه مدل در این تحقیق در نهایت مدل متعادل‌سازی در سلول یوشکل را به مدل تخصیص پویای چنددوره‌ای نیروی انسانی به سلول یوشکل تبدیل می‌کند که زمان‌بندی گردش شغلی نامیده می‌شود. از آنجا که ساختار مدل تحقیق به‌صورت مدل برنامه‌ریزی غیرخطی صفر و یک تلفیقی از مدل مسائل متعادل‌سازی و تخصیص است و در عین

حال مسئله متعادل‌سازی به‌تنهایی NP-hard است، مسئله زمان‌بندی چندهدفه گردش شغلی در سلول تولید ناب نیز پیچیدگی الگوریتمی دارد و جزو مسائل NP-hard به‌شمار می‌رود. میلتنبرگ (۲۰۰۲)، کارا و همکاران (۲۰۰۷) و شوچاک (۲۰۰۸) به NP-hard بودن مسئله خود اشاره کرده‌اند [۱۴، ۱۱، ۲۴]. همچنین، با توجه به تأثیر فاصله گردش شغلی بر معیارهای عملکردی هدف و درنظر گرفتن اثرات مشخصه‌های انسانی مسئله علاوه‌بر پیچیدگی الگوریتمی، به‌لحاظ ساختاری نیز پیچیدگی دارد.

مفروضات مدل. مفروضات مدل عبارت‌اند از:

۱. قبل از شروع به برنامه‌ریزی براساس سوابق موجود، زمان‌های پردازش هر فرد در هر مرکز کاری تخمین زده شده است که به آن زمان‌های پردازش اولیه هر فرد گفته می‌شود. حداکثر و حداقل زمان پردازش ممکن در هر مرکز کاری نیز مشخص است؛
۲. افق برنامه‌ریزی محدود است و فواصل گردش شغلی طی افق برنامه‌ریزی ثابت و با یکدیگر برابر است؛
۳. سطح انگیزه فرد در ابتدای هر دوره گردش به تکراری بودن وظایف تخصیص‌یافته به او در آن دوره گردش و چند دوره قبل و سطح انگیزش او در پایان دوره گردش بلافاصله قبل بستگی دارد؛
۴. سطح انگیزش فرد در هر دوره گردش طبق الگوی نمایی کاهش می‌یابد؛
۵. ترکیب افراد تخصیص‌یافته به سلول طی افق برنامه‌ریزی ثابت است و با تغییر دوره‌های گردش، تغییر نمی‌کند؛
۶. به هر فرد امکان هدایت چند فرآیند داده می‌شود و هر مرکز کاری در هر دوره گردش فقط توسط یک نفر هدایت می‌شود؛
۷. هر فرد تخصیص‌یافته به سلول، مسیر حرکت دایره‌ای خلاف جریان مواد را دنبال می‌کند؛
۸. در هنگام جابه‌جایی فرد در درون سلول امکان دور زدن اپراتور مشغول به کار دیگر وجود دارد و تقاطع مسیر حین جابه‌جایی ممنوع است؛
۹. برای رفع مشکلات ناشی از عملکرد نامطلوب فرد در سلول، میزان موجودی میان مراکز کاری از قبل پیش‌بینی و توسط مستقل‌ساز^۱ مدیریت می‌شود؛
۱۰. زمان عملیات هر فرد در هر مرکز کاری شامل زمان‌های پردازش دستی و بازرسی (در صورت لزوم) است و در محاسبه زمان چرخه، زمان‌های جابه‌جایی بین مراکز محاسبه می‌شود؛
۱۱. سلول فقط یک مدل محصول را تولید می‌کند.

توابع هدف مدل. در این تحقیق، از ترکیب خطی نرمال شده اهداف بهره‌گیری خواهد شد. اهداف دوگانه‌ای که به این ترتیب در یک هدف ادغام می‌شوند، عبارت‌اند از: کمترین انحراف از زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری و بیشترین سطح استفاده از نیروی انسانی. مربع انحراف بار کاری ایستگاه‌ها از زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری (Takt) در قالب دو معیار انحراف منفی (کمتر از تکت) -هدف شماره ۱- و انحرافات مثبت (بیشتر از تکت) -هدف شماره ۲- اندازه‌گیری و همچنین به‌منظور حداقل کردن انحراف از تقاضای مشتری علاوه بر انحرافات مثبت (بیشتر از تکت)، معیار تعداد دفعات انحرافات مثبت (بیشتر از تکت) - هدف شماره ۳- نیز کمینه می‌شود. هدف سطح استفاده کامل از نیروی انسانی از طریق کمینه کردن تعداد نیروی انسانی -هدف شماره ۴- تعقیب می‌شود. حدود بالا برای هر یک از اهداف فوق از ادبیات موضوع استخراج شده و به‌منظور نرمال‌سازی اهداف استفاده می‌شود. تابع هدف ارائه‌شده در رابطه ۱ شامل چهار عبارت است که از چپ به راست به ترتیب اهداف شماره ۱ تا ۴ را محاسبه می‌کنند.

در محاسبه هدف شماره ۴، اندازه سلول مستقیماً اعمال می‌شود و باید روشی به‌کار رود که نسبت تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول و اندازه آن را برحسب اندازه سلول یکسان کند. به این منظور دو نقطه به مختصات $A(\frac{1}{J}, \frac{1}{12})$ و $B(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ را به‌عنوان الگوی نسبت تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول و اندازه آن در نظر می‌گیریم. به این ترتیب، هرگاه به سلولی یک اپراتور تخصیص یابد، همانند این است که به سلول نمونه با ۱۲ مرکز کاری (از آنجا که سلول‌ها می‌توانند از ۴ تا ۲۰ مرکز کاری را شامل شوند، سلول با ۱۲ مرکز کاری به‌عنوان سلول نمونه در نظر گرفته می‌شود) یک اپراتور تخصیص یابد (نقطه A). همچنین، نسبت ۱ به ۲ در سلول نمونه، یعنی تخصیص شش اپراتور به ۱۲ مرکز کاری، معادل نسبت ۱ به ۲ در هر سلول با اندازه دیگر است؛ مانند اینکه به سلول با J مرکز کار J/2 اپراتور تخصیص یافته باشد (نقطه B). حال اگر به سلولی نسبت W/J تخصیص یافته باشد، در سلول نمونه این نسبت معادل با $\frac{J+10W-12}{12(J-2)}$ خواهد بود. حداقل این نسبت $\frac{1}{12}$ و حداکثر آن یک است؛ در نتیجه هدف شماره ۴ به شکل $\frac{J+10W-12}{12(J-2)} - \frac{1}{12}$ در عبارت چهارم تابع هدف رابطه ۱ محاسبه شده است. در مورد بقیه عبارات موجود در تابع هدف پس از طرح محدودیت‌های ساختاری مدل، بحث خواهد شد.

محدودیت‌های ساختاری مدل. محدودیت‌های ساختاری مدل در پنج طبقه کلی محدودیت‌های کلاسیک مسئله تخصیص و تعیین تعداد اپراتور تخصیص یافته به سلول (محدودیت‌های ۱ تا ۴)، محدودیت‌های تعیین حوزه (ایستگاه) کاری اپراتورها (محدودیت‌های ۵ تا ۱۴)، محدودیت‌های تعیین توالی کارهای تخصیص‌یافته به اپراتور (مسیر جابه‌جایی اپراتور در سلول که در محدودیت‌های ۱۵ تا ۲۰ فرموله شده‌اند)، محدودیت‌های مرتبط با محاسبه اثرات

خستگی و زمان‌های پردازش (محدودیت‌های ۲۱ تا ۲۹) و محدودیت‌های کلاسیک مسئله متعادل‌سازی سلول (محدودیت‌های ۳۰ تا ۳۹) تقسیم‌بندی می‌شوند. افق برنامه‌ریزی در این تحقیق الزاماً محدود است و همچنین طول سیکل کاری افراد تخصیص‌یافته به سلول به‌طور متوسط، \bar{c}_i^r ، برحسب تعداد سیکل‌های کاری، $l_{max}^r(i)$ ، و طول دوره گردش، DRI ، توسط این دسته از محدودیت‌های تحقیق محاسبه می‌شود.

مدل تحقیق

اندیس‌ها:

i : اندیس هر اپراتور $i = 1, 2, \dots, I$ ؛
 f, s, j : اندیس‌های مراکز کاری $j = 1, 2, \dots, J$ ؛
 r : اندیس هر دوره گردش $r = 1, 2, \dots, R$ ؛
 l : اندیس هر سیکل کاری $l = 1, 2, \dots, l_{max}^r(i)$.

متغیرهای تصمیم:

A_i : متغیر تخصیص اپراتور i به سلول؛
 x_{ij}^r : متغیر تخصیص اپراتور i به مرکز کاری j در دوره گردش r ؛
 W : تعداد بهینه اپراتور تخصیص‌یافته به سلول؛
 $l_{max}^r(i)$: آخرین سیکل کاری در دوره گردش r که توسط اپراتور i انجام شده است؛
 ADL_{ij}^r : متغیر تخصیص مجاور سمت چپ مرکز کاری j و $j + 1$ ؛
 ADR_{ij}^r : متغیر تخصیص مجاور سمت راست مراکز کاری j و $j + 1$ ؛
 $FFL_{i,s}^r$: متغیر تعیین اولین مرکز کاری s در جلوی سلول که به اپراتور i در دوره گردش r تخصیص یافته است؛
 $FBL_{i,s}^r$: متغیر تعیین اولین مرکز کاری s در پشت سلول که به اپراتور i در دوره گردش r تخصیص یافته است؛
 $q_{i0,D}^r$: متغیر تعیین مسیر جابه‌جایی اپراتور i در دوره گردش r از مرکز کاری O به مرکز کاری D ؛
 $v_{i,j}^r$: متغیر تعیین اینکه آیا اپراتور i در دوره گردش r در حین جابه‌جایی خود در سلول، مرکز کاری j را دور می‌زند یا نه؛
 $t_{i,j}^r(l)$: زمان پردازش عملیات مرکز کاری j توسط اپراتور i روی مدل m در سیکل کاری l از دوره گردش r ؛

$v_i^r(l)$: سطح انگیزه اپراتور i در ابتدای سیکل کاری l از دوره گردش r ؛
 v_{0i}^r : سطح انگیزه اپراتور i در ابتدای دوره گردش r ؛
 v_{1i}^r : سطح انگیزه اپراتور i در انتهای دوره گردش r ؛
 $v_i^{initial}$: سطح انگیزه اولیه اپراتور i ؛
 p_i^r : نسبتی از مراکز کاری تخصیص یافته به اپراتور i در دوره گردش r که در $POR - 1$ دوره قبل از آن نیز به او تخصیص یافته است؛
 p_{ij}^r : متغیری غیرمثبت که در صورت تخصیص متوالی مرکز کاری j به اپراتور i در دوره گردش r و POR دوره قبل از آن صفر و در غیر این صورت منفی است؛
 n_{ij}^r : متغیر تعیین اینکه مرکز کاری j در دوره گردش r و $POR - 1$ دوره قبل از آن به اپراتور i تخصیص یافته است یا نه؛
 w : تعداد اپراتورهای تخصیص یافته به سلول؛
 \bar{c}_i^r : زمان چرخه متوسط برای اپراتور i در دوره گردش r ؛
 \bar{c}_{min}^r : محتوای کاری کمینه در خلال دوره گردش r ؛
 b_i^r : متغیر تعیین اینکه اپراتور i در دوره گردش r محتوای کاری کمتر از تکت دارد ($b_i^r = 1$) یا نه؛
 g_i^r : متغیر تعیین اینکه اپراتور i در دوره گردش r کمترین محتوای کاری را دارد یا نه.

پارامترها:

DRI : طول دوره گردش؛
 t_j^{min} : زمان کمینه انجام پردازش در مرکز کاری j روی مدل m ؛
 $e_{B_{ij}}$: ضریب تأثیر خستگی اپراتور i در تأخیر در انجام عملیات مرکز کاری j ؛
 α_{B_i} : شاخص خستگی اپراتور i ؛
 v^{min} : سطح انگیزه کمینه واقع بینانه؛
 v^{max} : سطح انگیزه بیشینه واقع بینانه؛
 V^{UB} : سطح انگیزه بیشینه ایده‌آل؛
 POR : تعداد دوره‌ها به منظور بررسی تکرار تخصیص؛
 $t_{i,j}^1$: زمان پردازش اولیه مدل m توسط اپراتور i روی مرکز کاری j ؛
 $t_{1w_{s,j}}$: زمان جابه‌جایی اپراتور بین دو مرکز کاری S و j ؛
 t_{2w} : زمانی که هر اپراتور برای دور زدن یک مرکز کاری باید صرف کند.

توصیف محدودیت‌ها. محدودیت‌های کلاسیک مسئله تخصیص و تعیین تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول، هر مرکز کاری را در هر دوره گردش تنها به یک اپراتور تخصیص و تعداد مراکز کاری تخصیص‌یافته به هر اپراتور را حداقل برابر با یک به‌دست می‌دهند. همچنین، تخصیص یا عدم تخصیص هر اپراتور به سلول و تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول توسط این محدودیت‌ها کنترل می‌شود. این طبقه از محدودیت‌ها توسط محدودیت‌های ۲ تا ۵ فرموله شده است. در هر دوره گردش، مراکز کاری باید به‌شکلی به اپراتورها تخصیص یابند که از تخصیص غیرمجاور و تقاطع مسیر جابه‌جایی ممانعت شود. این محدودیت‌ها در راستای کار شوچاک (۲۰۰۸)، ناکاده و نیشیواکی (۲۰۰۸)، اوهنو و ناکاده (۱۹۹۷) و ناکاده و اوهنو (۱۹۹۹) قرار دارند و به‌صورت محدودیت‌های ۶ تا ۱۱ فرموله می‌شوند [۲۴، ۱۷، ۲۰، ۱]. اگر در دوره گردش r از دو مرکز کاری مجاور سمت راست زوج مراکز کاری j و $j + 1$ ، مرکز کاری به اپراتور \bar{t} تخصیص نیابد، آنگاه متغیر ADR_{ij}^r برابر یک قرار داده می‌شود و در غیر این صورت، متغیر مذکور برابر صفر خواهد بود. مقادیر متغیرهای ADR_{ij}^r و ADL_{ij}^r در محدودیت‌های ۶ تا ۱۰ تنظیم می‌شود. محدودیت ۶ تخصیص مجاور را تضمین می‌کند؛ به این ترتیب که اگر هم در مجاورت چپ و هم در مجاورت راست زوج مراکز کاری j و $j + 1$ ، مرکز کاری به اپراتور \bar{t} تخصیص یابد، آنگاه حداقل یکی از این زوج مرکز کاری باید به اپراتور \bar{t} تخصیص یابد (شوچاک، ۲۰۰۸). محدودیت ۱۱ از تخصیصی که موجب تقاطع مسیر جابه‌جایی هردو اپراتور شود، جلوگیری می‌کند. J_1 و J_2 شماره آخرین مرکز کاری روی جلو و اولین مرکز کاری پشت سلول است که با توجه به فرد یا زوج بودن تعداد مراکز کاری مستقر در سلول تعیین می‌شود. در این تحقیق، در صورت فرد بودن تعداد مراکز کاری سلول، مرکز کاری وسط به‌عنوان مرکز کاری مستقر روی پشت خط در نظر گرفته می‌شود. مقادیر مذکور در جدول ۱ محاسبه شده است.

هر اپراتور بسته به تخصیص مجازی که به او انجام شده، در ایستگاه خود و در محدوده زمان چرخه ازپیش مشخص باید بین مراکز کاری تخصیص‌یافته جابه‌جا شود و عملیات لازم را انجام دهد. در سلول تولید ناب، عمدتاً اپراتور برخلاف جریان مواد ساری در سلول حرکت می‌کند. مسیر حرکت او حلقه‌ای بسته است که از آخرین مرکز کاری شروع و به همان مرکز ختم می‌شود. مسیر حرکت اپراتور \bar{t} در دوره گردش r ، از مرکز کاری مبداء O به مرکز کاری مقصد D با متغیر تصمیم صفر و یک $q_{iO,D}^r$ و از طریق محدودیت‌های ۱۲ تا ۱۹ مشخص می‌شود.

محدودیت‌های ۱۲ تا ۱۵ برای وضعیتی که در آن به اپراتور مراکز کاری از جلو و یا پشت سلول تخصیص یافته باشد، اولین مراکز کاری روی سلول (در خلاف مسیر حرکت قطعات یا به عبارتی عملیات سلول) را تعیین و دو محدودیت ۱۸ و ۱۹ بسته بودن مسیر حرکت اپراتور را تضمین می‌کنند. مقادیر J_1 و J_2 به ترتیب آخرین و اولین مراکز کاری مستقر در جلو و پشت

سلول برمبنای مسیر عملیاتی سلول را با توجه به فرد یا زوج بودن تعداد کل مراکز کاری معین می‌کنند. سایر جابه‌جایی‌های اپراتور در سلول در جهت خلاف جریان عملیات سلول توسط دو محدودیت ۱۶ و ۱۷ مشخص می‌شود. اگر به اپراتور دو مرکز کاری $J - s + 1$ و $J - s - f + 1$ تخصیص یافته باشد، به طوری که در بین آن‌ها $f - 1$ مرکز کاری تخصیص نیافته به اپراتور وجود داشته باشد، آنگاه اپراتور از مرکز کاری $J - s + 1$ به مرکز کاری $J - s - f + 1$ حرکت می‌کند. اگر اپراتور در هریک از دو سوی سلول حین انجام وظایف مجبور به دور زدن یک یا چند مرکز کاری باشد، مسیر جابه‌جایی او در مقایسه با حالت عادی باید طولانی‌تر در نظر گرفته شود. برای چنین وضعیتی، متغیر صفر و یک $v_{i,j}^f$ بیانگر این است که اپراتور i در دوره گردش r در حین جابه‌جایی خود در سلول، مرکز کاری j را دور می‌زند یا نه. محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱ تعیین‌کننده این متغیر هستند. حدود مقادیر بسته به اینکه دور زدن روی جلو یا پشت سلول اتفاق می‌افتد، متفاوت است و توسط J_3 تا J_5 مشخص می‌شود. جدول ۱ مقادیر J_x به کاررفته در مدل را به دست می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر J_x به کاررفته در مدل

| J_x | شماره محدودیت مرتبط | شرح محدودیت | مقدار J_x اگر J | |
|-------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|
| | | | فرد باشد | زوج باشد |
| J_1 | ۶ تا ۱۴ و ۱۸، ۱۹ | جلوگیری از تخصیص غیرمجاور و تعیین اولین مرکز کاری تخصیص یافته به سلول روی جلو و پشت سلول | $(J-1)/2$ | $J/2$ |
| J_2 | ۱۹، ۱۸ | تعیین اولین مرکز کاری تخصیص یافته به سلول روی جلو و پشت سلول | $(J-1)/2 + 1$ | $(J/2) + 1$ |
| J_3 | ۲۱، ۲۰ | تعیین متغیر دور زدن مراکز کاری | $(J-1)/2 + 2$ | ۱ |
| J_4 | ۲۱، ۲۰ | تعیین متغیر دور زدن مراکز کاری | جلو/پشت سلول | $J_5 - 2$ |
| J_5 | ۲۱، ۲۰ | تعیین متغیر دور زدن مراکز کاری | جلو/پشت سلول | $(J-1)/2$ / J |

با فرض اینکه تکرار انجام وظایف تخصیص یافته به اپراتور عامل اصلی کاهش سطح انگیزش و معادل گرفتن اثر خستگی با کاهش سطح انگیزش او باشد، اختلاف سطح انگیزش اپراتور i در سیکل l از دوره گردش r با سطح بالای انگیزش موجب تأخیر در عملیات مرکز کاری خواهد شد که در این سیکل صورت خواهد گرفت [۲۴]. همانند مدل تحقیق عزیز و همکاران (۲۰۱۰)، عبارت دوم در محدودیت ۲۲ میزان تأخیرات ناشی از اثر خستگی را در قالب

تابعی خطی به‌دست می‌دهد [۴]. در این تحقیق، سطح انگیزش اپراتور \hat{l} در سیکل l از دوره گردش r ، $v_i^r(l)$ ، تابعی از عوامل چهارگانه ضریب خستگی اپراتور (α_{B_i}) ، زمان سپری‌شده تا سیکل l ، سطح انگیزش کمینه و سطح انگیزش اپراتور در ابتدای دوره گردش r (v_{0i}^r) بوده و کاهش آن در اثر مواجهه با وظایف تکراری مطابق الگوی نمایی ارائه‌شده عزیزی و همکاران (۲۰۱۰) در معادله ۲۳ محاسبه می‌شود. این محدودیت معادله نزول انگیزه عزیزی و همکاران (۲۰۱۰) را بر مبنای خصایص عملیاتی محیط سلول تولید ناب توسعه می‌دهد. در مدل تحقیق حاضر، در راستای مطالعه عبوق و همکاران (۱۳۸۹ و ۲۰۱۲) فرض بر این است که در ابتدای هر دوره، سطح انگیزش اپراتور بر مبنای درجه مشابهت وظایف تخصیص‌یافته به او در آن دوره و دوره‌های گذشته تعیین می‌شود [۱، ۳]؛ لذا طبق معادله ۲۴، هرچه تشابه وظایف تخصیص‌یافته بیشتر باشد، سطح انگیزش اولیه پایین‌تر است و تا سطح انگیزش بیشینه فاصله بیشتری دارد. معادله ۲۵ سطح انگیزش هر اپراتور در انتهای هر دوره گردش و معادله ۲۶ سطح انگیزه اولیه هر اپراتور در ابتدای افق برنامه‌ریزی را به‌دست می‌دهد. نسبت تشابه تخصیص اپراتور \hat{l} در دوره گردش r ($0 \leq p_i^r \leq 1$) در معادله‌های ۲۷ تا ۳۰ و برحسب تعداد دوره‌های گردش که در ارزیابی مراکز کاری تکراری تخصیص‌یافته به هر اپراتور موردنظر است و توسط پارامتر مفروض POR مشخص می‌شود، به‌دست می‌آید. اگر اپراتور \hat{l} در دوره گردش جاری r و POR دوره قبل از آن مشغول به انجام وظیفه در مرکز کاری j باشد، متغیر p_{ij}^r برابر صفر و متغیر n_{ij}^r که متغیری صفر یا یک بوده و نشان‌دهنده استمرار حضور اپراتور \hat{l} طی دوره گردش جاری r و POR دوره قبل از آن در مرکز کاری j است، برابر یک محاسبه می‌شود. طول سیکل کاری افراد تخصیص‌یافته به سلول به‌طور متوسط (\bar{c}_i^r) ، برحسب تعداد سیکل‌های کاری $(l_{max}^r(i))$ و طول دوره گردش (DRI) توسط محدودیت ۳۱ محاسبه می‌شود. محدودیت‌های ۳۲ و ۳۳ شماره آخرین سیکلی را که اپراتور \hat{l} در دوره گردش r به کار اشتغال داشته به‌دست می‌دهد. $l_{max}^r(i)$ به‌شکلی تعیین می‌شود که کل زمان اشتغال به کار اپراتور در طول بازه زمانی به اندازه دوره گردش قرار گیرد. همچنین در راستای اصول تولید ناب [۱۵، ۲۵، ۵، ۲۲، ۲۳، ۲۴]، کم‌کارترین اپراتور برحسب کمترین محتوی کاری در هر دوره گردش به‌کمک محدودیت‌های ۳۴ تا ۴۰ شناسایی می‌شود تا در صورت کمتر بودن آن از زمان تکت به‌عنوان جریمه در تابع هدف در نظر گرفته شود. محدودیت‌های ۳۴ تا ۳۶ محتوای کاری کمینه در هر دوره گردش (\bar{c}_{min}^r) را به‌دست می‌آورند. برای اپراتوری که این محتوی کاری را دارد، متغیر g_i^r توسط محدودیت‌های ۳۵ و ۳۶ معادل یک قرار داده می‌شود. اگر در یک دوره گردش، زمان تکت از طول سیکل کاری اپراتور \hat{l} تخصیص‌یافته به سلول به‌طور متوسط بزرگ‌تر باشد، متغیر b_i^r توسط محدودیت‌های ۳۷ و ۳۸ برابر یک قرار می‌گیرد. در محدودیت‌های ۳۹ و ۴۰ در هر دوره گردش، در صورتی که محتوای

کار کمینه آن دوره از زمان تکت کمتر باشد، متغیر b^r برابر یک می‌شود. عبارت اول در تابع هدف انحراف کمتر از تکت و عبارت دوم تابع هدف در رابطه ۱ انحراف بیشتر از تکت را محاسبه می‌کند. عبارت سوم در تابع هدف تعداد دفعات نقض زمان تکت در افق برنامه‌ریزی را محاسبه می‌کند.

$$MinZ = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R b^r \frac{Takt - \bar{c}_{min}^r}{Takt} + \frac{1}{RW} \sum_i^I \sum_r^R (1 - b_i^r) \frac{\bar{c}_i^r - Takt}{\sum_j \max_i \{t_{i,j}^1\} - Takt} + \frac{1}{RW} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R b_i^r + \frac{5(w-1)}{6(J-2)} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij}^r = 1 \quad \forall j; \forall r \quad (2)$$

$$M(1 - A_i) + \sum_{j=1}^J x_{ij}^r \geq 1 \quad \forall i; \forall r \quad (3)$$

$$-MA_i + \sum_{j=1}^J x_{ij}^r \leq 0 \quad \forall i; \forall r \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I A_i \leq w \quad (5)$$

$$ADL_{ij}^r + ADR_{ij}^r + M_1(1 - A_i) + x_{ij}^r + x_{i,J+1-j}^r \geq 1 \quad \forall j = 2, 3, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (6)$$

$$M_1(ADL_{ij}^r) + M_2(1 - A_i) + \sum_{a=1}^{j-1} x_{ia}^r + \sum_{a=J+2-j}^J x_{ia}^r \geq 1 \quad \forall j = 2, 3, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (7)$$

$$M_1(ADL_{ij}^r + 1 - A_i) + \sum_{a=1}^{j-1} x_{ia}^r + \sum_{a=J+2-j}^J x_{ia}^r \leq 2M_1 \quad \forall j = 2, 3, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (8)$$

$$M_1(ADR_{ij}^r) + M_2(1 - A_i) + \sum_{a=j+1}^{J-j} x_{ia}^r \geq 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (9)$$

$$M_1(ADR_{ij}^r + 1 - A_i) + \sum_{a=j+1}^{J-j} x_{ia}^r \leq 2M_1 \quad \forall j = 1, 3, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (10)$$

$$x_{i_1 j}^r + x_{i_2, J+2-j}^r + x_{i_2, j-1}^r + x_{i_1, J+1-j}^r \leq 3 \quad \forall i_1, i_2 = 1, 2, \dots, I; i_1 \neq i_2; \forall j = 2, 3, \dots, J_2; \forall r \quad (11)$$

$$M_1(1 - \sum_{j=1}^{s-1} x_{ij}^r) + M_2 x_{is}^r + 1 - FFL_{i,s}^r \leq M_1 + M_2 \quad \forall s = 1, 2, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (12)$$

$$M_1(1 - \sum_{j=1}^{s-1} x_{ij}^r) + M_2 x_{is}^r \geq (M_1 + M_2) FFL_{i,s}^r \quad \forall s = 1, 2, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (13)$$

$$M_1(1 - \sum_{j=1}^{s-1} x_{i,j-j+1}^r) + M_2 x_{i,j-s+1}^r + 1 - FBL_{i,j-s+1}^r \leq M_1 + M_2 \quad \forall s = 1, 2, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (14)$$

$$M_1(1 - \sum_{j=1}^{s-1} x_{i,j-j+1}^r) + M_2 x_{i,j-s+1}^r \geq (M_1 + M_2) FBL_{i,j-s+1}^r \quad \forall s = 1, 2, \dots, J_1; \forall i; \forall r \quad (15)$$

$$M_1(1 - \sum_{j=j-s}^{j-s-f+2} x_{ij}^r) + M_2 x_{i,j-s+1}^r + M_3 x_{i,j-s-f+1}^r + 1 - q_{i,j-s+1,j-s-f+1}^r \leq M_1 + M_2 + M_3 \quad \forall s = 1, 2, \dots, J-1; \forall f = 1, 2, \dots, J-s; \forall i \forall r \quad (16)$$

$$M_1(1 - \sum_{j=j-s}^{j-s-f+2} x_{ij}^r) + M_2 x_{i,j-s+1}^r + M_3 x_{i,j-s-f+1}^r \geq (M_1 + M_2 + M_3) q_{i,j-s+1,j-s-f+1}^r \quad \forall s = 1, 2, \dots, J-1; \forall f = 1, 2, \dots, J-s; ; \forall i \forall r \quad (17)$$

$$M_1 FFL_{i,s_a}^r + M_2 FBL_{i,s_b}^r + 1 - q_{i,s_b,s_a}^r \leq M_1 + M_2 \quad \forall s_a = 1, 2, \dots, J_1; \forall s_b = J_2, \dots, J; \forall i \forall r \quad (18)$$

$$M_1 FFL_{i,s_a}^r + M_2 FBL_{i,s_b}^r \geq (M_1 + M_2) q_{i,s_b,s_a}^r \quad \forall s_a = 1, 2, \dots, J_1; \forall s_b = J_2, \dots, J; \forall i \forall r \quad (19)$$

$$M_1(1 - q_{i,a,b}^r) + \sum_{j=a+1}^{b-1} v_{i,j}^r \geq b - a - 1 \quad \forall i \forall r \quad \forall a = J_3, J_3 + 1, \dots, J_4; \forall b = a + 2, a + 3, \dots, J_5 \quad (20)$$

$$-M_1 q_{i,a,b}^r + \sum_{j=a+1}^{b-1} v_{i,j}^r \leq 0 \quad \forall i \forall r; \forall a = 1, 2, \dots, J_1 - 2; \forall b = 1, 2, \dots, J_1 \quad (21)$$

$$t_{i,j}^r(l) = t_{i,j}^1 + e_{B_{ij}} \frac{v^{UB} - v_i^r(l)}{v^{UB}} t_j^{min} \quad \forall i \forall r \forall j \quad (22)$$

$$v_i^r(l) = v^{min} + (v_{0i}^r - v^{min}) e^{-\alpha_{B_i} (\sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^{l-1} t_{i,j}^r(c))} \quad \forall l = 1, 2, \dots, l_{max}^r(i); \forall i \forall r \quad (23)$$

$$v_{0i}^r = v^{max} - (v^{max} - v_{1i}^{r-1}) p_i^r \quad \forall i \forall r \quad (24)$$

$$v_{1i}^{r-1} = v_i^{r-1}(l_{max}^{r-1}(i)) \quad \forall i \forall r \quad (25)$$

$$v_{0i}^1 = v_i^{initial} \quad \forall i \quad (26)$$

$$p_{ij}^r = \sum_{u=0}^{min\{POR, r\}} x_{ij}^{r-u} - min\{POR, r\} - 1 \quad \forall i \forall r \forall j \quad (27)$$

$$p_{ij}^r + M_1 \geq n_{ij}^r M_1 \quad \forall i \forall r \forall j \quad (28)$$

$$p_{ij}^r + M_1 \geq n_{ij}^r M_1 \quad \forall i \forall r \forall j \quad (29)$$

$$p_i^r = \frac{\sum_{j=1}^J n_{ij}^r}{\sum_{j=1}^J x_{ij}^r} \quad \forall i \forall r \quad (30)$$

$$l_{max}^r(i) \bar{c}_i^r = DRI \\ \forall l = 1, 2, \dots, l_{max}^r(i) ; \forall i \forall r \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^{l_{max}^r(i)} t_{i,j}^r(l) + (l_{max}^r(i)) (\sum_{s=1}^J \sum_{j=1}^J t_{1w_{s,j}} q_{i,s,j}^r + \sum_{j=1}^J t_{2w} v_{i,j}^r) \leq DRI \\ \forall i \forall r \quad (32)$$

$$M_1(1 - A_i) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^{l_{max}^r(i)+1} t_{i,j}^r(l) + (l_{max}^r(i) + 1) (\sum_{s=1}^J \sum_{j=1}^J t_{1w_{s,j}} q_{i,s,j}^r + \sum_{j=1}^J t_{2w} v_{i,j}^r) \geq DRI \quad \forall i \forall r \quad (33)$$

$$M_1(1 - A_i) + \bar{c}_i^r \geq \bar{c}_{min}^r \\ \forall i \forall r \forall l = 1, 2, \dots, l_{max}^r(i) \quad (34)$$

$$\bar{c}_i^r - \bar{c}_{min}^r + M_1 g_i^r \leq M_1 + M_1(1 - A_i) \\ \forall i \forall r \forall l = 1, 2, \dots, l_{max}^r(i) \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^I g_i^r \geq 1 \quad \forall r \quad (36)$$

$$\bar{c}_i^r \leq Takt + M(1 - b_i^r) \quad \forall i \forall r \quad (37)$$

$$\bar{c}_i^r \geq Takt - Mb_i^r \\ \forall i \forall r \quad (38)$$

$$\bar{c}_{min}^r \leq Takt + M(1 - b^r) \quad \forall r \quad (39)$$

$$\bar{c}_{min}^r \geq Takt - Mb^r \\ \forall r \quad (40)$$

تحلیل مدل تحقیق

توسعه الگوریتم ژنتیک. به گزارش گلوور و کوکمبرگر (۲۰۰۳)، کاربرد موفقیت‌آمیز الگوریتم ژنتیک در مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی رشد سریعی داشته است [۷]. خصیصه اصلی این الگوریتم تولید دوباره مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها به منظور خلق جمعیت جدید است که ترکیب آن توسط عملگرهای تقاطع، جهش و تولید مجدد کنترل می‌شود. نحوه عمل الگوریتم توسعه‌یافته برای حل مسئله تحقیق در شبه‌کد شکل ۴ آورده شده است. در این شکل، $P(t)$ بیانگر والدین و $C(t)$ بیانگر فرزندان است. در ادامه، به تشریح استراتژی‌های مطرح در شبه‌کد می‌پردازیم.

| | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ورودی: | داده‌های مسئله و پارامترهای الگوریتم ژنتیک (حجم جامعه، تعداد نسل، درصد تقاطع، درصد جهش و درصد تولید مجدد) |
| خروجی: | بهترین برنامه تخصیص و گردش شغلی برای سلول تازه‌آرایش‌یافته در متغیر t قرار دهید صفر |
| | ایجاد $P(t)$ با استفاده از زیررویه کددهی مبتنی بر کروموزوم تصادفی |
| | ارزیابی $P(t)$ با استفاده از زیررویه کدگشایی مبتنی بر کروموزوم تصادفی تا زمانی که شرط پایان محقق نشده است: |
| | ایجاد $C(t)$ از $P(t)$ توسط عملگر تقاطع تسلط |
| | ایجاد $C(t)$ از $P(t)$ توسط عملگر جهش تغییر تصادفی ترکیب-ترتیب |
| | ایجاد $C(t)$ از $P(t)$ توسط عملگر تولید مجدد |
| | ارزیابی $C(t)$ با استفاده از زیررویه کدگشایی مبتنی بر کروموزوم تصادفی |
| | ایجاد $P(t+1)$ از $P(t)$ و $C(t)$ با استفاده از روش گزینش چرخه رولت |
| | در متغیر t قرار دهید $t + 1$ |

شکل ۴. شبه‌کد الگوریتم ژنتیک برای مسئله زمان‌بندی گردش شغلی

نمایش ژنتیک. شکل ۵ یک نمونه کروموزوم تصادفی برای مسئله‌ای با ۵ دوره گردش شغلی و ۸ مرکز کاری را نشان می‌دهد که در آن اپراتورهای $\{1,3,7\}$ به سلول تخصیص یافته‌اند. در زیررویه کددهی، پس از انتخاب تصادفی تعدادی از اپراتورها که از طریق تولید تصادفی W عدد در بازه $[1, I]$ انجام می‌شود، اپراتورهای منتخب در هر دوره گردش شغلی به مراکز کاری تخصیص می‌یابند؛ به طوری که از تقاطع مسیر جلوگیری شود. استخراج مقادیر متغیرهای تصمیم تخصیص مرکز کاری J به اپراتور I در دوره گردش r ، x_{rj}^I ، از هر کروموزوم و محاسبه برازندگی کروموزوم توسط روش کدگشایی انجام می‌شود. در مورد کروموزوم شکل ۵، به‌عنوان مثال داریم:

$$x_{32}^1 = 1$$

| دوره‌های گردش | مراکز کاری | | | | | | | |
|---------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | مرکز ۱ | مرکز ۲ | مرکز ۳ | مرکز ۴ | مرکز ۵ | مرکز ۶ | مرکز ۷ | مرکز ۸ |
| دوره ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ۷ | ۷ | ۳ | ۱ | ۱ |
| دوره ۲ | ۷ | ۷ | ۷ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۳ |
| دوره ۳ | ۱ | ۷ | ۷ | ۷ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ |
| دوره ۴ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ۷ |
| دوره ۵ | ۱ | ۱ | ۷ | ۳ | ۳ | ۷ | ۷ | ۷ |

شماره‌ی اپراتورها

شکل ۵. یک کروموزوم تصادفی برای مسئله‌ای با ۸ مرکز کاری و ۵ دوره گردش

زیررویه کددهی در شکل ۶ موجه بودن جواب در قالب یک کروموزوم تصادفی را تضمین می‌کند. این زیررویه تنها اپراتورهای تخصیص‌یافته در اولین دوره گردش را مشخص می‌کند و به‌منظور سادگی، هر سطر کروموزوم را به‌شکل یک ماتریس $2 \times J/2$ در صورت زوج بودن تعداد مراکز کاری یا در غیر این صورت، به‌صورت یک ماتریس $2 \times (J + 1)/2$ در نظر می‌آورد که تداعی‌کننده یک سلول یوشکل است. استخراج مقادیر متغیرهای تصمیم تخصیص مرکز کاری j به اپراتور i در دوره گردش t ، X_{ij}^t ، از هر کروموزوم و محاسبه برازندگی کروموزوم توسط روش کدگشایی انجام می‌شود.

-
- ورودی: داده‌های مسئله (تعداد مراکز کاری / اپراتور، بزرگ‌تر یا مساوی ۴)
 خروجی: برنامه موجه تخصیص و گردش شغلی برای سلول تازه‌آرایش‌یافته
۱. به اندازه دو شعاع حرکتی مجاز از مرکز اول روی پشت خط (آخرین مرکز کاری سلول) روی پشت و جلوی سلول حرکت کنید. مراکز کاری پوشش داده‌شده را ایستگاه اولین اپراتور قرار دهید.
 ۲. اولین مراکز کاری تخصیص‌نیافته روی پشت و جلوی خط را به‌ترتیب BI و FI قرار دهید.
 ۳. در صورت رسیدن به آخرین مراکز کاری (روی جلو و پشت سلول) توقف کنید و در حوزه‌های کاری به‌دست‌آمده، به تصادف شماره یک اپراتور تخصیص‌نیافته را قرار دهید و در غیر این صورت از هریک به اندازه دو شعاع حرکتی مجاز حرکت کنید.
 ۴. اگر شعاع مجاز حرکت روی جلوی خط برابر یک بود، روی جلوی خط حرکت نکنید. به اندازه شعاع مجاز دیگری از FI حرکت کنید و حوزه کاری ایجادشده را ایستگاه اپراتوری دیگر قرار دهید و در غیر این صورت مقاصد را روی پشت و جلوی سلول تعیین و مراکز کاری پوشش داده‌شده را ایستگاه اپراتور بعدی قرار دهید.
- ** اگر $BI > FI$ ، آنگاه روی جلوی خط حداقل باید تا مرکز کاری روبه‌روی $BI - 1$ پیشروی کرد.
۵. به قدم ۲ برگردید.

شکل ۶. زیررویه کددهی (ایجاد جواب‌های موجه)

عملگر تقاطع تسلط. این عملگر برای دوره گردش اول تکه سمت راست و سمت چپ فرزند (نسبت به یک عدد تصادفی)، به‌ترتیب از سمت راست والد ۱ و سمت چپ والد ۲ ایجاد می‌شود. در صورت عدم موجه بودن فرزند، یکی از دو تکه منتقل‌شده از والدین به تصادف انتخاب و به‌منظور موجه شدن فرزند با توجه به تکه دیگر که تکه الگو نامیده می‌شود اصلاح خواهد شد. سپس طبق رویه تسلط برای دیگر دوره‌های گردش براساس ترکیب اپراتورهای تخصیص‌یافته به

سلول در دوره گردش اول، نحوه تخصیص افراد به دست می‌آید. در این رویه امتیاز تسلط برحسب درجه تطابق با مجموعه اپراتورهای تخصیص یافته به سلول محاسبه می‌شود. شکل ۷ قدم‌های رویه تسلط را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. شکل ۸ تولید فرزند از دو کروموزوم نمونه توسط این عملگر را نشان می‌دهد. در قسمت «ب»، ابتدا براساس مجموعه اپراتورهای کروموزوم ۱ (اپراتورهای ۱، ۳ و ۷)، یک تخصیص تصادفی ایجاد شده است. امتیاز این تخصیص ۵ است؛ چون پنج ژن این کروموزوم سلولی با مجموعه اپراتورهای تخصیص یافته به سلول در دوره اول (اپراتورهای ۱، ۲، ۵ و ۷) تطابق دارد. به همین ترتیب، درمورد کروموزوم والد ۲ عمل شده است. ساختار اولیه کروموزوم نهایی براساس کروموزوم غالب شکل می‌گیرد. در این مثال، کروموزوم غالب به اضافه شدن اپراتور ۱ نیاز دارد که این کار با کم کردن تعداد اپراتور یا اپراتورهای پرکار مجاور هم صورت می‌گیرد. در اینجا، اپراتور ۲، دو تخصیص خود را به اپراتور ۱ واگذار کرده است. اگر کروموزوم کماکان ناقص باشد، قدم‌های ۴ و ۵ نیز به کار خواهد آمد.

عملگر جهش تغییر ترکیب - ترتیب. در صورت تخصیص تمامی اپراتورهای ورودی مسئله به سلول، یا ایستگاه کاری دو فرد به تصادف برگزیده شده در تمامی دوره‌های گردش با یکدیگر تعویض می‌شود و یا یک نفر حذف و به کمک گام‌های ۴ و ۵ رویه تسلط کروموزوم بازنگری خواهد شد. اگر تعدادی از اپراتورهای ورودی مسئله به سلول تخصیص یافته باشند، به‌طور تصادفی تعدادی از اپراتورهای تخصیص یافته با اپراتورهای تخصیص نیافته در تمامی دوره‌های گردش معاوضه می‌شود.

ورودی: دو کروموزوم والد

خروجی: کروموزوم فرزند

تعیین امتیاز دو والد برحسب تعداد اپراتورهای یکسان با ترکیب اپراتورهای تخصیص یافته به سلول و مشخص کردن والد غالب (مسلط)

به‌هنگام‌سازی والد غالب از طریق انتقال اپراتور غیرموجود در آن از والد مغلوب

انتقال والد غالب به‌هنگام‌شده به فرزند

تعیین اپراتورهای آغازین در فرزند

تکمیل فرزند از طریق پر کردن خانه‌های خالی آن به ترتیب از چپ به راست:

** اولین خانه خالی جلوی سلول = اپراتور آغازین جلوی خط

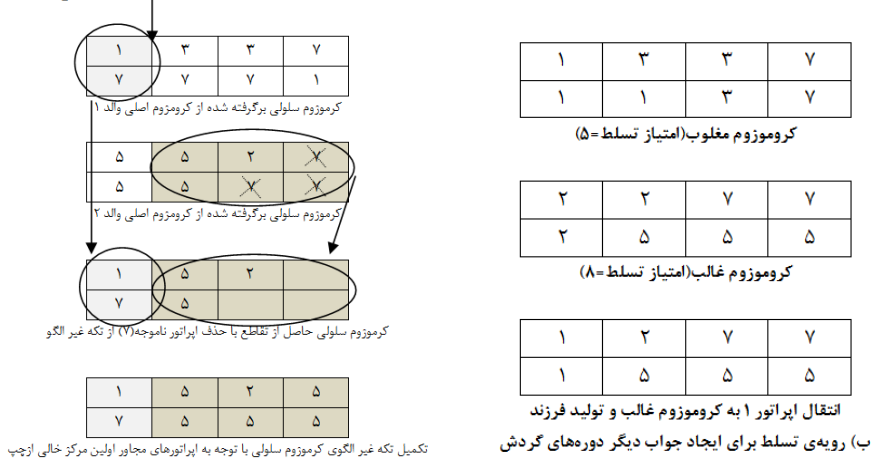
** اولین خانه خالی پشت سلول = اپراتور آغازین پشت خط

** هر خانه خالی دیگر (جلوی سلول / پشت سلول) = خانه قبلی

عملگر تولید مجدد. درصدی از بهترین‌های جمعیت هر نسل براساس میزان برازندگی به نسل بعدی منتقل می‌شوند. این عملگر مخاطره ازدست رفتن کروموزوم‌های مناسب در اثر تقاطع و یا جهش را از میان می‌برد.

حل مسائل نمونه و نتایج محاسبات. مسئله زمان‌بندی چندهدفه گردش شغلی در سلول تولید ناب نیز پیچیدگی الگوریتمی دارد و جزو مسائل NP-hard طبقه‌بندی می‌شود. میلتنبرگ (۲۰۰۲)، کارا و همکاران (۲۰۰۷) و شوچاک (۲۰۰۸) برای تحلیل مدل مورد مطالعه الگوریتم‌های فراابتکاری یا ابتکاری توسعه داده‌اند. میلتنبرگ (۲۰۰۲) و کارا و همکاران (۲۰۰۷) اعتبارسنجی الگوریتم‌های حل را از طریق مقایسه نتایج با جواب‌های بسته‌های نرم‌افزاری بهینه‌سازی بررسی نکرده‌اند [۱۱، ۱۴].

عدد تصادفی بین ۱ تا ۴ (۱)



الف) تولید جواب برای اولین دوره‌ی گردش (تعیین ترکیب اپراتورهای تخصیص یافته به سلول)

شکل ۸. تولید فرزند از دو کروموزوم نمونه توسط عملگر تقاطع تسلط

مدل این تحقیق نیز حتی برای سلول‌های کوچک به کمک دو بسته نرم‌افزاری معتبر لینگو ۱۰ و گمز قابل تحلیل نبود. تعداد زیاد متغیرها و روابط غیرخطی در محدودیت‌ها و همچنین مشخص نبودن تعداد سیکل‌های کاری هر اپراتور در هر دوره گردش از جمله مهم‌ترین دلایل این موضوع به‌شمار می‌آیند؛ با این حال، مقدار بهینه تابع هدف مدل برابر با صفر است که در شرایط خاصی قابل حصول است. این شرایط عبارت‌اند از: کوچک نبودن زمان تکت، وجود اپراتور چندمهارته با عملکرد در سطح ماهر در تمامی مراکز کاری و صفر بودن شیب خستگی این اپراتور. با توجه به مفروضات حاکم بر مدل تحقیق، فاصله از صفر یا انحراف از جواب بهینه بدیهی به‌نظر می‌رسد و قابل انتظار است. به این ترتیب، فاصله جواب‌های الگوریتم از صفر با

توجه به شرایط و داده‌های مسئله ملاکی برای ارزیابی اعتبارسنجی الگوریتم به‌شمار می‌رود. جدول ۲ نتایج انجام محاسبات الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته و محدوده پارامترهای الگوریتم را در مسائل نمونه مختلف گزارش می‌کند. همان‌گونه که در آخرین ستون این جدول مشخص است، الگوریتم برای مسائل دارای شرایط خاص جواب صفر به‌دست داده است. طبقه‌بندی مسائل برحسب اندازه سلول، از دسته‌بندی مقاله شوچاک (۲۰۰۸) اقتباس شده است که براساس آن سلول‌های ۵ تا ۹ کوچک، ۱۰ تا ۱۴ متوسط و ۱۵ تا ۲۰ بزرگ در نظر گرفته می‌شوند. به‌منظور بررسی کاربردپذیری مدل تحقیق، داده‌های جمع‌آوری‌شده از یک واحد ماشین‌کاری صنایع قطعه‌ساز کشور شامل ۸ مرکز کاری، ۸ اپراتور، ۴ مدل محصول که قرار است برای ۱۰ دوره گردش شغلی برنامه‌ریزی شود، به کار می‌روند. در حال حاضر، ساماندهی تولید به‌صورت فناوری گروهی است و ده اپراتور در کارگاه مشغول به کار هستند.

جدول ۲. نتایج انجام محاسبات الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته

| اندازه مسئله نمونه | تعداد نمونه | تعداد دفعات تکرار | حدود زمان محاسبات (ثانیه) | محدوده جواب‌های الگوریتم | حدود پارامترها | | تابع هدف در شرایط خاص |
|--------------------|-------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|----------|-----------------------|
| | | | | | NumGen | Pop size | |
| کوچک | ۶ | ۳۰ | ۱۵۰۰-۵۰۰۰ | ۰/۱۵ - ۰/۴۱ | ۵۰-۱۰۰ | ۱۰-۳۰ | ۰ |
| متوسط | ۲ | ۱۰ | ۴۵۰۰-۸۰۰۰ | ۰/۲۲ - ۰/۴۰ | ۱۰-۵۰ | ۵-۱۵ | ۰ |
| بزرگ | ۱ | ۵ | ۱۰۰۰۰-۱۲۰۰۰ | ۰/۲۸ - ۰/۳۳ | ۱۰-۵۰ | ۵-۱۵ | ۰ |

اپراتورها برای مدت طولانی با یک ماشین کار می‌کنند. با توجه به عدم وجود پایگاه داده تاریخیچه عملکردی اپراتورها، داده‌های مربوط به ضریب خستگی در محدوده ضرایب مستخرج از ادبیات موضوع توسط سرپرست کارگاه اعلام شد. پاسخ به‌دست داده‌شده توسط الگوریتم ژنتیک در شکل ۹ نشان داده شده است. هر جواب شامل سه نوع اطلاعات متمایزکننده است که عبارت‌اند از: ترکیب اپراتورهای تخصیص‌یافته، نحوه تخصیص اپراتورها به مراکز کاری در هر دوره گردش شغلی و توالی مدل‌ها در هر دوره گردش شغلی. در شکل ۹، مشخص است که اپراتورهای ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۷ به سلول تخصیص یافته‌اند. برای نمونه، اپراتور شماره ۳ در اولین دوره گردش به مرکز ۱، در دومین و سومین دوره گردش به مرکز ۴ و در دوره گردش ۶ به مراکز ۲، ۳ و ۴ تخصیص یافته است.

شکل ۱۰ چگونگی استقرار اپراتورها در هر دوره گردش در سلول را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل می‌بینیم، هیچ‌گونه تقاطع مسیر و تخصیص غیرمجاور غیرمجازی وجود ندارد؛ بنابراین، جواب موردبحث موجه است. بخش سمت راست این جواب توالی مدل‌ها را به‌دست می‌دهد که به‌عنوان مثال، در دوره گردش هفتم در چهار سیکل آخر ابتدا سه بار روی مدل ۳ و

سپس روی مدل ۴ کار می‌شود. تشخیص موجه بودن این بخش از جواب ساده است و فقط با تطبیق تعداد دفعات تکرار هر مدل در هر متاسیکل و میزان تقاضای آن در MPS صورت می‌پذیرد.

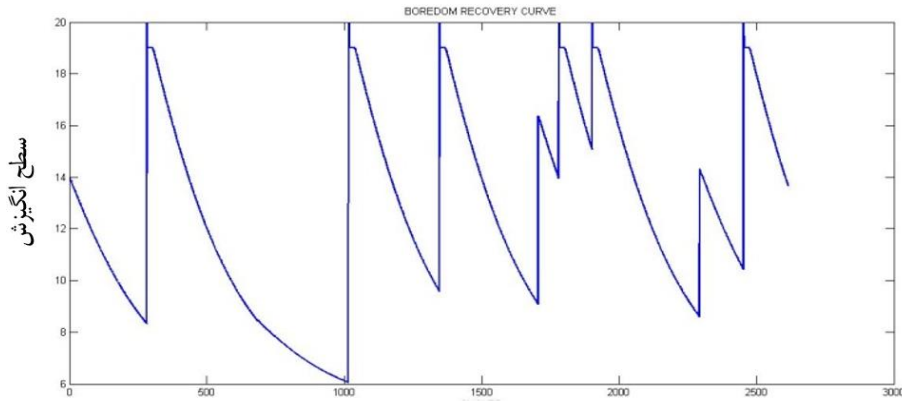
| | مراکز کاری | | | | | | | | یک متاسیکل (شامل ۷ سیکل) | | | | | | | |
|--------------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|--------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۶ | ۸ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | |
| دوره‌های گردش شغلی | ۱ | ۳ | ۶ | ۱ | ۲ | ۲ | ۷ | ۶ | ۵ | ۲ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ۴ | ۳ |
| | ۲ | ۶ | ۶ | ۶ | ۳ | ۷ | ۲ | ۱ | ۵ | ۱ | ۳ | ۳ | ۱ | ۴ | ۳ | ۲ |
| | ۳ | ۶ | ۶ | ۲ | ۳ | ۷ | ۱ | ۵ | ۵ | ۳ | ۱ | ۳ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ |
| | ۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۶ | ۵ | ۵ | ۷ | ۷ | ۳ | ۱ | ۳ | ۲ | ۴ | ۳ | ۱ |
| | ۵ | ۶ | ۶ | ۶ | ۳ | ۷ | ۲ | ۱ | ۵ | ۳ | ۳ | ۴ | ۲ | ۱ | ۱ | ۳ |
| | ۶ | ۶ | ۳ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ | ۷ | ۵ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۳ | ۱ | ۳ |
| | ۷ | ۱ | ۵ | ۵ | ۷ | ۶ | ۶ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۱ | ۳ | ۳ | ۳ | ۴ |
| | ۸ | ۲ | ۶ | ۶ | ۳ | ۷ | ۷ | ۵ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۴ | ۳ | ۳ | ۳ |
| | ۹ | ۶ | ۶ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ | ۷ | ۵ | ۴ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ۲ |
| | ۱۰ | ۲ | ۳ | ۶ | ۶ | ۵ | ۵ | ۱ | ۷ | ۴ | ۱ | ۳ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ |

شکل ۹. جواب به‌دست‌آمده توسط الگوریتم ژنتیک در مورد واقعی (یک واحد ماشین‌کاری)

| دوره گردش | M8 | M7 | M6 | M5 | دوره گردش | M8 | M7 | M6 | M5 |
|-----------|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|
| ۱ | 5 | 6 | 7 | 2 | ۶ | 5 | 7 | 2 | 1 |
| | 3 | 6 | 1 | 2 | | 6 | 3 | 3 | 3 |
| | M1 | M2 | M3 | M4 | | M1 | M2 | M3 | M4 |
| ۲ | 5 | 1 | 2 | 7 | ۷ | 3 | 2 | 6 | 6 |
| | 6 | 6 | 6 | 3 | | 1 | 5 | 5 | 7 |
| | M1 | M2 | M3 | M4 | | M1 | M2 | M3 | M4 |
| ۳ | 5 | 5 | 1 | 7 | ۸ | 1 | 5 | 7 | 7 |
| | 6 | 6 | 2 | 3 | | 2 | 6 | 6 | 3 |
| | M1 | M2 | M3 | M4 | | M1 | M2 | M3 | M4 |
| ۴ | 7 | 7 | 5 | 5 | ۹ | 1 | 2 | 7 | 5 |
| | 1 | 2 | 3 | 6 | | 6 | 6 | 3 | 3 |
| | M1 | M2 | M3 | M4 | | M1 | M2 | M3 | M4 |
| ۵ | 5 | 1 | 2 | 7 | ۱۰ | 5 | 5 | 1 | 7 |
| | 6 | 6 | 6 | 3 | | 2 | 3 | 6 | 6 |
| | M1 | M2 | M3 | M4 | | M1 | M2 | M3 | M4 |

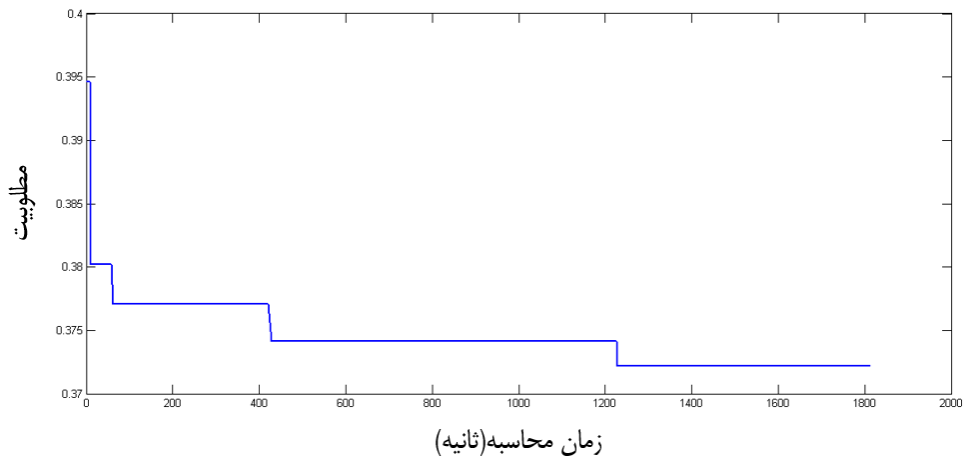
شکل ۱۰. نحوه استقرار اپراتورهای تخصیص یافته در سلول

شکل ۱۱ الگوی انگیزش و بازآوری خستگی اپراتور ۳ در اثر نحوه تخصیص به سلول طی هفته را براساس مفروضات تحقیق ترسیم کرده است. در ابتدای هر دوره گردش شغلی، یک شوک مثبت از طریق بازآوری خستگی به عملکرد فرد وارد می‌شود. این شوک تابعی از تغییر ترکیب کارهای تخصیص یافته به فرد نسبت به دوره یا دوره‌های قبل است.



شکل ۱۱. الگوی انگیزش و بازآوری خستگی اپراتور ۳ در اثر نحوه تخصیص به سلول طی هفته

شکل ۱۲ همگرایی الگوریتم به جواب نزدیک به بهینه برای داده‌های جمع‌آوری شده از یک واحد ماشین‌کاری صنایع قطعه‌ساز کشور شامل ۸ مرکز کاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. همگرایی الگوریتم به جواب نزدیک به بهینه برای داده‌های یک واحد ماشین‌کاری واقعی

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، برای اولین بار مدلی به‌منظور تخصیص اپراتورهای تک‌مهارته به سلول تازه‌آرایش‌یافته طبق اصول تولید ناب توسعه داده شد. از آنجا که سازکار عملیات در سلول‌ها مبتنی بر گردش شغلی است، مسئله تحقیق به‌صورت تخصیص پویا در افق زمانی محدود مدل‌سازی شد. با توجه به پیچیدگی ساختاری این مسئله و همچنین لزوم کسب بینش در مورد چگونگی برنامه‌های تعیین گردش شغلی در سلول تولید ناب، به‌نظر می‌رسد که استفاده از فنون شبیه‌سازی می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار شرکت‌های تولیدی به‌منظور سازماندهی سلول-های تولیدی تازه‌آرایش‌یافته قرار دهد. همچنین، تفکیک وظایف بر مبنای نوع عملیات مسلط صورت‌گرفته در سلول نیز می‌تواند باعث اثربخشی بیشتر برنامه‌های گردش شغلی در سلول تولید ناب شود. مدل این تحقیق نشان داد که در وضعیت ایده‌آل، هدایت سلول تولید با یک نفر اپراتور ممکن است؛ درحالی که در سلول‌های فناوری گروهی، هرگز چنین امکانی وجود ندارد. همچنین نشان داده شد که چگونه برنامه گردش شغلی و هدایت چندفرآیندی در سلول تولید ناب کاهش بی‌رویه سطح انگیزشی فرد یا خستگی ناشی از مواجهه با وظایف تکراری را کنترل می‌کند. با این حال، در نظر گرفتن اثرات انسانی دیگر در این مدل، هرچند به پیچیدگی آن می‌افزاید، می‌تواند نتایج کاربردی قابل توجهی به‌دست دهد. از طرفی، مطالعه انتقال اپراتورها به دیگر سلول‌های موجود در سیستم تولید نیز از موارد دیگر توسعه حوزه این تحقیق است. همچنین، توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر یک جواب، مانند شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی ممنوع برای مدل این تحقیق، از زمینه‌های دیگر برای تحقیقات آتی است.

منابع

۱. عیوق، اشکان؛ زندیه، مصطفی و هایده متقی. (۱۳۸۹). «ارائه مدل زمان‌بندی گردش شغلی با ملاحظه هزینه خستگی ناشی از شباهت کارها و توسعه الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری برای حل آن». *مطالعات مدیریت صنعتی*. ج ۶، ش ۱۶.
2. Ahmed M. Deif (2012). Dynamic analysis of a lean cell under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 50, 1127-1139
3. Ayough A., & Zandieh M. & Farsijani H., (2012). GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom. *Int J Adv Manuf Technol*, DOI 10.1007/s00170-011-3641-7
4. Azizi, N., Zolfaghari, S., and Liang, M., (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *International Journal of Production Economics*, 123, 69–85
5. Black, JT., (2007), "Design rules for implementing the Toyota Production System", *International Journal of Production Research*, 45, (16): 3639–3664.
6. Black, JT., and Hunter, S.L., (2003), *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan.
7. Glover, F. & Kochenberger, G. A., (2003). *Handbook of metaheuristics*. Kluwer Academic Publisher, 55-82
8. Huang, Y., (1999). Employee training and assignment for team-based manufacturing systems. PhD dissertation submitted to the department of systems and industrial engineering, university of Arizona
9. Jiunn-Chenn Lu & Taho Yang. (2014). Implementing lean standard work to solve a low work-in-process buffer problem in a highly automated manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2014.937009
10. Kannan, V. R., & Jensen, J. B., 2004. Learning and labor assignment in a dual constrained cellular shop, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No.7, pp. 1455–1470.
11. Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., (2007). An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines" *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-006-0437-2.
12. Lodree, J.E.J., Geiger, C.D., and Jiang, X., (2009). Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 39–51.
13. McDonald, T., Kimberly, P.E., (2009). Development and application of a worker assignment model to evaluate alean manufacturing cell. *International Journal of Production Research*, 47(9), 2427–2447.
14. Miltenburg J (2002). Balancing and scheduling mixed-model Ushaped production lines. *Int J Flex Manuf Syst*, 14(2), 119–151.

15. Monden, Y. (1993) Toyota Production System: An Integrated Approach to Just In Time. Norcross, Institute of Industrial Engineers.
16. Nakade, K., & Nishiwaki, R. (2008). Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line. *Computers & Industrial Engineering*, 54, 432-440
17. Nakade, K., & Ohno, K. (1999). *An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line*. International Journal of Production Economics, 60-61, 353-358.
18. Needy, K.L., Norman, B.A., Bidanda, B., Tharmmaphornphilas, W., Ariyawongrat, P. and Warner, R.C., (2001). Human capital assessment in lean manufacturing. In: Proceedings of 2001 American society for engineering management conference, Huntsville: AL.
19. Nembhard DA., and Osothsilp N. (2005). Learning and forgetting-based worker selection for tasks of varying complexity. *Journal of the Operational Research Society* (2005) 56, 576-587.
20. Ohno, K. and Nakade, K. (1997) , "Analysis and Optimization of a U-shaped Production Line", Journal of the Operations Research Society of Japan, vol.4: 0-104
21. Rehab M. Ali, Ahmed M. Deif (2014). Dynamic Lean Assessment for Takt Time Implementation. *Procedia CIRP*, 17, 577-581
22. Rother, M. and Shook, J., (1999). *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*. Brookline, MA, the Lean Enterprise Institute, Inc.
23. Sekine, K., (1992) "One-Piece Flow", Productivitypress, Portland, OR.
24. Shewchuk, JP., (2008). Worker allocation in lean U-shaped production lines. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3485-3502.
25. Shingo, S., (1997). *A Study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint*. Shingo, S.
26. Vidic, N. (2008). Developing Methods To Solve The Workforce Assignment Problem Considering Worker Heterogeneity And Learning And Forgetting. PhD dissertation Submitted to the Graduate Faculty of Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh.