

زمان‌بندی تولید سلولی با در نظر گرفتن عوامل انسانی و زمان تحویل سفارشات

فاطمه صاعدی^۱، کامران کیانفر^{۲*}

۱. کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع و آینده پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

خلاصه

مهندسی عوامل انسانی یک زمینه علمی مرتبط با فهم تعامل بین انسان و سایر عناصر یک سیستم در جهت آسایش و رفاه اپراتور و عملکرد کامل سیستم می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، زمان‌بندی تولید سفارش‌ها و شیفت‌بندی اپراتورها در محیط تولید سلولی با در نظر گرفتن عوامل انسانی و با اهداف کمینه کردن دیرکرد تحویل محصولات و میانگین خستگی اپراتورها می‌باشد. در این پژوهش فاکتورهای انسانی خستگی، یادگیری و فراموشی در زمان‌بندی محیط‌های تولیدی در نظر گرفته شده است و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح به همراه الگوریتم ابتکاری افق غلطان برای حل مسأله ارائه می‌شود. به منظور اجرای آزمایشات عددی، ۳ گروه مسائل نمونه به صورت تصادفی تولید شد. الگوریتم افق غلطان در دو حالت همپوشانی و بدون همپوشانی روی مسائل نمونه اجرا شد و نتایج نشان داد که این الگوریتم در حالت بدون همپوشانی با طول ۲ دوره از نظر زمان حل و اختلاف با جواب بهینه، مناسب‌ترین حالت است. الگوریتم ابتکاری افق غلطان قادر است مسائل در ابعاد بزرگ را با خطای حداکثر ۳٪ از جواب حل دقیق برای هر یک از اهداف در زمان ۵/۵ دقیقه به دست آورد در حالی که زمان حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح در این ابعاد از مسائل حدود ۲ ساعت است. نتایج خطی‌سازی مدل نشان داد که تبدیل متغیر پیوسته به عدد صحیح نسبت به روش مک کورمیک کارایی بهتری دارد و تحلیل حساسیت روی پارامترهای مسأله نشان می‌دهد که ضریب خستگی دارای رابطه مستقیم با میزان دیرکرد سفارشات بوده و ضریب یادگیری دارای رابطه معکوس با دیرکرد سفارشات و میانگین خستگی اپراتورها می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

پذیرش ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

گردش شغلی

زمان‌بندی محیط تولید سلولی

خستگی-بهبود

یادگیری-فراموشی

دیرکرد تحویل سفارشات

الگوریتم افق غلطان

۱. مقدمه

کارمند در یک کار جدید است که به طور دائمی توافق نشده است. چرخش شغلی منجر به افزایش دانش، آگاهی و تجربه فردی و کاهش فرسودگی و خستگی زیاد می‌شود و همه این‌ها منجر به رشد فکری و نوآوری خواهد شد. چرخش شغلی به کارمندان کمک می‌کند تا یاد بگیرند، پیشرفت کنند و چند استعداد شوند، به طوری که می‌توانند عملکردهای مختلفی را انجام دهند و از جنبه‌های مختلف سازمان کمک کنند.

یکی از روش‌های توسعه منابع انسانی، گردش شغلی می‌باشد. گردش شغلی از جمله راهکارهایی است که در حوزه منابع انسانی برای

اکثر کارکنان به دنبال کسب مهارت‌های جدید و ارتقای موقعیت شغلی خود هستند و کارفرمایان نیز به دنبال جذب کارکنانی هستند که مهارت‌های مختلفی دارند و در انجام وظایف مختلف توانمند باشند. به همین دلیل در بسیاری از مواقع، کارفرمایان از استراتژی چرخش شغلی (job rotation) استفاده می‌کنند و از این طریق به تسهیل و تسریع امور و صرفه‌جویی در منابع کمک می‌کنند. اجرای استراتژی گردش شغلی با در نظر گرفتن عوامل انسانی در کسب استعدادهای و مهارت‌های مختلف کمک می‌کند. چرخش شغلی به معنای عملکرد

* نویسنده مسئول: کامران کیانفر

تلفن: ۰۳۱-۳۷۹۳۴۰۴۱، پست الکترونیکی: k.kianfar@eng.ui.ac.ir

کاهش زمان تولید یک واحد محصول و دور بودن از انجام فعالیت‌ها باعث افزایش زمان تولید می‌شود [۴]. خستگی از نظر عملیاتی باعث کاهش عملکرد اپراتور در فعالیت‌های فیزیکی می‌باشد و چنانچه خستگی فیزیکی یا ذهنی باشد، تأثیر مشابه دارد.

هدف اصلی این پژوهش تعیین برنامه گردش شغلی در محیط سلولی با در نظر گرفتن عوامل انسانی است. همچنین به دنبال بررسی تأثیر در نظر گرفتن یادگیری (learning)، فراموشی (forgetting) و خستگی (fatigue) در تولید سلولی، بررسی تأثیر یادگیری، فراموشی و خستگی بر زمان پردازش تولید یک واحد محصول، مشخص کردن دوره‌های بیکاری و کاری اپراتور، تخصیص اپراتور به ماشین‌آلات در محیط تولید سلولی، بررسی تأثیر یادگیری، فراموشی و خستگی بر روی بالانس کاری اپراتور می‌باشد. این مطالعه دوهفته در یک محیط تولید سلولی را در نظر می‌گیرد که هدف اول حداقل کردن دیرکرد تحویل محصولات (tardiness) بر اساس یادگیری، فراموشی، خستگی و بهبود که بر زمان پردازش محصول و در نتیجه روی زمان تحویل تأثیر می‌گذارد و هدف دوم بالانس بار کاری روی اپراتور جهت کاهش میانگین خستگی، انجام می‌گیرد. مفروضاتی که در این پژوهش در نظر گرفته می‌شود شامل مشخص بودن تقاضا، تعداد سلول‌ها و دوره زمانی، در نظر گرفتن دیرکرد برای محصولات، عدم آموزش مقدماتی به کارگران، چندتخصصی بودن کارگران می‌باشد.

در ادامه این پژوهش در بخش ۲ مروری بر ادبیات موضوع انجام می‌گیرد. تعریف دقیق مسأله مورد بررسی در بخش ۳ انجام خواهد شد. بخش ۴ به معرفی روش‌های حل شامل مدل برنامه‌ریزی ریاضی و خطی‌سازی آن و نیز الگوریتم افق غلطان اختصاص داده شده است. در بخش ۵ نتایج محاسباتی شامل اعتبارسنجی مدل‌ها، تنظیم پارامترهای الگوریتم افق غلطان، نتایج حاصل از روش‌های حل و تحلیل حساسیت آورده شده است. آخرین بخش نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای مطالعات آتی اختصاص می‌یابد.

۲. پیشینه تحقیق

چرخش شغلی یک استراتژی سازمان کاری است که باتوجه به مزایای آن برای کارگران و شرکت‌ها، به‌ویژه آنهایی که با تولید کار می‌کنند، محبوبیت فزاینده‌ای دارد. بخشی و همکاران [۵] یک مدل ریاضی برای تخصیص افراد به مشاغل مختلف و جابجایی کارمندان بین مشاغل مرتبط ارائه می‌دهند. این اقدام باعث کاهش بار کاری فعالیت‌های تکراری و خطرات ارگونومیک در افق برنامه‌ریزی می‌شود و در نهایت کارایی سازمان را افزایش می‌دهد. در مدل پیشنهادی، دستگاه‌ها نیمه اتوماتیک هستند و می‌توان بیش از یک کار را به یک نفر اختصاص داد. پیچیدگی این نوع مسأله NP-Hard است و نتیجه روش‌های دقیق برای حل مسأله در یک زمان معقول امکان‌پذیر نیست و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مطالعه مدل پیشنهادی استفاده می‌شود.

مقاله لیو [۶] یک مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی را با در نظر گرفتن کارگران چندمهارته و عامل خستگی مورد مطالعه قرار می‌دهد.

داشتن نیروهای ماهر، باانگیزه و خلاق مطرح می‌شود و فرآیندی است که طی آن کارکنان یک سازمان در سطوح مختلف به‌صورت جابجایی انجام وظیفه می‌کنند. به‌واسطه این کار، افراد با مشاغل بیشتری آشنا شده و در کار خود از تنوع بالاتری برخوردار می‌شوند و به عضو مناسبی از سازمان تبدیل شده و انگیزه کار در آن‌ها تقویت می‌شود. گردش شغلی، آموزش ضمن خدمت نیز نامیده شده است. یعنی اینکه کارمند یک واحد یا یک بخش می‌تواند مهارت‌های شغلی مختلفی را در طول یک دوره زمانی مشخص آموزش ببیند، لذا می‌تواند به‌عنوان روشی عملی برای غنی‌سازی و توسعه شغلی در نظر گرفته شود. گردش شغلی شامل انواع ترفیع، تنزل درجه، انتقال و تغییر محل خدمت، تعلیق خدمتی، بازنشستگی، اخراج و استعفا، و همچنین به‌صورت گردش درون سازمانی (فرد در درون سازمان شغل خود را تغییر دهد)، گردش بین سازمانی (کارمند سازمان خود را تغییر دهد)، گردش درون حرفه‌ای (افراد درون حرفه خود جابجا می‌شوند)، گردش بین حرفه‌ای (افراد همراه با گردش، حرفه‌شان را نیز تغییر می‌دهند) در نظر گرفته می‌شود. امروزه به‌روزرسانی دانش و مهارت‌های کارکنان، مجهز کردن آن‌ها به آخرین و ویژه‌ترین مهارت‌ها، بهبود بهره‌وری و عملیات ارزش افزوده، مانع از منسوخ شدن مهارت‌های کارکنان و باعث ارتقای فرهنگ آموزش در میان این افراد می‌شود، که خود از مهمترین اهداف راهبردی کشورهای توسعه یافته است و همین‌طور ایجاد فرصت‌های یادگیری از عوامل افزایش رضایت شغلی کارکنان محسوب می‌شود [۱].

در این پژوهش از محیط تولید سلولی (cellular manufacturing system) به‌عنوان بستری برای پیاده‌سازی گردش شغلی و بررسی تأثیر عوامل انسانی بر بهره‌وری تولید استفاده خواهد شد. ویژگی‌های اصلی سیستم‌های تولید سلولی به این صورت می‌باشد که سلول‌ها به‌طور موازی مرتب شده‌اند و هر سلول به چندین نوع دستگاه ناهمگن برای چندین فرآیند از انواع مختلف محصول مجهز است. محصولات می‌توانند به‌طور همزمان و مستقل در سلول‌های مختلف پردازش شوند. تولید سلولی به‌عنوان یکی از روش‌های امیدوارکننده در کاهش طول زمان تولید شناخته می‌شود، به‌ویژه هنگامی که اولویت‌های بالایی برای انعطاف‌پذیری در استفاده از ترکیب پیچیده محصول وجود دارد [۲].

روند فزاینده سن بازنشستگی نمایانگر پدیده‌ای حیاتی برای فعالیت‌های تولید و جابجایی مواد است. جایی که معمولاً به فعالیت‌های تکراری، شامل حمل بارهای مختلف در فرکانس‌های مختلف، نیاز است. این وظایف می‌تواند به بیماری‌های شغلی و اختلالات اسکلتی-عضلانی مربوط به کار منجر شود، که به دلیل کاهش ظرفیت‌های عملکردی و جسمی، می‌تواند کارگران مسن‌تر را تحت تأثیر قرار دهد. از طرف دیگر، کارگران مسن از طریق تخصص و مهارت‌های خود در طول زمان به‌طور مثبت در فرآیندهای تولید نقش دارند [۳]. عوامل انسانی شامل مهارت، انگیزه، یادگیری-فراموشی، خستگی-بهبود می‌باشد که در این پژوهش به دو مورد آخر اشاره می‌کنیم. یادگیری از بُعد عملیاتی به‌منظور

می‌دهد که منحنی یادگیری پیشنهادی براساس معیارهای کارایی و تعادل نسبت به سایر مدل‌ها بهتر عمل می‌کند.

باتوجه به اهمیت گردش شغلی و عوامل انسانی در زمان‌بندی محیط‌های تولیدی، در جدول (۱) تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در حوزه تأثیر عوامل انسانی در محیط‌های تولیدی آورده شده است. در ستون مربوط به عوامل انسانی، هشت عامل انسانی مدنظر است که به ترتیب شامل (۱) مهارت، (۲) انگیزه، (۳) خستگی، (۴) یادگیری و فراموشی، (۵) چندتخصصی بودن (۶) آموزش حین انجام کار، (۷) افزایش رضایت شغلی و (۸) ریسک‌های شغلی می‌شود. در ستون مربوط به اهداف نیز اهداف مختلفی در جدول اشاره شده است که به ترتیب شامل (۱) کاهش ریسک، (۲) حداکثر تنوع در شغل انجام شده (گردش شغلی)، (۳) بالانس بار کاری اپراتور، (۴) حداقل کردن هزینه نگهداری ماشین‌آلات، (۵) حداقل کردن حجم کار، (۶) حداقل کردن هزینه حمل‌ونقل درون سلولی، (۷) حداقل کردن کل تأخیر براساس عدم مهارت و انگیزه، (۸) محدودیت دوگانه و (۹) کمینه کردن تأخیر و زمان تکمیل می‌شود. ستون بعدی جدول مربوط به انواع روش‌های حل می‌باشد که اعداد این ستون نشان‌دهنده تکنیک‌های (۱) مدل‌سازی ریاضی، (۲) الگوریتم فراابتکاری، (۳) روش‌های ابتکاری، (۴) شبیه‌سازی، (۵) تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و (۶) سایر روش‌های حل می‌شود. آخرین ستون جدول نیز به محیط مورد مطالعه در پژوهش اختصاص یافته است که شامل محیط‌های تولیدی (۱) تولید سلولی، (۲) خطوط مونتاژ، (۳) صنایع خودروسازی و (۴) سایر محیط‌های تولیدی است.

باتوجه به جدول (۱) مشخص است که از میان عوامل انسانی مختلف، عامل رضایت شغلی در ۱۶ پژوهش و عامل ریسک‌های شغلی با ۱۰ پژوهش بیشترین تعداد مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. سایر عوامل انسانی پرکاربرد در مطالعات سیستم‌های تولیدی شامل خستگی اپراتورها و چندتخصصی بودن آن‌ها می‌باشد. از لحاظ روش حل می‌توان ابزارهای متنوعی را برای تحلیل مسائل به‌کار گرفت. پرکاربردترین روش حل در جدول (۱) مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با ۲۰ پژوهش و پس از آن روش‌های فراابتکاری با ۸ پژوهش می‌باشد. از میان روش‌های فراابتکاری نیز الگوریتم ژنتیک بیش از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و سایر روش‌های فراابتکاری در این پژوهش‌ها شامل شبیه‌سازی تیرید و جستجوی ممنوع می‌باشد. باتوجه به فضای تولیدی در پژوهش‌های جدول (۱) مشخص است که تنها ۷ پژوهش از میان ۴۰ مقاله به مطالعه محیط تولید سلولی پرداخته‌اند و این موضوع ضرورت پرداختن به این محیط تولیدی در کنار عوامل انسانی را مشخص می‌دهد. آخرین سطر جدول به پژوهش حاضر اختصاص یافته است و تفاوت‌های این مقاله با پژوهش‌های پیشین را مشخص می‌کند.

در این پژوهش یک سیستم شبیه‌سازی مبتنی بر عامل برای مقابله با عدم قطعیت‌ها در مدل خستگی کارگر ایجاد شده است. علاوه بر این، یک چارچوب جدید بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را پیشنهاد می‌کند که الگوریتم ژنتیک (GA) و یادگیری تقویتی (RL) را برای حل مسأله ترکیب می‌کند. آزمایش‌های عددی بر روی چندین نمونه از یک مرکز تولید دارو برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی اجرا می‌شود.

در محیط کاری امروزی که دائماً در حال تغییر است، ماهیت پویای مهارت‌های کارکنان و تأثیرات یادگیری و فراموشی که بر کارایی تولید تأثیر می‌گذارند، اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کنند. هنگام افزایش تولید، زمانی که کارگران به‌طور مکرر وظایف مشابه را انجام می‌دهند، زمان پردازش از اثرات یادگیری بهره‌مند می‌شود. هویسر [۷] یک نوع اثر یادگیری و فراموشی جدید را در زمان‌بندی تک‌ماشین معرفی می‌کند. این اثر، دسته‌های مختلف محصول را در نظر می‌گیرد و اثرات یادگیری درون‌رده‌ای و اثرات فراموشی بین‌رده‌ای را در نظر می‌گیرد. در این تحقیق روش‌های حل نزدیک به بهینه برای به حداقل رساندن زمان تکمیل کل محصولات با استفاده از ۳۳۷۵۰۰ نمونه مثال ارائه شده‌اند. ژنگ [۸] یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه چندهدفه برنامه‌ریزی تولید و تعمیر و نگهداری ماشین را برای یافتن توالی تولید بهینه و تصمیم‌های نگهداری پیشگیرانه (PM) پیشنهاد می‌کند. این مدل زمان راه‌اندازی، اثرات یادگیری-فراموشی و اثرات چندخرابی را در نظر می‌گیرد. زمان راه‌اندازی و اثرات یادگیری-فراموشی با یکنواختی شغلی و تصمیمات PM مرتبط است. اثرات خرابی‌های چندگانه از جمله زوال ماشین، نرخ شکست و از دست دادن مشخصه کیفیت، ماهیت تصادفی اهداف را تعیین می‌کند. یک مطالعه موردی از تولید موتور خودرو نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند هزینه‌های کل تعمیر و نگهداری را تا ۲۷ درصد کاهش دهد، کل زمان پردازش را تا ۳ درصد کاهش دهد و همچنین استفاده از ماشین را تا ۳ درصد بهبود بخشد.

عوامل انسانی، از جمله انعطاف‌پذیری کارگران و تأثیرات یادگیری-فراموشی، از عوامل حیاتی در سیستم‌های تولید مدرن برای کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی هستند. با این حال، مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر فقط انعطاف‌پذیری ماشین را در نظر می‌گیرد و عوامل انسانی را نادیده می‌گیرد. لئو [۹] به بررسی یک مسأله FJSP چندهدفه با در نظر گرفتن عوامل انسانی می‌پردازد تا به‌طور هم‌زمان زمان ساخت، حداکثر حجم کار ماشین و کل حجم کار ماشین را به حداقل برساند. در مرحله اول، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط چندهدفه ایجاد شده است و سپس، یک الگوریتم مبتنی بر چندهدفه مبتنی بر یادگیری و تجزیه برای حل مدل پیشنهاد می‌شود.

یادگیری و خستگی از پیامدهای تکرار کار است و تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد فرد دارد. مقاله اسد ایوبی [۱۰] به این تحقیقات کمک می‌کند و برخلاف سایر مدل‌ها، یک مدل منحنی یادگیری با نرخ یادگیری وابسته به سطح خستگی پیشنهاد می‌کند. نتایج نشان

جدول (۱). مطالعات پیشین در حوزه عوامل انسانی در محیط‌های تولیدی

نام نویسنده	عوامل انسانی	اهداف	روش حل	محیط مسأله
اکبری [۴]	۴ و ۳	۸	۱	۴
زارع [۱۱]	۷	۹	۲ و ۵	۴
جابر [۱۲]	۴ و ۳	۸	۶	۴
ژو [۱۳]	۷	۷	۱	۴
عزیزی [۱۴]	۶ و ۲ و ۱	۷	۲	۴
الجینیدی [۱۵]	۷	۶	۱	۱
اوتو [۱۶]	۸	۱	۲	۴
جورجنسن [۱۷]	۵	۳	۵	۴
محمدی [۱۸]	۷	۶	۲	۱
دیگو [۱۹]	۸	۱	۲	۲
موریرا [۲۰]	۷	۲	۳	۲
لودری [۲۱]	۸ و ۷	۳ و ۲	۶	۴
بسنانی [۲۲]	۵	۲	۴	۱
اولیویرا [۲۳]	۸	۱	۶	۴
هوچدورفر [۲۴]	۵	۴	۱ و ۳	۳
الهیاری [۲۵]	۷	۴	۱	۱
موسوی [۲۶]	۷	۵	۱ و ۵	۳
بونزی [۲۷]	۸	۱	۶	۳
علیمیان [۲۸]	۷	۶	۱	۱
لانگ [۲]	۷	۶	۱ و ۳	۴
مهدوی [۲۹]	۷	۶	۱	۱
آکینار [۳۰]	۷	۹	۱	۲
کستا [۳۱]	۷	۹	۱ و ۳	۴
مُسا [۳۲]	۸	۲ و ۱	۱	۲
بونزی [۳۳]	۷	۲	۱	۲
لوگر [۳۴]	۳	۱	۶	۴
بوتی [۳]	۸	۱	۱	۴
باساواراج [۳۵]	۳	۲	۴	۴
ایوق [۳۶]	۷	۲	۲	۱
کورتلوش [۳۷]	۲	۲	۶	۴
میکالوس [۳۸]	۸	۱	۵	۴
دیگیسی [۳۹]	۳ و ۸	۱	۱	۲
آدم [۴۰]	۸	۱	۱	۴
انوار [۴۱]	۷	۹	۲	۴
اسد ایوبی [۱۰]	۴ و ۳	۳	۱	۴
باتینی [۴۲]	۳ و ۴ و ۸	۱	۱	۴
هویسر [۷]	۴ و ۳	۹	۳	۴
لیو [۶]	۳	۳	۴	۴
لئو [۹]	۴	۹ و ۵	۱ و ۲	۴
ژنگ [۸]	۴	۴	۱	۳
پژوهش حاضر	۴ و ۳	۳ و ۷	۱ و ۳	۱

باتوجه به آخرین سطر از جدول (۱) تنها در پژوهش‌های اکبری [۴]، جابر [۱۲]، اسد ایوبی [۱۰]، باتینی [۴۲] و هویسر [۷] به بررسی عوامل انسانی یادگیری-فراموشی به همراه خستگی-بهبود پرداخته‌اند که البته هیچ‌کدام از این تحقیق‌ها در محیط تولید سلولی انجام نگرفته است. همچنین در هیچ‌کدام از پژوهش‌های قبلی اهداف دیرکرد تحویل سفارشات و بالانس بار کاری اپراتورها جهت کاهش خستگی به صورت همزمان مدنظر نبوده است. از این رو، پژوهش حاضر از دو جنبه دارای نوآوری می‌باشد. اول اینکه چهار عامل انسانی یادگیری-فراموشی و نیز خستگی-بهبود در محیط تولید سلولی مدنظر قرار گرفته است که این موضوع در هیچ‌کدام از پژوهش‌های قبلی مشاهده نشده است. دوم اینکه اهداف دیرکرد در تحویل محصول و خستگی اپراتورها برای اولین بار در قالب یک مسأله دوهدفه تعریف شده است. با در کنار هم قرار دادن این دو هدف تلاش می‌شود تا علاوه بر توجه به سودآوری تولید به تأثیر عوامل انسانی در محیط تولید سلولی پرداخته شود. همچنین مدل‌سازی مسأله به نحوی انجام گرفته است که یک پردازش می‌تواند در یک شیفت کاری شروع و در شیفت کاری دیگری تکمیل شود. در این پژوهش مفروضاتی شامل چندکاره بودن اپراتورها و تخصصی بودن سلول‌های تولیدی برای تعدادی از خانواده‌های محصولات در نظر گرفته شده است که یک حالت جامع از محیط تولید سلولی را شامل می‌شود.

۳. تعریف مسأله و مفروضات

تولید سلولی، روش تولیدی است که در ساخت محصولات منفرد یا متغیر از طریق تنظیم تجهیزات تولید در سلول کار استفاده می‌شود. این یک روش کارآمد برای کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت محصولات و تقویت انعطاف پذیری تولید است. تولید سلولی در بسیاری از کشورهای پیشرو در ساخت به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است و سیستم تولید سلولی به‌عنوان یک کاربرد عملی مهم از تکنولوژی گروهی (group technology) شناخته می‌شود. این سیستم تولیدی رویکردی است که برای افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی در محیط‌های تولیدی کوچک و متوسط به‌طور همزمان به کار می‌رود [۴۳].

سیستم تولید سلولی شامل تعدادی سلول است که در آن هر سلول وظیفه پردازش خانواده‌های قطعات مشابه را برعهده دارد. محیط تولیدی سلولی به دلیل نیاز سازمان‌های تولیدی برای کنار آمدن با چرخه‌های عمر کوتاه‌تر محصول، تغییر تقاضا برای مخلوط‌های میان دوره و متوسط محصول ظهور کرده است [۲۹]. از آنجاکه کارگران نقش مهمی در انجام کارها در سیستم دارند، انتصاب کارگران به سلول‌ها عاملی اساسی برای استفاده کامل از سیستم‌های تولید سلولی می‌شود. خصوصیات این سیستم شامل در نظر گرفتن برنامه‌ریزی تولید چنددوره‌ای، پیکربندی پویای سیستم، ماشین‌های تکراری، ظرفیت ماشین، زمان در دسترس کارگران و تعیین کارگران می‌شود [۲۹].

معمولاً در یک سیستم تولید سلولی سطوح مختلفی نظیر تشکیل و پیکربندی سلول‌ها، بارگذاری قطعات، زمان بندی تولید، تخصیص

- شیفت‌های متوالی تنها مشغول کار با یک ماشین باشد میزان تجربه اپراتور افزایش خواهد یافت.
- شیفت‌های کاری برای همه ماشین‌آلات یکسان در نظر گرفته شده و در تمامی سلول‌ها اعمال می‌شود.
- تعداد ماشین‌ها در هر سلول مشخص می‌باشد.
- اگر سفارشی به سلولی تخصیص یابد تمام پردازش‌های آن باید در همان سلول انجام شود.
- قابلیت رد و قبول سفارش وجود ندارد و همه سفارش‌ها باید تحویل داده شود.
- احتمال خرابی ماشین‌آلات صفر در نظر گرفته شده است. بنابراین ماشین‌آلات همیشه در دسترس هستند.
- اپراتورها در همه شیفت‌های کاری در دسترس می‌باشند.

شکل (۱) نشان‌دهنده نمایی از سیستم تولید سلولی مفروض با K خانواده، M سفارش و I سلول می‌باشد که هر سلول i دارای i_j ماشین است. هر شکل هندسی بیانگر یک سفارش است و شکل‌های هندسی مشابه، یک خانواده محصول را تشکیل می‌دهند. هر خانواده محصول تنها می‌تواند به یک سلول تخصیص یابد ولی به یک سلول تولیدی بیش از یک خانواده می‌تواند تخصیص یابد.

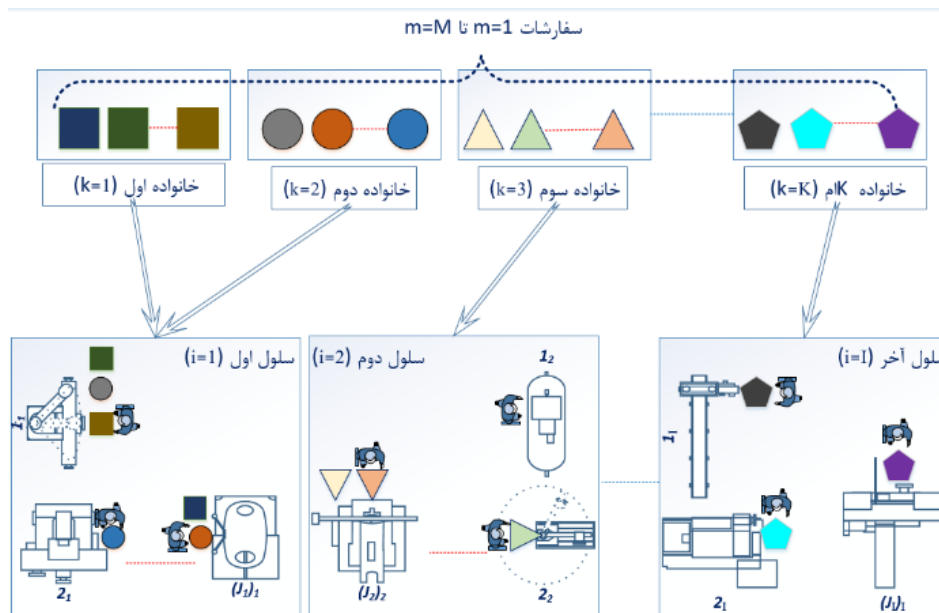
در ادامه نحوه محاسبه میزان یادگیری، فراموشی، خستگی و بهبود محاسبه می‌گردد. مدل یادگیری-فراموش کردن-یادگیری (Learn-Forget-Learn) برای محاسبه آموزش کارگران استفاده می‌شود که با پدیده یادگیری و فراموشی مرتبط هستند. تأثیر یادگیری-فراموشی را می‌توان در طول چرخه کار به صورت شکل (۲) مشاهده کرد. در این نمودار، محور عمودی نشان‌دهنده زمان تولید یک واحد محصول است و محور افقی واحد زمان را نشان می‌دهد که با افزایش تکرار در تولید، یادگیری کارگر افزایش یافته و در نتیجه زمان تولید یک واحد محصول کاهش می‌یابد و با دور بودن از انجام کار فراموشی افزایش و همچنین زمان تولید یک واحد محصول افزایش می‌یابد [۱۲].

منابع و ... بررسی می‌شود. در سطح تشکیل سلول، ماشین‌ها به سلول‌ها تخصیص می‌یابند و قطعات به خانواده‌هایی دسته‌بندی می‌شوند. در این سطح، حالت ایده‌آل این است که تشکیل سلول به نحوی انجام گیرد که نیاز به حرکت بین سلولی محصولات نباشد. سطح دوم از سیستم تولید سلولی شامل دو بخش پیکربندی درون سلولی و بین سلولی است. در پیکربندی درون سلولی، مکان ماشین‌ها در هر سلول مشخص می‌شود و در پیکربندی بین سلولی مکان هر سلول نسبت به یکدیگر تعیین می‌شود به صورتی که اهداف موردنظر مانند کمینه کردن هزینه حمل‌ونقل بین سلولی و درون سلولی و ... انجام گیرد. در سطح سوم از برنامه‌ریزی تولید سلولی، زمان بندی تولید قطعات گروه بندی شده انجام می‌شود یعنی مشخص خواهد شد که هر پردازش از هر قطعه در چه زمانی و در چه سلولی و روی کدام ماشین صورت گیرد. دو مرحله برای این سطح در نظر گرفته می‌شود، که مرحله اول تعیین توالی قطعات داخل هر خانواده و مرحله دوم توالی خانواده‌ها است.

در این مقاله صرفاً سطح سوم یعنی زمان بندی محصولات را انجام می‌دهیم. باید سلول‌ها از قبل تشکیل شده باشند یعنی مشخص شده باشد کدام ماشین متعلق به کدام سلول می‌باشد، همچنین مشخص است کدام ماشین قابلیت پردازش چه محصولی را دارد. در خصوص سفارش‌ها و خانواده‌ها می‌دانیم تعداد M سفارش وجود دارد که به K خانواده تقسیم شده‌اند و هر کدام از سفارش‌ها تعداد l_m پردازش دارند. توالی پردازش برای هر سفارش مشخص است و لزوماً بین سفارش‌های مختلف از یک خانواده یکسان نیست. در این مسأله هدف مورد نظر مینیمم کردن دیرکرد و میانگین خستگی اپراتورها و تأثیر ضرایب خستگی-بهبود و یادگیری-فراموشی روی توابع هدف می‌باشد.

سایر مفروضات مسأله به شرح زیر است:

- امکان جابجایی اپراتورها در یک شیفت بین ماشین‌ها وجود ندارد و زمانی که تعویض شیفت برای یک اپراتور از یک ماشین به ماشین دیگر باشد، فراموشی اتفاق می‌افتد و اگر همچنان یک اپراتور در



شکل (۱). نمایی از سیستم تولید سلولی مورد مطالعه

پس از یک استراحت به طول t' و پارامتر μ ضریب بهبودی را مشخص می‌کند. اگر $R = 0$ باشد بدین معنی است که اپراتور کاملاً استراحت کرده و هیچ خستگی ندارد و $R = 1$ نیز خستگی مطلق اپراتور را نمایش می‌دهد. پارامترهای λ و μ سرعت خستگی و بهبودی اپراتور را تنظیم می‌کنند. به منظور تنظیم این دو پارامتر در این پژوهش، فرض می‌شود که بیشینه خستگی پس از ۱۰ ساعت کار مداوم اتفاق می‌افتد و مقدار آن برابر ۱ است و از سوی دیگر، کمینه خستگی پس از گذشت ۲۴ ساعت استراحت اتفاق می‌افتد و مقدار آن برابر با $0/001$ فرض می‌شود. بنابراین، طبق روابط فوق، ضریب خستگی و بهبودی به ترتیب برابر با $0/011$ و $0/047$ محاسبه می‌شود.

۴. روش حل مسأله

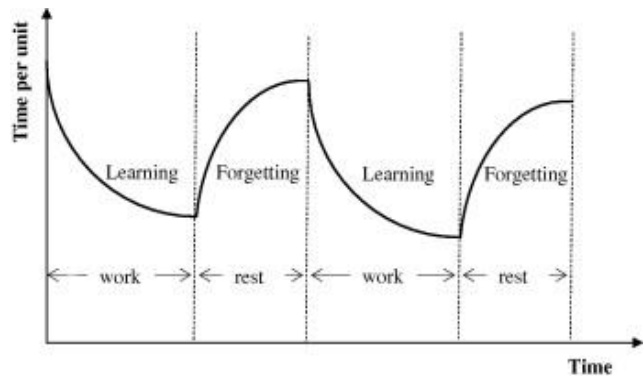
به منظور حل این مسأله ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی براساس مفروضات بیان شده ارائه شده است. تابع هدف این مسأله خطی می‌باشد ولی تعدادی از محدودیت‌های این مدل غیرخطی هستند که می‌بایست تکنیک‌های خطی‌سازی روی آن‌ها پیاده شود. این مدل به صورت دوهدفه طراحی شده که هدف اول آن کمینه کردن دیرکرد در تحویل سفارشات و هدف دوم نیز کمینه‌سازی میانگین خستگی اپراتورها می‌باشد. در ادامه، اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای استفاده شده در مدل برنامه‌ریزی ریاضی تشریح خواهد شد.

اندیس‌های استفاده شده در مدل ریاضی

i	سلول‌های تولیدی
j_i	ماشین‌های سلول i
k	خانواده محصولات
m	سفارش‌ها
l_m	پردازش‌های سفارش m
o	اپراتورها
s	شیفت‌های کاری

پارامترهای استفاده شده در مدل ریاضی

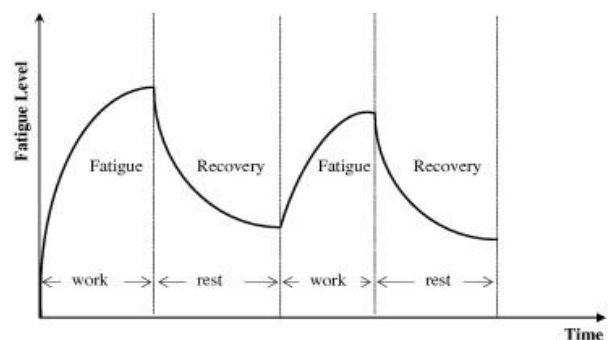
$a_{lm,ji}$	پارامتر باینری اگر پردازش l_m بتواند به ماشین j_i تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت ۰
$H_{k,m}$	پارامتر باینری اگر سفارش m متعلق به خانواده k باشد ۱ در غیر این صورت ۰
$POS_{k,i}$	پارامتر باینری، اگر خانواده k بتواند روی سلول i پردازش شود ۱ در غیر این صورت ۰
wo_{ji}	پارامتر باینری، اپراتور o توانایی کار با ماشین j_i را دارد ۱ در غیر این صورت ۰
$P^1_{l_m}$	زمان پردازش یک واحد محصول از پردازش l_m
DD_m	موعد تحویل سفارش m
D'_{l_m}	مقدار تقاضای پردازش l_m
TP_m	جریمه هر واحد زمانی دیرکرد در تحویل سفارش m
sh_s	طول شیفت s



شکل (۲). رفتار فرآیند یادگیری و فراموشی در طول چرخه کار- استراحت [۱۲]

در این مدل برای محاسبه یادگیری از معادله $t_x = t_1 * x^{-l}$ استفاده می‌شود که t_1 زمان پردازش اولین واحد محصول و t_x زمان پردازش x امین محصول و l ضریب یادگیری می‌باشد. فرآیند فراموشی که موجب افزایش زمان تولید می‌شود توسط رابطه $t_x = t_1 * x^f$ نمایش می‌یابد که پارامتر f ضریب فراموشی است. در این پژوهش، ضریب یادگیری برابر $0/007$ و ضریب فراموشی برابر با $0/004$ فرض می‌شود.

بارگیری فیزیکی منجر به خستگی کارگران در کار می‌شود که به دنبال آن استراحت برای کاهش آن نیاز است. نتایج مدل‌های یادگیری-فراموشی-خستگی-بهبودی نشان می‌دهد گنجاندن یادگیری در یک فرآیند تولید باعث کاهش خستگی و بهبود عملکرد سیستم می‌شود. از طرف دیگر خستگی کارگر باعث افزایش زمان تولید و کاهش تولید می‌شود. یک دوره نقاهت باید به اندازه کافی طول بکشد تا خستگی جمع شده کاهش یابد [۱۲]. می‌توان تأثیر یادگیری-فراموشی در طول چرخه کار را به صورت شکل (۳) مشاهده کرد. در این نمودار، محور عمودی نشان‌دهنده سطح خستگی می‌باشد و محور افقی واحد زمان را نشان می‌دهد که در طول انجام کار اپراتور با گذشت زمان، سطح خستگی افزایش و با استراحت کردن سطح خستگی کاهش می‌یابد [۱۲].



شکل (۳). رفتار فرآیند خستگی و استراحت در طول چرخه کار- استراحت [۱۲]

برای مدل‌سازی فرآیند خستگی از رابطه $F(t) = 1 - e^{-\lambda.t}$ استفاده می‌شود که $F(t)$ نشان‌دهنده خستگی تجمعی در زمان t و پارامتر λ معرف ضریب خستگی است. میزان بهبود نیز توسط رابطه

اکنون یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی اولیه براساس پارامترها و متغیرهای تصمیم ارائه شده برای مسأله مورد بررسی ارائه می‌شود. در این مدل، محدودیت‌های (۸)، (۲۳)، (۲۴) و (۲۶) شامل عبارت‌های غیرخطی هستند که در ادامه راهکارهایی جهت خطی‌سازی آن‌ها ارائه خواهد شد. همچنین در این مدل تعداد عناصر در مجموعه S و O با نمادهای $|s|$ و $|o|$ نمایش داده می‌شود.

$$\min TardPenalty = \sum_m TP_m * Tardiness_m \quad (۱)$$

$$\min FeMeanFatigue = \frac{\sum_{o,s} Fe_{o,s}}{|o| * |s|} \quad (۲)$$

s.t.

$$F_process_{l_m,j_i} \geq s_process_{l_m,j_i} + \sum_s p_{l_m,s,j_i} + \sum_s R_s * lag_{l_m,j_i,s} \quad (۳)$$

$$Tardiness_m \geq F_order_m - hp * DD_m \quad \forall m \quad (۴)$$

$$s_process_{l'_m,j_i} > F_process_{l_m,j_i} - M * (1 - TT_{l_m,l'_m,j_i}) \quad \forall l_m, l'_m, j_i \quad (۵)$$

$$TT_{l_m,l'_m,j_i} + TT_{l_m,l_m,j_i} \geq z_{l_m,j_i} + z_{l'_m,j_i} - 1 \quad \forall j_i, l_m, l'_m \quad (۶)$$

$$sh_s \geq \sum_{l_m} p_{l_m,s,j_i} \quad \forall j_i, s \quad (۷)$$

$$p_{l_m,s,j_i} = iEx_machine_{s,j_i} * q_{l_m,s,j_i} * P_{l_m}^1 \quad \forall s, j_i, l_m \quad (۸)$$

$$D'_{l_m} \leq \sum_{j_i} \sum_s q_{l_m,s,j_i} \quad \forall l_m \quad (۹)$$

$$z_{l_m,j_i} = (\sum_k H_{k,m} * y_{k,i}) * a_{l_m,j_i} \quad \forall l_m, m, i, j_i \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i|POS_{k,i}=1} y_{k,i} = 1 \quad \forall k \quad (۱۱)$$

$$q_{l_m,s,j_i} \leq \sum_o x_{o,s,j_i} \quad \forall l_m, s, j_i \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j_i} x_{o,s,j_i} \leq 1 \quad \forall s, o \quad (۱۳)$$

$$\sum_o x_{o,s,j_i} \leq 1 \quad \forall s, j_i \quad (۱۴)$$

$$x_{o,s,j_i} \leq w_{o,j_i} \quad \forall o, s, j_i \quad (۱۵)$$

$$s_process_{l_m,j_i} \leq z_{l_m,j_i} * M \quad \forall j_i, l_m \quad (۱۶)$$

$$F_process_{l_m,j_i} \leq z_{l_m,j_i} * M \quad \forall j_i, l_m \quad (۱۷)$$

$$q_{l_m,s,j_i} \leq z_{l_m,j_i} * M \quad \forall j_i, l_m, s \quad (۱۸)$$

$$F_order_m \geq F_process_{l_m,j_i} \quad \forall j_i, l_m \quad (۱۹)$$

$$s_process_{l_m,j_i} \leq f_shift_s + M * (1 - b_{l_m,j_i,s}) \quad \forall j_i, l_m, s \quad (۲۰)$$

R_s زمان بین شروع شیفت S و اتمام شیفت قبلی
 $larning$ ضریب یادگیری
 $Forget$ ضریب فراموشی
 $landa$ ضریب خستگی
 Mio ضریب بهبود

ماکسیمم تعداد واحدهای تولیدی در دوره کاری از پردازش سفارش l_m در شیفت کاری S روی ماشین j_i $maxq_{s,l_m,j_i}$

مینیمم تعداد واحدهای تولیدی در دوره کاری از پردازش سفارش l_m در شیفت کاری S روی ماشین j_i $minq_{s,l_m,j_i}$

مینیمم میزان تجربه در شیفت S روی ماشین j_i $miniEx_machine_{s,j_i}$

ماکسیمم میزان تجربه در شیفت S روی ماشین j_i $maxiEx_machine_{s,j_i}$

متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل ریاضی

تعداد واحد های تولیدی از پردازش سفارش l_m در شیفت کاری S روی ماشین j_i q_{s,l_m,j_i}

زمان شروع پردازش l_m روی ماشین j_i $s_process_{l_m,j_i}$

زمان تکمیل پردازش l_m روی ماشین j_i $F_process_{l_m,j_i}$

زمان پایان سفارش m F_order_m

زمان پردازش l_m روی ماشین j_i در شیفت S p_{l_m,s,j_i}

میزان تجربه ماشین j_i در شیفت S $iEx_machine_{s,j_i}$

میزان تجربه اپراتور o در شیفت S روی ماشین j_i $iEx_oprator_{o,s,j_i}$

میزان خستگی اپراتور o در انتهای شیفت S $Fe_{o,s}$

میزان خستگی اپراتور o در ابتدای شیفت S $Fs_{o,s}$

$FeMeanFatigue$ میزان میانگین خستگی

زمان شروع شیفت S s_shift_s

زمان پایان شیفت S f_shift_s

میزان دیرکرد در تحویل سفارش m $Tardiness_m$

مجموع هزینه دیرکرد در تحویل سفارش‌ها $TardPenalty$

اگر اپراتور o به ماشین j_i در شیفت S تخصیص یابد در غیر این صورت x_{o,s,j_i}

اگر خانواده k به سلول i تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت ۰ $y_{k,i}$

اگر پردازش l_m بعد از پردازش l'_m روی ماشین j_i انجام شود برابر ۱ در غیر این صورت ۰ TT_{l_m,l'_m,j_i}

اگر پردازش l_m روی ماشین j_i قرار بگیرد ۱ و در غیر این صورت ۰ z_{l_m,j_i}

اگر عملیات l_m روی ماشین j_i در شیفت S تولید شود ۱ در غیر این صورت ۰ $b_{l_m,j_i,s}$

اگر عملیات l_m روی ماشین j_i در دو شیفت متوالی S تولید شود ۱ در غیر این صورت ۰ $lag_{l_m,j_i,s}$

شیفت S محاسبه می‌کند. براساس محدودیت (۹) تعداد کل پردازش l_m تولید شده روی ماشین‌های مختلف در شیفت‌های مختلف باید بزرگتر از کل تقاضای سفارش l_m باشد. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند سفارش m در صورتی می‌تواند به ماشین j_i تخصیص یابد که آن سفارش متعلق به خانواده‌ای باشد که به سلول i تخصیص یافته است. محدودیت (۱۱) مشخص می‌کند هر خانواده از محصولات k تنها به یکی از سلول‌های i که قابلیت پردازش آن خانواده را دارد، تخصیص یابد. طبق رابطه (۱۲) در صورتی تولید از پردازش l_m در شیفت S روی ماشین j_i داریم که یکی از اپراتورهای o در آن شیفت به ماشین j_i تخصیص داده شود.

در رابطه (۱۳) مشخص می‌شود در هر شیفت و برای هر اپراتور o حداکثر یک ماشین j_i تخصیص داده می‌شود. رابطه (۱۴) مشخص می‌کند که در هر شیفت S و روی یک ماشین j_i حداکثر یک اپراتور o مشغول به کار است. طبق رابطه (۱۵) تنها در صورتی که اپراتور o توانایی کار با ماشین j_i را دارد به آن تخصیص داده می‌شود. در روابط (۱۶) تا (۱۸) زمان‌های شروع و پایان و مقدار تولید برای پردازش l_m تنها در صورتی محاسبه می‌شود که آن پردازش روی ماشین مربوطه قرار گرفته باشد. محدودیت (۱۹) تعیین می‌کند که زمان تکمیل سفارش m باید از ماکسیمم زمان پایان پردازش‌های آن سفارش روی ماشین‌های مختلف، بزرگتر باشد. محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) زمان شروع و پایان پردازش l_m را براساس اینکه در کدام شیفت‌ها در حال انجام هستند تنظیم می‌کنند و در رابطه (۲۲) مشخص می‌گردد تنها در صورتی می‌توانیم مقدار تولیدی از عملیات l_m روی ماشین j_i در شیفت S داشته باشیم که آن پردازش روی ماشین و شیفت مربوطه انجام شود.

در محدودیت (۲۳) مجموع میزان تجربه به دست آمده اپراتورها در شیفت S روی ماشین j_i محاسبه می‌شود. محدودیت (۲۴) مربوطه به میزان تجربه اپراتور o روی ماشین j_i در شیفت S می‌باشد که اگر اپراتور در شیفت مربوطه روی ماشین مشغول به کار باشد میزان یادگیری افزایش یافته در غیر این صورت در حال فراموشی می‌باشد. در محدودیت (۲۵) خستگی بین دو شیفت متوالی محاسبه می‌گردد به این صورت که خستگی در ابتدای شیفت S با میزان خستگی در انتهای شیفت قبلی ضرب در مقدار ریکاوری همان شیفت برابر است. محدودیت (۲۶) مربوط به محاسبه خستگی در انتهای شیفت S می‌باشد. در واقع اگر اپراتور در شیفت S مشغول به کار باشد، خستگی او در پایان شیفت برابر با میزان خستگی در ابتدای شیفت S ضرب در ضریب خستگی در حین شیفت خواهد بود و اگر اپراتور مشغول به کار نباشد میزان خستگی در انتهای شیفت S برابر خستگی در ابتدای شیفت S ضرب در ضریب بهبود است. رابطه (۲۷) نشان می‌دهد میزان خستگی اپراتورها در یک شیفت حداکثر به اندازه ۱ می‌باشد. طبق رابطه (۲۸) متغیر باینری $lag_{l_m,j_i,S}$ در صورتی که سفارش m در شیفت متوالی انجام بگیرد مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$$F_process_{l_m,j_i} \geq s_shift_s + p_{l_m,s,j_i} - M(1 - b_{l_m,j_i,s}) \quad (21)$$

$$q_{l_m,s,j_i} \leq b_{l_m,j_i,s} * M \quad (22)$$

$$iEx_machine_{s,j_i} = \sum_o iEx_oprator_{o,s,j_i} * x_{o,s,j_i} \quad (23)$$

$$iEx_oprator_{o,s,j_i} = iEx_oprator_{o,s-1,j_i} \left(\left(\left(\frac{s}{s-1} \right)^{-learning} \right) * x_{o,s,j_i} \right) + \left(\left(\frac{s}{s-1} \right)^{forget} * (1 - x_{o,s,j_i}) \right) \quad (24)$$

$$FS_{o,s} = Fe_{o,s-1} * e^{-mio*Rs} \quad (25)$$

$$Fe_{o,s} = FS_{o,s} * e^{-mio*Rs} \left(1 - \sum_{j_i} x_{o,s,j_i} \right) + \left(\sum_{j_i} x_{o,s,j_i} (FS_{o,s} * e^{-landa*sh_s}) \right) \quad (26)$$

$$Fe_{o,s} \leq 1 \quad (27)$$

$$lag_{l_m,j_i,s} > b_{l_m,j_i,s} + b_{l_m,j_i,s+1} - 1 \quad (28)$$

رابطه (۱) تابع هدف اول می‌باشد که مینیمم‌سازی هزینه دیرکرد سفارش است و رابطه (۲) تابع هدف دوم، مینیمم کردن میانگین دیرکرد خستگی اپراتورها می‌باشد. طبق رابطه (۳) زمان تکمیل هر سفارش l_m روی هر ماشین j_i بزرگتر از مجموع زمان شروع پردازش سفارش l_m روی آن ماشین و زمان پردازش عملیات سفارش l_m روی ماشین j_i در شیفت S و مدت زمان استراحت بین دو شیفت متوالی است. در رابطه (۴) زمان تکمیل آخرین عملیات سفارش m با موعد تحویل آن سفارش مقایسه می‌شود و اگر این اختلاف بزرگتر از صفر باشد برای تحویل این سفارش دیرکرد منظور می‌شود. رابطه (۵) زمان‌های شروع و پایان برای دو پردازش l_m و l'_m را روی ماشین j_i تنظیم می‌کند به نحوی که مشخص باشد یکی از پردازش‌ها باید قبل از پردازش دیگر روی ماشین قرار گیرد. اگر دو پردازش l_m و l'_m روی یک ماشین مشترک j_i باشد باید یکی از پردازش‌ها قبل از آن یکی پردازش روی ماشین j_i قرار گیرد که توسط رابطه (۶) تضمین می‌گردد.

طبق رابطه (۷) مدت زمان شیفت کاری S باید از مجموع زمان پردازش‌هایی که روی هر ماشین j_i در این شیفت پردازش می‌شود بزرگتر باشد. رابطه (۸) زمان پردازش l_m در شیفت S روی ماشین j_i را به صورت حاصل ضرب زمان پردازش اولین واحد عملیات l_m در مقدار تولیدی از سفارش l_m در شیفت S و میزان تجربه اپراتور ماشین j_i در

حدود بالا و پایین متغیر $iEx_machine_{o,s,j_i}$ به ترتیب $miniEx_machine_{s,j_i}$ و $maxiEx_machine_{s,j_i}$ است که طبق مطالعات انجام شده مقادیر آن‌ها ۱ و ۱/۵ می‌باشد. حال می‌توان با استفاده از روابط (۲۹) و (۳۰) حاصل ضرب این دو متغیر پیوسته را به روش مک کورمیک خطی سازی نمود.

دومین روش برای خطی سازی حاصل ضرب دو متغیر پیوسته این است که یکی از متغیرها را به صورت عدد صحیح در نظر گرفت و آن را به صورت ترکیب خطی از متغیرهای باینری تبدیل کنیم. حال با حاصل ضرب متغیر باینری در پیوسته مواجه هستیم که به سادگی قابل خطی سازی است. فرض کنید x یک متغیر عدد صحیح و حد بالای این متغیر UB باشد. با تعریف n عدد متغیر باینری y به نحوی که n کوچکترین عدد طبیعی صادق در رابطه $UB \geq 2^n - 1$ باشد می‌توان متغیر عدد صحیح x را توسط رابطه $x = \sum_{rr=1}^{ub} y_{rr} * 2^{n-1}$ به متغیرهای باینری تبدیل کرد. به منظور خطی سازی حاصل ضرب متغیر باینری y در متغیر پیوسته Z می‌بایست با جایگزینی متغیر پیوسته w به جای $x * y$ و افزودن روابط $w \leq Z$ و $w \leq M * y$ و $w \geq Z - w$ دست یافت. در این روابط M نشان‌دهنده یک عدد بزرگ است.

باتوجه به مدل مسئله و رابطه (۸) بایستی متغیر پیوسته q_{s,l_m,j_i} را به عدد صحیح تبدیل نموده و سپس با استفاده از روش حاصل ضرب عدد صحیح در پیوسته محدودیت (۸) خطی سازی می‌شود. ابتدا برای متغیر q_{l_m,s,j_i} یک حد بالا طبق رابطه (۳۱) مشخص کرده و سپس این متغیر به باینری تبدیل می‌گردد.

$$q_{l_m,s,j_i} = \sum_{rr=1}^n 2^{rr-1} * q'_{l_m,rr,s,j_i} \quad (32)$$

با جای گذاری رابطه (۳۲) در محدودیت (۸) می‌توان به رابطه (۳۳) رسید که در آن عبارتهای حاصل ضربی از متغیر باینری q'_{l_m,rr,s,j_i} در متغیر پیوسته $iEx_machine_{o,s,j_i}$ وجود دارد که باتوجه به توضیحات فوق به سادگی قابل خطی سازی است.

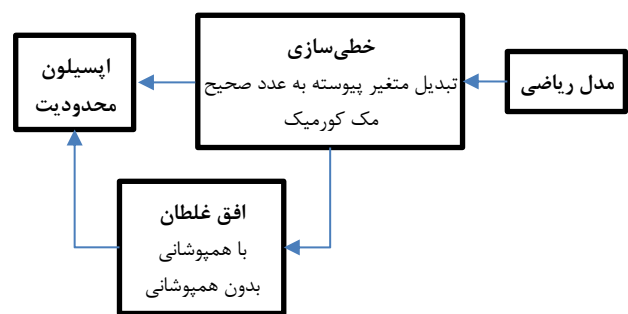
$$p_{l_m,s,j_i} = \sum_{rr}^n 2^{rr-1} * iEx_machine_{o,s,j_i} * q'_{l_m,rr,s,j_i} * P^1_{l_m} \quad (33)$$

در رابطه (۲۶) متغیر باینری x_{o,s,j_i} و متغیر پیوسته $FS_{o,s}$ در هم ضرب شده‌اند. همچنین در رابطه (۲۸) حاصل ضرب متغیر باینری x_{o,s,j_i} در متغیر پیوسته $iEx_oprator_{o,s,j_i}$ تشکیل شده است و در رابطه (۲۴) نیز عبارت غیرخطی حاصل ضرب متغیر باینری x_{o,s,j_i} و متغیر پیوسته $iEx_oprator_{o,s-1,j_i}$ وجود دارد. تمام این عبارات غیرخطی باتوجه به توضیحات حاصل ضرب متغیر باینری در پیوسته قابل خطی سازی است.

۴-۲. الگوریتم ابتکاری افق غلطان

باتوجه به زمان اجرای زیاد روش‌های حل دقیق در ابعاد بزرگ مسئله،

به منظور حل این مسئله ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای آن توسعه داده شد. این مدل دارای محدودیت‌های غیرخطی از نوع حاصل ضرب دو متغیر می‌باشد که برای خطی سازی آن‌ها از دو روش مک کورمیک ($McCormic$) و تبدیل متغیر پیوسته به متغیرهای عدد صحیح استفاده خواهد شد. برای حل مدل ریاضی در نمونه‌های با ابعاد بالا از روش افق غلطان در دو حالت با همپوشانی و بدون همپوشانی استفاده می‌شود و در ادامه تعداد دوره‌های مناسب برای این الگوریتم در حالت‌های مختلف تنظیم خواهد شد. مدل ریاضی این مسئله دارای دو تابع هدف از جنس‌های متفاوت است بنابراین برای حل آن به صورت یک مسئله دوهدفه و به دست آوردن نقاط پارتو از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است. مراحل حل مدل ریاضی در نمودار (۴) آمده است.



نمودار (۴). مراحل حل مدل ریاضی

۴-۱. انواع روش‌های خطی سازی مدل

محدودیت‌های (۸)، (۲۳)، (۲۴) و (۲۶) در مدل ارائه شده، غیرخطی می‌باشد. در این بخش به معرفی روش‌های تبدیل روابط غیرخطی به خطی خواهیم پرداخت.

برای تقریب خطی ضرب دو متغیر پیوسته می‌توان از روش مک کورمیک اقدام کرد. در این روش که توسط هوکر [۴۴] ارائه شده است براساس حدود بالا و پایین متغیرهای تشکیل‌دهنده رابطه غیرخطی، تقریب خطی آن ارائه می‌گردد. فرض کنید x_1 و x_2 متغیرهای پیوسته باشند که با جایگزینی متغیر پیوسته y به جای $x_1 * x_2$ و افزودن روابط (۲۹) و (۳۰) می‌توان به تقریب خوبی برای ضرب دو متغیر دست یافت. در این روابط $[L_i, U_i]$ بازه تغییرات متغیر x_i است.

$$L_2 \cdot x_1 + L_1 \cdot x_2 - L_1 \cdot L_2 \leq y \leq L_2 \cdot x_1 + U_1 \cdot x_2 - U_1 \cdot L_2 \quad (29)$$

$$U_2 \cdot x_1 + U_1 \cdot x_2 - U_1 \cdot U_2 \leq y \leq U_2 \cdot x_1 + L_1 \cdot x_2 - L_1 \cdot U_2 \quad (30)$$

در رابطه (۸) از مدل غیرخطی، دو متغیر پیوسته q_{s,l_m,j_i} و $iEx_machine_{o,s,j_i}$ در هم ضرب شده‌اند. حدود بالا و پایین متغیر q_{s,l_m,j_i} به ترتیب تحت عناوین $minq_{s,l_m,j_i}$ و $maxq_{s,l_m,j_i}$ به عنوان پارامتر ورودی تعریف شده‌اند. حد پایین $minq_{s,l_m,j_i}$ برابر صفر و محاسبه پارامتر $maxq_{s,l_m,j_i}$ با استفاده از رابطه (۳۱) انجام می‌گیرد.

$$maxq_{s,l_m,j_i} = \left(\frac{sh_s}{minEx'_{s,j_i} * P^1_{l_m}} \right) \quad (31)$$

Algorithm: RHH algorithm with overlap**Input:** *totalshift* and *cycle* parameters**For** $s = 1$ **to** $totalshift - cycle + 1$ **For** $ss = s$ **to** $s + cycle - 1$ variables in shifts ss are binary and others are relaxed as continuous**End**

solve the model

fix the binary variables based on the current solution

End

از آنجایی که مسأله مورد بررسی از نوع دوهدفه است بنابراین برای مقایسه روش حل نیاز به معیارهای کارایی می باشد که بتوانند مرزهای پارتو (مجموعه نقاط پارتو) را با هم مقایسه کنند. در این پژوهش از سه معیار تعداد نقاط پارتوی تولید شده، میانگین زمان حل و معیار گسترش جوابها به منظور مقایسه جوابها استفاده می شود. معیار گسترش نشان دهنده گستردگی و کشیدگی مرز پارتو می باشد که باتوجه به فاصله نقاط انتهایی مرز پارتو از یکدیگر براساس رابطه (۳۴) محاسبه می شود و الگوریتم با معیار گسترش بزرگتر دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتمها می باشد. در این رابطه، M معرف تعداد اهداف مسأله می باشد و f_m^i نشان دهنده مقدار تابع هدف m ام بر روی نقطه i ام در مرز پارتو می باشد. نماد Q نیز مجموعه جوابها در مرز پارتو را مشخص می کند.

$$D = \sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\max_{1 \leq i \leq |Q|} f_m^i - \min_{1 \leq i \leq |Q|} f_m^i \right)^2} \quad (34)$$

۵. نتایج محاسباتی

در این بخش ابتدا نحوه تولید پارامترهای ورودی برای تجزیه و تحلیل مدل ارائه و سه گروه ابعادی G1 تا G3 نیز برای مسأله تعریف خواهد شد. در ادامه مقایسه روشهای خطی سازی و انتخاب روش خطی سازی مناسب برای مسأله ارائه می شود. سپس با یکی از مسائل تولید شده گروه G2 نحوه عملکرد الگوریتم *RHH* در دو حالت همپوشانی و بدون همپوشانی را بررسی کردیم و مسائل نمونه برای انتخاب متغیر باینری مناسب برای آزاد و فیکس شدن در الگوریتم مورد آزمون قرار گرفته است. با تولید پنج مسأله برای هر گروه ابعادی، کارایی مدل با استفاده از روش حل دقیق و روش *RHH* بررسی شده است. مدل ریاضی با استفاده از روش حل دقیق و روش *RHH* در نرم افزار GAMS v24.1.2 پیاده سازی شده است و توسط یک کامپیوتر رومیزی با مشخصات CPU: Core i7 2.20 GHz و RAM: 8 GB اجرا شده اند.

۵-۱. نحوه تولید پارامترهای ورودی

چگونگی تولید داده های ورودی برای مسأله در جدول (۲) ارائه شده است که در آن نماد U نشان دهنده توزیع یکنواخت می باشد. به عنوان مثال، زمان پردازش اولیه برای پردازش های یک سفارش قبل از اینکه یادگیری-فراموشی اپراتور روی آن تأثیر بگذارد از بازه یکنواخت پیوسته بین ۱ و ۳ تولید می شود.

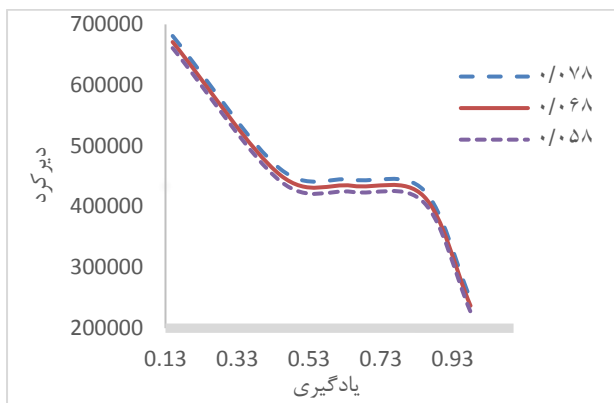
ارائه الگوریتمی کارا جهت بهینه سازی مدل ضروری می باشد. می توان با استفاده از الگوریتم افق غلطان (*Rolling Horizon Heuristic*) با عنوان اختصاری *RHH* مدل را حل نموده و زمان حل را کاهش داده شود. در این بخش ابتدا ساختار کلی الگوریتم *RHH* در دو حالت همپوشانی و بدون همپوشانی تشریح می شود و در ادامه پس از معرفی نمادهای استفاده شده، شبه کد الگوریتم شرح داده خواهد شد.

رویکرد افق غلطان زیرمجموعه ای از متغیرهای عدد صحیح مسأله را انتخاب می کند و شرط گسسته بودن را برای متغیرهای عدد صحیح باقیمانده کاهش می دهد. مدل تحت شرایط آزادسازی برخی متغیرها حل خواهد شد و متغیرهای عدد صحیح در مدل را به مقادیر جواب به دست آمده ثابت می کند. سپس تعدادی از متغیرهای عدد صحیح دیگر به صورت پیوسته در نظر گرفته می شوند و این فرآیند تا زمانی که مسأله حل شود یا غیرممکن تشخیص داده شود تکرار می شود. الگوریتم افق غلطان برای مدل هایی استفاده می شود که چنددوره ای می باشند و یا اندیسی دارند که مشابه با زمان عمل می کند (مثلاً اندیسی شماره شیفت). در این الگوریتم باید متغیرهای مناسب که وابسته به زمان یا شیفت هستند را در دوره مورد نظر به صورت عدد صحیح در نظر گرفت و در بقیه دوره ها آزاد باشد. این الگوریتم را می توان در دو حالت همپوشانی و بدون همپوشانی اجرا کرد.

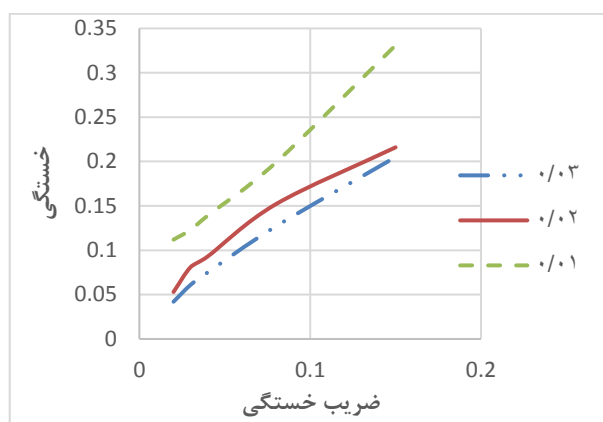
برای مسأله در دست دو متغیر $x_{o,s,j,i}$ و $b_{l,m,j,i,s}$ برای فرآیند آزاد کردن و ثابت سازی انتخاب شده اند. این دو متغیر هر دو باینری بوده و وابسته به اندیسی شیفت مسأله یعنی s هستند. در این الگوریتم نماد *totalshift* نشان دهنده تعداد شیفتها و *cycle* نشان دهنده طول دوره برای غلطانند اندیسی می باشد. در بخش تحلیل نتایج مشخص خواهد شد که کدامیک از این دو متغیر برای فرآیند آزادسازی مناسب تر هستند و طول مناسب برای دوره های *cycle* تنظیم خواهد شد.

ابتدا تعداد کل شیفتها و تعداد طول هر دوره غلطان مشخص می شود. سپس متغیرهای باینری $x_{o,s,j,i}$ و $b_{l,m,j,i,s}$ وابسته به اندیسی شیفت را در نظر گرفته و باتوجه به طول دوره مشخص شده، متغیرهای مربوط به تکرار فعلی را باینری و در دوره های باقیمانده به صورت پیوسته در نظر می گیرد و متغیرهای باینری تکرار فعلی باتوجه به مقداری که در جواب گرفته است فیکس می شود. همین عملیات در تکرارهای بعدی الگوریتم مجدداً تکرار می شود. الگوریتم را می توان در دو حالت بدون همپوشانی و همپوشانی اجرا کرد، در حالت بدون همپوشانی به طور مثال اگر تعداد کل شیفتها برابر ۶ و طول دوره برابر ۳ باشد، الگوریتم ابتدا شیفت های ۱ تا ۳ را در نظر می گیرد و متغیرهای مربوطه در ۳ شیفت اول را باینری و سایر شیفتها را پیوسته فرض کرده و مدل حل می شود. سپس این متغیرها در شیفت های ۱ تا ۳ فیکس می شود و مدل شیفت های ۴ و ۵ و ۶ را در نظر می گیرد. حالت دوم یعنی همپوشانی، اگر طول دوره ۳ باشد ابتدا شیفت های ۱ و ۲ و ۳ سپس برای تکرار بعدی الگوریتم، دوره های ۲ و ۳ و ۴ در نظر گرفته می شود. شبه کد این الگوریتم برای حالت همپوشانی مطابق زیر است.

معکوس دارند. طبق نمودار زیر زمانی که ضریب بهبود در سطح بالا ۰/۰۳ است میزان خستگی در کمترین میزان می‌باشد.



نمودار (۵). تأثیر ضریب یادگیری در دیرکرد



نمودار (۶). تأثیر ضریب بهبود در میزان خستگی در گروه G2

نمودار (۷) رابطه بین تابع هدف اول (میزان دیرکرد) و تابع هدف دوم (میانگین خستگی) می‌باشد که محور افقی میزان خستگی و محور عمودی میزان دیرکرد را نمایش می‌دهد. نمودار پارتو برای گروه G2 در ۵ مسأله نمونه متفاوت با استفاده از روش اسپیلون محدودیت جهت تبدیل مسأله دوهدفه به تک‌هدفه انجام شده است. به این صورت که ماکسیمم و مینیمم مقدار هر تابع هدف را محاسبه کرده و یک تابع هدف را براساس بازه مینیمم و ماکسیمم تابع دوم محاسبه کرده و سپس نمودار پارتو را رسم کرده‌ایم. همان‌طور که در نمودار نمایش داده می‌شود با افزایش تابع هدف اول (دیرکرد) تابع هدف دوم (خستگی) کاهش می‌یابد.

۳-۵. مقایسه روش‌های خطی‌سازی

در بخش ۱-۴ برای خطی‌سازی مدل از دو روش مک‌کورمیک و تبدیل متغیر پیوسته به باینری استفاده شد. در اینجا نتایج این دو روش خطی‌سازی بر روی یکی از مسائل گروه G2 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نمونه مسأله طبق جدول (۴) مقدار تولیدی و میزان تجربه ماشین اول در سلول اول از سفارش اول در شیفت دوم مورد بررسی قرار داده شده است. طبق مقادیر به‌دست آمده، روش مک‌کورمیک حاصل ضرب دو متغیر $iEx_machine_{o,s,j_i}$ و qs_{l,m,j_i} را با عنوان

ضرایب یادگیری، فراموشی، خستگی و بهبود براساس مقادیر استاندارد آن‌ها از مقالات جابر [۱۲] و [۴۵] استخراج شده‌اند. مقدار تقاضای پردازش l_m از سفارش m به‌صورت حاصل ضرب تقاضای آن سفارش در تعداد پردازش لازم برای تولید یک واحد از آن سفارش تعریف می‌شود.

جدول (۲). نحوه تولید پارامترهای ورودی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$P1(l,m)$	$U(1,3)$	D_m	$U(50,150)$
Mio	$U(0.01,0.02)$	D'_{l_m}	$D_m * 00(m,l)$
$Forget$	$U(0.058,0.078)$	$Landa$	$U(0.02,0.04)$
$Lerning$	$U(0.25,0.45)$		

مسأله ایجاد و جزئیات هر گروه که شامل تعداد تقاضا، سفارش، محصول، سلول و ماشین می‌باشد در جدول (۳) ارائه شده است. برای هر کدام از این گروه‌ها پنج نمونه مسأله تصادفی بصورت مستقل تولید شده است. گروه‌های G1 تا G3 به ترتیب مسایل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ را شامل می‌شود. در این مسایل نمونه، مقادیر تقاضا، تعداد سفارشات، محصولات، سلول‌های تولیدی و تعداد ماشین‌آلات در هر سلول به ترتیب از گروه G1 به گروه G3 افزایش می‌یابد.

جدول (۳). مشخصات هر کدام از گروه مسائل نمونه تصادفی

گروه	تقاضا	سفارش	محصول	سلول	ماشین
G1	۵۰	۴	۲	۴	۱۲
G2	۱۰۰	۶	۳	۴	۱۳
G3	۱۵۰	۸	۵	۵	۱۵

۲-۵. اعتبارسنجی مدل

به‌منظور اعتبارسنجی این مدل، با یک مثال عددی از گروه G2 حالت‌های متفاوت از این مدل رسم و تجزیه و تحلیل شده است. نمودار (۵) تأثیر یادگیری روی تابع هدف اول یعنی میزان دیرکرد می‌باشد که محور افقی ضریب یادگیری و محور عمودی میزان دیرکرد تقاضا را نشان می‌دهد و هر یک از خطوط نیز مربوط به ضریب فراموشی متفاوتی است. با افزایش یادگیری، زمان پردازش یک محصول کاهش یافته است در نتیجه دیرکرد تقاضا هم کاهش می‌یابد. تأثیر یادگیری روی دیرکرد در سه سطح ضریب فراموشی ۰/۰۵۸، ۰/۰۶۸ و ۰/۰۷۸ مورد بررسی قرار گرفته است. بالاترین ضریب فراموشی ۰/۰۷۸ می‌باشد که طبق نمودار تابع هدف اول یعنی دیرکرد هم در این حالت افزایش یافته است.

نمودار (۶) میزان تغییرات تابع هدف دوم یعنی خستگی براساس ضریب خستگی را نمایش می‌دهد که محور عمودی ضریب خستگی و محور افقی میزان خستگی می‌باشد. این تغییرات در سه سطح ضریب بهبود ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ مورد بررسی قرار گرفته است. میزان خستگی با ضریب خستگی رابطه مستقیم و با ضریب بهبود رابطه

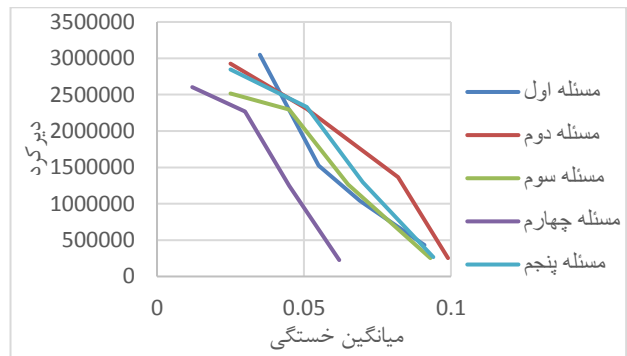
۴-۵. انتخاب متغیر و طول دوره مناسب در الگوریتم RHH

در الگوریتم افق غلطان انتخاب متغیر مناسب برای آزادسازی و فیکس کردن بسیار مهم می باشد و تأثیر زیادی در زمان حل و میزان اختلاف تابع هدف از روش حل دقیق دارد. در این مسأله دو متغیر باینری و وابسته به شیفیت x_{0,s,j_i} و $b_{l_m,j_i,s}$ وجود دارد که در سه حالت می توان الگوریتم را باتوجه به متغیر انتخاب شده بررسی کرد. حالت اول آزاد کردن متغیر x_{0,s,j_i} ، حالت دوم آزاد کردن متغیر $b_{l_m,j_i,s}$ و حالت سوم هر دو متغیر آزاد و فیکس شود. نتایج از نظر زمان اجرا و میزان فاصله ای که با مقدار تابع هدف از روش حل دقیق دارد با یک مثال عددی از گروه G2 در سه حالت گفته شده و به صورت همپوشانی و بدون همپوشانی مورد بررسی قرار می گیرد.

زمانی که مدل با الگوریتم RHH با آزادسازی و فیکس کردن متغیرهای x_{0,s,j_i} و $b_{l_m,j_i,s}$ اجرا شد، در هر کدام از دوره ها باتوجه به ساختار مدل، این متغیرها مقدار باینری نمی گیرند در نتیجه مقدار تابع هدف اول صفر می باشد. گاهی چند دسته متغیر باینری در مسأله وجود دارد و به این نتیجه می رسیم که نباید همه متغیرها در فرآیند الگوریتم دخیل شوند. پس انتخاب همزمان دو متغیر برای آزادسازی و فیکس کردن مناسب نمی باشد.

جدول (۵) شامل نتایج اجرای مدل در دو حالت همپوشانی و بدون همپوشانی با طول دوره های ۱، ۲ و ۳ می باشد. هر یک از زوج اعداد داخل جدول نشان دهنده مقادیر توابع هدف اول و دوم است. به ازای هر یک از روش ها ۵ نقطه پارتو براساس روش اسپیلون محدودیت در جدول به دست آمده است. براساس نتایج، متغیر x_{0,s,j_i} برای آزادسازی و فیکس کردن باتوجه به پایین بودن زمان حل مسأله و میزان اختلاف کمتر برای تابع هدف اول از روش حل دقیق، برای الگوریتم RHH مناسب می باشد.

به صورت دقیق محاسبه نکرده و مقدار به دست آمده را به بالا گرد می کند. در نتیجه در رابطه (۸) زمانی که میزان تجربه در روش مک کورمیک بیشتر محاسبه می گردد، زمان پردازش سفارش اول در شیفیت دوم افزایش یافته است و باعث افزایش نادرست میزان هزینه دیرکرد تابع هدف اول و افزایش میزان خستگی تابع هدف دوم می گردد. زمان حل مدل با روش مک کورمیک نیز نسبت به روش تبدیل متغیر پیوسته به باینری حدوداً ۱۰ ثانیه بیشتر می باشد. لذا از روش دوم خطی سازی یعنی تبدیل متغیر پیوسته به باینری که مقدار دقیق محاسبه می کند در محاسبات بعدی استفاده می شود.



نمودار (۷). نمودار پارتو خستگی-دیرکرد در گروه G2

جدول (۴). مقایسه روش های خطی سازی روی مثال گروه G2

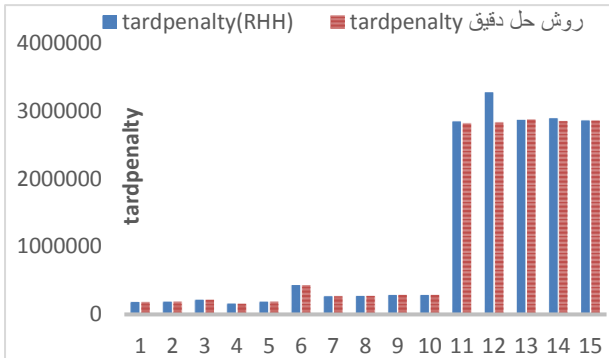
روش حل	$FeMeanFatigue$	$TardPenalty$	$Ex'q_{s,l_m,j_i}$	q_{s,l_m,j_i}	$iEx_machine_{0,s,j_i}$
مک کورمیک	۰/۲۵۹	۲۵۶۴۶۷	۵۷	۱۰۱	۰/۵۶۳
تبدیل متغیر	۰/۱۵۹	۱۳۵۵۸	۵۶/۸۶۳	۱۰۱	۰/۵۶۳

جدول (۵). نتایج اجرای الگوریتم RHH در حالت همپوشانی و بدون همپوشانی برای گروه G2

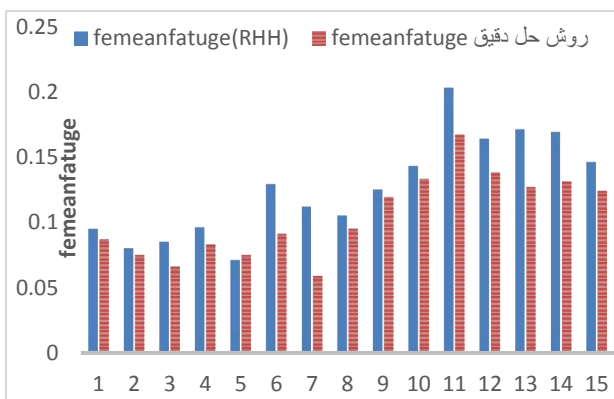
حل دقیق	بدون همپوشانی			همپوشانی		
	Cycle=3	Cycle=2	Cycle=1	Cycle=3	Cycle=2	
x_{0,s,j_i} متغیر	(۲۵۶۴۶۷ - ۰/۱۵۹)	(۲۵۴۷۷۱ - ۰/۱۲)	(۲۵۶۹۰۲ - ۰/۱)	(۲۵۷۸۹۰ - ۰/۱۲۶)	(۲۷۰۲۵۱ - ۰/۱۴۲)	(۲۸۵۳۰۷ - ۰/۱۴۳)
	(۲۵۳۴۵۷ - ۰/۲)	(۲۵۴۴۶۷ - ۰/۱۲۱)	(۲۵۷۴۰۶ - ۰/۱۱)	(۲۹۷۱۴۸ - ۰/۱۲۸)	(۲۸۴۱۴۳۶ - ۰/۱۳۵)	(۲۷۲۴۹۲ - ۰/۱۳۸)
	(۲۶۸۵۳۷ - ۰/۲۵)	(۲۵۷۸۶۹ - ۰/۱۲۸)	(۲۶۸۸۲۳ - ۰/۱۲)	(۴۵۴۱۴۱ - ۰/۱۲۹)	(۲۹۶۷۲۴ - ۰/۱۲۵)	(۲۷۶۵۴۲ - ۰/۲۳)
	(۲۶۵۶۵۴ - ۰/۳)	(۲۶۵۶۴۱ - ۰/۱۴۱)	(۲۶۶۶۶۸ - ۰/۱۴)	(۷۲۸۴۶۱ - ۰/۱۳)	(۲۸۸۹۱۹ - ۰/۱۲)	(۲۷۴۰۷۹ - ۰/۱۸)
	(۲۶۶۶۵۳ - ۰/۲۸۳)	(۲۸۶۴۶۷ - ۰/۱۲۷)	(۲۷۰۹۰۲ - ۰/۱۴۷)	(۴۹۱۸۱۹ - ۰/۱۳۱)	(۲۸۹۶۱۴ - ۰/۱۱)	(۲۷۵۶۴۳ - ۰/۱۳)
$b_{l_m,j_i,s}$ متغیر	(۲۵۶۴۶۷ - ۰/۱۵۹)	(۳۱۵۶۲۱ - ۰/۱۱)	(۳۵۵۴۶۳ - ۰/۱۲)	(۳۹۵۵۲۳ - ۰/۱۱)	(۳۵۵۴۳۶ - ۰/۱۱)	(۳۸۵۴۵۲ - ۰/۱۱۸)
	(۲۵۳۴۵۷ - ۰/۲)	(۳۴۶۵۲۱ - ۰/۱۲۳)	(۳۶۵۴۵۴ - ۰/۱۱)	(۳۸۵۵۴۸ - ۰/۱۲)	(۳۶۵۴۳۵ - ۰/۱۲۳)	(۳۷۵۴۳۴ - ۰/۱۲۸)
	(۲۶۸۵۳۷ - ۰/۲۵)	(۳۶۵۲۴۱ - ۰/۱۳۳)	(۳۲۶۵۴۱ - ۰/۱۲۳)	(۳۳۵۵۴۱ - ۰/۱۳)	(۳۴۵۴۳۷ - ۰/۱۳۳)	(۳۹۵۴۳۵ - ۰/۱۳۸)
	(۲۶۵۶۵۴ - ۰/۳)	(۳۹۵۴۵۶ - ۰/۱۴۳)	(۳۹۵۴۵۲ - ۰/۱۳۳)	(۳۲۵۴۸۵ - ۰/۱۴)	(۳۹۵۴۳۴ - ۰/۱۴۳)	(۳۵۵۴۳۱ - ۰/۱۴۸)
	(۲۶۶۶۵۳ - ۰/۲۸۳)	(۳۹۵۷۸۵ - ۰/۱۵۳)	(۳۸۹۸۶۵ - ۰/۱۴۳)	(۳۳۵۴۶۵ - ۰/۱۵)	(۳۹۵۲۱۵ - ۰/۱۵۳)	(۳۹۵۶۸۷ - ۰/۱۵۸)

جدول (۶). نتایج حل الگوریتم در حالت آزادسازی متغیر x_{o,s,j_i} برای گروه G2

حل دقیق	بدون همپوشانی			همپوشانی		
	Cycle=3	Cycle=2	Cycle=1	Cycle=3	Cycle=2	
۳۶۵۲	۱۰۸۵۶	۷	۱۰۹	۱۱۷۶۰	۱۰۳	میانگین زمان حل (s)
۵	۲	۵	۲	۳	۲	میانگین تعداد نقاط پارتو
۳۰۹۳۴۹۴	۲۸۶۳۵۴	۳۱۷۹۰۹۸	۲۸۰۸۳۸۱	۹۴۲۲۱	۶۲۶۱۵	میانگین معیار گسترش



نمودار (۸). نمودار تابع هدف اول برای گروه مسئله G3, G2, G1



نمودار (۹). نمودار تابع هدف دوم برای گروه مسئله G3, G2, G1

جدول (۷). مقایسه نتایج الگوریتم RHH با حل دقیق

تعداد محدودیت	تعداد متغیر کل	تعداد متغیر باینری	زمان حل			گروه مسئله	حل دقیق
			Mean	Max	Min		
۶۱۳۲۳	۱۳۶۱۶	۲۷۷۰۱	۴۳	۸۸	۲۵	G1	حل دقیق
۸۹۱۲۸	۲۱۵۷۹	۴۱۱۴۴	۷۹	۸۱	۷۷	G2	
۱۳۹۴۴۷	۳۵۵۲۵	۶۵۱۲۲	۷۳۷۲	۸۶۹۶	۷۱۸۶	G3	
۴۹۹۴۶	۱۲۹۹۲	۲۷۸۲۲	۲۴	۲۷	۲۱	G1	RHH
۷۲۹۰۳	۲۰۹۰۳	۴۱۲۳۴	۳۵	۳۸	۳۱	G2	
۱۰۲۲۶۶	۳۰۴۸۵	۵۶۸۴۲	۳۲۵	۳۳۲	۳۰۶	G3	

۵-۶. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی

در این بخش تحلیل حساسیت مدل‌های ارائه شده نسبت به برخی از پارامترهای مسئله انجام شده است که شامل ضریب خستگی، ضریب بهبود، ضریب یادگیری و فراموشی است که تمامی این تحلیل‌ها بر روی گروه G2 انجام می‌شود.

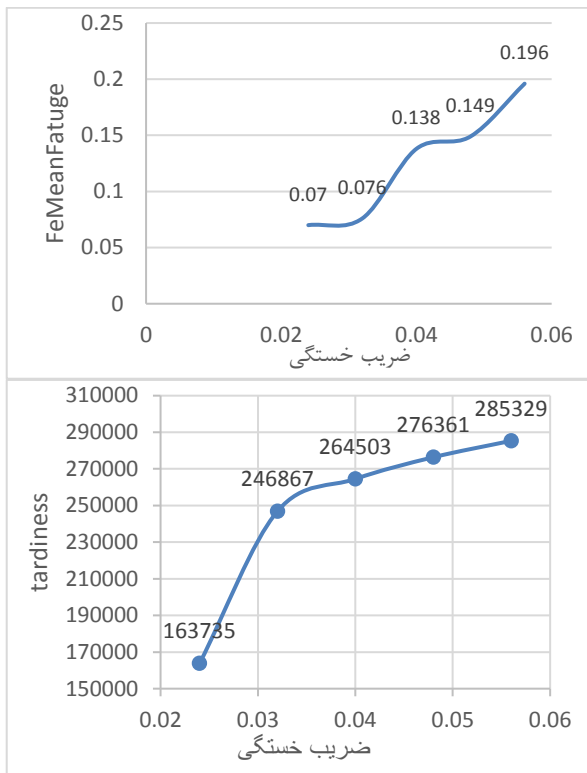
جدول (۶) میانگین زمان حل مدل، تعداد نقاط پارتو و معیار گسترش مرز پارتو برای هر کدام از حالت‌های الگوریتم با طول دوره‌های ۱ تا ۳ را نمایش می‌دهد. این نتایج بین پنج مسئله نمونه در گروه G2 به دست آمده است. هر حالتی که زمان حل آن کمتر و تعداد نقاط پارتو و معیار گسترش بزرگتری داشته باشد دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر حالات الگوریتم است. لذا طبق جدول (۶) حالت بدون همپوشانی با طول دوره ۲ برای این مسئله مناسب می‌باشد.

۵-۵. نتایج الگوریتم RHH

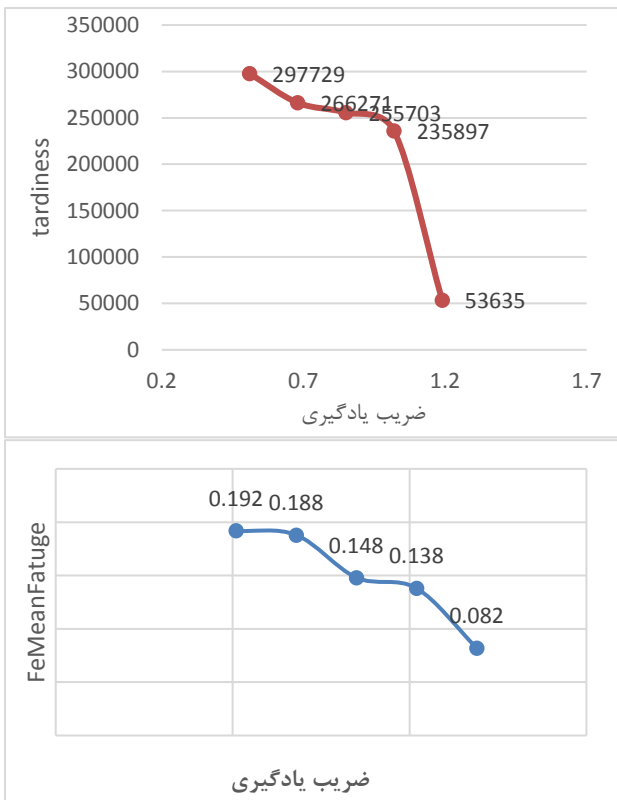
برای هر گروه مسئله G1، G2 و G3 پنج مسئله متفاوت اجرا شده است که از شماره ۱ تا ۵ برای گروه G1 و مسئله ۶ تا ۱۰ برای گروه G2 و مسائل ۱۱ تا ۱۵ برای گروه G3 با حالت بدون همپوشانی با طول دوره ۲ اجرا شده است. نمودارهای (۸) و (۹) برای هر کدام از گروه‌های G1، G2 و G3 که هر کدام پنج مسئله متفاوت می‌باشد، رسم شده است. هر کدام از مسئله‌ها با روش حل اپسیلون محدودیت دارای پنج نقطه پارتو می‌باشد که در این نمودارها میانگین آن نقاط در نظر گرفته شده است. در نمودار (۸) محور افقی مسئله‌های مورد بررسی و محور عمودی تابع هدف اول یعنی میزان دیرکرد می‌باشد که با روش حل دقیق و الگوریتم ابتکاری RHH با حالت بدون همپوشانی با طول دوره ۲ ترسیم شده است. نمودار (۹) برای تابع هدف میزان خستگی مدل رسم شده است. همان‌طور که در این دو نمودار مشاهده می‌شود، میزان دیرکرد و خستگی با استفاده از الگوریتم ابتکاری بیشتر از روش حل دقیق می‌باشد ولی میزان اختلاف بین مقادیر حاصل از دو روش حدود ۲ درصد می‌باشد که دقت بالای الگوریتم ابتکاری RHH را در حل این مسئله نشان می‌دهد.

جدول (۷) تعداد متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها به همراه مینیمم، ماکسیمم و میانگین زمان حل ۵ مسئله نمونه در هر گروه G1, G2, G3 با استفاده از روش حل دقیق و الگوریتم افق غلطان با حالت بدون همپوشانی با طول ۲ دوره را نشان می‌دهد. مطابق نتایج این جدول، با افزایش ابعاد مسئله و گروه‌های بزرگتر، پیچیدگی مسئله نیز افزایش می‌یابد و به دنبال آن زمان حل هم نیز افزایش یافته است. اما اجرای مدل توسط الگوریتم RHH در زمان بسیار کمتری نسبت به زمان حل روش حل دقیق انجام گرفته است و این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر به اجرای مدل در ابعاد بالاتر هم می‌باشد. در این جدول، تعداد محدودیت‌های مدل با استفاده از الگوریتم افق غلطان کمتر از روش حل دقیق می‌باشد و تعداد متغیرهای باینری نیز در الگوریتم افق غلطان نسبت به روش حل دقیق کاهش یافته است.

موجب کاهش دیرکرد تحویل سفارش‌ها خواهد شد. با انجام اقداماتی مانند افزایش انگیزه اپراتور، تعیین هدف برای هر اپراتور، استفاده از اپراتورهای متخصص، توسعه روش‌های کار و پویایی محیط می‌توان ضریب یادگیری را افزایش داد.

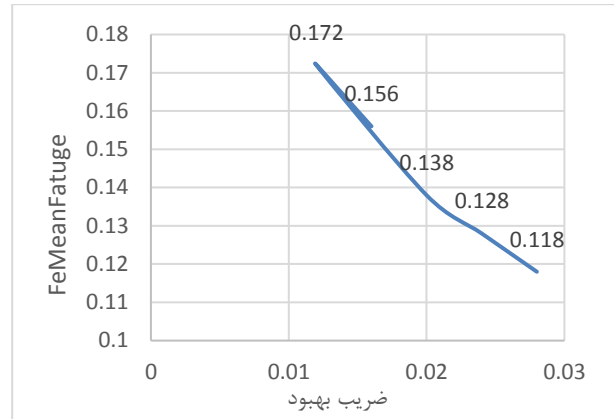


نمودار (۱۰). نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر ضریب خستگی



نمودار (۱۱). نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر ضریب یادگیری

تحلیل حساسیت ضریب بهبود: در شکل (۱۰) به منظور بررسی تغییر پارامتر ضریب بهبود بر نتایج حل مدل، مقدار اولیه این پارامتر در اعداد ۰/۸ و ۰/۶ و ۱/۲ و ۱/۴ ضرب شده و با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترهای مسأله، آنرا حل می‌کنیم. در مثال مورد بررسی مقدار اولیه ضریب بهبود برابر با ۰/۰۲ است.



نمودار (۱۲). نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر ضریب بهبود

از آنجایی که تغییر ضریب بهبود و خستگی روی تابع هدف اول یعنی دیرکرد به صورت مستقیم تأثیری ندارد لذا نتایج فقط روی تابع هدف دوم که همان میزان خستگی می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. با مقایسه نتایج مشخص است که ضریب بهبود و میزان خستگی رابطه معکوس دارند که البته با توجه به ماهیت ضریب بهبود این نتیجه کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

تحلیل حساسیت ضریب خستگی: مقدار اولیه ضریب خستگی براساس جدول (۲) به صورت یکنواخت از بازه (۰/۰۲ و ۰/۰۴) در نظر گرفته شده است. به منظور تحلیل حساسیت پارامتر ضریب خستگی آن را در مقادیر ۰/۸ و ۰/۶ و ۱/۲ و ۱/۴ ضرب می‌کنیم و سایر پارامترها در مقادیر اولیه خود ثابت نگه داشته می‌شوند. براساس شکل (۱۱)، ضریب خستگی و میانگین خستگی اپراتورها و میانگین دیرکرد رابطه مستقیمی دارند. هر چقدر فشار کاری بیشتری در طول یک شیفت کاری به اپراتور وارد شود ضریب خستگی نیز بالاتر است. مثلاً اپراتوری که سن بالاتری دارد قاعدتاً دارای ضریب خستگی بالاتری نیز خواهد بود. می‌توان با انجام اقداماتی مانند کاهش سروصدای ناشی از محیط کار، قراردادن سیستم نوردهی مناسب، کاهش دمای محیط کار و استراحت‌های برنامه‌ریزی شده، ضریب خستگی اپراتورها را کاهش داد.

تحلیل حساسیت ضریب یادگیری: مقدار اولیه این پارامتر در بازه (۰/۶۵ و ۰/۸۵) در نظر گرفته شده است و برای انجام تحلیل حساسیت در مقادیر ۰/۸ و ۰/۶ و ۱/۲ و ۱/۴ ضرب می‌شود. طبق شکل (۱۲) میزان تغییرات ضریب یادگیری با تابع هدف اول و دوم یعنی میزان دیرکرد و میانگین خستگی رابطه معکوس دارد به این صورت که با افزایش میزان یادگیری، مقدار دیرکرد و میانگین خستگی کاهش می‌یابد. می‌دانیم که هر چقدر یادگیری اپراتور سریعتر اتفاق بیافتد می‌تواند در زمان کوتاهتری پردازش‌ها را انجام دهد و همین موضوع

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مسأله زمان‌بندی سفارش‌ها در محیط تولید سلولی مورد بررسی قرار گرفته است به‌نحوی که هر سفارش شامل چندین عدد از یک نوع محصول می‌شود و پردازش‌های آن بایستی بر روی ماشین‌های مشخصی از یک سلول تولیدی انجام شوند. هدف نهایی این مسأله، مینیمم‌سازی جریمه‌های ناشی از دیرکرد در تحویل سفارش‌ها به مشتری و میزان خستگی اپراتورها در هر شیفت کاری می‌باشد.

برای حل این مسأله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شد که در این مدل چهار محدودیت غیرخطی از نوع ضرب دو متغیر پیوسته و ضرب متغیر پیوسته و باینری وجود داشت که باتوجه به نتایج محاسباتی، روش تبدیل متغیر پیوسته به عدد صحیح و سپس به باینری می‌تواند روش مناسبی برای خطی‌سازی مدل باشد. در ادامه یک الگوریتم ابتکاری افق غلطان تحت عنوان RHH در دو حالت همپوشانی و بدون همپوشانی با طول دوره‌های متفاوت ارائه گردید. به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج، سه گروه مسائل نمونه G1 تا G3 هر یک شامل پنج نمونه مسأله تصادفی تولید شد. باتوجه به دوده‌ها بودن مسأله، از شاخص‌های زمان دستیابی به جواب، تعداد نقاط پارتوی تولید شده و گستردگی آن‌ها استفاده شد. پس از تنظیم پارامترها، نتایج نشان داد که الگوریتم RHH در حالت بدون همپوشانی با طول دوره ۲ روی متغیر تخصیص اپراتور به ماشین در شیفت، بهترین جواب‌ها را تولید می‌کند و میانگین اختلاف جواب آن با روش حل دقیق کمتر از ۳ درصد می‌باشد. مدل با روش حل دقیق در گروه G1 (چهار سفارش، دو محصول، چهار سلول و ۱۲ ماشین) قادر است در تکرارهای مختلف با میانگین زمانی ۴۳ ثانیه به جواب بهینه برسد و در گروه G2 (شش سفارش، سه محصول، چهار سلول و ۱۳ ماشین) این مدل توانسته است جواب‌هایی با میانگین زمانی ۶۷۹ ثانیه به‌دست آورد. مدل ریاضی در گروه G3 (هشت سفارش، پنج محصول، پنج سلول و ۱۵ ماشین) میانگین زمانی ۷۳۷۲ ثانیه را به‌دست آورده است. روش RHH در گروه‌های G1 تا G3 از عملکرد خوبی برخوردار است، به‌نحوی که میانگین اختلاف با جواب بهینه به ترتیب صفر درصد، ۲ درصد و ۳ درصد و میانگین زمان حل به ترتیب ۲۴، ۳۵ و ۳۲۵ می‌باشد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر ضریب بهبود روی تابع هدف دیرکرد به‌صورت مستقیم تأثیری ندارد ولی ضریب بهبود با تابع هدف دوم (میزان خستگی) رابطه معکوس دارد. ضریب خستگی اپراتورها با هر دو تابع هدف رابطه مستقیم دارد و افزایش این ضریب موجب افزایش میانگین خستگی اپراتورها و دیرکرد تحویل سفارشات به‌صورت همزمان خواهد شد. عملکرد ضریب یادگیری بر روی توابع هدف برعکس عملکرد ضریب خستگی است و هرچقدر یادگیری سریع‌تر اتفاق بیفتد میزان خستگی و دیرکرد کاهش خواهد یافت.

باتوجه به نتایج حاصل شده در این پژوهش، اهمیت زمان‌بندی تولید بر مبنای در نظر گرفتن عوامل انسانی از جمله خستگی-بهبود و یادگیری-فراموشی مشخص شد. لذا به مدیران و کارشناسان صنایع

تولیدی پیشنهاد می‌شود که عوامل انسانی را در زمان‌بندی‌های تولید و شیفت‌بندی اپراتورها لحاظ نمایند تا علاوه بر کاهش دیرکرد تقاضا، میزان خستگی اپراتورها نیز کاهش یابد. مشخص شد که با افزایش ضریب یادگیری، میزان دیرکرد سفارش کاهش و با افزایش ضریب بهبود، میانگین خستگی کاهش می‌یابد لذا بایستی با ترفندهایی مانند آموزش مهارت به اپراتور، سطح اولیه مهارت آن‌ها افزایش یابد تا سطح یادگیری ابتدایی آن‌ها بیشتر شود و حتی الامکان شیفت‌های کاری به‌نحوی برنامه‌ریزی شوند که بار کاری زیادی به اپراتورها تحمیل نشود تا در نتیجه میانگین خستگی و میزان دیرکرد سفارش کاهش یابد.

سایر پیشنهادات برای مطالعات آتی شامل موارد زیر است. (۱) اضافه نمودن هزینه‌های آموزش اپراتورها جهت افزایش مهارت‌های آن‌ها، (۲) باتوجه به اهمیت حمل‌ونقل در سیستم تولید سلولی، زمان‌بندی وسایل حمل‌ونقل می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، (۳) هزینه نگهداری برای محصولات و یا جریمه زودکرد در تحویل سفارش‌ها می‌تواند به‌عنوان موضوعی مهم در تحقیقات آتی بررسی شود. (۴) زمان‌های آماده‌سازی برای سلول‌ها و ماشین‌ها در دو حالت مستقل و وابسته به توالی به مفروضات مسأله اضافه گردد، (۵) می‌توان قابلیت تنظیم سرعت ماشین‌ها برای هر سفارش را لحاظ کرد و به‌عنوان آخرین پیشنهاد (۶) تمامی پارامترهای این مسأله در حالت قطعی در نظر گرفته شده‌اند در صورتی که مسائل جهان واقعی در شرایط عدم قطعیت اتفاق می‌افتند و بنابراین تعریف مسأله به‌صورت احتمالی یا فازی می‌تواند جالب باشد.

مراجع

- [1] خسروی، شیمیا و غضنفری، فاطمه (۱۳۹۴) بررسی رابطه گردش شغلی با رضایتمندی از کار و فرسودگی شغلی در کارکنان دانشگاه علوم پزشکی تهران. مجله پیابورد سلامت، ۱۳۹۴، ۹(۶): صفحه ۵۱۷-۵۲۶.
- [2] Lang, W., et al., Minimizing makespan of stochastic customer orders in cellular manufacturing systems with parallel machines. *Computers & Operations Research*, 2021. 125: p. 105101.
- [3] Botti, L., C. Mora, and M. Calzavara, Design of job rotation schedules managing the exposure to age-related risk factors. *IFAC-PapersOnLine*, 2017. 50(1): p. 13993-139.
- [4] اکبری، محمد (۲۰۱۷) مدل‌سازی ریاضی عوامل انسانی در سیستم با محدودیت دوگانه. پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری. (۲)۲: صفحه ۲۳-۴۹.
- [5] Bakhshi, M., S.E. Hashemi, and H. Dezhdar, Applying mathematical modeling to create job rotation for improve workforce performance in semi-automatic systems. *International journal of research in industrial engineering*, 2020. 9(4): p. 318-327.
- [6] Liu, Y., et al., Agent-based simulation and optimization of hybrid flow shop considering multi-skilled workers and fatigue factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023. 80: p. 102478.
- [7] Heuser, P. and B. Tauer, Single-machine scheduling with product category-based learning and forgetting effects. *Omega*, 2023. 115: p. 102786.
- [8] Zhang, X., et al., Integrated optimization on production

- in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018. 46: p. 103-114.
- [25] Allahyari, M.Z. and A. Azab, A Novel Bi-level Continuous Formulation for the Cellular Manufacturing System Facility Layout Problem. *Procedia CIRP*, 2015. 33: p. 87-92.
- [26] Moussavi, S.E., M. Mahdjoub, and O. Grunder, A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system. *IFAC-PapersOnLine*, 2018. 51(11): p. 850-855.
- [27] Boenzi, F., et al., Ergonomic improvement through job rotations in repetitive manual tasks in case of limited specialization and differentiated ergonomic requirements. *IFAC-PapersOnLine*, 2016. 49(12): p. 1667-1672.
- [28] Alimian, M., V. Ghezavati, and R. Tavakkoli-Moghaddam, New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020. 56: p. 341-358.
- [29] Mahdavi, I., et al., Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment. *Computers & Mathematics with Applications*, 2010. 60(4): p-۱۰۱۴ . ۱۰۲۵
- [30] Akpinar, Ş. and A. Baykasoglu, Modeling and solving mixed-model assembly line balancing problem with setups. Part I: A mixed integer linear programming model. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013. 33.
- [31] Costa, A., V. Fernandez-Viagas ,and J.M. Framinan, Solving the hybrid flow shop scheduling problem with limited human resource constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 2020. 146: p. 106545.
- [32] Mossa, G., et al., Productivity and ergonomic risk in human based production systems :A job-rotation scheduling model. *International Journal of Production Economics*, 2016. 171: p. 471-477.
- [33] Boenzi, F., et al., Modelling Workforce Aging in Job Rotation Problems. *IFAC-PapersOnLine*, 2015. 48(3): p. 604-609.
- [34] Luger, T., et al., Is rotating between static and dynamic work beneficial for our fatigue state? *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2016. 28: p. 104-113.
- [35] Basavaraj, P., The effect of job rotation and single-piece flow in human based assembly system. 2020, Texas State University, San Marcos, Texas: Theses and Dissertations-Ingram School of Engineering.
- [36] Ayough, A., M. Hosseinzadeh, and A. Motameni, Job rotation scheduling in the Seru system: shake enforced invasive weed optimization approach. *Assembly Automation*, 2020. 40(3): p. 461-474.
- [37] Kaymaz, K., The Effects of Job Rotation Practices on Motivation: A Research on Managers in the Automotive Organizations. *Business and Economics Research Journal*, 2010. 1: p. 69-69.
- [38] Michalos, G., et al., Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010. 2(3): p. 153-160.
- [39] Digiesi, S., et al., Minimizing and balancing ergonomic risk of workers of an assembly line by job rotation: a MINLP model. *International Journal of Industrial scheduling and imperfect preventive maintenance considering multi-degradation and learning-forgetting effects. Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2022. 34(2): p. 451-482.
- [9] Lou, H., et al., Memetic algorithm based on learning and decomposition for multiobjective flexible job shop scheduling considering human factors. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022. 75: p. 101204.
- [10] Asadayoobi, N., M.Y. Jaber, and S. Taghipour, A new learning curve with fatigue-dependent learning rate. *Applied Mathematical Modelling*, 2021. 93: p. 644-656.
- [11] Zare Mehrjerdi, Y., A.A. Ghasemi Gajvan, and M. Shahmohammadi, A Bi-criterion hybrid flow shop time scheduling: Balancing the performance and total completion times. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 2014. 24(4): p. 475-488.
- [12] Jaber, M.Y., Z.S. Givi, and W.P. Neumann, Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(12): p. 7287-7299.
- [13] Zhou, S., et al., Minimizing makespan on parallel batch processing machines with two-dimensional rectangular jobs. *Computers & Industrial Engineering*, 2022. 169: p. 108167.
- [14] Azizi, N ,S. Zolfaghari, and M. Liang, Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *International Journal of Production Economics*, 2010. 123(1): p. 69-85.
- [15] Aljuneidi, T. and A.A. Bulgak, Designing a Cellular Manufacturing System featuring remanufacturing, recycling, and disposal options: A mathematical modeling approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017. 19: p. 25-35.
- [16] Otto, A. and A. Scholl, Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR Spectrum*, 2013. 35(3): p. 711-733.
- [17] Jorgensen, M., et al., Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector. *Ergonomics*, 2006. 48: p. 1721-33.
- [18] Mohammadi, M. and K. Forghani, Designing cellular manufacturing systems considering S-shaped layout. *Computers & Industrial Engineering*, 2016. 98: p. 221-236.
- [19] Diego-Mas, J.A., et al., A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules. *International Journal of Industrial Ergonomics* : (۱)۳۹ .۲۰۰۹ .p. 23-33.
- [20] Moreira, M.C.O., et al., The multi-objective assembly line worker integration and balancing problem of type-2. *Comput. Oper. Res.*, 2017. 82: p. 114-125.
- [21] Lodree, E.J., C.D. Geiger, and X. Jiang, Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2009. 39(1): p. 39-51.
- [22] Cesani, V.I. and H.J. Steudel, A study of labor assignment flexibility in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2005. 48(3): p. 571-591.
- [23] de Oliveira Sato, T. and H.J. Cote Gil Coury, Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs. *Applied Ergonomics*, 2009. 40(4): p. 707-712.
- [24] Hochdörffer, J., M. Hedler, and G. Lanza, Staff scheduling

- International Journal of Production Economics, 2022. 250: p. 108619.
- [43] Zhang, Z., Modeling complexity of cellular manufacturing systems. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. 35(9): p. 4189-4195.
- [44] Hooker, J.N., *Integrated Methods for Optimization*. 2 ed. 2012: Springer New York, NY.
- [45] Jaber, M.Y. and W.P. Neumann, Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(1): p. 75-84.
- Engineering and Management, 2018. 9(3): p. 129-138.
- [40] Adem, A. and M. Dağdeviren, A job rotation-scheduling model for blue-collar employees' hand-arm vibration levels in manufacturing firms. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2021. 31(2): p. 174-190.
- [41] Anuar, N., et al., Improved multi-objective particle swarm optimization for job-shop scheduling problems. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. 14(3): p. 33-49.
- [42] Battini, D., et al., Towards industry 5.0: A multi-objective job rotation model for an inclusive workforce.



DOI: 10.22084/IER.2023.27096.2101

Scheduling Cellular Manufacturing Systems Based on Human Factors and Due Date of Orders

F. Saedi¹, K. Kianfar^{2*}

¹: Master of Industrial Engineering, Faculty of Technical and Engineering University of Isfahan, Isfahan, Iran

²: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering and Future Research, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 Apr 2022

Accepted 27 Jul 2022

Keywords:

Job Rotation
CMS Scheduling
Fatigue-Recovery
Learning-Forgetting
Tardiness
Rolling Horizon Algorithm.

ABSTRACT

Human factors engineering is a scientific area about collaboration between persons and other parameters of a system. It consists of theorems, principles and methods for designing based on the relief of operators and system performance. The main purpose of this paper is scheduling the orders and operators in a CMS regarding the human factors to minimize the orders' tardiness and fatigue of operators. The fatigue, recovery, learning and forgetting are the human factors in this study, which affect the job rotation and shift scheduling. A mathematical model and a rolling horizon heuristic are developed as well as three groups of test problems each including five random problem instances. The rolling horizon algorithm was tested on the test problems and the results showed that non-overlapping mode with a length of 2 periods is the best choice. The heuristic algorithm solves large-scale instances with less than 3% optimality gaps in about 5.5 minutes while the MIP model needs about 2 hours. The results of linearization of the model showed that the conversion of the continuous variables into integer numbers is more efficient than the McCormick method. Sensitivity analysis shows that fatigue factor has a direct relation with tardiness and learning and also, the learning factor has a reverse relation with the both objectives of tardiness and mean fatigue.

* Corresponding author. K. Kianfar
Tel.: 031-37934041; E-mail address: k.kianfar@eng.ui.ac.ir