

## بهینه‌سازی مبتنی بر مبنای شبیه‌سازی مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی در کسب‌وکارهای کوچک و متوسط با رویکرد نظام‌های صف با هدف کاهش هزینه زودکرد و دیرکرد فعالیت‌ها

سید مجتبی سجادی<sup>۱</sup>، صادق شهبازی<sup>۲</sup>

**چکیده:** تعیین بهینه‌توالی کارها در تولید کارگاهی کسب‌وکارهای کوچک و متوسط، در بهره‌وری ماشین‌آلات، هزینه‌های مربوط به دیرکرد و زودکرد تحویل کارها تأثیرگذار است. در این پژوهش ابتدا مدل ریاضی مسئله تولید کارگاهی کسب‌وکارهای کوچک و متوسط طراحی شد، سپس به کمک نرم‌افزار Arena 14 مدل شبیه‌سازی طراحی گردید و در نهایت با حل یک مثال عددی، جواب نزدیک به بهینه مسئله از لحاظ مجموع هزینه دیرکرد و زودکرد به‌منظور انتخاب بهترین قانون اولویت‌بندی کارها در سلول‌های کاری با اجرای مدل و به‌کمک آنالیز واریانس به‌دست آمد. بر اساس یافته‌ها، روش LPT دارای کمترین هزینه است و روش‌های FIFO، EDD و SLACK نتایج قابل قبولی دارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد برخلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی، در شبیه‌سازی به ایجاد یک مدل ریاضی دقیق نیازی نیست، بلکه با یک مدل مفهومی ریاضی می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت و این کار حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده را در صورتی که بتوان آن را به مدل شبیه‌سازی شده تبدیل نمود، تسهیل می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، تولید کارگاهی، شبیه‌سازی، صف، هزینه دیرکرد - زودکرد.

۱. استادیار گروه کسب‌وکار جدید، دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۰

نویسنده مسئول مقاله: سید مجتبی سجادی

E-mail: msajadi@ut.ac.ir

## مقدمه

مسئله تولید کارگاهی، نوعی از مسائل توالی عملیات است که در آن کارها از ماشین‌های مشخص ولی متمایز عبور می‌کنند. به بیان دیگر، در این مسئله هر کاری که وارد سیستم می‌شود، باید ماشین‌های مشخص و از پیش تعیین شده‌ای را ملاقات کند و این ترتیب برای کارهای مختلف با هم فرق می‌کند (پیندو، ۲۰۱۲: ۱۸۴). با نگاه عمیق‌تری به سیستم تولید کارگاهی کسب و کارهای کوچک و متوسط، می‌توان دریافت که پویایی و عدم قطعیت از ویژگی‌های بارز این نوع سیستم تولید است. برای مقایسه، می‌توان به اختلاف بین تولید کارگاهی با روش خط تولید نگاه کرد. در روش خط تولید، یکسری محصولات با ترتیب مشخص و یکسان و به‌صورت انبوه تولید می‌شوند؛ به‌طوری که اغلب، برای تولید محصولات جدید، به دریافت سفارش نیازی نیست و محصولات تولید شده در انبار برای پاسخ به تقاضاهای آتی ذخیره می‌شوند که به این حالت، تولید برای ذخیره گفته می‌شود؛ در حالی که در سیستم‌های تولید کارگاهی، بیشتر با تولید محصولاتی مواجه‌ایم که حالت پروژه‌ای دارند و هر محصول برای تولید، باید فرایندهای منحصر به خود را طی کند. ضمن آن که به‌طور معمول در چنین سیستم‌هایی، بعد از سفارش محصول جدید به تولید آن اقدام می‌شود (تولید برای سفارش). به‌طور کلی عوامل ایجاد عدم قطعیت در سیستم تولید کارگاهی را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

**الف) تقاضا:** یکی از عوامل مهم برنامه‌ریزی برای سیاست‌های سازمان است. تقاضا جزء عواملی است که سازمان تأثیر ناچیزی روی آن می‌گذارد، اما تأثیر فراوانی از آن می‌پذیرد. برای مسائل تولید کارگاهی که اغلب حالت تولید برای سفارش دارند، این موضوع اهمیت بیشتری دارد، چون سیستم در هر لحظه باید آماده دریافت سفارش جدید باشد.

**ب) ماهیت محصول تولیدی:** محصولاتی که در سیستم کارگاهی تولید می‌شوند، ماهیت شبه پروژه‌ای دارند و نوع فرایند لازم برای یک محصول می‌تواند با سایر محصولات متفاوت باشد، از این رو نمی‌توان به‌طور قطعی درباره زمان فرایند محصولات اظهار نظر کرد. به‌علاوه، ممکن است قطعه‌ای به دوباره‌کاری نیاز داشته باشد که باید برنامه‌ریزی‌های لازم در این زمینه انجام شود.

**ج) محیط کارگاه:** وجود خرابی‌های پیش‌بینی نشده در سیستم‌های تولید کارگاهی، اجتناب‌ناپذیر است. همچنین سایر عناصر حاضر در کارگاه مانند نیروی انسانی می‌تواند بر سرعت و میزان تولید اثر بگذارد.

از این رو در صورتی که زمان ورود کارها و زمان‌های پردازش کاملاً معلوم باشد، مسئله دارای حالت قطعی است و در غیر این صورت احتمالی خواهد بود. به‌علاوه، با توجه به در دسترس بودن

کارها در ابتدای مسئله یا ورود تدریجی کارهای جدید در طول فرایند، می‌توان مسئله را به دو دسته ایستا و پویا دسته‌بندی کرد.

با توجه به اهمیت موضوع زمان‌بندی تولید کارگاهی در شرایط عدم قطعیت در زمان ورود کارها، احتمالی بودن زمان انجام عملیات در هر سلول کاری، امکان خرابی ماشین‌آلات و همچنین احتمال نیاز به دوباره‌کاری قطعات، حل مسئله به کمک مدل‌سازی ریاضی بسیار پیچیده و حتی امکان‌ناپذیر است؛ از این رو در مقاله حاضر تلاش شده است با استفاده از شبیه‌سازی و قوانین اولویت‌دهی کارها، مدلی ارائه شود که در شرایط عدم قطعیت (ورود تصادفی، زمان فرایند احتمالی و احتمال خرابی) و مشخص بودن زمان تحویل و جابه‌جایی، بتوان جواب نزدیک به بهینه‌ای را برای مسئله تولید کارگاهی با هدف حداقل نمودن مجموع هزینه دیرکرد و زودکرد استخراج کرد.

### پیشینه پژوهش

مسئله تولید کارگاهی در حالت قطعی و ایستا با بیش از دو ماشین، مسئله NP-Hard محسوب می‌شود (پیندو، ۲۰۱۲: ۶۲) و وارد کردن عوامل ایجاد عدم قطعیت بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. بر این اساس، با استفاده از تکنیک‌های معمولی تحقیق در عملیات، نمی‌توان به مدل‌سازی و یافتن جواب بهینه برای این مسئله اقدام کرد. عمده مسائلی که در این زمینه مدل‌سازی شده‌اند با استفاده از فرض‌های محدودکننده به ساده‌سازی مسئله اقدام کرده‌اند که این کار موجب فاصله گرفتن از حالات واقعی می‌شود (ویرا، هرمن و لین، ۲۰۰۰). روش‌های حل مسائل تولید کارگاهی را می‌توان به دسته تکنیک‌های ریاضی و تکنیک‌های تقریب‌زنی طبقه‌بندی کرد (جین و میران، ۱۹۹۹). تکنیک‌های ریاضی جذائیت فراوانی در فرموله کردن و حل مسائل تولید کارگاهی دارند. با این حال، این روش‌ها در مسائل بزرگ‌مقیاس کارایی خود را از دست می‌دهند. تکنیک‌های تقریب‌زنی روش‌های مناسبی برای حل مسائل تولید کارگاهی با کیفیت جواب قابل قبول و در زمان مناسب هستند، اما رسیدن به جواب بهینه را تضمین نمی‌کنند.

برای این مسئله می‌توان از شبیه‌سازی استفاده کرد و با شبیه‌سازی سیستم را با تمام پویایی‌هایش در نظر گرفت؛ اما این روش به تنهایی راه‌حلی برای رسیدن به جواب بهینه نیست (بانکز و نلسون، ۲۰۱۰: ۲۵۴).

شبیه‌سازی در واقع رویکردی برای تحلیل حساسیت سیستم و مقایسه بین راه‌حل‌های ممکن است. افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌های امروزی، انجام این کار را برای مسائل پیچیده‌تر و با تکرارهای زیاد امکان‌پذیر کرده است. تعیین پارامترهای کنترلی مناسب برای مدل شبیه‌سازی شده می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم و رسیدن به جواب بهینه منجر شود. بدین منظور می‌توان با

ترکیب روش‌های بهینه‌سازی با شبیه‌سازی، در عین توجه به پویایی مدل، جواب مناسبی برای آن تولید کرد. روش‌های بهینه‌سازی بر اساس شبیه‌سازی، به جای آن که روی فرمول یا گراف تمرکز کنند، بر شی تمرکز می‌کنند و سعی می‌کنند از این طریق مسئله را بهینه نمایند. این روش حل مسئله علاوه بر انعطاف‌پذیری بالا، دقت زیادی نیز دارد.

مهم‌ترین پارامتر قابل تغییر در بهینه‌سازی مسائل زمان‌بندی بر اساس شی (محصول)، چگونگی اولویت‌دهی به کارها در صف ماشین‌هاست. در این روش جواب قطعی بهینه برای مسئله به دست نمی‌آید، اما سیاست مناسبی برای اولویت‌دادن به کارها در پشت صف ماشین‌ها پیشنهاد می‌شود. در مقاله بلک‌استون، فیلیس و هاگ (۱۹۸۲) قوانین پیشنهاد شده برای اولویت‌دهی به کارها در پشت صف ماشین‌ها برای سیستم تولید کارگاهی بررسی و طبقه‌بندی شده و با استفاده از شبیه‌سازی، حالت‌های موجود برای سیستم ارزیابی شده است. این مقاله جزء اولین مقالات در زمینه طبقه‌بندی قوانین اولویت‌دهی به کارهاست. در سال‌های اخیر مقالات زیادی در این زمینه ارائه شده است. برای مثال در پژوهش‌های چان، چان، لائوو ایپی (۲۰۰۳) و ونگ و رن (۲۰۰۶) روش‌های جدیدتری برای این کار پیشنهاد شده است. روش‌های به کار گرفته شده برای بهینه‌سازی بر اساس شبیه‌سازی، به پنج گروه روش‌های جست‌وجوی شیب، روش‌های تقریبی تصادفی، بهینه‌سازی مسیر نمونه، روش پاسخ سطح و روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری دسته‌بندی می‌شوند (آزادیور، ۱۹۹۹).

با ترکیب شبیه‌سازی، قوانین اولویت‌دهی و روش‌های جست‌وجوی تصادفی، می‌توان جواب مناسبی برای سیستم تولیدی به دست آورد؛ بدین صورت که پس از مدل‌سازی سیستم با شبیه‌سازی، یک بردار کنترلی برای مسئله تعریف می‌شود که این بردار به صورت تصادفی تولید شده و به عنوان متغیر کنترلی به شبیه‌سازی داده می‌شود و نتایج آن به عنوان مقدار تابع هدف مسئله مد نظر قرار می‌گیرد و به کمک روش‌های جست‌وجو، تغییراتی در این بردار ایجاد شده و سعی می‌شود نتایج مناسب‌تری برای مسئله به دست آید.

در این زمینه، کلمت، هرن، بیر و ویگرت (۲۰۰۷) با ترکیب شبیه‌سازی با روش‌های جست‌وجوی محلی، از جمله قبول آستانه‌ای، شبیه‌سازی تیریدی، جست‌وجوی حریم‌صانه و سایر الگوریتم‌ها، به اولویت‌دهی به کارها در یک سیستم دارای زمان آماده‌سازی اقدام کرده‌اند.

در مرجعی (یان، گیوکسین، ۲۰۰۷) بهینه‌سازی بر اساس شبیه‌سازی برای حل یک مسئله تولید کارگاهی به کار رفته است. برای مدل‌سازی مسئله، از شبیه‌سازی گسسته - پیشامد و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک و از قوانین اولویت‌دهی در صف پشت ماشین‌ها به عنوان عامل ایجاد تغییر در متغیر پاسخ استفاده شده است. زمان‌های ورود سفارش‌های جدید در این مقاله به صورت

قطعی و در فواصل زمانی ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده و برای تولید زمان‌های فرایند، یکسری کارها با زمان‌های فرایند مشابه به صورت دوره‌ای وارد مسئله شده است.

کلمت و همکارانش (۲۰۰۹) یک مسئله قطعی تولید کارگاهی را با ترکیب شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط ارزیابی کردند. در این مقاله از شبیه‌سازی برای شناسایی ماشین‌گلوگاه استفاده شده و با تبدیل مسئله به حالت تک‌ماشینه، به کمک برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط، به حل مسئله در تکرارهای مختلف اقدام شده است. با مرور کارهای انجام شده در زمینه تولید کارگاهی، نبود راه‌حلی برای یک مدل کاملاً پویا و بر اساس سیستم واقعی تولید مشهود است. زندیه و احمدی (۱۳۹۳) در مقاله‌ای با عنوان «زمان‌بندی مقاوم و پایدار برای محیط کار کارگاهی منعطف با شکست تصادفی ماشین»، رویکردی را به منظور ایجاد زمان‌بندی مقاوم و پایدار برای محیط کار کارگاهی منعطف، زمانی که شکست تصادفی ماشین وجود دارد، پیشنهاد کردند. به منظور بررسی وضعیت شکست ماشین از شبیه‌سازی‌ای استفاده کردند که برای دستیابی به زمان‌بندی مقاوم و پایدار به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری پیکارچه شده است. الگوریتم پیشنهادی شامل دو مرحله می‌شود؛ در مرحله اول، از آنجا که زمان تکمیل برنامه اولین هدف هر برنامه زمان‌بندی است، این شاخص بهبود می‌یابد؛ سپس در مرحله دوم، سه شاخص زمان تکمیل برنامه، مقاومت و پایداری، به صورت خطی ترکیب شده و تابع هدف را تشکیل خواهد داد.

در مرجعی (علی‌زاده، نورالسنا و رئیسی، ۱۳۹۴) با عنوان «بهینه‌سازی همزمان چندهدفه فرایند دادرسی کیفری به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری گسسته - پیشامد و طراحی آزمایش‌ها»، با بهره‌گیری از رویکرد شبیه‌سازی کامپیوتری گسسته - پیشامد، نظام دادرسی کیفری در یکی از دادگاه‌های برگزیده کشورمان تجزیه و تحلیل کمی شد و در آن با استفاده از ابزارهای آماری مانند طراحی آزمایش‌ها، آزمون فرض، تحلیل رگرسیون، روش‌های تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی چندهدفه، راهکارهای عملیاتی مناسب برای بهبود زوج شاخص عملکردی سیستم ارائه شده است.

در مقاله‌ای با عنوان «مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه ترافیک شهری با شبکه‌های پتری رنگین»، سلیمی‌فرد و انصاری (۱۳۹۵) به ارائه روشی بر پایه تحقیق در عملیات برای مدل‌سازی سامانه کنترل ترافیک شهری پرداختند تا به عنوان ابزاری شایسته برای بهبود در ترافیک شهری به کار رود. سهم علمی این مقاله در بررسی سیاست‌های زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی در روان‌سازی جریان ترافیک شهری با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین است. در این پژوهش، شبکه‌های پتری رنگین به عنوان ابزار مدل‌سازی و بهبود سامانه پیشنهاد شده است. بخشی از شبکه ترافیکی شهر بوشهر با روش پیشنهادی مدل‌سازی شده و به کمک شبیه‌سازی گسسته پیشامد، سناریوهای بهبود بررسی شده است. یافته‌ها نشان داد روش پیشنهادی روش شایسته و کارآمدی برای بهبود عملکرد سامانه ترافیک شهری است.

سجادی و اصفهانی (۲۰۱۱) در مقاله‌ای با عنوان «کنترل تولید در یک شبکه تولید مستعد شکست با استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته و RSM» به تعیین مقدار تولید بهینه با توجه به سیاست‌های کنترلی ماشین‌ها و همچنین حداقل کردن هزینه موجودی پرداختند.

هشیم (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با عنوان «شبیه‌سازی برای کاهش مصرف انرژی از منبع ولتاژ پایین چند هسته‌ای سیستم تولید»، به بررسی چند سناریو برای استفاده از دستگاه‌های مختلف پرداخت و بهترین منابع را پیشنهاد داد.

شارما، سوراج و روترو (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با عنوان «وضعیت موجودی در زنجیره تأمین با استفاده از مدل شبیه‌سازی روی کاهش موجودی در یک مدل سه‌مرحله‌ای»، با شناسایی نقطه سفارش و مقدار سفارش مجدد به بهینه‌سازی موجودی پرداختند. تلس، لوپس و راموس (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با عنوان «تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی مبتنی بر سیستم انتقال چوب پنبه»، به ایجاد یک مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی جریان تولید از طریق تجزیه و تحلیل شاخص‌های عملکرد مانند زمان، میزان استفاده از منابع و همچنین صف پرداختند و پس از تجزیه و تحلیل دقیق نتایج سیستم، برنامه کاربردی‌ای برای بهبود برنامه تولید ارائه دادند.

در مقاله‌ای با عنوان «بهبود عملکرد خط مونتاژ قفل با استفاده از تکنیک‌های ناب و با رویکرد شبیه‌سازی» رنه، ساپوار و کری (۲۰۱۷) به بهبود عملکرد خط مونتاژ با به حداکثر رساندن شاخص‌های عملکرد مانند زمان سیکل، توان، استفاده از منابع و همچنین کاهش هزینه پرداختند. در این تحقیق از تکنیک‌های ناب مانند کابزن، نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر، بالانس خط برای حالات مختلف استفاده شده است.

اغلب مسائلی که در زمینه کارگاهی مدل‌سازی شده‌اند، با استفاده از فرض‌های محدودکننده به ساده‌سازی مسئله اقدام کرده‌اند، این کار موجب فاصله‌گرفتن از حالات واقعی می‌شود، برای رفع این مشکل، یکی از روش‌های پیشنهادی با توجه به بررسی پیشینه تحقیق، می‌تواند شبیه‌سازی باشد که در این تحقیق با بیان یک مسئله پویا با پارامترهای عدم قطعیت مانند زمان فعالیت، خرابی تجهیزات، احتمال در دسترس بودن منابع و سایر ویژگی‌ها، روش یاد شده بررسی و تحلیل شده است.

## روش‌شناسی پژوهش

### شرح مسئله

مدل ریاضی (برنامه نویسی ترکیبی عدد صحیح و غیرخطی) به منظور شناسایی بیشتر مسئله و همچنین استفاده از آن برای حل مسائل ارائه می‌شود. در حالت کلی، ما مسئله زمان‌بندی تولید

کارگاهی احتمالی را بدین صورت مدل سازی می کنیم. این مسئله دارای  $m$  ماشین و  $n$  کار است. هر کار شامل یک توالی از عملیاتها  $h = 1, 2, \dots, h_j$  می شود که  $O_{j,h}$  نشان دهنده عملیات  $h$  از کار  $j$ ام و  $h_j$  معرف تعداد عملیاتهای مورد نیاز کار  $j$ ام است. مجموعه ماشینها با  $M = \{M_1; M_2, \dots, M_m\}$  نمایش داده می شود. اندیس  $i$  نشان دهنده ماشین، اندیس  $j$  معرف کار و اندیس  $h$  برای عملیات به کار می رود. برای اجرای عملیات  $h$  از کار  $j$  که به صورت  $O_{j,h}$  نشان داده می شود، یک ماشین اختصاص داده شده که توانایی انجام آن عملیات را دارد. انجام عملیات  $O_{j,h}$  دارای زمان پردازش مشخص به صورت  $P_{j,h}$  و توزیع مشخص خود است (برای مثال، توزیع نرمال با میانگین  $\mu_{j,h}$  و انحراف معیار  $\sigma_{j,h}$ ). ماشین اختصاص یافته به هر عملیات با استفاده از متغیر صفر و یک  $\gamma_{i,j,h}$  تعریف می شود. اگر متغیر  $\gamma_{i,j,h}$  مقدار ۱ بگیرد، به این معناست که ماشین  $i$  توانایی انجام عملیات  $O_{j,h}$  را دارد. برای در نظر گرفتن مسئله توالی، برای هر ماشین سری نوبت در نظر گرفته می شود. به هر یک از عملیاتهای اختصاص یافته به یک ماشین، یک نوبت اختصاص داده می شود. این نوبتها توالی انجام عملیاتها را توسط آن ماشین مشخص می کنند. برای این منظور از متغیر صفر و یک  $x_{i,j,h,k}$  استفاده می کنیم. ارزش ۱ برای متغیر یاد شده به این معناست که عملیات  $O_{j,h}$  روی ماشین  $i$  در نوبت  $k$  انجام می شود. هدف در این مسئله حداقل کردن مجموع هزینههای زودکرد و دیرکرد است.

پارامترهای این مدل عبارتاند از:  $n, m, O_{j,h}, \gamma_{i,j,h}, \mu_{j,h}, \sigma_{j,h}, W, V, d_j$

$W$ : هزینه هر واحد زمانی زودکرد

$V$ : هزینه هر واحد زمانی دیرکرد

$d_j$ : تاریخ تحویل کار  $j$ ام

متغیرهای مدل نیز عبارتاند از:

$E_j$ : میزان واحد زمانی زودکرد کار  $j$ ام

$T_j$ : میزان واحد زمانی دیرکرد کار  $j$ ام

$C_j$ : تاریخ تکمیل کار  $j$ ام

$x_{i,j,h,k}$ : عملیات  $O_{j,h}$  روی ماشین  $i$  در نوبت  $k$  (متغیر ۰ و ۱)

$M$ : یک عدد بزرگ

$t_{i,j}$ : زمان شروع عملیات  $O_{j,h}$

$Tm_{i,k}$ : زمان شروع کار ماشین  $i$  در نوبت  $k$

$k_i$ : تعداد عملیات‌های اختصاص یافته به ماشین  $i$

$P_{j,h}$ : زمان پردازش احتمالی عملیات  $O_{j,h}$

با داشتن پارامترهای  $n, m, O_{j,h}, \gamma_{i,j,h}, \mu_{j,h}, \sigma_{j,h}, W, V, d_j$  مسئله به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\text{Min}Z = W.E_j + V.T_j \quad \text{رابطه (۱)}$$

S.t:

$$P_{j,h} \approx N(\mu_{j,h}, \sigma_{j,h}) \text{ for } j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, h_j \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$E_j = \max\{0, d_j - C_j\} \text{ for } j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$T_j = \max\{0, C_j - d_j\} \text{ for } j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$C_j = t_{j,h_j} + p_{j,h_j} \text{ for } j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, h_j \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$t_{j,h} + p_{j,h} \leq t_{j,h+1} \text{ for } j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, h_j - 1 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$Tm_{i,k} + p_{j,k} \cdot x_{i,j,h,k} \leq Tm_{i,k+1} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\text{for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; h = 1, \dots, h_j; k = 1, \dots, k_i - 1;$$

$$Tm_{i,k} \leq t_{i,k} + (1 - x_{i,j,h,k}) \cdot M \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\text{for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; h = 1, \dots, h_j; k = 1, \dots, k_i;$$

$$Tm_{i,k} + (1 - x_{i,j,h,k}) \cdot M \leq t_{j,h} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\text{for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; h = 1, \dots, h_j; k = 1, \dots, k_i;$$

$$\sum_j \sum_h x_{i,j,h,k} = 1 \text{ for } i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, k_i; \quad \text{رابطه (۱۰)}$$



$$\sum_k x_{i,j,h,k} = y_{i,j,h} \text{ for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; h = 1, \dots, h_j; \quad (\text{رابطه } ۱۱)$$

$$t_{j,h} \geq 0 \text{ for } j = 1, \dots, n; h = 1, \dots, h_j; \quad (\text{رابطه } ۱۲)$$

$$x_{i,j,h,k} \in \{0,1\} \text{ for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; h = 1, \dots, h_j; k = 1, \dots, k_j \quad (\text{رابطه } ۱۳)$$

رابطه ۱ بیانگر تابع هدف برای حداقل کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد است. رابطه ۲ زمان پردازش هر عملیات را معرفی می‌کند. رابطه ۳ میزان زودکرد، رابطه ۴ میزان دیرکرد و رابطه ۵ زمان تکمیل هر کار را تعریف می‌کنند. محدودیت‌های پیش‌نیاز با رابطه ۶ بیان شده است. این محدودیت زمان شروع هر عملیات را به اتمام عملیات قبلی از همان کار محدود می‌کند. رابطه ۷ الزام می‌کند در صورتی یک ماشین می‌تواند به کار در نوبت  $k + 1$  پردازد که کار آن ماشین در نوبت  $k$  به اتمام رسیده باشد. رابطه‌های ۸ و ۹ الزام می‌کنند در صورتی یک عملیات می‌تواند شروع شود که هم محدودیت پیش‌نیازی (عملیات قبلی آن به اتمام رسیده باشد) و هم محدودیت ماشین (ماشین مورد نیاز آن بیکار باشد) رعایت شده باشند. رابطه ۱۰ موجب می‌شود که برای یک عملیات، تنها یک نوبت از بین نوبت‌های ممکن انتخاب شود. بر اساس رابطه ۱۱، برای هر عملیات از ماشین اختصاص یافته به آن عملیات، نوبت اجرای عملیات تعیین می‌شود. رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ نوع متغیرها را معرفی می‌کنند.

### مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار Arena

در روش پیشنهادی، سیستم تولید کارگاهی با استفاده از شبیه‌سازی در نسخه ۱۴ نرم‌افزار Arena مدل‌سازی می‌شود، سپس با استفاده از قوانین اولویت‌دهی کارها در هر ایستگاه، به یافتن بهترین روش اولویت‌دهی کارها که بهترین جواب را برای تابع هدف مسئله ایجاد می‌کند، اقدام می‌شود.

### روش‌های اولویت‌دهی

تصمیم‌گیری درباره انتخاب یک کار از بین کارهای موجود در صف در زمان آزاد شدن ماشین برای بارگذاری روی آن، از مهم‌ترین تصمیم‌های محیط کارگاهی است. در سال‌های اخیر روش‌های زیادی برای این کار بررسی و پیشنهاد شده است. در این روش‌ها از معیارهای مختلفی برای اولویت‌دهی به کارها استفاده شده و کارهایی که اولویت بیشتری دارند، زودتر وارد ماشین شده‌اند. در این مقاله از هفت قانون اولویت‌دهی متداول به شرح جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱. روش‌های اولویت‌دهی به کار گرفته شده

روش‌های اولویت‌دهی	توضیح روش
FIFO	خروج از صف به ترتیب ورود
LIFO	خروج آخرین ورودی به‌عنوان اول خروجی صف
SPT	اولویت‌دهی بر اساس کوتاه‌ترین زمان پردازش
LPT	اولویت‌دهی بر اساس طولانی‌ترین زمان پردازش
EDD	اولویت‌دهی بر اساس زودترین زمان اتمام مورد انتظار
CR	اولویت‌دهی بر اساس میزان بحرانی بودن کار
SLACK	اولویت‌دهی بر اساس متوسط زمان تأخیر در تحویل کار

برای تولید زمان اتمام مورد انتظار برای استفاده در قانون زودترین زمان اتمام مورد انتظار کار، از روش کل محتوای کار استفاده می‌شود (رابطه ۱۴).

$$d_j = A_i + \sum_{i=1}^{h_j} P_{j,i} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در این رابطه،  $j$  شماره کار،  $d_j$  زمان مورد انتظار تخمین زده برای تحویل کار  $j$ ،  $A_j$  زمان ورود کار  $j$  و  $P_{j,i}$  زمان پردازش کار  $j$  روی ماشین  $i$  نام است. برای به‌دست آوردن ضریب بحرانی از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود:

$$CR_{ji} = \frac{D_j}{P_{ji}} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

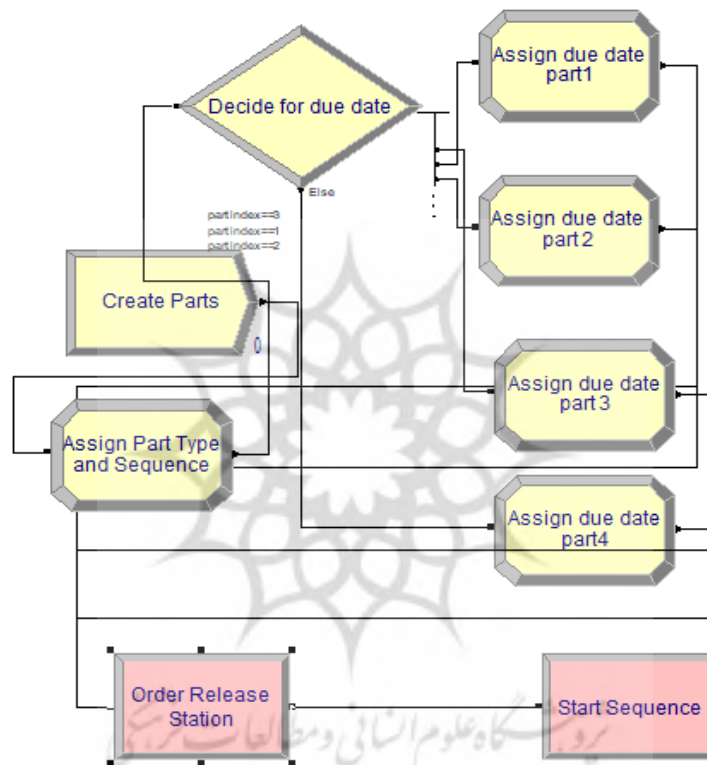
برای محاسبه متوسط زمان تأخیر در تحویل کالا (SLACK) از رابطه ۱۶ استفاده می‌شود:

$$SLACK_{ji} = (D_j - \text{Arrival Time}_j) - P_{ji} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

#### مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار Arena 14

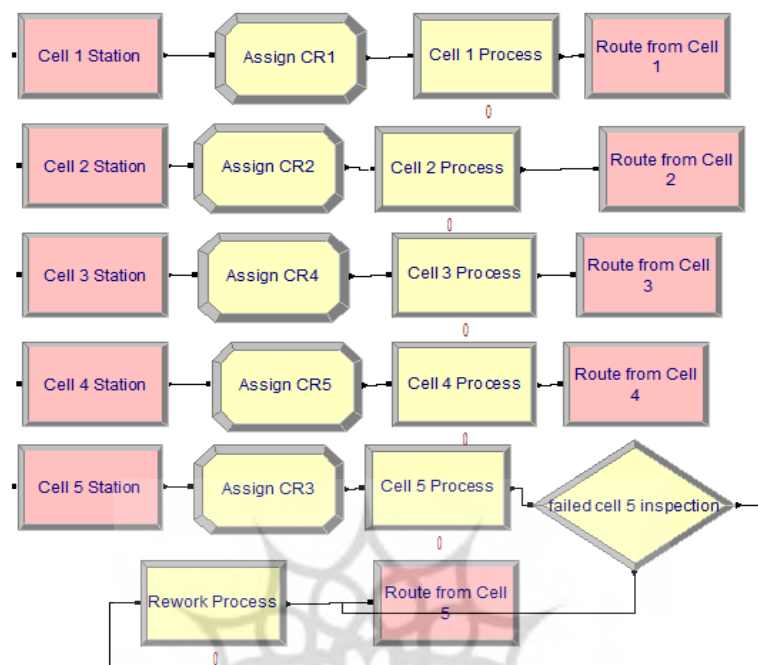
شبیه‌سازی، بیان رفتار پویای یک سیستم در حالت پایدار به‌واسطه حرکت آن از یک وضعیت به وضعیت دیگر بر اساس قواعد عملیاتی، تعریف شده است. اصولاً در شبیه‌سازی، ارزیابی عددی یک مدل در کامپیوتر انجام می‌گیرد و داده‌ها به برای تخمین ویژگی‌های مدنظر مدل جمع‌آوری می‌شوند. شبیه‌سازی کامپیوتری در عام‌ترین معنایش، فرایند طراحی مدلی ریاضی - منطقی از سیستم واقعی و آزمایش این مدل با کامپیوتر است. در این پژوهش نیز، پس از مدل‌سازی سیستم

مربوط به زمان بندی تولید کارگاهی، آن را در نرم افزار Arena 14 پیاده سازی کردیم. در ادامه، ضمن بررسی صحت و اعتبار مدل با دادن داده های ورودی به مسئله و همچنین تغییر قوانین اولویت دهی به کارها، به مقدار بهینه مد نظر نزدیک شدیم. شکل های ۱ تا ۳ بخش های مختلف مدل شبیه سازی شده مسئله را نشان می دهند.

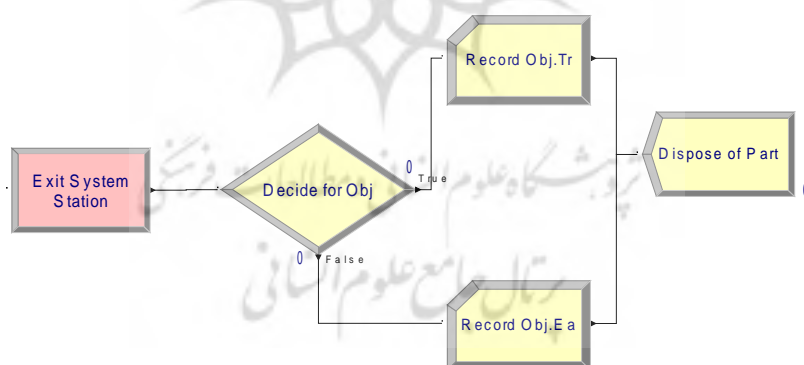


شکل ۱. مدل شبیه سازی شده زمان بندی تولید کارگاهی - فاز اول مدل

با توجه به شکل ۱، در فاز اول مدل، ورود قطعات همراه با مشخصات هر نوع قطعه شامل تعداد، تاریخ تحویل، توالی تولید و... سایر موارد مورد نیاز مسئله مشخص می شود. با توجه به شکل ۲، در فاز دوم مدل، کارگاه های مختلف تولیدی همراه با منابع آنها (نیروی انسانی و ماشین آلات) مشخص شده و قطعات تعریف شده در فاز اول مدل برای عملیات وارد این کارگاه های تولیدی می شوند. سناریوهای اولویت بندی انجام کار در کارگاه های مختلف نیز در این بخش از مدل تعیین خواهد شد.



شکل ۲. مدل شبیه‌سازی شده زمان‌بندی تولید کارگاهی - فاز دوم مدل



شکل ۳. مدل شبیه‌سازی شده زمان‌بندی تولید کارگاهی - فاز سوم مدل

با توجه به شکل ۳، در فاز سوم مدل، شاخص‌های عملکردی مدل تعریف می‌شود که شاخص عملکردی مورد بحث در این پژوهش، تابع هدف مدل یا همان حداقل کردن هزینه دیرکرد و زودکرد انجام کارهاست.

### مطالعه موردی

به منظور نشان دادن کارکرد مدل، یک کارگاه تولیدی که چهار نوع قطعه ۱، ۲، ۳ و ۴ تولید می‌کند، در نظر گرفته شده است. در این مدل درصد تولید روزانه هر قطعه مشخص است. هر یک از قطعات موعد تحویل مشخص دارند. قطعات بر اساس قوانین زمان‌بندی مشخصی روی ماشین‌ها قرار می‌گیرند. این کارگاه پنج سلول تولیدی را دربردارد. توالی قطعات و زمان عملیات هر قطعه در هر سلول روی هر ماشین مطابق جدول ۲ است.

زمان بین دو ورود قطعات متوالی (تمام انواع)، دارای توزیع نمایی با میانگین ۱۰ دقیقه است. اولین قطعه در زمان صفر وارد می‌شود. سلول‌های ۱، ۲، ۴ و ۵، هر یک شامل ۱ ماشین می‌شود. سلول شماره ۳ دارای ۲ ماشین است (ماشین دستی و ماشین خودکار که ماشین خودکار در ۷۰ درصد زمان ماشین دستی فرایند عملیاتی را انجام می‌دهد). زمان انتقال بین سلول‌ها ۱/۵ دقیقه فرض شده است. قطعات تولیدی ایستگاه پنجم به احتمال ۳ درصد به دوباره‌کاری نیاز دارند که بعد از آن سالم می‌شوند. ماشین دستی سلول ۳ دارای خرابی با توزیع پواسون و ضریب ۱ بار در ساعت است و زمان تعمیر آن توزیع یکنواخت ۵ تا ۱۰ دقیقه‌ای است. هزینه دیرکرد هر کار ۲۰ واحد پول و هزینه زودکرد هر کار ۵ واحد پول است.

جدول ۲. اطلاعات مربوط به مثال عددی

فرایند تولید قطعات (شماره سلول)						موعد تحویل (ساعت)	درصد	توالی / زمان قطعه
		۴	۳	۲	۱	۷	۲۰	توالی قطعه ۱
		یکنواخت بین ۸ تا ۱۱	مثلی ۲۰-۱۵-۵	مثلی ۸-۶-۴	ثابت ۸			زمان قطعه ۱ (دقیقه)
۵	۳	۲	۴	۲	۱	۶	۳۰	توالی قطعه ۲
یکنواخت بین ۴ تا ۷	مثلی ۱۱-۹	مثلی ۱۲-۹-۶	مثلی ۲۱-۱۸-۱۵	مثلی ۸-۶-۴	یکنواخت بین ۱۰ تا ۱۴			زمان قطعه ۲ (دقیقه)
		۴	۳	۱	۲	۸	۲۵	توالی قطعه ۳
		ثابت ۱۰	یکنواخت بین ۱۸ تا ۲۵	ثابت ۱۰	ثابت ۹			زمان قطعه ۳ (دقیقه)
			۵	۴	۲	۷	۲۵	توالی قطعه ۴
			یکنواخت بین ۴ تا ۸	ثابت ۷	مثلی ۱۰-۸-۶			زمان قطعه ۴ (دقیقه)

## تحلیل یافته‌های پژوهش به کمک طراحی آزمایش‌ها

### نتایج اجرای شبیه‌سازی

همان‌طور که در قسمت شرح مسئله بیان شد، مدل ریاضی مورد بررسی در این تحقیق دارای تابع هدف بر مبنای مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد است. برای حل این مسئله، پس از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Arena 14، در سلول‌ها قوانین اولویت‌دهی کارها در نظر گرفته شده که در صورت ایجاد صف، یکی از قوانین برای صف (در تمام سلول‌ها به‌طور مشترک) در نظر گرفته شود. نتایج به‌دست آمده برای مسئله عددی مطرح شده پس از ۴ بار آزمایش با تکرار ۱۰۰ مرتبه به ازای هر قانون اولویت‌بندی به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی

مقدار Z	تعداد تکرار	شماره آزمایش	کد فاکتور	روش اولویت‌دهی
۹۲۱۳/۵۷	۱۰۰	۱	۱	FIFO
۹۳۱۵/۹۵	۱۰۰	۲		
۹۲۴۷/۵۳	۱۰۰	۳		
۸۸۷۰/۲۵	۱۰۰	۴		
۹۰۱۷/۶۲	۱۰۰	۱	۲	LIFO
۹۲۱۴/۲۲	۱۰۰	۲		
۹۰۵۸/۴۲	۱۰۰	۳		
۹۲۹۳/۱۲	۱۰۰	۴		
۹۳۶۲/۱۱	۱۰۰	۱	۳	SPT
۹۳۵۷/۶۷	۱۰۰	۲		
۹۳۷۱/۲۷	۱۰۰	۳		
۹۲۰۰/۶۴	۱۰۰	۴		
۹۰۰۱/۲۲	۱۰۰	۱	۴	LPT
۸۸۶۱/۶۷	۱۰۰	۲		
۸۷۱۰/۹۴	۱۰۰	۳		
۹۱۰۰/۲۴	۱۰۰	۴		
۸۹۴۳/۴۱	۱۰۰	۱	۵	EDD
۹۲۹۹/۷۵	۱۰۰	۲		
۹۰۳۸/۱۳	۱۰۰	۳		
۹۲۵۴/۹۶	۱۰۰	۴		
۹۳۱۴/۸۴	۱۰۰	۱	۶	CR
۹۱۸۷/۶۴	۱۰۰	۲		
۹۷۱۰/۹۴	۱۰۰	۳		
۹۲۷۴/۰۳	۱۰۰	۴		
۹۲۳۰/۰۷	۱۰۰	۱	۷	SLACK
۹۴۷۴/۲۵	۱۰۰	۲		
۹۱۱۷	۱۰۰	۳		
۹۳۱۷	۱۰۰	۴		

### طراحی آزمایش‌ها به کمک تحلیل واریانس

به منظور تعیین بهترین توالی، ابتدا آنالیز واریانس برای بررسی تساوی میانگین روی داده‌های فوق انجام گرفته است:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7$$

حداقل یکی از میانگین‌ها با بقیه متفاوت است:  $H_1$

با توجه به جدول ۴، از آنجا که مقدار P-value کوچک‌تر از ۰/۰۵ است، فرض صفر رد شده و بین میانگین‌ها اختلاف معنادار وجود دارد.

جدول ۴. آنالیز واریانس

منبع	DF	Adj SS	MS	F-value	P-value
فاکتور اولویت‌بندی	۶	۵۷۷۰۹۰	۹۶۱۴۸	۳/۲۹	۰/۰۱۹
خطا	۲۱	۵۹۲۶۰۰	۲۸۲۱۹		
کل	۲۷	۱۱۴۹۶۹۱			

به منظور دسته‌بندی گروه‌های متفاوت از روش توکی استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۵. دسته‌بندی گروه‌ها به کمک روش توکی

فاکتور	میانگین	گروه	گروه
۶	۹۳۷۲	A	
۳	۹۳۲۲/۹	A	
۷	۹۲۸۴/۶	A	B
۱	۹۱۶۱/۸	A	B
۲	۹۱۴۵/۶	A	B
۵	۹۱۳۴/۱	A	B
۴	۸۹۱۸/۵		B

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، دو گروه ایجاد شده است و از آنجا که تابع هدف بر مبنای هزینه است، گروه دوم که دارای هزینه کمتری است پذیرفته می‌شود. به بیان دیگر، روش LPT کمترین هزینه را دارد، ولی از لحاظ آماری، نتایج روش‌های EDD، LIFO، FIFO و SLACK نیز قابل قبول است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مسئله تولید کارگاهی در حالت قطعی و ایستا با بیش از دو ماشین، پیچیدگی زیادی دارد و وارد کردن عوامل ایجاد عدم قطعیت، بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. بر این اساس، با استفاده از تکنیک‌های معمولی تحقیق در عملیات، نمی‌توان به مدل‌سازی و یافتن جواب بهینه برای این مسئله اقدام کرد. اغلب مسائلی که در این زمینه مدل‌سازی شده‌اند با استفاده از فرض‌های محدودکننده، به ساده‌سازی مسئله اقدام کرده‌اند که این کار باعث فاصله‌گرفتن از حالات واقعی می‌شود. به‌منظور بررسی شبیه‌سازی به‌عنوان روشی برای بهینه‌سازی، در این تحقیق ابتدا مدل ریاضی مسئله که تعیین توالی کارها در تولید کارگاهی با هدف حداقل نمودن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد بود، بیان شد. در ادامه مدل شبیه‌سازی مسئله به کمک نرم‌افزار Arena 14 طراحی گردید و با یک مثال عددی بررسی و تحلیل شد و توالی نزدیک به بهینه به‌منظور حداقل کردن هزینه به کمک نرم‌افزار Minitab و آنالیز واریانس مشخص شد. نتایج نشان داد روش LPT کمترین هزینه را دارد، اما از لحاظ آماری نتایج روش‌های EDD، LIFO، FIFO و SLACK نیز قابل قبول است.

پیشنهاد می‌شود سازمان‌های تولیدی و خدماتی به‌منظور بهینه‌سازی شاخص‌های عملکردی خود از شبیه‌سازی به‌عنوان، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری استفاده کنند، این سیستم می‌تواند در تصمیم‌گیری برای تعداد بهینه تجهیزات، تعداد بهینه نیروی انسانی و سایر موارد با توجه به شاخص‌های عملکردی مد نظر و همچنین محدودیت‌های موجود در سازمان، اثربخش باشد. استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند علاوه بر زمان‌بندی تولید کارگاهی، در سایر فرایندهای تولیدی نظیر Flow Shop و... نیز استفاده شود. همچنین برای زمان‌بندی مسائل حمل و نقل زمینی و هوایی می‌توان از این تکنیک استفاده کرد.

### فهرست منابع

- زندیه، م.، احمدی، ا. (۱۳۹۳). زمان‌بندی مقاوم و پایدار برای محیط کار کارگاهی منعطف با شکست تصادفی ماشین. نشریه مدیریت صنعتی، ۳(۳)، ۵۳۴-۵۱۱.
- سلیمی فرد، خ.، انصاری، م. (۱۳۹۵). مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه ترافیک شهری با شبکه‌های پتری رنگین. نشریه مدیریت صنعتی، ۳(۳)، ۴۰۴-۳۸۱.
- علی‌زاده، ل.، نورالسائ، ر.، رئیسی، ص. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی همزمان چند هدفه فرایند دادرسی کیفی به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری گسسته - پیشامد و طراحی آزمایش‌ها. نشریه مدیریت صنعتی، ۳(۱)، ۸۲-۶۵.



- Alizadeh, L., Noorossana, R. & Raissi, S. (2015). Multi-objective optimization of criminal trial process using discrete event computer simulation and design of experiment. *Industrial Management*, 7(1), 65-82. (in Persian)
- Azadivar, F. (1999). Simulation optimization methodologies, Presented at *the Proceedings of the 31st conference on winter simulation: Simulation a bridge to the future - Volume 1*, Phoenix, Arizona, United States.
- Banks, J. & Nelson, B. L. (2010). *Discrete-Event System Simulation*: Prentice Hall.
- Blackstone, J. H., Phillips, D. T. & Hogg, G. L. (1982). A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20(1), 27-45.
- Chan, F. T. S., Chan, H. K., Lau, H. C. W. & Ip, R. W. L. (2003). Analysis of dynamic dispatching rules for a flexible manufacturing system. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3), 325-331.
- Hashim, S. A. M. (2017). Simulation for reducing energy consumption of multi core low voltage power cable manufacturing system. *Journal on Technical and Vocational Education*, 1(2), 1-10.
- Jain, A. & Meeran, S. (1999). A State-Of-The-Art Review of Job-Shop Scheduling Techniques (113ed.) Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.54.8522>.
- Klemmt, A., Horn, S., Beier, E. & Weigert, G. (2007). Investigation of modified heuristic algorithms for simulation-based optimization. In *Electronics Technology, 30th International Spring Seminar on*, pp. 24-29.
- Klemmt, A., Horn, Weigert, S. G. & Wolter, K.J. (2009). Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(6), 917-925.
- Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*: Springer.
- Rane, A. B., Sunnapwar, V. K., Chari, N. R., Sharma, M. R. & Jorapur, V. S. (2017). Improving performance of lock assembly line using lean and simulation approach. *International Journal of Business Performance Management*, 18(1), 101-124.
- Salimifard, K. & Ansari, M. (2016). Modeling and Simulation of Urban Traffic Network Using Colored Petri Nets. *Industrial Management*, 8(3), 381-404. (in Persian)
- Sharma, S. K., Suraj, B. V. & Routroy, S. (2017). Positioning of Inventory in Supply Chain Using Simulation Modeling. *The IUP Journal of Supply Chain Management*, 13(2), 20-32.

Sajadi, S. M., Esfahani, M. M. S. & Sörensen, K. (2011). Production control in a failure-prone manufacturing network using discrete event simulation and automated response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4), 35-46.

Teles, J., Lopes, R. B. & Ramos, A. L. (2017). A Simulation-Based Analysis of a Cork Transformation System. In *Engineering Systems and Networks* (pp. 3-11). Springer, Cham Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Springer.

Vieira, G. E., Herrmann, J. W. & Lin, E. (2000). Predicting the performance of rescheduling strategies for parallel machine systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(4), 256-266.

Weng, M. X. & Ren, H. (2006). An efficient priority rule for scheduling job shops to minimize mean tardiness. *IIE Transactions*, 38(9), 789-795.

Yan, Y. & Guoxin, W. (2007). A job shop scheduling approach based on simulation optimization, in *Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE International Conference on*, pp. 1816-1822.

Zandieh, M. & Ahmadi, E. (2015). Robust and stable scheduling for FJSP under random machine breakdown by use of genetic algorithm and simulation. *Industrial Management*, 6(3), 511-534. (in Persian)