

ارائه‌ی مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی تولید در محیط‌های تولیدی ترکیبی ساخت ذخیره‌یی - سفارشی با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات و حل آن با الگوریتم‌های فراابتکاری

ناصر پیاپی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

اسماعیل مهدی‌زاده* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۶)
دوری (۱-۳۳)، شماره ۲/۲، ص. ۱۳-۳

در این پژوهش مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی تولید در محیط‌های تولیدی ترکیبی ساخت ذخیره‌یی و ساخت سفارشی با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات ارائه می‌شود. برای حل مدل ارائه شده در ابعاد کوچک از روش شاخه‌وکران با نرم افزار لینگو و ویرایش ۸ بهره گرفته می‌شود. اما به دلیل ماهیت NP-hard بودن مسئله، برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهره گرفته شده است و پارامترهای این الگوریتم‌ها به روش تاگوشی تنظیم می‌شوند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهند که الگوریتم‌های ارائه شده در حل مسئله‌ی مورد مطالعه از کارایی مناسبی برخوردار هستند. همچنین دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی با هم مقایسه شده‌اند. از نظر گرافیکی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی برتری نسبی دارد اما از نظر آماری تفاوت معناداری بین الگوریتم‌های پیشنهادی وجود ندارد. همچنین به منظور اعتبارسنجی مدل و بررسی تأثیر واردکردن، نگه‌داری و تعمیرات در مدل با کمک یک مثال عددی نشان داده شده است که با تأیید دادن نگه‌داری و تعمیرات در مدل، به‌طور چشم‌گیری هزینه‌ی کل سیستم کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ساخت ذخیره‌یی، ساخت سفارشی، نگه‌داری و تعمیرات، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

naser.payami@gmail.com
emehdi@qiau.ac.ir

۱. مقدمه

این روش، میزان انعطاف‌پذیری سازمان نسبت به سفارش‌های مشتریان بسیار پایین است. همچنین بسته به نوع محصولات تولیدی، سازمان ریسک منسوخ شدن یا فاسد شدن محصولات خود را متحمل می‌شود. پیش از سال ۱۹۹۰ عمده‌ی تحقیقات در حیطه‌ی محیط‌های تولیدی MTS صورت گرفته است. در سیستم‌های تولیدی MTO، شرکت‌های تولیدی محصولات خود را براساس سفارش‌های دریافت شده از طرف مشتریان تولید می‌کنند و تا زمانی که سفارشی از طرف مشتری به سازمان نرسد، دست به تولید نمی‌زنند. انعطاف‌پذیری بیشتر و هزینه‌ی انبارداری کمتر از مزیت‌های اصلی این سیستم تولیدی محسوب می‌شود. از طرفی در این سیستم تولیدی، زمان تحویل سفارش به مشتری نسبت به سیستم‌های MTS بیشتر است.^[۱] در محیط‌های رقابتی کسب‌وکار امروز، بسیاری از سازمان‌ها با ایجاد سیستم‌های تولیدی ترکیبی MTS و MTO از مزایای هر دو سیستم بهره می‌برند که چنین محیط‌هایی را محیط‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO^۵ می‌نامند. در این گونه سیستم‌ها، ابتدا محصولات به شکل MTS و بدون توجه به سفارش مشتری تولید

امروزه شرکت‌های تولیدی برای برآوردن سفارش‌ها و احتیاجات مشتریان خود سیاست‌های تولیدی مختلفی را به کار می‌گیرند. بعضی از سیاست‌های تولیدی پرکاربرد عبارت‌اند از: ساخت ذخیره‌یی (MTS)^۱، مونتاژ طبق سفارش (ATO)^۲، ساخت سفارشی (MTO)^۳، و مهندسی طبق سفارش (ETO)^۴. در بین آنها سیستم‌های تولیدی ساخت ذخیره‌یی و ساخت سفارشی به‌طور گسترده‌تری در سازمان‌های تولیدی استفاده می‌شوند. در سیستم‌های تولیدی MTS، تقاضای مشتریان با موجودی‌های ذخیره‌شده از محصولات تمام شده برآورد می‌شود. به این دلیل، در این روش هزینه‌ی انبارداری نسبت به سایر سیستم‌ها بالاتر است. در این سیستم زمان تحویل سفارش به مشتری نسبت به سایر سیستم‌های تولیدی کمتر است که این موضوع مزیت اصلی این سیستم به شمار می‌آید. علاوه بر این در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۵.

می‌شوند سپس همچون سیستم MTO براساس سفارش مشتری تکمیل می‌شوند که به این حالت تفکیک تأخیری^۶ گفته می‌شود.^[۲] ویژگی‌های سیستم‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO عبارت‌اند از: زمان تحویل کم، موجودی کمتر، و استفاده از فواید تفکیک‌پذیری تأخیری. در محیط‌های تولیدی ترکیبی از عبارت «نقطه‌ی انفصال سفارش مشتری (CODP)»^۷ استفاده می‌شود. نقطه‌ی CODP نقطه‌ی در جریان تولید است که تمام فرایندهای تولیدی بعد از آن براساس سفارش مشتری انجام می‌شوند. هرچه CODP به انتهای خط تولید نزدیک‌تر باشد باعث کاهش زمان تحویل سفارش به مشتری و افزایش قدرت پاسخ‌گویی به مشتریان و نیز افزایش موجودی مواد اولیه و نیمه‌ساخته در ایستگاه‌های قبل این نقطه می‌شود. در مقابل هر چه این نقطه به ابتدای خط تولید نزدیک‌تر شود سبب کاهش موجودی مواد اولیه و نیمه‌ساخته و نیز افزایش زمان تحویل محصولات به مشتری می‌شود. مهم‌ترین مسئله‌ی تصمیم‌گیری در محیط‌های تلفیقی MTS/MTO یافتن مکان بهینه‌ی نقطه‌ی CODP است. مکان بهینه‌ی این نقطه به نوع محصول تولیدی، وضعیت بازار، و استراتژی تولید شرکت بستگی دارد. در واقع این نقطه، نقطه‌ی تعادل بین موجودی و زمان پاسخ‌گویی به سفارش‌های مشتریان است.^[۳] درباره‌ی سیستم‌های تولیدی ترکیبی تحقیقاتی صورت گرفته است. اولین تحقیق در مورد سیستم‌های تولیدی ترکیبی ساخت ذخیره‌ی و ساخت سفارشی توسط بینگدانگ انجام شده است که در این سیستم ترکیبی، قسمتی از سیستم براساس MTS و قسمتی دیگر براساس MTO کار می‌کند.^[۴] عشایری و سلن موضوع بهینه‌سازی انتخاب سفارش‌ها را در محیط‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO بررسی کرده‌اند. آنها روشی را به‌کار بردند که هزینه‌های تولید را در شرایطی که ظرفیت محدود باشد، به حداقل می‌رساند.^[۵] تسوونه و همکاران مدلی برای طراحی برنامه‌ریزی ظرفیت یک سیستم تولیدی ترکیبی MTS/MTO ارائه دادند. مدل آنها شامل تعیین بهینه‌ی مقدار تخصیص ظرفیت تولید به منظور نشان‌دادن رابطه‌ی بین میزان تخصیص ظرفیت تولیدی و دستیابی اهداف تولیدی برای هر محصول است.^[۶] سومان و همکاران سیستمی را پیشنهاد دادند که اندازه‌ی انباشته‌ی بهینه از نظر اقتصادی را در سه محیط MTS، MTO و MTS/MTO در نظر می‌گیرد. در مدل پیشنهادی آنها، مسئله‌ی زمان‌بندی انباشته با یک ایستگاه بررسی شده بود و تابع هدف کل هزینه شامل هزینه‌ی نگهداری و آماده‌سازی را کمیته می‌کند.^[۷] کرکانن مسئله‌ی تولیدی را در کارخانه‌ی نورد استیل با اندازه‌ی کوچک مورد مطالعه قرار داده است. او ادعا می‌کند که در مقالات دیگر که سیستم‌های ترکیبی را مطالعه کرده‌اند، هدف، حرکت از سوی سیستم MTS به سمت سیستم منعطف MTO بوده است ولی در تحقیق وی هدف، حرکت به سمت یک سیستم ترکیبی MTS/MTO است تا میزان محصولات نیمه‌ساخته‌ی را که انبار می‌شوند، بیازد.^[۸] عیوضی و همکاران در مدل خود برای سیستم‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO مباحث نرخ بحرانی و تعیین شرایط ترخیص و همچنین بحث ثابت در نظر گرفتن زمان ترخیص را در مدل خود وارد کرده‌اند. علاوه بر این با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی، توانسته‌اند شرایط کارگاه را به صورت پویا در نظر بگیرند.^[۹] رفیعی و ربانی با ارائه‌ی مدلی ابتدا تعیین کرده‌اند که چه محصولی در استراتژی MTS و چه محصولی در استراتژی MTO و چه محصولی در استراتژی ترکیبی MTS/MTO تولید شود و سپس برای محصول تولیدشده، فرایند تحلیل شبکه‌ی فازی (FANP)، استفاده کرده‌اند تا نقطه‌ی انفصال مشتری را سفارش تعیین شود.^[۱۰] کلانتری و همکاران مدلی را برای سیستم‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO در مرحله‌ی ورود سفارش‌ها ارائه کردند که در نتیجه‌ی آن سفارش‌ها ابتدا با روش Topsis فازی اولویت‌بندی می‌شوند و بعد از اولویت‌بندی، محدودیت‌های سرانگشتی ظرفیت و مواد برای شناسایی سفارش‌های نامطلوب اعمال می‌شود تا برخی از سفارش‌ها رد

شوند. برای سفارش‌هایی که رد نشده‌اند با ارائه‌ی یک مدل MILP، قیمت و زمان تحویل سفارش به مشتری ارائه می‌شود و در صورت قبول آنها توسط مشتری، برنامه‌ی تولید به سفارش اختصاص داده می‌شود.^[۱۱] ژانگ و همکاران مدل صف چند خدمت‌دهنده برای سیستم‌های MTS و MTO را ارائه دادند که در آن زیرمجموعه‌ی ماشین‌ها یا خدمت‌دهنده‌ها می‌توانند به صورت پویا بین تولیدات MTS و MTO تعویض شوند. آنها همچنین یک روش جست‌وجو برای تعیین پارامترهای کنترل موجودی و ظرفیت محصول ارائه کردند به طوری که محدودیت خدمت به مشتری در نظر گرفته می‌شود. سپس نتایج را در حالت پویا با نتایج سیستم‌های MTS و MTO، در حالت ایستا مقایسه کردند که نتایج نشان‌گر بهبود سیستم‌های پویاست.^[۱۲] از طرفی یکی از فعالیت‌های هزینه‌بر و زمان‌بر در محیط‌های تولیدی، فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات است و یک سیستم معروف در نگهداری و تعمیرات، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه^۸ است. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه عبارت گسترده‌ی است که شامل مجموعه‌ی فعالیت‌هایی است که برای بهبود قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیر بودن سیستم انجام می‌شود.^[۱۳] برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی تولید رایج‌ترین و مهم‌ترین مسئله در صنایع تولید است و ایستگاه‌های کاری (ماشین‌آلات، روبات‌های صنایع و...) مهم‌ترین منابع برای انجام برنامه‌های تولیدی‌اند. فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ی تولید به طور مستقیم زمان‌بندی عملیات ایستگاه‌های کاری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برنامه‌ریزی تولید تخصیص منابع محدود به مجموعه‌ی فعالیت‌ها به منظور بهینه‌کردن اهداف مشخصی است. در سیستم‌های تولید واقعی، در برخی از دوره‌ها تعدادی از ایستگاه‌های کاری به دلیل درگیر بودن در فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات از پیش تعیین شده یا به دلیل خرابی‌های پیش‌بینی نشده در دسترس نیستند. در زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات، ایجاد برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات مناسب به منظور کمیته‌سازی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات مهم‌ترین کار است. بنابراین، در عمل یک رابطه‌ی تنگاتنگ بین فعالیت‌های تولید و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات وجود دارد.^[۱۴] فیتوچی و نورلخت مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات غیردوره‌ی^۹ را برای تک‌ماشین در افق برنامه‌ریزی محدود و به صورت چندمحصولی به صورت یکپارچه بررسی کردند. در این مقاله برنامه‌ریزی تولید بهینه و عملیات نگهداری و تعمیرات به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. تابع هدف کمیته‌سازی هزینه‌های نگهداری تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه، هزینه‌های آماده‌سازی، هزینه‌های نگهداری، هزینه‌های تولید و هزینه‌های سفارش‌های عقب‌افتاده است. در این مقاله نگهداری و تعمیرات به صورت غیردوره‌ی و یکپارچه با هزینه‌های تولید در نظر گرفته شده است که در این حالت هزینه‌ها نسبت به حالت‌های برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات به صورت غیریکپارچه و در نظرگیری نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به صورت دوره‌ی کاهش یافته است.^[۱۵] لیو و همکاران در سیستم‌های تولیدی تک‌ماشینی رو به زوال^{۱۰} در مرحله‌ی مونتاژ محصولات، نگهداری و تعمیرات و بهبود کیفیت را به صورت یکپارچه در نظر گرفته‌اند. با مطالعه‌ی موردی انجام‌گرفته در یک شرکت تولید بدنه‌ی دنده‌ی استوانه‌ی اتومبیل نشان داده می‌شود که مدل مورد نظر موجب سود اقتصادی می‌شود که در مدل‌های قبلی این ادغام منجر به کاهش سود اقتصادی شده بود.^[۱۶] کادر و همکاران استراتژی مدیریتی جدیدی را که از برنامه‌ی تولید بهینه و استراتژی نگهداری و تعمیرات با استفاده از قطعات یدکی جدید و استفاده‌شده^{۱۱} در هنگام عملیات نگهداری و تعمیرات ترکیب یافته است با ملاحظات زیست‌محیطی به‌کارگرفته‌اند که هزینه‌ی کل شامل هزینه‌های تولیدی، نگهداری و تعمیرات، هزینه‌های قطعات یدکی (جدید و استفاده‌شده) و کربن دور ریخته شده است. با مثال عددی حل‌شده نشان داده می‌شود که هزینه‌ی استفاده از قطعات یدکی استفاده‌شده هم از لحاظ هزینه و هم از لحاظ میزان کربن آزادشده

به عنوان محصول نیمه ساخته محصولات MTS/MTO به مصرف می رسند (تقاضای داخلی).

-- در ارتباط با محصولات MTS/MTO یک خانواده محصول شامل q محصول مختلف وجود دارد. به این معنی که محصول نیمه ساخته این محصولات که از این پس WIP نامیده می شود، برای تمام این q نوع محصول تا مرحله تولید این محصول نیمه ساخته با هم مشترک است. پس از آن براساس سفارش مشتریان، q نوع محصول را می توان از مونتاژ قطعات مشخص بر روی WIP تولید کرد.

-- تولید محصولات MTS در هر دوره برای استفاده در دوره بعد است. به این ترتیب که در هر دوره، پیش بینی تقاضای خارجی و تقاضای داخلی این محصولات در دوره بعد مشخص و براساس آن میزان تولید محصولات MTS در هر دوره معین می شود.

-- مازاد محصولات MTS که در انتهای هر دوره t در انبار باقی می ماند، قابل انتقال و استفاده در دوره $t + 1$ است.

-- خط مونتاژ نیز به صورت تولید محصولی و دارای K ایستگاه مونتاژ است.

-- نگه داری و تعمیرات برای تمام ماشین آلات موجود در خط مونتاژ اجرا می شود.

-- برای انجام عملیات نگه داری و تعمیرات منابع کافی وجود دارد.

-- در صورت عدم انجام نگه داری و تعمیرات بر روی منبع k ام از خط تولید در دوره $t - 1$ در دوره t در یک خرابی به سیستم تحمیل می شود. این خرابی در تابع هدف به عنوان جریمه یی برای منبعی در نظر گرفته می شود که دوره قبل بر روی آن منبع نگه داری و تعمیرات انجام نشده باشد.

-- خرابی ناشی از انجام نشدن نت بر روی منبع k ام از خط مونتاژ در دوره $t - 1$ در دوره t در زمان های عادی و اضافه کاری رخ می دهد.

-- عملیات نگه داری و تعمیرات در یک دوره می تواند بر روی ماشین آلات مختلف از خط مونتاژ به صورت هم زمان صورت گیرد.

۲.۲. مدل ریاضی برای سفارش های MTS/MTO

این مدل توسعه ی مدل ارائه شده توسط کلاتری و همکاران است که در پیشینه نیز آورده شده است.^[۱۱] بعد از ارائه ی فرضیات مدل، در این بخش به ارائه ی مدل ریاضی می پردازیم.

۱.۲.۲. مشخصه های مدل ریاضی پیشنهادی

اندیس ها:

j : اندیس سفارش ($j = 1, \dots, J$)؛

k : اندیس ایستگاه در خط مونتاژ ($k = 1, \dots, K$)؛

k' : اندیس ایستگاه در خط مونتاژ ($k' = 1, \dots, K$)؛

l : اندیس ماده ی اولیه برای تولید محصولات MTS/MTO ($l = 1, \dots, L$)؛

q : اندیس نوع محصول MTS/MTO ($q = 1, \dots, Q$)؛

t : اندیس دوره ی زمانی ($t = 1, \dots, T$).

پارامترها:

cr_{qkt} : هزینه ی مونتاژ یک واحد محصول MTS/MTO نوع q ام روی ایستگاه

k ام از خط مونتاژ در یک واحد زمان (ماشین - ساعت) در دوره ی t ؛

co_{qkt} : هزینه ی مونتاژ یک واحد محصول MTS/MTO نوع q ام روی ایستگاه

k ام از خط مونتاژ در یک واحد زمان (ماشین - ساعت) در دوره ی t در زمان

بهر از قطعات یدکی جدید است. همچنین برنامه ی نگه داری و تعمیرات با قطعات جدید و استفاده شده ارائه شده است.^[۱۷] در این مقاله به دنبال این هستیم که در سیستم تولیدی ترکیبی MTS/MTO پیشنهادی با در نظر گیری هزینه های عملیاتی، هزینه ی نگه داری و تعمیرات، هزینه ی خرابی و جریمه های دیرکرد - زودکرد سفارش ها، در چه دوره هایی نگه داری و تعمیرات بر روی منابع تولیدی انجام گیرد تا هزینه ی کل سیستم حداقل شود. مدل مورد نظر ابتدا برای به دست آوردن جواب های دقیق در ابعاد کوچک با نرم افزار بهینه سازی لینگو ویرایش ۸ حل شده است و به دلیل ماهیت NP-Hard بودن آن -- که در مقاله ی کلاتری و همکاران^[۱۱] نیز به آن اشاره شده است -- با الگوریتم های فراابتکاری ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات حل شده است و مقایسات آماری بین روش های حل پیشنهادی صورت گرفته است.

۲. مدل پیشنهادی

مدلی را که در ادامه خواهیم آورد برای سیستم های تولیدی ترکیبی MTS/MTO در مرحله ی ورود سفارش ها به سازمان است.

۱.۲. مفروضات مدل

-- افق زمانی برنامه ریزی در این مسئله معادل T است که این بازه ی زمانی، خود به دوره های کوچک تر و مساوی به نام t تقسیم می شود.

-- سفارش های مشتریان بر اساس اولویت مشتریان به دو دسته سفارش های با اولویت بالا^{۱۲} و سفارش های با اولویت نرمال^{۱۳} تقسیم می شوند.

-- حجم سفارش پذیرفته شده مشتریان از طرف سازمان تغییر پذیر نیست.

-- زمان تحویل سفارش توسط مشتری تعیین می شود.

-- چنانچه سفارش زودتر از زمان تحویل مقرر شده آماده شود، جریمه ی زودکرد به آن تعلق می گیرد و چنانچه دیرتر از زمان تحویل مقرر شده آماده شود، جریمه ی دیرکرد به آن تعلق می گیرد.

-- مواد اولیه برای تولید محصولات سازمان در انبار نگه داری می شود و چنانچه این مواد برای تولید سفارش های ورودی به سازمان کافی نباشند، سفارش از دست رفته خواهیم داشت.

-- مواد اولیه در هر دوره t برای استفاده در دوره $t + 1$ به تأمین کنندگان سفارش داده می شود و در همان دوره t نیز دریافت و در انبار نگه داری می شود.

-- باقی مانده ی مواد اولیه در هر دوره قابل انتقال و استفاده در دوره $t + 1$ است.

-- چنانچه ظرفیت ماشین آلات تولیدی برای تولید سفارش های دریافتی از مشتریان کافی نباشد، اضافه کاری و برون سپاری مجاز است.

-- محصولات تولیدی در سازمان به دو دسته تقسیم می شوند: محصولاتی که تولید آنها مبتنی بر انبارش است که از این پس این محصولات را MTS می نامیم و محصولاتی که تولید آنها تا مرحله ی مشخصی از فرایند تولید بر اساس انبارش و پس از آن مرحله بر اساس سفارش مشتری است که از این پس این محصولات را MTS/MTO می نامیم.

-- در سازمان، تنها یک نوع محصول MTS تولید می شود. محصولات MTS که در سازمان تولید می شوند، به دو صورت مشخص به مصرف می رسند: این محصولات هم به صورت مستقیم به فروش می رسند (تقاضای بیرونی) و هم

اضافه‌کاری؛

CS_{qkt} : هزینه‌ی مونتاژ یک واحد محصول MTS/MTO نوع q ام روی ایستگاه مونتاژ نوع k ام در یک واحد زمان (ماشین - ساعت) در دوره‌ی t در حالتی که تولید برون‌سپاری شود؛

CT_j : جریمه‌ی دیرکرد/زودکرد سفارش z ام به ازای هر واحد زمانی؛

CR_{kt} : بیشینه‌ی ظرفیت در دسترس ایستگاه k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t در زمان‌های عادی (بر حسب ماشین - ساعت)؛

CO_{kt} : بیشینه‌ی ظرفیت در دسترس ایستگاه k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t در زمان‌های اضافه‌کاری (بر حسب ماشین - ساعت)؛

CS_{kt} : بیشینه‌ی ظرفیت در دسترس ایستگاه k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t به منظور برون‌سپاری مونتاژ محصولات MTS/MTO (بر حسب ماشین - ساعت)؛

$APTS_{qkt}$: میزان ظرفیت لازم از منبع k ام برای تولید محصولات MTS/MTO نوع q ام که در دوره‌ی $(t - 1)$ پذیرفته شده‌اند و مونتاژ آنها کامل نشده و در دوره‌ی t ادامه یافته است (بر حسب ماشین - ساعت)؛

α_{kt} : درصدی از ظرفیت منبع k ام که در دوره‌ی t برای سفارش‌های احتمالی بعدی با اولویت بالاتر ذخیره می‌شود؛

PTS_{qk} : مدت زمان انجام عملیات منبع k ام از خط مونتاژ بر روی یک واحد از محصول MTS/MTO نوع q ام (بر حسب ساعت)؛

PRS_{jq} : تعداد محصولات MTS/MTO نوع q ام در سفارش j ؛

seq_{qk} : یک ماتریس $q \times k$ که شامل اعداد صفر و یک است و نشان می‌دهد که محصول MTS/MTO نوع q بر روی چه ایستگاه‌هایی در خط مونتاژ نیاز به عملیات مونتاژ دارد (چنانچه عدد موجود در یک خانه مشخص ۱ باشد، یعنی آن محصول بر روی آن ایستگاه نیاز به مونتاژ دارد و در غیر این صورت خیر)؛

RM_{lt} : میزان ماده‌ی اولیه‌ی نوع l ام که برای تولید محصول MTS/MTO در خط مونتاژ برای دوره‌ی t سفارش داده شده و در انبار موجود است (این مواد اولیه به جز محصول نیمه‌ساخته‌ی WIP هستند)؛

RRM_{lt} : میزان ماده‌ی اولیه‌ی نوع l ام برای تولید محصول MTS/MTO در خط مونتاژ در دوره‌ی قبل و انتقال داده شده به دوره‌ی t ؛

UM_{lq} : ضریب مصرف ماده‌ی اولیه‌ی l ام در محصول MTS/MTO نوع q ام؛
 SS_{qt} : تعداد کالای MTS تولیدشده در دوره‌ی $t - 1$ برای تولید محصولات MTS/MTO نوع q ام در دوره‌ی t ؛

RSS_{qt} : تعداد کالای MTS تولیدشده در دوره‌ی $t - 2$ برای تولید کالاهای MTS/MTO نوع q ام در دوره‌ی $t - 1$ که کامل مصرف نشده‌اند و به دوره‌ی t منتقل شده‌اند؛

UM' : ضریب مصرف محصول MTS در یک واحد محصول MTS/MTO نوع q ام؛

DD_j : زمان (دوره) تحویل سفارش z ام که توسط مشتری تعیین شده است؛

M : یک عدد خیلی بزرگ؛

MT_{kt} : مدت زمان انجام عملیات نگه‌داری و تعمیرات بر روی ایستگاه k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t (بر حسب ماشین - ساعت)؛

CM_{kt} : هزینه‌ی انجام عملیات نگه‌داری و تعمیرات بر روی ایستگاه k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t (بر حسب ماشین - ساعت)؛

K_{kt} : درصدی از ظرفیت ایستگاه k ام از خط مونتاژ که در دوره‌ی t (به علت عدم انجام نگه‌داری و تعمیرات در دوره‌ی قبل) به علت خرابی از دست می‌رود؛

C_{kt} : هزینه‌ی خرابی ایستگاه k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t که به علت انجام‌نشدن

نت در دوره‌ی قبل به سیستم تحمیل می‌شود.

متغیرهای تصمیم‌گیری:

PM_{kt} : عبارت صفر و یک نگه‌داری و تعمیرات، که در صورت انجام نگه‌داری و تعمیرات بر روی ایستگاه مونتاژ k ام از خط مونتاژ در دوره‌ی t مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر به خود می‌گیرد؛

Y_{jqkt} : مدت زمان تخصیص داده شده از ایستگاه k ام از خط مونتاژ به مونتاژ محصول MTS/MTO نوع q ام از سفارش z ام در دوره‌ی t در مجموع زمان‌های عادی و اضافه‌کاری و برون‌سپاری (بر حسب ماشین - ساعت)؛

O_{jqkt} : مدت زمان تخصیص داده شده از ایستگاه k ام از خط مونتاژ به مونتاژ محصول MTS/MTO نوع q ام از سفارش z ام در دوره‌ی t در زمان‌های اضافه‌کاری (بر حسب ماشین - ساعت)؛

S_{jqkt} : مدت زمان تخصیص داده شده از ایستگاه k ام از خط مونتاژ به مونتاژ محصول MTS/MTO نوع q ام از سفارش z ام در دوره‌ی t به صورت برون‌سپاری شده (بر حسب ماشین - ساعت)؛

CD_j : زمان (دوره) تکمیل سفارش j ام؛

$Z_{jqkk'}$: متغیر کمکی؛

X_j : اگر $Y_{jqkt} > 0$ باشد برابر ۱، در غیر این صورت برابر صفر است.

۲.۲.۲. مدل پیشنهادی

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{t=t_{now}}^T [cr_{qkt} \times (Y_{jqkt} - O_{jqkt} - S_{jqkt}) \\ & + co_{qkt} \times O_{jqkt} + cs_{qkt} \times S_{jqkt}] \\ & + \sum_{j=1}^J [ct_j \times |CD_j - DD_j|] + \sum_{k=1}^K \sum_{t=t_{now}}^{T-1} PM_{kt} \times CM_{kt} \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=t_{now}+1}^T C_{kt} \times (1 - PM_{k(t-1)}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q (Y_{jqkt} - O_{jqkt} - S_{jqkt}) \leq & \left(CR_{kt} - \sum_{q=1}^Q APTS_{qkt} - \right. \\ & \left. PM_{kt} * MT_{kt} - (1 - PM_{k(t-1)}) * K_{kt} * CR_{kt} \right) \\ & * (1 - \alpha_{kt}) \quad \forall k, t \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q (O_{jqkt}) \leq & CO_{kt} - (1 - PM_{k(t-1)}) * K_{kt} * CO_{kt} \\ & \forall k, t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q (S_{jqkt}) \leq CS_{kt} \quad \forall k, t \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T Y_{jqkt} \times seq_{qk} \geq PTS_{qk} \times PRS_{jq} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left(\sum_{t=1}^T (Y_{jqkt} \times seq_{qk}) \right) - (PTS_{qk} \times PRS_{jq}) \leq & Z_{jqkk'} \times M \\ & \forall j, q, k, k' : k < k' \end{aligned} \quad (6)$$

قیمتی که به مشتری اعلام می‌شود، بر اساس مدل ریاضی بالا و جمع هزینه‌های عملیاتی و یک نرخ افزایش قیمت (Mark up) حاصل می‌شود. این نرخ افزایش قیمت برای پوشش هزینه‌های بالاسری و هزینه‌های غیرمنتظره به قیمت اضافه می‌شود. بنابراین بر اساس این مدل ریاضی از حاصل جمع تابع هدف و یک Mark up استاندارد، قیمتی که برای مشتری برای هر سفارش اعلام خواهد شد، مشخص می‌شود.

۳. روش‌های حل پیشنهادی

در جدول ۱ مسائل مختلفی با ابعاد متفاوتی آورده شده که با نرم‌افزار بهینه‌سازی Lingo ۱۷ حل شده‌اند و زمان محاسباتی برای هر مسئله نیز در جدول ۱ آورده شده است. همه‌ی مسائل حل شده، بر روی یک رایانه‌ی شخصی با مشخصات RAM of ۲ GHz و Pentium(R) Dual – Core CPU E۵۷۰۰ @ ۳GHz اجرا شده‌اند. داده‌های مورد نیاز مسائل به صورت تصادفی تولید شده‌اند. واحد زمانی یک هفته و طول افق زمانی برنامه‌ریزی شش هفته است. به عبارت دیگر افق زمانی برنامه‌ریزی (T) به شش بازه‌ی زمانی مساوی (t) هر یک معادل یک هفته تقسیم می‌شود. با مشاهده‌ی زمان محاسباتی به دست آمده برای انواع مختلف مسائل مدل پیشنهادی مشاهده می‌شود که نرم‌افزار لینگو قادر به حل مسائل با ابعاد متوسط و بالا نیست. در نتیجه مدل پیشنهادی در زمره‌ی مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. برای مسائل با ابعاد متوسط و بالا الگوریتم‌های فراابتکاری GA ۱۵ و PSO ۱۶ را به کار برده‌ایم. نرم‌افزار لینگو برای ابعاد مختلف مسائل تا ۳۶۰۰ ثانیه اجرا شده است و اگر مسئله‌ی در خارج از این مدت زمان جواب داده باشد در جلوی آن مسئله در جدول ۱، N.A نوشته شده است. اندیس مواد اولیه برای تمام مسائل برابر دو در نظر گرفته شده است.

در ادامه ابتدا توضیح مختصری از الگوریتم ژنتیک ارائه و سپس تنظیم پارامترهای الگوریتم به کمک روش تاگوچی و نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم بر روی تعدادی از مسائل نمونه آورده می‌شود.

۱.۳. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

الگوریتم ژنتیک (GA) روش بهینه‌سازی و جست‌وجو بر مبنای فرایند تکاملی زیستی در طبیعت است. مفاهیم نظری GA توسط هالند در سال ۱۹۷۵ توسعه داده شد و به وسیله گلدبرگ مشهور شد.^[۱۹،۱۸] به طور خلاصه الگوریتم ژنتیک پیشنهادی گام‌های زیر را می‌پیماید:

جدول ۱. اطلاعات مربوط به آزمایش‌های عددی.

شماره مسئله نمونه	تعداد سفارش‌های موجود در سیستم	تعداد انواع محصولات MTS/MTO	تعداد محاسباتی منابع (s)	زمان
۱	۴	۲	۲	۳۵
۲	۶	۲	۲	۲۳۵
۳	۷	۳	۳	۱۱۵۰
۴	۸	۳	۳	۲۰۵۰
۵	۹	۴	۳	N.A

$$\sum_{t=1}^T (Y_{jqkt} \times seq_{qk}) \leq (1 - Z_{jqkk'}) \times M \quad \forall j, q, k, k' : k < k' \quad (7)$$

$$Y_{jqkt} \leq M \times X_{jt} \quad \forall j, q, k, t \quad (8)$$

$$t \times X_{jt} \leq CD_j \quad \forall j, t \quad (9)$$

$$\frac{\left(\sum_{j=1}^J Y_{jqkt} \right)}{PTS_{qk}} \leq \left[\frac{RM_{lt} + RRM_{lt}}{UM_{lq}} \right] \quad \forall q, l, k, t \quad (10)$$

$$\frac{\left(\sum_{j=1}^J Y_{jqkt} \right)}{PTS_{qk}} \leq \left[\frac{SS_{qt} + RSS_{qt}}{UM'_q} \right] \quad \forall q, k, t \quad (11)$$

$$Y_{ijqkt}, O_{jqkt}, S_{jqkt} \geq 0 \quad \forall j, q, k, t \quad (12)$$

$$CD_j \in N \quad \forall j, X_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, t \quad (13)$$

$$PM_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k, t \quad (14)$$

$$Z_{jqkk'} \in \{0, 1\} \quad \forall j, q, k, k' \quad (15)$$

تابع هدف ۱ نشان دهنده‌ی هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات، هزینه‌ی خرابی و جریمه‌های دیرکرد - زودکرد را کمیته می‌کند. محدودیت ۲ تا ۴ به ترتیب محدودیت‌های ظرفیت در زمان‌های عادی، اضافه‌کاری و برون‌سپاری سفارش‌ها هستند. محدودیت ۵ حداقل زمان مورد نیاز برای تکمیل سفارش را نشان می‌دهد. محدودیت ۶ و ۷ محدودیت‌هایی برای رعایت بحث پیش‌نیازی‌ها در استفاده از منابع تولیدی برای تکمیل سفارش‌ها هستند. محدودیت ۸ و ۹ به منظور تعیین دوره‌ی تکمیل کار هر سفارش هستند. محدودیت ۱۰ محدودیت مواد اولیه‌ی تولید است. محدودیت ۱۱ نیز مشابه محدودیت ۱۰ است، با این تفاوت که این محدودیت مربوط به میزان محصول نیمه‌ساخته‌ی در دسترس (یا همان محصولات MTS که در خط تولید می‌شوند) برای استفاده در عملیات مونتاژ است. محدودیت‌های ۱۲ تا ۱۵ محدودیت‌های نامنفی، عدد طبیعی، و دودویی بودن متغیرهای تصمیم است. مدل ارائه شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)^{۱۴} است. با وجود این در تابع هدف عبارت $|CD_j - DD_j|$ که نشان دهنده‌ی میزان انحراف زمان تکمیل سفارش از زمان تحویل آن است، این مدل را غیر خطی کرده است. برای خطی‌سازی تابع هدف از مقاله‌ی کلانتیری و همکاران استفاده شده است.^[۱۱] به منظور خطی‌سازی عبارت موجود در قدرمطلق می‌توان از دو متغیر مثبت CDP_j و DDN_j به ترتیب طبق روابط ۱۶ و ۱۷ استفاده کرد:

$$CDP_j : \begin{cases} CD_j - DD_j & \text{if } (CD_j - DD_j > 0) \\ CDP_j = 0 & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$DDN_j : \begin{cases} DD_j - CD_j & \text{if } (CD_j - DD_j < 0) \\ DDN_j = 0 & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

به این ترتیب به جای عبارت $|CD_j - DD_j|$ در تابع هدف می‌توان نوشت $CDP_j + DDN_j$. همچنین باید محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ به محدودیت‌های مدل اضافه شوند:

$$CD_j - DD_j = CDP_j - DDN_j \quad \forall j \quad (18)$$

$$CDP_j, DDN_j \geq 0 \quad \forall j \quad (19)$$

۳	۱	۴	۲	۰	۰	۱	۱	۰	۰
				۱	۱	۰	۰	۱	۱

شکل ۱. نمایشی از کروموزوم.

گام اول: ایجاد یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها؛

گام دوم: ارزیابی برازندگی هر کروموزوم با استفاده از تابع برازندگی؛

گام سوم: انتخاب کروموزوم‌هایی برای استخراج جفت‌گیری؛

گام چهارم: ایجاد کروموزوم‌های جدید با استفاده از عملگرهای تقاطع و جهش در کروموزوم‌های اخیر؛

گام پنجم: ارزیابی برازندگی جمعیت جدید کروموزوم‌ها با استفاده از تابع برازندگی؛

گام ششم: اگر شرط خاتمه برقرار شده باشد، خاتمه‌ی الگوریتم صورت بگیرد و بهترین کروموزوم‌ها برگردانده شوند و در غیر این صورت به گام چهارم برود.

اجرای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در ادامه آمده است.

۱.۱.۳. آماده‌سازی^{۱۸}

در آماده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، اطلاعات اساسی مورد نیاز برای شروع یک الگوریتم ژنتیک شامل اندازه‌ی جمعیت (Pop size)، احتمال تقاطع (Pc)، احتمال جهش (Pm)، تعداد تکرارها (nIt) تعیین می‌شوند. علاوه بر این، جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود.

۲.۱.۳. نمایش^{۱۹}

نمایش کروموزوم‌ها به صورت دو بخشی ارائه شده است. بخش اول نشان‌دهنده‌ی ترتیب انجام سفارش‌ها است و بخش دوم یک ماتریس $k * t$ است که به صورت صفر و یک مقدار می‌گیرد، که k نشان‌دهنده‌ی تعداد منابع موجود در خط مونتاژ و t نشان‌گر دوره‌ی زمانی برنامه‌ریزی است. شکل ۱ کروموزومی را نشان می‌دهد که تعداد سفارش‌ها چهار، تعداد منابع مونتاژ دو و افق زمانی شش دوره است.

در واقع در شکل ۱ چهار سفارش داریم که اولویت برآورد سفارش‌ها ابتدا با سفارش سوم، سپس سفارش‌های اول، چهارم و دوم است. اولویت‌بندی سفارش‌ها با توجه به اولویت خود سفارش در بین دیگر سفارش‌ها و ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات صورت می‌گیرد.

۳.۱.۳. انتخاب^{۲۰}

برای عمل انتخاب والد از روش انتخاب مسابقی استفاده شده است. در این روش مجموعه‌ی از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. کروموزوم برانده‌تر از مجموعه سپس در یک استخراج جفت‌گیری قرار می‌گیرد. این فرایند تا زمانی تکرار می‌شود تا استخراج جفت‌گیری شامل تعداد کافی از کروموزوم برای شروع روند جفت‌گیری باشد.

۴.۱.۳. عملگر تقاطع^{۲۱}

عمل تقاطع به صورت تقاطع یک نقطه‌ی است. به این صورت که برای بخش اول و بخش دوم کروموزوم دو نقطه‌ی تقاطع جداگانه انتخاب و عمل تقاطع انجام می‌شود. شکل ۲ مثالی از عملگر تقاطع را بر روی کروموزوم‌های آورده شده نشان می‌دهد که در این مثال تعداد سفارش‌ها چهار، تعداد منابع مونتاژ دو، و افق زمانی شش دوره است و نقاط دوم و سوم به ترتیب از بخش اول و دوم کروموزوم‌ها برای نقاط تقاطع انتخاب شده‌اند.

۳	۱	۴	۲	۰	۰	۱	۱	۰	۰
				۱	۱	۰	۰	۱	۱

والد اول:

۲	۳	۱	۴	۱	۰	۱	۰	۰	۱
				۱	۰	۰	۰	۱	۰

والد دوم:

۳	۱	۱	۴	۰	۰	۱	۰	۰	۱
				۱	۱	۰	۱	۰	۱

فرزند اول:

۲	۳	۴	۲	۱	۰	۱	۱	۰	۰
				۱	۰	۰	۰	۱	۱

فرزند دوم:

شکل ۲. مثالی از عملگر تقاطع.

۳	۱	۴	۲	۰	۰	۱	۱	۰	۰
				۱	۱	۰	۰	۱	۱

والد:

۴	۱	۳	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰
				۱	۱	۰	۱	۱	۱

فرزند:

شکل ۳. مثالی از عملگر جهش.

۵.۱.۳. عملگر جهش^{۲۲}

عمل جهش به این صورت است که برای بخش اول دو نقطه انتخاب می‌شود و جای مقدار ژن مربوط به آن دو نقطه با همدیگر عوض می‌شود. عمل جهش در بخش دوم کروموزوم به این صورت است که یک نقطه از بخش دوم انتخاب می‌شود و آن نقطه اگر مقدار صفر بود، به یک تغییر پیدا می‌کند و اگر مقدار آن یک بود، به صفر تغییر پیدا می‌کند. شکل ۳ مثالی از عملگر جهش را بر روی کروموزوم آورده شده در بخش اول و دوم کروموزوم نشان می‌دهد.

۶.۱.۳. تابع برازندگی^{۲۳}

تابع برازندگی همانند تابع هدف تعریف شده در بخش ۱.۲.۲ است.

۷.۱.۳. شرایط خاتمه

فرایند تکامل تا زمانی که شرایط خاتمه برآورده نشده باشد تکرار می‌شود. در این مقاله مجموعه‌ی تعداد تکرار ثابتی به عنوان معیار توقف انتخاب می‌شود. زمانی که الگوریتم به تعداد تکرارهای از پیش تعیین شده برسد، الگوریتم متوقف می‌شود.

۲.۳. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که از شبیه‌سازی رفتار اجتماعی گروه پرندگان مدل‌سازی شده است.^{[۲۰] و [۲۱]} الگوریتم PSO با جمعیت جواب‌های تصادفی به نام ذرات^{۲۴} مقداردهی اولیه می‌شود، و هر ذره که نشان‌دهنده‌ی یک راه حل کاندید به مسئله‌ی بهینه‌سازی می‌باشد با موقعیت و سرعت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود. این ذرات در فضای جست‌وجو تحت تأثیر ذرات بهینه‌ی اخیر پرواز می‌کنند. حرکت ذرات در فضای جست‌وجو تحت تأثیر سه عامل قرار می‌گیرد:^[۲۲] سرعت ذره در آخرین تکرار، موقعیت Pbest که بهترین راه حل به دست آمده‌ی خود ذره است و موقعیت

جدول ۲. پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم GA.

High	Medium	LOW	سطوح
۳	۲	۱	پارامتر
۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	MaxIt
۴۰	۳۰	۲۰	Npop
۰/۸	۰/۷	۰/۶	Pc
۰/۳	۰/۲	۰/۱	Pm
۵	۴	۳	Tour Size selection

جدول ۳. پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم PSO.

High	Medium	LOW	سطوح
۳	۲	۱	پارامترها
۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	MaxIt
۴۰	۳۰	۲۰	Npop
۱	۰/۹۹	۰/۹۸	W
۲	۱/۹	۱/۸	C۱
۲	۱/۹	۱/۸	C۲

جدول ۴. پارامترها و سطوح بهینه‌ی پارامترها برای الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی.

مقدار بهینه	پارامترها	روش حل پیشنهادی
۱۰۰۰	MaxIt	
۴۰	Npop	
۰/۶	Pc	GA
۰/۲	Pm	
۴	Tour Size selection	
۱۰۰۰	MaxIt	
۴۰	Npop	
۱	W	PSO
۱/۸	C۱	
۱/۸	C۲	

توسط کلانتری و همکاران^[۱۱] است. در جدول ۵ به ارائه‌ی مثال‌های مختلف پرداخته‌ایم و زمان‌های حل ۱۵ مسئله با ابعاد مختلف با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو و الگوریتم‌های GA و PSO پیشنهادی را آورده‌ایم. هر مسئله برای الگوریتم‌های پیشنهادی پنج بار اجرا شده است و میانگین مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی هر مسئله برای الگوریتم‌های پیشنهادی در جدول ۵ آورده شده است.

۱.۴. مقایسه‌ی نتایج حل الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی با

لینگو

برای نشان‌دادن درصد انحراف نسبی الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی از جواب

Gbest که بهترین راه حل در کل جمعیت را نشان می‌دهد. در هر تکرار موقعیت و سرعت هر ذره i نسبت به موقعیت‌های Pbest و Gbest به ترتیب با استفاده از معادلات ۲۰ و ۲۱ به‌روزرسانی می‌شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (20)$$

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + \varphi_1 r_1 (Pbest - x_i^t) + \varphi_2 r_2 (Gbest - x_i^t) \quad (21)$$

که v_i^t سرعت ذره i که نشان‌گر فاصله طی شده ذره از موقعیت فعلی ذره می‌باشد، x_i^t موقعیت فعلی ذره i را نشان می‌دهد، ω ضریب اینرسی می‌باشد که اندازه حرکت ذره را کنترل می‌کند، φ_1 و φ_2 به ترتیب ضریب یادگیری فردی و جمعی را نشان می‌دهند و r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت هستند که برای حفظ تنوع در جمعیت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این مقاله، نمایش جواب‌ها، تابع برازندگی و شرط خاتمه الگوریتم PSO مانند الگوریتم GA پیشنهادی در بخش ۱.۳، می‌باشند.

۳.۳. تنظیم پارامتر الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری به طور گسترده‌ی به پارامترهای این الگوریتم‌ها وابسته است. بنابراین، ضروری است تا پارامترهای الگوریتم‌ها برای افزایش دقت راه حل‌ها به دقت انتخاب شوند. چندین راه‌کار در طراحی آزمایش‌های (DOE) برای تنظیم پارامتر وجود دارند. یک گزینه، آزمایش کل فاکتورها است که همه سطوح فاکتورهای داده شده با همه سطوح فاکتورهای دیگر در آزمایش ترکیب می‌شود.^[۲۳] تاگوچی (۱۹۸۶) تعدادی از آزمایش‌ها را برای آزمودن تعداد زیادی از فاکتورها با تعداد خیلی کوچک از مشاهدات پیشنهاد داد. برای تعیین بهترین سطح هر فاکتور، راه‌کار تاگوچی نسبت سیگنال به نویز (S/N) را به عنوان اندازه تغییرپذیری به صورت رابطه ۲۲ در نظر می‌گیرد:

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log_{10} (RPD)^t \quad (22)$$

علاوه بر این، درصد انحراف نسبی (RPD) مقیاس عملکردی برای ارزیابی الگوریتم‌ها است. RPD نشان می‌دهد که چقدر الگوریتم از بهترین راه حل به دست آمده تفاوت دارد و از رابطه‌ی ۲۳ به دست می‌آید:

$$RPD = |Method \text{ Sol} - Best \text{ Sol}| * 100 / |Best \text{ Sol}| \quad (23)$$

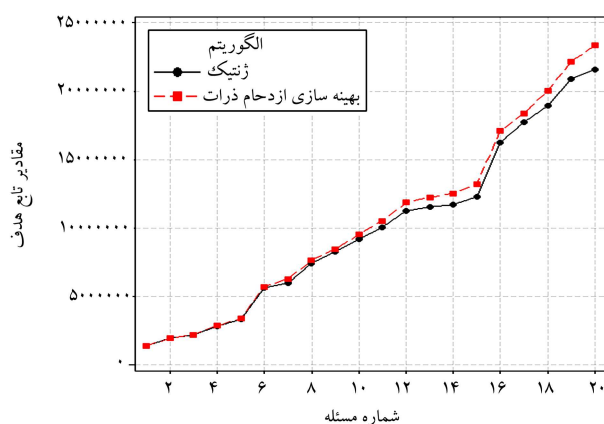
که Method Sol راه حل به دست آمده از الگوریتم داده شده برای مثال می‌باشد و Best Sol بهترین راه حل برای هر مثال است. آشکار است که کمترین مقدارها برای RPD ترجیح داده می‌شوند. بعد از به دست آوردن نتایج آزمایش تاگوچی، مقادیر RPD به نسبت S/N تبدیل می‌شوند. در هر کدام از الگوریتم‌های پیشنهادی پنج پارامتر وجود دارد که باید تنظیم شوند. پارامترها و سطوح انتخاب شده برای پارامترها (High و Medium، LOW) برای الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است و پارامترها و سطوح بهینه‌ی پارامترها برای الگوریتم‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

۴. نتایج محاسباتی و مقایسات

بعد از ارائه‌ی روش‌های حل، در این بخش به ارائه‌ی مثال‌های عددی با ابعاد متفاوت می‌پردازیم که داده‌های ورودی مسائل جدول ۵ شبیه داده‌های مسئله‌ی حل شده

جدول ۵. نتایج حل مسائل با ابعاد مختلف با استفاده از الگوریتم‌های حل پیشنهادی.

شماره مسئله	PSO		GA		Lingo	
	تابع هدف (C)	میانگین زمان محاسباتی (ثانیه)	تابع هدف (B)	میانگین زمان محاسباتی (ثانیه)	تابع هدف (A)	زمان محاسباتی (ثانیه)
۱	۱۳۲۴۳۰۰	۲۳۵	۱۳۲۴۳۰۰	۱۶۵	۱۳۲۴۰۰۰	۳۵
۲	۱۸۸۴۵۸۹	۳۴۵	۱۸۸۱۵۳۴	۲۴۴	۱۸۷۱۵۵۲	۲۳۵
۳	۲۱۳۵۸۶۲	۴۷۵	۲۱۳۱۴۲۵	۳۵۵	۲۱۲۱۳۶۰	۱۱۵۰
۴	۲۸۱۵۲۲۱	۵۳۸	۲۸۰۱۶۷۰	۴۱۰	۲۷۳۶۳۵۴	۲۰۵۰
۵	۳۳۴۶۱۷۰	۶۴۵	۳۲۷۷۱۱۰	۴۹۰	N.A	N.A
۶	۵۶۷۶۳۸۰	۸۲۰	۵۵۷۸۵۰۰	۶۲۰	N.A	N.A
۷	۶۲۵۶۳۰۰	۸۷۵	۵۹۲۱۳۵۵	۶۷۵	N.A	N.A
۸	۷۶۲۱۶۵۸	۹۶۳	۷۳۹۱۳۳۰	۷۳۰	N.A	N.A
۹	۸۴۳۵۵۲۰	۱۰۸۷	۸۲۲۱۷۵۲	۸۵۵	N.A	N.A
۱۰	۹۴۹۴۹۰۱	۱۲۱۵	۹۱۵۰۱۴۰	۹۱۲	N.A	N.A
۱۱	۱۰۵۱۱۵۸۰	۱۳۲۵	۱۰۰۰۹۱۷۵	۹۹۰	N.A	N.A
۱۲	۱۱۸۴۹۱۵۶	۱۴۷۵	۱۱۲۴۲۵۶۵	۱۱۸۵	N.A	N.A
۱۳	۱۲۲۲۶۱۲۵	۱۶۲۰	۱۱۵۴۶۳۶۵	۱۲۳۲	N.A	N.A
۱۴	۱۲۵۱۶۱۶۸	۱۸۲۵	۱۱۷۱۵۲۵۰	۱۳۸۰	N.A	N.A
۱۵	۱۳۲۰۰۲۴۵	۲۰۰۵	۱۲۲۴۱۷۵۸	۱۴۵۰	N.A	N.A
۱۶	۱۷۰۹۹۲۶۵	۲۳۲۰	۱۶۲۱۸۵۳۶	۱۶۷۰	N.A	N.A
۱۷	۱۸۳۸۰۵۸۲	۲۳۵۰	۱۷۷۳۵۲۵۸	۱۷۶۶	N.A	N.A
۱۸	۲۰۰۳۷۵۶۲	۲۴۱۰	۱۸۹۱۷۵۲۷	۱۸۴۵	N.A	N.A
۱۹	۲۲۱۷۰۱۲۰	۲۷۷۵	۲۰۸۷۱۸۲۵	۲۰۶۲	N.A	N.A
۲۰	۲۳۳۴۱۲۶۹	۲۷۷۰	۲۱۶۰۷۵۸۲	۲۱۰۶	N.A	N.A



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج مقدار تابع هدف دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی.

۲.۴. مقایسه‌ی نتایج حل الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی با یکدیگر

در این بخش به مقایسه‌ی دو الگوریتم فراابتکاری با یکدیگر می‌پردازیم. برای مقایسه‌ی دو الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی از دو معیار نتایج تابع هدف و زمان محاسباتی را استفاده می‌کنیم که به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. برای پی‌بردن به وجود تفاوت بین دو الگوریتم پیشنهادی از آزمون‌های آماری ۲۵

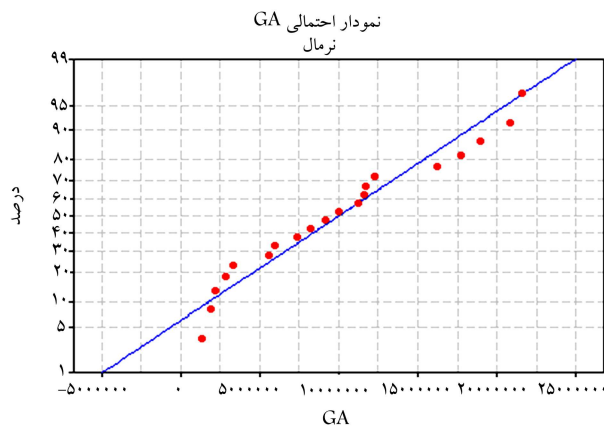
جدول ۶. نتایج معیار کیفیتی فاصله برای الگوریتم‌های پیشنهادی.

شماره مسئله	GAP _{PSO}	GAP _{GA}
۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲
۲	۰٫۶۹	۰٫۵۳
۳	۰٫۶۸	۰٫۴۷
۴	۲٫۸۸	۲٫۳۸

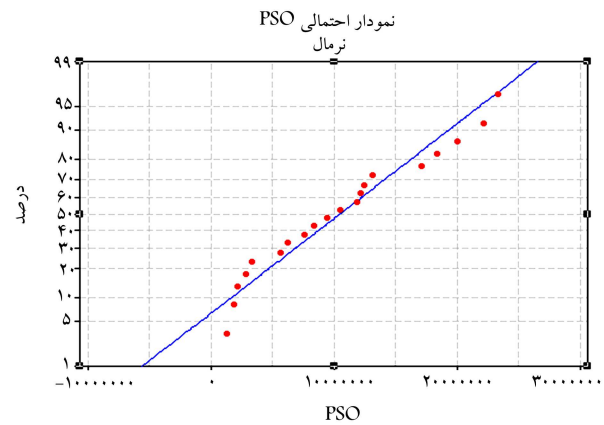
بهینه، از معیار کیفیتی فاصله (GAP) استفاده می‌کنیم. این معیار برای مقایسه‌ی هر کدام از الگوریتم‌ها با لینگو به صورت جداگانه محاسبه می‌شود که برای الگوریتم‌های پیشنهادی GA و PSO به ترتیب طبق روابط ۲۴ و ۲۵ محاسبه می‌شود که A، B، و C در جدول ۵ مشخص شده‌اند. معیار کیفیتی فاصله برای چهار مسئله‌ی اول جدول ۵ محاسبه شده است و نتایج در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی این است که انحراف نسبی هر دو الگوریتم GA و PSO از نتایج حل نرم‌افزار لینگو کم بوده است و این دو الگوریتم می‌توانند برای حل مسائل با ابعاد بالا نیز به کار برده شوند.

$$GAP_{GA} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (24)$$

$$GAP_{PSO} = \frac{C - A}{A} \times 100 \quad (25)$$



شکل ۶. نمایش نرمال بودن مسائل انتخاب شده برای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی.



شکل ۷. نمایش نرمال بودن مسائل انتخاب شده برای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی.

Two-Sample T-Test and CI: GA(Objective Function), PSO(Objective Function)

Two-sample T for GA(Objective Function) vs PSO(Objective Function)

	N	Mean	StDev	SE Mean
GA(Objective Function)	20	9989248	6447518	1441709
PSO(Objective Function)	20	10516149	6910343	1545200

Difference = μ (GA(Objective Function)) - μ (PSO(Objective Function))
 Estimate for difference: -526901
 95% CI for difference: (-4808915, 3755114)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -0.25 P-Value = 0.804 DF = 37

شکل ۸. نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار آماری برای مقایسه‌ی نتایج تابع هدف دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی.

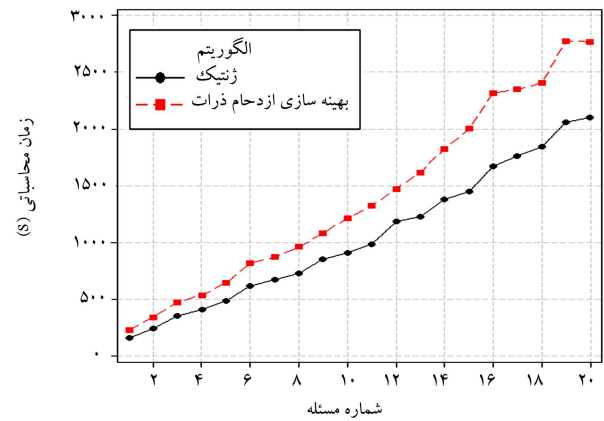
Two-Sample T-Test and CI: GA(time), PSO(time)

Two-sample T for GA(time) vs PSO(time)

	N	Mean	StDev	SE Mean
GA(time)	20	1057	612	137
PSO(time)	20	1404	818	183

Difference = μ (GA(time)) - μ (PSO(time))
 Estimate for difference: -347
 95% CI for difference: (-810, 117)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -1.52 P-Value = 0.138 DF = 35

شکل ۹. نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار آماری برای مقایسه‌ی زمان محاسباتی دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی.



شکل ۵. مقایسه‌ی زمان محاسباتی دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی.

استفاده می‌شود. مقایسات بین دو الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار Minitab ۱۶ انجام شده است. آزمون فرض آماری که برای مقایسه‌ی میانگین‌های دو جامعه به‌کار برده می‌شود به صورت رابطه‌ی ۲۶ است:

$$\begin{cases} H_0 : \mu = \mu_0 \\ H_1 : \mu \neq \mu_0 \end{cases} \quad (26)$$

که μ_0 میانگین جامعه‌ی آماری است. برای مقایسه‌ی دو الگوریتم با استفاده از معیارهای تابع هدف و زمان محاسباتی به دو آزمون فرض آماری مشابه رابطه‌ی ۲۶ نیاز است. بنابراین دو آزمون فرض به‌کار برده می‌شود که یکی برای مقایسه‌ی نتایج تابع هدف دو الگوریتم GA و PSO به‌کار برده می‌شود و دیگری برای مقایسه‌ی زمان‌های محاسباتی دو الگوریتم استفاده می‌شود. برای هر جامعه تعداد مسائل نمونه ۲۰ است که آماری آزمون t استودنت با تفاوت میانگین‌های دو جامعه‌ی مستقل خواهد بود. به علت کم بودن تعداد مسائل آزمایش شده کمتر از ۳۰ برای هر کدام از الگوریتم‌های GA و PSO پیشنهادی، باید نرمال بودن مسائل انتخاب شده با استفاده از نرم‌افزار Minitab نشان داده شوند تا در صورت نرمال بودن مسائل انتخاب شده مقایسات t استودنت برای مقایسه‌ی دو الگوریتم به‌کار برده شوند. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نرمال بودن مسائل انتخاب شده برای الگوریتم‌های GA و PSO پیشنهادی را نشان می‌دهند.

بعد از اثبات نرمال بودن مسائل تولید شده، برای مقایسه‌ی دو الگوریتم پیشنهادی با همدیگر آزمون t استودنت در نرم‌افزار Minitab استفاده می‌شود. نتایج حاصل از اجرای برنامه Minitab برای مقایسه‌ی نتایج تابع هدف و زمان‌های محاسباتی دو الگوریتم به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. بر اساس نتایج در شکل‌های ۸ و ۹ هر دو مقدار P-Value بزرگ‌تر از $\alpha = 0.05$ (خطای نوع اول) می‌باشند که این به معنای پذیرش فرض صفر برای هر دو آزمون فرض آماری است. به عبارتی هیچ تفاوت آماری بین الگوریتم‌های پیشنهادی GA و PSO از نظر نتایج تابع هدف و زمان‌های محاسباتی دو الگوریتم در سطح اطمینان ۹۵٪ وجود ندارد.

۳.۴. اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبار سنجی مدل ارائه شده در این مقاله، مسئله‌ی حل شده توسط کلاستری و همکاران^[۱۱] را با در نظر گرفتن فعالیت‌های نت با نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو و برپاش ۸

جدول ۷. اطلاعات مربوط به مسئله‌ی حل شده.

شماره منبع	افق برنامه‌ریزی (C)						افق برنامه‌ریزی (MT)						افق برنامه‌ریزی (CM)					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۷۹۰	۸۱۰	۷۶۰	۷۹۰	۸۴۰	۹۱۰	۶	۷	۵	۸	۵	۷	۸۱۰	۷۵۰	۸۰۰	۸۳۰	۹۰۰	۷۸۰
۲	۹۱۵	۷۱۰	۸۰۰	۹۲۰	۸۳۰	۸۶۰	۸	۸	۷	۵	۸	۹	۷۰۰	۸۱۰	۹۱۰	۸۲۰	۸۷۰	۹۱۰

جدول ۸. مقادیر متغیر نگه‌داری و تعمیرات در مدل پیشنهادی.

شماره منبع	افق برنامه‌ریزی (PM)					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰
۲	۰	۱	۰	۱	۱	۰

جدول ۹. مقایسه‌ی نتایج حل در مدل با نرم‌افزار لینگو ۸٫۰.

مقدار تابع هدف در مدل بدون در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات (مدل کلاسیک و همکاران ^[۱۱])	۱۲۴۵۰
مقدار تابع هدف در مدل با در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات	۱۰۶۲۰
مقدار کاهش در هزینه کل	۱۴٪

حل می‌کنیم. K_{kt} برای تمام ایستگاه‌های کاری در افق برنامه‌ریزی ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. سایر اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله در جدول ۷ آورده شده‌اند و بقیه داده‌های ورودی در مقاله‌ی کلاسیک و همکاران^[۱۱] است. نتیجه‌ی نهایی متغیر نگه‌داری و تعمیرات مربوط به حل مدل پیشنهادی در جدول ۸ آمده است. همچنین در جدول ۹ نتایج دو مدل (بدون در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات و با در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات) با هم مقایسه می‌شوند و نتایج نشان‌گر این است که مدل پیشنهادی (با در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات) نسبت به مدل کلاسیک و همکاران (بدون در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات)^[۱۱] ۱۴ درصد کاهش هزینه داشته است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در محیط‌های رقابتی کسب و کار امروز، بسیاری از سازمان‌ها با ایجاد یک سیستم تولیدی ترکیبی از دو محیط MTS و MTO از مزایای هر دوی این سیستم‌ها بهره می‌برند که چنین محیط‌هایی را محیط‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO می‌نامند. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان به زمان تحویل کم و موجودی کمتر اشاره کرد.

بحث در دسترس بودن منابع تولیدی و جلوگیری از خرابی‌های احتمالی ماشین‌آلات با استفاده از زمان‌بندی نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه موضوع مهمی در جواب‌گویی به موقع سفارش‌های مشتریان است که در مدل ارائه‌شده در این مقاله در نظر گرفته شده است. در این نوشتار برای سیستم‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO مدل ریاضی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات ارائه شد که هدف کمینه‌کردن هزینه‌های عملیاتی مونتاژ سفارش‌ها، هزینه‌ی نگه‌داری و تعمیرات و جریمه‌های دیرکرد - زودکرد تحویل سفارش‌هاست که خروجی‌های مدل پیشنهادی زمان‌بندی نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای منابع موجود در خط مونتاژ و همچنین قیمت و زمان تحویل سفارش‌ها به مشتریان هستند. قیمتی که به مشتری اعلام می‌شود، از جمع هزینه‌های عملیاتی به‌دست آمده از حل مدل و یک نرخ افزایش قیمت (Mark up) حاصل می‌شود. این نرخ افزایش قیمت برای پوشش هزینه‌های بالاسری و هزینه‌های غیر منتظره به قیمت اضافه می‌شود. برای مدل ارائه‌شده، مثال‌های عددی متنوع در ابعاد مختلف ارائه شده است و مشاهده می‌شود که نرم‌افزار لینگو قادر به حل مسائل با ابعاد متوسط و بالا در زمان معقول نیست که دسته‌بندی مدل مورد نظر را در زمره‌ی مسائل NP-hard قرار داده است.^[۱۱] برای حل این مسئله الگوریتم‌های فراابتکاری GA و PSO را پیشنهاد دادیم که قادر هستند مسائل با ابعاد متوسط و بالا را در زمان بسیار کم‌تر از لینگو حل کند. برای مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار لینگو و الگوریتم‌های PSO و GA پیشنهادی، از معیار کیفیتی فاصله استفاده شده است که نتایج نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن نتایج حل لینگو و الگوریتم‌های پیشنهادی است. برای مقایسه‌ی دو الگوریتم از نظر زمان محاسباتی و نتایج تابع هدف از آزمون فرض آماری استفاده شده است و نشان داده شده است که در سطح اطمینان ۹۵٪ هیچ تفاوت آماری بین دو الگوریتم وجود ندارد. همچنین در مدل ارائه‌شده که با در نظر گرفتن نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه در مرحله‌ی ورود سفارش‌ها و در سیستم‌های تولیدی ترکیبی MTS/MTO همراه بود شاهد کاهش هزینه‌ی کل نسبت به زمانی که فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات در نظر گرفته نشده بود بودیم که این موضوع با کمک یک مثال عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای تحقیقات آینده، در مدل مورد نظر می‌توان ضایعات تولید و زمان آماده‌سازی منابع تولیدی را در نظر گرفت. همچنین زمان تحویل سفارش‌ها در این تحقیق قطعی است که می‌توان آن را احتمالی در نظر گرفت.

پانویس‌ها

1. make to stock
2. assemble to order
3. make to order

4. engineering to order
5. make to stock/make to order
6. delayed differentiation
7. customer order decoupling point
8. preventive maintenance
9. noncyclical preventive maintenance

10. deteriorating single-machine manufacturing systems
11. new and used spare parts
12. high priority
13. normal priority
14. mixed integer linear programming
15. genetic algorithms
16. particle swarm optimization
17. not available
18. initialization
19. representation
20. selection
21. crossover operator
22. mutation operator
23. fitness function
24. particles
25. statistical tests

منابع (References)

1. Hendry, L.C. and Kingsman, B.G. "Production planning systems and their applicability to make to order companies", *European Journal of Operations Research*, **40**(1), pp. 1-15 (1989).
2. Lee, H.L. and Tang, C.S. "Modeling the cost and benefit of delayed differentiation", *Manage. Sci.*, **43**, pp. 40-53 (1997).
3. Olhager, J. "Strategic positioning of the order penetration point", *Int. J. Production Economics*, **85**, pp. 319-329 (2003).
4. Yingdong, M. "Design of hybrid make-to-stock (MTS)-make-to-order (MTO) manufacturing system", M.Sc. Thesis, the University of Minnesota (2001).
5. Ashyery, J. and Selen, W.J. "Order selection optimization in hybrid make-to-order and make-to-stock markets", *Journal of the Operational Research Society*, **52**, pp. 1098-1106 (2001).
6. Tsubone, H., Ishikawa, Y. and Yamamoto, H. "Production planning system for a combination of make-to-stock and make-to-order products", *International Journal of Production Research*, **40**(18), pp. 4835-4851 (2002).
7. Soman, C.A., Van Donk, D.P. and Gaalman, G. "Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production system with stochastic demand", *International Journal of Production Economics*, **104**(2), pp. 441-453 (2006).
8. Kerkanen, A. "Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill", *International Journal of Production Economics*, **108**, pp. 111-118 (2007).
9. Eivazy, H., Rabbani, M. and Ebadian, M. "A developed production control and scheduling model in the semiconductor manufacturing systems with hybrid make-to-stock/ make-to-order", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **45**, pp. 968-986 (2009).
10. Rafiei, H. and Rabbani, M. "Order partitioning and order penetration point location in hybrid make-to-stock/ make-to-order production contexts", *Computers & Industrial Engineering*, **61**, pp. 550-560 (2011).
11. Kalantary, M., Rabbani, M. and Ebadian, M.A. "Decision support system for order acceptance/rejection in hybrid MTS/MTO production systems", *Applied Mathematical Modelling*, **35**, pp. 1363-1377 (2011).
12. Zhang, Z.G., Kim, I., Springer, M., Cai, G. and Yu, Y. "Dynamic pooling of make-to-stock and make-to-order operations", *Int. J. Production Economics*, **144**, pp. 44-56 (2013).
13. Moghaddam, K.S. and Usher, J.S. "Sensitivity analysis and comparison of algorithms in preventive maintenance and replacement scheduling optimization models", *Computers & Industrial Engineering*, **61**, pp. 64-75 (2011).
14. Moghaddam, K.S. "Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming", *Int. J. Production Economics*, **146**, pp. 704-716 (2013).
15. Fitouhi, M.H. and Nourelfath, M. "Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for a single machine", *Int. J. Production Economics*, **136**, pp. 344-351 (2012).
16. Lu, B., Zhou, X. and Li, Y. "Joint modeling of preventive maintenance and quality improvement for deteriorating single-machine manufacturing systems", *Computers & Industrial Engineering*, **91**, pp. 188-196 (2016).
17. Kader, B., Sofiene, D. and Nidhal, R. "Ecological and joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventories for an optimal production plan", *Reliability Engineering & System Safety*, **149**, pp. 172-186 (2016).
18. Holland, J.M., *Adaption in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI: The University of Michigan (1975).
19. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search: Optimization and Machine Learning*, 1st Edition, MA: Addison-Wesley (1989).
20. Kennedy, J. and Eberhart, R. "Particle swarm optimization", In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, **4**, pp. 1942-1948 (1995).
21. Kennedy, J. and Eberhart, R., *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann (2001).
22. Sha, D.Y. and Hsu, C.Y. "A new particle swarm optimization for the open shop scheduling problem", *Computers & Operations Research*, **35**(10), pp. 3243-3261 (2008).
23. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York (2005).