

Designing a Mathematical Model of a Collaborative Production System Based on Make to Order under Uncertainty

Mehrnaz Sadat Seyed Bathaee^{*}, Javid Ghahremani-Nahr^{},
Hamed Nozari^{***}, Seyed Esmaeil Najafi^{****}**

Abstract

We present a mathematical model for the problem of collaborative production system based on order with fairness to allocate production loads. The main objectives of the model are to minimize total production costs and maximize the use of resources in order to distribute production loads fairly in conditions of uncertainty. Fuzzy programming was used to control uncertain parameters. The results show that, with increasing the uncertainty rates, production system costs have increased. Since the capacity of factories is constant, with the increase in demand, the amount of production has increased and the maximum use of resources of each factory has also increased. Also, contrary to the trend of system cost changes, with the increase in the number of factories, the maximum use of available resources has decreased. To solve large sample problems, the NSGA II algorithm with a suitable chromosome is used to search the problem space. Numerical results of solving 15 sample problems show the high efficiency of NSGA II algorithm in solving the problem of cooperative production system in a very short time.

Keywords: Make to Order; Fuzzy Programming; Collaborative Production System; NSGA II Algorithm; Uncertainty.

Received: Jan. 11, 2021; Accepted: Oct. 01, 2021.

^{*} Master Student, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch.

^{**} Faculty Member of Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR).

^{***} Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch (Corresponding Author).

Email: ham.nozari.eng@iauctb.ac.ir

^{****} Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch.

طراحی مدل ریاضی سیستم تولیدی همکارانه ساخت بر اساس سفارش تحت شرایط عدم قطعیت

مهرناز سادات سیدبطحائی*، جاوید قهرمانی نهر**،

حامد نوذری***، سیداسماعیل نجفی***

چکیده

در این مقاله یک مدل ریاضی برای مسئله سیستم تولیدی همکارانه ساخت بر اساس سفارش با رعایت انصاف برای تخصیص بارهای تولید طراحی شده است. اهداف اصلی مدل، کمینه‌سازی هزینه‌های کل تولید و حداکثر استفاده از منابع به‌منظور تخصیص عادلانه بارهای تولید در شرایط عدم قطعیت است. برای کنترل پارامترهای غیرقطعی از روش برنامه‌ریزی فازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نرخ عدم قطعیت، هزینه‌های سیستم تولید افزایش می‌یابد. از آنجا که ظرفیت کارخانه‌ها ثابت است، با افزایش مقدار تقاضا، مقدار تولید افزایش و حداکثر استفاده از منابع هر کارخانه نیز افزایش می‌یابد؛ همچنین بر خلاف روند تغییرات هزینه سیستم، با افزایش تعداد کارخانه‌ها، حداکثر استفاده از منابع در دسترس کاهش یافته است. برای حل مسائل نمونه با اندازه بزرگ از الگوریتم NSGA II با یک کروموزوم مناسب برای جست‌وجوی فضای مسئله استفاده شده است. نتایج عددی از حل ۱۵ مسئله نمونه، نشان از کارایی بالای الگوریتم NSGA II در حل مسئله سیستم تولیدی همکارانه در زمان بسیار کوتاه دارد.

کلیدواژه‌ها: ساخت بر اساس سفارش؛ برنامه‌ریزی فازی؛ سیستم تولید همکارانه؛
الگوریتم NSGA II؛ عدم قطعیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۹.

* دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج.

** عضو هیئت علمی پژوهشکده توسعه و برنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی.

*** استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز (نویسنده مسئول).

Email: ham.nozari.eng@iauctb.ac.ir

*** استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر بیشتر زنجیره‌های تأمین در جهت تولید سفارشی یا ساخت بر اساس سفارش حرکت کرده‌اند. در این محیط‌ها انتخاب محصولات توسط مشتری و بر اساس طرح‌های موجود انجام می‌شود. شرکت تولیدی نیز پس از دریافت سفارش، اقدام به تأمین مواد، ساخت قطعات و محصول نهایی می‌کند؛ از این‌رو برنامه‌ریزی تولید سفارش‌های مشتری توسط واحدهای تولید برای برآورده‌سازی تقاضای آن‌ها امری سخت است. تخصیص مقدار سفارش به هر یک از واحدهای تولیدی، کاهش هزینه‌های تولید، در نظرگیری پنجره زمانی تولید و غیره، مواردی است که بر این پیچیدگی مسئله می‌افزاید [۸]؛ همچنین غیرقطعی بودن تقاضای مشتریان از هر سفارش نیز منجر به آن شده است تا در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید در سیستم ساخت بر اساس سفارش، واحدهای تولیدی نتوانند برآورد دقیقی از مقدار تولید داشته و در نتیجه استفاده از حداکثر منابع تولیدی داشته باشند [۱۳].

میزان تولید هر جامعه، یک شاخص رشد و کمال برای آن کشور به‌شمار می‌رود و جزو شاخص‌های اصلی پیشرفت آن کشور است؛ از این‌رو لازمه پرداختن به برنامه‌ریزی تولید مشخص می‌شود. برنامه‌ریزی تولید یکی از مهم‌ترین تصمیماتی است که شرکت‌ها با آن مواجه هستند و توجه زیادی را در جوامع دانشگاهی به‌سوی خود جلب کرده است [۱۸]. اگرچه مطالعات زیادی، عمدتاً بر هدف کاهش هزینه‌ها متمرکز شده است. اهداف دیگری همچون بهره‌وری و پاسخگویی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند تا تقاضای مشتریان را در بازارهای رقابتی ارضا کنند. به‌علاوه با افزایش همکاری بین شرکت‌ها و یا بین بخش‌های مختلف یک شرکت، تصمیم‌گیران باید منافع هر سازمان یا بخش‌ها را در نظر بگیرند تا به توسعه پایدار برسند [۱۲]. شرکت پس از جمع‌آوری سفارش‌ها از مشتریان، سفارش‌ها را به کارخانه‌های وابسته خود تخصیص می‌دهد و کارخانه‌ها سفارش‌ها را با توجه به زمان سررسید و زمان تحویل تولید می‌کنند [۳۴]. هنگامی که زمان تحویل فرابرسد، سفارش باید تکمیل شود و به مشتری مربوطه ارسال شود. از دیدگاه کمیته‌سازی هزینه، کارخانه‌هایی با حداقل هزینه‌های تولید انتخاب می‌شوند. در زمان تصویب تصمیمات تولید، باید بارهای تولیدی به‌صورت متعادل در نظر گرفته شود [۴۲]. استراتژی‌های متفاوتی برای تولید وجود دارد. بسته به نوع محصولات، نوع تقاضا، میزان سفارش و زمان سفارش و غیره، استراتژی هر سازمان و واحد تولیدی متفاوت است. برخی از سیستم‌های تولیدی به‌منظور کاهش حجم انبار و همچنین افزایش سطح رضایت مشتریان خود به سیستم «ساخت بر اساس سفارش» روی آورده‌اند [۳۱]. این استراتژی برخلاف استراتژی «ساخت برای ذخیره‌سازی» به سفارش‌های دریافت‌شده از مشتری توجه دارد؛ یعنی تا زمانی که مشتری سفارشی را صادر نکند هیچ تولیدی در کارخانه انجام نمی‌شود. این استراتژی می‌تواند کالاهایی

را با تنوع بسیار بالا تولید کند [۲۶]. عوامل زیر برای ارزیابی چشم‌انداز «ساخت بر اساس سفارش» وجود دارد. ویژگی‌های استراتژی ساخت بر اساس سفارش عبارت‌اند از [۲۹]:

الف) انتظار صبر مشتری: اگر هزینه ازدست‌رفتن مشتری که به معنای ازدست‌رفتن فروش و خرید مشتری از شرکت‌های رقیب است، وجود نداشته باشد و یا اینکه این هزینه بسیار پایین باشد، سیستم «ساخت بر اساس سفارش» به خوبی می‌تواند جوابگوی تولید با رضایت بالای مشتری از محصول باشد؛

ب) هزینه نگهداری: در صورتی که هزینه ازدست‌رفتن مشتری وجود نداشته باشد و مشتری مجدداً به سیستم بازگردد با استفاده از سیستم «ساخت بر اساس سفارش» می‌توان هزینه‌های نگهداری را به میزان زیادی کاهش داد؛

ج) مدت‌زمان سفارش تا تحویل محصول: زمان تحویل بالا می‌تواند موجب غیرعملی شدن سیستم «ساخت بر اساس سفارش» شود؛ بنابراین سیستم تولید چابک در این سیستم تولیدی بسیار مورد توجه است؛

د) هزینه راه‌اندازی: در صورتی که هزینه راه‌اندازی برای هر محصول عدد قابل توجهی باشد، سیستم «ساخت بر اساس سفارش» به هیچ‌وجه مقرون به صرفه نیست.

اهمیت کاهش هزینه‌های در سیستم‌های تولید ساخت بر اساس سفارش به آن شده منجر است تا همکاری بین کارخانه‌های تولیدی برای تأمین تقاضا و سفارش‌های مشتریان صورت پذیرد. بدین صورت که در این سیستم یک شرکت اصلی وظیفه دریافت سفارش‌ها و تقاضای مشتریان مختلف در اندازه‌های مختلف و ارسال آن به کارخانه‌های مختلف برای تولید را بر عهده دارد. در این سیستم تولیدی ساخت بر اساس سفارش‌های غیرقطعی از تقاضای مشتریان در کارخانه‌ها صورت می‌پذیرد. از آنجاکه کارخانه‌ها با یکدیگر همکاری دارند، برای تأمین برخی از سفارش‌های مشتریان به صورت همکارانه با یکدیگر فعالیت می‌کنند. در این سیستم یکی از هدف‌های اصلی، تخصیص بار عادلانه بین کارخانه‌های تولیدی است تا همه کارخانه‌ها به طور تقریباً یکسان به امر تولید بپردازند. از سویی عدم قطعیت در تقاضا و سفارش‌های مشتریان و همچنین عدم قطعیت در هزینه‌ها به پیچیدگی مسئله سیستم تولیدی همکارانه منجر شده است؛ از این رو در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی تولید در سیستم تولیدی «ساخت بر اساس سفارش» در شرایط عدم قطعیت تقاضا و برخی پارامترهای دیگر ارائه شده است. مدل طراحی شده شامل مجموعه‌ای از مشتریان با سفارش‌های مختلف، یک شرکت برای جمع‌آوری سفارش‌ها و مجموعه‌ای از چندین کارخانه است که به طور همکارانه به تأمین سفارش‌های غیرقطعی مشتریان می‌پردازند. هدف اصلی مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، کمینه‌سازی هم‌زمان حداکثر به‌کارگیری از منابع تولیدی و هزینه‌های کل تولید و انتقال سفارش‌ها است. حداکثر به‌کارگیری منابع تولیدی به تخصیص منصفانه بارهای تولیدی منجر می‌شود. در این صورت،

تعیین مقدار تولید توسط هر کارخانه و نحوه تخصیص منصفانه بارهای تولیدی برای کاهش هزینه‌ها و تأمین تقاضای مشتریان مهم‌ترین موضوعی است که در این پژوهش و در مدل ارائه‌شده به آن پرداخته شده است.

ساختار مقاله بدین صورت است که در بخش دوم به ارائه مبانی نظری و پیشینه پژوهش در حوزه برنامه‌ریزی و سیستم‌های تولیدی پرداخته شده و در انتها به مقایسه مهم‌ترین پژوهش‌ها و تعیین شکاف پژوهشی پرداخته می‌شود. در بخش سوم به تعریف مسئله و مدل‌سازی اختصاص دارد. در این بخش مدل غیرقطعی از مسئله سیستم تولید همکارانه ساخت بر اساس سفارش طراحی و از روش برنامه‌ریزی فازی برای کنترل پارامترهای غیرقطعی مسئله استفاده شده است. در بخش چهارم تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش ارائه خواهد شد. در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها آورده می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برنامه‌ریزی تولید، کلیدواژه‌ای برای مدیریت سیستم تولید است و در دهه‌های گذشته به‌عنوان یک مسئله محبوب در میان پژوهشگران مطرح شده است. در پیشینه پژوهش، کاهش هزینه‌ها، مانند هزینه تولید و راه‌اندازی، موجودی و هزینه نگهداری، بیشتر در برنامه‌ریزی تولید کلاسیک تعیین شده است [۱۶]. انواع مختلفی از مسائل کلاسیک با انواع مختلف محدودیت‌هایی از قبیل زمان، ظرفیت تولید و تصمیمات مختلف مانند تقسیم سفارش و تخصیص بر اساس کاربردهای واقعی زندگی اخیراً به مسائل برنامه‌ریزی تولید کلاسیک تبدیل شده‌اند [۳۷]. طالع‌زاده (۲۰۱۷) بر مطالعات مبتنی بر پنجره‌های زمانی و محدودیت‌های تقسیم سفارش در مسائل برنامه‌ریزی تولید چندهدفه تمرکز کرد [۳۵]. هوانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۰)، محدودیت‌های زمان تولید و زمان تحویل را برای یک مسئله اندازه سفارش کلاسیک در نظر گرفتند و یک الگوریتم زمانی چندجمله‌ای را برای رسیدن به راه‌حل‌های مطلوب توسعه دادند [۱۵]. برهمی و همکاران^۲ (۲۰۱۰) از دو رویکرد متفاوت، از جمله رویکرد لاگرانژ و نرم‌افزار تجاری با اصلاحات جدید، برای یک مسئله چندمنظوره با ظرفیت و محدودیت‌های زمانی تولید استفاده کردند. آزمایش‌های محاسباتی نشان داد که لاگرانژ عملکرد سریع‌تر و مناسب‌تری را برای تولید جواب‌ها فراهم می‌کند؛ درحالی‌که نرم‌افزار تجاری به‌مراتب عملکرد ضعیف‌تری دارد [۵]. زیبیهان و همکاران (۲۰۱۸)، به بحث مکان‌یابی و قیمت‌گذاری در یک شبکه زنجیره تأمین با هدف کاهش هزینه‌های تولید، توزیع و مکان‌یابی تسهیلات بالقوه پرداختند. آن‌ها از روش برنامه‌ریزی فازی مثلثی برای کنترل پارامتر تقاضا و هزینه حمل‌ونقل بهره گرفتند و با یک مثال عددی نتایج مدل

1. Hwang, et al.

2. Brahim, et al.

خود را بررسی کرد [۴۳]. لی و همکاران (۲۰۲۰)، پنجره‌های زمانی را با دو نوع مسائل کاربردی مانند زمان تولید و دوره‌های زمانی تحویل سفارش‌ها ارائه دادند. در پنجره زمانی تولید، سفارش‌ها باید در یک زمان مشخص شده تولید و توزیع شوند [۲۰].

به‌طور کلی تقسیم سفارش در تصمیم‌گیری‌های تولیدکننده ارائه می‌شود که میزان سفارش‌های تولیدشده توسط تأمین‌کنندگان را بر اساس نسبت تقسیم سفارش در هر دوره تولید تعیین کند. این تعریف که کدام یک از تولیدکنندگان چه مقدار و در چه دوره‌های باید تولید کنند، توسط پژوهشگران بررسی شده است. لیاو و ریتسچر^۱ (۲۰۰۷)، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه با تصمیم‌گیری از جمله انتخاب یک تأمین‌کننده با استراتژی تقسیم سفارش، اندازه سفارش، تعداد زیادی از کالاهای خرید و انتخاب حامل را مطرح کردند. آن‌ها الگوریتم ژنتیک را برای به‌حداقل‌رساندن هزینه کل، اقلام ردشده و همچنین عدم تحویل به‌موقع جهت حل ارائه دادند [۱۹]. دینگ و همکاران^۲ (۲۰۰۹)، یک مسئله تقسیم سفارش را به یک مسئله توزیع تولید چندهدفه گسترش دادند تا تقسیم سفارش‌های تولیدی به‌منظور تخصیص منصفانه‌تر و انتقال آن‌ها به چند کارخانه را افزایش دهند. هدف از این پژوهش، یافتن ترکیب مطلوب هزینه‌ها و خدمات مشتریان بود [۹]. چنگ و یو^۳ (۲۰۱۱)، تقسیم سفارش را در یک مدل دوهدفه تک-دوره‌ای برای کاهش کل هزینه و تعادل بار تولید در میان تأمین‌کنندگان به روش عادلانه را بررسی کردند. این پژوهش تأثیر مثبت تقسیم سفارش‌ها بر تعادل بار تولید را در میان تأمین‌کنندگان نشان داده است که به بهبود مدیریت عملیاتی شرکت‌ها منجر می‌شود [۷]. تر و همکاران^۴ (۲۰۱۸) از مفهوم تقسیم‌بندی برای قطعات/ سفارش‌ها در برنامه‌ریزی مواد موردنیاز برای مغازه‌ها استفاده کردند. از لحاظ مسائل چندهدفه، گسترش برنامه‌های تولید چندهدفه با مسائل مختلف در چند دوره و مسائل چندمرحله‌ای بررسی شده است [۳۶]. مرنیدی و همکاران (۲۰۱۹)، یک رویکرد مسیریابی خودرو در یک کارخانه تولیدی و توزیع چندمنظوره را پیشنهاد کردند. هدف این بود که با تقسیم‌کار به شبکه‌های کارخانه‌ها از طریق بهترین مسیر با هدف به حداقل‌رساندن کل زمان تحویل و هزینه‌های تأخیر، خواسته‌های مشتریان را رفع کنند [۲۳]. سلامتی هرمز و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله برنامه‌ریزی تولید مشترک ارائه کردند. توابع هدف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل تولید و کمینه‌سازی حداکثر کارایی تولید بود که به‌تبع آن تخصیص عادلانه بارهای تولیدی صورت می‌گرفت [۳۴]. لیو و لیو^۵ (۲۰۲۰)، یک مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه برای محصولات فسادپذیر،

1. Liao & rittscher
 2. Ding, et al.
 3. Cheng & Ye
 4. Thurer, et al.
 5. Liu & Liu

شامل چندین مشتری و چندین وسیله نقلیه همگن با محدودیت ظرفیت را مدل‌سازی کردند [۲۰]. ما و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، به بررسی سیاست‌های پذیرش سفارش بر اساس ساخت در یک زنجیره تأمین غیرمتمرکز برای افزایش سود زنجیره تأمین پرداختند. آن‌ها یک زنجیره دوسطحی را بررسی کردند که در آن یک شرکت مسئول جمع‌آوری تقاضای مشتریان و برنامه‌ریزی تولید به کارخانه‌ها برای برآورده‌سازی سفارش‌های مشتریان بود [۲۲].

لو و همکاران^۲ (۲۰۱۹)، ویژگی‌های خاص برنامه‌ریزی لجستیک تولید هم‌زمان در انبار کارخانه (سفارش بر اساس ساخت) و انبار (کراس‌داک) را بررسی کرده و یک مدل ریاضی همگام‌سازی MTO_CD ارائه کردند [۲۱]. هی و همکاران^۳ (۲۰۱۹) یک مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن چندین ویژگی مهم واقع‌گرایانه، نظیر کارخانه‌های متعدد، وسایل نقلیه متفاوت و اندازه سفارش‌های مختلف ارائه دادند. هدف اصلی آن‌ها کمینه‌سازی کل هزینه‌های تولید و توزیع بود [۱۴]. کاساس-رامیز و همکاران^۴ (۲۰۱۸)، یک مدل ریاضی برای مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع دوهدفه ارائه کردند که هدف اصلی آن کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم تولید و توزیع و متعادل کردن کل کار زنجیره تأمین شامل انبارها و واحدهای تولیدی متفاوت بود [۶]. یادگاری و همکاران (۲۰۱۹)، یک شبکه زنجیره تأمین طراحی کرده و از الگوریتم ممتیک با رمزگذاری و رمزگشایی مبتنی بر اولویت برای حل مسئله استفاده کردند [۴۰]. یائو و همکاران^۵ (۲۰۱۸)، یک چارچوب برنامه‌ریزی و کنترل تولید یکپارچه مبتنی بر RFID را برای سیاست ساخت بر اساس سفارش تنظیم کردند. آن‌ها برای بررسی عملکرد چارچوب خود از شبیه‌سازی ARENA و آزمایش‌های مبتنی بر Rfidi Edge Serve بهره گرفتند [۴۱]. بوگرس^۶ (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی مشترک برای سیستم تولیدی سفارش بر اساس پیش‌بینی ارائه کرد. هدف اصلی وی توجه به مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی بود. مدل ارائه‌شده توسط وی یک برنامه‌ریزی مناسب برای هماهنگی میان‌مدت را در یک محیط MTFbusiness تضمین می‌کرد [۴]. مسلمی‌پور و قدیرپور (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر مدل تخصیص درجه دوم برای طراحی استقرار بهینه تسهیلات در هر دوره از افق برنامه‌ریزی زمانی چنددوره‌ای مسئله استقرار پویا و تصادفی تسهیلات ارائه کردند [۲۵]. سجادی و همکاران (۲۰۱۶)، به ارائه مدل یکپارچه برای تحلیل و بهبود مسائل زمان‌بندی و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار در سیستم تولید انعطاف‌پذیر پرداختند. در این مدل به‌طور هم‌زمان به مسائل زمان‌بندی وظایف تولید و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار پرداخته شده است [۳۳]. علیدوست

1. Ma, et al.

2. Luo, et al.

3. He, et al.

4. Casas-Ramírez, et al.

5. Yao, et al.

6. Bogers

و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل چندهدفه از زنجیره تأمین را مدل‌سازی کردند. هدف آن‌ها کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی کمبود و بیشینه‌سازی مراکز توزیع بود [۱].

برای بررسی شکاف پژوهشی، جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین ویژگی‌های پژوهش‌ها در سیستم‌های تولید ساخت بر اساس سفارش و مقایسه آن‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد.

برای بحث در مورد مرور مبانی نظری مربوط به تعادل بار تولید، تقسیم سفارش باعث بهبود عملکرد در سفارش‌های مشابه می‌شود. واضح است که وجود سفارش‌های بزرگ، مانع متعادل‌سازی سیستم‌های تولید و انعطاف‌پذیری تولید سیستم خواهد شد. تقسیم‌بندی بار به‌طور آزادانه بین کارخانه‌ها، منجر به تسهیل در زمان‌بندی تولید می‌شود. از سوی دیگر، تقسیم سفارش ممکن است هزینه حمل‌ونقل را افزایش دهد که مانع تعادل می‌شود. اگرچه در پژوهش‌ها، اهمیت کاهش هزینه سیستم و تعادل تولید از طریق تقسیم‌بندی به‌طور جداگانه موردتوجه قرار گرفته است، توجه هم‌زمان به این دو موضوع باید موردمطالعه قرار گیرد. با توجه به مبانی نظری و پیشینه پژوهش، یک مدل مبتنی بر سیستم تولید همکارانه ساخت بر اساس سفارش که علاوه بر در نظرگیری جنبه اقتصادی و کاهش هزینه‌های سیستم، به تخصیص بارهای بهینه تولید بپردازد، وجود ندارد؛ از این رو با در نظر گرفتن این موضوع برای کاهش هزینه‌های تولید و همچنین رعایت اعتدال بین تولیدات کارخانه‌های مختلف از سیستم همکارانه بین واحدهای تولیدی (کارخانه‌ها) در تأمین تقاضای غیرقطعی مشتریان، در مدل‌سازی پژوهش استفاده شده است. از آنجا که مدل‌های سیستم تولید در شبکه‌های زنجیره تأمین جزو مسائل سخت محسوب می‌شوند و در مبانی نظری موضوع به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری اشاره شده است، در این پژوهش از یک الگوریتم چندهدفه NSGA II با ارائه یک کروموزوم مناسب برای جست‌وجو در فضای جواب برای حل مدل استفاده شده است.

مالکیت مدل. در این پژوهش یک مدل ریاضی سیستم تولیدی همکارانه ساخت بر اساس سفارش تحت شرایط عدم قطعیت طراحی شده است. چارچوب اصلی پژوهش، سیستم تولید ساخت بر اساس سفارش است که با استفاده از مبانی نظری موضوع استخراج و بر اساس مفروضات خاص پژوهش، مدل‌سازی شده است؛ همچنین در نظرگیری سیستم همکاری بین کارخانه‌های تولیدی برای کاهش هزینه و توزیع عادلانه بار تولید در شرایط عدم قطعیت (فازی) نوآوری پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

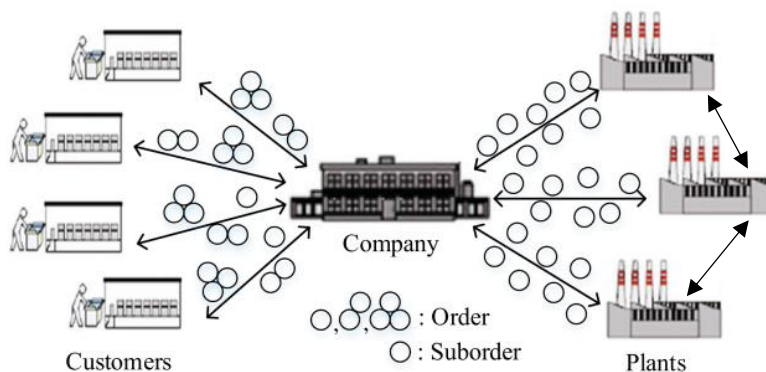
جدول ۱. خلاصه‌ای از مهم‌ترین ویژگی‌های پژوهش در حوزه سیستم تولید

روش حل	سیستم همکارانه	سیستم موجودی	عدم قطعیت	هدف					سطوح شبکه	چند دورهای	چند محصول	پژوهشگر / سال	
				زمان تحویل	کاهش CO2	تعادل بار تولید	افزایش سود	کاهش هزینه					
Cplex	-	-	-	-	-	-	-	-	*	۳	-	*	لند و همکاران (۲۰۱۷)
Cplex	-	*	احتمالی	-	-	-	-	-	*	۲	*	*	رفیعی و همکاران (۲۰۱۷)
PSO	*	*	-	-	-	-	-	-	*	۳	*	-	فنگ و همکاران (۲۰۱۸)
ARIMA	-	*	-	-	-	-	-	-	*	۳	*	*	فانگ و همکاران (۲۰۲۰)
شبیه سازی	*	*	-	-	-	-	-	-	*	۲	*	-	وسچانک و همکاران (۲۰۲۰)
Cplex	-	*	-	-	*	-	-	-	*	۴	*	-	خیونگ و همکاران (۲۰۲۰)
NSGA II	-	*	-	*	-	-	-	-	*	۳	*	*	بانک و همکاران (۲۰۲۱)
اپسیلون محدودیت	-	*	احتمالی	-	*	-	-	-	*	۴	*	*	ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)
Cplex	*	*	-	*	-	-	-	-	-	۳	-	*	ژای و همکاران (۲۰۲۱)
NSGA II	*	*	فازی	-	-	*	-	-	*	۳	*	*	پژوهش حاضر

۳. تعریف مسئله و مدل سازی

در این بخش یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید در سیستم ساخت بر اساس سفارش با در نظرگیری هماهنگی و تخصیص بارهای تولید طراحی شده است. مطابق شکل ۱، مشاهده می‌شود که مشتریان سفارش‌های خود را به شرکت تولیدی ارائه می‌دهند و شرکت تولیدی با استفاده از سیستم همکارانه اقدام به تولید محصولات نهایی و تأمین تقاضای مشتریان می‌کند. در این مسئله، تقاضای مشتریان به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است؛ یعنی تقاضای مشتریان بر اساس تابع توزیع فازی مثلی تخمین زده شده است و کارخانه‌ها باید بر اساس این حجم از داده‌ها اقدام به تولید کنند. در شکل ۱، همچنین مشاهده می‌شود که سیستم تولید به صورت همکارانه است؛ یعنی ارتباط متقابل بین کارخانه‌ها برای برآورده‌سازی تقاضای مشتریان وجود دارد. هر کارخانه بخشی از تولید سفارش‌ها را بر عهده می‌گیرد و در پنجره زمانی تعریف شده تقاضای مشتریان را برآورده می‌سازد. مطابق با مفروضات زیر مسئله برنامه‌ریزی تولید در سیستم ساخت بر اساس سفارش با در نظرگیری هماهنگی و تخصیص بارهای تولید قابل-مدل سازی خواهد بود:

۱. مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی با هدف کاهش هزینه شبکه و پیشینه‌سازی کمینه توزیع بار بین کارخانه‌ها است؛
۲. کارخانه‌ها دارای محدودیت ظرفیت تولید هستند؛
۳. تقاضای تمامی مشتریان باید برآورده شود و کمبود مجاز نیست؛
۴. پارامترهای تقاضا و هزینه حمل‌ونقل غیرقطعی در نظر گرفته شده است؛
۵. برای کنترل کردن پارامترهای غیرقطعی از روش برنامه‌ریزی فازی استفاده شده است؛
۶. همکاری متقابل برای برآورده‌سازی سفارش‌های مشتریان بین کارخانه‌ها وجود دارد.



شکل ۱. مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید در سیستم ساخت بر اساس سفارش

با توجه به مفروضات، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر تعریف می‌شوند:

مجموعه‌ها

M : مجموعه کارخانه‌ها $\{1, 2, \dots, M\}$ ، $m, m' \in \{1, 2, \dots, M\}$

C : مجموعه مشتریان $\{1, 2, \dots, C\}$ ، $c \in \{1, 2, \dots, C\}$

K : مجموعه محصولات $\{1, 2, \dots, K\}$ ، $k \in \{1, 2, \dots, K\}$

O : مجموعه سفارش‌ها $\{1, 2, \dots, O\}$ ، $o \in \{1, 2, \dots, O\}$

T : مجموعه دوره‌های زمانی $\{1, 2, \dots, T\}$ ، $t \in \{1, 2, \dots, T\}$

پارامترها

P_m^{max} : ظرفیت تولید کارخانه m در یک دوره زمانی

$\bar{P}C_{mk}$: هزینه تولید یک واحد محصول k در کارخانه m

h_{mk} : هزینه نگهداری یک واحد محصول k در کارخانه m

s_{mk} : هزینه راه‌اندازی یک واحد محصول k در کارخانه m

d_{mc} : فاصله بین کارخانه m و مشتری c

$d'_{mm'}$: فاصله بین کارخانه m و m'

\bar{g}_k : هزینه انتقال هر واحد محصول k به‌ازای هر کیلومتر

t_o^s : زمان ترخیص سفارش o

t_o^f : زمان تحویل سفارش o

e_{oc} : پارامتر صفر یا ۱؛ اگر مشتری c سفارش o را درخواست کند، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

\bar{n}_{ok} : تقاضای محصول k در سفارش o

متغیرهای تصمیم‌گیری

I_{mkt} : سطح موجودی محصول k در کارخانه m در انتهای دوره زمانی t

X_{mokt} : مقدار انتقال محصول k در کارخانه m در انتهای دوره زمانی t

V_{mo} : نسبت تقسیم سفارش o در کارخانه m

Z_{mkt} : مقدار تولید محصول k از سفارش o در کارخانه m در دوره زمانی t

Y_{mokt} : اگر محصول k از سفارش o در کارخانه m در دوره زمانی t پردازش شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.

$X'_{mm'okt}$: مقدار انتقال محصول k از سفارش o بین کارخانه m و m' در دوره زمانی t

پس از ارائه مجموعه، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری، مدل نهایی غیرقطعی به صورت زیر است.

$$\min Z1 = \sum_t \sum_m \sum_k \left(\begin{aligned} & \left(\bar{P}C_{mk} \sum_o X_{mokt} + S_{mk} \sum_o Y_{mokt} + h_{mk} I_{mkt} + \right. \\ & \left. \sum_o \sum_{\substack{m' \\ m' \neq m}} d'_{mm'} X'_{mm'okt} \right) \end{aligned} \right) \quad (1)$$

$$+ \sum_m \sum_o V_{mo} \left(\sum_c e_{oc} d_{mc} \right) \left(\sum_k \tilde{g}_k \tilde{n}_{ok} \right) \quad (2)$$

$$\min Z2 = U_{max} \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_o X_{mokt} \leq P_m^{max}, \quad \forall m, t \quad (3)$$

$$I_{mkt} = I_{mkt-1} + \sum_o X_{mokt} + \sum_o \sum_{\substack{m' \\ m' \neq m}} X'_{m'mokt} - \sum_o \sum_{\substack{m' \\ m' \neq m}} X'_{mm'okt}, \quad \forall m, t, k \quad (4)$$

$$Z_{mkt} = \sum_{\substack{o \\ t_o^f = t}} X_{mokt}, \quad \forall m, t, k \quad (5)$$

$$\sum_{t=t_o^s}^{t_o^f} X_{mokt} \geq \tilde{n}_{ok} V_{mo}, \quad \forall m, o, k \quad (6)$$

$$\sum_{t=0}^{t_o^s-1} X_{mokt} + \sum_{t=t_o^f+1}^T X_{mokt} = 0, \quad \forall m, o, k \quad (7)$$

$$\sum_m V_{mo} = 1, \quad \forall o \quad (8)$$

$$\frac{\sum_k \sum_o \tilde{n}_{ok} V_{mo}}{T \cdot P_m^{max}} \leq U_{max}, \quad \forall m \quad (9)$$

$$X_{mokt} \leq BigM \cdot Y_{mokt}, \quad \forall m, o, k, t \quad (10)$$

$$I_{mkt}, Z_{mkt}, V_{mo}, X_{mokt} \geq 0 \quad (11)$$

$$Y_{mokt} \in \{0,1\} \quad (12)$$

رابطه ۱، مقدار تابع هدف اول مسئله را نشان می‌دهد و شامل هزینه‌های تولید، انتقال و نگهداری است. رابطه ۲، نشان‌دهنده حداکثر بهره‌وری بین کارخانه‌های تولیدی است و تضمین می‌کند که بار بین کارخانه‌های تولیدی به تناسب توزیع می‌شود. رابطه ۳، ظرفیت تولید هر کارخانه را در هر دوره زمانی نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که مقدار تولید در هر کارخانه از ظرفیت آن بیشتر نخواهد بود. رابطه ۴، مقدار موجودی از هر محصول را در انتهای دوره زمانی در هر کارخانه نشان می‌دهد. این رابطه شامل مقدار موجودی تولیدشده در آن کارخانه و همکاری دیگر کارخانه‌ها در تولید همان محصول است. رابطه ۵، نشان می‌دهد که کارخانه‌ها به‌طور همکارانه باید مقدار سفارش غیرقطعی محصولات را برآورده سازند. روابط ۶ و ۷، پنجره زمانی تولید محصولات را نشان می‌دهند و تضمین می‌کنند مقدار تولید محصولات در بازه زمانی تعیین شده انجام پذیرد. رابطه ۸، تضمین می‌کند که سفارش هر مشتری باید توسط مجموع کارخانه‌ها انجام پذیرد؛ بنابراین رابطه همکارانه‌ای برای برآورده‌سازی تقاضا وجود دارد. رابطه ۹، حداکثر بهره‌وری تولید کارخانه‌ها و تخصیص بارهای تولید را برای هر کارخانه نشان می‌دهد. رابطه ۱۰، تخصیص تولید هر محصول به هر کارخانه را نشان می‌دهد. روابط ۱۱ و ۱۲، نشان‌دهنده نوع و جنس متغیرهای تصمیم‌گیری هستند.

با توجه به غیرقطعی بودن برخی از پارامترهای مدل، روش برنامه‌ریزی فازی برای کنترل پارامترهای غیرقطعی به کار رفته است؛ از این رو مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی زیر را با پارامترهای فازی در نظر بگیرید [۳۲]:

$$\text{Min } Z = \bar{c}^t x \quad (13)$$

s. t.:

$$x \in N(\bar{A}, \bar{B}) = \{x \in R^n | \bar{a}_i x \geq \bar{b}_i, i \in m \quad x \geq 0\} \quad (14)$$

در روابط بالا $\bar{c} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n)$ ، $A = [\bar{a}_{ij}]_{m \times n}$ ، $\bar{b} = (\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_n)^t$ فازی به کار رفته در تابع هدف مسئله، ضریب برداری و پارامتر سمت راست محدودیت است. تابع توزیع احتمالی پارامترهای فازی بر اساس ویژگی‌های اعداد فازی فرض شده است. در نهایت توزیع $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. برای امکان‌پذیری و بهینه‌سازی مسئله ارائه شده در مدل بالا، کنترل پارامترهای غیرقطعی ارائه شده در تابع هدف و محدودیت ضروری است؛ از این رو با فرض در نظر گرفتن پارامتر α به عنوان حداقل درجه شدنی بودن محدودیت‌ها، مدل کنترل شده به صورت زیر است [۲۴]:

$$\text{Min } Z = EV(\bar{c})x \quad (15)$$

s. t.:

$$[(1 - \alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}]x \geq (1 - \alpha)E_1^{b_i} + \alpha E_2^{b_i}, \quad i \in m \quad (16)$$

$$x \geq 0, \quad \alpha \in [0,1] \quad (17)$$

در رابطه ۱۵، $EV(\tilde{C})$ ارزش موردانتظار عدد فازی به کاررفته در تابع هدف مدل است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$EV(\tilde{C}) = \frac{E_1^c + E_2^c}{2} \quad (18)$$

در این پژوهش، پارامترهای فازی به صورت فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. توزیع امکانی پارامتر فازی به صورت $\tilde{C} = (C^1, C^2, C^3)$ نشان داده می شود که C^3, C^2, C^1 به ترتیب نشان دهنده مقادیر خوش بینانه، محتمل و بدبینانه عدد فازی \tilde{C} هستند که توسط تصمیم گیرنده مشخص می شوند؛ بنابراین امید ریاضی (ارزش موردانتظار پارامتر فازی تابع هدف) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$EI(\tilde{c}) = [E_1^c, E_2^c] = \left[\frac{c^1 + c^2}{2}, \frac{c^2 + c^3}{2} \right] \quad (19)$$

روش های حل. در این پژوهش برای حل مسئله دو روش دقیق و فراابتکاری به کار گرفته شده است؛ از این رو برای حل مسائل نمونه در اندازه کوچک از روش اپسیلون محدودیت و برای حل مسائل نمونه در اندازه های بزرگ تر از الگوریتم NSGA II استفاده شده است که در ادامه روش های یادشده بررسی خواهد شد.

روش اپسیلون محدودیت برای حل مسائل برنامه ریزی چندهدفه. روش اپسیلون محدودیت یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که در آن تمامی توابع هدف، به جز مهم ترین تابع هدف در نظر گرفته شده، به عنوان محدودیت شناخته می شوند. مرز پارتو می تواند با روش قید ϵ ایجاد شود [۱۷]:

$$\begin{aligned} \min f_1(x) \\ x \in X \\ f_2(x) \leq \epsilon_2 \\ f_3(x) \leq \epsilon_3 \end{aligned} \quad (20)$$

گام های روش اپسیلون محدودیت به صورت زیر است:

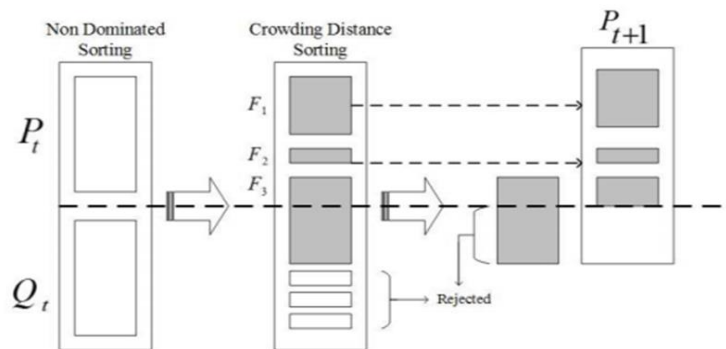
۱. یکی از توابع هدف به عنوان تابع اصلی انتخاب می شود؛

۲. هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله حل می شود و مقادیر بهینه هر تابع هدف به دست می آید؛

۳. بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعداد از قبل مشخص تقسیم‌بندی می‌شود؛
۴. هر بار مسئله با تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر ε حل می‌شود؛
۵. جواب‌های پارتویی یافت شده گزارش می‌شود.

الگوریتم NSGA II. در حالت کلی مراحل اجرای این الگوریتم به صورت زیر است:

- گام ۱: جمعیت اولیه P_0 به اندازه N با جواب‌های تصادفی ایجاد شده و $t = 0$ قرار داده می‌شود؛
 - گام ۲: در صورت عدم برقراری شرط توقف، به P_t باز گشته می‌شود؛
 - گام ۳: با استفاده از عملگر انتخاب مسابقه‌ای دودویی، N والد از جمعیت P_t انتخاب می‌شود؛
 - گام ۴: با اعمال عملگرهای تقاطع و جهش بر روی جمعیت P_t ، جمعیت فرزندان Q_t به اندازه N ایجاد می‌شود؛
 - گام ۵: $R_t = P_t \cup Q_t$ قرار داده می‌شود؛
 - گام ۶: از روش رتبه‌بندی نامغلوب برای تعیین مجموعه‌های پارتو F_i در جمعیت R_t استفاده می‌شود؛
 - گام ۷: $P_{t+1} = \emptyset$ و $i = 1$ قرار داده می‌شود؛
 - گام ۸: تا زمانی که $|P_{t+1}| + |F_i| < N$ ، جواب‌های مجموعه F_i به جمعیت P_{t+1} اضافه شده و $i = i + 1$ قرار داده می‌شود؛
 - گام ۹: جواب‌های مجموعه F_i را بر اساس فاصله ازدحام و به صورت نزولی مرتب می‌شود؛
 - گام ۱۰: به اندازه $N - |P_{t+1}|$ از اولین جواب‌های F_i به جمعیت P_{t+1} انتقال داده می‌شود؛
 - گام ۱۱: $t = t + 1$ قرار داده شده و به گام ۲ باز گشته می‌شود.
- کلیه مراحل انجام شده در الگوریتم NSGA-II در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۲. چارچوب الگوریتم NSGA II

طراحی کروموزوم اولیه. در این پژوهش برای حل مسائل نمونه در اندازه‌های بزرگ‌تر از الگوریتم NSGA II استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد، برای استفاده از این الگوریتم باید یک جواب اولیه یا کروموزوم طراحی شود. در این بخش با فرض ۳ کارخانه تولیدی و ۵ سفارش، کروموزوم اولیه به شرح شکل ۳، طراحی می‌شود.

		سفارش				
V_{mo}		۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱	۰/۱۱۴	۰/۶۴۰	۰/۲۷۸	۰/۴۶۴	۰/۱۵۷
کارخانه	۲	۰/۲۳۸	۰/۲۶۳	۰/۵۴۶	۰/۱۵۷	۰/۴۸۵
	۳	۰/۶۴۸	۰/۰۹۷	۰/۱۷۶	۰/۳۷۹	۰/۳۵۸

شکل ۳. کروموزوم اولیه مسئله موردبررسی

با توجه به پیوسته‌بودن فضای الگوریتم NSGA II، از اعداد تصادفی استفاده شده است؛ از این‌رو درصدی از سفارش‌ها که توسط هر کارخانه باید تولید شود، مشخص می‌شود. مطابق شکل ۳، ۱۱/۴ درصد از سفارش شماره ۱ توسط کارخانه ۱، ۲۳/۸ درصد توسط کارخانه ۲ و ۶۴/۸ درصد توسط کارخانه ۳ برآورده می‌شود. پس از تعیین تخصیص مقدار سفارش به هر کارخانه، بر اساس ظرفیت تولیدی هر کارخانه و بر اساس محصولات، مقدار تولید هر محصول از هر سفارش توسط هر کارخانه مشخص می‌شود. پس از تعیین مقادیر برخی از متغیرهای تصمیم‌گیری، هر یک از محدودیت‌ها به‌تنهایی بررسی و در صورت عدم برقراری محدودیت‌ها از تابع جریمه برای اطمینان از جست‌وجو در فضای موجه مسئله استفاده می‌شود. تابع جریمه به‌عنوان یک هزینه بسیار زیاد به تابع هدف اول مسئله افزوده می‌شود.

عملگرهای جهش و ترکیب به‌عنوان مهم‌ترین عملگرهای الگوریتم NSGA II برای تولید جواب‌های جدید برای مدل پیشنهادی به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

عملگر ترکیب. در این عملگر، بخشی از کروموزوم والد اول با بخشی از کروموزوم والد دوم ترکیب شده و به ایجاد دو فرزند جدید منجر می‌شود. برای مثال، شکل ۴، نحوه انجام عملگر ترکیب را نشان می‌دهد.

والد ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵	فرزند ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۵۴	۰/۱۵	۰/۴۸		۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۳۲
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۵		۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۵
والد ۲	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۳۲	فرزند ۲	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۱۵	۰/۴۸
	۰/۲۸	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۵۳		۰/۲۸	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۵۳
	۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۳۴	۰/۱۴		۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۳۴	۰/۱۴

شکل ۴. نحوه عملکرد عملگر ترکیب

از آنجاکه با تغییر کروموزوم محدودیت $\sum_m V_{mo} = 1$ نقض خواهد شد، از یک مکانیسم اصلاح برای برطرف کردن این مشکل استفاده شد؛ از این رو کروموزوم‌های اصلاح شده شکل ۴، به صورت شکل ۵ است.

والد ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۳۲
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۵

فرزند ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۱۱
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۲۳
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۳۷	۰/۰۹	۰/۶۴

والد ۲	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۴۸
	۰/۲۸	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۵۳
	۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۳۴	۰/۱۴

فرزند ۲	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۰۹
	۰/۲۸	۰/۳۹	۰/۳۰	۰/۳۹	۰/۲۸
	۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۶۲

شکل ۵. مکانیسم اصلاح عملگر ترکیب

نحوه انجام مکانیسم اصلاح بدین صورت است که در بخش ترکیب انجام شده، ابتدا مجموع هر ستون محاسبه و سپس ژن‌های هر سلول به مجموع سطر هر کروموزوم تقسیم می‌شود.

عملگر جهش. در این عملگر، بخشی از ژن‌های کروموزوم تعیین و داده‌های جدید به جای داده‌های قبل وارد می‌شود؛ از این رو فرزند جدید با تلفیق ژن‌های والد و ژن‌های جدید ایجاد می‌شود. برای مثال، شکل ۶ نحوه انجام عملگر جهش را نشان می‌دهد.

والد ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۵۴	۰/۱۵	۰/۴۸
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۵

فرزند ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۹۴	۰/۳۴
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۵

شکل ۶. نحوه عملکرد عملگر جهش

از آنجاکه با تغییر کروموزوم محدودیت $\sum_m V_{mo} = 1$ نقض خواهد شد، از یک مکانیسم اصلاح برای برطرف کردن این مشکل استفاده شده است؛ از این رو کروموزوم‌های اصلاح شده شکل ۷، به صورت شکل ۷ است.

والد ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۳۲
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۳۵

فرزند ۱	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۳۸	۰/۶۴	۰/۱۱
	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۲۳
	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۶۴

شکل ۷. مکانیسم اصلاح عملگر جهش

معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه. در مسائل تک‌هدفه، در پایان اجرای الگوریتم‌ها، حلی با توجه به نوع هدف (بیشینه یا کمینه) به‌عنوان بهترین حل انتخاب می‌شود و این در حالی است که در مسائل چندهدفه در پایان حل، مجموعه‌ای از جواب‌ها ایجاد می‌شوند که باید با توجه به این مجموعه حل‌ها راجع به عملکرد الگوریتم اظهار نظر شود. این روش‌ها از این نظر مهم هستند که به پژوهشگر کمک می‌کنند تا عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی را با روشی کمی ارزیابی و انحراف الگوریتم را مدیریت کند [۲۷]. هم‌گرایی به جواب‌های بهینه پارتو و فراهم کردن چگالی و تنوع در میان مجموعه جواب‌های به‌دست‌آمده، دو هدف اصلی هر الگوریتم تکاملی چندهدفه است؛ ولی به‌دلیل آنکه این دو هدف تا حدودی در تضاد با یکدیگر هستند، معیاری که بتواند به‌تنهایی و به‌صورت مطلق در مورد عملکرد الگوریتم‌ها تصمیم بگیرد، وجود ندارد؛ بنابراین برای ارزیابی عملکرد الگوریتم NSGA II، معیارهای زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸]:

(الف) زمان محاسبات: الگوریتمی که زمان محاسبات کمتری داشته باشد، مطلوب‌تر خواهد بود؛
 (ب) تعداد جواب‌ها در پارتو: تعداد جواب‌های نامغلوب در مجموعه پارتو به‌دست‌آمده برای هر مسئله را نشان می‌دهد و هر مقدار تعداد این نقاط بیشتر باشد، بدین معنی است که الگوریتم کارایی بیشتری دارد؛
 (ج) بیش‌ترین گسترش: این معیار نشان می‌دهد که چه میزان از جواب‌های یک مجموعه پارتو در فضای جواب توزیع شده که از رابطه ۳۲، محاسبه می‌شود. بزرگ‌تر بودن مقدار این معیار، نشان‌دهنده تنوع مناسب جواب‌های مجموعه پارتو است؛

$$MSI = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\max_{i=1:|Q|} f_m^i - \min_{i=1:|Q|} f_m^i)^2} \quad (32)$$

(د) فاصله‌گذاری: نشان‌دهنده میزان قرارگرفتن جواب‌ها به‌طور یکنواخت در کنار هم بوده که از رابطه ۳۳، محاسبه می‌شود.

$$SM = \sqrt{\frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})^2} \quad (33)$$

در رابطه بالا، $|Q|$ نشان‌دهنده اندازه آرشیو پارتو است و مقادیر d_i و \bar{d} را می‌توان به ترتیب از روابط ۳۴ و ۳۵، محاسبه کرد. الگوریتمی که میزان این معیار کمتر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود.

$$d_i = \min_{k \in Q \cap k \neq i} \sum_{m=1}^M |f_m^i - f_m^k| \quad (34)$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{|Q|} \frac{d_i}{|Q|} \quad (35)$$

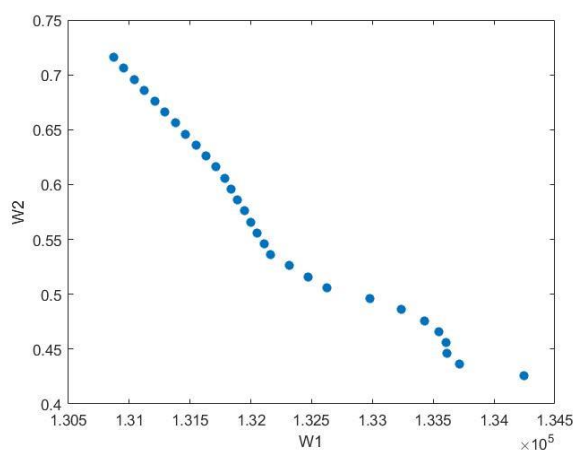
۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

با توجه به نبود مطالعه موردی، در این پژوهش از مسائل نمونه با داده‌های تصادفی استفاده شده است. بر اساس مبانی نظری موضوع بیشترین کاربرد مسئله در صنعت چاپ و تولید ماشین‌آلات است. مسئله نمونه در نظر گرفته شده شامل ۳ کارخانه، ۳ مشتری، ۳ نوع محصول و ۲ نوع سفارش در ۴ دوره زمانی است. جدول ۲، حدود بازه‌های پارامترهای قطعی و غیرقطعی مدل را نشان می‌دهد. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های واقعی، در این پژوهش از داده‌های تصادفی بر اساس تابع توزیع یکنواخت استفاده شده است.

جدول ۲. حدود بازه‌های پارامترهای قطعی و غیرقطعی مدل

پارامتر	حدود بازه‌های پارامترهای قطعی	پارامتر	حدود بازه‌های پارامترهای قطعی
P_m^{max}	$\sim U [1, 3]$	t_n^s	$\sim U [1, 2]$
h_{mk}	$\sim U [1, 4]$	t_n^f	$\sim U [T-1, T-2]$
s_{mk}	$\sim U [2000, 3000]$	e_{oc}	$\sim U [0, 1]$
$d_{mc}, d'_{mm'}$	$\sim U [100, 200]$		
پارامتر	خوش‌بینانه	محتمل	بدبینانه
\bar{q}_k	$\sim U [0.1, 0.2]$	$\sim U [0.2, 0.3]$	$\sim U [0.3, 0.4]$
\bar{P}_{cmk}	$\sim U [20, 30]$	$\sim U [30, 40]$	$\sim U [40, 50]$
$\bar{n}_{\rho k}$	$\sim U [100, 150]$	$\sim U [150, 200]$	$\sim U [200, 250]$

پس از حل مسئله به روش بهینه‌سازی انفرادی مقدار بهینه تابع هدف اول برابر ۱۱۷۴۲۶/۶۶ و مقدار بهینه تابع هدف دوم ۰/۴۱۶ به دست آمد؛ در نتیجه برای بهینه‌سازی هم‌زمان دو تابع هدف از روش اپسیلون محدودیت به تشکیل جبهه پارتو و ارائه جواب‌های کارا استفاده شده است. با توجه به الگوریتم این روش حل، مقدار تابع هدف دوم به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شده و به بهینه‌سازی مقدار تابع هدف اول در هر تکرار پرداخته شده است. بنا به غیرقطعی بودن پارامترهای مدل، مقدار آلفا برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده و جواب‌های کارا بر اساس این مقدار در شکل ۸، نشان داده شده است.



شکل ۸. جبهه پارتو حاصل از حل مسئله نمونه با اندازه کوچک

مطابق با جبهه پارتو شکل ۸، مشاهده می‌شود که با مقدار تابع هدف اول مسئله، مقدار تابع هدف دوم مسئله کاهش می‌یابد. برای بررسی متغیرهای خروجی مسئله، نخستین جواب کارایی مسئله بررسی شده و در ادامه مقادیر متغیرهای خروجی این جواب کارا نشان داده شده است.

جدول ۳. مقدار محصول انتقال یافته در هر دوره زمانی (اپسیون محدودیت)

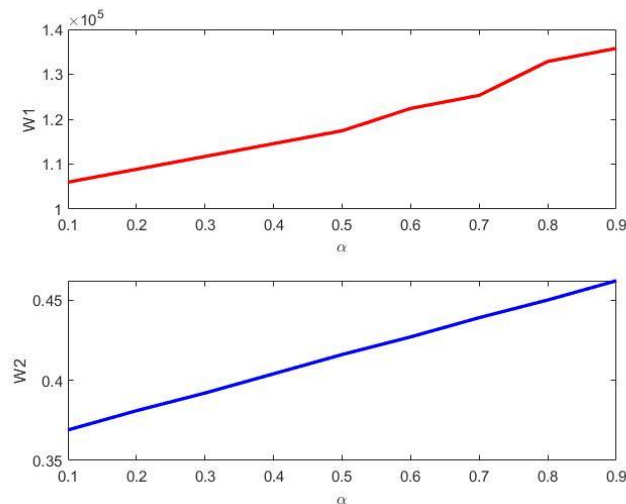
$X_{1213} = 94.42$	$X_{2214} = 77.82$	$X_{2124} = 21.94$	$X_{3122} = 141.96$
$X_{1224} = 90.76$	$X_{2224} = 74.80$	$X_{2133} = 21.75$	$X_{3133} = 140.71$
$X_{1232} = 89.86$	$X_{2233} = 74.06$	$X_{2113} = 23.31$	$X_{3114} = 150.81$
$V_{12} = 0.548$	$V_{21} = 0.134$	$V_{22} = 0.452$	$V_{31} = 0.866$
$I_{113} = 94.42$	$I_{213} = 23.31$	$I_{232} = 89.86$	$I_{314} = 150.81$
$I_{114} = 94.42$	$I_{214} = 101.13$	$I_{233} = 326.39$	$I_{322} = 141.96$
$I_{124} = 90.76$	$I_{224} = 96.75$	$I_{234} = 326.39$	$I_{323} = 141.96$
			$I_{324} = 141.96$
$Z_{113} = 94.42$	$Z_{213} = 23.31$	$Z_{233} = 95.82$	$Z_{314} = 150.81$
$Z_{132} = 89.86$	$Z_{214} = 77.82$	$Z_{333} = 140.71$	$Z_{322} = 141.96$
$Z_{124} = 90.76$	$Z_{224} = 96.75$		
$X'_{13312} = 89.86$	$X'_{31313} = 140.71$	$X'_{32312} = 89.86$	$X'_{12313} = 140.71$
$Y_{1213} = 1$	$Y_{2214} = 1$	$Y_{2124} = 1$	$Y_{3122} = 1$
$Y_{1224} = 1$	$Y_{2224} = 1$	$Y_{2133} = 1$	$Y_{3133} = 1$
$Y_{1232} = 1$	$Y_{2233} = 1$	$Y_{2113} = 1$	$Y_{3114} = 1$

تحلیل حساسیت مسئله. در این بخش از مقاله به تحلیل حساسیت دو پارامتر، نرخ عدم قطعیت و ظرفیت کارخانه بر روی مقادیر توابع هدف پرداخته شده است. ابتدا مقدار نرخ عدم قطعیت در بازه بین ۰/۱ تا ۰/۹ بررسی شده و مطابق با آن تغییرات مقدار تابع هدف اول و دوم در جدول ۴، نشان داده شده است.

جدول ۴. بررسی تغییرات مقادیر توابع هدف اول و دوم در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت

تغییرات مقدار نرخ عدم قطعیت	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	درصد اختلاف نسبی تابع هدف اول از مقدار پایه	درصد اختلاف نسبی تابع هدف دوم از مقدار پایه
۰/۱	۱۰۵۹۸۸/۷۵	-۰/۳۶۹	-۹/۷۴	-۱۱/۳۰
۰/۲	۱۰۸۸۴۸/۲۲	-۰/۳۸۱	-۷/۳۱	-۸/۴۱
۰/۳	۱۱۱۷۰۷/۷۰	-۰/۳۹۲	-۴/۸۷	-۵/۷۷
۰/۴	۱۱۴۵۶۷/۱۸	-۰/۴۰۴	-۲/۴۴	-۲/۸
۰/۵	۱۱۷۴۲۶/۶۶	-۰/۴۱۶	۰	۰
۰/۶	۱۲۲۴۰۳/۱۳	-۰/۴۲۷	۴/۲۴	۲/۶۴
۰/۷	۱۲۵۳۱۱/۸۵	-۰/۴۳۹	۶/۷۱	۵/۵۳
۰/۸	۱۳۲۸۶۱/۳۶	-۰/۴۵۰	۱۳/۱۴	۸/۱۷
۰/۹	۱۳۵۷۶۸/۸۱	-۰/۴۶۲	۱۵/۶۲	۱۱/۰۶

مطابق با جدول ۴، مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ عدم قطعیت، به دلیل افزایش تقاضای هر مشتری از هر محصول، مقدار تابع هدف اول افزایش یافته است. از آنجاکه ظرفیت کارخانه‌ها در این تحلیل ثابت در نظر گرفته شده است، با افزایش مقدار تقاضا، مقدار تولید افزایش و به‌ازای آن حداکثر استفاده از منابع هر کارخانه افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در شرایط بدبینانه کل هزینه تحمیل شده به کارخانه در این مسئله نمونه بیش از $۱۳۵۷۶۸/۸۱$ نخواهد بود. شکل ۹، تغییرات مقدار تابع هدف اول و دوم را به‌ازای تغییرات نرخ عدم قطعیت بین بازه ۰/۱ (خوش‌بینانه) تا ۰/۹ (بدبینانه) نشان می‌دهد.



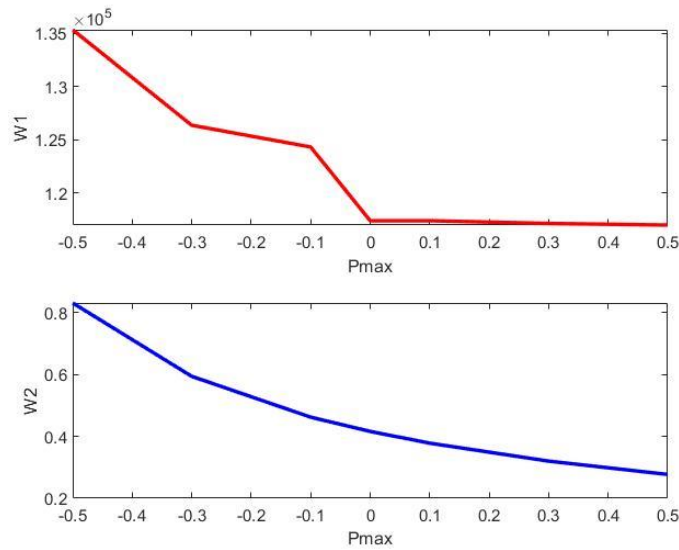
شکل ۹. تغییرات مقدار توابع هدف به‌ازای تغییرات نرخ عدم قطعیت

در ادامه به تغییرات مقادیر توابع هدف به ازای تغییرات ظرفیت کارخانه پرداخته می‌شود؛ از این رو ظرفیت کارخانه‌ها ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کمتر و بیشتر از مقدار پایه در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. جدول ۵، تغییرات مقادیر توابع هدف را به ازای تغییرات ظرفیت کارخانه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵. بررسی تغییرات مقادیر توابع هدف اول و دوم در ظرفیت‌های مختلف کارخانه

تغییرات مقدار Pmax	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	درصد اختلاف نسبی تابع هدف اول از مقدار پایه	درصد اختلاف نسبی تابع هدف دوم از مقدار پایه
۵۰٪ کاهش	۱۳۵۳۱۰/۱۶	-/۸۳۱	۱/۶۰	۹۹/۷۵
۳۰٪ کاهش	۱۲۶۳۶۸/۳۱	-/۵۹۴	۰/۸۰	۴۲/۷۸
۱۰٪ کاهش	۱۲۴۳۲۹/۸۲	-/۴۶۲	۰/۶۱	۱۱/۰۵
پایه	۱۱۷۴۲۶/۶۶	-/۴۱۶	۰	۰
۱۰٪ افزایش	۱۱۷۴۲۶/۶۶	-/۳۷۸	۰	-۹/۱۳
۳۰٪ افزایش	۱۱۷۱۷۱/۵۰	-/۳۲۰	-۰/۰۲	-۲۳/۰۷
۵۰٪ افزایش	۱۱۷۰۲۰/۰۳	-/۲۷۷	-۰/۰۳	-۳۳/۴۱

با توجه به جدول ۵، مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت کارخانه‌ها، مقدار تولید توسط هر کارخانه افزایش یافته و از این رو هزینه حمل‌ونقل بین کارخانه‌ها کمتر و کل هزینه کاهش پیدا کرده است؛ همچنین به دلیل افزایش ظرفیت کارخانه‌ها حداکثر استفاده از منابع کاهش یافته است. شکل ۱۰، تغییرات مقدار تابع هدف اول و دوم را به ازای تغییرات مختلف ظرفیت کارخانه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. تغییرات مقدار توابع هدف به‌ازای تغییرات ظرفیت مختلف کارخانه

حل مسائل نمونه با الگوریتم فراابتکاری NSGA II. قبل از حل مسائل نمونه در اندازه‌های مختلف، باید پارامترهای اولیه الگوریتم برای افزایش کارایی آن در کسب جبهه پارتو تنظیم شود؛ از این‌رو ابتدا پارامتر الگوریتم فرا ابتکاری NSGA II با روش تاگوچی تنظیم شده است. برای تنظیم پارامتر از متغیر پاسخ به شرح رابطه ۳۶، استفاده شد.

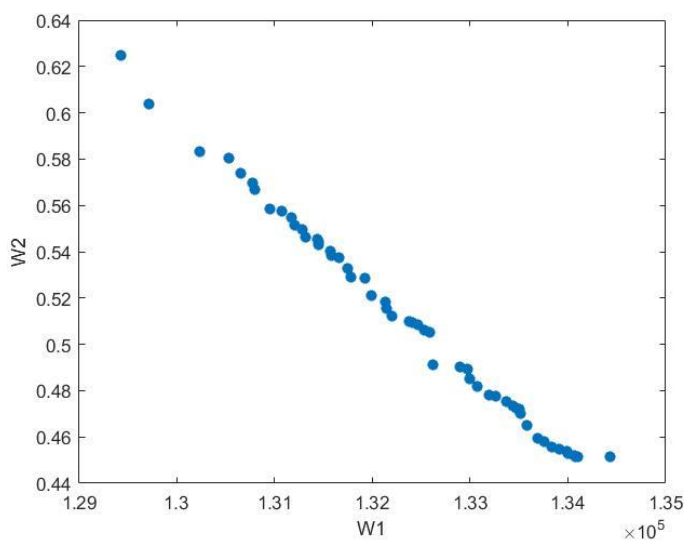
$$y_i = \frac{AlgSolution_i - Bestsolution}{Bestsolution} \quad (36)$$

جدول ۶ سطوح پیشنهادی پارامترهای اولیه الگوریتم NSGA II و مقدار بهینه آن را در سه سطح پایین، متوسط و بالا نشان می‌دهد.

جدول ۶. پارامترها و سطوح پیشنهادی برای تنظیم با روش تاگوچی

پارامتر	سطح پایین	سطح متوسط	سطح بالا	مقدار بهینه
تعداد جمعیت اولیه N_{pop}	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰
نرخ جهش P_m	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳
نرخ ترکیب P_c	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۸

در تنظیم پارامتر الگوریتم پیشنهادی، شرط توقف الگوریتم بر اساس همگرایی نتایج است. در ادامه به بررسی و حل مسئله نمونه اندازه کوچک طراحی شده و حدود بازه‌ای پارامترهای ارائه شده در جدول ۲، با الگوریتم NSGA II و مقایسه نتایج آن با روش اپسیلون محدودیت پرداخته شده است. پس از کدنویسی مدل در نرم‌افزار متلب و حل مسئله، ۵۴ جواب کارا مطابق با جبهه پارتو شکل ۱۱، به دست آمد.



شکل ۱۱. جبهه پارتو حاصل از حل مسئله نمونه با اندازه کوچک با الگوریتم NSGA II

برای بررسی متغیرهای خروجی، نخستین جواب کارای مسئله از بین ۵۴ جواب کارا انتخاب و متغیرهای خروجی حاصل از آن در جداول ۷، نشان داده شده است. مطابق با جبهه پارتو شکل ۱۱، مشاهده می‌شود با مقدار تابع هدف اول مسئله، مقدار تابع هدف دوم مسئله کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که با افزایش سرمایه‌گذاری در بخش تولید، حداکثر استفاده از منابع هدف واحد تولید کاهش می‌یابد.

جدول ۷. مقدار محصول انتقال یافته در هر دوره زمانی (NSGA II)

$X_{1214} = 41.35$	$X_{2214} = 130.88$	$X_{3114} = 174.13$
$X_{1224} = 39.75$	$X_{2223} = 125.82$	$X_{3122} = 163.90$
$X_{1234} = 39.36$	$X_{2232} = 124.57$	$X_{3133} = 162.46$
$V_{12} = 0.240$	$V_{22} = 0.760$	$V_{31} = 1$
$I_{233} = 287.03$	$I_{124} = 39.75$	$I_{234} = 326.39$
$I_{323} = 163.90$	$I_{214} = 130.88$	$I_{314} = 174.13$
$I_{114} = 41.357$	$I_{224} = 125.82$	$I_{324} = 163.90$
$I_{322} = 125.82$	$I_{232} = 163.90$	$I_{223} = 124.57$
$Z_{114} = 41.35$	$Z_{214} = 130.88$	$Z_{314} = 174.13$
$Z_{124} = 39.75$	$Z_{223} = 125.82$	$Z_{322} = 163.90$
$Z_{134} = 39.36$	$Z_{232} = 124.57$	$Z_{333} = 162.46$
$X'_{12313} = 162.46$	$X'_{12314} = 39.36$	$X'_{31313} = 162.46$
$Y_{1214} = 1$	$Y_{2214} = 1$	$Y_{3114} = 1$
$Y_{1224} = 1$	$Y_{2223} = 1$	$Y_{3122} = 1$
$Y_{1234} = 1$	$Y_{2232} = 1$	$Y_{3133} = 1$

برای بررسی نتایج دو روش اپسیلون محدودیت و الگوریتم NSGA II بر روی مسئله نمونه با اندازه کوچک از ۶ شاخص استفاده شده است. مقایسه شاخص‌های جواب‌های کارا بین دو روش اپسیلون محدودیت و NSGA II در جدول ۸، نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود که روش اپسیلون محدودیت در کسب شاخص‌های میانگین تابع هدف اول، شاخص فاصله متریک (SM^1) نتایج بهتری نسبت به الگوریتم NSGA II کسب کرده است. بر این اساس الگوریتم NSGA II نیز در کسب شاخص میانگین تابع هدف دوم، تعداد جواب کارا (NPF^2)، شاخص بیشترین گسترش (MSI^3) و زمان محاسباتی (CPU-time) نتایج بهتری نسبت به روش اپسیلون محدودیت کسب کرده است.

جدول ۸. مقایسه شاخص‌های مقایسه جواب‌های کارا در مسئله نمونه با اندازه کوچک

CPU-time	SM	MSI	NPF	میانگین تابع هدف دوم	میانگین تابع هدف اول	روش حل
۸۲/۱۶	۰/۵۶۲	۳۳۷۳/۴۲	۳۰	۰/۵۷۱	۱۳۲۱۹۲/۶۵	eps constraint
۲۰/۱۲	۰/۷۵۴	۵۰۱۴/۳۵	۵۴	۰/۵۱۱	۱۳۲۳۳۸/۲۲	NSGA II

1. Space Metric
2. Number of Pareto Front
3. Maximum Spread Index

حل مسائل نمونه اندازه با اندازه بزرگ. پس از بررسی متغیرهای خروجی مسئله با الگوریتم NSGA II و همچنین بالا بودن زمان محاسباتی روش اپسیلون محدودیت در حل مسائل نمونه با اندازه بزرگ، در ادامه به حل مسائل بزرگ با استفاده از الگوریتم NSGA II پرداخته شده است. جدول ۹، اندازه مسائل نمونه اندازه بزرگ را نشان می‌دهد. برای این امر ۱۵ مسئله نمونه طراحی شده و داده‌ها مسئله بر اساس تابع توزیع یکنواخت جدول ۲، تولید شده است؛ همچنین برای دستیابی به نتایج بهتر از هر مسئله نمونه ۵ زیرمسئله تولید و میانگین ۵ زیرمسئله به‌عنوان نتایج نهایی آن مسئله نمونه در نظر گرفته شده است.

جدول ۹. اندازه مسائل نمونه طراحی شده در اندازه بزرگ

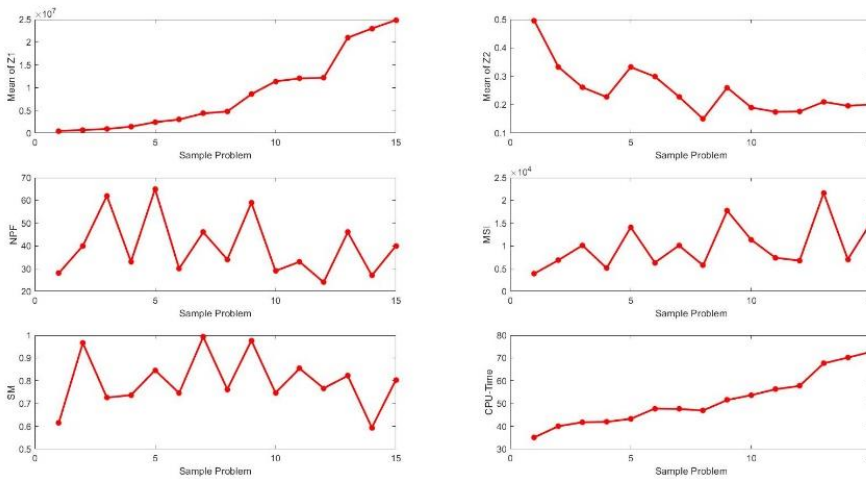
مسئله نمونه	O	C	K	M	T
۱	۳	۵	۳	۴	۴
۲	۳	۸	۳	۶	۴
۳	۳	۱۰	۳	۸	۴
۴	۳	۱۲	۳	۱۰	۵
۵	۴	۱۵	۴	۱۲	۵
۶	۴	۱۸	۴	۱۴	۵
۷	۴	۲۰	۴	۱۶	۶
۸	۴	۲۲	۴	۱۸	۶
۹	۵	۲۵	۵	۲۰	۶
۱۰	۵	۲۸	۵	۲۲	۷
۱۱	۵	۳۰	۵	۲۴	۷
۱۲	۵	۳۲	۵	۲۶	۷
۱۳	۶	۳۵	۶	۲۸	۸
۱۴	۶	۳۸	۶	۳۰	۸
۱۵	۶	۴۰	۶	۳۲	۸

پس از حل مسائل نمونه، میانگین شاخص‌های ۵ زیرمسئله محاسبه و در جدول ۱۰، نشان داده شده است. شاخص‌های موردبررسی شامل میانگین کلی مقدار تابع هدف اول و دوم، میانگین تعداد جواب کارا، میانگین بیشترین گستردگی، میانگین فاصله متریک و میانگین زمان محاسباتی است.

جدول ۱۰. میانگین شاخص‌های جواب کارا در مسائل نمونه سایز بزرگ

مسئله نمونه	میانگین تابع هدف اول	میانگین تابع هدف دوم	NPF	MSI	SM	CPU-time
۱	۴۸۶۵۴۹/۷۰	۰/۴۹۶	۲۸	۳۸۹۳/۹۲	۰/۶۱۴	۳۵/۱۰
۲	۶۸۲۸۳۲/۱۰	۰/۳۳۳	۴۰	۶۸۵۴/۷۶	۰/۹۶۶	۴۰/۰۱
۳	۹۲۱۸۳۳/۲۸	۰/۲۶۱	۶۲	۱۰۱۰۶/۵۲	۰/۷۲۶	۴۱/۷۷
۴	۱۴۱۹۹۴۳/۲۱	۰/۲۲۷	۳۳	۵۱۰۰/۲۵	۰/۷۳۷	۴۱/۹۲
۵	۲۴۱۷۹۶۷/۹۲	۰/۲۲۷	۶۵	۱۴۰۹۳/۶۲	۰/۸۴۶	۴۳/۲۸
۶	۲۹۹۰۸۵۹/۲۱	۰/۲۹۹	۳۰	۶۳۰۴/۴۵	۰/۷۴۶	۴۷/۷۸
۷	۴۳۳۹۷۹۷/۴۹	۰/۲۲۸	۴۶	۱۰۰۸۹/۲۷	۰/۹۹۳	۴۷/۵۸
۸	۴۷۶۴۱۱۳/۱۸	۰/۱۵۰	۳۴	۵۷۰۴/۳۴	۰/۷۶۲	۴۶/۹۴
۹	۸۵۵۷۱۳۶/۷۲	۰/۲۶۰	۵۹	۱۷۷۲۲/۶۰	۰/۹۷۷	۵۱/۵۴
۱۰	۱۱۳۲۵۰۰/۴۰	۰/۱۹	۲۹	۱۱۳۲۵/۱۵	۰/۷۴۷	۵۳/۶۹
۱۱	۱۲۰۲۸۵۱۳/۲۱	۰/۱۷۵	۳۳	۷۳۸۶/۱۳	۰/۸۵۴	۵۶/۲۶
۱۲	۱۲۱۵۸۶۰۷/۷۳	۰/۱۷۶	۲۴	۶۷۴۸/۴۰	۰/۷۶۷	۵۷/۷۳
۱۳	۲۰۹۸۴۰۵۴/۲۳	۰/۲۱۰	۴۶	۲۱۶۳۷/۴۲	۰/۸۲۲	۶۷/۶۶
۱۴	۲۲۹۹۶۳۸۳/۵۷	۰/۱۹۶	۲۷	۷۰۳۵/۴۲	۰/۵۹۴	۷۰/۱۷
۱۵	۲۴۸۳۹۷۸۵/۵۸	۰/۲۰۱	۴۰	۱۵۴۶۱/۰۳	۰/۸۰۴	۷۳/۸۳

برای تحلیل بهتر مسئله، شکل ۱۲، میانگین شاخص‌های جواب کارا را در مسائل نمونه با اندازه بزرگ با الگوریتم NSGA II نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. روند تغییرات میانگین شاخص‌ها از حل مسئله نمونه اندازه بزرگ با الگوریتم NSGA II

با توجه به شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه مسئله، به دلیل افزایش تعداد مشتریان و محصولات درخواستی، تقاضای کل مجموعه افزایش و به علت افزایش تقاضا، مقدار تولید و هزینه‌های مرتبط با آن افزایش می‌یابد و به همین دلیل میانگین تابع هدف اول با افزایش اندازه مسئله افزایش یافته است. برخلاف روند تغییرات مقدار تابع هدف اول با افزایش تعداد کارخانه‌ها، حداکثر استفاده از منابع در دسترس کاهش یافته است؛ همچنین با افزایش اندازه مسئله، زمان حل مسئله توسط الگوریتم NSGA II افزایش می‌یابد که این امر نشان از NP-Hard بودن مسئله دارد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک مدل غیرقطعی از مسئله برنامه‌ریزی تولید همکارانه در سیستم تولیدی ساخت برای سفارش با رعایت انصاف به منظور هماهنگی و تخصیص بارهای تولید طراحی شد. توابع هدف این مدل کمینه‌سازی هزینه‌های کل و کمینه‌سازی حداکثر استفاده از منابع تولیدی برای تخصیص عادلانه بارهای تولیدی بود. در این مدل سیاست ساخت بر اساس سفارش موردبررسی قرار گرفت که کارخانه‌ها با یکدیگر همکاری متقابلی برای برآورده‌سازی تقاضای مشتریان داشتند. با توجه به غیرقطعی در نظر گرفتن پارامترهای مدل نظیر تقاضا، هزینه حمل‌ونقل و تولید، از روش برنامه‌ریزی فازی برای کنترل مدل و تبدیل مدل غیرقطعی به یک مدل قطعی قابل حل استفاده شد. با توجه به دو هدفه بودن مدل طراحی‌شده، برای حل مدل از روش‌های دقیق و فرا ابتکاری بهره‌گیری شد. ابتدا یک مسئله نمونه در اندازه کوچک طراحی و مسئله با استفاده از روش اپسیلون محدودیت حل شد. نتیجه این امر کسب ۳۰ جواب کارا بود؛ سپس به تحلیل حساسیت مسئله پرداخته شد و نتایج نشان داد که با افزایش نرخ عدم قطعیت، به دلیل افزایش تقاضای هر مشتری از هر محصول، مقدار تابع هدف اول افزایش می‌یابد. از آنجا که ظرفیت کارخانه‌ها در این تحلیل ثابت در نظر گرفته شده بود، با افزایش مقدار تقاضا، مقدار تولید افزایش و به‌ازای آن حداکثر استفاده از منابع هر کارخانه افزایش یافته است؛ همچنین مشاهده شد با افزایش ظرفیت کارخانه‌ها، مقدار تولید توسط هر کارخانه افزایش یافته و از این رو هزینه حمل‌ونقل بین کارخانه‌ها کمتر و کل هزینه کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل افزایش ظرفیت کارخانه‌ها حداکثر استفاده از منابع کاهش یافته است. به منظور حل مسائل نمونه در اندازه‌های بزرگ‌تر از الگوریتم فراابتکاری NSGA II استفاده شد. قبل از استفاده از این الگوریتم، کروموزوم اولیه این مسئله طراحی و عملگرهای ترکیب و جهش نیز تعریف شد؛ سپس ۱۵ مسئله نمونه در اندازه‌های بزرگ‌تر طراحی و از داده‌های تصادفی بر اساس توزیع یکنواخت استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش اندازه مسئله، به دلیل افزایش تعداد مشتریان و محصولات درخواستی، تقاضای کل مجموعه افزایش و به علت افزایش تقاضا، مقدار تولید و هزینه‌های

مرتبط با آن افزایش یافته است. به همین دلیل میانگین تابع هدف اول با افزایش اندازه مسئله افزایش می‌یابد. برخلاف روند تغییرات مقدار تابع هدف اول با افزایش تعداد کارخانه‌ها، حداکثر استفاده از منابع در دسترس کاهش یافته است؛ همچنین مشاهده شد که با افزایش اندازه مسئله، زمان حل مسئله توسط الگوریتم NSGA II افزایش می‌یابد که این امر نشان از NP-Hard بودن مسئله دارد.

با توجه به مدل ارائه شده، پیشنهاد می‌شود برای کنترل پارامترهای غیرقطعی از دیگر روش‌های کنترل نظیر روش استوار استفاده شود؛ همچنین استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری جدیدتر برای حل مسئله در زمان کوتاه‌تر و مقایسه آن‌ها با یکدیگر به‌عنوان پیشنهاد‌های آتی مطرح می‌شود.

یافته‌های مدیریتی. با توجه به اهمیت کاهش هزینه‌ها در سیستم تولید ساخت بر اساس سفارش و توجه مدیران به این موضوع، در این پژوهش مدل متناسب با سیستم تولید ساخت بر اساس سفارش که قابلیت اجرا در صنایعی همانند صنعت چاپ و تولید ماشین‌آلات و غیره را دارد، طراحی شده است. وجود عدم قطعیت در محیط و عدم تصمیم‌گیری مدیران در تعیین مقدار دقیق سفارش از دیگر نکاتی است که در این پژوهش به کنترل آن پرداخته شد؛ از این رو مدیران با در نظر گرفتن مدل و استفاده از ابزارهای کنترل عدم قطعیت می‌توانند حداقل و حداکثر هزینه‌های متحمل بر سیستم را شناسایی کرده و متناسب با بودجه در دسترس مناسب‌ترین گزینه را برای تولید و تأمین سفارش‌های مشتریان و تخصیص بهینه بار به واحدهای تولیدی اتخاذ کنند.

منابع

1. Alidoost, F., Bahrami, F., & Safari, H. (2020). Multi-Objective Pharmaceutical Supply Chain Modeling in Disaster (Case Study: Earthquake Crisis in Tehran). *Journal of Industrial Management Perspective*, 10(3), 99-123. (In Persian).
2. Bank, M., Mazdeh, M. M., Heydari, M., & Teimoury, E. (2021). Coordinating lot sizing and integrated production and distribution scheduling with batch delivery and holding cost. *Kybernetes*.
3. Beemsterboer, B., Land, M., & Teunter, R. (2017). Flexible lot sizing in hybrid make-to-order/make-to-stock production planning. *European Journal of Operational Research*, 260(3), 1014-1023.
4. Bogers, R. R. (2018). Collaborative Planning in a High-Tech Industry with a Make-To-Forecast Environment.
5. Brahim, N., Dauzere-Peres, S., & Wolsey, L. (2010). Polyhedral and Lagrangian approaches for lot sizing with production time windows and setup times. *Computers & Operations Research*, 37(1), 182-188.
6. Casas-Ramírez, M. S., Camacho-Vallejo, J. F., González-Ramírez, R. G., Marmolejo-Saucedo, J. A., & Velarde-Cantú, J. M. (2018). Optimizing a Biobjective Production-Distribution Planning Problem Using a GRASP. *Complexity*, 2018.
7. Cheng, F., & Ye, F. (2011). A two objective optimisation model for order splitting among parallel suppliers. *International Journal of Production Research*, 49(10), 2759-2769.
8. Damyad, M. H., & Jafari, D. (2021). Codify a Three echelon inventory control model in terms of inflation with allowed shortage for a deterioration items. *International Journal of Innovation in Engineering*, 1(1), 101-119.
9. Ding, H., Benyoucef, L., & Xie, X. (2009). Stochastic multi-objective production-distribution network design using simulation-based optimization. *International Journal of Production Research*, 47(2), 479-505.
10. Fang, W., Guo, Y., Liao, W., Huang, S., Yang, N., & Liu, J. (2020). A Parallel Gated Recurrent Units (P-GRUs) network for the shifting lateness bottleneck prediction in make-to-order production system. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106246.
11. Feng, X., Chen, Y., & Hu, X. (2018). Co-optimizing Capacity Planning with Order Acceptance and Scheduling in Make-to-Order Production System. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (pp. 1849-1854). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
12. Ghahremani Nahr, J., Pasandideh, S. H. R., & Niaki, S. T. A. (2020). A robust optimization approach for multi-objective, multi-product, multi-period, closed-loop green supply chain network designs under uncertainty and discount. *Journal of industrial and production engineering*, 37(1), 1-22.
13. Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Najafi, S. E. (2020). Design a green closed loop supply chain network by considering discount under uncertainty. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 7(3), 238-266.
14. He, Z., Guo, Z., & Wang, J. (2019). Integrated scheduling of production and distribution operations in a global MTO supply chain. *Enterprise Information Systems*, 13(4), 490-514.

15. Hwang, H., Jaruphongs, W., Cetinkaya, S., & Lee, C. (2010). Capacitated dynamic lotsizing problem with delivery/production time windows. *Operations Research Letters*, 38(5), 408–413.
16. Jans, R., & Degraeve, Z. (2007). Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1855–1875.
17. Laumanns, M., Thiele, L., & Zitzler, E. (2006). An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. *European Journal of Operational Research*, 169(3), 932-942.
18. Lee, C., Cetinkaya, S., & Wagelmans, A. (2001). A dynamic lot-sizing model with demand time windows. *Management Science*, 47(10), 1384–1395.
19. Liao, Z., & Rittscher, J. (2007). Integration of supplier selection, procurement lot sizing and carrier selection under dynamic demand conditions. *International Journal of Production Economics*, 107(2), 502–510.
20. Liu, L., & Liu, S. (2020). Integrated Production and Distribution Problem of Perishable Products with a Minimum Total Order Weighted Delivery Time. *Mathematics*, 8(2), 146.
21. Luo, H., Yang, X., & Wang, K. (2019). Synchronized scheduling of make to order plant and cross-docking warehouse. *Computers & Industrial Engineering*, 138, 106108.
22. Ma, J., Tu, Y., & Feng, D. (2020). Order Acceptance Policy for Make-To-Order Supply Chain. In *Data Management and Analysis* (pp. 67-89). Springer, Cham.
23. Marandi, F., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2019). Integrated multi-factory production and distribution scheduling applying vehicle routing approach. *International Journal of Production Research*, 57(3), 722-748.
24. Meng, F., Tang, J., & Xu, Z. (2017). A 0-1 mixed programming model based method for group decision making with intuitionistic fuzzy preference relations. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 289-304.
25. Moslemipour, G., & Ghadirpour, S. M. (2021). Intelligent Design of a Dynamic Facility Layout in the Stochastic Environment of Flexible Manufacturing Systems Considering Routing Flexibility. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(1), 175-209. (In Persian).
26. Og, C., Salman, F. S., & Yalçın, Z. B. (2010). Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order systems. *International Journal of Production Economics*, 125(1), 200-211.
27. Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., & Asadi, K. (2015). Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information Sciences*, 292, 57-74.
28. Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., & Asadi, K. (2015). Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three echelon supply chain network with warehouse reliability. *Expert Systems with Applications*, 42(5), 2615-2623.
29. Rafiei, H., & Rabbani, M. (2011). Order partitioning and order penetration point location in hybrid make-to-stock/make-to-order production contexts. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 550-560.
30. Rafiei, H., Rabbani, M., Vafa-Arani, H., & Bodaghi, G. (2017). Production-inventory analysis of single-station parallel machine make-to-stock/make-to-order system with random demands and lead times. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 12(1), 33-44.

31. Rajagopalan, S. (2002). Make to order or make to stock: model and application. *Management Science*, 48(2), 241-256.
32. Ren, C., Guo, P., Tan, Q., & Zhang, L. (2017). A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 85-94.
33. Sajadi, S. M., Ayough, A., & Sayed Isfahani, M. M. (2016). An Integrated Model for Analysis and Improvement of Scheduling “Flexible Manufacturing Systems (FMS)” and Dispatching “Automated Guided Vehicle (AGV)” Problems. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6(1), 97-127. (In Persian).
34. Salamati-Hormozi, H., Zhang, Z. H., Zarei, O., & Ramezani, R. (2018). Trade-off between the costs and the fairness for a collaborative production planning problem in make-to-order manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 421-434.
35. Taleizadeh, A. A. (2017). Stochastic multi-objectives supply chain optimization with forecasting partial backordering rate: a novel hybrid method of meta goal programming and evolutionary algorithms. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 34(04), 1750021.
36. Thurer, M., Fernandes, N., Carmo-Silva, S., & Stevenson, M. (2018). Lot splitting under load-limiting order release in high-variety shops: An assessment by simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 63-72.
37. Wolsey, L. (2006). Lot-sizing with production and delivery time windows. *Mathematical Programming*, 107(3), 471-489.
38. Woschank, M., Dallasega, P., & Kapeller, J. A. (2020). The impact of planning granularity on production planning and control strategies in MTO: A discrete event simulation study. *Procedia Manufacturing*, 51, 1502-1507.
39. Xiong, S., Feng, Y., & Huang, K. (2020). Optimal MTS and MTO Hybrid Production System for a Single Product under the Cap-And-Trade Environment. *Sustainability*, 12(6), 2426.
40. Yadegari, E., Alem-Tabriz, A., & Zandieh, M. (2019). A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 418-436.
41. Yao, X., Zhang, J., Li, Y., & Zhang, C. (2018). Towards flexible RFID event-driven integrated manufacturing for make-to-order production. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 228-242.
42. Ylänen, J. (2017). Continuous improvement in order delivery process of make-to-order products.
43. Zabihian, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Memari, P., & Jolai, F. (2018, June). Location-pricing problem in the closed-loop supply chain network design under uncertainty. In *International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing* (pp. 360-371). Springer, Cham.
44. Zhai, Y., & Cheng, T. C. E. (2021). Lead-time Quotation and Hedging Coordination in Make-to-order Supply Chain. *European Journal of Operational Research*, 112 (2), 28-44.

45. Zhang, Z., Guo, C., Wei, Q., Guo, Z., & Gao, L. (2021). A bi-objective stochastic order planning problem in make-to-order multi-site textile manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107367.