




# Development of a Closed-Loop Supply Chain Mathematical Model with Demand Constraints and Fuzzy Supplier Capacity and Solving it with Meta-Heuristic Algorithms

Sadegh Faiz Elahi, Vahid Sharfi\* 

\*Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Humanities, Hazrat Masoumeh University, Qom, Iran

(Received: 16/08/2022, Revised: 12/03/2023, Accepted: 31/05/2023 , Published: 22/06/2023)

DOR: 20.1001.1.20089198.1402.25.79.2.6

## ABSTRACT

*Nowadays, in order to achieve competitive advantages in the market, it is essential to design the supply chain network. Optimizing this network leads to efficient and effective management of the entire supply chain operation. In this article, a closed loop supply chain is designed, which is examined as multi-objective, multi-level and single product with product returns. The main goals of this issue are to minimize costs, increase profit from recycled products, increase cost savings from recycling and environmental effects. On the other hand, due to the fact that in the real world, the data related to the effective indicators in the problems are not available definitively, so it will be more appropriate to use the non-deterministic approach. In this study, the demand and capacity of the non-deterministic supplier and the approach used to solve the TH approach multi-objective model were solved and investigated using GAMS software. By increasing the size of the problem, it is impossible to solve the model with the mentioned method, so the proposed problem was solved using MOPSO and NSGA-II algorithms and the performance results of both algorithms were compared. The results show that the answers produced by the NSGA-II algorithm are of higher quality.*

**Keywords:** Closed Loop Supply Chain, Fuzzy Demand, Fuzzy Supplier Capacity, NSGA-II Algorithm, MOPSO Algorithm

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



\* Corresponding Author Email: v.sharafi@hmu.ac.ir

## توسعه مدل ریاضی زنجیره تامین حلقه بسته با محدودیت‌های تقاضا و ظرفیت تامین کننده فازی و حل آن با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

صادق فیض‌اللهی<sup>۱</sup>، وحید شرفی<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار گروه مدیریت، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران ۲- استادیار گروه مدیریت، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه حضرت معصومه (س)، قم، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1402.25.79.2.6

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

### چکیده

امروزه برای دستیابی به منافع رقابتی در بازار، طراحی شبکه زنجیره تامین، امری ضروری است. بهینه‌سازی این شبکه منجر به مدیریت کارا و موثر عملیات کل زنجیره تامین می‌شود. در این مقاله یک زنجیره تامین حلقه بسته طراحی شده است که به صورت چند هدفه، چند سطحی و تک محصولی با بازگشت محصول بررسی می‌شود. اهداف اصلی این مسئله، حداقل کردن هزینه‌ها، افزایش سود حاصل از محصول بازیافتی، افزایش صرفه‌جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و اثرات زیست محیطی می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه در دنیای واقعی، داده‌های مربوط به شاخص‌های اثرگذار در مسائل، به صورت قطعی در دسترس نمی‌باشد بنابراین استفاده از رویکرد غیرقطعی مناسب‌تر خواهد بود. در این مطالعه نیز، تقاضا و ظرفیت تامین‌کننده غیر قطعی و رویکرد استفاده شده برای حل مدل چند هدفه رویکرد TH و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل و مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش سایز مسئله، حل مدل با روش ذکر شده غیر ممکن است بنابراین مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های MOPSO و NSGA-II حل و نتایج عملکرد هر دو الگوریتم با هم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده این است که جواب‌های تولیدی با الگوریتم NSGA-II از کیفیت بالاتری برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره تامین حلقه بسته، تقاضای فازی، ظرفیت تامین کننده فازی، الگوریتم NSGA-II، الگوریتم MOPSO

### ۱- مقدمه

طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته می‌تواند به میزان زیادی تأثیرات زیست محیطی و هزینه را بهبود بخشد، از اینرو طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و تصمیمی استراتژیک با آثار بلندمدت است [۸]. مسئله مورد نظر در این پژوهش، توسعه مدل شبکه زنجیره تامین یکپارچه است. در این مسئله، شبکه زنجیره تامین شامل سطوح تامین کننده، مراکز تولید، مراکز توزیع کننده، مشتری، مراکز جمع‌آوری، مراکز بازرسی و انهدام می‌باشند. در این مسئله مراکز تولید پس از خرید مواد اولیه و تبدیل آن به محصولات نهایی، آنها را به سیستم توزیع می‌فرستند و سپس از راه مراکز توزیع محصولات برای مشتریان ارسال می‌شوند. درصدی از محصولات به دلایل مختلف مانند خرابی و ... از مشتریان به مراکز جمع‌آوری که اولین حلقه در شبکه معکوس می‌باشند ارسال می‌شوند. این محصولات پس از ارسال به مراکز بازرسی و انهدام در صورت قابل تعمیر بودن به مراکز تولید فرستاده شده و بعد از تعمیر دوباره به شبکه زنجیره تامین وارد می‌شوند که آن گاه برای پاسخگویی به نیاز مشتریان از آنها استفاده می‌شود. در صورتی که محصولات موجود در مراکز بازرسی و انهدام قابل تعمیر نباشند در همان جا منهدم شده و از شبکه خارج می‌شوند تا از محیط زیست به طرز مناسبی خارج شود. چون کالاها در چرخه

طراحی شبکه زنجیره تامین یکی از مهمترین تصمیمات راهبردی است که توجه محققان به سمت آن جلب شده است. یک زنجیره تامین معمولی شامل مراحل است که بطور مستقیم و غیر مستقیم خواسته‌های مشتری را برآورده می‌سازد و تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل محصول‌ها از مرحله تامین مواد اولیه تا تحویل به مشتری و نیز جریان‌های مرتبط با آن‌ها را شامل می‌شود [۲۱]. با توجه به اینکه طراحی شبکه مستقیم و شبکه معکوس بطور جداگانه، باعث نتایج طرح‌های زیر بهینه نمی‌شود، لذا طراحی شبکه مستقیم و شبکه معکوس باید یکپارچه شود و اگر شبکه معکوس با شبکه مستقیم یکپارچه شود، به عنوان شبکه حلقه بسته شناخته می‌شود [۳ و ۴]. در ابتدا توجه به مسائل اقتصادی و کاهش هزینه در زنجیره تامین مورد تأکید واقع می‌شد [۵]. اخیراً اهمیت رقابت پذیری اقتصادی و نگرانی‌های زیست محیطی پیرامون محصولات فرسوده، باعث توجه به لجستیک معکوس و زنجیره تامین حلقه بسته شده است [۶]. آگاهی از مسائل زیست محیطی، شرکت‌ها را به سمت لجستیک معکوس و طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته هدایت کرده است [۷].

\* رایانامه نویسنده مسئول: v.sharafi@hmu.ac.ir

نظر گرفتن اهداف زیست محیطی و کاهش میزان انتشار دی اکسید کربن در محیط در سراسر شبکه توسعه داده شده است [۱۵]. سابولان و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۵) در پژوهشی به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با گزینه‌های بازایی متعدد با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی به بررسی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند [۱۶]. کافا و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۵) به شبیه سازی، مدلسازی و تجزیه و تحلیل طراحی شبکه زنجیره‌ای حلقه بسته تغذیه: مطالعه موردی صنعت باتری به بررسی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند [۱۷]. جوی تائو و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۵) به موازنه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای با فشرده سازی انتشار کربن پرداخته‌اند. و هدف آن دوباره سازی برای کاهش ضایعات و ایمنی محیطی است [۱۸]. السالم و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۶) به مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. مدل پیشنهادی آنها یک برنامه عدد صحیح غیر خطی ترکیبی است که از طریق آن، مشکلات حمل و نقل و سفارش و مکان حل می‌شود [۱۹]. رومی‌نیا و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۶) به طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه بسته محیطی قوی تحت عدم قطعیت پرداخته‌اند. مدل پیشنهادی طبق مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی تک هدفه حل می‌شود [۲۰]. کایا و یورک<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۶) به مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ترکیبی و راه حل‌های ابتدایی برای تصمیم‌گیری مکان، فهرست موجودی و قیمت در زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند [۲۱]. زوحال و سلیمانی<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۶) به توسعه رویکرد کلونی مورچگان در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز پرداخته‌اند. هدف این مطالعه کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با راه حل بهینه نرم افزار لینگو<sup>۱۲</sup> از طریق مثال‌های عددی بر اساس داده‌های واقعی مقایسه شده است [۲۲]. ژئی و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۶) در پژوهشی به مطالعه پیچیدگی و کنترل زنجیره تأمین بازیافت بازار تلویزیون‌های رنگی چین بر اساس پارانه دولت به بررسی حل مدل زنجیره تأمین حلقه بسته بازیافت پرداختند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل، در بهبود محیط زیست و افزایش رفاه اجتماعی استفاده می‌شوند [۲۳]. تیواری و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۶) به بررسی رویکرد الگوریتم تکاملی برای طراحی شبکه حلقه بسته زنجیره تأمین سبز و حل مدل زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند [۲۴]. کادامبالا و

زنجیره تأمین معکوس و در چرخه زنجیره تأمین مستقیم وارد می‌شوند لذا شبکه یک شبکه حلقه بسته خواهد بود مدل بصورت چند هدفه، چند سطحی و تک محصولی با بازگشت محصول در شرایط عدم اطمینان است. توابع هدف مدل شامل حداقل کردن هزینه‌ها، افزایش سود حاصل از محصول بازیافتی، افزایش صرفه جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و اثرات زیست محیطی می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه در دنیای واقعی، داده‌های مربوط به شاخص‌های اثرگذار در مسائل، به صورت قطعی در دسترس نمی‌باشد بنابراین استفاده از رویکرد غیرقطعی مناسبتر خواهد بود. در این مطالعه نیز، تقاضا و ظرفیت تامین کننده غیر قطعی در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- مرور ادبیات تحقیق

مرور مبانی نظری، دیدگاه‌های مختلفی را در مطالعه روابط زنجیره تأمین نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان چنین برداشت کرد که مطالعات پیشین بر موضوع‌های زیر متمرکز هستند:

امین و ژانگ<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) یک مدل شبکه زنجیره تأمین دو هدفه حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت ارائه نمودند. شبکه لجستیک حلقه بسته در این مطالعه، یک شبکه شامل کارخانه‌های تولیدی، بازار تقاضا، مراکز جمع‌آوری و مرکز دفن می‌باشد [۹]. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس ارائه داده‌اند که با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین و برای حل مدل از نرم افزار لینگو بهره گرفته‌اند [۱۰]. رضانی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت محیط فازی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند [۱۱]. اوزسیلان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) به مدل سازی و بهینه سازی مشکلات یکپارچگی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و پیاده کردن تعادل خط تولید پرداخته‌اند [۱۲]. جایانت و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) به شبیه سازی، مدلسازی و تجزیه و تحلیل طراحی شبکه زنجیره‌ای حلقه بسته تغذیه در صنعت باتری پرداختند [۱۳]. دای و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی: یک مدل برنامه‌ریزی فازی و شانس محدود به بررسی حل مدل پرداختند [۱۴]. طلائی و همکاران (۲۰۱۵) در یک مطالعه، بررسی یک مدل تخصیص/محل تسهیلات برای یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته چند محصول متشکل از تولید/بازتولید و مراکز جمع‌آوری/بازرسی و همچنین بازارها و مرکز در دسترس انجام دادند. مدل با

<sup>5</sup> Subulan et al

<sup>6</sup> Kafa et al

<sup>7</sup> Tao et al

<sup>8</sup> Al-Salem et al

<sup>9</sup> Ruimin et al

<sup>10</sup> Kaya et al

<sup>11</sup> Zohal & Soleimani

<sup>12</sup> Lingo

<sup>13</sup> Xie et al

<sup>14</sup> Tiwari et al

<sup>1</sup> Amin & Zhang

<sup>2</sup> Özceylan et al

<sup>3</sup> Jayant et al

<sup>4</sup> Dai et al

عدم قطعیت‌های مدل استفاده کردند [۳۴]. سازوار و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۱)، برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه سناریو محور ارائه دادند و در آن جریان معکوس داروهای منقضى را بررسی کردند [۳۵].

مقدس پور و همکاران در سال ۱۳۹۹ یک مدل ریاضی دو هدفه، چند محصولی و چند دوره‌ای برای طراحی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در صنعت تیر ارائه دادند و به منظور حل مدل از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده استفاده کردند [۳۶]. تاجیک جنگلی و همکاران (۱۳۹۹) به طراحی و برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز روغن موتور با در نظر گرفتن سیستم گردآوری کالا و ضایعات بصورت شبکه‌ای پرداختند. در این مطالعه تابع هدف اول هزینه‌ها و تابع هدف دوم اثرات نامطلوب زیست محیطی بود. و جهت حل مدل از روش اپسیلون محدودیت استفاده نموده‌اند. [۳۷]. ملک پور کلبادی نژاد و سیف برقی (۱۳۹۹) به توسعه شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن عوامل زیست محیطی و تصمیمات مکان یابی - موجودی در شرایط عدم اطمینان پرداختند. و با الهام از زنجیره تولید، توزیع و بازیافت لاستیک خودرو یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح ارائه و با روش‌های حل مساله چند هدفه مورد بررسی قرار دادند. [۳۸]. فیض‌اللهی و حیدری (۱۴۰۰) به توسعه مدل ریاضی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چند هدفه؛ با تمرکز بر صرفه جویی هزینه‌های بازیافت در شرایط عدم اطمینان پرداختند و به منظور حل مساله چندهدفه، از رویکرد ترابی و حسینی (TH) استفاده کردند [۳۹].

با توجه به پژوهش‌های موجود در مبانی نظری، تحقیق حاضر به دنبال ارائه مدل شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چندهدفه تحت شرایط عدم اطمینان با در نظر گرفتن اهداف مدل شامل حداقل کردن هزینه‌ها، افزایش سود حاصل از محصول بازیافتی، افزایش صرفه‌جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و اثرات زیست محیطی به طور همزمان است که در این مطالعه، تقاضا و ظرفیت تامین کننده غیر قطعی می‌باشد.

همان‌طور که در پیشینه تحقیق مشاهده می‌شود، اکثر پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، توابع هدف خود را به کمینه کردن هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی و یا حداکثر سازی سود و کمینه کردن اثرات زیست محیطی پرداخته‌اند و در هیچکدام از پژوهش‌های انجام شده هر سه تابع هدف (کمینه کردن هزینه‌ها، کمینه کردن اثرات زیست محیطی و حداکثر سازی سود) به صورت همزمان لحاظ نشده است. در این مدل پیشنهادی این خلاء پوشش داده شده است. از منظر عدم

همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) در پژوهشی به شبکه زنجیره تامین حلقه بسته، طراحی برای کارایی زمان و انرژی پرداخته‌اند رویکرد بهینه سازی مورد استفاده آنها برای حل مدل و استفاده از الگوریتم ژنتیک است [۲۵]. امین و باکی<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) یک مدل موقعیت مکانی برای طراحی شبکه جهانی زنجیره تامین حلقه بسته در نظر گرفتند این مدل یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفه یکپارچه با تقاضای نامحدود است. یک راه حل مبتنی بر برنامه نویسی فازی برای حل مشکل بهینه سازی توسعه داده شده است [۲۶]. پایدار و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) به طراحی زنجیره تامین حلقه بسته مهندسی نفت با در نظر گرفتن ریسک جمع‌آوری پرداخته‌اند [۲۷]. چن و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) به بهینه سازی تازگی محصولات در زنجیره تامین حلقه بسته با استفاده از مدل چند دوره‌ای ترکیب شده با کنترل کننده فازی تحت شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند [۲۸]. لویز و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) به یکپارچه‌سازی طراحی زنجیره تامین حلقه بسته تحت جریان بازگشت نامشخص پرداختند در این مطالعه یک مدل خطی عدد صحیح دو بعدی با عدم اطمینان بر کیفیت و کمیت جریان بازگشتی پیشنهاد شده است [۲۹]. فرخ و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۸) به طراحی شبکه‌های زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم اطمینان با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی جامع فازی پرداختند [۳۰]. فتح‌اللهی فرد و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۸) یک مدل چند هدفه تصادفی برای زنجیره تامین حلقه بسته با ملاحظات محیطی طراحی کردند و برای اعتبار سنجی مدل در اندازه‌های کوچک از اپسیلون محدودیت و برای اندازه‌های بزرگ ترکیبی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده کرد [۳۱]. قهرمانی نهر و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۹)، یک مدل مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته، چند دوره‌ای، چند محصولی و چند سطحی ارائه دادند. مدل برای بررسی اثرات پارامترهای غیرقطعی ارائه شد [۳۲]. اتابکی و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای به طراحی مجدد شبکه زنجیره تامین حلقه بسته محصولات بادوام پرداختند. در این پژوهش، مدل جدید بهینه سازی استوار با روش‌های برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو ارائه شد [۳۳]. لیو و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۱)، یک مدل طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته فازی استوار به منظور بهینه سازی بدترین عملکرد شبکه با در نظر گرفتن بده بستان بین ریسک و هزینه مورد انتظار توسعه دادند. آنها از نظریه اعتبار برای مقابله با

<sup>1</sup> Kadambala et al

<sup>2</sup> Amin & Baki

<sup>3</sup> Paydar et al

<sup>4</sup> Chen et al

<sup>5</sup> Luis et al

<sup>6</sup> Farrokh et al

<sup>7</sup> Fathollahi et al

<sup>8</sup> Ghahremani-Nahr et al

<sup>9</sup> Atabaki et al

<sup>10</sup> Liu et al

<sup>11</sup> Sazvar et al

- قطعیت نیز برخی از پژوهش‌ها تمام پارامترها را به شکل قطعی در نظر گرفتند و برخی هم که عدم قطعیت را لحاظ کردند، بر روی پارامترهای تقاضا و ظرفیت تامین کنندگان بصورت همزمان تمرکز نداشته اند که این شکاف نیز در مدل پیشنهادی مرتفع شده است.
- ۳- روش شناسی پژوهش**
- این تحقیق از لحاظ هدف از نوع توسعه‌ای و از حیث روش از نوع مدلسازی کمی است و محقق در صدد است ابتدا یک مسئله ریاضی چندهدفه شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم اطمینان را مدلسازی کند برای حل مدل چند هدفه رویکرد TH و با استفاده از نرم افزار GAMS حل و مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش سایز مسئله، حل مدل با روش ذکر شده غیر ممکن است بنابراین مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم های MOPSO و NSGA-II حل و نتایج عملکرد هر دو الگوریتم با هم مورد مقایسه قرار گرفت.
- ۴- مدل سازی ریاضی**
- در این قسمت به تعریف مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم پرداخته می‌شود و در ادامه مدل ارائه شده آورده شده است.
- مفروضات:**
- هزینه انتقال (جابجایی) به نوع مواد، قطعه، محصول بستگی ندارد و تحت تأثیر مبدا و مقصد (مسافت) است.
  - هزینه توزیع با هزینه انتقال محصول از توزیع کننده به مشتری در نظر گرفته شده است.
- مراکز تامین کنندگان، تولید کنندگان / مونتاژگران، توزیع کنندگان و مشتریان ثابت و از پیش تعریف شده است.
  - هزینه جمع‌آوری داخل هزینه انتقال محصول استفاده شده از مراکز مشتری به مراکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است.
  - هزینه دفع و انهدام مواد و قطعات در هزینه حمل و نقل آنها به مراکز دفع در نظر گرفته شده است.
  - قطعات مورد استفاده در مراکز مونتاژ از تامین کننده خریداری شده است.
  - محصولات سبز از مواد قابل بازیافت ساخته شده است.
  - درصد ثابتی از محصولات ارسال شده به هر مشتری برابر با مقدار محصولات برگشتی از همان مشتری در نظر گرفته می‌شود.
  - تقاضا برای محصولات باید ارضا شود.
  - محصولات پس از جمع‌آوری از مناطق مشتری، دمونتاژ می‌شوند.
  - قطعات حاصل از دمونتاژ در سه دسته قطعات مشابه نو، قطعات بازیافتی و قطعات ضایعاتی، به ترتیب، به مراکز مونتاژ، مرکز بازیافت و مرکز دفع منتقل می‌شوند.
  - یک محصول در نظر گرفته می‌شود.
- اندیس‌های مدل:
- اندیس‌های مدل در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱). اندیس‌های ارائه شده در مدل

$i = 1, 2, \dots, I$	شاخص تامین کننده ها	I
$j = 1, 2, \dots, J$	شاخص تولید کننده ها	J
$ma = 1, 2, \dots, MA$	شاخص بازار مواد	Ma
$p = 1, 2, \dots, P$	شاخص انواع قطعات	P
$m = 1, 2, \dots, M$	شاخص مواد خام	M
$t = 1, 2, \dots, T$	شاخص دوره،	T
$k = 1, 2, \dots, K$	شاخص مراکز توزیع	K
$g = 1, 2, \dots, G$	شاخص مراکز جمع‌آوری	G
$r = 1, 2, \dots, R$	شاخص مراکز بازیافت	R
$re = 1, 2, \dots, RE$	شاخص مراکز دفع و انهدام	Re
$l = 1, 2, \dots, L$	شاخص مراکز بالقوه دمونتاژ	L
$c = 1, 2, \dots, C$	شاخص مناطق مشتریان	C

هزینه واحد راه‌اندازی مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	$setrev_{rt}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز دفع و انهدام $re$ در دوره $t$	$setrebuttal_{ret}$
هزینه واحد دمونتاز محصول در مرکز دمونتاز $l$ در دوره $t$	$costdis_{lt}$
هزینه بازیافت قطعه نوع $p$ در مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	$costrev_{rpt}$
هزینه واحد تولید کننده $j$ در دوره $t$	$cost_{jt}^2$
هزینه خرید مواد اولیه نوع $m$ از بازار $ma$ در دوره $t$	$b \text{ cost}_{maimt}^1$
هزینه نگهداری موجودی در انبار توزیع کننده $k$ در دوره $t$	$h_{kt}$
آلودگی ناشی از زباله شیمیایی تولید شده به ازای هر قطعه نوع $p$ به وسیله تامین کننده $i$ در دوره $t$	$CC_{ipt}$
آلودگی ناشی از فاضلاب و پساب تولید شده به ازای هر قطعه نوع $p$ به وسیله تامین کننده $i$ در دوره $t$	$WW_{ipt}$
آلودگی ناشی از تولید ضایعات جامد به ازای تولید هر قطعه نوع $p$ به وسیله تامین کننده $i$ در دوره $t$	$SW_{ipt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعه نوع $p$ به وسیله تامین کننده $i$ به تولید کننده $j$ در دوره $t$	$AEX_{ijpt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از تولید کننده $j$ به توزیع کننده $k$ در دوره $t$	$AEY_{jkt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از توزیع کننده $k$ به محل مشتری $c$ در دوره $t$	$AEY'_{kct}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از مشتری $c$ به مرکز جمع‌آوری $g$ در دوره $t$	$AEY''_{cgt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از مرکز جمع‌آوری $g$ به مرکز دمونتاز $l$ در دوره $t$	$AEYY'_{glt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعات بازیافتی نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$ به تولید کننده $j$ در دوره $t$	$AEXX'_{lrept}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعات بازیافتی نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$ به مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	$AEYY_{lrpt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعات دورریز نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$ به مرکز دفع $re$ در دوره $t$	$AEY'''_{ljpt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال مواد دورریز نوع $m$ از مرکز بازیافت $r$ به مرکز دفع $re$ در دوره $t$	$AEXX''_{rremt}$

## پارامترها:

پارامترهای مدل در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲). پارامترهای ارائه شده در مدل

هزینه واحد انتقال مواد اولیه نوع $m$ از بازار $ma$ در دوره $t$	$ship_{maimt}^1$
هزینه واحد انتقال قطعه نوع $p$ از تامین کننده $i$ به تولید کننده $j$ در دوره $t$	$ship_{ijpt}^2$
هزینه واحد جابجایی محصول از تولید کننده $j$ به توزیع کننده $k$ در دوره $t$	$ship_{jkt}^3$
هزینه واحد جابجایی محصول از توزیع کننده $k$ به مشتری $c$ در دوره $t$	$ship_{kct}^4$
هزینه واحد انتقال محصول از مشتری $c$ به مرکز جمع‌آوری $g$ در دوره $t$	$ship_{cgt}^5$
هزینه واحد انتقال محصول از مرکز جمع‌آوری $g$ به مرکز دمونتاز $l$ در دوره $t$	$ship_{glt}^6$
هزینه واحد انتقال قطعات مشابه نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$ به تولید کننده $j$ در دوره $t$	$ship_{ljpt}^7$
هزینه جابجایی قطعات بازیافتی نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$ به مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	$ship_{lrpt}^8$
هزینه انتقال قطعات ضایعاتی نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$ به مرکز دفع و انهدام $re$ در دوره $t$	$ship_{lrept}^9$
هزینه انتقال مواد بازیافت شده نوع $m$ از مرکز بازیافت $r$ به تامین کننده $i$ در دوره $t$	$ship_{rimt}^{10}$
هزینه انتقال مواد ضایعاتی نوع $m$ از مرکز بازیافت $r$ به مرکز دفع و انهدام $re$ در دوره $t$	$ship_{rremt}^{11}$
متوسط قیمت خرید قطعات نوع $p$ از تامین کنندگان در دوره $t$	$income_{pt}$
قیمت قطعه نوع $p$ از تامین کننده $i$ در دوره $t$	$price_{ipt}$
هزینه نگهداری قطعه نوع $p$ تولید کننده $j$ در دوره $t$	$inv_{jpt}$
هزینه ثابت تامین محصول از تامین کننده $i$ در دوره $t$	$Fcost_{it}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری $g$ در دوره $t$	$setg_{gt}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز دمونتاز $l$ در دوره $t$	$setdis_{lt}$

متغیر صفرویک. اگر مرکز دمونتاز I در دوره t انتخاب شود، یک و در غیر آن صفر است.	$dis_{it}$
متغیر صفرویک. اگر مرکز بازبافت r در دوره t انتخاب شود، یک و در غیر آن صفر است.	$rev_{rt}$
متغیر صفرویک. اگر مرکز دفع و انهدام re در دوره t انتخاب شود، یک و در غیر آن صفر است.	$btl_{ret}$
متغیر عدد صحیح. میزان مواد خریداری شده نوع m از بازار ma به تأمین کننده i در دوره t	$z_{mait}$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات خریداری شده نوع p از تأمین کننده i به تولید کننده j در دوره t	$x_{ijpt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات انتقال یافته از تولید کننده j به توزیع کننده k در دوره t	$y_{jkt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات انتقال یافته از توزیع کننده k به محل مشتری c در دوره t	$y'_{kct}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات استفاده شده از محل مشتری c به مرکز جمع آوری g در دوره t انتقال می‌یابد.	$y''_{cgt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات استفاده شده از مرکز جمع آوری g به مرکز دمونتاز I در دوره t انتقال می‌یابد.	$yy'_{glt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات نوع p از مرکز دمونتاز I به تولید کننده j در دوره t انتقال می‌یابد.	$yljpt'''$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات بازبافتی نوع p که از مرکز دمونتاز I به مرکز بازبافت r در دوره t انتقال می‌یابد.	$yy_{lrpt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات دورریز نوع p از مرکز دمونتاز I به مرکز دفع re در دوره t انتقال می‌یابد.	$xx'_{lrept}$
متغیر عدد صحیح. میزان مواد دورریز نوع m از مرکز بازبافت r به مرکز دفع re در دوره t انتقال می‌یابد.	$xx''_{remt}$
متغیر عدد صحیح. میزان مواد بازبافتی نوع m که از مرکز بازبافت r به تأمین کننده i در دوره t انتقال می‌یابد.	$z'_{rimt}$
موجودی محصول در انبار توزیع کننده k در دوره t	$inv'_{kt}$

واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال مواد بازبافتی نوع m که از مرکز بازبافت r به تأمین کننده i در دوره t	$AEZ'_{rimt}$
واحد مصرف انرژی در حین انتقال مواد نوع m از بازار ma به تأمین کننده i در دوره t	$ec_{mait}$
میزان مصرف منابع تجدید ناپذیر در حین تولید قطعه نوع p به وسیله تأمین کننده i در دوره t	$NC_{ipt}$
تقاضای فازی محصول در دوره t	$\widetilde{dem}_t$
تعداد واحد مورد نیاز از قطعه نوع p در دوره t	$req_p$
تعداد مورد نیاز واحد قطعه (مشابه نو) نوع p در محصول	$req'_p$
درصد (جمع‌آوری/ برگشت از مشتری) محصول در دوره t	$Q_t$
درصد بازبافت قطعه نوع p در مرکز بازبافت r در دوره t	$Q'_{ptr}$
حداکثر ظرفیت فازی در دسترس قطعه نوع p ارائه شده به وسیله تأمین کننده i در دوره t	$\sup\max_{ipt}$
حداقل مقدار خرید قطعه نوع p از تأمین کننده i در دوره t	$\sup\min_{ipt}$
حداکثر درصد قطعه قابل استفاده مجدد نوع p در دوره t	$reuse_{pt}$
ظرفیت محصول تولید کننده j در دوره t	$C^1_{jt}$
ظرفیت محصول توزیع کننده k در دوره t	$C^2_{kt}$
ظرفیت محصول استفاده شده مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$C^4_{gt}$
ظرفیت قطعه مشابه نو نوع p مرکز دمونتاز I در دوره t	$C^5_{plt}$
ظرفیت مواد بازبافتی نوع m مرکز بازبافت r در دوره t	$C^6_{rmt}$
ظرفیت مرکز دفع و انهدام در دوره t	$C^7_{ret}$
بودجه تأمین در دوره t	$B_t$

### متغیرهای تصمیم:

متغیرهای تصمیم مدل در جدول (۳) ارائه شده است.

### جدول (۳). پارامترهای ارائه شده در مدل

متغیر صفرویک. اگر تأمین کننده i در دوره t انتخاب شود، یک و در غیر آن صفر است.	$S_{it}$
متغیر صفرویک. اگر مرکز جمع‌آوری g در دوره t انتخاب شود، یک و در غیر آن صفر است.	$ga_{gt}$

توابع هدف:

هدف اول: هزینه کل با توجه به رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \text{Min F(1): } & \sum_k \sum_c \sum_t \text{ship}_{kct}^4 y'_{kct} + \sum_j \sum_k \sum_t (\text{cost}_{jt}^2 + \text{ship}_{jkt}^3) y_{jkt} + \quad \text{رابطه (۱)} \\ & \sum_{ma} \sum_i \sum_m \sum_t (\text{bcost}_{maimt}^1 + \text{ship}_{maimt}^1) z_{maimt} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t (\text{price}_{ipt} + \text{ship}_{ijpt}^2 + \text{inv}_{jpt}) x_{ijpt} + \sum_i \sum_t F \text{cost}_{it} S_{it} \\ & \sum_t \sum_g \text{setg}_{gt} ga_{gt} + \sum_c \sum_g \sum_t \text{ship}_{cgt}^5 y''_{cgt} + \sum_t \sum_l \text{setdis}_{lt} dis_{lt} + \\ & \sum_t \sum_r \text{setrev}_{rt} rev_{rt} + \sum_t \sum_{re} \text{setrebutt}_{ret} btl_{ret} \\ & \sum_g \sum_l \sum_t (\text{costdis}_{lt} + \text{ship}_{glt}^6) yy'_{gt} + \sum_l \sum_j \sum_p \sum_t \text{ship}_{ljpt}^7 y'''_{ljpt} + \\ & \sum_l \sum_r \sum_p \sum_t (\text{costrev}_{rpt} + \text{ship}_{lrpt}^8) yy_{lrpt} + \\ & \sum_l \sum_{re} \sum_p \sum_t \text{ship}_{lrpt}^9 xx'_{lrpt} + \\ & \sum_r \sum_i \sum_m \sum_t \text{ship}_{rimt}^{10} z'_{rimt} + \\ & \sum_r \sum_{re} \sum_m \sum_t \text{ship}_{rremt}^{11} xx''_{rremt} + \sum_k \sum_t \text{inv}'_{kt} h_{kt} \end{aligned}$$

هدف دوم: سود حاصل از محصولات بازیافتی در رابطه (۲) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} & \sum_t \sum_g \sum_l yy'_{gt} AEYY'_{gt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_{re} \sum_p xx'_{lrpt} AEXX'_{lrpt} + \\ & \sum_t \sum_l \sum_j \sum_p y'''_{ljpt} AEY'''_{ljpt} + \\ & \sum_t \sum_r \sum_{re} \sum_m xx''_{rremt} AEXX''_{rremt} + \\ & \sum_t \sum_r \sum_i \sum_m z'_{rimt} AEZ'_{rimt} \end{aligned}$$

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} \text{Max} & \sum_l \sum_j \sum_p \sum_t \text{income}_{pt} yy'''_{ljpt} + \\ \text{F(2)} & \sum_l \sum_r \sum_p \sum_t \text{income}_{pt} yy_{lrpt} \end{aligned}$$

محدودیت‌ها: در روابط (۴) تا (۲۲) ارائه شده است.

هدف سوم: افزایش صرفه جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و اثرات زیست محیطی در رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\sum_k y'_{kct} \geq \widetilde{dem}_{t,c} \quad \forall t, c \quad \text{رابطه (۴)}$$

رابطه (۳) Max F(3):

$$\sum_{ma} \sum_m z_{maimt} + \sum_r \sum_m z'_{rimt} = \sum_p \sum_j x_{ijpt} \quad \forall t, i \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_k req_p y_{jkt} = \sum_i x_{ijpt} + \sum_l y'''_{ljpt} \quad \forall t, p, j \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_j y_{jkt} = \sum_c y'_{kct} + \sum_j \text{inv}'_{jt} \quad \forall t, k \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_g y''_{cgt} = \sum_k Q_t y'_{kct} \quad \forall t, c \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\begin{aligned} & \sum_t \sum_p \sum_i (\sum_j x_{ijpt}) CC_{ipt} + \\ & \sum_t \sum_p \sum_i (\sum_j x_{ijpt}) WW_{ipt} + \\ & \sum_t \sum_p \sum_i (\sum_j x_{ijpt}) SW_{ipt} + \\ & \sum_t \sum_p \sum_i \sum_j x_{ijpt} AEX_{ijpt} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k y_{jkt} AEY_{jkt} + \\ & \sum_t \sum_{ma} \sum_i \sum_m ec_{maimt} z_{maimt} + \\ & \sum_t \sum_i \sum_j (\sum_p x_{ijpt}) NC_{ipt} + \\ & \sum_k \sum_c \sum_t y'_{kct} AEY'_{kct} + \\ & \sum_t \sum_c \sum_g y''_{cgt} AEY''_{cgt} + \end{aligned}$$



$\sum_c y'_{kct} \leq C_{kt}^2 \quad \forall k, t \quad \text{رابطه (۱۶)}$	$\sum_n \sum_g req'_p y'_{glt} = \sum_j y'''_{ljpt} + \sum_r y y_{lrpt} + \sum_{re} xx'_{lrept} \quad \forall p, l, t \quad \text{رابطه (۹)}$
$\sum_g y''_{cgt} \leq C_{ct}^3 \quad \forall c, t \quad \text{رابطه (۱۷)}$	$\sum_{p,l} Q'_{ptr} y y_{lrpt} = \sum_m (z'_{rimt} + \sum_{re} xx''_{rremt}) \quad \forall r, t \quad \text{رابطه (۱۰)}$
$\sum_l y y'_{glt} \leq C_{gt}^4 g a_{gt} \quad \forall g, t \quad \text{رابطه (۱۸)}$	$\sum_j x_{ijpt} \leq \overline{supmax}_{ipt} S_{it} \quad \forall p, i, t \quad \text{رابطه (۱۱)}$
$\sum_j y y'''_{ljpt} + \sum_r y y_{lrpt} + \sum_{re} xx'_{lrept} \leq C_{pt}^5 dis_{it} \quad \forall p, l, t \quad \text{رابطه (۱۹)}$	$\sum_j x_{ijpt} \geq \underline{supmin}_{ipt} S_{it} \quad \forall p, i, t \quad \text{رابطه (۱۲)}$
$\sum_i z_{rint} + \sum_{re} xx''_{rremt} \leq C_{rmt}^6 rev_{it} \quad \forall g, t \quad \text{رابطه (۲۰)}$	$\sum_j y y'''_{ljpt} \leq \sum_g reuse_{pt} y y'_{glt} \quad \forall p, l, t \quad \text{رابطه (۱۳)}$
$\sum_i \sum_j \sum_p (price_{ipt} + ship^2_{ijt}) x_{ijpt} + \sum_i Fcost_{it} S_{it} \leq B_t \quad \text{رابطه (۲۱)}$	$\sum_r y y_{lrpt} + \sum_{re} xx'_{lrept} \leq \sum_g (1 - reuse_{pt}) y y'_{glt} \quad \forall p, l, t \quad \text{رابطه (۱۴)}$
$\sum_l \sum_p xx'_{lrept} + \sum_r \sum_m xx''_{rremt} \leq btl_{ret} * C_{ret}^7 \quad \text{رابطه (۲۲)}$	$\sum_k y_{jkt} \leq C_{jt}^1 \quad \forall j, t \quad \text{رابطه (۱۵)}$

تابع هدف (۲) میزان صرفه جویی (سود) حاصل از استفاده قطعات مشابه نو و بازیافتی از مراکز دمونتاز و مراکز بازیافت به تولیدکنندگان است.

تابع هدف (۳) جهت افزایش صرفه جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و اثرات زیست محیطی که شامل میزان آلودگی ناشی از زباله‌های شیمیایی تولید شده در بخش تولید، آلودگی ناشی از فاضلاب و پساب تولید شده در بخش تأمین کنندگان، مجموع آلودگی ناشی از ضایعات جامد شامل مواد سمی تولید شده در حین تولید تأمین کننده، مجموع آلودگی هوا از تأمین کننده به تولید کننده، مجموع آلودگی هوا از تولید کننده به مرکز توزیع، مجموع مصرف انرژی مواد خریداری شده در انتقال از بازار به تأمین کننده، مجموع مصرف منابع تجدید ناپذیر در محل تأمین کننده، مجموع آلودگی هوا از توزیع کننده به مشتری، مجموع آلودگی هوا از مشتری به مراکز جمع آوری، مجموع آلودگی هوا از مراکز جمع آوری به مراکز دمونتاز، مجموع آلودگی هوا از مراکز دمونتاز به مراکز دفع، مجموع آلودگی هوا از مراکز دمونتاز به مراکز بازیافت، مجموع آلودگی هوا از مراکز دمونتاز به تولید کننده، مجموع آلودگی هوا از مراکز بازیافت به مراکز دفع، مجموع آلودگی هوا از مراکز بازیافت به تأمین کننده است.

محدودیت (۴) برآوردن تقاضا: در هر دوره، تعداد محصولات انتقال یافته از همه توزیع کننده‌ها به مشتری c از تقاضای آن مشتری در

تابع هدف (۱) جهت حداقل کردن هزینه کل که شامل مجموع هزینه جابجایی محصولات ارسالی از توزیع کنندگان به مشتریان در تمام دوره‌ها، مجموع هزینه تولید و جابجایی محصولات ارسالی از تولیدکنندگان به توزیع کنندگان در تمام دوره‌ها، مجموع هزینه خرید مواد اولیه از بازارها بعلاوه هزینه انتقال این مواد در تمام دوره‌ها، مجموع هزینه خرید و حمل قطعات از تأمین کنندگان به تولیدکنندگان و هزینه نگهداری قطعات در مراکز تولید، مجموع هزینه‌های ثابت تأمین کنندگان در صورتی که انتخاب گردند، مجموع هزینه راه اندازی مراکز جمع‌آوری (در صورت راه اندازی مراکز) بعلاوه هزینه ارسال محصولات از مشتریان به مراکز جمع‌آوری، مجموع هزینه راه اندازی مراکز دمونتاز و مراکز بازیافت، مجموع هزینه راه اندازی مرکز دفع و انهدام، مجموع هزینه دمونتاز و حمل محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به مراکز دمونتاز، مجموع هزینه قطعات مشابه نو از مراکز دمونتاز به تولیدکنندگان، مجموع هزینه قطعات مشابه نو از مراکز دمونتاز به تولیدکنندگان، مجموع هزینه بازیافت و انتقال قطعات بازیافتی از مرکز دمونتاز به مرکز بازیافت، مجموع هزینه حمل قطعات دورریز از مرکز مونتاز به مرکز دفع، مجموع هزینه حمل مواد بازیافتی از مرکز بازیافت به تأمین کننده، مجموع هزینه انتقال مواد دورریز از مرکز بازیافت به مراکز دفع و انهدام، مجموع هزینه نگهداری کالا در انبار توزیع کننده است.

آن دوره بیشتر باشد (تقاضای مشتریان به صورت عدد فازی مثلثی در نظر می‌گیریم)

محدودیت (۵) توازن جریان در تامین کننده: مقدار جریان مواد ورودی به تامین کننده شامل مواد اولیه  $m$  از بازارهای مواد اولیه  $ma$  و مواد بازیافتی از مراکز بازیافت  $r$  برابر است با مقدار جریان قطعات خروجی  $p$  از تامین کننده  $i$  به تولید کننده  $j$ .

محدودیت (۶) توازن جریان در مراکز تولید/ مونتاژ در هر دوره و برای هر قطعه و هر تولید کننده: تعداد قطعات نوع  $p$  مورد استفاده برای محصولات ارسالی از تولید کننده  $j$  به توزیع کننده‌ها برابر است با تعداد قطعه نوع  $p$  خریداری شده توسط تولید کننده  $j$  از تامین کنندگان بعلاوه مراکز مونتاژ

محدودیت (۷) توازن جریان محصولات در مراکز توزیع در هر دوره: تعداد محصول انتقال یافته از تمام تولید کنندگان به توزیع کننده  $k$  برابر است با تعداد محصول انتقال یافته از توزیع کننده  $k$  به تمام مشتریان به علاوه موجودی محصول در انبار تولید کنندگان.

محدودیت (۸) توازن جریان محصولات در مراکز مشتری: تعداد محصولات ارسالی از مشتری  $c$  به تمام مراکز جمع‌آوری برابر است با درصد جمع‌آوری/ برگشت از مشتری محصول ضربدر تعداد محصولات انتقال یافته از تمام توزیع کنندگان به مشتری  $c$

محدودیت (۹) توازن جریان محصولات در مراکز مونتاژ در هر دوره: تعداد قطعات نوع  $p$  که محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به مرکز مونتاژ  $i$  دارند برابر است با تعداد قطعات نوع  $p$  ارسالی از مرکز مونتاژ  $i$  به تمام تولید کنندگان، مرکز بازیافت و مرکز دفع

محدودیت (۱۰) توازن جریان محصولات در مراکز بازیافت: تعداد قطعات بازیافتی ارسال از مراکز مونتاژ به مرکز بازیافت  $r$  برابر است با تعداد قطعات بازیافتی ارسالی از مرکز بازیافت  $r$  به مراکز بازیافت بعلاوه مراکز تولید.

محدودیت (۱۱) ظرفیت تامین کننده (قطعات خریداری شده): تعداد قطعه نوع  $p$  خریداری شده توسط تولید کنندگان از تامین کننده  $i$  باید کمتر از حداکثر ظرفیت در دسترس قطعه نوع  $p$  توسط تامین کننده  $i$  باشد (در صورتی که آن تامین کننده انتخاب شود) اگر تامین کننده انتخاب نشود مجاز به خریداری از آن تامین کننده نیستیم. (در این محدودیت، حداکثر ظرفیت در دسترس قطعه را فازی در نظر می‌گیریم)

محدودیت (۱۲) حداقل خرید از هر تامین کننده: تعداد قطعه نوع  $p$  خریداری شده توسط تولید کنندگان از تامین کننده  $i$  باید بیشتر از حداقل مقدار مجاز خرید قطعه نوع  $p$  از تامین کننده  $i$  باشد (در

صورتی که آن تامین کننده انتخاب شود) اگر تامین کننده انتخاب نشود این محدودیت زائد می‌گردد.

محدودیت (۱۳) درصد قابل استفاده مجدد در مونتاژ: تعداد قطعه نوع  $P$  ارسالی از مرکز مونتاژ  $i$  به تولید کنندگان برابر است با حداکثر درصد قطعه قابل استفاده مجدد نوع  $p$  از تعداد محصول ارسالی از مراکز جمع‌آوری  $i$  به مرکز مونتاژ  $i$

محدودیت (۱۴) درصد قطعات بازیافتی و دورریز در مونتاژ: مجموع قطعات بازیافتی نوع  $p$  ارسالی از مرکز مونتاژ  $i$  به مراکز بازیافت و مراکز دفع کمتر یا مساوی تعداد محصول ارسالی (درصد قطعه غیر قابل استفاده مجدد) از مراکز جمع‌آوری  $i$  به مرکز مونتاژ  $i$

محدودیت (۱۵) ظرفیت تولید کننده: تعداد محصولات ارسالی از تولید کننده  $j$  به تمام توزیع کنندگان باید از ظرفیت تولید کننده  $j$  در دوره  $t$  کمتر باشد.

محدودیت (۱۶) ظرفیت توزیع کننده: تعداد محصولات ارسالی از توزیع کننده  $k$  به تمام مشتریان باید از ظرفیت توزیع کننده  $k$  در دوره  $t$  کمتر باشد.

محدودیت (۱۷) ظرفیت مشتری در هر دوره و بازای هر مشتری: تعداد محصول ارسالی از مشتری  $c$  به مراکز جمع‌آوری باید از حداکثر ظرفیت محصول مشتری  $c$  کمتر باشد.

محدودیت (۱۸) ظرفیت مرکز جمع‌آوری در هر دوره و بازای هر مرکز جمع‌آوری: تعداد محصولات ارسال شده از مرکز جمع‌آوری  $g$  به مراکز مونتاژ باید از ظرفیت مرکز جمع‌آوری کمتر باشد.

محدودیت (۱۹) ظرفیت مونتاژ: مجموع تعداد قطعات نوع  $p$  از مرکز مونتاژ  $i$  به تولید کنندگان و مراکز بازیافت و مراکز دفع باید از ظرفیت قطعه نوع  $p$  مرکز مونتاژ  $i$  کمتر باشد (در صورت راه اندازی مرکز مونتاژ  $i$ ).

محدودیت (۲۰) ظرفیت بازیافت: مجموع میزان مواد بازیافتی از مرکز بازیافت  $r$  به تامین کنندگان بعلاوه میزان مواد دورریز نوع  $m$  ارسالی از مرکز بازیافت  $r$  به مراکز دفع باید از ظرفیت مواد بازیافتی نوع  $m$  مرکز بازیافت  $r$  کمتر باشد (در صورت راه اندازی مرکز بازیافت  $r$ ).

محدودیت (۲۱) بودجه تامین: مجموع قیمت قطعات خریداری شده از تامین کنندگان بعلاوه هزینه انتقال قطعات از تامین کنندگان به تولید کنندگان بعلاوه هزینه ثابت تامین از تامین کنندگان باید از بودجه تامین در دوره کمتر باشد.

محدودیت (۲۲) محدودیت ظرفیت مراکز دفع: میزان تعداد کل قطعات دورریز از مراکز مونتاژ و میزان کل مواد دورریز از مراکز بازیافت  $r$  باید از ظرفیت مرکز دفع  $re$  کمتر باشد.

قطعیت پارامتر تقاضا و پارامتر حداکثر ظرفیت قطعه ارائه شده توسط تأمین کننده استفاده می‌شود. برای این منظور از مفاهیم ریاضی مانند مقادیر انتظاری یک عدد فازی استفاده می‌شود و سطح اطمینان از ارضای محدودیت‌ها توسط تصمیم گیرنده تعیین می‌گردد.

مدل برنامه‌ریزی فازی مثلثی به صورت رابطه (۲۳) نشان داده می‌شود:

$$\sum_j x_{ijpt} \text{ رابطه (۲۶)}$$

$$\leq [(1 - \beta) \sup \max_{ipt}^{(2)} + \beta * \sup \max_{ipt}^{(1)}] S_{it} \quad \forall p, i, t$$

#### ۵- الگوریتم های حل

در این قسمت مدل ارائه شده در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ با بهره گیری از الگوریتم TH برای ابعاد کوچک و الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) و الگوریتم انبوه ذرات (MOPSO) برای ابعاد متوسط و بزرگ مدل را حل می‌کنیم.

#### ۵-۱- الگوریتم ترابی و حسینی (TH)

گام اول: تعیین جواب ایده‌آل مثبت (PIS) و جواب ایده‌آل منفی (NIS) برای هر یک از توابع هدف.

گام دوم: تخمین یک تابع عضویت فازی خطی برای هر یک از توابع هدف،

گام سوم: تبدیل مدل خطی عدد صحیح قطعی چند هدفه به مدل تک هدفه به کمک تابع ادغام‌سازی پیشنهادی توسط ترابی و حسینی (۲۰۰۸)

گام چهارم: حل مدل تک هدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و توقف حل در صورت رضایت و در غیر این صورت، تغییر مقادیر پارامتر  $\gamma$  و برگشتن به گام دوم [۴۱].

#### ۵-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در واقع شناخته شده ترین نوع از الگوریتم های تکاملی است که طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ توسط جان هلند و همکارانش ابداع و گسترش یافت. ایده محاسبات تکاملی در دهه ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ در کتابی با عنوان استراتژیهای تکامل معرفی شد. [۴۲] در ادامه مراحل پیاده سازی الگوریتم در این مساله در گام‌های مختلف تشریح می‌گردد.

#### ۴-۱- عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و ظرفیت تأمین کننده

شرایط واقعی، ماهیت پیچیده و فضای رقابتی زنجیره تأمین سبب افزایش عدم قطعیت بسیاری از پارامترهای زنجیره می‌شود که در اکثر مواقع، با کمبود اطلاعات و یا در دسترس نبودن اطلاعات کمی در مورد پارامترها مواجه می‌شویم. در این مطالعه، عدم قطعیت از نوع فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. این روش برای برخورد با عدم

$$\text{رابطه (۲۳)} \quad \begin{aligned} \text{Min } Z \\ = Cx + Fy, s. t. \end{aligned}$$

$$By \leq Ay,$$

$$\text{Nec}\{Tx \leq \bar{S}y, \} \geq \beta,$$

$$\text{Nec}\{Kx \leq \bar{S}\} \geq \alpha,$$

$$y \in \{0,1\}. x \geq 0.$$

مدل قطعی

معادل مدل رابطه

(۲۳) در رابطه

(۲۴) نشان داده شده است [۴۰]

$$\text{رابطه (۲۴)} \quad \text{Min } Z = Cx + Fy, s. t.$$

$$By \leq Ay,$$

$$Tx \leq \left( (1 - \beta)s^{(2)} + \beta s^{(1)} \right) y,$$

$$Kx \geq (1 - \alpha)d^{(2)} + \alpha s^{(3)}$$

$$Ex \geq Uy,$$

$$y \in \{0,1\}. x \geq 0.$$

با توجه به موارد گفته شده معادل قطعی دو محدودیت فازی به شکل زیر خواهد بود:

معادل قطعی محدودیت تقاضا:

$$\text{رابطه (۲۵)} \quad \begin{aligned} \sum_k y'_{kct} \geq (1 - \alpha) dem_{ct}^{(2)} \\ + \alpha dem_{ct}^{(3)} \quad \forall t, c \end{aligned}$$

معادل قطعی محدودیت ظرفیت تأمین کننده:

برای روش حل الگوریتم MOPSO از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$v_i(t) = w * v_1(t-1) + c_1 * rand_1 * (P_{i,best} - x_i)(t-1) + c_2 * rand_2 * (P_{i,best} - x_i)(t-1)$$

$$x_i = x_i(t-1) + v_i(t)$$

گام اول: ابتدا nvar را برابر تعداد متغیرهای مدل خود قرار می‌دهیم.

گام دوم: حد بالا و پایین Lb و Ub را به صورت زیر نشان می‌دهیم.

$$Lb.x = -10.one(1, nvar);$$

$$Ub.x = 10.one(1, nvar);$$

گام سوم: حد بالا و پایین سرعت را می‌بایم تنظیم شده با تاگوچی

$$Lb.x = -0.15$$

$$Ub.x = 0.15$$

گام چهارم: پارامترهای اصلی مسئله را تنظیم می‌کنیم.

W: وزن یا اهمیت جابه جایی فعلی در این مدل بر روی عدد یک تنظیم شده است.

W\_RF: مزیت کاهنده (تنظیم شده با تاگوچی بر روی 0.99) انتخاب شده است.

C1: بهترین تجربه شخصی (C1=2 تنظیم شده است)

C2: وزن و اهمیت تجربه کل گروه (C2=2 تنظیم شده است)

Npar: تعداد ذرات معلق (پرنده) (بر روی ۱۰۰ تنظیم شده است)

Maxit: تعداد تکرار بر روی ۵۰۰ تنظیم گردیده است.

گام پنجم: جمعیت اولیه را تولید می‌کنیم.

گام ششم: شرط خاتمه در الگوریتم MOPSO شرط همگرایی یا همان حداکثر تکرار در نظر گرفته شده است.

## ۶- نتایج محاسبات

از آنجایی که مدل پیشنهادی جدید بوده، طبق تحقیقات صورت گرفته، مسائل نمونه معیاری برای مسأله مطرح شده وجود ندارد. در این قسمت به منظور اثبات کارآمدی الگوریتم‌های پیشنهادی، دو نمونه مسائل در ابعاد کوچک و دیگری در ابعاد بزرگ طراحی شده است. در نمونه اول دسته‌ای از مسائل نمونه کوچک به وسیله الگوریتم‌های پیشنهادی حل شده و جواب‌های حاصل با نتایج بدست آمده از روش TH با قید زمانی ۳۶۰۰ ثانیه مقایسه شد و در نمونه دوم عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در مسائل بزرگ بررسی می‌گردد.

گام اول: ابتدا با تعریف توابع شایستگی مرتبط با مدل مورد نظر تابع شایستگی را به فرمت @fitnessfun.m به صورت m فایل ذخیره می‌نمایم.

گام دوم: تعداد متغیرها: اندازه بردار ورودی به تابع شایستگی را مشخص می‌کنیم.

گام سوم: برای تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی و به صورت کد گذاری مقداری بر روی ۵۰۰ با نرخ تقاطع ۰/۷ و نرخ جهش ۰/۱۵ که با استفاده از آزمایشات تاگوچی تنظیم نموده ایم عمل می‌کنیم.

گام چهارم: انتخاب عملگر (انتخاب والدین) از مقادیر تولید شده برای هر کروموزوم توسط عملگر fitness در مرحله قبل استفاده کرده و از میان جمعیت فعلی، کروموزوم‌هایی را برای ترکیب شدن انتخاب می‌کند. تعداد جمعیت selection برابر تعداد جمعیت اصلی انتخاب می‌شود که با استفاده از روش tournament تنظیم گردیده است بدین ترتیب کد کروموزوم بهتر در مسابقه انتخاب می‌گردد.

گام پنجم: ادغام یا ترکیب (crossover) به امید دستیابی به کروموزوم بهتر فرزندان حاصل از ترکیب کروموزوم پدر با استفاده از روش ادغام دو نقطه‌ای بر روی نرخ تقاطع ۰/۷، کروموزوم فرزند تولید شده است.

گام ششم: جهش (mutation) با توجه به ماهیت ساختن کروموزوم‌های نامتعارف عملگر جهش را بر روی اعداد پایین تنظیم و نرخ جهش ۰/۱۵ که از آزمایشات تاگوچی بدست می‌آید، کروموزوم فرزند را تولید می‌نمایم.

گام هفتم: شرط خاتمه الگوریتم ترکیبی از موارد زیر می‌باشد

- به تعداد ثابتی از نسل‌ها برسیم (نسل هیچ پیشرفتی در کیفیت نداشته باشد)

- بودجه تمام شود (زمان یا پول)

- یک فرزند بهینه تولید شود.

- یک راه حل راضی کننده بدست آید.

- تعداد تولید نسل یا زمان آن از قبل پیش بینی شود.

## ۵-۳- الگوریتم انبوه ذرات

الگوریتم انبوه ذرات یک الگوریتم تکاملی جهت بهینه سازی توابع غیرخطی است که بر مبنای رفتار اجتماعی پرندگان ارائه شده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات مطرح شد که بر گرفته از رفتار ذرات هجومی همچون دسته کلاغ‌ها بوده است. [۴۳] در ادامه مراحل پیاده سازی الگوریتم در این مساله در گام‌های مختلف تشریح می‌گردد.

### ۶-۱- بررسی الگوریتم ارائه شده در مسائل نمونه کوچک

مقایسه شد که این نتایج در جداول (۴) و (۵) نشان داده شده است. جدول (۴) و (۵) بررسی زمان حل مسائل در روش دقیق با روش‌های فرا ابتکاری پیشنهادی نشان از افزایش بسیار زیاد زمان حل در روش دقیق داشته و در مقابل، زمان لازم برای حل مسئله به روش NSGA-II و MOPSO با افزایش خطی در حل مسائل مواجهه است. به طور متوسط زمان حل مسائل توسط روش دقیق برابر با ۵۳۸/۳۲ ثانیه است، در حالی که این مقدار برای روش‌های فرا ابتکاری ژنتیک ۱۵۷/۵۹ و اجتماع ذرات ۱۴۳/۱۹ ثانیه است. که این امر نشان از عملکرد مناسب الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی دارد.

در این قسمت به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی، ۱۲ مسئله نمونه در ابعاد کوچک تولید شد. ابعاد مسائل با  $M \times I \times J \times C$  نشان داده شده است که M تعداد بازار مواد، I تعداد تأمین کننده، J تعداد تولید کننده و C مراکز مشتری می‌باشد. نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها که بهترین مقدار از ۵ بار اجرای هر الگوریتم می‌باشد با نتایج حاصل از روش دقیق با قید زمانی ۳۶۰۰ ثانیه

جدول (۴). مقایسه نتایج محاسباتی روش‌های TH و الگوریتم NSGA-II برای حل مسائل با ابعاد کوچک

مساله °	ابعاد مسئله $M \times I \times J \times C$	روش TH				الگوریتم NSGA-II			
		هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	زمان حل	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	زمان حل
۱	۲×۳×۳×۲	۲۲۹۷۱۴۱۰	۴۹۴۰۰۲۰۵۹	۱۳۹۱۸۶۸۰	۰٫۶۴۰	۲۲۴۲۰۰۹۶٫۲	۵۳۲۵۳۴٫۷۹	۱۵۰۰۴۳۳۷٫۰۴	۰٫۱۸۷۳۶۶۴
۲	۲×۴×۴×۳	۲۷۳۳۸۶۹۰	۱۷۳۹۵۷۳۸	۱۶۳۶۶۷۲۰	۰٫۸۴۱	۲۶۶۸۲۵۶۱٫۴	۱۸۷۵۲۶۰٫۵۶	۱۷۶۴۳۳۲۴٫۱۶	۰٫۲۴۶۲۱۱۱۶
۳	۳×۴×۴×۴	۶۴۳۶۴۳۲۰	۳۹۲۷۳۰۲٫۷۳	۳۹۶۱۱۶۳۰	۱٫۶۵۵	۶۲۸۱۹۵۷۶٫۳	۴۲۳۳۶۳۲٫۳۴	۴۲۷۰۱۳۳۷٫۱۴	۰٫۴۸۴۵۱۷۸
۴	۴×۵×۴×۵	۴۴۵۰۶۲۵۰	۲۰۳۷۶۹۷٫۲۹	۲۹۶۶۴۱۱۰	۲٫۳۰۹	۴۳۴۳۸۱۰۰	۲۱۹۶۶۳۷٫۶۸	۳۱۹۷۷۹۱۰٫۵۸	۰٫۶۷۵۹۸۲۸۴
۵	۵×۵×۵×۶	۹۶۵۵۸۱۰۰	۴۸۰۷۱۹۳٫۸۸	۶۲۵۶۱۹۸۰	۶٫۲۴۱	۹۴۲۴۰۷۰۵۶	۵۱۸۲۱۵۵۰٫۱	۶۷۴۴۱۸۱۴٫۴۴	۱٫۸۲۷۱۱۵۱۶
۶	۶×۷×۶×۸	۱۲۴۹۴۸۸۰۰	۱۲۳۱۷۱۶۰	۷۳۲۹۲۴۷۰	۱۲٫۹۶۸	۱۲۱۹۵۰۰۲۸٫۸	۱۳۲۷۷۸۹۸٫۴۸	۷۹۰۰۹۲۸۲٫۶۶	۳٫۷۹۰۶۵۴۸
۷	۸×۸×۸×۹	۱۵۲۷۶۷۴۰۰	۲۲۷۱۴۷۰۰	۹۹۱۵۱۵۱۰	۱۹٫۰۹۴	۱۴۹۱۰۰۹۸۲٫۴	۲۴۴۸۶۴۴۶٫۶	۱۰۶۸۸۵۳۲۷٫۸	۵٫۵۸۹۹۵۹۴۴
۸	۱۰×۹×۹×۱۰	۳۶۸۰۵۰۱۰۰	۷۴۳۴۱۹۴۰	۲۲۳۳۶۸۰۰	۶۱٫۷۴۶	۳۵۹۲۱۶۸۹۷٫۶	۸۰۱۴۰۶۱۱٫۳۲	۲۴۰۷۹۰۷۰٫۴	۱۸۰۰۷۶۷۵۹
۹	۱۰×۱۰×۱۰×۱۴ ۱۲	۴۹۰۲۰۴۳۰۰	۹۶۳۸۷۹۶۰	۲۸۳۶۴۸۷۰۰	۱۵۱٫۶۱۷	۴۷۸۴۳۹۳۹۶٫۸	۱۰۳۹۰۵۹۲۹٫۸	۳۰۵۷۷۱۴۶٫۶	۴۴٫۳۸۷۳۹۲۹
۱۰	۱۲×۱۱×۲۰ ۱۵	۸۹۲۷۸۷۲۰۰	۲۶۵۹۲۶۵۰۰	۵۳۷۹۴۴۱۰۰	۵۸۱٫۴۷۸	۸۷۱۳۶۰۳۰۷٫۲	۲۹۰۲۶۷۶۷	۵۷۹۹۰۳۷۳۹٫۸	۱۷۰٫۲۳۳۴۹۹
۱۱	۱۵×۱۵×۲۵ ۲۰	۱۲۶۲۵۳۱۰۰۰	۶۱۵۵۲۰۰۰۰	۷۵۹۸۶۶۷۰۰	۲۰۲۱٫۲۹	۱۲۳۲۲۳۰۲۵۶	۶۶۳۵۳۰۵۶۰	۸۱۹۱۳۶۳۰۲۶	۵۹۱٫۷۵۲۸۶
۱۲	۲۰×۲۰×۳۰ ۲۵	۱۴۲۳۶۶۳۰۰۰	۱۱۸۳۴۹۸۰۰۰	۸۴۰۷۲۹۵۰۰	۳۶۰۰	۱۴۴۸۰۵۵۰۸۸	۱۲۷۵۸۱۰۸۴۴	۹۰۶۳۰۶۴۰۱	۱۰۵۳٫۹۳۶
میانگین		۴۱۹۲۲۴۲۱۴٫۲	۱۹۰۳۰۹۳۳۵٫۹	۲۳۱۵۹۱۰۷۵	۵۳۸٫۳۲	۴۰۹۱۶۲۸۳۳	۱۸۳۶۸۳۲۷۳٫۱	۲۲۶۷۲۲۱۶۶٫۲	۱۵۷٫۵۹۹

جدول (۵). مقایسه نتایج محاسباتی روش‌های TH و الگوریتم MOPSO برای حل مسائل با ابعاد کوچک

مسئله له	ابعاد مسئله $M \times I \times J \times C$	روش TH				الگوریتم MOPSO			
		هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	زمان حل	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	زمان حل
۱	۲×۳×۳×۲	۲۲۹۷۱۴۱۰	۴۹۴۰۰۲,۵۹	۱۳۹۱۸۶۸۰	۰,۶۴۰	۲۱۳۶۳۴۱۱,۳	۴۹۶۴۷۲,۶۰۳	۱۳۹۸۸۲۷۳,۴	۰,۱۷۰۲۴
۲	۲×۴×۴×۳	۲۷۳۳۸۶۹۰	۱۷۳۹۵۷۳,۸	۱۶۳۶۶۷۲۰	۰,۸۴۱	۲۵۴۲۴۹۸۱,۷	۱۷۴۸۲۷۱,۶۶ ۹	۱۶۴۴۸۵۵۳,۶	۰,۲۲۳۷۰۶
۳	۴×۴×۴×۳	۶۴۳۶۴۳۲۰	۳۹۲۷۳۰۲,۷۳	۳۹۶۱۱۶۳۰	۱,۶۵۵	۵۹۸۵۸۸۱۷,۶	۳۹۴۶۹۳۹,۲۴ ۴	۳۹۸۰۹۶۸۸,۱ ۵	۰,۴۴۰۲۳
۴	۴×۵×۴×۵	۴۴۵۰۶۲۵۰	۲۰۳۷۶۹۷,۲۹	۲۹۶۶۴۱۱۰	۲,۳۰۹	۴۱۳۹۰۸۱۲,۵	۲۰۴۷۸۸۵,۷ ۷۶	۲۹۸۱۲۴۳۰,۵ ۵	۰,۶۱۴۱۹۴
۵	۵×۵×۵×۶	۹۶۵۵۸۱۰۰	۴۸۰۷۱۹۳,۸۸	۶۲۵۶۱۹۸۰	۶,۲۴۱	۸۹۷۹۹۰۳۳	۴۸۳۱۲۲۹,۸ ۴	۶۲۸۷۴۷۸۹,۹	۱,۶۶۰۱۰۶
۶	۶×۷×۶×۸	۱۲۴۹۴۸۸۰۰	۱۲۳۱۷۱۶۰	۷۳۲۹۲۴۷۰	۱۲,۹۴۸	۱۱۶۲۰۲۳۸۴	۱۲۳۷۸۷۴۵, ۸	۷۳۶۵۸۹۳۲,۳ ۵	۳,۴۴۴۱۶۸
۷	۸×۸×۸×۹	۱۵۲۷۶۷۴۰۰	۲۲۷۱۴۷۰۰	۹۹۱۵۱۵۱۰	۱۹,۰۹۴	۱۴۲۰۷۳۶۸۲	۲۲۸۲۸۲۷۶,۵ ۵	۹۹۶۴۷۲۶۷,۵ ۵	۵,۰۷۹۰۰۴
۸	۱۰×۹×۹×۱۰	۳۶۸۰۵۰۱۰۰	۷۴۳۴۱۹۴۰	۲۲۳۳۶۸۰۰	۶۱,۷۴۶	۳۴۲۲۸۶۵۹۳	۷۴۷۱۳۶۴۹,۷	۲۲۴۴۸۴۸۴	۱۶,۴۲۴۴۳ ۶
۹	۱۰×۱۰×۱۴ ۱۲	۴۹۰۲۰۴۳۰۰	۹۶۳۸۷۹۶۰	۲۸۳۶۴۸۷۰ ۰	۱۵۱,۶۱ ۷	۴۵۵۸۱۹۹۹۹	۹۶۸۶۹۸۹۹,۸	۲۸۵۰۶۶۹۴۳, ۵	۴۰,۳۳۰۱۲ ۲
۱۰	۱۲×۱۱×۲۰ ۱۵	۸۹۲۷۸۱۲۰۰	۲۶۵۹۲۶۵۰۰	۵۳۷۹۴۴۱۰ ۰	۵۸۱,۴۷ ۸	۸۳۰۲۹۲۰۹۶	۲۶۷۲۵۶۱۳۲, ۵	۵۴۰۶۳۳۸۲۰, ۵	۱۵۴,۶۷۳۱ ۵
۱۱	۱۵×۱۵×۲۵ ۲۰	۱۲۶۲۵۳۱۰۰ ۰	۶۱۵۵۲۰۰۰۰	۷۵۹۸۶۶۷۰ ۰	۲۰۲۱,۲ ۹	۱۱۷۴۱۵۳۸۳ ۰	۶۱۸۵۹۷۶۰۰	۷۶۳۶۶۶۰۲۳, ۵	۵۳۷,۶۶۳۱ ۴
۱۲	۲۰×۲۰×۳۰ ۲۵	۱۴۸۳۶۶۳۰۰ ۰	۱۱۸۳۴۹۸۰۰ ۰	۸۴۰۷۲۹۵۰ ۰	۳۶۰۰	۱۳۷۹۸۰۶۵۹ ۰	۱۱۸۹۴۱۵۴۹ ۰	۸۴۹۳۳۱۴۷, ۵	۹۵۷,۶
میانگین		۴۱۹۲۲۴۲۱۴, ۲	۱۹۰۳۰۹۳۳۵, ۹	۲۳۱۵۹۱۰۷ ۵	۵۳۸,۳۲	۳۸۹۸۷۸۵۱۹, ۲	۱۹۱۲۶۰۸۸۲, ۵	۲۳۲۷۴۹۰۳۰, ۴	۱۴۳,۱۹۳۵

شاخص‌های ارزیابی بیشتری بهره خواهیم گرفت که تشریح این شاخص‌ها در ادامه خواهد آمد.

#### ۶-۲-۱- تنظیم پارامترها

الگوریتم‌های فرا ابتکاری نسبت به پارامترهای خود بسیار حساس هستند و تغییر این پارامترها تاثیر به سزایی بر جستجوی آنها دارند. در این بخش برای تنظیم پارامترها از روش تاگوچی استفاده شد و با بهره گیری از نرم افزار مینسی تب پارامترهای الگوریتم‌ها تنظیم گردید. که بصورت جداول (۶) و (۷) در زیر نشان داده می‌شود.

#### ۶-۲- بررسی الگوریتم ارائه شده در مسائل نمونه بزرگ

به منظور حل مسئله مدلسازی شده الگوریتم‌های فرا ابتکاری ابتدا با روش تاگوچی تنظیم پارامتر صورت گرفت و سپس به حل مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO پرداخته شد. از طرفی عملکرد الگوریتم‌های چند هدفه بسیار پیچیده تر از الگوریتم‌های تک هدفه می‌باشد و یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های ارائه شده کافی باشد. از این رو برای بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم‌ها از

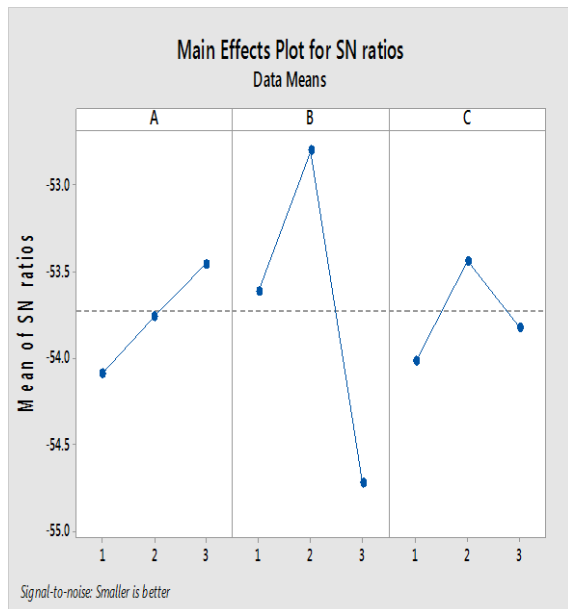
جدول (۶). پارامترهای مورد آزمایش الگوریتم ژنتیک توسط طراحی آزمایشات

تاگوچی

سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل npop	Crossover nc	Mutation nm
۱	(۳۵۰، ۴۰۰)	۰،۶	۰،۱
۲	(۴۵۰، ۴۵۰)	۰،۷	۰،۱۵
۳	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰،۸	۰،۲
پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم ژنتیک			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل npop	Crossover nc	Mutation nm
۱	(۳۵۰، ۴۰۰)	۰،۶	۰،۱
۲	(۴۵۰، ۴۵۰)	۰،۷	۰،۱۵
۳	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰،۸	۰،۲

جدول (۷). پارامترهای مورد آزمایش الگوریتم MOPSO توسط طراحی آزمایشات تاگوچی

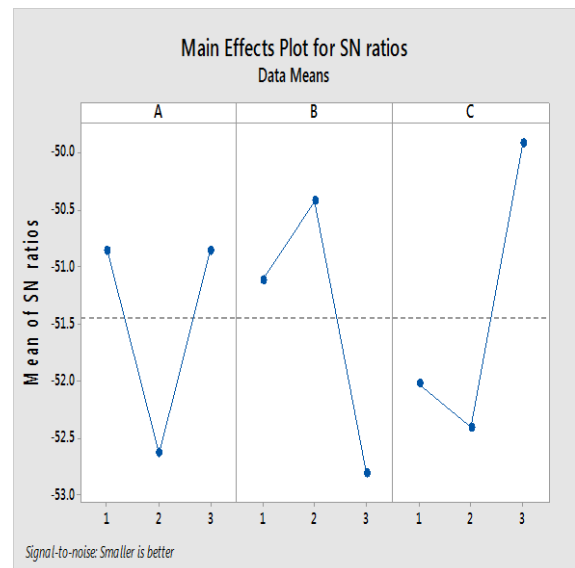
MPSO پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل npop	Velocity Limits VelMax	Inertia Weight Damping Ratio wdamp
۱	(۳۵۰، ۴۰۰)	۰،۱	۰،۹۷
۲	(۴۵۰، ۴۵۰)	۰،۱۲	۰،۹۸
۳	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰،۱۵	۰،۹۹
MPSO پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل npop	Velocity Limits VelMax	Inertia Weight Damping Ratio wdamp
۱	(۳۵۰، ۴۰۰)	۰،۱	۰،۹۷
۲	(۴۵۰، ۴۵۰)	۰،۱۲	۰،۹۸
۳	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰،۱۵	۰،۹۹



شکل (۲). نمودار S/N الگوریتم MOPSO

همانطور که مشاهده می‌شود پارامترهای مناسب برای دو الگوریتم در جدول (۸) به صورت زیر می‌باشد:

طراحی آزمایشات تاگوچی در نرم افزار میننی تب به شکل ارائه‌های متعامد L9 مورد آزمون قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های (۱) و (۲) زیر گزارش شده است.



شکل (۱). نمودار S/N الگوریتم ژنتیک



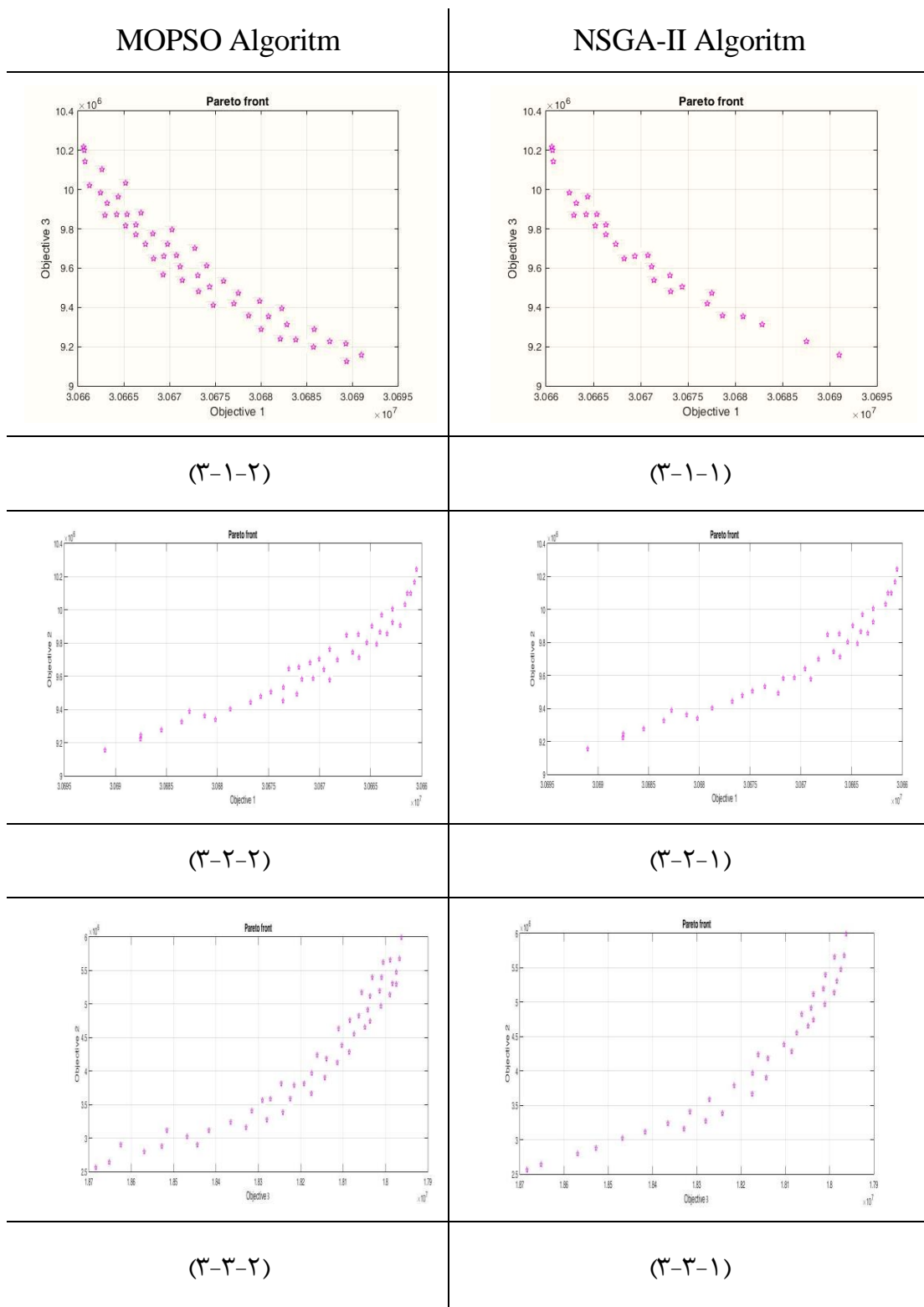
## ۶-۲-۲- حل مدل ارائه شده

به منظور حل مسئله مدل سازی شده با استفاده از الگوریتم های NSGA-II و MOPSO، از نرم افزار Matlab R2015a و در کامپیوتر ۷ هسته ای با پردازشگر ۲,۴۵ گیگاهرتز و رم ۸ گیگابایت استفاده شده است. سپس الگوریتم با ۵۰۰ تکرار اجرا شد. با توجه به این که جمعیت اولیه ۵۰۰ نقطه بوده است، در پایان نیز ۳۵۰ نقطه برای الگوریتم ژنتیک و ۴۰۰ نقطه برای الگوریتم انبوه ذرات که بهترین شرایط را در فضای ممکن تصمیم دارند، به عنوان جواب الگوریتم به دست آمده است. یک سری از نقاط در خارج از محدوده قرار می گیرد. این امر به دلیل جستجوی نقاط جواب در الگوریتم های NSGA-II و MOPSO بر اساس حداقل و حداکثر مختصات نقاط موجود در محدوده است که فضایی مربع شکل در نظر می گیرد ولی محدوده مورد نظر دایره ای شکل می باشد. بدین منظور تمامی نقاطی که خارج از محدوده بودند، حذف گردیدند.

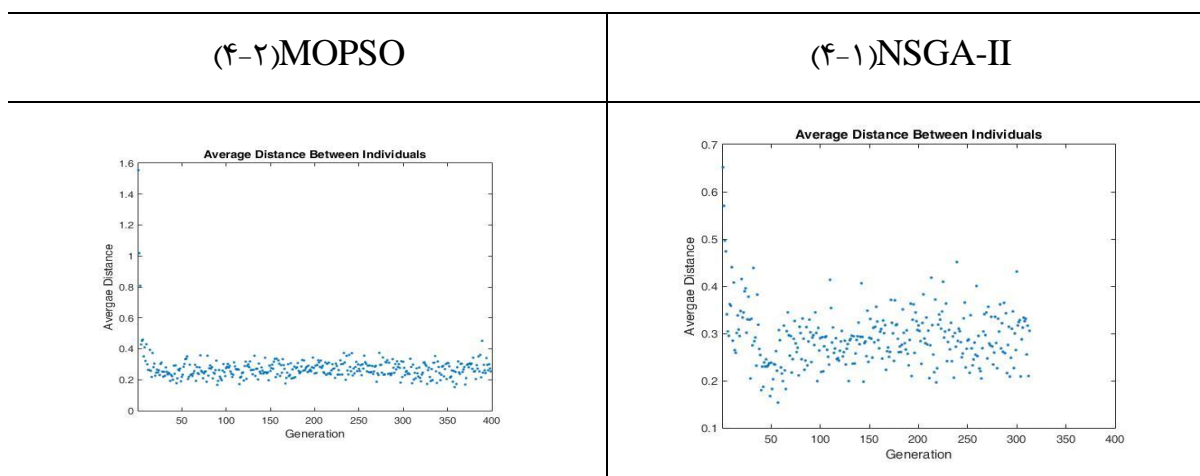
برای دستیابی به جبهه جواب بهینه، مقادیر توابع هدف به ازای هریک از جواب های نهایی الگوریتم ها بررسی گردید. که در نمودارهای پارتو دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقایسه پارتو دو به دو توابع هدف از دو الگوریتم در اشکال (۳-۱-۱) و (۳-۱-۲) و (۳-۱-۳) و (۳-۲-۱) و (۳-۲-۲) و (۳-۲-۳) و (۳-۳-۱) و (۳-۳-۲) نشان داده شده است. مجموعه جواب پارتو ارائه شده از دو الگوریتم از همگرایی مناسبی برخوردار است. بررسی دقیقتر از مجموعه جواب های ارائه شده نشان می دهد که همگرایی مجموعه جواب پارتو الگوریتم NSGA-II دارای برتری بالاتری از مجموعه جواب پارتو ارائه شده برای الگوریتم MOPSO می باشد. همچنین در شکل (۴) تعداد تکرار حل مدل برای الگوریتم های NSGA-II و MOPSO نشان داده شده است. که در شکل (۴-۱) تعداد تکرار الگوریتم NSGA-II تقریباً برابر ۳۵۰ تکرار و برای الگوریتم MOPSO برابر ۴۰۰ تکرار می باشد.

جدول (۸). پارامترهای تایید شده برای الگوریتم ها

سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل n <sub>pop</sub>	Crossover nc	Mutation nm
۱	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰,۷	۰,۱۵
پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم MPSO			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل n <sub>pop</sub>	Velocity Limits VelMax	Inertia Weight Damping Ratio wdamp
۱	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰,۱۲	۰,۹۹
پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم ژنتیک			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل n <sub>pop</sub>	Crossover nc	Mutation nm
۱	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰,۷	۰,۱۵
پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم MPSO			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل n <sub>pop</sub>	Velocity Limits VelMax	Inertia Weight Damping Ratio wdamp
۱	(۴۵۰، ۵۰۰)	۰,۱۲	۰,۹۹



شکل (۳). مجموعه جواب پاراتو با استفاده از الگوریتم MOPSO و NSGA-II



شکل (۴). تعداد تکرار حل مدل برای الگوریتم‌های پیشنهادی: (۴-۱) NSGA-II، (۴-۲) MOPSO. تعداد تکرار الگوریتم

در رابطه بالا،  $N$  نشان دهنده تعداد جواب‌ها،  $d_i$  نشان دهنده فاصله اقلیدسی بین هر دو جواب متوالی در مرز بهینه به دست آمده توسط هر الگوریتم است و  $\bar{d}$  میانگین مقادیر  $d_i$  می‌باشد.

#### شاخص پراکندگی

شاخص پراکندگی میزان تنوع یا گوناگونی جواب‌ها را نشان می‌دهد و هر چه بیشتر باشد بهتر است. [۴۵]

$$DM = \sqrt{\left(\frac{\max f_{1i} - \min f_{1i}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{\max f_{2i} - \min f_{2i}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2} \quad (\text{رابطه ۲۸})$$

زمان اجرای، زمان رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه همواره یکی از مهمترین معیارهای بررسی کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری بوده است.

#### ۴-۲-۶- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری

در این بخش ۱۲ مسأله در ابعاد مختلف تولید شده و متوسط ۵ بار اجرای هر الگوریتم برای مقادیر توابع هدف الگوریتم‌ها گزارش گردید ابعاد مسائل با  $M \times I \times J \times C$  نشان داده شده است که  $M$  تعداد بازار مواد،  $I$  تعداد تأمین کننده،  $J$  تعداد تولید کننده و  $C$  مراکز مشتریان می‌باشد. و در ادامه شاخص‌های مربوط به هریک از دو الگوریتم فرا ابتکاری ارائه شده است. مشخصات نمونه مسائل تولید شده و مقادیر شاخص‌های ارزیابی دو الگوریتم در جدول (۹) و در ادامه، نمودارهای شاخص‌های ارزیابی در شکل (۵) و (۶) و (۷) ارائه شده‌اند.

#### ۳-۲-۶- شاخص‌های ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری

در مسائل بهینه سازی چند هدفه، جواب‌های مسأله تشکیل یک مرز بهینه پارتو را می‌دهند. برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های متفاوت که جواب‌های پارتو ارائه می‌دهند روش‌های گوناگونی وجود دارد. در این قسمت شاخص‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند به اختصار توضیح داده شده است. در بسیاری از مطالعات از شاخص تعداد جواب‌های پارتو ۱ به عنوان یک معیار کمی عملکرد الگوریتم استفاده نموده‌اند هرچه تعداد جواب‌های پارتوی یک روش بیشتر و از همگرایی مناسبی برخوردار باشد آن روش مطلوب‌تر است. شاخص دیگری تحت عنوان شاخص فاصله ۲، پراکندگی ۳ و زمان اجرا ۴ برای ارزیابی مجموعه جواب وجود دارند که در ادامه به بررسی و سپس به مقایسه نتایج حاصل از آنها می‌پردازیم.

#### شاخص فاصله

برای بیان محاسبه فاصله نسبی جواب‌های متوالی توسط اسکات [۴۴] معرفی شده است. این شاخص هرچه کمتر باشد بهتر است. شاخص فاصله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \bar{d} - d_i}{(N-1)\bar{d}} \quad (\text{رابطه ۲۷})$$

<sup>1</sup> Number of pareto solutions

<sup>2</sup> Spacing metric

<sup>3</sup> Diversity metric

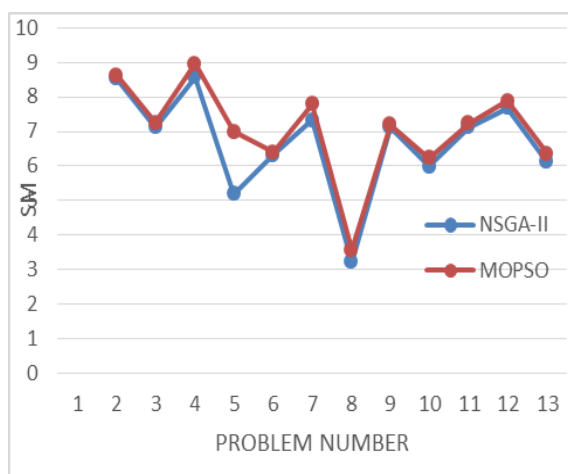
<sup>4</sup> Run Time

مجموعه جواب بهتری می‌باشد اما معیار زمان اجرای مدل در الگوریتم MOPSO نسبت به الگوریتم NSGA-II داری عملکرد بهتری می‌باشد.

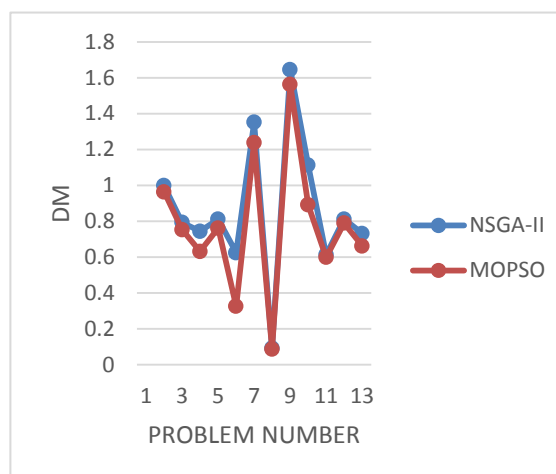
با توجه به نمودارهای شاخص‌های پراکندگی در شکل (۵)، شاخص فاصله در شکل (۶) و زمان اجرای در شکل (۷) الگوریتم‌ها ارائه شده الگوریتم NSGA-II در شاخص‌های فاصله و پراکندگی دارای

جدول (۹). مشخصات مسائل و مقادیر شاخص‌های ارزیابی دو الگوریتم

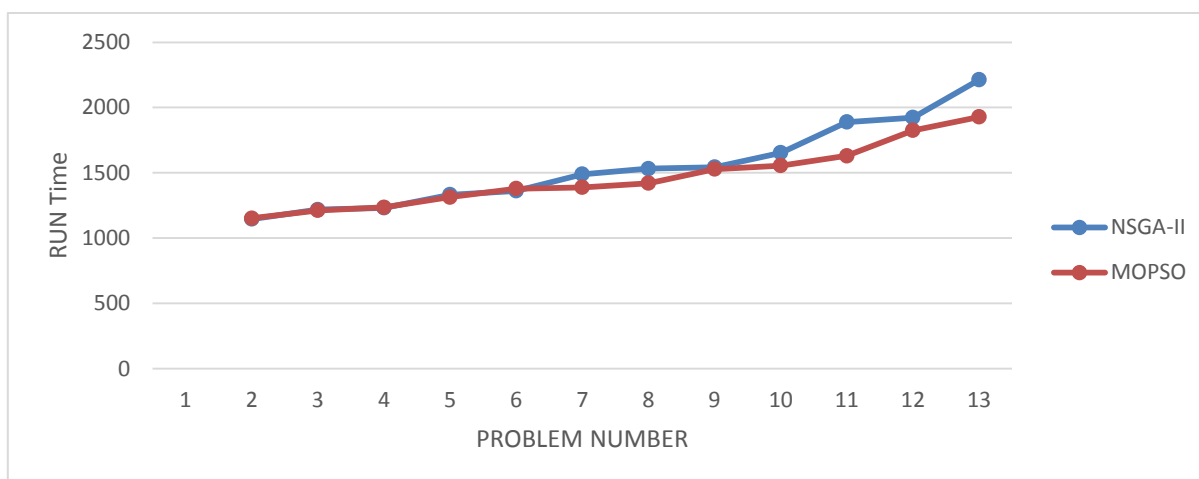
مساله	ابعاد مسئله M×I×J×C		الگوریتم NSGA-II					الگوریتم MOPSO					
	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	S M	DM	Run Time	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	S M	DM	Run Time	
۱	۲۵×۳۰×۳۰ ۳۰×	۱۵۷۹۵۰۷۶۳ ۰	۱۲۵۹۹۵۱۹ ۷۱	۸۹۵۰۴۰۶۲۵ ۰٫۷	۸٫۵ ۳	۰٫۹۹	۱۱۴۵٫ ۳	۱۵۹۰۱۵۴۶۳ ۰	۱۲۵۹۹۵۱۹ ۷۱	۸۹۵۰۴۰۶۲۵ ۰٫۷	۸٫۶ ۳	۰٫۹۶	۱۱۵۲٫۳
۲	۲۷×۲۵×۲۵ ۳۳×	۱۶۳۴۴۴۴۷۱ ۶	۱۲۹۰۲۱۳۴ ۹۲	۱۰۱۸۵۰۹۷ ۰	۷٫۱ ۳	۰٫۷۹	۱۲۱۸٫ ۳	۱۶۴۵۷۵۴۴۹ ۴	۱۲۹۰۹۲۲۲ ۴۹	۹۷۵۵۶۶۶۹۹ ۰٫۷	۷٫۲ ۵	۰٫۷۵	۱۲۱۲٫۳
۳	۲۹×۲۸×۲۸ ۳۵×	۱۷۹۸۴۹۹۲ ۹۸	۱۳۹۷۳۵۶۶۹ ۹	۱۰۵۳۳۳۸۵ ۸	۸٫۵ ۶	۰٫۷۴	۱۳۲۱٫ ۱	۱۷۶۷۰۰۱۷۸ ۸	۱۳۸۶۵۹۴۶۵ ۸	۹۸۹۳۶۲۵۸۸ ۸	۸٫۹ ۶	۰٫۶۳	۱۲۳۵٫۲
۴	۳۲×۴۲×۴۲ ۴۰×	۲۰۵۷۷۱۶۱ ۴	۱۶۳۰۴۷۳۲۲ ۶	۱۳۱۰۷۹۵۱ ۳۸	۵٫۱ ۹	۸۱٫	۱۳۳۲٫ ۱	۲۰۵۷۰۹۰۳ ۸۴	۱۵۸۵۲۱۷۶۱ ۲	۱۳۱۰۷۹۵۱ ۳۸	۶٫۹ ۹	۰٫۷۶	۱۳۱۳٫۶
۵	۳۳×۴۳×۴۳ ۴۳×	۲۲۹۲۳۵۷۱ ۸۹	۱۸۴۳۷۷۳۹ ۲۷	۱۶۷۱۲۷۵۴۰ ۵	۶٫۳ ۲	۰٫۶۲	۱۳۶۱٫ ۲	۲۳۱۰۱۳۹۷ ۳۵	۲۰۱۳۰۴۱۴ ۹۴	۱۶۷۱۲۷۵۴۰ ۵	۶٫۳ ۹	۰٫۳۲	۱۳۷۴٫۴
۶	۳۶×۴۶×۴۵ ۴۶×	۲۵۹۴۳۱۴۳ ۷۲	۲۱۴۳۷۱۶۸۸ ۶	۲۰۱۵۵۵۶۰۸ ۲	۷٫۳ ۲	۱٫۳۵	۱۴۸۹٫ ۲	۲۴۴۱۳۹۶۰۸ ۲	۲۳۸۱۴۹۹۰ ۲۲	۲۰۱۵۵۵۶۰۸ ۲	۷٫۷ ۸	۱٫۲۳	۱۳۸۸٫۴
۷	۳۸×۴۹×۴۸ ۴۸×	۳۰۷۶۷۲۸۰۶ ۷	۲۳۰۹۴۹۱۰ ۷۵	۲۰۵۷۴۳۷۷ ۷۳	۳٫۲ ۲	۰٫۹۳	۱۵۳۲٫ ۱	۲۶۹۶۰۱۰۳۹ ۲۶۹۶۰۱۰۳۹	۲۶۹۶۳۰۱۰۳ ۹	۱۹۵۰۹۷۷۷ ۷۳	۳٫۵ ۶	۰٫۰۸ ۸	۱۴۲۰٫۱
۸	۴۰×۵۰×۵۰ ۵۰×	۳۳۲۷۴۰۹۴ ۲۹	۲۴۰۷۴۴۹۱ ۷۹	۲۲۶۰۸۷۶۱۱ ۶	۷٫۱ ۲	۱٫۶۴	۱۵۴۳٫ ۳	۳۴۴۷۲۱۹۶۲ ۳۴۴۷۲۱۹۶۲	۲۸۰۲۶۲۳۳۷ ۶	۲۰۴۷۹۵۶۱۱ ۶	۷٫۱ ۹	۱٫۵۶	۱۵۲۸٫۱
۹	۴۲×۵۵×۵۵ ۵۵×	۳۹۵۲۴۲۹۷ ۰۲	۲۸۱۷۷۶۶۸۶ ۹	۲۳۵۵۶۳۸۳۹ ۷	۵٫۹ ۸	۱٫۱۱	۱۶۵۳٫ ۲	۴۰۶۲۱۹۲۱۹ ۷	۳۳۱۳۶۴۰۹۵ ۷	۲۲۴۹۱۷۸۳ ۹۷	۶٫۳ ۲	۰٫۸۹	۱۵۵۵٫۵
۱۰	۴۵×۵۸×۵۸ ۵۸×	۴۲۷۵۱۱۱۷ ۹۴	۳۳۲۷۹۲۴۳ ۰۲	۲۲۶۷۳۴۸۸۹ ۳	۷٫۱ ۳	۰٫۶۱	۱۸۸۹٫ ۳	۴۴۹۶۷۶۱۳۸ ۷	۳۴۲۰۱۰۰۸ ۵۱	۲۲۶۰۸۸۸۸۹ ۳	۷٫۲ ۳	۰٫۵۹	۱۶۳۰٫۱ ۵
۱۱	۴۹×۶۰×۶۰ ۶۰×	۴۹۵۲۰۱۱۶۳ ۱	۳۷۳۹۴۲۰۹ ۱۴	۲۷۸۱۴۰۸۵ ۷۰	۷٫۶ ۸	۰٫۸۱	۱۹۲۳٫ ۳	۵۲۳۰۰۱۴۱ ۲۱	۴۰۲۴۳۶۷۷۰ ۵	۲۶۷۴۹۴۸۵۷ ۰	۷٫۸ ۹	۰٫۷۸	۱۸۲۵٫۶
۱۲	۵۰×۶۵×۶۵ ۶۵×	۵۲۲۹۶۸۷۸۱ ۰	۴۱۶۵۳۲۰۴۲ ۵	۲۸۱۷۷۹۳۵ ۳۹	۶٫۱ ۱	۰٫۷۳	۲۲۱۲٫ ۳	۵۵۶۱۰۳۶۰۷ ۷	۴۳۸۶۴۲۵۸۸ ۹	۲۷۸۱۳۳۳۵ ۳۹	۶٫۳ ۶	۰٫۶۶	۱۹۲۵٫۶
میانگین		۳۰۶۴۱۸۸۸۸ ۸	۲۳۶۶۹۰۴۹۱ ۴	۱۸۸۹۵۴۶۶۷ ۵	۶٫۶ ۹	۰٫۸۶	۱۵۴۴٫ ۳۲	۳۱۰۸۵۴۶۹۰ ۸	۲۵۴۷۵۵۷۱ ۹۴	۱۸۱۸۵۷۳۳ ۴۱	۷٫۰ ۴	۰٫۷۷	۱۴۶۴٫۴



شکل (۶). مقایسه شاخص فاصله در دو الگوریتم ارائه شده



شکل (۵). مقایسه شاخص پراکندگی در دو الگوریتم ارائه شده



شکل (۷). مقایسه زمان اجرا در دو الگوریتم ارائه شده

می‌دهند به طور متوسط زمان حل مسائل توسط روش دقیق برابر با ۵۳۸/۳۲ ثانیه است، در حالی که این مقدار برای روش‌های فرا ابتکاری ژنتیک ۱۵۷/۵۹ و اجتماع ذرات ۱۴۳/۱۹ ثانیه است. که این امر نشان از عملکرد مناسب الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی دارد. در ادامه برای ابعاد بزرگتر با استفاده از الگوریتم‌های MOPSO و NSGA-II به حل مدل چند هدفه پیشنهادی، پرداخته و نتایج عملکرد هر دو الگوریتم با هم مقایسه شده است. همانطور که در نمودارهای پارتو دیده می‌شود از نظر معیار نظم جواب‌های پارتو الگوریتم ژنتیک بهتر عمل کرده است. برای بررسی دقیق‌تر عملکرد الگوریتم‌های مذکور از معیارهای ارزیابی فاصله (DM)، پراکندگی (SM) و زمان اجرا (RT) استفاده شده است که نتایج بدست آمده از این شاخص‌ها نشان از برتری کارایی الگوریتم ژنتیک دارد.

## ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه به توسعه یک مدل ریاضی سه هدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل بازار مواد اولیه، تأمین کنندگان، تولید کنندگان، توزیع کنندگان، مشتریان، و همچنین مراکز جمع‌آوری، بازیافت و دفع تحت شرایط عدم اطمینان پرداخته شد. با استفاده از رویکرد فازی مثلثی عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و حداکثر ظرفیت قطعه ارائه شده توسط تأمین کننده در نظر گرفته شده و معادل قطعی برای مدل توسعه داده شده ارائه شد. سه تابع هدف هزینه، سود و اثرات زیست محیطی برای این مسئله در نظر گرفته شد. برای حل مدل در ابعاد کوچک با استفاده از روش TH مدل سه هدفه به مدل تک هدفه با یک تابع هدف ماکزیمم تبدیل و مسائل مختلف در محیط نرم افزار GAMS انجام گرفت و نتایج حل دقیق آن با الگوریتم‌های پیشنهادی مقایسه شد نتایج بدست آمده نشان

[8] E. Yadegari, A. Alem-Tabriz, & M. Zandieh, "A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 128, pp. 418-436, 2019.

[9] آرین پور، ن. و امیدواری، ز. یک مدل بهینه سازی قوی برای طراحی استراتژیک و عملیاتی زنجیره تامین نفت. مجله چشم انداز مدیریت صنعتی، دوره ۱۰، شماره ۴، ص ۱۵۵-۱۹۱، ۱۳۹۹.

[10] R. Tavakoli Moghadam, M. Rekavandy Omid, and A. Ghodrat Nema, "Mathematical modeling to design integrated forward and reverse logistics network," *Management research in Iran*, vol. 17, 2013.

[11] M. Ramezani, A. M. Kimiagari, B. Karimi, and T. H. Hejazi, "Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment. Knowledge-Based Systems," vol. 59, pp. 108-120, 2014.

[12] E. Özceylan, T. Paksoy, T. Bektas, "Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing, Transportation research part E: logistics and transportation review," vol. 61, pp. 142-1, 2014.

[13] A. Jayant, P. Gupta, S. K. Garg, "Simulation modeling and analysis of network design for closed-loop supply chain: a case study of battery industry," *Procedia Engineering*, 97(1672), pp. 2213-2221, 64, 2014.

[14] Z. Dai and X. Zheng, "Design of close-loop supply chain network under uncertainty using hybrid genetic algorithm: A fuzzy and chance-constrained programming model," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 88, pp. 444-457, 2015.

[15] Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., Gholamnejad, S., A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry, *Journal of Cleaner Production*, 113, P.662-673, 2016.

[16] Subulan, K., Taşan, A. S., Baykasoğlu, A., Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming, *Applied Mathematical Modeling*, 39(9), P.2661-2702, 2015.

[17] N. Kafa, Y. Hani, and A. El Mhamedi, "An integrated sustainable partner selection approach with closed-loop supply chain network configuration," *IFAC-Papers Online*, vol. 48(3), pp. 1840-1845, 2015.

[18] Z. G. Tao, Z. Y. Guang, S. Hao, and H. J. Song, "Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with carbon emission constraints. Resources, Conservation and Recycling," vol. 104, pp. 354-365, 2015.

[19] M. Al-Salem, A. Diabat, D. Dalalah, and M. Alrefaei, "A closed-loop supply chain management problem: Reformulation and piecewise linearization, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 40, pp. 1-8, 2016.

[20] M. A. Ruimin, Y. A. O. Lifei, J. I. N. Maozhu, R. E. N. Peiyu, and L. V. Zhihan, "Robust environmental closedloop supply chain design under uncertainty," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 89, pp. 195-202, 2016.

[21] Kaya, O., Urek, B., A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain, *Computers & Operations Research*, 65, P.93-103, 2016.

[22] M. Zohal and H. Soleimani, "Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, pp. 314-337, 2016.

[23] L. Xie and J. Ma, "Study the complexity and control of the recycling-supply chain of China's color TVs market based on the government subsidy," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 38, pp. 102-116, 2016.

از نظر مدیریتی، این مقاله می‌تواند به عنوان یک خط راهنمای مناسب برای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن تأثیرات فاکتورهای هزینه، سود و اثرات زیست محیطی در طراحی زنجیره تامین و همچنین در نظر گرفتن عامل عدم قطعیت باشد. همچنین به دلیل شرایط محیطی و تغییر سلاقی مشتریان، تقاضا و حداکثر ظرفیت در این زنجیره می‌تواند توأم با عدم قطعیت باشد که در این مدل نیز این فرض در نظر گرفته شده است و شرایط مدل را به دنیای واقعی نزدیکتر نموده است.

برای مطالعات بیشتر که توسط محققان آتی انجام می‌گیرد می‌توان موارد زیر را پیشنهاد داد:

- در نظر گرفتن مدل چند دوره‌ای با مسائل کنترل موجودی و جریان مواد و انبارها

- توسعه مدل‌های طراحی یکپارچه چند هدفه برای شبکه‌های چند محصولی

- در نظر گرفتن توابع هدف مرتبط با محیط زیست از جمله بسته بندی سبز، تکنولوژی پاک، گواهینامه‌های محیط زیست

- مدل‌های با پارامترهای غیر قطعی و بازگشت پویا به منظور نزدیک تر شدن مسئله به دنیای واقعی

- استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار و حل مدل با سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری

## ۸- مراجع

[1] E. Özceylan and T. Paksoy, "A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network," *International Journal of Production Research*, vol. 51(3), pp. 718-734, 2013.

[2] T. Paksoy, T. Bektas, and E. Ozceylan, "Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain," *Transportation Research Part E* 47 (4), pp. 532-546, 2011.

[3] P. Fleischmann, J. M. Beullens, and L. Bloemhof-ruwaard, Wassenhove, "The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operation Management*," vol. 10, pp. 156-173, 2001.

[4] D. Lee and M. Dong, "A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery," *Transportation Research Part E*. pp. 44 455-474, 2008.

[5] S. H. Amin and G. Zhang, "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return," *Applied Mathematical Modeling*, vol. 37(6), pp. 4165-4176, 2013.

[6] حدیدی داهویی، ج. حسینی دهشیری، س. شناسایی و اولویت بندی استراتژی‌ها برای کاهش هزینه‌های زنجیره تامین تجهیزات نیروگاهی از طریق مهندسی ارزش. مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۷، شماره ۵۲، ص ۱۲۵-۱۵۲، ۱۳۹۸.

[7] R. G. Yaghin, P. Sarlak, and A. Ghareaghaji, "Robust master planning of a socially responsible supply chain under fuzzy-stochastic uncertainty (A case study of clothing industry)," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 94, p. 103715, 2020.

- [34] Y. Liu, L. Ma, & Y. Liu, "A novel robust fuzzy mean-UPM model for green closed-loop supply chain network design under distribution ambiguity," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 92, pp. 99-135, 2021.
- [35] Z. Sazvar, M. Zokaei, R. Tavakkoli-Moghaddam, S. A.-S. Salari, & S. Nayeri, "Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty," *manufacturer's brand and waste management. Annals of Operations Research*, pp. 1-32, 2021.
- [36] مقدس پور، ب، جبل عاملی، م، بزرگی امیدی، ع، (ا)، ارائه مدل زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن عوامل طرف سوم، نشریه زنجیره تامین، دوره ۲۲، شماره ۶۶، ص ۷۵-۹۲، ۱۳۹۹.
- [37] تاجیک جنگلی، م، ماکویی، ا، دهقانی، ا، طراحی و برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز روغن موتور با در نظر گرفتن سیستم گردآوری کالا و ضایعات بصورت شبکه‌های، نشریه زنجیره تامین، دوره ۲۲، شماره ۶۸، ص ۴۰-۵۵، ۱۳۹۹.
- [38] ملک پور کلیدی نژاد، س، سیف برقی، م، توسعه شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن عوامل زیست محیطی و تصمیمات مکان یابی - موجودی در شرایط عدم اطمینان، نشریه زنجیره تامین، دوره ۲۲، شماره ۶۷، ص ۲۲-۴، ۱۳۹۹.
- [39] فیض الهی، ص، حیدری، ح، توسعه مدل ریاضی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چند هدفه؛ با تمرکز بر صرفه جویی هزینه‌های بازیافت در شرایط عدم اطمینان، فصلنامه مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، شماره ۴۶، ص ۵۷۶-۶۰۴، ۱۴۰۰.
- [40] M. S. Pishvaei, J. Razmi, and S. A. Torabi, "Robust possibility programming for socially responsible supply chain network design: A new approach," *Fuzzy sets and systems*, vol. 206, pp. 1-20, 2012.
- [41] S. A. Torabi & E. Hassini, "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning," *Fuzzy sets and systems*, vol. 159(2), pp. 193-214, 2008.
- [42] R. L. Haupt and S. E. Haupt, "Practical genetic algorithms," New York: Wiley, 2, 1998.
- [43] M. Clerc, "Particle Swarm Optimization," London, British Library Cataloguing-in-Publication Data, UK, 2006.
- [44] J. R. Schott, "Fault Tolerant Design Using Single and Multi criteria Genetic Algorithm Optimization (No. AFIT/CI/CIA-95-039)," Air Force Ins of Tech Wright Patterson AFB OH, 1995.
- [45] Zitzler, E. Evolutionary algorithms for multi objective optimization: Methods and applications (vol. 63). Ithaca: Shaker, 1999.
- [24] A. Tiwari, P. C. Chang, M. K. Tiwari, and R. Kandhway, "A Hybrid Territory Defined evolutionary algorithm approach for closed loop green supply chain network design, *Computers & Industrial Engineering*, 99, pp. 432-447, 2016.
- [25] D. K. Kadambala, N. Subramanian, M. K. Tiwari, M. Abdulrahman, and C. Liu, "Closed loop supply chain networks: Designs for energy and time value efficiency," *International Journal of Production Economics*, vol. 183, pp. 382-393, 2017.
- [26] S. H. Amin and F. Baki, "A facility location model for global closed-loop supply chain network designs," *Applied Mathematical Modeling*, vol. 41, pp. 316-330, 2017.
- [27] M. M. Paydar, V. Babaveisi, and A. S. Safaei, "An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 104, pp. 38-55, 2017.
- [28] Y. T. Chen, F. T. Chan, S. H. Chung, and W. Y. Park, "Optimization of product refurbishment in closed-loop supply chain using multi-period model integrated with fuzzy controller under uncertainties," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 50, pp. 1-12, 2018.
- [29] Luis J. Zeballos Carlos, A. Méndez Ana, and P. Barbosa-Povoa, "Integrating decisions of product and closed-loop supply chain design under uncertain return flows," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 112, pp. 211-238, 2018.
- [30] M. Farrokh, A. Azar, G. Jandaghi, and E. Ahmadi, "A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 341, pp. 69-91, 2018.
- [31] A. M. Fathollahi-Fard and M. Hajiaghvaei-Keshтели, "A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations," *Applied Soft Computing*, vol. 69, pp. 232-249, 2018.
- [32] J. Ghahremani-Nahr, R. Kian, & E. Sabet, "A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm," *Expert systems with applications*, vol. 116, pp. 454-471, 2019.
- [33] M. S. Atabaki, M. Mohammadi, and Naderi, "B New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 146, p. 106520, 2020.