



## Mathematical Modeling of Sustainable Supply Chain Networks under Uncertainty and Solving It Using Metaheuristic Algorithms

**Mohammad Reza Fathi**

Assistant Prof., Department of Industrial and Financial Management, Faculty of Management and Accounting, Farabi Campus, University of Tehran, Qom, Iran. E-mail: reza.fathi@ut.ac.ir

**Mahdi Nasrollahi**

\*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Social Sciences, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. E-mail: m.nasrollahi@soc.ikiu.ac.ir

**Ali Zamanian**

M.S. Student, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Farabi Campus, University of Tehran, Qom, Iran. E-mail: a.zamanian@ut.ac.ir

### Abstract

**Objective:** In recent years, global concerns about environmental and social issues have made consumers, government organizations, companies and universities more active, and their focus has increasingly been on the design of the supply chain network as the most important part of the supply chain. The main objective of this paper is to present a supply chain modeling model for Hamadan Glass Manufacturing Company considering the dimensions of sustainability.

**Methods:** In this paper, a Fuzzy Multi-objective Mixed Integral Programming is presented to design a closed loop supply chain under uncertainty conditions in order to minimize environmental impacts and maximize social impacts and economic benefits. In this model, both the constraints and the parameters of the problem are fuzzy, which is determined by the Jimenez method, and the algorithms of NSGA-II and MOPSO have been used to solve the model.

**Results:** The proposed model was solved with two multi-objective genetic algorithms and multi-objective particle swarm optimization, and the necessary comparisons were made between the results. Finally, Pareto's solutions were determined. According to the results, the two algorithms differ in the time criterion that the NSGA-II is superior to MOPSO. Also, there are two different algorithms in the MID standard that MOPSO excels over NSGA-II and does not have any significant superiority over the remaining criteria.

**Conclusion:** Based on the results of the research, simultaneous consideration of economic, environmental and social dimensions and uncertainty in some parameters such as demand and returns lead to improved supply chain performance in terms of profitability and customer satisfaction.

**Keywords:** Sustainable Supply Chain, Meta-heuristic Algorithms, Mixed-Integer Linear Programming.

**Citation:** Fathi, M.R., Nasrollahi, M., & Zamanian, A. (2019). Mathematical Modeling of Sustainable Supply Chain Networks under Uncertainty and Solving It Using Metaheuristic Algorithms. *Industrial Management Journal*, 11(4), 621-652. (in Persian)

-----  
Industrial Management Journal, 2019, Vol. 11, No.4, pp. 621-652

DOI: 10.22059/imj.2019.280393.1007588

Received: May 01, 2019; Accepted: September 24, 2019

© Faculty of Management, University of Tehran



## مدل سازی ریاضی شبکه زنجیره تأمین پایدار در وضعیت عدم قطعیت و حل آن با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری

محمد رضا فتحی

استادیار، گروه مدیریت صنعتی و مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران. رایانامه: reza.fathi@ut.ac.ir

مهدی نصراللهی

\* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: m.nasrollahi@soc.ikiu.ac.ir

علی زمانیان

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران. رایانامه: a.zamaniyan@ut.ac.ir

### چکیده

**هدف:** در سال های اخیر نگرانی های جهانی در خصوص مسائل زیست محیطی و اجتماعی، باعث شده است که مصرف کنندگان، سازمان های دولتی، شرکت ها و دانشگاه ها فعال تر شوند و بیش از پیش به طراحی شبکه زنجیره تأمین در جایگاه اساسی ترین بخش زنجیره تأمین پایدار توجه کنند. هدف اصلی این مقاله، ارائه مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین برای شرکت شیشه سازی همدان با در نظر گرفتن ابعاد پایداری است.

**روش:** در این مقاله برای به حداقل رساندن آثار زیست محیطی و حداکثر سازی آثار اجتماعی و سود اقتصادی، مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه فازی، به منظور طراحی زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته در وضعیت عدم قطعیت ارائه شده است. در این مدل، هم محدودیت ها و هم پارامترهای مسئله از نوع فازی است که با استفاده از روش خیمز قطعی شده و برای حل مدل، از الگوریتم های فراابتکاری NSGA-II و MOPSO استفاده شده است.

**یافته ها:** مدل برنامه ریزی پیشنهادی با دو الگوریتم ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه حل شد و مقایسه های لازم بین نتایج صورت گرفت و در نهایت، جواب های پارتو مشخص شد. با توجه به نتایج، از لحاظ معیار زمان، الگوریتم NSGA-II بر MOPSO و از نظر معیار MID الگوریتم MOPSO بر NSGA-II برتری دارد و در باقی معیارها برتری معناداری نسبت به هم ندارند.

**نتیجه گیری:** بر اساس نتایج، ملاحظات هم زمان ابعاد اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی و عدم قطعیت در برخی پارامترها همچون تقاضا و میزان برگشتی، به بهبود عملکرد زنجیره تأمین از نظر سودآوری و پاسخ گویی به نیازهای مشتریان منجر می شود.

**کلیدواژه ها:** زنجیره تأمین پایدار، الگوریتم های فراابتکاری، برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط.

**استناد:** فتحی، محمد رضا؛ نصراللهی، مهدی؛ زمانیان، علی (۱۳۹۸). مدل سازی ریاضی شبکه زنجیره تأمین پایدار در وضعیت عدم قطعیت و حل آن با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری. مدیریت صنعتی، ۱۱(۴)، ۶۲۱-۶۵۲.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۴، صص. ۶۲۱-۶۵۲

DOI: 10.22059/imj.2019.280393.1007588

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲

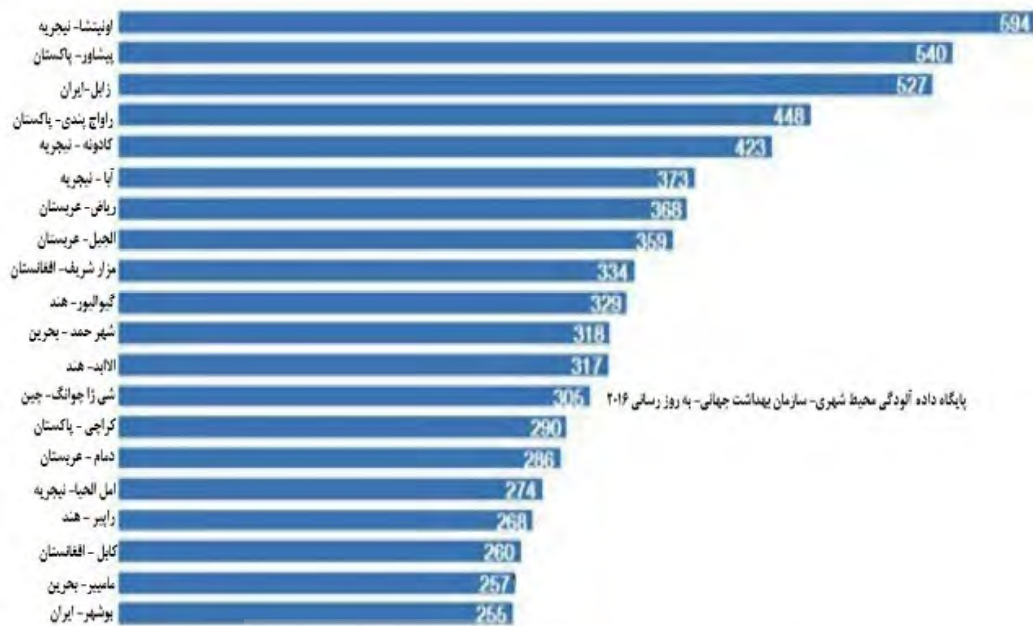
© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

## مقدمه

سالیان متمادی، هدف بیشتر شرکت‌ها، حداقل کردن هزینه‌ها بوده است و امروزه پاسخ‌گویی در زمینه آثار زیست‌محیطی تولیدات و فرایندهای تولیدی شرکت‌ها در کنار ایمنی و سلامت کارکنان، به هدف اصلی شرکت‌ها تبدیل شده است و در این رابطه، نقش سازمان‌های مردم‌نهاد انکارناپذیر است (غضنفری و فتح‌الله، ۱۳۹۶). پایداری در زنجیره تأمین، پس از معرفی مفهوم توسعه پایدار و به‌منظور تلفیق مفاهیم عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مطرح شد (عمرانی، منوری، جوزی و زمانی، ۱۳۸۸). زنجیره تأمین معکوس، تمام فعالیت‌های لجستیکی لازم برای تهیه محصول‌هایی است که مصرف‌کنندگان آن را استفاده کرده‌اند و قابلیت عرضه مجدد به بازار را دارند. تصویری که کاربران از آثار زیست‌محیطی و اجتماعی محصول انتخابی خود در ذهن دارند، در تصمیم‌گیری خرید آنها مؤثر است. یکی از قسمت‌های عمده این فعالیت‌ها که به صرفه‌جویی بسیار در هزینه‌ها می‌انجامد، فعالیت‌های لجستیکی است. لجستیک، بخش فیزیکی زنجیره تأمین را دربرمی‌گیرد و عمدتاً تمام فعالیت‌های مربوط به جریان مواد و کالاها، از مرحله تهیه مواد خام تا تولید محصول نهایی، از جمله حمل‌ونقل، انبارداری و غیره را شامل می‌شود. یکی از گرایش‌های جدید در مدیریت لجستیک، بازیافت، چرخه مجدد یا استفاده مجدد از محصول‌هاست. در این روش، محصول‌هایی که عمر مفیدشان به پایان رسیده است، بار دیگر از مصرف‌کننده نهایی خریداری می‌شوند و پس از پیاده‌کردن، قسمت‌هایی از محصول که قابلیت استفاده مجدد دارند، دوباره در قالب محصول‌های اسقاطی به چرخه حیات برمی‌گردند (غضنفری و فتح‌الله، ۱۳۸۵). از سویی، یکی از چارچوب‌های مفید برای ارزیابی آثار زیست‌محیطی، محصول‌های چرخه عمر محصول بازیافت شده است که در برنامه‌ریزی‌های توسعه اتحادیه اروپا، بر این موضوع در قالب چارچوب تأکید شده است (سورینگ و مولر، ۲۰۰۸).

شیشه از جمله محصول‌های پُرکاربرد در تمامی جنبه‌های زندگی روزمره و صنعتی انسان است و اهمیت اقتصادی زیادی دارد. در فرایند تولید شیشه، آلودگی‌های فراوانی به محیط زیست منتشر می‌شود که در این بین، آلودگی هوا اهمیت ویژه‌ای دارد. این آلودگی‌ها به‌طور عمده از ذرات گردوغبار  $CO$ ،  $NO_2$ ،  $SO_2$  و  $HF_2$  و فلزات سنگین تشکیل شده‌اند که در مراحل دریافت و آماده‌سازی مواد اولیه و فرایند ذوب و شکل‌دادن شیشه تولید می‌شوند. بر اساس آمار سازمان بازیافت و تبدیل مواد در سال ۱۳۸۵، حدود ۲/۲ درصد وزن کلی مواد زائد جامد را ضایعات شیشه تشکیل می‌دهد. سالانه، فقط در زباله‌های تهران، ۵۲ هزار و ۲۲۶ تن شیشه وجود دارد که متأسفانه از این میزان ضایعات شیشه‌ای تولید شده، تنها مقدار ناچیزی بازیافت می‌شود. به‌طور کلی متوسط ماهانه بازیافت شیشه در شهر تهران، حدود ۲ درصد است (عمرانی و همکاران، ۱۳۸۸). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دو شهر از شهرهای ایران، جزء ۲۰ شهر آلوده جهان است. از این رو، با توجه به اهمیت این مسئله و سهم شیشه در این آلودگی‌ها، در این پژوهش صنعت شیشه را برگزیدیم.

هدف این مقاله، باطراحی شبکه زنجیره تأمین در صنعت شیشه‌سازی با در نظر گرفتن هر سه بُعد پایداری در وضعیت عدم قطعیت است.



شکل ۱. فهرست ۲۰ شهر آلوده جهان

منبع: گزارش سازمان اقتصاد جهانی (۲۰۱۶)

بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، مدل جامعی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین وجود ندارد. هدف از طراحی شبکه زنجیره تأمین، شناسایی بهترین ساختار برای زنجیره تأمین است. طراحی مناسب بایستی قادر باشد که سازمان را به عملکرد بلندمدت خود برساند. در حقیقت، نبرد اصلی در بازارها و تنوع ترجیح مشتریان در کنار توسعه سریع فناوری و جهانی‌سازی، سازمان‌ها را وادار کرده است که خود را عضوی از زنجیره تأمین دانسته و برای آن کار کنند. برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار، تأثیر بالقوه هر عملی باید در سه بُعد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی درک شود. این اثر، نه تنها بایستی به صورت داخلی در شرکت در نظر گرفته شود، بلکه تا آنجا که ممکن است، باید در ارتباط با شرکای کسب و کار و محیط خارجی نیز لحاظ شود. جنبه زیست‌محیطی پایداری زنجیره تأمین به راهبرد خرید در اعضای زنجیره تأمین بستگی دارد. اغلب مدل‌های پیشین، برای ارزیابی تأمین‌کننده، بر مسائلی همچون هزینه، کیفیت، زمان تحویل و غیره متمرکز بوده‌اند؛ اما به انتشار گاز کربن توجه کافی نکرده‌اند. اخیراً اعضای زنجیره تأمین تحت فشار فزاینده‌ای برای کاهش انتشار گاز کربن در زنجیره تأمین قرار گرفته‌اند (شاو، شانکار، یاداو و تانکور<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲).

همان طور که قبلاً بیان شد، هدف اغلب شرکت‌های فعلی، توسعه پایدار شبکه زنجیره تأمین و تغییر طراحی محصول است؛ به گونه‌ای که برای محیط کم‌خطرتر باشند، انرژی کمتری مصرف کنند و سبزتر باشند. دیدگاه سنتی در کارخانه‌ها، تمرکز بر فرایندهای تولیدی یا کسب ارزش بیشتر در شبکه زنجیره تأمین بوده است. اما در سال‌های اخیر، شرکت‌ها و دانشگاهیان به حوزه مدیریت زنجیره تأمین پایدار به طور چشمگیری علاقه‌مند شده‌اند؛ به گونه‌ای که این موضوع با مرور مقاله‌های منتشر شده در مجله‌ها مشاهده می‌شود. با این حال، اغلب پژوهش‌ها به مسائل سبز توجه

داشته‌اند و بررسی جنبه‌های اجتماعی و نیز مطالعات مربوط به ادغام سه بُعد پایداری هنوز هم نادر است (سورینگ و مولر، ۲۰۰۸). به همین دلیل، مبحث پایداری نظر بسیاری از پژوهشگران و فعالان کسب‌وکارها را به خود جلب کرده است (گویدینن، خداوردی و جعفریان<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳).

در این پژوهش، بر مبنای نگرانی‌های جهانی در خصوص آثار زیست‌محیطی و اجتماعی و فعالیت‌های اقتصادی، نیاز ملی و هدف‌گذاری موجود در اسناد راهبردی کشور و همچنین، خلأیی که در ادبیات مرتبط مشاهده می‌شود، موضوع توسعه پایدار در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به بحث گذاشته خواهد شد. با توجه به اهمیت مدیریت پایان عمر محصول‌ها در چارچوب توسعه پایدار، طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و معکوس صنعت شیشه‌سازی مد نظر قرار گرفته است. این موضوع با توجه به نیاز بومی کشور، ماهیت بین رشته‌ای و خلأ جدی در ادبیات، از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله از یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه فازی، به منظور ارائه مدلی جدید برای حداقل‌سازی آثار زیست‌محیطی و بیشینه‌سازی پاسخ‌گویی اجتماعی و نیز، کمینه‌سازی هزینه‌ها بهره برده شده است. در این مدل، از روش خیمز به منظور قطعی کردن متغیرهای فازی و از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله بهره برده شده است.

### پیشینه پژوهش

به دلیل اهمیت روزافزون مردم به موضوع‌های زیست‌محیطی، در کنار کاهش هزینه و افزایش سود شرکت‌ها و همچنین دقت در افزایش آثار اجتماعی فعالیت‌ها، مردم برای زنجیره تأمین معکوس، اهمیت بیشتری قائل می‌شوند. به دلیل ماهیت به هم پیوسته تصمیم‌های مستقیم و معکوس در زنجیره تأمین، بررسی مستقل پارامترها و زمینه‌ها، به تولید نتایج بهینه منجر می‌شود (پیشوایی و ترابی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰) بنابراین، باید تصمیم‌های رو به جلو و معکوس در زنجیره تأمین، به صورت هم‌زمان بررسی شوند. از سویی، جذابیت پایداری باعث شده است که پژوهشگران بسیاری به بررسی موضوع پایداری در زنجیره تأمین بپردازند. تانگ و ژو<sup>۳</sup> (۲۰۱۲) با طبقه‌بندی پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص تحقیق در عملیات و دانش مدیریت، خلأهای موجود برای زمینه‌های پژوهشی آتی را بررسی و ارزیابی کردند. برندبرگ، گویندان، سارکیس و سورینگ<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) نیز با بررسی مدل‌های کمی، به ارزیابی جنبه پایداری در زنجیره تأمین رو به جلو پرداختند. چابانه، رامودهین و پاکوت<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) نیز یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را با در نظر گرفتن چرخه عمر محصول برای طراحی زنجیره تأمین پایدار به کار گرفتند.

جبارزاده، هاگتون و خسروجردی<sup>۶</sup> (۲۰۱۸) از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته تصادفی، برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس و پایدار با در نظر گرفتن هر سه بُعد پایداری بهره بردند. حسن‌زاده امین و باکی<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) نیز یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته متفاوتی را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس و پایدار با در نظر گرفتن سه بُعد پایداری ارائه کردند. در جدول ۱، مقاله‌های منتشر شده به اجمال مرور شده است.

1. Govindinen, Khodaverdi and Jafarian  
3. Tang and Zhou  
5. Chaabane, Ramudhin, & Paquet  
7. Hasanzadeh Amin and Baki

2. Pishvae and Torabi  
4. Brandenburg, Govindan, Sarkis, & Seuring  
6. Jabbarzadeh, Haughton, & Khosrojerdi

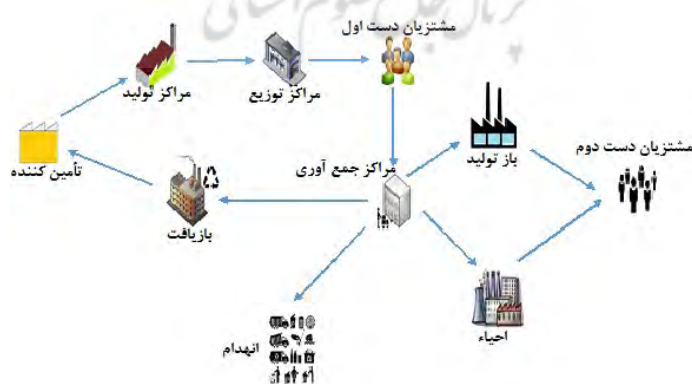
جدول ۱. مروری بر ادبیات پژوهش  
سنگ شنگ / سنگ شنگ

*	فهرستی ها										
	مقدار تقاضای برطرف نشده					مقدار محصول‌های مصرف شده مورد پردازش					
	مقدار تقاضای برطرف نشده										
	مقدار محصول‌های مصرف شده مورد پردازش										
	فناوری پردازش برگشتی‌ها										
	میزان حمل‌ونقل										
	روش حمل‌ونقل										
	موجودی										
	تعداد ماشین‌آلات										
	فناوری تولید										
	مقدار تولید										
	تخصیص										
	ظرفیت تسهیلات										
	مکان‌یابی تسهیلات										
	تأمین‌کنندگان										
	مراکز انهدام										
	مراکز بازیافت										
	مراکز احیا										
	مراکز توزیع مجدد										
	مراکز جداسازی										
	مراکز بازرسی / جمع‌آوری										
	مناطق مشتری										
	انبارها										
	پارک‌ها										
	مراکز توزیع										
	مراکز تولید										
	مراکز تأمین										
	اجتماعی										
	زیست‌محیطی										
	اقتصادی										
	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح امیخته					فصلی					
	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح امیخته					یوسته					
	برنامه‌ریزی عدد صحیح امیخته فازی					حلقه بسته					
	برنامه‌ریزی عدد صحیح امیخته تصادفی					معکوس					
	تقریب پیوسته					مستقیم					
	زن و همکاران (۲۰۱۹)										
	جبارزاده و همکاران (۲۰۱۸)										
	فلاحی و همکاران (۲۰۱۸)										
	سلیهانی و همکاران (۲۰۱۷)										
	کسبوند و همکاران (۲۰۱۷)										
	اسنین و یاسی (۲۰۱۷)										
	کاسبرو و همکاران (۲۰۱۶)										
	زادچیان و همکاران (۲۰۱۶)										
	کروناشنگه و همکاران (۲۰۱۶)										
	توکبا و همکاران (۲۰۱۴)										
	دامی و زنگ (۲۰۱۵)										
	چایانه و همکاران (۲۰۱۶)										
	ونگ و همکاران (۲۰۱۱)										
	گوردیس و سبو (۲۰۱۰)										
	سنگس و باهاریزو (۲۰۰۸)										
	پیشنوایی و ترابی (۲۰۱۰)										
	الدیمی و مرنگ (۲۰۱۶)										
	پیشپاوری و همکاران (۲۰۱۶)										
	مین و کو (۲۰۰۸)										
	فلاح و همکاران (۱۳۹۸)										
	حصندی و همکاران (۱۳۹۷)										
	پژوهش حاضر										

## روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر انواع جهت‌گیری‌های پژوهش، جزء پژوهش‌های توسعه‌ای است؛ چون سعی دارد که مدل‌های موجود در طراحی شبکه زنجیره تأمین را گسترش دهد و ابعاد پایداری را که در پژوهش‌های قبلی کمتر به آن اشاره شده بود، در نظر بگیرد. بنابراین، کار پژوهشگر در مقایسه با پژوهشگران قبلی، توسعه‌یافته‌تر و عمیق‌تر است. همچنین، از نظر ماهیت و چگونگی، جزء پژوهش‌های اکتشافی است. مسئله بررسی‌شده در این مقاله، طراحی شبکه زنجیره تأمین برای یک شرکت در صنعت تولید شیشه‌های جار و بطری است. هدف از طراحی مجدد شبکه این است که به دلیل افزایش تقاضای محصول برای شرکتی که هم‌اکنون به تولید این محصول‌ها می‌پردازد، شبکه زنجیره تأمین جدیدتر، بهینه‌تر و گسترده‌تری را طراحی کنیم. در مسئله این مقاله، طراحی شبکه با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی و اجتماعی، برای تحقق راهبرد پایداری سازمان و کسب رضایت ذی‌نفعان انجام شده است. در این شبکه که یک شبکه چندسطحی و چندمحصولی است، پس از تولید شدن محصول‌ها در مراکز تولیدی، از طریق مراکز توزیع برای مشتریان فرستاده می‌شود، محصول‌هایی که مشتریان از آنها راضی نیستند، برگشت داده شده و در مراکز جمع‌آوری نگهداری می‌شوند. در قسمت جمع‌آوری و بازرسی، درصدی از محصول‌های بازگشتی به مراکز انهدام ارسال می‌شوند تا منهدم شوند. مابقی محصول‌ها به دو شیوه مجدداً استفاده می‌شوند:

۱. شیشه‌های شکسته‌نشده در مراکز احیا یا تعمیر، شسته می‌شوند و آنهایی که نو هستند، از طریق مراکز توزیع، بار دیگر برای مشتریان ارسال خواهند شد. همچنین، برخی از محصول‌های تعمیر و احیا شده‌ای که این قابلیت را ندارند که به مناطق مشتریان ارسال شوند، از طریق مراکز توزیع مجدد به بازار دوم (محصول‌های دسته دوم تقریباً نو) ارسال می‌شوند.
۲. شیشه‌های شکسته‌شده، در مراکز بازیافت شسته می‌شوند و پس از خرد شدن، این مواد خام به مراکز تأمین ارسال می‌شود. بنابراین، همان‌طور که مطرح شد، محصول‌ها در جهت جلو تولید و بین مشتریان توزیع می‌شوند و در جهت رو به عقب به یکی از مراکز بازیافت، احیا، بازتولید یا انهدام برمی‌گردند.



شکل ۲. شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه



شبکه زنجیره تأمین فوق، از نوع شبکه حلقه بسته است که باعث می‌شود که امکان استفاده از صرفه‌جویی در مقیاس، استفاده مشترک از زیرساخت‌ها و رسیدن به طراحی بهینه کلی فراهم شود و همچنین هزینه‌های بالاسری و سر جمع هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و از زیربهرینگی جلوگیری می‌کند (پیشوایی، کیانفر و کریمی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). شکل ۳، شبکه زنجیره تأمین این مقاله را به نمایش گذاشته است. همچنین، مراحل اجرای این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.



### شکل ۳. مراحل انجام پژوهش

از آنجا که فناوری ذوب در مراکز تولید شیشه، بر عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شبکه، تأثیر زیادی دارد، بحث انتخاب فناوری ذوب در مسئله بازطراحی شبکه لحاظ شده است. پنج نوع فناوری ذوب برای تولید ظروف شیشه‌ای در نظر گرفته شده است که هر یک از این فناوری‌ها، هزینه‌های خاص و میزان آلاینده‌گی متفاوتی دارد. در نتیجه، در این شبکه، امکان انتخاب هر یک از پنج فناوری ذوب برای مراکز تولیدی لحاظ شده است. طبیعت پویای زنجیره تأمین و افق بلندمدت مسئله طراحی شبکه، درجه بالایی از عدم قطعیت را به این نوع از مسائل تحمیل می‌کند. از این رو، این موضوع عملکرد کل زنجیره را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (کلیبی، مارتل و گوتونی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰). اگر زنجیره تأمین معکوس هم مدنظر باشد، به دلیل سختی کنترل و تخمین میزان و کیفیت برگشتی‌ها، میزان عدم قطعیت موجود در پارامترهای مسئله طراحی شبکه افزایش می‌یابد (فلیچمن، روواد، بلوئنس و دکر<sup>۳</sup>، ۲۰۰۴). پارامترهایی از قبیل تقاضا، ظرفیت تسهیلات، هزینه‌ها و غیره، از جمله مواردی هستند که به‌علت کمبود دانش ما درباره رفتار هر یک از آنها، بر عدم قطعیت می‌افزاید. عدم قطعیت موجود در پارامترهای مسئله، از نوع عدم قطعیت معمول کسب‌وکار در مقابل عدم قطعیت حالت بحران است. با توجه به مطالب بیان شده، مفروضات مسئله به شرح زیر است:

- مدل به صورت چندسطحی و چندمحصولی است.

1. Pishvaei, Kianfar and Karimi

2. Klibi, Martel and Guitoun

3. Fleischmann, Bloemhof-Ruwaard, Beullens and Dekker

- جریان محصول‌ها فقط بین تسهیلات متوالی متفاوت وجود دارد و جریان محصول بین تسهیلات مشابه امکان‌پذیر نیست.
  - مکان و تعداد مشتریان بازارهای اول و دوم و همچنین تأمین‌کنندگان، ثابت و مشخص است.
  - پارامترهایی نظیر ظرفیت، هزینه، تقاضا، میزان تعمیر، بازتولید، انهدام، بازیافت، ظرفیت وسایل حمل‌ونقل، زمان‌های حمل محصول، قطعی نیستند و از تئوری فازی برای رفع عدم قطعیت استفاده شده است.
  - کیفیت محصول‌های تعمیر شده برای فروش در بازار دوم که از طریق مراکز توزیع مجدد به بازار دوم می‌رسد، با محصول‌های جدید تفاوت دارد.
  - کمبود جواب‌گویی به تقاضای مشتریان امکان‌پذیر است و هزینه‌ای برای تقاضای ارضا نشده مشتری در نظر گرفته می‌شود. این کمبود به صورت از دست رفته است.
  - مکان‌های مراکز بالقوه تولید، توزیع، توزیع مجدد، بازتولید، احیا یا تعمیر، بازیافت و انهدام مشخص است.
  - تمام برگشتی‌ها در مراکز جمع‌آوری جمع نمی‌شوند و برای برگشتی‌های جمع‌آوری نشده، جریمه لحاظ می‌شود.
  - مراکز بازرسی، جداسازی و مرتب‌سازی برای مرکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است.
  - هنگام احداث هر مرکز تولیدی، به طور بالقوه می‌توان از پنج نوع فناوری ذوب برای تولید محصول‌ها استفاده کرد؛ اما در عین حال، بعد از احداث، تنها یک فناوری به یک مرکز تولیدی تخصیص داده می‌شود.
  - موجودی در مراکز تولید، توزیع، توزیع مجدد و جمع‌آوری برای محصول‌ها در نظر گرفته شده است.
  - برای هر یک از مراکز قابل احداث، سه سطح ظرفیت در نظر گرفته شده است.
- شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه، از نوع شبکه حلقه بسته است که شبکه رو به جلو چهار سطح (تأمین، تولید، توزیع و مشتریان دسته اول) و شبکه برگشتی هفت سطح (مراکز جمع‌آوری، مراکز احیا، مراکز بازتولید، مراکز بازیافت، مراکز انهدام، مراکز توزیع مجدد و مشتریان دسته دوم) را دربرمی‌گیرد. مدل ریاضی ارائه شده دارای سه تابع هدف است: ۱. کمینه کردن هزینه کل؛ ۲. کمینه کردن آثار زیست‌محیطی و ۳. بیشینه کردن آثار اجتماعی زنجیره تأمین. در خصوص تابع هدف هزینه، چون در این مقاله سعی شده است که تمامی تسهیلات و جریان بین آنها مد نظر قرار گیرد و مدل جامعی ارائه شود، اکثر هزینه‌ها لحاظ شده است. تابع هدف هزینه عبارت است از:
- هزینه خرید (تهیه مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و هزینه خرید محصول‌های برگشتی از مشتریان)؛
  - هزینه جریمه (هزینه جریمه برای تقاضای ارضانشده و هزینه جریمه محصول برگشتی جمع‌آوری نشده)؛
  - هزینه‌های عملیاتی (هزینه تولید، هزینه بازتولید، هزینه جمع‌آوری، احیا، بازیافت و هزینه انهدام)؛
  - هزینه موجودی (هزینه برای قسمت تولید، توزیع، توزیع مجدد و جمع‌آوری)؛
  - هزینه حمل‌ونقل یا انتقال جریان بین تسهیلات؛
  - هزینه ثابت راه‌اندازی.
- در تابع هدف دوم، همواره سعی شده است تا آثاری که بر محیط زیست تأثیرات نامطلوبی می‌گذارد، به حداقل برسد. تسهیلات و انتقال جریان بین تسهیلات، در آلودگی محیط زیست تأثیر مهمی دارند و از آنجا که در مرور ادبیات

مشاهده شد، در بیشتر پژوهش‌ها، حداقل کردن انتشار گاز دی‌اکسیدکربن تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این مقاله نیز، حداقل کردن گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از عملیات درون تسهیلات و انتقال جریان بین تسهیلات، به‌عنوان تابع هدف زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. تابع هدف سوم، دربرگیرنده شاخص‌های فرصت‌های شغلی ثابت و متغیر، شاخص توسعه اقتصادی و شاخص متوسط روزهای کاری از دست‌رفته، به‌علت آسیب‌دیدگی است. در ادامه، مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی، همراه با نمادهایی که در طراحی شبکه زنجیره تأمین وجود دارد، معرفی می‌شود. شایان ذکر است که پارامترهای دارای عدم قطعیت با علامت تیلدا ( $\sim$ ) مشخص شده‌اند.

### اندیس‌ها

i	$i=1,2,\dots,I$	مجموعه مکان‌های ثابت برای تأمین‌کنندگان
j	$j=1,2,\dots,J$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید برای احداث کردن
k	$k=1,2,\dots,K$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع برای احداث کردن
l	$l=1,2,\dots,L$	مجموعه مکان‌های ثابت برای مشتری‌های بازار اول
m	$m=1,2,\dots,M$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری و بازرسی برای احداث کردن
n	$n=1,2,\dots,N$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز احیا یا تعمیر برای احداث کردن
o	$o=1,2,\dots,O$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز بازتولید برای احداث کردن
v	$v=1,2,\dots,V$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز بازیافت برای احداث کردن
c	$c=1,2,\dots,C$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز انهدام برای احداث کردن
r	$r=1,2,\dots,R$	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع مجدد برای احداث کردن
s	$s=1,2,\dots,S$	مجموعه مکان‌های ثابت برای مشتری‌های بازار دوم
p	$p=1,2,\dots,P$	مجموعه محصول‌ها
z	$z=1,2,\dots,Z$	مجموعه مواد اولیه
h	$h=1,2,\dots,H$	مجموعه سطوح ظرفیت برای مکان‌های بالقوه
f	$f=1,2,\dots,F$	مجموعه گزینه‌های بالقوه برای حمل‌ونقل
t	$t=1,2,\dots,T$	مجموعه فناوری‌های ذوب در مراکز تولید

### پارامترها

$\overline{MC}_{ptj}$	هزینه تولید محصول p در مرکز تولید j با فناوری ذوب t
$\overline{RMC}_{po}$	هزینه بازتولید هر واحد محصول p در مرکز بازتولید o
$\overline{DISD}_{pc}$	هزینه دفع هر واحد محصول p در مرکز دفع c
$\overline{CI}_{pm}$	هزینه جمع‌آوری و بازرسی محصول p در مرکز جمع‌آوری m
$\overline{RECO}_{pn}$	هزینه تعمیر هر واحد محصول p در مرکز تعمیر n
$\overline{RECY}_{pv}$	هزینه بازیافت هر واحد محصول p در مرکز بازیافت v

$\overline{HC}_{pj}$	هزینه نگهداری موجودی محصول p در مراکز تولید j
$\overline{HC}_{pk}$	هزینه نگهداری موجودی محصول p در مراکز توزیع k
$\overline{HC}_{pm}$	هزینه نگهداری موجودی محصول p در مراکز جمع‌آوری و بازرسی m
$\overline{HC}_{pr}$	هزینه نگهداری موجودی محصول p در مراکز توزیع مجدد r
$PCY_p$	هزینه جریمه برای تقاضای ارضانگشته محصول p
$PCZ_p$	هزینه جریمه محصول برگشتی جمع‌آوری نشده محصول p
$\overline{PC}_{zi}$	هزینه خرید یا تهیه هر واحد ماده اولیه z از تأمین‌کننده i
$\overline{RPC}_{pl}$	هزینه خرید محصول برگشتی p از مشتری l
MAJ	بیشینه تعداد مراکز تولید برای احداث
MAK	بیشینه تعداد مراکز توزیع برای احداث
MAM	بیشینه تعداد مراکز جمع‌آوری و بازرسی برای احداث
MAN	بیشینه تعداد مراکز تعمیر برای احداث
MAO	بیشینه تعداد مراکز بازتولید برای احداث
MAV	بیشینه تعداد مراکز بازیافت برای احداث
MAC	بیشینه تعداد مراکز انهدام برای احداث
MAD	بیشینه تعداد مراکز توزیع مجدد برای احداث
$\overline{D}_{pl}$	میزان تقاضا برای محصول p در مراکز مشتری l
$\overline{R}_{pl}$	میزان برگشتی‌ها از مشتری l برای محصول p
$\overline{SP}_{ps}$	قیمت فروش محصول p در بازار دوم s
$\overline{CAQ}_{jth}$	ظرفیت تولید مراکز تولید j با فناوری t و سطح ظرفیت h
$\overline{CAR}_{kth}$	ظرفیت توزیع مراکز توزیع k با سطح ظرفیت h
$\overline{CAS}_i$	ظرفیت تأمین‌کننده i
$\overline{CAT}_{mh}$	ظرفیت مراکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت h
$\overline{CAU}_{nh}$	ظرفیت تعمیر محصول‌ها در مراکز تعمیر n با سطح ظرفیت h
$\overline{CAV}_{rh}$	ظرفیت توزیع مجدد محصول‌ها در مرکز توزیع مجدد r با سطح ظرفیت h
$\overline{CAW}_{oh}$	ظرفیت بازتولید محصول‌ها در مراکز بازتولید o با سطح ظرفیت h
$\overline{CAY}_{vh}$	ظرفیت بازیافت محصول‌ها در مرکز بازیافت v با سطح ظرفیت h
$\overline{CAZ}_{ch}$	ظرفیت انهدام محصول‌ها در مراکز انهدام c یا دفع c با سطح ظرفیت h
$\overline{TK}_{zijf}$	هزینه حمل هر واحد ماده اولیه z از تأمین‌کننده i به مراکز تولید j با وسیله حمل و نقل f

$\overline{TC}L_{pjkf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز تولید z به مرکز توزیع k با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}M_{pklf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز توزیع k به مناطق مشتری l با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}N_{plmf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مناطق مشتری l به مراکز جمع‌آوری و بازرسی m با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}O_{pmnf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مراکز جمع‌آوری و بازرسی m به مراکز تعمیر n با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}P_{pmof}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مراکز جمع‌آوری و بازرسی m به مراکز بازتولید o با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}Q_{pmvf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مراکز جمع‌آوری و بازرسی m به مراکز بازیافت v با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}R_{pmcf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مراکز جمع‌آوری و بازرسی m به مراکز دفع یا انهدام c با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}S_{pnkf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز تعمیر n به مرکز توزیع k با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}T_{pnrf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز تعمیر n به مرکز توزیع مجدد r با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}U_{prsf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز توزیع مجدد r به بازار دوم s با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}V_{porf}$	هزینه حمل هر واحد محصول p بازتولید شده از مرکز تولید o به مرکز توزیع مجدد r با وسیله حمل و نقل f
$\overline{TC}W_{zvf}$	هزینه حمل هر واحد ماده اولیه بازیافت شده z از مرکز بازیافت v به تأمین‌کننده i با وسیله حمل و نقل f
$PER_{pz}$	میزان به‌کارگیری ماده اولیه z در تولید محصول p
$\overline{RR}_{pl}$	میزان بازگشت محصول‌های استفاده شده p از مناطق مشتری l به مراکز جمع‌آوری m
$\overline{RR}M_p$	میزان تولید مجدد محصول‌های استفاده شده p
$\overline{RR}ECO_p$	میزان تعمیر محصول‌های استفاده شده p
$\overline{RR}ECY_p$	میزان بازیافت محصول‌های استفاده شده p
$\overline{RD}ISP_p$	میزان دفع مجدد محصول‌های استفاده شده p
$\overline{FR}_{jht}$	هزینه ثابت احداث مرکز تولید z با فناوری t و سطح ظرفیت h
$\overline{FS}_{kh}$	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت h
$\overline{FT}_{mh}$	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری و بازرسی m با سطح ظرفیت h
$\overline{FU}_{nh}$	هزینه ثابت احداث مرکز تعمیر n با سطح ظرفیت h
$\overline{FV}_{rh}$	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع مجدد r با سطح ظرفیت h
$\overline{FW}_{vh}$	هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت v با سطح ظرفیت h

$\overline{F}Y_{oh}$	هزینه ثابت احداث مرکز بازتولید o با سطح ظرفیت h
$\overline{F}Z_{ch}$	هزینه ثابت احداث مرکز انهدام c با سطح ظرفیت h
$\overline{CAP}L_{fij}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل مواد اولیه از تأمین‌کننده i به مرکز تولید j
$\overline{CAP}M_{fjk}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول از مرکز تولید j به مرکز توزیع k
$\overline{CAP}N_{fkl}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l
$\overline{CAP}O_{flm}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول استفاده شده از مناطق مشتری l به مرکز جمع‌آوری m و بازرسی
$\overline{CAP}P_{fmc}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی m به مرکز دفع c
$\overline{CAP}Q_{fmn}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی m به مرکز تعمیر n
$\overline{CAP}R_{fmo}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی m به مرکز باز تولید o
$\overline{CAP}S_{fmv}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی m به مرکز بازیافت v
$\overline{CAP}T_{fnk}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول تعمیر شده از مرکز تعمیر n به مرکز توزیع k
$\overline{CAP}U_{fnr}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول تعمیر شده از مرکز تعمیر n به مرکز توزیع مجدد r
$\overline{CAP}V_{frs}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول تعمیر و بازیافت شده از مرکز توزیع مجدد r به مناطق بازار دوم s
$\overline{CAP}W_{for}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل محصول باز تولید شده از مرکز باز تولید o به مرکز توزیع مجدد r
$\overline{CAP}Y_{fvi}$	ظرفیت وسیله حمل و نقل f برای حمل مواد اولیه بازیافت شده از مرکز بازیافت v به تأمین‌کننده i
$EM_{ptj}$	میزان انتشار کربن به‌ازای تولید هر واحد محصول p در مراکز تولید j با فناوری ذوب t
$ERECO_{pn}$	میزان انتشار کربن به‌ازای تعمیر هر واحد محصول p استفاده شده در مراکز تعمیر n
$ERM_{po}$	میزان انتشار کربن به‌ازای باز تولید هر واحد محصول p استفاده شده در مراکز باز تولید o
$ERECY_{pv}$	میزان انتشار کربن به‌ازای بازیافت هر واحد محصول p استفاده شده در مراکز بازیافت v
$EDIS_{pc}$	میزان انتشار کربن به‌ازای انهدام هر واحد محصول p استفاده شده در مراکز انهدام c
$ETM_{zijf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد ماده اولیه z از تأمین‌کننده i به مرکز تولید j با وسیله حمل و نقل f
$ETN_{pjkf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول p از مرکز تولید j به مرکز توزیع k با وسیله حمل و نقل f

$ETO_{pklf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول $p$ از مرکز توزیع $k$ به مناطق مشتری $l$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETP_{plmf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول $p$ استفاده شده از مناطق مشتری $l$ به مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETQ_{pmof}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول $p$ استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز بازتولید $o$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETR_{pmcf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول $p$ استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز دفع $c$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETS_{pmvf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول $p$ استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز بازیافت $v$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETT_{pmnf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول $p$ استفاده شده از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز تعمیر یا احیای $n$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETU_{pnkf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز احیا یا تعمیر $n$ به مرکز توزیع $k$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETV_{pnrf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز احیا یا تعمیر $n$ به مرکز توزیع مجدد $r$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETW_{porf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول بازتولید شده $p$ از مرکز باز تولید $o$ به مرکز توزیع مجدد $r$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETY_{zvi f}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد ماده اولیه بازیافت شده $z$ از مرکز بازیافت $v$ به تأمین‌کننده $i$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
$ETZ_{prsf}$	میزان انتشار کربن به‌ازای حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز توزیع مجدد $r$ به بازار دوم $s$ با وسیله حمل‌ونقل $f$
SEA	صرفه‌جویی زیست‌محیطی به‌دلیل استفاده مجدد از محصول‌های تعمیر شده
SEB	صرفه‌جویی زیست‌محیطی به‌دلیل استفاده مجدد از مواد اولیه بازیافت شده
SCA	صرفه‌جویی اقتصادی به‌دلیل استفاده مجدد از محصول‌های تعمیر شده
SCB	صرفه‌جویی اقتصادی به‌دلیل استفاده مجدد از مواد اولیه بازیافت شده
$\overline{DAM}_{jt}$	کسری از محصول‌های تولید شده در مرکز تولید $z$ با فناوری $t$ که به مشتریان آسیب می‌رساند
$\overline{W}_{jt}$	کسری از محصول‌های تولید شده شکسته در مرکز تولید $z$ با فناوری $t$
$\overline{TT}_{zij}$	زمان حمل ماده اولیه $z$ از مراکز تأمین $i$ به مراکز تولید $z$
$\overline{TT}_{pjk}$	زمان حمل محصول $p$ از مراکز تولید $z$ به مراکز توزیع $k$
$\overline{TT}_{pkl}$	زمان حمل محصول $p$ از مراکز توزیع $k$ به مناطق مشتری $l$
$\overline{TTP}_{pt}$	زمان تولید محصول $p$ در مراکز تولید $z$ با فناوری ذوب $t$

## متغیرهای تصمیم مدل

$QZI_{zijf}$	میزان ماده اولیه حمل شده $Z$ از تأمین‌کننده $i$ به مرکز تولید $z$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPJ_{pjkf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز تولید $z$ به مرکز توزیع $k$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPK_{pklf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز توزیع $k$ به مناطق مشتری $l$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPL_{plmf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مناطق مشتری $l$ به مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPMO_{pmof}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز بازتولید $o$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPMC_{pmcf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز دفع $c$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPMV_{pmvf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز بازیافت $v$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPMN_{pmnf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری و بازرسی $m$ به مرکز احیا یا تعمیر $n$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPNK_{pnkf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز تعمیر $n$ به مرکز توزیع $k$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPNR_{pnrf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز تعمیر $n$ به مرکز توزیع مجدد $r$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPO_{porf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز بازتولید $o$ به مرکز توزیع مجدد $r$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QZV_{zvivf}$	میزان ماده اولیه حمل شده $Z$ از مرکز بازیافت $v$ به مرکز تأمین‌کننده $i$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QPR_{prsf}$	میزان محصول حمل شده $p$ از مرکز توزیع مجدد $r$ به مرکز بازار دوم $s$ با وسیله حمل و نقل $f$
$QMP_{ptjt}$	میزان محصول تولید شده $p$ در مرکز تولید $z$ با فناوری ذوب $t$
$QIC_{pk}$	میزان موجودی محصول $p$ در مراکز توزیع $k$
$QID_{pm}$	میزان موجودی محصول $p$ در مراکز جمع‌آوری $m$
$QIJ_{pr}$	میزان موجودی محصول $p$ در مراکز توزیع مجدد $r$
$QIA_{pj}$	میزان موجودی محصول $p$ در مراکز تولید $z$
$NNS_{lp}$	تعداد تقاضای ارضا نشده مشتری $l$ برای محصول $p$
$NNY_{pl}$	تعداد برگشتی‌های جمع‌آوری نشده برای محصول $p$ از مشتری $l$
$A_{fij}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل مواد اولیه از تأمین‌کننده $i$ به مراکز تولید $z$ انتخاب شود به آن عدد $1$ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$B_{fjk}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز تولید $z$ به مراکز توزیع $k$ انتخاب شود به آن عدد $1$ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$C_{fkl}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز توزیع $k$ به مراکز مشتری $l$ انتخاب شود به آن عدد $1$ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$D_{fjm}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز مشتری $l$ به مراکز جمع‌آوری $m$ انتخاب شود به آن عدد $1$ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$E_{fmc}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز جمع‌آوری $m$ به مراکز دفع $c$ انتخاب شود به آن عدد $1$ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.



$G_{fmn}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز جمع‌آوری $m$ به مراکز تعمیر $n$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$H_{fmo}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز جمع‌آوری $m$ به مراکز بازتولید $o$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$F_{fmv}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز جمع‌آوری $m$ به مراکز بازیافت $v$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$I_{fnk}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز تعمیر $n$ به مراکز توزیع $k$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$K_{fnr}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز تعمیر $n$ به مراکز توزیع مجدد $r$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$L_{frs}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز توزیع مجدد $r$ به مراکز بازار دوم $s$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$M_{for}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل محصول از مراکز بازتولید $o$ به مراکز توزیع مجدد $r$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$N_{fvi}$	اگر وسیله حمل $f$ برای حمل ماده اولیه از مراکز بازیافت $v$ به تأمین‌کننده $i$ انتخاب شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$O_{jth}$	اگر مرکز تولید $z$ با فناوری $t$ و سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$P_{kh}$	اگر مرکز توزیع $k$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$Q_{mh}$	اگر مرکز جمع‌آوری $m$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$R_{nh}$	اگر مرکز تعمیر $n$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$S_{oh}$	اگر مرکز بازتولید $o$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$T_{vh}$	اگر بازیافت $v$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$U_{ch}$	اگر مرکز دفع $c$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.
$V_{rh}$	اگر مرکز مجدد $r$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود به آن عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت صفر است.

با استفاده از نمادهای فوق، مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه به شرح ذیل

ارائه می‌شود.

## توابع هدف مدل

مدل ارائه شده در این مقاله، شامل سه تابع هدف است: ۱. کمینه کردن هزینه‌های کل؛ ۲. کمینه کردن آثار زیست‌محیطی؛ ۳. بیشینه کردن آثار اجتماعی.

• تابع هدف اول - حداقل‌سازی هزینه‌های کل: هزینه‌های در نظر گرفته شده در طراحی شبکه مدنظر در این مقاله عبارت است از:

- هزینه خرید (تهیه مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و هزینه خرید محصولات برگشتی از مشتریان)؛
- هزینه جریمه (هزینه جریمه برای تقاضای ارضا نشده و هزینه جریمه محصول برگشتی جمع‌آوری نشده)؛
- هزینه‌های عملیاتی (هزینه تولید، هزینه باز تولید، هزینه جمع‌آوری، احیا، بازیافت و هزینه انهدام)؛
- هزینه موجودی (هزینه برای قسمت تولید، توزیع، توزیع مجدد و جمع‌آوری)؛
- هزینه حمل‌ونقل یا انتقال جریان بین تسهیلات
- هزینه ثابت راه‌اندازی رابطه ریاضی این تابع هدف در زیر نشان داده شده است.

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & [\sum_j \sum_h \sum_t \overline{FR}_{jht} \cdot O_{jht} + \sum_k \sum_h \overline{FS}_{kh} \cdot P_{kh} + \sum_m \sum_h \overline{FT}_{mh} \cdot Q_{mh} + \sum_n \sum_h \overline{FU}_{nh} \cdot R_{nh} + \\ & \sum_o \sum_h \overline{FY}_{oh} \cdot S_{oh} + \sum_v \sum_h \overline{FW}_{vh} \cdot T_{vh} + \sum_c \sum_h \overline{FZ}_{ch} \cdot U_{ch} + \sum_r \sum_h \overline{FV}_{rh} \cdot V_{rh}] + \\ & [\sum_z \sum_i \sum_j \sum_f \overline{TC}_{zif} \cdot QZ_{zif} + \sum_p \sum_j \sum_k \sum_f \overline{TC}_{pjkf} \cdot QP_{pjkf} + \\ & \sum_p \sum_k \sum_l \sum_f \overline{TC}_{pklf} \cdot QP_{pklf} + \sum_p \sum_l \sum_m \sum_f \overline{TC}_{plmf} \cdot QP_{plmf} + \\ & \sum_p \sum_m \sum_n \sum_f \overline{TC}_{pmnf} \cdot QP_{pmnf} + \sum_p \sum_m \sum_o \sum_f \overline{TC}_{pmof} \cdot QP_{pmof} + \\ & \sum_p \sum_m \sum_v \sum_f \overline{TC}_{pmvf} \cdot QP_{pmvf} + \sum_p \sum_m \sum_c \sum_f \overline{TC}_{pmcf} \cdot QP_{pmcf} + \\ & \sum_p \sum_n \sum_k \sum_f \overline{TC}_{pnkf} \cdot QP_{pnkf} + \sum_p \sum_n \sum_r \sum_f \overline{TC}_{pnrf} \cdot QP_{pnrf} + \\ & \sum_p \sum_r \sum_s \sum_f \overline{TC}_{prsf} \cdot QP_{prsf} + \sum_p \sum_o \sum_r \sum_f \overline{TC}_{porf} \cdot QP_{porf} + \\ & \sum_z \sum_v \sum_i \sum_f \overline{TC}_{zgif} \cdot QZ_{zgif}] + [\sum_p \sum_t \sum_j \overline{MC}_{ptj} \cdot QM_{ptj} + \\ & \sum_p \sum_m \sum_o \sum_f \overline{MC}_{pof} \cdot QP_{pof} + \sum_p \sum_m \sum_c \sum_f \overline{DISD}_{pc} \cdot QP_{pmcf} + \\ & \sum_p \sum_l \sum_m \sum_f \overline{CI}_{plm} \cdot QP_{plmf} + \sum_p \sum_m \sum_n \sum_f \overline{RECO}_{pn} \cdot QP_{pmnf} + \\ & \sum_p \sum_m \sum_v \sum_f \overline{RECY}_{pv} \cdot QP_{pmvf}] + [\sum_l \sum_p \overline{PCY}_p \cdot NNS_{lp} + \sum_p \sum_l \overline{PCZ}_p \cdot NNY_{pl}] + \\ & [\sum_p \sum_j \overline{HC}_{pj} \cdot QI_{pj} + \sum_p \sum_k \overline{HC}_{pk} \cdot QI_{pk} + \sum_p \sum_m \overline{HC}_{pm} \cdot QI_{pm} + \sum_p \sum_r \overline{HC}_{pr} \cdot QI_{pr}] + \\ & [\sum_z \sum_i \sum_j \sum_f \overline{PC}_{zi} \cdot QZ_{zif} + \sum_p \sum_l \sum_m \sum_f \overline{RPC}_{pl} \cdot QP_{plmf}] - \text{SCA} \cdot \sum_p \sum_n \sum_k \sum_f QP_{pnkf} - \\ & \text{SCB} \cdot \sum_z \sum_v \sum_i \sum_f QZ_{zgif} - \sum_p \sum_r \sum_s \sum_f \overline{SP}_{ps} \cdot QP_{prsf} \end{aligned}$$

• تابع هدف دوم - حداقل‌سازی آثار زیست‌محیطی: در این تابع هدف سعی می‌شود تا آثار زیست‌محیطی که بر محیط زیست تأثیرات نامطلوبی می‌گذارد، به کمترین حد برسد. تسهیلات و انتقال جریان بین تسهیلات، در آلودگی محیط زیست تأثیر مهمی دارند و از آنجا که در مرور ادبیات مشاهده شد، بیشتر پژوهش‌های پیشین، کمینه کردن انتشار گاز دی‌اکسیدکربن را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته‌اند. در این مقاله هم کمینه کردن گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از عملیات درون تسهیلات و انتقال جریان بین تسهیلات، تابع هدف زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. این تابع هدف در قالب رابطه ۲ نشان داده شده است.

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = & [\sum_p \sum_t \sum_j \sum_h EM_{ptj} \cdot O_{jth} + \sum_p \sum_n \sum_h ERECO_{pn} \cdot R_{nh} + \sum_p \sum_o \sum_h ERM_{po} \cdot S_{oh} + \\ & \sum_p \sum_v \sum_h ERECY_{pv} \cdot T_{vh} + \sum_p \sum_c \sum_h EDIS_{pc} \cdot U_{ch}] + [\sum_z \sum_i \sum_j \sum_f ETM_{zif} \cdot QZ_{zif} + \\ & \sum_p \sum_j \sum_k \sum_f ETN_{pjkf} \cdot QPJ_{pjkf} + \sum_p \sum_k \sum_l \sum_f ETO_{pklf} \cdot QPK_{pklf} + \\ & \sum_p \sum_l \sum_m \sum_f ETP_{plmf} \cdot QPL_{plmf} + \sum_p \sum_m \sum_o \sum_f ETQ_{pmof} \cdot QPMO_{pmof} + \\ & \sum_p \sum_m \sum_c \sum_f ETR_{pmcf} \cdot QPMC_{pmcf} + \sum_p \sum_m \sum_v \sum_f ETS_{pmvf} \cdot QPMV_{pmvf} + \\ & \sum_p \sum_m \sum_n \sum_f ETT_{pmnf} \cdot QPMN_{pmnf} + \sum_p \sum_n \sum_k \sum_f ETU_{pnkf} \cdot QPNK_{pnkf} + \\ & \sum_p \sum_n \sum_r \sum_f ETV_{pnrf} \cdot QPNR_{pnrf} + \sum_p \sum_o \sum_r \sum_f ETW_{porf} \cdot QPO_{porf} + \\ & \sum_z \sum_v \sum_i \sum_f ETY_{zviv} \cdot QZV_{zviv} + \sum_p \sum_r \sum_s \sum_f ETZ_{prsf} \cdot QPR_{prsf}] + [\sum_p \sum_t \sum_j (1 - \\ & \tilde{W}_{jt}) \cdot \overline{DAM}_{jt} \cdot QMP_{ptj}] - \text{SEA} \cdot \sum_p \sum_n \sum_k \sum_f QPNK_{pnkf} - \text{SEB} \cdot \sum_z \sum_v \sum_i \sum_f QZV_{zviv} \end{aligned}$$

- تابع هدف سوم - بیشینه کردن پاسخ‌گویی اجتماعی زنجیره تأمین: این تابع هدف، دربرگیرنده شاخص‌های ایجاد فرصت‌های شغلی، توسعه اقتصادی و متوسط روزهای کاری از دست‌رفته به‌علت آسیب‌دیدگی است. در این مقاله، فرصت‌های شغلی به دو دسته ثابت و متغیر طبقه‌بندی شده‌اند. فرصت‌های شغلی ثابت به ظرفیت تسهیلات وابسته نیستند، مانند شغل‌های مدیریتی؛ اما شغل‌های متغیر مانند کار کارگران، بسته به ظرفیت تسهیلات، متفاوت‌اند. در این تابع هدف، سعی شده است تا فرصت‌های شغلی ثابت و متغیر به‌صورت مجزا مدل شوند. در خصوص سلامت و ایمنی کارکنان، معمولاً از شاخص «تعداد مصدومان و آسیب‌دیدگان» و «میزان روزهای کاری از دست‌رفته، به‌علت آسیب‌دیدگی و مصدومیت» استفاده می‌شود. در این مقاله از شاخص متوسط تعداد روزهای کاری از دست‌رفته به‌علت آسیب‌دیدگی استفاده شده است. شاخص سوم، شاخص توسعه اقتصادی است. احداث تسهیلات در مناطق محروم و کمتر توسعه‌یافته، به ارتقای توسعه اقتصادی در آن مناطق منجر می‌شود. در حوزه توسعه اقتصادی، شاخص توسعه‌یافتگی استان‌های کشور (ضرابی و شاه‌یوندی، ۱۳۸۹) استفاده شده است.

رابطه (۳)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_3 = & W_{job} \cdot ([\sum_j \sum_h \sum_t FJOA_{jht} \cdot O_{jht} + \sum_k \sum_h FJOB_{kh} \cdot P_{kh} + \sum_m \sum_h FJOC_{mh} \cdot Q_{mh} \\ & + \sum_n \sum_h FJOD_{nh} \cdot R_{nh} + \sum_o \sum_h FJOF_{oh} \cdot S_{oh} + \sum_v \sum_h FJOH_{vh} \cdot T_{vh} + \sum_c \sum_h FJOJ_{ch} \cdot U_{ch} \\ & + \sum_r \sum_h FJOK_{rh} \cdot V_{rh}] + [\sum_j \sum_t \sum_h \sum_p \frac{VJOA_{jth} \cdot QMP_{ptj}}{\overline{CAQ}_{jth}} + \sum_k \sum_h \sum_p \sum_j \sum_f \frac{VJOB_{kh} \cdot QPJ_{pjkf}}{\overline{CAR}_{kh}} + \\ & \sum_m \sum_h \sum_p \sum_l \frac{VJOC_{mh} \cdot \overline{D}_{pl} \cdot WC_{lm} \cdot \overline{RR}_{pl}}{\overline{CAT}_{mh}} + \sum_r \sum_h \sum_p \sum_n \sum_o \sum_f \frac{VJOK_{rh} \cdot (QPNR_{pnrf} + QPO_{porf})}{\overline{CAV}_{rh}} \\ & + \sum_n \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{VJOD_{nh} \cdot QPMN_{pmnf} \cdot \alpha A_m}{\overline{CAU}_{nh}} + \sum_o \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{VJOF_{oh} \cdot QPMO_{pmof} \cdot \alpha B_m}{\overline{CAW}_{oh}} + \\ & \sum_v \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{VJOH_{vh} \cdot QPMV_{pmvf} \cdot \alpha C_m}{\overline{CAV}_{vh}} + \sum_c \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{VJOJ_{ch} \cdot QPMC_{pmcf} \cdot \alpha D_m}{\overline{CAZ}_{ch}}]) - \\ & W_{lod} \cdot ([\sum_j \sum_h \sum_t DA_{jht} \cdot O_{jht} + \sum_k \sum_h DB_{kh} \cdot P_{kh} + \sum_m \sum_h DC_{mh} \cdot Q_{mh} + \sum_n \sum_h DD_{nh} \cdot R_{nh} + \\ & \sum_o \sum_h DE_{oh} \cdot S_{oh} + \sum_v \sum_h DF_{vh} \cdot T_{vh} + \sum_c \sum_h DG_{ch} \cdot U_{ch} + \sum_r \sum_h DH_{rh} \cdot V_{rh} \\ & + \sum_j \sum_t \sum_h \sum_p \frac{DI_{jth} \cdot QMP_{ptj}}{\overline{CAQ}_{jth}} + \sum_k \sum_h \sum_p \sum_j \sum_f \frac{DK_{kh} \cdot QPJ_{pjkf}}{\overline{CAR}_{kh}} + \sum_m \sum_h \sum_p \sum_l \frac{DJ_{mh} \cdot \overline{D}_{pl} \cdot WC_{lm} \cdot \overline{RR}_{pl}}{\overline{CAT}_{mh}} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_r \sum_h \sum_p \sum_n \sum_o \sum_f \frac{DP_{rh} \cdot (QP_{nr} p_{nr} f + QP_{o} p_{o} f)}{CAV_{rh}} + \sum_n \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{DL_{nh} \cdot QPMN_{p} m n f \cdot \alpha A_m}{CAU_{nh}} + \\ & \sum_o \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{DM_{oh} \cdot QPMO_{p} m o f \cdot \alpha B_m}{CAW_{oh}} + \sum_v \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{DN_{vh} \cdot QPMV_{p} m v f \cdot \alpha C_m}{CAY_{vh}} + \\ & \sum_c \sum_h \sum_p \sum_m \sum_f \frac{DO_{ch} \cdot QPMC_{p} m c f \cdot \alpha D_m}{CAZ_{ch}} + W_{eod} \cdot (\sum_j \sum_h \sum_t O_{jht} \cdot \overline{EVA}_{jh} \cdot (1 - EDA_j) + \\ & \sum_k \sum_h \overline{EVB}_{kh} \cdot (1 - EDB_k) \cdot P_{kh} + \sum_m \sum_h \overline{EVC}_{mh} \cdot (1 - EDC_m) \cdot Q_{mh} + \sum_n \sum_h \overline{EVD}_{nh} \cdot (1 - \\ & EDD_n) \cdot R_{nh} + \sum_o \sum_h \overline{EVE}_{oh} \cdot (1 - EDE_o) \cdot S_{oh} + \sum_v \sum_h \overline{EVF}_{vh} \cdot (1 - EDF_v) \cdot T_{vh} + \\ & \sum_c \sum_h \overline{EVH}_{ch} \cdot (1 - EDH_c) \cdot U_{ch} + \sum_r \sum_h \overline{EVR}_{rh} \cdot (1 - EDK_r) \cdot V_{rh}) \end{aligned}$$

### محدودیت‌های مدل

در این قسمت محدودیت‌های مدل پیشنهادی بررسی شده است.

### محدودیت‌های سطح ظرفیت تسهیلات

محدودیت‌های ۴ تا ۱۰ تضمین می‌کنند که مراکز توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، بازتولید، بازیافت، دفع و توزیع مجدد، حداکثر با یک سطح ظرفیت احداث شوند.

$$\sum_h P_{kh} \leq 1 \quad \forall k \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\sum_h Q_{mh} \leq 1 \quad \forall m \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\sum_h R_{nh} \leq 1 \quad \forall n \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\sum_h S_{oh} \leq 1 \quad \forall o \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\sum_h T_{vh} \leq 1 \quad \forall v \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_h U_{ch} \leq 1 \quad \forall c \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_h V_{rh} \leq 1 \quad \forall r \quad \text{رابطه ۱۰}$$

محدودیت ۱۱، تضمین می‌کند که تنها یک سطح ظرفیت و یک فناوری ذوب به هر مرکز تولید شده تخصیص

یابد.

$$\sum_t \sum_h O_{jth} \leq 1 \quad \forall j \quad \text{رابطه ۱۱}$$

محدودیت‌های ۱۲ تا ۱۹، بیشینه تعداد مراکز توزیع، تولید، جمع‌آوری، تعمیر، بازتولید، بازیافت، انهدام و توزیع

مجدد را که از پتانسیل احداث برخوردارند، محدود می‌کنند.

$$\sum_k \sum_h P_{kh} \leq MAK \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_j \sum_h \sum_t O_{jth} \leq MAJ \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_m \sum_h Q_{mh} \leq MAM \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_n \sum_h R_{nh} \leq MAN \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_o \sum_h S_{oh} \leq MAO \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_v \sum_h T_{vh} \leq MAV \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_c \sum_h U_{ch} \leq MAC \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_r \sum_h V_{rh} \leq MA \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

محدودیت‌های ۲۰ تا ۳۲، محدودیت ظرفیت حمل جریان محصول بین مراکز مختلف را نشان می‌دهد.

$$\sum_z QZI_{zijf} \leq A_{fij} \cdot \overline{CAPL}_{fij} \quad \forall i, j, f \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\sum_p QPJ_{pjkf} \leq B_{fjk} \cdot \overline{CAPM}_{fjk} \quad \forall j, k, f \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sum_p QPK_{pklf} \leq C_{fkl} \cdot \overline{CAPN}_{fkl} \quad \forall k, l, f \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\sum_p QPL_{plmf} \leq D_{flm} \cdot \overline{CAPO}_{flm} \quad \forall l, m, f \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_p QPMO_{pmof} \leq H_{fmo} \cdot \overline{CAPR}_{fmo} \quad \forall m, o, f \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\sum_p QPMC_{pmcf} \leq E_{fmc} \cdot \overline{CAPP}_{fmc} \quad \forall m, c, f \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\sum_p QPMV_{pmvf} \leq F_{fmv} \cdot \overline{CAPS}_{fmv} \quad \forall m, v, f \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$\sum_p QPMN_{pmnf} \leq G_{fmn} \cdot \widehat{CAP}Q_{fmn} \quad \forall m, n, f \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\sum_p QPNK_{pnkf} \leq I_{fnk} \cdot \widehat{CAP}T_{fnk} \quad \forall n, k, f \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\sum_p QPNR_{pnrf} \leq K_{fnr} \cdot \widehat{CAP}U_{fnr} \quad \forall n, r, f \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_p QPO_{porf} \leq M_{for} \cdot \widehat{CAP}W_{for} \quad \forall o, r, f \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\sum_z QZV_{zvi} \leq N_{fvi} \cdot \widehat{CAP}Y_{fvi} \quad \forall v, i, f \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\sum_p QPR_{prsf} \leq L_{frs} \cdot \widehat{CAP}V_{frs} \quad \forall r, s, f \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

محدودیت‌های ۳۳ تا ۴۴ نشان می‌دهند که حداکثر یک نوع تسهیل برای انتقال جریان بین تسهیلات وجود دارد.

$$\sum_f A_{fij} \leq 1 \quad \forall i, j \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$\sum_f B_{fjk} \leq 1 \quad \forall j, k \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$\sum_f C_{fkl} \leq 1 \quad \forall k, l \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$\sum_f D_{flm} \leq 1 \quad \forall l, m \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$\sum_f E_{fmc} \leq 1 \quad \forall m, c \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$\sum_f G_{fmn} \leq 1 \quad \forall m, n \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

$$\sum_f H_{fmo} \leq 1 \quad \forall m, o \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

$$\sum_f F_{fmv} \leq 1 \quad \forall m, v \quad \text{رابطه (۴۰)}$$



$$\sum_f I_{fnk} \leq 1 \quad \forall n, k \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

$$\sum_f K_{fnr} \leq 1 \quad \forall n, r \quad \text{رابطه (۴۲)}$$

$$\sum_f L_{frs} \leq 1 \quad \forall r, s \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

$$\sum_f M_{for} \leq 1 \quad \forall o, r \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

محدودیت ۴۵ نشان می‌دهد که جریان ورودی به مراکز جمع‌آوری و بازرسی بزرگ‌تر یا مساوی با جریان خروجی آن است.

$$\begin{aligned} \sum_l \sum_f QPL_{plmf} &\geq \sum_n \sum_f QPMN_{pmnf} \\ &+ \sum_o \sum_f QPMO_{pmof} \\ &+ \sum_v \sum_f QPMV_{pmvf} + \sum_c \sum_f QPMC_{pmcf} \quad \forall p, m \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

محدودیت ۴۶ نشان می‌دهد که مجموع محصول‌های تولید شده در مراکز تولیدی، بزرگ‌تر یا مساوی با جریان خروجی آن است.

$$\sum_t \sum_j QMP_{ptj} \geq \sum_k \sum_f \sum_j QPJ_{pjkf} \quad \forall p \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

محدودیت ۴۷ نشان می‌دهد که جریان ورودی به مراکز تعمیر یا احیا بزرگ‌تر یا مساوی با جریان خروجی آن است.

$$\sum_m \sum_f QPMN_{pmnf} \geq \sum_k \sum_f QPNK_{pnkf} + \sum_r \sum_f QPNR_{pnrf} \quad \forall p, n \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

محدودیت ۴۸ نشان می‌دهد که جریان ورودی به مراکز بازتولید بزرگ‌تر یا مساوی با جریان خروجی آن است.

$$\sum_m \sum_f QPMO_{pmof} \geq \sum_r \sum_f QPO_{porf} \quad \forall p, o \quad \text{رابطه (۴۸)}$$

محدودیت‌های ۴۹ تا ۵۲ نشان می‌دهند که مقدار انتقالی از مراکز جمع‌آوری به مراکز تعمیر، بازیافت، انهدام و بازتولید، حداقل نسبتی از مقدار جریان ورودی به مرکز جمع‌آوری است.

$$\sum_n \sum_f QPMN_{pmnf} \geq R\overline{RECO}_p \cdot \sum_l \sum_f QPL_{plmf} \quad \forall p, m \quad \text{رابطه (۴۹)}$$

$$\sum_o \sum_f QPMO_{pmof} \geq \overline{RRM}_p \cdot \sum_l \sum_f QPL_{plmf} \quad \forall p, m \quad \text{رابطه (۵۰)}$$

$$\sum_v \sum_f QPMV_{pmvf} \geq \overline{RRECY}_p \cdot \sum_l \sum_f QPL_{plmf} \quad \forall p, m \quad \text{رابطه (۵۱)}$$

$$\sum_c \sum_f QPMC_{pmcf} \geq \overline{RDISP}_p \cdot \sum_l \sum_f QPL_{plmf} \quad \forall p, m \quad \text{رابطه (۵۲)}$$

محدودیت‌های ۵۳ تا ۶۵ نشان می‌دهند که باید محصولی بین تسهیل مراکز مختلف باشد تا وسیله‌ای برای حمل

انتخاب شود.

$$A_{fij} \leq \sum_z QZI_{zijf} \quad \forall i, j, f \quad \text{رابطه (۵۳)}$$

$$B_{fjk} \leq \sum_p QPJ_{pjkf} \quad \forall j, k, f \quad \text{رابطه (۵۴)}$$

$$C_{fkl} \leq \sum_p QPK_{pklf} \quad \forall k, l, f \quad \text{رابطه (۵۵)}$$

$$D_{flm} \leq \sum_p QPL_{plmf} \quad \forall l, m, f \quad \text{رابطه (۵۶)}$$

$$E_{fmc} \leq \sum_p QPMC_{pmcf} \quad \forall m, c, f \quad \text{رابطه (۵۷)}$$

$$G_{fmn} \leq \sum_p QPMN_{pmnf} \quad \forall m, n, f \quad \text{رابطه (۵۸)}$$

$$H_{fmo} \leq \sum_p QPMO_{pmof} \quad \forall m, o, f \quad \text{رابطه (۵۹)}$$

$$F_{fmv} \leq \sum_p QPMV_{pmvf} \quad \forall m, v, f \quad \text{رابطه (۶۰)}$$

$$I_{fnk} \leq \sum_p QPNK_{pnkf} \quad \forall f, n, k \quad \text{رابطه (۶۱)}$$

$$K_{fnr} \leq \sum_p QPNR_{pnrf} \quad \forall f, n, r \quad \text{رابطه (۶۲)}$$

$$L_{frs} \leq \sum_p QPR_{prsf} \quad \forall f, r, s \quad \text{رابطه (۶۳)}$$



$$M_{for} \leq \sum_p QPO_{porf} \quad \forall f, o, r \quad \text{رابطه (۶۴)}$$

$$N_{fvi} \leq \sum_z QZV_{zvi} \quad \forall f, v, i \quad \text{رابطه (۶۵)}$$

محدودیت‌های ۶۶ تا ۷۸ تضمین می‌کنند که حمل‌ونقلی بین مکان‌هایی که با یکدیگر ارتباط ندارند، وجود نخواهد داشت. همچنین، جریان فقط مجاز است که از طریق گزینه‌های حمل‌ونقل فعال در شبکه عبور کند.

$$\sum_z QZI_{zijf} \leq M.A_{fij} \quad \forall i, j, f \quad \text{رابطه (۶۶)}$$

$$\sum_p QPJ_{pjkf} \leq M.B_{fjk} \quad \forall j, k, f \quad \text{رابطه (۶۷)}$$

$$\sum_p QPK_{pklf} \leq M.C_{fkl} \quad \forall k, l, f \quad \text{رابطه (۶۸)}$$

$$\sum_p QPL_{plmf} \leq M.D_{flm} \quad \forall l, m, f \quad \text{رابطه (۶۹)}$$

$$\sum_p QPMC_{pmcf} \leq M.E_{fmc} \quad \forall m, c, f \quad \text{رابطه (۷۰)}$$

$$\sum_p QPMN_{pmnf} \leq M.G_{fmn} \quad \forall m, n, f \quad \text{رابطه (۷۱)}$$

$$\sum_p QPMO_{pmof} \leq M.H_{fmo} \quad \forall m, o, f \quad \text{رابطه (۷۲)}$$

$$\sum_p QPMV_{pmvf} \leq M.F_{fmv} \quad \forall m, v, f \quad \text{رابطه (۷۳)}$$

$$\sum_p QPNK_{pnkf} \leq M.I_{fnk} \quad \forall f, n, k \quad \text{رابطه (۷۴)}$$

$$\sum_p QPNR_{pnrf} \leq M.K_{fnr} \quad \forall f, n, r \quad \text{رابطه (۷۵)}$$

$$\sum_p QPR_{prsf} \leq M.L_{frs} \quad \forall f, r, s \quad \text{رابطه (۷۶)}$$

$$\sum_p QPO_{porf} \leq M.M_{for} \quad \forall f, o, r \quad \text{رابطه (۷۷)}$$

$$\sum_z QZV_{zvi} \leq M \cdot N_{fvi} \quad \forall f, v, i \quad \text{رابطه ۷۸}$$

محدودیت ۷۹ نشان می‌دهد که مراکز تولید، برای تولید محصول به نسبتی از مواد اولیه‌ای که تأمین‌کنندگان فراهم می‌کنند، نیاز دارند.

$$\sum_f \sum_i \sum_j PER_{pz} \cdot QZI_{zijf} \geq \sum_t \sum_j QMP_{ptj} \quad \forall p, z \quad \text{رابطه ۷۹}$$

محدودیت ۸۰ تضمین می‌کند که برای هر ماده اولیه، مجموع جریان‌های خروجی از هر تأمین‌کننده به تمامی مراکز تولید از ظرفیت تأمین‌کننده تجاوز نمی‌کند.

$$\sum_z \sum_j \sum_f QZI_{zijf} \leq \bar{C}AS_i \quad \forall i \quad \text{رابطه ۸۰}$$

محدودیت‌های ۸۱ تا ۸۸ حداکثر ظرفیت مجاز را برای مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، بازتولید، بازیافت، انهدام و توزیع مجدد نشان می‌دهند.

$$\sum_p \sum_t QMP_{ptj} \leq \sum_h \sum_t O_{jth} \cdot \bar{C}AQ_{jth} \quad \forall j \quad \text{رابطه ۸۱}$$

$$\sum_p \sum_l \sum_f QPK_{pklf} \leq \sum_h P_{kh} \cdot \bar{C}AR_{kh} \quad \forall k \quad \text{رابطه ۸۲}$$

$$\sum_p \sum_l \sum_f QPL_{plmf} \leq \sum_h Q_{mh} \cdot \bar{C}AT_{mh} \quad \forall m \quad \text{رابطه ۸۳}$$

$$\sum_p \sum_m \sum_f QPMN_{pmnf} \leq \sum_h R_{nh} \cdot \bar{C}AU_{nh} \quad \forall n \quad \text{رابطه ۸۴}$$

$$\sum_p \sum_m \sum_f QPMO_{pmof} \leq \sum_h S_{oh} \cdot \bar{C}AW_{oh} \quad \forall o \quad \text{رابطه ۸۵}$$

$$\sum_p \sum_m \sum_f QPMV_{pmvf} \leq \sum_h T_{vh} \cdot \bar{C}AY_{vh} \quad \forall v \quad \text{رابطه ۸۶}$$

$$\sum_p \sum_m \sum_f QPMC_{pmcf} \leq \sum_h U_{ch} \cdot \bar{C}AZ_{ch} \quad \forall c \quad \text{رابطه ۸۷}$$

$$\sum_p \sum_n \sum_f QPNR_{pnrf} + \sum_p \sum_o \sum_f QPO_{porf} \leq \sum_h V_{rh} \cdot \bar{C}AV_{rh} \quad \forall r \quad \text{رابطه ۸۸}$$

محدودیت‌های ۸۹ تا ۹۲، محدودیت تعادل موجودی برای مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری و توزیع مجدد را نشان می‌دهند.

$$QIA_{pj} = \sum_t QMP_{ptj} - \sum_k \sum_f QPJ_{pjkf} \quad \forall p, j \quad \text{رابطه ۸۹}$$

$$QIC_{pk} = \sum_n \sum_f QPNK_{pnkf} + \sum_j \sum_f QPJ_{pjkf} - \sum_l \sum_f QPK_{pklf} \quad \forall p, k \quad \text{رابطه ۹۰}$$

$$QID_{pm} = \sum_l \sum_f QPL_{plmf} - \sum_o \sum_f QPMO_{pmof} - \sum_n \sum_f QPMN_{pmnf} \\ - \sum_c \sum_f QPMC_{pmcf} - \sum_v \sum_f QPMV_{pmvf} \quad \forall p, m \quad \text{رابطه ۹۱}$$

$$QIJ_{pr} = \sum_n \sum_f QPNR_{pnrf} + \sum_o \sum_f QPO_{porf} - \sum_s \sum_f QPR_{prsf} \quad \forall p, r \quad \text{رابطه ۹۲}$$

محدودیت ۹۳ نشان می‌دهد که جریان محصول رسیده به مشتریان، از طریق مراکز توزیع حداکثر برابر با تقاضا خواهد بود.

$$\sum_k \sum_f QPK_{pklf} \leq \tilde{D}_{pl} \quad \forall p, l \quad \text{رابطه ۹۳}$$

محدودیت ۹۴ نشان‌دهنده ارتباط تقاضای مشتری با جریان محصول‌های بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع‌آوری است.

$$\sum_m \sum_f QPL_{plmf} \leq \tilde{D}_{pl} \cdot \bar{R}R_{pl} \quad \forall p, l \quad \text{رابطه ۹۴}$$

محدودیت ۹۵ تقاضای ارضا نشده مشتریان را مشخص می‌کند و محدودیت ۹۶ مقدار برگشتی‌های جمع‌آوری نشده را محدود می‌کند.

$$\tilde{D}_{pl} - \sum_k \sum_f QPK_{pklf} = NNS_{lp} \quad \forall p, l \quad \text{رابطه ۹۵}$$

$$\bar{R}R_{pl} - \sum_m \sum_f QPL_{plmf} = NNY_{pl} \quad \forall p, l \quad \text{رابطه ۹۶}$$

محدودیت‌های ۹۷ و ۹۸ به ترتیب گویای محدودیت‌های ضروری منطقی روی متغیرهای تصمیم‌گسسته و پیوسته‌اند.

$$A_{fij}, B_{fjk}, C_{fkl}, D_{flm}, E_{fmc}, G_{fmi}, H_{fmo}, F_{fmv}, I_{fnk}, K_{fnr}, L_{frs}, M_{for}, N_{fvi}, \\ O_{jth}, P_{kh}, Q_{mh}, R_{nh}, S_{oh}, T_{vh}, U_{ch}, V_{rh}, WZ_{zi} \in \{0,1\} \\ \forall f, i, j, k, l, m, c, n, o, v, r, s, t, h, z \quad \text{رابطه ۹۷}$$

$$QZI_{zijf}, QPJ_{pjkf}, QPK_{pklf}, QPL_{plmf}, QPMO_{pmof}, QPMC_{pmcf}, QPMV_{pmvf}, \\ QPMN_{pmnf}, QPNK_{pnkf}, QPNR_{pnrf}, QPO_{porf}, QZV_{zvif}, QPR_{prsf}, QMP_{ptj}, \\ QIC_{pk}, QID_{pm}, QIJ_{pr}, QIA_{pj}, NNS_{lp}, NNY_{pl} \geq 0, \\ \forall z, i, j, f, p, k, l, m, o, c, v, n, r, s, t \quad \text{رابطه ۹۸}$$

مدل ریاضی پیشنهادی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه فازی است. در ادبیات موضوع مدل‌های فازی، روش‌های متعددی برای مواجهه با مدل‌های فازی با ضرایب غیرقطعی در محدودیت‌ها و توابع هدف معرفی شده‌اند (خیمنز، آرنس و بیبالو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). در این مقاله برای حل مدل، ابتدا مدل با استفاده از روش خیمنز به مدل کمکی قطعی چند هدفه تبدیل شده است.

## رویکرد حل مسئله

### حل مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) و ازدحام ذرات چندهدفه، حل شده است. در الگوریتم ژنتیک چندهدفه، تعداد تکرار ۲۰۰، تعداد جمعیت اولیه (یا در این الگوریتم تعداد اعضای پارتو فرانت اول) ۵۰، مقدار تقاطع<sup>۲</sup> برابر با ۰/۲ و میزان جهش<sup>۳</sup> برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه، مقدار جمعیت اولیه و مقدار اعضای موجود در خزانه نامغلوب ۵۰، تعداد تکرار ۲۰۰، ضریب اینرسی در حرکت ذرات ۰/۵، ضریب یادگیری جمعی<sup>۲</sup> و ضریب یادگیری فردی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مقادیر توابع هدف به‌ازای حل با الگوریتم ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه

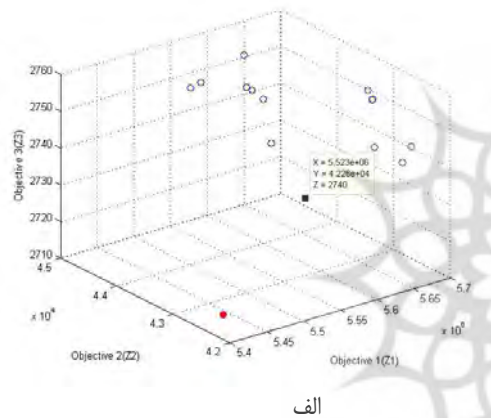
$Z_3$	$Z_2$	$Z_1$	مقدار آلفای خیمنز	الگوریتم حل
۷۸۸	۴۱۹۶۳	۶۰۷۷۳۲۵	۰/۶	الگوریتم ژنتیک چندهدفه
۷۸۲	۴۱۸۵۹	۶۱۶۹۴۳۴	۰/۷	
۷۸۴	۴۱۱۳۰	۶۲۶۲۳۸۸	۰/۸	
۷۷۹	۴۱۰۳۴	۶۲۳۸۴۱۶	۰/۹	
۷۸۷	۴۴۱۱۲	۶۰۸۱۳۲۵	۰/۶	ازدحام ذرات چندهدفه
۷۹۰	۴۲۵۲۷	۶۱۲۸۷۵۶	۰/۷	
۷۸۳	۴۲۷۹۸	۶۱۳۲۴۳۸	۰/۸	
۷۸۹	۴۲۱۳۴	۶۱۹۴۶۴۱	۰/۹	

مقادیر توابع هدف برای مطالعه موردی پژوهش با رویکرد قطعی‌سازی خیمنز، با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه در جدول ۲ ارائه شده است. گفتنی است، از آنجا که در مدل قطعی‌سازی خیمنز، مقادیر مختلف  $\alpha$  استفاده شده است، مقادیر توابع هدف به‌ازای هر یک از این مقادیر در جدول درج شده است. مقادیر توابع هدف (جدول ۳) در واقع یکی از دسته جواب‌های پارتو است که با استفاده از الگوریتم‌های یادشده به‌دست آمده است. توضیح اینکه جواب به‌دست‌آمده، نزدیک‌ترین جواب به جواب بهینه است. همچنین جدول ۴، مقادیر سه تابع هدف را به‌ازای مقادیر مختلف درجه برقرای محدودیت نشان داده است. این مقادیر با استفاده از روش محدودیت اپسیلون در نرم‌افزار گمز به دست آمده‌اند.

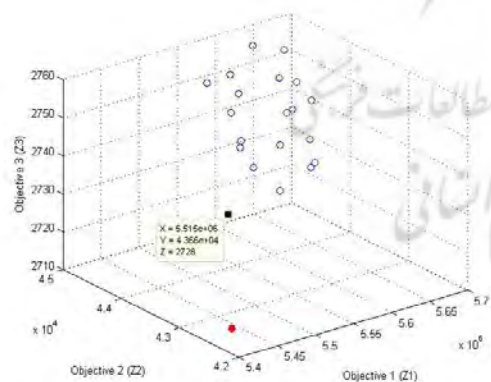
جدول ۳. مقادیر توابع هدف مقادیر با استفاده از روش محدودیت اسپیلون

$\alpha$	مقدار تابع هدف اقتصادی ( $Z_1$ )	مقدار تابع هدف زیست‌محیطی ( $Z_2$ )	مقدار تابع هدف بعد اجتماعی ( $Z_3$ )
۰/۶	۶۳۳۶۰۴۴	۴۰۲۰۵	۷۶۹
۰/۷	۶۳۶۷۸۱۸	۴۰۰۸۳	۷۶۸
۰/۸	۶۳۹۹۵۹۱	۳۹۵۲۱	۷۶۶
۰/۹	۶۴۳۱۳۶۴	۳۹۱۷۸	۷۶۴

برای مقایسه دو الگوریتم از چهار معیار Spacing، Diversity و MID استفاده شده است. اشکال پارتو برای هر دو الگوریتم و برای مطالعه موردی با روش قطعی‌سازی خیمنز، به‌ازای یکی از مقادیر آلفا نشان داده شده است. شکل ۴ جواب پارتو الگوریتم ژنتیک چندهدفه و الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه با ۲۰۰ تکرار را نشان می‌دهد.



شکل ۴. الف) جواب بهینه پارتو الگوریتم ژنتیک چندهدفه



ب) الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه برای مطالعه موردی و روش قطعی‌سازی خیمنز ( $\alpha=0/6$ )

همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، برای مطالعه موردی با روش قطعی‌سازی خیمنز با آلفای ۰/۶، تعداد جواب‌های پارتو مستخرج از الگوریتم ژنتیک چندهدفه ۱۴ جواب و تعداد جواب‌های پارتو مستخرج از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه ۲۰ جواب است که بهترین آن با رنگ مشکی نشان داده شده است. نقطه قرمز رنگ، نقطه بهینه‌ای است که از حل الگوریتم در نرم‌افزار گمز<sup>۱</sup> به دست آمده است.

جدول ۴. مقایسه معیارها برای دو الگوریتم

میانگین	MID	میانگین	Spacing	میانگین	Diversity	میانگین	Time	مقدار آلفای خیمنز	الگوریتم حل
۱۳۳۵۰۸	۱۳۴۵۸۲	۶۰۶۳۱۴	۶۶۵۷۶۵	۶۶۳۷۲۰	۸۲۳۷۰۲	۲۲/۱۶	۲۲/۲۴	۰/۷	الگوریتم ژنتیک چندهدفه
	۱۴۱۰۲۰		۴۲۲۶۴۵		۴۳۶۲۵۵		۲۱/۹۳	۰/۸	
	۱۴۶۱۹۳		۸۴۳۶۸۵		۸۸۹۰۱۷		۲۲/۱۴	۰/۹	
	۱۰۴۸۲۰		۸۳۴۷۷۳		۳۹۷۹۴۷		۲۲/۱۸	۱	
۱۲۴۶۶۵	۱۳۷۴۸۹	۶۸۲۵۷۰	۹۳۳۵۹۹	۵۸۸۳۲۷	۹۳۰۳۹۰	۴۰/۳	۳۹/۸۹	۰/۷	ازدحام ذرات چندهدفه
	۱۲۸۳۴۹		۹۷۳۰۴۳		۷۰۰۰۳۷		۴۰/۳۲	۰/۸	
	۱۰۳۲۷۴		۴۴۸۵۹۷		۵۸۷۴۲۶		۴۰/۵۸	۰/۹	
	۱۰۷۱۵۲		۶۹۱۲۶۴		۹۳۶۶۶		۴۰/۲۱	۱	

### نتیجه‌گیری

پس از بررسی کلیه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه موضوع تحقیق، مشخص شد که در بیشتر پژوهش‌ها، زنجیره رو به جلو یا رو به عقب بوده است؛ اما در این مقاله زنجیره حلقه بسته بررسی شده است. علاوه بر این، عدم قطعیت در بیشتر مسائل فقط تقاضا را شامل می‌شد؛ ولی در این مسئله، عدم قطعیت در بیشتر پارامترها بررسی شده است. این مدل به‌گونه‌ای طراحی شده که در شبکه رو به جلو، چهار سطح (تأمین، تولید، توزیع و مشتریان دسته اول) و در شبکه برگشتی، هفت سطح (مراکز جمع‌آوری و بازرسی، مراکز احیا یا تعمیر، مراکز بازتولید، مراکز بازیافت، مراکز انهدام، مراکز توزیع مجدد و مشتریان دسته دوم) را شامل می‌شود. مدل از سه تابع هدف کمینه‌کردن هزینه کل، کمینه‌کردن آثار زیست‌محیطی و بیشینه‌کردن آثار اجتماعی زنجیره تأمین تشکیل شده است. در خصوص تابع هدف هزینه، از آنجا که در این مقاله سعی شده است تا تمامی تسهیلات و جریان بین آنها مدنظر قرار گیرد و مدل جامعی ارائه شود، اکثر هزینه‌ها لحاظ شده است. هزینه خرید (تهیه مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و هزینه خرید محصول‌های برگشتی از مشتریان)، هزینه جریمه (هزینه جریمه برای تقاضای ارضا نشده و هزینه جریمه محصول برگشتی جمع‌آوری نشده)، هزینه‌های عملیاتی (هزینه تولید، هزینه بازتولید، هزینه جمع‌آوری، احیا، بازیافت و هزینه انهدام)، هزینه موجودی (هزینه برای قسمت تولید، توزیع، توزیع مجدد و جمع‌آوری)، هزینه حمل‌ونقل یا انتقال جریان بین تسهیلات و هزینه ثابت راه‌اندازی، تابع هدف هزینه را شکل داده‌اند. در تابع هدف دوم، سعی شده است تا آثار زیست‌محیطی نامطلوب به کمترین حد برسد. در این مقاله کمینه‌کردن گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از عملیات درون تسهیلات و انتقال جریان بین تسهیلات، تابع هدف زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. تابع هدف سوم، دربرگیرنده شاخص‌های فرصت‌های شغلی ثابت و متغیر، توسعه اقتصادی و متوسط روزهای کاری از دست‌رفته به‌علت آسیب‌دیدگی است. در نهایت، مدل مطرح‌شده با رویکرد قطعی‌سازی خیمنز قطعی شد. در این مقاله مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی با روش دقیق و دو الگوریتم ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه حل شده است و بین نتایج مقایسه زوجی صورت گرفت و در نهایت، جواب‌های پارتو مشخص شد. با توجه به نتایج، دو الگوریتم در معیار زمان با هم متفاوت‌اند و الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه برتری دارد. همچنین دو الگوریتم در معیار MID با هم تفاوت دارند که الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه بر

الگوریتم ژنتیک چندهدفه برتری دارد و در باقی معیارها، برتری معناداری نسبت به هم ندارند. در انتها پیشنهادهایی برای پژوهش‌های بعدی آمده است:

- می‌توان موارد رایج در کارخانجات مثل نرخ مالیات، سرمایه در گردش، جریان نقدینگی، درآمد و غیره را به مدل این پژوهش اضافه کرد.
- توابع هدف دیگری مانند کمینه کردن ریسک مالی را در نظر گرفت.
- مسئله بر اساس رویکردهای بهینه‌سازی استوار یا روش‌های برنامه‌ریزی احتمالی که در آن تابع توزیع پارامترها مشخص است، مدل‌سازی شود.
- مسئله به صورت چند دوره‌ای، به گونه‌ای که تقاضا در دوره‌های مختلف تغییر کند، مدل‌سازی شود.
- می‌توان از روش‌های مختلف پیش‌بینی پارامترها، مانند شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی زنجیره تأمین استفاده کرد.

## منابع

- ضرابی، اصغر؛ شاهپوندی، احمد (۱۳۸۹). تحلیلی بر پراکندگی شاخص‌های توسعه اقتصادی در استان‌های ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۱(۲)، ۱۷-۳۳.
- عمرانی، قاسم علی؛ منوری، سید مسعود؛ جوزی، سید علی؛ زمانی، ندا (۱۳۸۸). مدیریت بازیافت شیشه در شهر تهران. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۱(۴)، ۴۱-۵۰.
- غضنفری، مهدی؛ فتح الله، مهدی (۱۳۹۶). *نگرشی جامع بر مدیریت زنجیره تأمین*. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.
- فلاح لاجیمی، حمیدرضا؛ جعفرنژاد، احمد؛ مهرگان، محمدرضا؛ الفت، لعیبا (۱۳۹۴). پیکره‌بندی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه راهبردی تصادفی. *مدیریت صنعتی*، ۷(۱)، ۸۳-۱۰۵.
- محمدی، امیرسالار؛ عالم تبریز، اکبر؛ پیشوایی، میرسامان (۱۳۹۷). طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت. *مدیریت صنعتی*، ۱۰(۱)، ۶۱-۸۴.

## References

- Aras, N., Aksen, D. (2008). Locating collection centers for distance-and incentive-dependent returns. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 316-333.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299-312.
- Cambero, C., Sowlati, T., Pavel, M. (2016). Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *chemical engineering research and design*, 107, 218-235.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 37-49.

- Dai, Z., Zheng, Z. (2015). Design of close-loop supply chain network under uncertainty using hybrid genetic algorithm: A fuzzy and chance-constrained programming model. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 444–457.
- Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm, *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 559-570.
- Devika, K., Jafarian, A., Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235, 594–615.
- Elhedhli, S., Merrick, R. (2012). Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17 (5), 370-379.
- Fallah Lajimi, H.R., Jafarnejad, A., Mehrgan, M.R., Olfat, L. (2016). Configuring integrated supply chain network stochastic strategic. *Industrial Management Journal*, 7(1), 83-105. (in Persian)
- Fattahi, M., Govindan, K., Keyvanshokoo, E. (2018). A multi-stage stochastic program for supply chain network redesign problem with price-dependent uncertain demands. *Computers and Operations Research*, 110, 314-332.
- Feito Cespon, M., Sarache, W., Jimenez, F. P., Cespon Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 151, 206-217.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Beullens, P., Dekker, R. (2004). Reverse Logistics Network Design. In Dekker R., Fleischmann M., Inderfurth K., Van Wassenhove L. N., *Reverse Logistics: Quantities Models for closed-loop supply chains*, Springer, Berlin, 65-94.
- Georgiadis, P., Besiou, M. (2010). Environmental and economic sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: a system dynamics analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 475-493.
- Ghazanfari, M, Fathollah, M. (2017). *Comprehensive Approach to Supply Chain Management*. Iran University of Science and Technology press. (in Persian)
- Govindan, K., Khodaverdi, R., Jafarian, A. (2013). A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach, *journal of cleaner production*, 47, 345-354.
- Hasanzadeh Amin, S. H., Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modeling*, 41, 316–330.
- Jabbarzadeh, A., Houghton, M., Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application, *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178–191.
- Jimenez, M., Arenas, M., & Bilbao, A. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1599-1609.



- Keyvanshokoo, E., Ryan, S. M., Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition, *European Journal of Operational Research*, 249, 76–92.
- Klibi, W., Martel, A., Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203, 283-293.
- Min, H., Ko, H. J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers, *International Journal of Production Economics*, 113(1), 176-192.
- Mohammadi, A.S., Alemtabriz, A., Pishvae, M. (2018). Designing Green Closed-loop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 10(1), 61-84. (in Persian)
- Omran, GH., Monavari, S.M., Jozi, S.A., Zamani, N. (2009). Glass recycling management in Tehran city. *Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 41-50. (in Persian)
- Pishvae, M.S., Jolai, F., Razmi, J. (2010). Stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114.
- Pishvae, M.S., Kianfar, K., Karimi, B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. *International journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47, 269-281.
- Pishvae, M.S., Torabi, S.A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 161, 2668 – 2683.
- Pishvae, M.S., Torabi, S.A., Razmi, J. (2012). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 62 (2), 624-632.
- Seuring, S., Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.
- Shaw, K., Shankar, R., Yadav, S. S., & Thakur, L. S. (2013). Modeling a low-carbon garment supply chain. *Production Planning & Control*, 24(8-9), 851-865.
- Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 191–203.
- Tang, C.S., Zhou, S. (2012). Research advances in environmentally and socially sustainable operations. *European Journal of Operational Research*, 223, 585–594.
- Tsiakis, P., Papageorgiou, L.G. (2008). Optimal production allocation and distribution supply chain network. *International Journal of Production Economics*, 111, 468-483.
- Wang, M., Wang, J., Tan, J., Sun, J., Mou, J. (2011). Optimization of Ethanol Fermentation from Sweet Sorghum Juice Using Response Surface Methodology, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 33 (12), 1139-1146.

- Zarabi, A., Shahiwandi, A. (2010). An Analysis of the Dispersion of Economic Development Indicators in Iranian Provinces, *Geography Magazine and Environmental Planning*, 38 (2), 17-32. (in Persian)
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E*, 89, 182–214.
- Zhen, L., Huang, L., Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1195-1209.

