

Cold-Water Farmed Fish Chain Supply Chain Network Design Considering Uncertainty Conditions: A Case Study of Trout Supply Chain Network in Mazandaran

Maedeh Fasihi

Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Seyyed Esmaeil Najafi*

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Reza Tavakkoli-Moghaddam

Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Mostafa Hajiaghaei-Keshteli

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran

Abstract

The supply chain management is an important factor in current competitive market. In recent years, the shortage of resources for answering an increasing food demand has increased researchers' attention to the food supply chain. Given the importance of fish in the Household Food Basket, the development of aquaculture and recycling of returned goods in reverse logistics would significantly help with preserving water resources, as well as sustainable development. Therefore, government agencies and aquaculture industry beneficiaries are interested in reverse logistics. This study is focused on the optimization of a closed-loop supply chain of fish. To this end, a new bi-objective mathematical model is proposed that both minimizes total costs and maximizes fulfilling customers demand in uncertainty situation. Several well-known multi-objective meta-heuristic algorithms and a proposed hybrid meta-heuristic algorithm are applied to identify Pareto solutions. The solutions are then compared in terms of performance metrics. Also, the epsilon-constraint method and sensitivity analysis are used to validate the algorithms and evaluate the performance of the model. Lastly, the VIKOR method is used to select the superior method. To demonstrate the capability of the proposed model, a closed-loop supply chain of trout in northern Iran is investigated as a case study. The results show that the developed model could be effective in reducing the costs and increasing customer satisfaction.

Keywords: Closed-loop supply chain, Fish reverse logistics, Bi-objective mathematical model, uncertainty, Meta-heuristic algorithms.

* Corresponding Author: s.e.najafi.uni@gmail.com

How to Cite: Vol.19 No 63, Winter 2021



طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ماهیان پرورشی سردآبی با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت: مطالعه موردی شبکه زنجیره تامین قزل آلا در مازندران

مأنده فصیحی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

سید اسماعیل نجفی*

استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم

استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مصطفی حاجی آقائی

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

کشتلی

چکیده

در اقتصاد رقابتی کنونی، مدیریت زنجیره تامین امری مهم تلقی می‌گردد. در سال‌های اخیر به دلیل کمبود منابع جهت پاسخگویی به تقاضای فزاینده غذا، توجه محققان به زنجیره تامین مواد غذایی افزایش یافته است. از آنجاییکه ماهی یکی از اقلام مطلوب در سبد غذایی خانوار است، توسعه آبرزی پروری و بازیافت محصولات برگشتی در لجستیک معکوس به حفظ منابع آبی و توسعه پایدار کمک قابل ملاحظه‌ای می‌نماید. از این رو نهادهای دولتی و همچنین ذینفعان صنعت آبرزی پروری علاقه‌مند به لجستیک معکوس هستند. مطالعه حاضر بر روی بهینه‌سازی یک زنجیره تامین حلقه بسته ماهی متمرکز شده است. بدین منظور، در ابتدا یک مدل ریاضی دو هدفه ارائه شده است که علاوه بر به حداقل رساندن هزینه‌ها، به حداکثر رساندن پاسخگویی به تقاضای مشتریان در شرایط عدم قطعیت را نیز در نظر می‌گیرد. چندین الگوریتم فراابتکاری چندهدفه شناخته شده و یک الگوریتم فراابتکاری تلفیقی پیشنهادی برای یافتن راه‌حل‌های پارتو بکار گرفته شده‌اند و راه‌حل‌ها از نظر معیارهای عملکرد مقایسه گردیده‌اند. همچنین روش اسپیلون-محدودیت و تجزیه و تحلیل حساسیت جهت اعتبارسنجی الگوریتم‌ها و ارزیابی کارایی مدل بکار گرفته شده‌اند. سرانجام، از الگوریتم ویکور برای انتخاب روش حل برتر استفاده شده است. به منظور نشان دادن قابلیت مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی شامل زنجیره تامین حلقه بسته ماهی قزل آلا در شمال ایران بررسی گردیده است. نتایج حاصل از بررسی مسائل نشان می‌دهند که مدل توسعه یافته می‌تواند جهت صرفه جویی در هزینه‌ها و بالا بردن سطح رضایت مشتریان موثر باشد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تامین حلقه بسته، لجستیک معکوس ماهی، مدل ریاضی دوهدفه، عدم قطعیت، الگوریتم فراابتکاری.

مقدمه

زنجیره تأمین در قالب کلاسیک خود (زنجیره تأمین رو به جلو) ترکیبی از فرایندهایی است که نیازمندی‌های مشتری را برآورده می‌کند. اگر هر دو زنجیره تأمین رو به جلو و معکوس با هدف ایجاد ارزش در طول چرخه عمر محصول در نظر گرفته شوند، شبکه حاصل یک زنجیره تأمین حلقه بسته را ایجاد می‌کند (پنگ و همکاران، ۲۰۲۰). مدیریت زنجیره تأمین برای هر شرکتی که اهدافی از لحاظ رقابت اقتصادی، زمان و کیفیت خدمات را دنبال می‌نماید به مسأله‌ای استراتژیک تبدیل شده است، به خصوص در محیط اقتصادی‌ای که تحت تاثیر تجارت جهانی و شتاب چرخه‌های صنعتی است (اسکندرپور و همکاران، ۲۰۱۵).

کمبود منابع ارزشمند، شرایط اقتصادی، تأثیرات اجتماعی و زیست محیطی و افزایش تقاضای مشتریان برای محصولات با کیفیت، تصمیم‌گیرندگان را بر آن می‌دارد تا طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس را مورد بررسی و اجرا قرار دهند (راحی و همکاران، ۲۰۲۰؛ لیاو و همکاران، ۲۰۲۰). در این راستا، خصوصیات لجستیک معکوس به ذینفعان این امکان را می‌دهد تا به طور موثر از شرکت‌های خود در زمینه بازیافت، بازگرداندن و استفاده مجدد از مواد در رویکردی چند مرحله‌ای استفاده کنند که این امر منجر به بهبود شرایط محیطی می‌شود (حاجی‌آقایی - کشتلی و همکاران، ۲۰۱۱).

در ۵۰ سال گذشته تقاضا برای غذا سه برابر شده است و ما به نقطه‌ای رسیده‌ایم که مصرف انسان بالاتر از ظرفیت طبیعت برای بازسازی است. یک دلیل برای این افزایش، رشد جمعیت در جهان بوده و افزایش چشمگیر جمعیت جهان با مشکلات نیاز به تغذیه همه مردم، همراه است. از این رو، زنجیره تأمین مواد غذایی سابق دیگر نمی‌تواند به طور موثر به تقاضا رسیدگی نماید، بنابراین نیاز به بازسازی دارد (گوویندان، ۲۰۱۸). آمار فائو نشان می‌دهد که تولید جهانی محصولات تازه در دهه گذشته ۳۸ درصد افزایش یافته است. ماهی تازه یک غذای فاسدشدنی می‌باشد که می‌تواند برای مدت کوتاهی در یخچال نگهداری شود. با توجه به چرخه عمر کوتاه مواد غذایی فاسدشدنی مدیریت زنجیره تأمین این محصولات پیچیدگی خاصی دارد (لی و همکاران، ۲۰۰۹). فسادپذیری مهمترین عامل

تأثیرگذار در طراحی و مدیریت زنجیره‌های تامین مواد غذایی است (تبریزی و همکاران، ۲۰۱۸).

تغییرات آب و هوایی، خشکسالی و بحران آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر منجر به کاهش زمین زیر کشت محصولات کشاورزی، تخریب منابع طبیعی مورد نیاز برای دامداری و کاهش ذخایر دریایی در ایران، نظیر دیگر کشورهای خاورمیانه شده است. گسترش مزارع آبی‌پروری نه تنها به توسعه غذاهای پایدار کشور کمک کرده بلکه در حفظ گونه‌های درخطر به هر دلیلی، بسیار موثر بوده است (تبریزی و همکاران، ۲۰۱۸). امروزه غذاهای دریایی و محصولات مرتبط با آن در سبد غذایی مردم در میان ملل مختلف نقش مهمی ایفا می‌کنند.

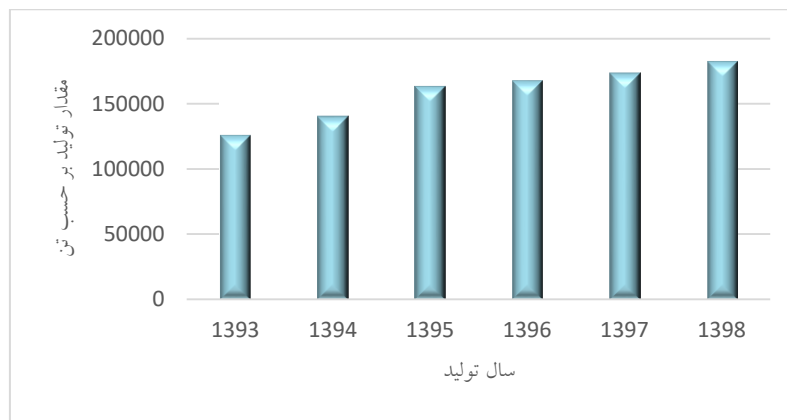
صنعت پرورش ماهی در دهه‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. طبق گزارش فائو یا سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۱، افزایش تقاضا برای محصولات ماهی منجر به افزایش قابل توجهی در تعداد ماهی‌های پرورشی در سطح جهانی شده است. مطالعات مربوط به پرورش ماهیان به طور موازی با گسترش صنعت آن، توسعه یافته است (عابدی و زو، ۲۰۱۷). گزارش سازمان فائو^۲ (سال ۲۰۲۰) از آمار جهانی مرتبط با ماهیگیری و پرورش ماهی، حاکی از آن است که در سال‌های اخیر، حجم پرورش و صید تقریباً برابر بوده و پیش‌بینی می‌شود (تا سال ۲۰۳۰) میزان تولید آبیان پرورشی از میزان صید آن‌ها بیشتر نیز گردد.

گونه‌های مختلفی از ماهی‌ها وجود دارند که ماهی قزل‌آلا محبوب‌ترین آن‌هاست (عابدی و زو، ۲۰۱۷). ماهی قزل‌آلا از انواع ماهیان سردآبی است که از نظر زیستی در آب‌های با دمای ۱۹-۶ درجه سانتی‌گراد رشد و نمو می‌کنند. میزان تولیدات آبی‌پروری در ایران میزان پرورش ماهیان سردآبی، طبق آمار سازمان شیلات ایران^۳ (شکل ۱)) در ایران روند روبه‌رشدی را دنبال می‌کند. همانطور که شکل (۲) نشان می‌دهد، استان مازندران در زمینه تولید ماهیان سردآبی در جایگاه سوم در کشور قرار دارد.

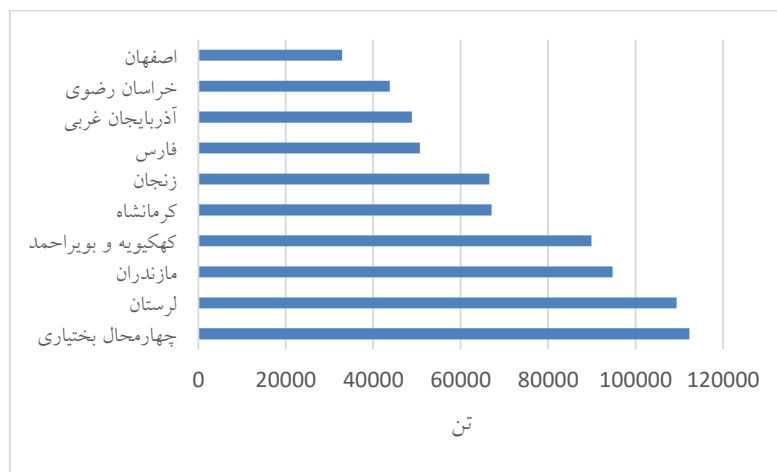
1. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations

2. Source: FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020

3. Source: <http://shilat.com>



شکل ۱. میزان تولید آبی پروری ماهیان سردآبی در سال‌های ۱۳۹۳-۹۸

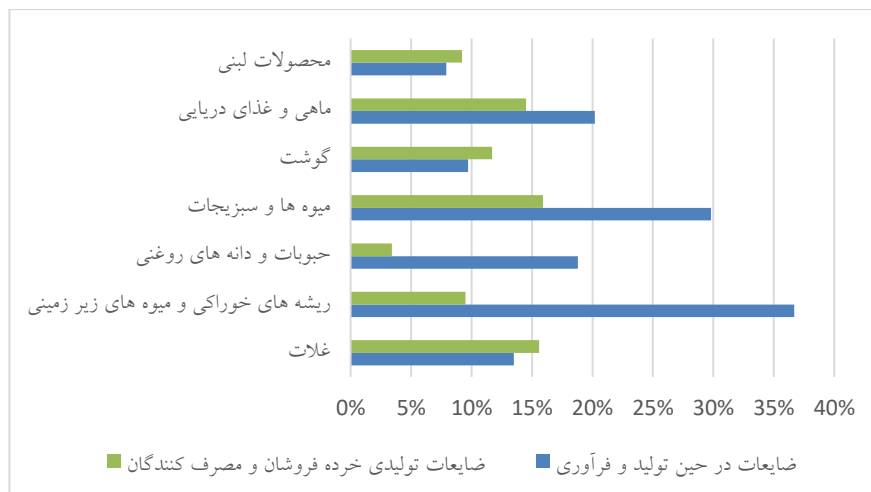


شکل ۲. مجموع میزان پرورش ماهیان سردآبی به تفکیک استان در سال‌های ۱۳۹۳-۹۸

طبق آمارمنتشر شده فائو^۱، ضایعات و تلفات ماهی و غذای دریایی در هنگام تولید و فرآوری ۲۰/۲٪ و ضایعات خرده فروشان و مصرف کنندگان ۱۴/۵٪ است (شکل (۳)). ضایعات ماهی، بافتی از ماهی است که برای مصرف مناسب نیست. تخمین زده شده است که بالغ بر ۵۰٪ از ماهی‌های صید شده به عنوان مواد غذایی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند (مو و همکاران، ۲۰۱۸). اغلب ضایعات دفن شده و در محل دفن زباله سبب مشکلات

1. Source: www.statista.com

زیست محیطی می گردند و بعضی تبدیل به محصولات نظیر کمپوست، خوراک آبیان و حیوانات می شوند (سووال و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۳. سهم تلفات و ضایعات مواد غذایی بر اساس انواع آن

با توجه به کاهش ذخایر آبیان در جهان و افزایش هزینه ی تولید از یک سو و نیز توسعه آبیاری پروری و نیاز آن به پودر ماهی، روز به روز بر توجهات به ضایعات و فرآورده های جانبی صنعت فرآوری آبیان افزوده می شود. امروزه در تمامی دنیا فرآوری ضایعات ماهی از ارزش بسیاری برخوردار است. ضایعات به وجود آمده از آبیان به دلیل تازگی و نیز اهمیت در نگهداری باکیفیت، از اولویت ویژه ای برای بهره برداری برخوردار است. در شکل (۴) آکواریوم های نگهداری ماهی قزل آلا و ضایعات باقی مانده از آن در بازار ماهی نشان داده می شود. همچنین مدیریت زباله به دلیل کاهش منابع طبیعی، تعداد اماکن دفن زباله ها و به طور کلی توجه به ملاحظات زیست محیطی، مساله مهمی است. شرکت ها محصولات EOL^۱ را با اجرای فرایندهای مختلف بازیابی محصول مانند استفاده مجدد، جداسازی، بازیافت، تعمیر و بازسازی، مدیریت می کنند. از آنجا که محصولات EOL یکسان نیستند، هر محصول نیاز به برنامه های بازیابی منحصر به فرد دارد (جوشی و گوپتا، ۲۰۱۹).

1. End-of-Life



شکل ۴. آکواریوم‌های نگهداری ماهی قزل‌آلا و ضایعات باقی مانده در بازار ماهی

این پژوهش با توجه به تشریح موضوع زنجیره تأمین و لجستیک معکوس، به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ماهی قزل‌آلای پرورشی در شرایط عدم قطعیت برای هر دو حالت جریان روبه‌جلو و معکوس می‌پردازد. واضح است که هر محصول دارای استراتژی زنجیره تأمین خاص خود است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد هر محصول، مدیریت زنجیره تأمین هر یک از آن‌ها شامل شرایط خاص خود می‌شود (تبریزی و همکاران، ۲۰۱۸). این تحقیق با توجه به ضایعات و تلفات ماهی موجود در زنجیره تأمین ماهی، شبکه‌ای برای جمع‌آوری این برگشتی‌ها به منظور کاهش هزینه‌های زنجیره و ایجاد درآمدهای احتمالی از آن‌ها ارائه خواهد داد. به عنوان یک روش معمول برای بازیافت ضایعات ماهی در لجستیک معکوس، پودر ماهی برای تأمین غذای ماهی، همچنین حفظ سلامت انسان و حفظ محیط زیست تولید می‌شود. علاوه بر این به جهت در نظر گرفتن شرایط دنیای واقعی در مطالعه‌ی زنجیره تأمین ماهی، شرایط عدم قطعیت در طراحی زنجیره تأمین این تحقیق بررسی گشته است.

در مدل ریاضی ارائه شده به حداقل رساندن هزینه زنجیره تأمین حلقه بسته ماهی و به حداکثر رساندن پاسخگویی به تقاضای مشتری به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مدل و مطالعه روش‌های حل، از برخی الگوریتم‌های معروف فراابتکاری استفاده شده است. علاوه بر این، برای دستیابی به عملکرد بهتر در این الگوریتم‌ها، روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای مربوطه بکار برده شده است. همچنین، مطالعه موردی را برای

کاربرد و اعتبارسنجی مدل در دنیای واقعی در نظر گرفته شده است. نهادهای دولتی و همچنین سرمایه گذاران بخش خصوصی، که به دنبال طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین خود هستند، می توانند این مدل را جهت بهینه سازی بکار گیرند.

این مقاله بدین صورت سازمان دهی شده است: مرور ادبیات و شرح مسأله به همراه توضیحات مدل مورد مطالعه به ترتیب در بخش های ۲ و ۳ شرح داده می شوند. در بخش ۴ روش های حل مسأله و رویکرد رمزگذاری و رمزگشایی الگوریتم های حل مطالعه می شوند. شاخص های ارزیابی عملکرد الگوریتم ها در بخش ۵ معرفی می گردند. داده های ورودی، تنظیم پارامترها و نتایج محاسباتی به همراه تجزیه و تحلیل آن ها برای مسائل نمونه و یک مطالعه موردی در مورد زنجیره تأمین ماهی قزل آلا در مازندران، در بخش ۶ آورده شده اند. نتیجه گیری و پیشنهادات برای مطالعات آتی در آخرین بخش مطرح می شود.

مرور ادبیات

لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته

بازار امروز رقابتی و پویا است. مدیریت زنجیره تأمین نقش مهمی در بهینه سازی هزینه های تولید در بازارهای رقابتی ایفا می کند (پارسائیان و همکاران، ۲۰۱۹). ادبیات اخیر نشان داده اند که امروزه، بازگشت محصولات نه تنها امری هزینه بر نیست بلکه ابزاری برای ایجاد ارزش می باشد. به عنوان نمونه می توان حفظ محیط زیست، فراهم نمودن منابع اصلی و ارزش بیشتر بخشیدن به مشتری اشاره کرد که درآمدهای احتمالی معمولاً بیشتر از هزینه های صرف شده برای ایجاد اقدامات لازم برای کانال های بازگشت می باشد. آگاهی عمومی موجب توجه بیشتر به مسائل مربوط به لجستیک معکوس^۱ (RL) و زنجیره تأمین حلقه بسته^۲ (CLSC) شده است. شرکت ها دریافته اند که درک بهتر از ضایعات و بازگشتی های محصول و در نتیجه RL کارا می تواند مزیت رقابتی ایجاد نماید (چراغعلی پور و همکاران، ۲۰۱۸). در جدول (۱) برخی از مطالعات مروری جدید در حوزه RL و CLSC آورده شده است. بر اساس بررسی های صورت گرفته بر روی مقالات حوزه

1. Reverse Logistics

2. Closed-Loop Supply Chain

لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته، محققان می‌توانند توجه بیشتری به سایر صنایع نظیر فولاد، غذا، بهداشت و غیره داشته باشند که صنایع مهم در مدیریت زنجیره تأمین پایدار هستند (گوویندان و سلیمانی، ۲۰۱۷).

جدول ۱. برخی از مطالعات مروری جدید در حوزه RL و CLSC

دامنه زمانی	شرح تحقیق (حوزه مورد بررسی مقاله مروری)	نویسندگان و سال
۲۰۱۷-۲۰۰۰	مطالعات مدیریت زنجیره تأمین لجستیک معکوس و حلقه بسته منتشر شده در <i>IJPR</i>	(کاظمی و همکاران، ۲۰۱۹)
۲۰۱۷-۱۹۹۷	بررسی پیشرفته لجستیک معکوس	(پرجاپاتی و همکاران، ۲۰۱۹)
۲۰۱۷-۱۹۹۵	مدل‌های بهینه‌سازی استراتژیک شبکه در زنجیره‌های تأمین معکوس ضایعات	(ون انگلند و همکاران، ۲۰۲۰)
۲۰۱۷-۱۹۹۲	لجستیک معکوس	(بناسم و کین، ۲۰۲۰)
۲۰۱۸-۲۰۰۴	عوامل تأثیرگذار بر مدل‌های زنجیره تأمین حلقه بسته	(شکاریان، ۲۰۲۰)
۲۰۱۹-۲۰۰۸	زنجیره تأمین حلقه بسته	(رازا و همکاران، ۲۰۲۰)

زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت

مدیریت عدم قطعیت یک چالش اصلی در مدیریت زنجیره تأمین است. بنابراین، انتظار می‌رود که آن دسته از روش‌های برنامه‌ریزی زنجیره تأمین که عدم اطمینان را شامل نمی‌شوند، در مقایسه با مدل‌هایی که آن را بصورت ضمنی رسماً بررسی می‌کنند، نتایج بدتری کسب نمایند. عدم قطعیت به عنوان تفاوت بین مقدار اطلاعات مورد نیاز برای اجرای یک کار و اطلاعاتی که در واقع در دسترس است تعریف می‌شود (پیدرو و همکاران، ۲۰۰۹). ملاحظات عدم اطمینان، شرایطی نظیر تقاضا و موجودی تصادفی، پارامترهای نامشخص و اختلال در خدمت‌دهی است (فراهانی و همکاران، ۲۰۱۴). در ادامه در جدول (۲) مقالات اخیر که بر عدم قطعیت در زنجیره تأمین تمرکز داشته‌اند بررسی شده است.

جدول ۲. مقالات اخیر در حوزه عدم قطعیت در زنجیره تأمین

نویسندگان و سال	شرح تحقیق
(نژادروشن و همکاران، ۲۰۲۰)	رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی- تصادفی مبتنی بر سناریو برای بررسی لجستیک بشردوستانه ارتجاعی (تاب آور) با در نظر گرفتن زمان سفر و سطح تاب آوری امکانات
(همتی و پسندیده، ۲۰۲۰)	مساله مکان‌یابی تأمین‌کننده، انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش دو هدفه با محدودیت‌های سبز: رویکرد مبتنی بر سناریو
(فتح‌اللهی-فرد و همکاران، ۲۰۲۰a)	شبکه زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته برای یک سیستم یکپارچه تأمین آب و جمع‌آوری فاضلاب در شرایط عدم اطمینان
(پورمهدی و همکاران، ۲۰۲۰)	طراحی مبتنی بر سناریو یک شبکه زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته فولادی با در نظر گرفتن فناوری تولید
(عبدی و همکاران، ۲۰۲۱)	مجموعه‌ای از فراابتکاری‌های تنظیم شده جهت حل مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم اطمینان
مقالات مروری	
(توردکیلا و همکاران، ۲۰۲۱)	روش‌های بهینه‌سازی شبیه‌سازی برای طراحی و ارزیابی عرضه انعطاف پذیر شبکه‌های زنجیره‌ای تحت سناریوهای عدم اطمینان
(پنگ و همکاران، ۲۰۲۰)	فاکتورهای عدم اطمینان، روش‌ها و راه‌حل‌های زنجیره تأمین حلقه بسته
(پادولوه و همکاران، ۲۰۲۰)	مدل‌های عدم قطعیت در زنجیره تأمین معکوس

زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی و ماهی

از آنجایی که موضوع مورد بررسی در این تحقیق زنجیره تأمین ماهی بوده و این محصول از اقلام فاسدشدنی است ابتدا مروری در زمینه محصولات فساد پذیر و زنجیره تأمین سرد انجام شده است. فسادپذیری مهمترین پارامتری است که بر طراحی و مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی تاثیر می‌گذارد. اولین مطالعه در زمینه فسادپذیری محصولات، مربوط به مطالعه قره و شریدر (۱۹۶۳) است. نویسندگان خاطرنشان ساختند که زوال (فساد) موجودی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کل هزینه‌های موجودی داشته باشد، در حالیکه اگر در تجزیه و تحلیل موجودی، زوال (فساد) موجودی گرفته شود، صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه می‌تواند به دست آید. فسادپذیری توجه محققان حوزه SC را به خود جلب کرده است (گوویندان و همکاران، ۲۰۱۴).

مدیریت زنجیره تامین محصول فاسد شدنی^۱ (PPSC) به دلیل عدم قطعیت تقاضا، تغییرپذیری، عمر کوتاه محصول و نرخ زوال بالا، به طور خاصی پیچیده بوده و برای کاهش سرعت فاسد شدن، نیاز به شرایط ویژه انبار دارد (فرگوسن و کتزنبرگ، ۲۰۰۶). در نظر گرفتن فسادپذیری در زنجیره تامین، هم در عمل و هم در تحقیقات علمی افزایش یافته است (گوویندان و همکاران، ۲۰۱۴). مقالات مروری اخیر در این حوزه عبارتند از مقالات (چادوری و همکاران، ۲۰۱۸؛ لوسیانتورو و همکاران، ۲۰۱۸؛ امینی و همکاران، ۲۰۲۰).

عبارت "زنجیره تامین مواد غذایی فاسدشدنی^۲ (PFSC)" برای اولین بار در تحقیق تیلور (۱۹۹۴) عنوان شد. با توجه به اهمیت مدیریت زنجیره تامین مواد غذایی، مطالعات بسیاری انجام شده است که روش‌های مختلفی را برای افزایش کارایی زنجیره تامین مواد غذایی پیشنهاد کرده‌اند (گوویندان و همکاران، ۲۰۱۵). در ادامه به مقالات مرتبط با حوزه تحقیق اشاره شده است.

زنجیره تامین میگوهای سفید تایوان توسط لین و وو (۲۰۱۶) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها عملکرد یک زنجیره تامین متمرکز و یک زنجیره تامین غیر متمرکز را مقایسه کردند. ویژگی عمده زنجیره تامین میگو عوامل متعددی نظیر تقاضای زیاد، قیمت بازار و مکان‌های مختلف صید یا پرورش عنوان شد. تحقیق آن‌ها مجموعه‌ای از مراکز توزیع، عمده فروشان، کارخانه‌های فرآوری میگو، بازارها، کارخانه پودر ضایعات میگو و بازار پودر میگو را در نظر گرفت. یک مدل ریاضی پیشنهاد شد که هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل از طریق زنجیره تامین است. عابدی و زو (۲۰۱۷) یک مدل بهینه‌سازی برای خرید تخم ماهی، فرایند تولید پرورش و توزیع ماهی برداشت (صید) شده در یک زنجیره تامین ماهی ارائه دادند. آن‌ها بیان نمودند که با توجه به پیچیدگی و تنوع زنجیره‌های تامین ماهی در دنیای واقعی، مدل بر اساس یک مطالعه موردی برای ماهی قزل‌آلا پایه‌گذاری شده تا عوامل موثر بر زنجیره گرم و زنجیره سرد بررسی گردد. زنجیره گرم به طور عمده فاکتورهای بیولوژیکی را در نظر می‌گیرد در حالی که ماهی زنده است و زنجیره سرد اغلب عوامل اقتصادی را برای ماهی آماده ی برداشت، برداشت شده و فرآوری شده،

1. Management of the perishable product supply chain

2. Perishable Food Supply Chain

بررسی می‌کند. مدل پیشنهادی با برنامه‌ریزی تولید ماهی قزل‌آلا به تصمیم‌گیری بهتر در مورد میزان خرید تخم ماهی، بهترین زمان برای برداشت ماهی و دوره‌های پرورش کمک می‌کند. علاوه بر این، مدل آن‌ها در برنامه‌ریزی توزیع روش طبقه‌بندی مشتری را اعمال می‌نماید که اولویت بندی تحویل ماهی تازه به مشتریان سود آورتر را نتیجه می‌دهد. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای بیشینه‌سازی سود کلی توسعه داده شد. نتایج تجربی نشان داد که پس از اعمال استراتژی بهینه‌سازی پیشنهاد شده، در مقایسه با استراتژی پرورش سنتی، سود کلی پرورش دهندگان می‌تواند افزایش یابد. تیریزی و همکاران (۲۰۱۸) با ارائه یک رویکرد مدل‌سازی و بهینه‌سازی جدید، مدل تعادلی را در زنجیره تامین مواد غذایی فاسدشدنی در قالب مطالعه موردی بر زنجیره عرضه ماهیان پرورشی گرمابی مطالعه نمودند. آن‌ها یک الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی با هدف بیشینه‌سازی سود مزارع پرورش و غرفه‌های فعال در بازار توزیع ماهی، مبتنی بر روش فراابتکاری بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO) برای حل مساله برنامه‌ریزی دو سطحی توسعه دادند. اجرای مدل با بهره‌گیری از داده‌های گردآوری شده از سطح بازار ماهی ایران، مبین کارایی مدل پیشنهادی در حل مسایل واقعی زنجیره تامین مواد غذایی فاسدشدنی بود.

اونگو و همکاران (۲۰۱۹) مساله IRP محصولات غذایی کشاورزی را با تقاضاهای تصادفی مورد مطالعه قرار داده و آن را به عنوان برنامه‌ریزی صحیح مختلط مدل‌سازی کرده‌اند. آن‌ها همچنین یک الگوریتم شبیه‌سازی ارائه دادند که شبیه‌سازی مونت کارلو را در جستجوی محلی تکراری برای حل آن ادغام می‌کند. طبق آزمایشات، الگوریتم ارائه شده توسط آن‌ها راه حل اولیه را با زمان‌های محاسباتی منطقی بهبود بخشید. برنامه‌ریزی تولید چند محصولی و تخصیص توزیع ترکیبی در SC برای یک تولیدکننده لبنیات توسط مسروره و همکاران (۲۰۲۰) پیشنهاد شد. بر اساس یافته‌ها، مدل‌های ارائه شده نقش مهمی در کاهش هزینه کل و رشد سود ناخالص سالانه داشتند. چن و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل چهار هدفه MILP برای یک سیستم هوشمند لجستیک غذا پیشنهاد کردند. اهداف مورد بررسی عبارتند از کمینه‌سازی هزینه کل سیستم، بیشینه‌سازی کیفیت غذا، کمینه‌سازی میزان انتشار CO₂ در حمل و نقل و تولید و کمینه‌سازی موعده تحویل. مدل ریاضی فرموله

شده، توسط یک الگوریتم چند هدفه PSO با استفاده از ساختارهای مختلف اجتماعی بهینه‌سازی شد. رهبری و همکاران (۲۰۲۰) مساله مسیریابی - موجودی - مکان‌یابی^۱ (LIRP) چندهدفه با توجه به وسایل نقلیه مختلف با ظرفیت‌های مختلف برای زنجیره تأمین گوشت قرمز را بررسی نمودند. هدف تحقیق آن‌ها کاهش هزینه‌های متغیر و ثابت حمل و تولید، هزینه‌های نگهداری گوشت قرمز، هزینه پرورش دام و اجاره یخچال است. شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده شامل پنج سطح و مدل ارائه شده یک مدل MILP است. برای ارزیابی قابلیت مدل ارائه شده، یک مورد واقعی در ایران حل شده و نتایج آن با شرایط واقعی یک شرکت مقایسه شده است. ژنگ و همکاران (۲۰۲۰) یک مساله برنامه‌ریزی زنجیره تأمین مواد غذایی حلقه بسته چند دوره‌ای یکپارچه با اقلام قابل بازگشت را با در نظر گرفتن سود کل و تأثیرات زیست محیطی به طور همزمان بررسی نمودند. جهت مدل‌سازی مساله، یک مدل MILP دو هدفه بهبود یافته ارائه شد. برای حل مساله، یک روش ابتکاری جهت دستیابی به مرز تقریبی پارتو پیشنهاد کردند.

غلامی‌زنجانی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل MIP دو مرحله‌ای عمومی برای ادغام ویژگی‌های اساسی تصمیمات مربوط به تخصیص - مکان‌یابی و بازسازی موجودی ارائه دادند. همچنین سه استراتژی انعطاف‌پذیری برای مواجهه با شرایط عدم قطعیت به کار گرفتند. بر اساس آزمایش‌های عددی، مدل‌های مختلف طراحی شده کارا بوده و همچنین اهمیت ترکیب مفروضات در نظر گرفته شده مشخص شد. در مطالعه صالحی-امیری و همکاران (۲۰۲۱)، با انجام یک بررسی کامل از مطالعات گذشته، یک شبکه CLSC جدید برای صنعت گردو به عنوان بخشی از محصولات کشاورزی طراحی شده است. آن‌ها یک مدل MILP جدید برای شبکه پیشنهادی ایجاد کردند که هزینه‌های کلی در صنعت گردو را به حداقل می‌رساند. شبکه طراحی شده جریان روبه جلو و معکوس را نه تنها برای پاسخگویی به تقاضاهای بازارهای مختلف بلکه برای آماده‌سازی محصولات برگشتی برای استفاده دوباره در نظر می‌گیرد. به منظور حل مدل پیشنهادی، مجموعه‌ای از روش‌های حل دقیق، فراابتکاری و فراابتکاری تلفیقی استفاده شده است. جوزدانی و گوویندان (۲۰۲۱) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای بهینه‌سازی هزینه، مصرف

انرژی و ازدحام ترافیک مرتبط با عملیات‌های زنجیره تأمین پایدار لابیات ارائه کردند. عدم قطعیت در رابطه با عمر محصول به عنوان یک متغیر تصادفی مدل‌سازی شده و فرض شد که مواد غذایی فاسدشدنی تحت تأثیر استفاده از یخچال وسایل نقلیه قرار داشته که به عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شدند. علاوه بر این، چندین نوع وسیله نقلیه و چندین نوع محصول در نظر گرفتند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند تأثیرات زیست محیطی و اجتماعی زنجیره تأمین بدون تأثیر زیاد بر جنبه اقتصادی کاهش دهند. علاوه بر این، مقالات مروری مختلفی به بررسی SCS مواد غذایی فاسدشدنی پرداخته است: (سیده و همکاران، ۲۰۱۸؛ اوتومو و همکاران، ۲۰۱۸؛ دانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شارما و همکاران، ۲۰۲۰).

بررسی برخی از ادبیات مرتبط با موضوع مورد مطالعه تحقیق و شکاف تحقیقاتی در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین چادهوری و آریان‌پور (۲۰۱۸) در مقاله مروری خود به این نتیجه رسیدند که ادبیات محدودی در مورد چگونگی استفاده از داده‌ها برای تصمیم‌گیری در زنجیره‌های سرد و به ویژه برای ماهی و محصولات دریایی وجود دارد. بیشتر مطالعات انجام شده از قبیل مدل‌سازی ریاضی، بررسی و مطالعه موردی در مورد میوه‌ها، سبزیجات و همچنین محصولات لبنی و در مرحله توزیع انجام گرفته است. در حالیکه برای بررسی محصولات ماهی عمدتاً روش‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. این نشان می‌دهد که امکان بررسی بیشتر برای ماهی به خصوص در مراحل برداشت، تهیه و خرده‌فروشی زنجیره سرد وجود دارد.

جدول ۳. مقایسه مطالعات پیشین و تحقیق حاضر

مکان نامی - شبکه	مقاله	روش حل	تافلها	مدل	تابع هدف	نوع محصول	نویسندگان
-	مورد مطالعاتی (بیگو- تایلند)	EX	غیرقطبی	NLP	سود کل (SO)	دروایی	لین و وو (۲۰۱۶)
-	مورد مطالعاتی (ژولآلا- آمریکا)	EX	قطبی	MILP	سود کل (SO)	دروایی	عابدی و زر (۲۰۱۷)
-	مورد مطالعاتی (رامی- کرمان- ایران)	MHE	قطبی	NLP	سود کل (BL)	دروایی	تیریزی و همکاران (۲۰۱۸)
-	مقاله عدوی	HE, MHE	غیرقطبی	MIP	سود کل (SO)	باقیانی	ارنگی و همکاران (۲۰۱۹)
-	مقاله عدوی	EX	قطبی	MILP	سود کل، هزینه، راهاندازی کل (SO)	لیبات	سیرزوه و همکاران (۲۰۲۰)
-	مقاله عدوی	MHE	قطبی	MILP	هزینه حمل و نقل، کیفیت غذا، CO ₂ ، موده تحویل (MO)	غذا	چن و همکاران (۲۰۲۰)
-	مورد مطالعاتی (گوشت فرور- ایران)	EX	قطبی	MIP	سود کل (SO)	گوشت	رهبری و همکاران (۲۰۲۰)
CTSC	مورد مطالعاتی (گوشت- چین)	HE	قطبی	MILP	سود کل، اثرات زیست محیطی (MO)	غذا	ژنگ و همکاران (۲۰۲۰)
-	مقاله عدوی	HE	غیرقطبی	MIP	هزینه کل (SO)	غذا	غلامرضا زنجانی و همکاران (۲۰۲۱)
CTSC	مقاله عدوی	EX, MHE, Hybrid MHE	قطبی	MILP	سود کل (SO)	باقیانی	صالحی-تابیری و همکاران (۲۰۲۱)
-	مکانیابی	EX	قطبی	MIP	سود کل، ترانزیک چانه‌ای، صرف سوخت (MO)	لیبات	جوزدانی و گوربیدان (۲۰۲۱)
CTSC	مکانیابی- تخصیص	EX, MHE, Hybrid MHE	غیرقطبی	MILP	هزینه کل، جابجایی، تقاضای مشتریان (MO)	دروایی	مطالعه حاضر

SO = Single-objective optimization, MO = Multi-objective optimization, BL = Bi-level optimization

Solution approach: EX = Exact solution method, HE = Heuristics method, MHE=Meta-heuristic method

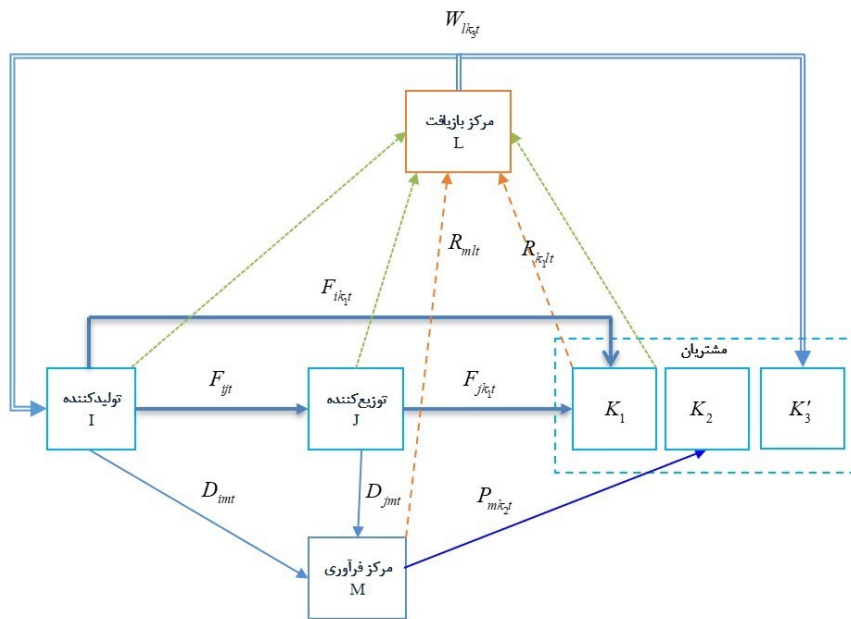
مدل پیشنهادی

شرح مساله

تحقیق حاضر با توسعه یک مدل ریاضی دوهدفه تحت شرایط عدم قطعیت، CLSC را برای ماهیان پرورشی در حالت جریان رو به جلو و معکوس طراحی کرده است. شبکه لجستیک طراحی شده یک دوره‌ای و شامل تولیدکنندگان (استخر پرورش ماهی، شالیزار و پرورش در قفس در دریا)، مراکز توزیع، مراکز بازیافت (مراکز تولید پودر ماهی)، مراکز فرآوری و مشتریان (بازارها: بازارهای ماهی تازه، بازارهای فرآوری ماهی و بازارهای پودر ماهی) است. با جمع آوری ضایعات و تلفات ماهی در زنجیره تامین ماهی، هزینه زنجیره به حداقل رسیده و پاسخگویی به تقاضای مشتری به حداکثر می‌رسد. علاوه بر مقدار تقاضای در نظر گرفته شده به عنوان پارامتر برای هر سه نوع تقاضا (ماهی تازه، ماهی فرآوری شده و پودر ماهی)، مقادیر بیشتر و کمتر برای تقاضا نیز با در نظر گرفتن احتمال وقوع، لحاظ گشته است. بدین ترتیب ۳ سناریوی احتمالی برای تقاضاهای مشتریان در نظر گرفته شده است.

در شبکه زنجیره تامین طراحی شده که جریان محصولات در شکل (۵) نشان داده شده است، در جریان رو به جلو، محصولات از تولیدکنندگان به مراکز توزیع و مشتریان و از مراکز توزیع به مشتریان منتقل می‌شوند تا تقاضای آن‌ها را برآورده کنند. اندیس i برای تولیدکننده، اندیس j برای توزیع‌کننده و اندیس l برای مراکز بازیافت هم شامل نقاط موجود و هم نقاط بالقوه می‌باشد. برای مراکز پردازش و مشتریان مکان‌های ثابت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که موجودی اولیه همه‌ی مراکز برابر با صفر فرض شده است. میزان تولید محصولات توسط تولیدکنندگان به صورت دقیق مشخص نمی‌باشد و به صورت متغیر تصمیم در نظر گرفته شده که کوچک‌تر از حداکثر ظرفیت تولید مزارع می‌باشد. با توجه به فسادپذیر بودن محصول، نرخ فساد در سه سطح ابتدایی (تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان ماهی تازه) لحاظ شده است. با توجه به ضایعات داشتن محصول، نرخ ضایعات در دو سطح مشتریان ماهی تازه و مراکز فرآوری لحاظ شده است. هزینه حمل و نقل محصول میان سطوح شبکه بر اساس مسافت بین نقاط محاسبه شده

و فرض می‌شود یک نوع تجهیز حمل‌ونقل با ظرفیت و هزینه معین در دسترس است. امکان جابه‌جایی محصول فرآوری شده میان مراکز فرآوری وجود ندارد. امکان جابه‌جایی میان تولیدکنندگان یا میان مشتریان وجود ندارد. امکان جابه‌جایی میان مراکز بازیافت وجود ندارد. محصولات بازگشتی در جریان معکوس به مراکز بازیافت حمل می‌شوند تا به فرآورده‌های جانبی تبدیل شوند و مجدداً برای مشتریان بازار پودر ماهی حمل می‌شوند. با توجه به مزارع پرورش ماهی (تولیدکنندگان) به عنوان مشتریان بالقوه غذای ماهی، می‌توان شبکه را CLSC در نظر گرفت که تولیدکنندگان نقش مشتری پودر ماهی را بازی می‌کنند. کاهش چشمگیر در عمر محصول، منابع طبیعی و محل دفن زباله، مدیریت پسماند را به یک مساله مهم تبدیل کرده است.



شکل ۵. نمای زنجیره تامین حلقه بسته ماهی

علامت گذاری مدل

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم برای مدل ریاضی به شرح زیر ارائه می‌شود:

اندیس‌ها

$i_1 = 1, 2, \dots, I_1$	مکان‌های تولید (استخر) - ثابت
$i_2 = 1, 2, \dots, I_2$	مکان‌های تولید (شالیزار) - پتانسیل
$i_3 = 1, 2, \dots, I_3$	مکان‌های تولید (قفس در دریا) - پتانسیل
$i = i_1 + i_2 + i_3$	مکان‌های تولید (مزارع پرورش ماهی) - کل نقاط
$j_1 = 1, 2, \dots, J_1$	مکان‌های توزیع - ثابت
$j_2 = 1, 2, \dots, J_2$	مکان‌های توزیع - پتانسیل
$j = j_1 + j_2$	مکان‌های توزیع - کل نقاط
$k_1 = 1, 2, \dots, K_1$	مکان‌های مشتریان (بازار ماهی تازه)
$k_2 = 1, 2, \dots, K_2$	مکان‌های مشتریان (بازار ماهی فرآوری شده)
$k'_3 = 1, 2, \dots, K'_3$	مکان‌های مشتریان (بازار پودر ماهی)
$k''_3 = 1, 2, \dots, K''_3$	بعضی از تولیدکنندگان (مزارع ماهی) به عنوان مشتری پودر ماهی
$k_3 = k'_3 + k''_3$	مکان‌های مشتریان پودر ماهی
$l_1 = 1, 2, \dots, L_1$	مکان‌های مراکز بازیافت ضایعات ماهی - ثابت
$l_2 = 1, 2, \dots, L_2$	مکان‌های مراکز بازیافت ضایعات ماهی - پتانسیل
$l = l_1 + l_2$	مکان‌های مراکز بازیافت ضایعات ماهی - کل نقاط
$m = 1, 2, \dots, M$	مکان‌های مراکز فرآوری ماهی
$u = 1, 2, \dots, U$	سناریوها

پارامترها

f_i	هزینه ثابت مورد نیاز برای احداث مرکز تولید i
f_j	هزینه ثابت مورد نیاز برای احداث مرکز توزیع j
f_l	هزینه ثابت مورد نیاز برای احداث مرکز بازیافت ضایعات ماهی l
Cf_{ij}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول زنده از تولید کننده i به مرکز توزیع j
Cf_{ik_1}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول تازه از تولید کننده i به مشتری k_1
Cf_{jk_1}	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول تازه از مرکز توزیع j به مشتری k_1
Cd_{im}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول تازه از تولید کننده i به مرکز فرآوری ماهی m
Cd_{jm}	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول تازه از مرکز توزیع j مرکز فرآوری ماهی m
Cp_{mk_2}	هزینه حمل هر واحد ماهی فرآوری شده از مرکز فرآوری ماهی به مشتری k_2
Cr_{k_1l}	هزینه حمل و نقل هر واحد از ضایعات محصول از مشتری k_1 به مرکز بازیافت ضایعات ماهی l

Cr_{mi}	هزینه حمل و نقل هر واحد از ضایعات محصول از مرکز فرآوری ماهی m به مرکز بازیافت ضایعات ماهی i
Cw_{lk_3}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول بازیافتی از مرکز بازیافت ضایعات ماهی l به بازارهای پودر ماهی k_3
Cq_{il}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول بی کیفیت از تولید کننده i به مرکز بازیافت ضایعات ماهی l
Cq_{jl}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول بی کیفیت از مرکز توزیع j مرکز بازیافت ضایعات ماهی l
Cq_{ki}	هزینه حمل و نقل هر واحد محصول بی کیفیت از مشتری k_1 به مرکز بازیافت ضایعات ماهی i
Cp	هزینه فرآوری هر واحد محصول در مراکز فرآوری ماهی
Cr	هزینه تولید پودر ماهی هر واحد از محصول در مراکز بازیافت ضایعات ماهی
Cp'	هزینه تولید هر واحد از محصول توسط تولیدکنندگان
d_{k_1u}	تقاضای محصول تازه توسط مشتری k_1 برای سناریوی u
d_{k_2u}	تقاضای محصول فرآوری شده توسط مشتری k_2 برای سناریوی u
d_{k_3u}	تقاضا برای محصول بازیافتی (پودر ماهی) توسط بازارهای پودر ماهی k_3 برای سناریوی u
λc_i	حداکثر ظرفیت تولید تولید کننده i
λh_j	ظرفیت نگهداری مرکز توزیع j
λr_l	ظرفیت تولید پودر ماهی مرکز بازیافت ضایعات ماهی l
λr_m	ظرفیت فرآوری مرکز فرآوری ماهی m
α_i	درصد رو به زوال رفتن محصول در مراکز تولید
α_j	درصد رو به زوال رفتن محصول در مراکز توزیع
α_{k_1}	درصد رو به زوال رفتن محصول در نزد مشتری k_1
β_{k_1}	درصد ضایعات محصول در نزد مشتری k_1
β_m	درصد ضایعات محصول در نزد مراکز فرآوری ماهی
θ	حداقل میزان استفاده از ظرفیت هر مرکز توزیع
δ	حداکثر میزان تأمین تقاضای مشتری برای ماهی تازه مستقیماً از تولید کننده
ρ	ضریب اهمیت وزنی برای پاسخگویی به جریان‌های رو به جلو
$1-\rho$	ضریب اهمیت وزنی برای ایجاد یک جریان معکوس
φ	نرخ تبدیل ضایعات محصول به محصول بازیافتی (پودر ماهی)
φ'	نرخ تبدیل یک محصول به یک محصول فرآوری شده
MM	عدد مثبت خیلی بزرگ
p_u	احتمال سناریو u

متغیرهای تصمیم

F_{iju} مقدار محصول زنده ارسال شده از تولید کننده i به مرکز توزیع j در سناریوی u

F_{ik_1u}	مقدار محصول تازه ارسال شده از تولید کننده i به مشتری k_1 در سناریوی u
F_{jk_1u}	مقدار محصول تازه ارسال شده از مرکز توزیع j به مشتری k_1 در سناریوی u
R_{k_1lu}	مقدار ضایعات ارسال شده از مشتری k_1 به مرکز بازیافت ضایعات ماهی l در سناریوی u
R_{mlu}	مقدار ضایعات ارسال شده از مرکز فرآوری ماهی m به مرکز بازیافت ضایعات ماهی l در سناریوی u
D_{imu}	مقدار محصول تازه ارسال شده از تولید کننده i به مرکز فرآوری ماهی m در سناریوی u
D_{jmu}	مقدار محصول تازه ارسال شده از مرکز توزیع j به مرکز فرآوری ماهی m در سناریوی u
P_{mk_2u}	مقدار محصول فرآوری شده ارسالی از مرکز فرآوری ماهی m به مشتری k_2 در سناریوی u
W_{lk_3u}	مقدار محصول بازیافتی (پودر ماهی) ارسال شده از مراکز بازیافت ضایعات ماهی l به بازارهای پودر ماهی k_3 در سناریوی u
Q_{ilu}	مقدار محصول بی کیفیت حمل شده از تولید کننده i به مراکز بازیافت ضایعات ماهی l در سناریوی u
Q_{jlu}	مقدار محصول بی کیفیت حمل شده از مرکز توزیع j به مراکز بازیافت ضایعات ماهی l در سناریوی u
Q_{k_1lu}	مقدار محصول بی کیفیت حمل شده از مشتری k_1 به مراکز بازیافت ضایعات ماهی l در سناریوی u
λ_{iu}	مقدار تولید تولید کننده i در سناریوی u
X_i	اگر مرکز تولید i در محل کاندید احداث شود یک، در غیر این صورت صفر است.
W_j	اگر مرکز توزیع j در محل کاندید احداث شود یک، در غیر این صورت صفر است.
Y_l	اگر مرکز بازیافت ضایعات ماهی l در محل کاندید احداث شود یک، در غیر این صورت صفر است.

مدل ریاضی زنجیره تامین حلقه بسته ماهی در شرایط عدم قطعیت

مدل ریاضی طراحی زنجیره تامین حلقه بسته (CLSC) دو هدفه ماهی در شرایط عدم قطعیت به صورت زیر فرموله شده است:

$$\text{Min } Z = z_1 + z_2 + z_3 \quad (1)$$

$$z_1 = \sum_{i=1}^I f_i \times X_i + \sum_{j=1}^J f_j \times W_j + \sum_{l=1}^L f_l \times Y_l \quad (2)$$

$$z_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U p_u \times Cf_{ij} \times F_{iju} + \sum_{j=1}^J \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{u=1}^U p_u \times Cf_{jk_1} \times F_{jk_1u} + \sum_{i=1}^I \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{u=1}^U p_u \times Cf_{ik_1} \times F_{ik_1u} \quad (۳)$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U p_u \times Cd_{im} \times D_{imu} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U p_u \times Cd_{jm} \times D_{jmu} + \sum_{m=1}^M \sum_{k_2=1}^{K_2} \sum_{u=1}^U p_u \times Cp_{mk_2} \times P_{mk_2u}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \sum_{u=1}^U p_u \times Cr_{ml} \times R_{mlu} + \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{l=1}^L \sum_{u=1}^U p_u \times Cr_{k_1l} \times R_{k_1lu}$$

$$+ \sum_{l=1}^L \sum_{k_3=1}^{K_3} \sum_{u=1}^U p_u \times Cw_{lk_3} \times W_{lk_3u}$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{u=1}^U p_u \times Cq_{il} \times Q_{ilu} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{u=1}^U p_u \times Cq_{jl} \times Q_{jlu} + \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{l=1}^L \sum_{u=1}^U p_u \times Cq_{k_1l} \times Q_{k_1lu}$$

$$z_3 = \sum_{m=k_2=1}^M \sum_{k_2=1}^K \sum_{u=1}^U p_u \times P_{mk_2u} \times Cp + \sum_{l=1}^L \sum_{k_3=1}^{K_3} \sum_{u=1}^U p_u \times W_{lk_3u} \times Cr + \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U p_u \times \lambda_{iu} \times Cp' \quad (۴)$$

$$Max Z' = (\rho / 2) \times \left(\sum_{k_j=1}^{K_j} \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U p_u \times F_{ik_ju} + \sum_{k=1}^{K_1} \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U p_u \times F_{jk_u} \right) / \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{u=1}^U p_u \times d_{k_1u} \quad (۵)$$

$$+ (\rho / 2) \times \left(\sum_{k_2=1}^{K_2} \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U p_u \times P_{mk_2u} / \sum_{k_2=1}^{K_2} \sum_{u=1}^U p_u \times d_{k_2u} \right)$$

$$+ (1 - \rho) \times \left(\sum_{l=1}^L \sum_{k_3=1}^{K_3} \sum_{u=1}^U p_u \times W_{lk_3u} \right) / \left(\sum_{k_3=1}^{K_3} \sum_{u=1}^U p_u \times d_{k_3u} \right)$$

محدودیت‌ها:

$$\lambda_{iu} \times (1 - \alpha_i) - \sum_{m=1}^M D_{imu} = \sum_{j=1}^J F_{iju} + \sum_{k_j=1}^{K_j} F_{ik_ju} \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^I F_{iju} \leq MM \times W_j \quad \forall j \in J, \forall u \in U \quad (۷)$$

$$\lambda_{iu} \leq \lambda c_i \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^I F_{iju} \leq \lambda h_j \quad \forall j \in J, \forall u \in U \quad (۹)$$

$$\sum_{i=1}^I F_{iju} \geq \theta \times \lambda h_j \quad \forall j \in J_1, \forall u \in U \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i=1}^I F_{iju} = \sum_{k_j=1}^{K_j} F_{jk_ju} + \sum_{m=1}^M D_{jmu} + \sum_{l=1}^L Q_{jlu} \quad \forall j \in J, \forall u \in U \quad (۱۱)$$

$$\sum_{j=1}^J F_{jk,\mu} + \sum_{i=1}^I F_{ik,\mu} \leq d_{k,\mu} \quad \forall k_1 \in K_1, \forall u \in U \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I F_{ik,\mu} \leq \delta \times d_{k,\mu} \quad \forall k_1 \in K_1, \forall u \in U \quad (13)$$

$$\left(\sum_{i=1}^I D_{imu} + \sum_{j=1}^J D_{jmu} - \sum_{l=1}^L R_{mlu} \right) \times \varphi' = \sum_{k_2=1}^{K_2} P_{mk_2u} \quad \forall m \in M, \forall u \in U \quad (14)$$

$$\sum_{k_2=1}^{K_2} P_{mk_2u} \leq \lambda r_m \quad \forall m \in M, \forall u \in U \quad (15)$$

$$\sum_{m=1}^M P_{mk_2u} \leq d_{k_2,u} \quad \forall k_2 \in K_2, \forall u \in U \quad (16)$$

$$\sum_{l=1}^L Q_{ilu} \leq \alpha_i \times \lambda_{iu} \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{ilu} \leq MM \times Y_l \quad \forall l \in L, \forall u \in U \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^L Q_{jlu} \leq \alpha_j \times \sum_{i=1}^I F_{iju} \quad \forall j \in J, \forall u \in U \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{jlu} \leq MM \times Y_l \quad \forall l \in L, \forall u \in U \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L Q_{k_1lu} \leq \alpha_{k_1} \times \left(\sum_{i=1}^I F_{ik_1u} + \sum_{j=1}^J F_{jk_1u} \right) \quad \forall k_1 \in K_1, \forall u \in U \quad (21)$$

$$\sum_{k_1=1}^{K_1} Q_{k_1lu} \leq MM \times Y_l \quad \forall l \in L, \forall u \in U \quad (22)$$

$$\sum_{l=1}^L R_{k_1lu} \leq \beta_{k_1} \times \left(\sum_{i=1}^I F_{ik_1u} + \sum_{j=1}^J F_{jk_1u} \right) \times (1 - \alpha_{k_1}) \quad \forall k_1 \in K_1, \forall u \in U \quad (23)$$

$$\sum_{k_1=1}^{K_1} R_{k_1lu} \leq MM \times Y_l \quad \forall l \in L, \forall u \in U \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^L R_{mlu} \leq \beta_m \times \left(\sum_{i=1}^I D_{imu} + \sum_{j=1}^J D_{jmu} \right) \quad \forall m \in M, \forall u \in U \quad (25)$$

$$\sum_{m=1}^M R_{mlu} \leq MM \times Y_l \quad \forall l \in L, \forall u \in U \quad (26)$$

$$\left(\sum_{m=1}^M R_{mlu} + \sum_{k_1=1}^{K_1} R_{k_1lu} + \sum_{i=1}^I Q_{ilu} + \sum_{j=1}^J Q_{jlu} + \sum_{k_1=1}^{K_1} Q_{k_1lu}\right) \times \varphi = \sum_{k_3=1}^{K_3} W_{lk_3u} \quad (27)$$

$$\forall l \in L, \forall u \in U$$

$$\sum_{k_3=1}^{K_3} W_{lk_3u} \leq \lambda r_l \quad \forall l \in L, \forall u \in U \quad (28)$$

$$\sum_{l=1}^L W_{lk_3u} \leq d_{k_3u} \quad \forall k_3 \in K_3, \forall u \in U \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^J F_{iju} \leq MM \times X_i \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (30)$$

$$\sum_{k_1=1}^{K_1} F_{ik_1u} \leq MM \times X_i \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (31)$$

$$\sum_{m=1}^M D_{imu} \leq MM \times X_i \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (32)$$

$$\sum_{l=1}^L Q_{ilu} \leq MM \times X_i \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (33)$$

$$X_i, Y_l, W_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall j \in J \quad (34)$$

$$F_{iju}, F_{ik_1u}, F_{jk_1u}, D_{imu}, D_{jmu}, D_{jmu}, R_{k_1lu}, R_{mlu}, W_{lk_3u}, Q_{ilu}, Q_{jlu}, Q_{k_1lu} \geq 0 \quad (35)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k_1 \in K_1, k_2 \in K_2, k_3 \in K_3, m \in M, l \in L, \forall u \in U$$

$$\lambda_{iu} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall u \in U \quad (36)$$

تابع هدف اول (۱) کل هزینه‌ها که شامل هزینه‌های ثابت احداث (۲)، هزینه‌های حمل و نقل (۳)، هزینه‌های تولید تولیدکنندگان، تولیدات مراکز فرآوری ماهی و فرآیند بازیافت مراکز بازیافت ضایعات ماهی (۴) می‌شود را به حداقل می‌رساند. به علت اینکه بعضی از مراکز هم شامل نقاط موجود و هم نقاط بالقوه می‌باشند، در صورت احداث آن مرکز هزینه ثابت احداث از طریق بخش اول تابع هدف اول محاسبه شده و سایر هزینه‌های مرتبط با مکان احداث شده در دیگر بخش‌های تابع هدف لحاظ می‌گردند.

از طرف دیگر، تابع هدف دوم (۵) حداکثر سرعت پاسخگویی به تقاضای مشتریان با توجه به سناریوهای مختلف را در جریان‌های رو به جلو و معکوس شبکه حلقه بسته را ارائه می‌دهد. صورت کسر، محصولات حمل شده را به مشتریان نشان می‌دهد، در حالی که

مخرج کسر نشان دهنده تقاضاهای مشتریان است. حداکثر مقدار پاسخگویی ۱ خواهد بود. بنابراین نزدیک شدن این کسر به ۱ مطلوب است. این تابع هدف بر اساس آنچه (آلتیپارمک و همکاران، ۲۰۰۶) برای یک شبکه لجستیک رو به جلو پیشنهاد شده نمودند شکل گرفته و مقدار آن بین ۰ تا ۱ محدود می‌شود. همچنین در تحقیق حاضر از فرمول‌بندی بر اساس آنچه توسط (پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۰) به عنوان یک مدل دو هدفه برای یک شبکه لجستیک رو به جلو/معکوس پیشنهاد شد، استفاده شده است. نتایج با توجه به موازنه بین هزینه کل و سطح رضایت مشتری، تأثیر قابل توجهی در درک نیازهای احداث تسهیل جدید در سطوح مختلف تعریف شده در صنعت ماهی دارد. در مدل پیشنهادی، ρ درجه اهمیتی است که به جریان‌های رو به جلو داده می‌شود و $1 - \rho$ درجه اهمیت جریان‌های معکوس است. از آنجاییکه جریان رو به جلو شامل دو بخش برای دو نوع تقاضا است ضریب $(\rho/2)$ برای هر کدام از این دو بخش در نظر گرفته شده است. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که به ازای تمام سناریوهای محتمل برای تقاضا مقدار محصول تولیدی منهای مقدار رو به زوال و مقدار محصول ارسال شده به مراکز فرآوری با مقدار محصول ارسال شده از تولیدکنندگان به مراکز توزیع و مشتریان برابر است. محدودیت‌هایی از این دست تضمین‌کننده توازن جریان در دو طرف یک گره (سطح) هستند. محدودیت (۷) مربوط به محدودیت (۶) است و اطمینان حاصل می‌کند که محصولات فقط در صورت احداث یک مرکز توزیع در آن مکان، به یک مکان بالقوه ارسال می‌شوند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که محصول هر تولیدکننده کمتر یا برابر با حداکثر نرخ تولید پیش بینی شده است. این برای در نظر گرفتن ظرفیت تولید تولیدکننده است. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که در هر مرکز توزیع، میزان محصول دریافت شده از تولیدکنندگان کمتر یا مساوی با ظرفیت نگهداری مرکز توزیع است. همچنین بکارگیری حداقل ضریبی از ظرفیت هر مرکز توزیع با محدودیت (۱۰) تضمین می‌گردد. این ضریب به عنوان پارامتر ورودی مساله بوده و با توجه به نظر تصمیم‌گیرنده قابل تنظیم است. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که در هر مرکز توزیع، میزان محصول ارسال شده به مشتری به علاوه ارسال شده به مراکز پردازش و بعلاوه میزان محصولات رو به زوال ارسال شده به مراکز بازیافت با مقدار محصول دریافت شده از تولیدکنندگان برابر

است. از آنجاییکه مدل در حالت تک دوره‌ای (روزانه) بررسی شده، درصد زوال عدد ثابتی در نظر گرفته شده است و البته مقدار آن در سطوح بالاتر زنجیره افزایش می‌یابد. با توجه به در نظر گرفتن ضریبی به عنوان درصد زوال، محصول بی کیفیت تعیین می‌گردد. محصول بی کیفیت می‌تواند مثلاً ماهی‌ای باشد که اکسیژن یا غذای کافی به آن نرسیده و یا در اثر آلودگی آب و یا نامناسب بودن دمای نگهداری از کیفیت آن کاسته شده است. این ماهی مناسب مصرف به عنوان غذا نبوده و به همین دلیل به مراکز بازیافت انتقال داده می‌شود.

این واقعیت که تقاضای هر مشتری محصول تازه از مقدار محصول دریافت شده از تولیدکنندگان و مرکز توزیع بیشتر یا مساوی است با محدودیت اعمال (۱۲) می‌شود. محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد که حداکثر مقداری از تقاضای مشتری برای ماهی تازه به طور مستقیم از تولیدکننده تامین گردد و این مقدار با ضریب δ به عنوان پارامتر ورودی مشخص می‌گردد. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که کلیه محصولات دریافتی از تولیدکنندگان و مراکز توزیع منهای ضایعات ارسال شده به مراکز بازیافت ضرب شده در نرخ تبدیل با کل محصولات فرآوری شده ارسال شده به بازارهای محصولات فرآوری شده برابر است. محدودیت (۱۵) نشان می‌دهد که مقدار محصولات ارسال شده به بازارهای محصولات فرآوری شده کمتر یا مساوی با حداکثر نرخ پردازش پیش بینی شده و همچنین تقاضای مشتری محصول پردازش شده است (محدودیت (۱۶)). محدودیت‌ها (۱۷) نشان می‌دهد که محصولات برگشتی ارسال شده به مراکز بازیافت از هر تولیدکننده نسبت به ضایعات تولید، کمتر یا مساوی است. محدودیت (۱۷) بیانگر این واقعیت است که محصولات برگشتی ممکن است از مراکز تولید به یک مرکز پردازش فقط در صورت باز شدن یک مرکز بازیافت در یک مکان بالقوه برای چنین تاسیساتی ارسال شوند. مشابه محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸)، محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰)، محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲)، محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) و محدودیت‌های (۲۵) و (۲۶) محصولات حمل شده را به حداکثر ظرفیت تاسیسات محدود می‌کنند و احداث تسهیلات را به عنوان پیش شرط ارسال محصولات در نظر می‌گیرند.

محدودیت (۲۷) تضمین می‌کند که کلیه محصولات برگشتی دریافت شده از تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مشتریان و مراکز فرآوری ضرب شده در نرخ تبدیل با کل

محصول فرآوری شده (پودر ماهی) ارسال شده به بازارهای پودر ماهی برابر است. به دلیل اینکه محصولات دریافت شده توسط مرکز بازیافت باید طی فرآیندی تبدیل به پودر ماهی که سبک تر است شوند، این ضریب مقداری کمتر از یک است. محدودیت‌های (۲۸) و (۲۹) نشان می‌دهند که مقدار پودر ماهی که به بازارهای پودر ماهی ارسال می‌شود به ترتیب با ظرفیت تولید و تقاضای هر یک از بازارهای پودر ماهی، کمتر یا مساوی است. محدودیت‌های (۳۰) تا (۳۳) این اطمینان را حاصل می‌کنند که محصولات فقط در صورتی که یک مرکز تولید در آن مکان احداث شود، به آن مکان بالقوه ارسال می‌شوند. در نهایت، محدودیت‌های دودویی و غیر منفی در مورد متغیرهای تصمیم‌گیری مربوطه در محدودیت‌های (۳۴) و (۳۵) و (۳۶) نشان داده شده است.

روش حل

همانطور که قبلاً ذکر شد، مسائل شبکه زنجیره تأمین در دنیای واقعی پیچیده و در نتیجه برای مثال‌های در مقیاس بزرگ، NP-hard است (دنگ و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از روش‌های دقیق برای حل این مسائل به خصوص برای مسائل در ابعاد بزرگ، زمانبر و ناکارآمد است (روکو و مورائیتو، ۲۰۲۰). در این مطالعه از الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، الگوریتم بهینه‌سازی مهندسی اجتماعی چندهدفه (MOSEO) برای حل مساله استفاده شده است. علاوه بر این، از الگوریتم فراابتکاری تلفیقی چندهدفه (HGASEO) برای یافتن جواب بهینه استفاده شده است. در ادامه، رویکردهای رمزگذاری و رمزگشایی بکارگرفته شده در الگوریتم‌های فراابتکاری توضیح داده شده است. همچنین با بکارگیری روش اسپیلون-محدودیت، الگوریتم‌های فراابتکاری اعتبارسنجی شده‌اند.

رمز گذاری و رمزگشایی

در میان رویکردهای متعدد برای رویکردهای رمزگذاری در الگوریتم‌های فراابتکاری، از روش جدید مبتنی بر اولویت استفاده شده است (چراغعلی پور و همکاران، ۲۰۱۸). در این بخش، کروموزوم پیشنهادی برای شبکه زنجیره تأمین ماهی و بکارگیری روش مبتنی بر

اولویت برای برآوردن همه محدودیت‌ها با استفاده از یک مثال در اندازه کوچک توضیح داده می‌شود.

فرض بر این است که تعداد تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مشتریان محصولات تازه، مشتریان محصولات فرآوری شده، مراکز فرآوری، مراکز بازیافت و تعداد مشتریان پودر ماهی به ترتیب برابر ۳، ۲، ۳، ۲، ۱، ۲ و ۲ است. کروموزوم ارائه شده یک ماتریس با یک سطر و $(3i + 4j + 4k_1 + k_2 + k_3 + 2m + 2l)$ ستون است. ستون‌ها به شش قسمت تقسیم می‌شوند. همچنین، شکل (۶) نمای شماتیک کروموزوم پیشنهادی را نشان می‌دهد. اطلاعات این کروموزوم به طور تصادفی با اعداد در فاصله $[0, 1]$ تولید می‌شود. پس از مرتب‌سازی مقادیر، به ماتریس مبتنی بر اولویت تبدیل می‌شود.

Part 1		Part 2		Part 3		Part 4		Part 5		Part 6	
i	$j+k_1$	j	k_1	$i+j$	m	$i+j+m+2k_1$	l	m	k_2	l	k_3
...

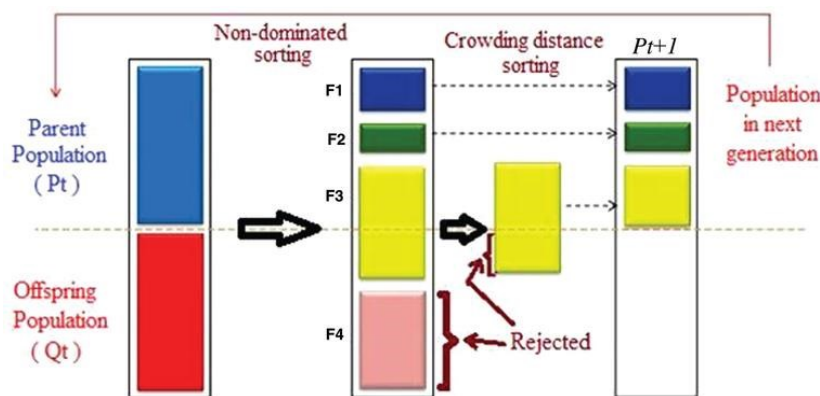
شکل ۶. نمای شماتیک کروموزوم پیشنهادی

الگوریتم‌های فراابتکاری

طی سال‌های گذشته، دانشمندان روش‌های فراابتکاری مختلفی را جهت حل مسائل NP-Hard و دستیابی به یک حل مناسب بکار گرفته‌اند. صرفه‌جویی در زمان، مناسب بودن برای مسائل با پیچیدگی بالا و اجتناب از بهینه‌سازی محلی، برجسته‌ترین مزایای این روش‌ها است (فتح‌اللهی-فرد و همکاران، ۲۰۲۰c). این مطالعه از مزایای الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌کند و دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOSEO همچنین یک فراابتکاری تلفیقی یعنی HGASEO را برای حل شبکه‌زنجیره تامین ماهی توسعه می‌دهد. در بخش‌های بعدی، الگوریتم‌های ذکر شده مورد بحث قرار گرفته و شبه‌کد هر الگوریتم ارائه می‌شود.

الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)

در میان الگوریتم‌های چندهدفه، تفاوت عمده، تعیین برازندگی است. تعیین برازندگی NSGA-II (دب و همکاران، ۲۰۰۲) به مقدار رتبه‌دهی به غلبه‌ی پارتو، بستگی دارد. سطح رتبه بندی پایین‌تر، حلی با کیفیت بالاتر است. زمانیکه دو حل از یک رتبه انتخاب می‌شوند، NSGA-II، فاصله‌ی تراکمی را برای اندازه‌گیری تراکم عنصرها در فضای حل، محاسبه می‌نماید. NSGA-II را می‌توان به سه بخش (طبقه بندی نامغلوب، محاسبه فاصله تراکمی، اپراتور محاسبه تراکم) تقسیم نمود. شکل (۷)، نحوه عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد.

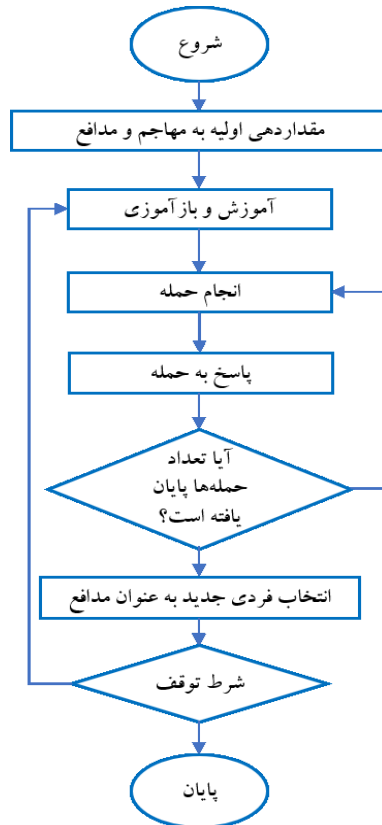


شکل ۷. نمایشی از نحوه عملکرد NSGA-II

الگوریتم بهینه‌سازی مهندسی اجتماعی چندهدفه (MOSEO)

الگوریتم بهینه‌سازی مهندسی اجتماعی (SEO) معرفی شده توسط فتح‌اللهی-فرد و همکاران (۲۰۱۸) در مقایسه با بسیاری از فراابتکاری‌ها که بر پایه جمعیت هستند، الگوریتمی تک نقطه‌ای است. این فراابتکاری تنها سه پارامتر برای تنظیم دارد و اپراتورها می‌توانند جایگاه حل‌ها را در فضای شدنی جستجو تغییر دهند. الگوریتم SEO با دو حل ابتدایی شامل مهاجم و مدافع شروع می‌شود. مهاجم قوانین فنون مهندسی اجتماعی را برای رسیدن به اهداف مطلوب خود بدست می‌آورد. با استفاده از این ویژگی‌های ساده، الگوریتم استراتژی تقویت و تنوع را بکار می‌گیرد. اساس الگوریتم به چگونگی حمله

مهاجم به یک مدافع توسط چهار تکنیک مختلف مرتبط بستگی دارد. شکل (۸) فلوجارت SEO را نشان می‌دهد. فتح‌اللهی-فرد و همکاران (۲۰۲۰b) الگوریتم SEO را به الگوریتم چندهدفه توسعه دادند. که توضیحات بیشتر توسط شبه کد در بخش بعد ارائه می‌شود.



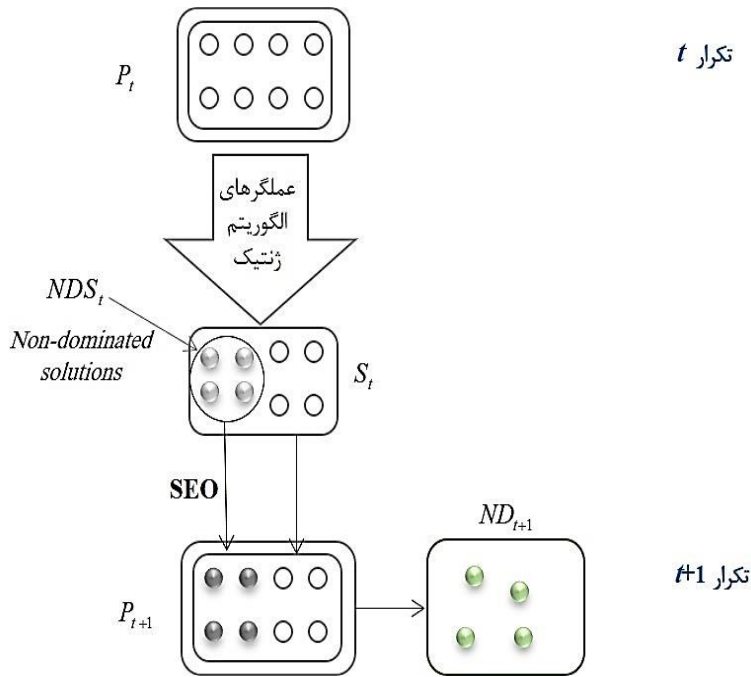
شکل ۸ فلوجارت SEO

الگوریتم فراابتکاری تلفیقی چندهدفه (HGASEO)

در این تحقیق نیز با توجه به پیچیدگی حاصل از چندهدفه بودن مسأله و برای بهره‌گیری از کارایی حاصل از ترکیب چند الگوریتم، دو روش فراابتکاری GA و SEO با در نظر گرفتن تطابق‌پذیری با یکدیگر ترکیب شده‌اند. الگوریتم فراابتکاری تلفیقی چندهدفه با هدف توسعه‌ی هر چه بهتر جستجوی فضای حل بکار گرفته می‌شود. این روش بر اساس جستجو در فضای حل‌های نامغلوب عمل می‌کند. الگوریتم فراابتکاری تلفیقی در

الگوریتم ژنتیک، جمعیت تولید شده را با آرشویی که از جستجوی الگوریتم SEO حاصل شده بهنگام می نماید. مزایای استفاده از الگوریتم های مختلف فراابتکاری از نظر بهبود استراتژی تقویت و تنوع الگوریتم ها باعث شده که محققان به بکارگیری الگوریتم های مختلف تلفیقی روی آورند حاجی آقایی-کشتلی و فتح اللهی-فرد، ۲۰۱۹). در این مطالعه، الگوریتم تلفیقی از جمله HGASEO اعمال می شود. الگوریتم پیشنهادی تلفیقی از GA به عنوان روش مبتنی بر جمعیت و SEO به عنوان یک الگوریتم تک راه حل است. در شکل های (۱۱)-(۹)،

توضیحات دقیق الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است.



شکل ۹. مراحل و طرز کار پایه‌ای فراابتکاری تلفیقی

1. Initialize *Population*;
2. Generate random *population*;
3. Evaluate Objectives Values;
4. **For** each *Parent and Child Population* **do**
5. Assign Rank (level) based on Pareto;
6. Generate sets of *non-dominated solutions*;
7. Determine *the crowding distance*
8. Loop (inside) by adding solutions to the next generation
9. **End**
10. Determine the population front;
11. **For** each determined front
12. Roulette wheel selection (NSGA-II);
13. Generate a new population with *mutation* and *crossover* (S_i)
14. **End**
15. Determine the *non-dominated solutions* (NDS_i) to be explored by the SEO;
16. Apply *Multi-objective SEO* (Algorithm MOSEO) to the set NDS_i .
Let ND_{SEO} be the set of *non-dominated solutions* at the end of the SEO.
Update the population S_i with ND_{SEO} .
17. If the stopping criterion is satisfied, then *select optimal Pareto Frontier (Best solutions)*.

شکل ۱۰. شبه کد الگوریتم HGASEO

input: NDS_i : a set of non-dominated solutions
 T_1 =clock;
Initialize attacker and defender.
Consider the non-dominated Pareto solutions (randomly chosen solution from NDS_i).
 $It=1$;
Output: ND_{SEO} (set of improved non-dominated solutions).
while *solving_time* < *Max_time*
 Do training and retraining;
 if the new position of new defender can dominate the defender
 Check and update the non-dominated solution sets.
 end
 Num_attack=1;
 while *Num_attack* < *Max_attack*
 Spot an attack;
 Check the boundary;
 Respond to attack;
 Update the Pareto optimal frontier.
 if the new position of defender dominated than the attacker
 Exchange the defender and attacker position;
 endif
 Num_attack= *Num_attack*+1;
 endwhile
 Create a new solution as a defender;
 Update the non-dominated solutions.
 $It=It+1$;
 $T2$ =clock;
 Solving_time= $T_2 - T_1$;
endwhile
Return the best non-dominated (ND_{SEO})

شکل ۱۱. شبه کد الگوریتم MOSEO بکار رفته در الگوریتم تلفیقی

نتیجه‌ی SEO، مجموعه راه‌حل‌های بهبود یافته ND_{SEO} است. پس جمعیت S_t را با راه‌حل‌های ND_{SEO} به صورت زیر به‌نگام می‌کنیم (شکل (۱۲)):

- (a) If $|ND_{seo}| = |NDS_t|$: The solutions of NDS_t are replaced by the ND_{SEO} solutions in S_t .
 (b) If $|ND_{seo}| > |NDS_t|$: The set ND_{SEO} is inserted in S_t and the set NDS_t is removed from $|ND_{seo}| - |NDS_t|$ and S_t solutions are randomly chosen.
 (c) If $|ND_{seo}| < |NDS_t|$: The set ND_{SEO} is inserted in S_t , $|NDS_t| - |ND_{seo}|$ solutions of NDS_t are randomly chosen and they are removed from S_t .

شکل ۱۲. الگوریتم به‌نگام‌سازی

معیارهای عملکردی برای مقایسه الگوریتم‌ها

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه، از چهار معیار به شرح زیر استفاده شده است.

الف) میانگین فاصله ایده‌آل (MID): این فاصله در معادله (۳۷) ارائه شده است. برای محاسبه فاصله بین راه‌حل‌های پارتو و نقطه ایده‌آل استفاده می‌شود (کریمی و همکاران، ۲۰۲۰). اگر مقادیر این شاخص کمتر باشد، عملکرد روش بیشتر است.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_1 - f_{1_{best}}}{f_{1_{total}^{max}} - f_{1_{total}^{min}}} \right)^2 + \left(\frac{f_2 - f_{2_{best}}}{f_{2_{total}^{max}} - f_{2_{total}^{min}}} \right)^2}}{n} \quad (37)$$

ب) زمان محاسباتی (CPU Time): سرعت اجرای یک الگوریتم با این شاخص ارزیابی می‌شود.

ج) پراکندگی جواب‌های نامغلوب (SNS): این روش برای اندازه‌گیری تنوع جواب‌های پارتو بکار گرفته می‌شود، که به عنوان معادله (۳۸) داده شده است:

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M - C_i)^2}{n-1}} \quad (38)$$

$$\text{where, } C_i = \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \quad \text{and} \quad M = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{f_1^2 + f_2^2}}{n}$$

د) تعداد جواب‌های پارتو (NPS): تعداد جواب‌های بهینه پارتو را برای هر الگوریتم محاسبه می‌کند. اگر NPS در یک الگوریتم بزرگتر باشد، الگوریتم عملکرد بهتری دارد.

نتایج محاسباتی

در بخش زیر، مقادیر پارامترها برای هر آزمون تصادفی تعیین می‌شود. از روش طراحی تجربی تاگوجی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. در نهایت، برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی انجام می‌شود.

داده‌های ورودی مساله تحقیق

مجموعه‌ای از مسائل نمونه با ابعاد مختلف برای تأیید مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. در اینجا، ۶ مساله نمونه طراحی شده است. آن‌ها براساس تعداد تولیدکنندگان (I)، مراکز توزیع (J)، مشتریان (K_1)، مشتریان محصولات فرآوری شده (K_2)، مراکز فرآوری (M)، مراکز بازیافت (L) و مشتریان پودر ماهی (K_3) طبقه بندی می‌شوند. مقادیر این پارامترها در جدول (۴) آورده شده است. برای ارزیابی الگوریتم‌ها ۳۰ بار هر مساله را حل شده و در نهایت در بین ۳۰ مجموعه پارتو حاصل، یک مرتب‌سازی نهایی نامغلوب حاصل می‌شود و مرز پارتو بدست آمده پذیرفته می‌شود.

جدول ۴. ساختار مسائل نمونه

مساله نمونه	I ₁	I ₂	I ₃	I	J ₁	J ₂	J	K ₁	K ₂	M	L ₁	L ₂	L	K' ₃	K'' ₃	K ₃
1	3	1	1	5	5	1	6	9	2	1	0	2	2	1	2	3
2	4	2	2	8	7	2	9	13	5	2	1	3	4	2	3	5
3	5	3	3	11	9	3	12	17	8	3	2	4	6	3	4	7
4	6	4	4	14	11	4	15	21	11	4	3	5	8	4	5	9
5	7	5	5	17	13	5	18	25	14	5	4	6	10	5	6	11
6	8	6	6	20	15	6	21	29	17	6	5	7	12	6	7	13

اولین مساله، مطالعه موردی است که در منطقه شمالی ایران برای نشان دادن کاربرد الگوریتم‌های حل و مدل تحقیق انجام شده است. برای آزمایش مدل پیشنهادی، شرایط و پارامترهای مختلفی با استفاده از روش‌های حل در نظر گرفته شده است. داده‌های جمع‌آوری شده در استان مازندران است. شکل (۱۳) نقشه استان مازندران را نشان می‌دهد.

شهرهای انتخاب شده برای هر مکان در مساله مطالعه موردی به صورت جدول (۵) می باشد. هزینه حمل و نقل بین شهرهای شمالی ایران با فاصله آن‌ها برای هر کیلومتر، بر اساس روش حمل و نقل و نرخ کرایه (یعنی ماهی تازه یا فرآوری شده: ۴۰۰۰، پودر ماهی: ۲۰۰۰ و ماهی زنده: ۳,۰۰۰ تومان بر تن کیلومتر) تعریف شده است. جدول (۶) پارامترهای مدل مختص مطالعه موردی را ارائه می دهد. همچنین پارامترهای مدل به طور کلی و برای سایر مسائل نمونه در جدول (۷) نشان داده شده اند.



شکل ۱۳. شهرستان‌های استان مازندران

جدول ۵. شهرهای انتخاب شده برای هر اندیس

i	j	K_1	K_2
تنکابن	تنکابن	رامسر	چالوس
چالوس	عباس آباد	تنکابن	رامسر
آمل	نوشهر	کلاردشت	
آمل (پرورش در شالیزار)	محمودآباد	عباس آباد	K_3
نوشهر (پرورش در دریا)	آمل	چالوس	نور
	چالوس	نوشهر	تنکابن
l		نور	آمل
تنکابن	m	محمودآباد	
نوشهر	آمل	آمل	

جدول ۶. پارامترهای مربوط به مساله اول

پارامتر	مقدار	واحد
f_i	[0, 0, 0, 249, 60]	هزار تومان
f_j	[0, 0, 0, 0, 0, 1070]	هزار تومان
f_l	[1805, 1528]	هزار تومان
d_{k_1}	[0.99, 2.22, 0.7, 1.85, 1.55, 0.32, 1.62, 1.31, 5.36]	تن
d_{k_2}	[1.03, 0.66]	تن
d_{k_3}	[0.17, 0.18, 0.19]	تن
λc_i	[9.13, 1.25, 9.51, 5.60, 0.36]	تن
λh_j	[2.2, 0.7, 1.84, 1.30, 5.32, 1.54]	تن
λr_m	[2.78]	تن
λr_l	[1.3, 1.1]	تن

جدول ۷. پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار	واحد اندازه گیری
f_i	Uniform ~ [60, 3168]	هزار تومان
f_j	Uniform ~ [1070, 7634]	هزار تومان
f_l	Uniform ~ [1528, 4180]	هزار تومان
$d_{k_{1u}}$	Uniform ~ [0.99, 11]	تن
$d_{k_{2u}}$	Uniform ~ [0.66, 2]	تن
$d_{k_{3u}}$	Uniform ~ [0.17, 0.4]	تن
λc_i	Uniform ~ [1.25, 19]	تن
λh_j	Uniform ~ [0.7, 11]	تن
λr_m	Uniform ~ [2.78, 6]	تن
λr_l	Uniform ~ [1.1, 3]	تن

$\alpha_i = 0.01, \alpha_j = 0.02, \alpha_{k_1} = 0.03, \beta_{k_1} = 0.15, \beta_m = 0.4, \theta = 0.5, \delta = 0.2,$
 $\rho = 0.6,$
 $\varphi = 0.25, \varphi' = 1.2, P_1 = 0.5, P_2 = 0.2, P_3 = 0.3$

$C_p = 50006, C_r = 9988, C_p' = 19998$
هزار تومان بر تن

تنظیم پارامترها

تنظیم پارامترها در الگوریتم‌های فراابتکاری یک مرحله حیاتی است، زیرا اگر پارامترها به درستی تنظیم نشوند، ممکن است اجرای الگوریتم منجر به نتایج نامناسب شود. از این رو، برای تنظیم پارامترها، از روش طراحی آزمایشات تاگوچی، توسعه یافته توسط تاگوچی (۱۹۸۶) استفاده شده است. برای استفاده از روش تاگوچی باید ابتدا نسبت S/N را برای مسأله پیدا کنیم به گونه‌ای که کمترین نسبت بهترین باشد. اما از آنجا که ما با یک مسأله کمینه‌سازی سرو کار داریم، از نسبت S/N زیر استفاده می‌کنیم:

$$S/N_{\text{smaller is better}} = -10 \log \left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^k Y_i^2 \right)$$

K تعداد اجرای هر آزمایش و Y پاسخ فرآیند می‌باشد. دو مفهوم اصلی (یعنی تنوع و همگرایی) به این پاسخ مرتبط هستند. میزان همگرایی الگوریتم توسط MID محاسبه می‌شود و SNS تنوع راه حل‌های پارتو را ارائه می‌دهد (معادله (۳۹)).

$$MCOV = \frac{MID}{SNS} \quad (39)$$

اولین مرحله برای ایجاد طراحی تاگوچی، شناسایی سطوح عامل است. جدول (۸) این مرحله را نشان می‌دهد که در آن هر عامل دارای سه سطح است $x = i + j + k1 + k2 + k3 + m + l + u$. در مرحله دوم از نرم افزار Minitab استفاده می‌شود و با روش تاگوچی، طراحی $L9$ برای MOSEO و NSGA-II و طرح $L27$ برای HGASEO انتخاب می‌شود.

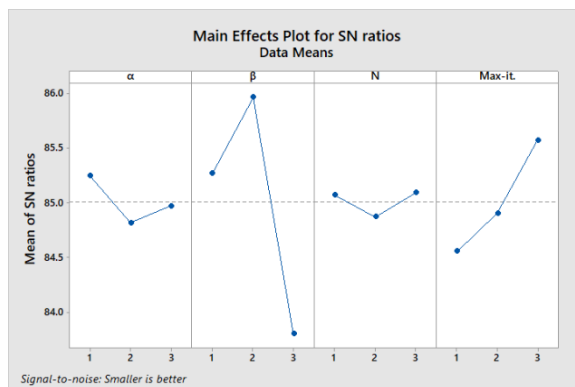
جدول ۸. دامنه پارامترهای الگوریتم

الگوریتم	عامل	سطح			
		1	2	3	
NSGA-II	Pc	Rate of crossover	0.7	0.8	0.9
	Pm	Rate of mutation	0.05	0.1	0.15
	N-pop	Population size	50	100	150
	Max-it.	Maximum number of iterations	2x	3x	4x
MOSEO	α	Rate of training	0.2	0.25	0.3
	β	Rate of spotting an attack	0.04	0.045	0.05
	N	Number of attacks	50	55	60
	Max-it.	Maximum number of iterations	4x	6x	10x
HGASEO	Pc	Rate of crossover	0.7	0.8	0.9
	Pm	Rate of mutation	0.05	0.1	0.15
	N-pop	Population size	50	100	150
	α	Rate of training	0.15	0.2	0.25
	β	Rate of spotting an attack	0.035	0.05	0.065
	GA- it.	Maximum number of iterations	2x	3x	4x
	SEO- it.	Maximum number of iterations	4x	6x	8x

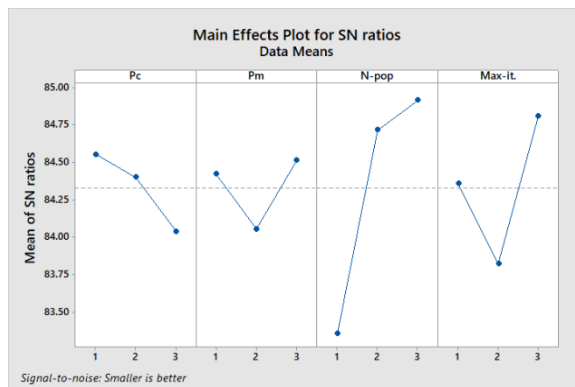
به همین ترتیب، شکل‌های (۱۴)–(۱۶) نمودار اثر S/N را برای هر الگوریتم نشان می‌دهد. جدول (۹) سطوح مناسب هر پارامتر را برای مساله اول ارائه می‌دهد. برای همه مسائل، مقادیر تنظیم شده برای اولین مساله نمونه است.

جدول ۹. مقادیر بهینه پارامترها

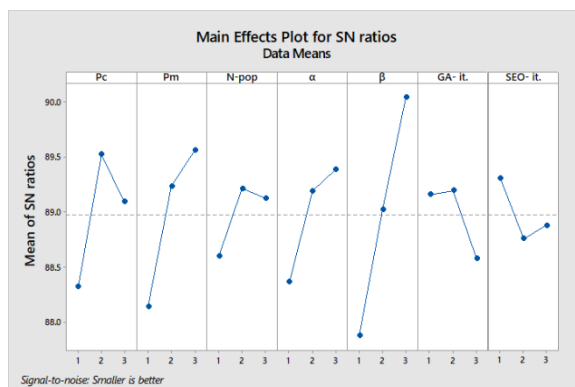
الگوریتم	مقادیر بهینه
NSG A-II	$Pc=0.7; Pm=0.15; N-pop=150; Max-it=4x.$
MOS EO	$\alpha=0.2; \beta=0.045; N=60; Max-it=10x.$
HGA SEO	$Pc=0.8; Pm=0.15; N-pop=100; \alpha=0.25; \beta=0.065; GA-it=3x; SEO-it=4x.$



شکل ۱۴. دیاگرام نسبت S/N برای الگوریتم MOSEO



شکل ۱۵. دیاگرام نسبت S/N برای الگوریتم NSGA-II



شکل ۱۶. دیاگرام نسبت S/N برای الگوریتم HGASEO

نتایج محاسباتی و بحث

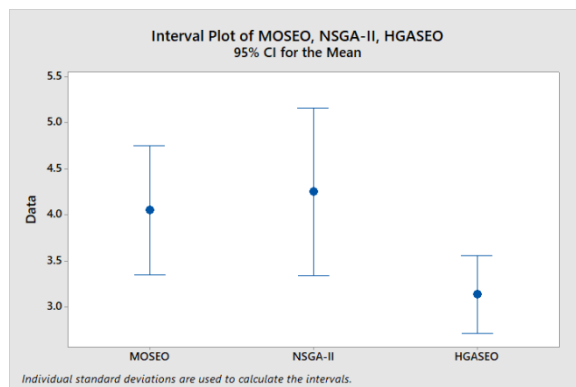
به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های بکار رفته، این الگوریتم‌ها را با شش مساله نمونه بررسی و نتایج مقایسه می‌گردند. با استفاده از معیارهای ذکر شده در بخش ۵، الگوریتم‌های فراابتکاری ارزیابی می‌شوند (جدول ۱۰).

معیارهای بزرگتر برای SNS و NPS و کوچکتر برای MID و CPU Time نشان عملکرد بهتر هستند. برای مقایسه مقادیر بدست آمده از روش تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده شده است. همانطور که توسط نتایج اثبات شد، عملکرد الگوریتم‌ها از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نشان داد. شکل‌های (۱۷) - (۲۰) نمودارهای فاصله ای (۹۵٪ سطح اطمینان) الگوریتم‌های ذکر شده برای هر معیار را نشان می‌دهد، واضح است که بهترین عملکرد از نظر اندازه گیری MID و SNS به HGASEO نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم‌های MOSEO و NSGA-II به ترتیب بیشترین عملکرد مربوط به NPS و زمان محاسبات را نشان دادند.

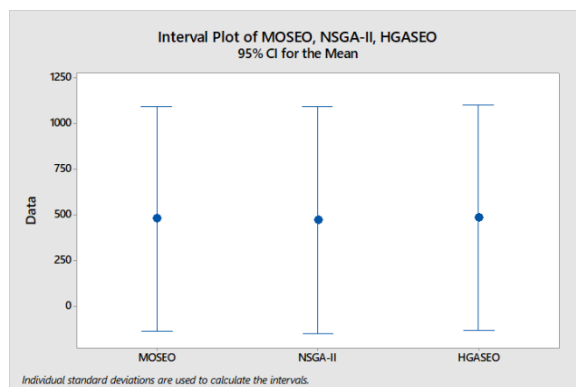
جدول ۱۰. ارزیابی الگوریتم‌ها بر اساس معیارهای عملکردی

مساله	MID			CPU Time		
	MOSEO	NSGA-II	HGASEO	MOSEO	NSGA-II	HGASEO
1	4.19280	4.72272	2.75910	5.9896	4.9006	7.0974
2	3.86892	3.60045	3.52251	34.1955	24.0070	40.6134
3	3.59974	4.81736	2.94380	99.6141	136.2725	135.4753
4	4.75263	3.40128	2.64168	281.9070	231.5599	264.5748
5	4.34790	5.47082	3.41488	1291.0683	1416.5787	1380.8362
6	3.76584	3.47865	3.52962	1151.3388	1006.3233	1070.7235

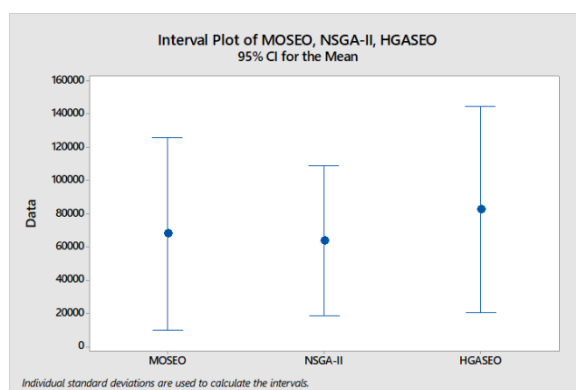
مساله	SNS			NPS		
	MOSEO	NSGA-II	HGASEO	MOSEO	NSGA-II	HGASEO
1	3564.892734	6971.406184	10629.16314	9	8	13
2	36227.99419	47609.22707	45957.92405	7	11	14
3	46908.3777	46786.91872	61108.05224	8	7	10
4	54005.97721	72319.48519	96305.51881	9	12	11
5	110239.1968	71950.09349	98302.16438	13	8	9
6	155485.8376	136970.1496	182719.9353	12	11	16



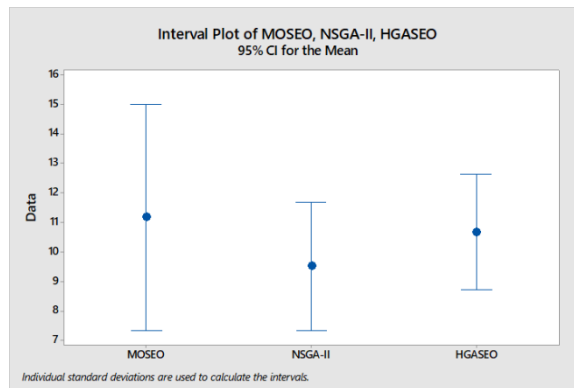
شکل ۱۷. نمودار فاصله‌ای *MID* (فاصله اطمینان ۹۵٪)



شکل ۱۸. نمودار فاصله‌ای *CPU Time* (فاصله اطمینان ۹۵٪)



شکل ۱۹. نمودار فاصله‌ای *SNS* (فاصله اطمینان ۹۵٪)



شکل ۲۰. نمودار فاصله‌های NPS (فاصله اطمینان ۹۵٪)

اعتبارسنجی و تجزیه و تحلیل حساسیت: روش اپسیلون- محدودیت^۱ از طریق نرم افزار Lingo برای اعتبارسنجی این الگوریتم‌ها بکار گرفته می‌شود. همچنین، معیار اندازه‌گیری عملکرد MID برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های تکاملی و روش اپسیلون- محدودیت استفاده می‌شود. با تغییر دادن احتمالات برای سناریوهای مختلف تقاضاها در مساله اول، ۴ حالت جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر می‌گیریم. جدول (۱۱) شرایط ۴ حالت را نشان می‌دهد. P_2 و P_3 به ترتیب احتمال برای تقاضاهای کمتر و بیشتر می‌باشند. همچنین نتایج اعتبارسنجی الگوریتم‌ها در جدول (۱۲) قابل مشاهده است.

جدول ۱۱. شرایط برای مسائل نمونه

شرایط	احتمالات		
	P_1	P_2	P_3
1	0.5	0.2	0.3
2	0.3	0.2	0.5
3	0.3	0.5	0.2
4	0.5	0.3	0.2

پس از محاسبه شاخص‌های استاندارد برای این روش‌ها، مشاهده می‌گردد که نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی نزدیک به روش دقیق اپسیلون- محدودیت و یا حتی در مواردی

¹ ϵ -constraint

بهرتر از آن است. جدول (۱۲) نشان‌دهنده این موضوع است. همچنین با توجه به میانگین مقادیر، مشاهده می‌گردد که در بین ۴ حالت اول به ترتیب حالت‌های ۳، ۴، ۱ و ۲ جواب‌های نزدیکتر به بهینه ارائه می‌نمایند. یعنی در سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده، حالتی که احتمال بیشتری به سناریوی تقاضای کمتر نسبت داده بود در توابع هدف جواب‌های بهتری داده است. به نوعی با هزینه‌ی کمتر پاسخگویی مناسبی به تقاضای مشتریان داشته است. تحلیل نتایج بدست آمده گواه بر معتبر بودن مدل است.

جدول ۱۲. نتایج اعتبارسنجی الگوریتم‌ها

شرایط	MID ↓								میانگین مقادیر
	MOSEO		NSGA-II		HGASEO		ε-constraint		
	value	gap	value	gap	value	gap	value	gap	
1	4.19280	0.560	4.72272	0.757	2.75910	0.027	2.68736	0.000	3.59
2	4.43598	0.579	5.07220	0.806	2.80876	0.000	2.84861	0.014	3.79
3	3.66870	0.032	3.55621	0.000	2.42249	0.319	2.28157	0.358	2.98
4	3.79029	0.507	4.25045	0.690	2.75358	0.095	2.51537	0.000	3.33

برای محاسبه gap از فرمول زیر استفاده شده است.

$$gap = \left| \frac{alg-best}{best} \right| \quad (39)$$

رتبه بندی روش‌های حل: در ادامه از الگوریتم ویکور^۱ نیز به منظور رتبه بندی و انتخاب بهترین روش از بین الگوریتم‌های بکار گرفته شده استفاده می‌شود. روش ویکور برای بهینه‌سازی چند معیاره سیستم‌های پیچیده ایجاد شد (اوپریکوویچ و همکاران، ۲۰۰۴). این روش بر رتبه‌بندی و انتخاب مجموعه‌ای از گزینه‌های موجود در حضور معیارهای متعارض با پیشنهاد حل توافقی متمرکز است. خلاصه روش ویکور در مراحل جدول (۱۳) شرح داده شده است:

1 VIKOR

جدول ۱۳. مراحل روش ویکور

گام ۱	$f_j^+ = \max_i f_{ij}; f_j^- = \min_i f_{ij}, j=1, \dots, n.$	Assumption: "more is better" criteria.
گام ۲	$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-}, i=1, \dots, m,$ $R_i = \max_j \left[w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right], i=1, \dots, m.$	W_j : criteria weight, $\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0,$
گام ۳	$Q_i = v \cdot \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1-v) \cdot \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-}, i=1, \dots, m$	$v = 0.5,$ $S^+ = \min_i S_i, S^- = \max_i S_i,$ $R^+ = \min_i R_i, R^- = \max_i R_i.$
گام ۴	Rank the alternatives by sorting the values S_i , R_i , and Q_i in descending order.	

نتایج حاصل از بکارگیری روش ویکور در جدول (۱۴) قابل مشاهده است. با توجه به اینکه، مقدار ضریب روش HGASEO کمتر است، این روش به عنوان روش برتر انتخاب می شود.

جدول ۱۴. نتایج روش VIKOR

رتبه	S	R	Q	روش
2	0.5490	0.2567	0.6446	NSGA-II
3	0.9000	0.3000	1.0000	MOSEO
1	0.1900	0.1000	0.0000	HGASEO

نتیجه گیری و پیشنهادات

اخیراً، به دلیل افزایش تولیدات آبرزی پروری، گسترش بازارهای بین المللی و تغییر خواسته های مشتریان، تجارت غذاهای دریایی به طرز حیرت انگیزی توسعه یافته است. بنابراین، طراحی یک شبکه زنجیره تامین مناسب برای ماهی پرورشی می تواند مزایای بسیاری را برای تصمیم گیرندگان، سازمان ها، کارخانه ها یا حتی بازارها برای بهبود عملکرد زنجیره تامین فراهم کند. در این مطالعه، برای زنجیره تامین ماهی یک مساله

چند هدف هفت سطحی با دو هدف ارائه شده است. اهداف شامل به حداقل رساندن هزینه کل شبکه و به حداکثر رساندن پاسخگویی به تقاضای مشتری است. برای حل مدل پیشنهادی از دو الگوریتم فراابتکاری معروف و یک الگوریتم فراابتکاری تلفیقی پیشنهادی استفاده شده است. یک مورد مطالعاتی در جهان واقعی برای تأیید یافته‌های تحقیق در ایران مورد تحقیق قرار گرفت. علاوه بر این، از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای همه الگوریتم‌ها استفاده شده تا بهترین نتیجه حاصل شود. مدل برای شش مساله با سه الگوریتم پیشنهادی، حل شده و معیارها محاسبه گشت. نتایج نشان داد که HGASEO از نظر معیارهای مربوط به نزدیکی به نقطه ایده آل و تنوع حل‌ها کارآمدتر است. همچنین، اگر زمان حل اولویت باشد، NSGA-II بهتر کار می‌کند و اگر تعداد حل‌ها مهم باشد، MOSEO عملکرد بهتری دارد. همچنین با بکارگیری الگوریتم ویکور، HGASEO در رتبه نخست قرار گرفت. همچنین اعتبار الگوریتم‌های حل و کارایی مدل با استفاده از روش دقیق و تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی پارامتر ورودی بررسی شد. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترها مطابق با منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند.

مدیران و سرمایه‌گذاران صنعت آبی‌پروری می‌توانند مدل پیشنهادی را در جهت ارتقای سطوح تصمیم‌گیری از جنبه‌های تاکتیکی و استراتژیک بکار گیرند. کشور ایران با وجود دسترسی به منابع طبیعی مناسب، تجهیزات صنعتی و منابع انسانی از جمله کارشناسان دانشگاهی، دارای ظرفیت بالقوه زیادی در پرورش آبزیان است. تحقق این پتانسیل برای عرضه داخلی و بین‌المللی می‌تواند اقتصاد ایران را تقویت کرده و منابع دریایی را حفظ نماید. نتایج با توجه به تعادل بین رضایت مشتری و هزینه کل، بر درک الزامات احداث تأسیسات جدید در سطوح مختلف صنعت ماهی تأثیر بسزایی دارد. مدیران به طور مستمر به دنبال روش‌های کارا برای حل معضلات و تصمیم‌گیری موفق هستند. مدیران مزارع پرورش ماهی و کارخانجات پودر ماهی می‌توانند از این مدل برای کاهش هزینه‌های احداث و حمل و نقل، مدیریت بهتر تولید و زنجیره تأمین با تطبیق ظرفیت‌های تولید و تقاضای بازار استفاده کنند.

عدم قطعیت در سایر پارامترهای مدل (نظیر بحث تولید ماهی) به صورت مدل‌های فازی، استوار و تصادفی می‌تواند در تحقیقات آینده در نظر گرفته شود. همچنین فاکتورهای نظیر

بیماری‌های ماهی و تغییرات آب و هوایی که می‌تواند عدم قطعیت پارامترهای مدل، مانند عرضه و تقاضا را افزایش دهد قابل بررسی هستند. تأثیر عوامل بیولوژیکی (مانند وزن و سرعت رشد) در بهینه‌سازی صنعت پرورش ماهی را می‌توان در نظر گرفت. علاوه بر این، توصیه می‌شود تا معیارهای پایداری (جنبه‌های زیست محیطی و اجتماعی) پوشش داده شود و همچنین مدل در حالت چند دوره‌ای و چند محصولی بررسی شود. برای حل مدل، استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی چندهدفه دیگر نیز امکان پذیر است. همچنین، توصیه می‌شود مطالعات آینده درباره پیچیدگی مدل و ابعاد ریاضی آن بحث کنند. وابستگی شدید قیمت فروش به عمر محصول و تاثیر آن در سیاست‌های قیمت‌گذاری در پژوهش‌های آتی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

ORCIDReza Tavakkoli-Moghaddam  <http://orcid.org/0000-0002-6757-926X>Mostafa Hajiaghaei-Keshteli  <http://orcid.org/0000-0002-9988-2626>

منابع

پارسائیان، سمیرا. امیری، مقصود. عظیمی، پرهام. تقوی فرد، محمدتقی. (۱۳۹۸). «طراحی مدل شبیه سازی زنجیره تامین حلقه بسته سبز و قیمت گذاری محصول در حضور رقیب». *مجله مطالعات مدیریت صنعتی*، دوره ۱۷، شماره ۵۲، ۲۰۲-۱۵۳.

References

- Abdi, A., Abdi, A., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). A set of calibrated metaheuristics to address a closed-loop supply chain network design problem under uncertainty. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 8(1), 23-40.
- Abedi, A., & Zhu, W. (2017). An optimisation model for purchase, production and distribution in fish supply chain—a case study. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3451-3464.
- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & industrial engineering*, 51(1), 196-215.
- Amini, M., Bienstock, C. C., & Golias, M. (2020). Management of supply chains with attribute-sensitive products: a comprehensive literature review and future research agenda. *The International Journal of Logistics Management*.
- Bensalem, A., & Kin, V. (2019, January). A bibliometric analysis of reverse logistics from 1992 to 2017. In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 20, No. 1, pp. 15-28). Taylor & Francis.
- Chan, F. T., Wang, Z. X., Goswami, A., Singhania, A., & Tiwari, M. K. (2020). Multi-objective particle swarm optimisation based integrated production inventory routing planning for efficient perishable food logistics operations. *International Journal of Production Research*, 1-20.
- Chaudhuri, A., Dukovska-Popovska, I., Subramanian, N., Chan, H. K., & Bai, R. (2018). Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review. *The International Journal of Logistics Management*.
- Chaudhuri, A., Dukovska-Popovska, I., Subramanian, N., Chan, H. K., & Bai, R. (2018). Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review. *The International Journal of Logistics Management*.
- Cheraghalipour, A., Paydar, M. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms. *Applied Soft Computing*, 69, 33-59.
- Dania, W. A. P., Xing, K., & Amer, Y. (2018). Collaboration behavioural factors for sustainable agri-food supply chains: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 186, 851-864.

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Deng, W., Zhao, H., Zou, L., Li, G., Yang, X., & Wu, D. (2017). A novel collaborative optimization algorithm in solving complex optimization problems. *Soft Computing*, 21(15), 4387-4398.
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32.
- Farahani, R. Z., Rezapour, S., Drezner, T., & Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega*, 45, 92-118.
- Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., & Al-e-Hashem, S. M. (2020a). Sustainable closed-loop supply chain network for an integrated water supply and wastewater collection system under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 275, 111277.
- Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., Goodarzian, F., & Cheikhrouhou, N. (2020b). A bi-objective home healthcare routing and scheduling problem considering patients' satisfaction in a fuzzy environment. *Applied soft computing*, 93, 106385.
- Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2020c). A set of efficient heuristics for a home healthcare problem. *Neural Computing and Applications*, 32(10), 6185-6205.
- Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). The social engineering optimizer (SEO). *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72, 267-293.
- Ferguson, M. E., & Ketzenberg, M. E. (2005). Information Sharing to Improve Retail Product Freshness of Perishables (ed. 3).
- Ghare, P. M. (1963). A model for an exponentially decaying inventory. *J. ind. Engng*, 14, 238-243.
- Gholami-Zanjani, S. M., Jabalameli, M. S., Klibi, W., & Pishvae, M. S. (2021). A robust location-inventory model for food supply chains operating under disruptions with ripple effects. *International Journal of Production Research*, 59(1), 301-324.
- Govindan, K. (2018). Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 195, 419-431.
- Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. *Journal of Cleaner Production*, 142, 371-384.
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9-28.
- Hajiaghaei-Keshteli, M., & Fard, A. M. F. (2019). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural Computing and Applications*, 31(9), 5343-5377.
- Hajiaghaei-Keshteli, M., Sajadifar, S. M., & Haji, R. (2011). Determination of the economical policy of a three-echelon inventory system with (R, Q) ordering

- policy and information sharing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5-8), 831-841.
- Hemmati, M., & Pasandideh, S. H. R. (2020). A bi-objective supplier location, supplier selection and order allocation problem with green constraints: scenario-based approach. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-24.
- Joshi, A. D., & Gupta, S. M. (2019). Evaluation of design alternatives of End-Of-Life products using internet of things. *International Journal of Production Economics*, 208, 281-293.
- Jouzani, J., & Govindan, K. (2021). On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123060.
- Karimi, N., Zandieh, M., & Karamooz, H. R. (2010). Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: A multi-phase approach. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4024-4032.
- Kazemi, N., Modak, N. M., & Govindan, K. (2019). A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4937-4960.
- Li, Y., Lim, A., & Rodrigues, B. (2009). Note—Pricing and Inventory Control for a Perishable Product. *Manufacturing & Service Operations Management*, 11(3), 538-542.
- Liao, Y., Kaviyani-Charati, M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Diabat, A. (2020). Designing a closed-loop supply chain network for citrus fruits crates considering environmental and economic issues. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 199-220.
- Lin, D. Y., & Wu, M. H. (2016). Pricing and inventory problem in shrimp supply chain: A case study of Taiwan's white shrimp industry. *Aquaculture*, 456, 24-35.
- Lusiantoro, L., Yates, N., Mena, C., & Varga, L. (2018). A refined framework of information sharing in perishable product supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(3), 254-283.
- Masruroh, N. A., Fauziah, H. A., & Sulistyono, S. R. (2020). Integrated production scheduling and distribution allocation for multi-products considering sequence-dependent setups: a practical application. *Production Engineering*, 14(2), 191-206.
- Mo, W. Y., Man, Y. B., & Wong, M. H. (2018). Use of food waste, fish waste and food processing waste for China's aquaculture industry: Needs and challenge. *Science of the Total Environment*, 613, 635-643.
- Nezhadroshan, A. M., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2020). A scenario-based possibilistic-stochastic programming approach to address resilient humanitarian logistics considering travel time and resilience levels of facilities. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1-27.
- Onggo, B. S., Panadero, J., Corlu, C. G., & Juan, A. A. (2019). Agri-food supply chains with stochastic demands: A multi-period inventory routing problem with perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 97, 101970.

- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European journal of operational research*, 156(2), 445-455.
- Paduloh, P., Djatna, T., Sukardi, S., & Muslich, M. (2020). Uncertainty Models in Reverse Supply Chain: A Review. *Int. J. Supply Chain Manag*, 9, 139-149.
- Peidro, D., Mula, J., Poler, R., & Lario, F. C. (2009). Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(3-4), 400-420.
- Peng, H., Shen, N., Liao, H., Xue, H., & Wang, Q. (2020). Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain—A review for current situation and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120032.
- Peng, H., Shen, N., Liao, H., Xue, H., & Wang, Q. (2020). Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain—A review for current situation and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120032.
- Pishvaei, M. S., Farahani, R. Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & operations research*, 37(6), 1100-1112.
- Pourmehdi, M., Paydar, M. M., & Asadi-Gangraj, E. (2020). Scenario-based design of a steel sustainable closed-loop supply chain network considering production technology. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123298.
- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019). Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*, 211, 503-520.
- Rahbari, M., Hajiagha, S. H. R., Dehaghi, M. R., Moallem, M., & Dorcheh, F. R. (2020). Modeling and solving a five-echelon location–inventory–routing problem for red meat supply chain. *Kybernetes*.
- Rahemi, H., Torabi, S. A., Avami, A., & Jolai, F. (2020). Bioethanol supply chain network design considering land characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109517.
- Raza, S. A. (2020). A systematic literature review of closed-loop supply chains. *Benchmarking: An International Journal*.
- Rocco, C. D., & Morabito, R. (2016). Production and logistics planning in the tomato processing industry: A conceptual scheme and mathematical model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 763-774.
- Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110821.
- Sharma, J., Tyagi, M., & Bhardwaj, A. (2020). Parametric review of food supply chain performance implications under different aspects. *Journal of Advances in Management Research*.
- Shekarian, E. (2020). A review of factors affecting closed-loop supply chain models. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119823.
- Siddh, M. M., Soni, G., Jain, R., & Sharma, M. K. (2018). Structural model of perishable food supply chain quality (PFSCQ) to improve sustainable organizational performance. *Benchmarking: An International Journal*.
- Suwal, S., Ketnawa, S., Liceaga, A. M., & Huang, J. Y. (2018). Electro-membrane fractionation of antioxidant peptides from protein hydrolysates of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) byproducts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 122-131.

- Tabrizi, S., Ghodsypour, S. H., & Ahmadi, A. (2018). Modelling three-echelon warm-water fish supply chain: A bi-level optimization approach under Nash-Cournot equilibrium. *Applied Soft Computing*, 71, 1035-1053.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes* (No. 658.562 T3).
- Taylor, D. H. (1994). Problems of food supply logistics in Russia and the CIS. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(2), 15-22.
- Tordecilla, R. D., Juan, A. A., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., & Panadero, J. (2021). Simulation-optimization methods for designing and assessing resilient supply chain networks under uncertainty scenarios: A review. *Simulation modelling practice and theory*, 106, 102166.
- Utomo, D. S., Onggo, B. S., & Eldridge, S. (2018). Applications of agent-based modelling and simulation in the agri-food supply chains. *European Journal of Operational Research*, 269(3), 794-805.
- Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega*, 91, 102012.
- Zhang, Y., Che, A., & Chu, F. (2020). Improved model and efficient method for bi-objective closed-loop food supply chain problem with returnable transport items. *International Journal of Production Research*, 1-18.

In Persian

- Parsaiyan, S., Amiri, M., Azimi, P., & Taghavifard, M. T. (2019). Designing a green closed-loop supply chain simulation model and product pricing in the presence of a competitor. *Industrial Management Studies*, 17(52), 153-202.