



DESIGNING A NEW MULTI-OBJECTIVE MODEL FOR A PROCUREMENT-PRODUCTION-DISTRIBUTION NETWORK DESIGN PROBLEM IN A GREEN SUPPLY CHAIN BY A GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM

Reza Tavakkoli-Moghaddam*, Behnaz Jafarmazdeh & Saber Molla-Alizadeh-Zavardehi

Reza Tavakkoli-Moghaddam, Professor of Industrial Eng., College of Eng., University of Tehran

Behnaz Jafarmazdeh, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science & Technology

Saber Molla-Alizadeh-Zavardehi, Department of Industrial Engineering, Masjed Soleyman Branch, Islamic Azad University

Keywords

Green Supply Chain,
Network Design,
Multi-objective,
Optimization,
Gravitational Search
Algorithm

ABSTRACT

This paper presents a new multi-objective model for a procurement-production-distribution network design problem in a 4-level green supply chain. It considers three objectives that minimize: (1) the total system costs as a quantitative objective, consisting of purchase costs of raw materials from suppliers and transport them to producers, environmental protection investments in production centers, production costs and transportation costs of the final product between producers, distribution centers and customers, (2) the total delay in delivery the products to customers as a qualitative objective and (3) the total amount of CO₂ emission in all of the supply chain as a green objective, in order to control the environmental harmful effects of the supply chain. To solve the presented model, a multi-objective gravitational search algorithm (MOGSA) with two different solution representation methods, namely Prefer number and priority-based coding, is applied to find a Pareto optimal set of solutions. A number of random test problems with different sizes are solved by the proposed MOGSA and NSGA-II. Finally, the computational results are reported and analyzed.

©2015 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 2, All Rights Reserved



طراحی شبکه خرید-تولید-توزیع چند هدفه در زنجیره تأمین سبز با الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه

رضا توکلی مقدم^{*}، بهناز جعفرمزده و صابر ملاعلیزاده زواردهی

چکیده:

در این مقاله، یک شبکه خرید - تولید- توزیع یکپارچه برای یک زنجیره تأمین سبز چهار سطحی طراحی می‌شود که در آن سه هدف متناقض زیر در نظر گرفته شده است: (۱) حداقل کردن هزینه کل سیستم به عنوان هدفی کمی که شامل هزینه خرید و ارسال مواد اولیه از تأمینکنندگان به تولیدکنندگان، هزینه ناشی از سرمایه‌گذاری‌های زیست محیطی در مراکز تولید، هزینه تولید محصول نهایی و هزینه‌های توزیع و ارسال محصول از تولیدکنندگان به مراکز توزیع و فروش می‌باشد، (۲) حداکثر کردن سطح سرویس‌دهی و خدمات‌رسانی به مشتریان به عنوان هدفی کیفی که با حداقل کردن کل تأخیرها در تحویل کالاها به مشتریان، میسر می‌گردد و (۳) حداقل کردن میزان کل دی‌اکسید کربن منتشر شده در اثر تولید و توزیع محصول در کل زنجیره، به عنوان هدفی سبز که به منظور کنترل و حداقل کردن اثرات مخرب زیست محیطی زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. پس از ارائه مدل ریاضی توسعه یافته برای مسأله، رویکرد حل چند هدفه بر اساس الگوریتم جستجوی گرانشی با دو نحوه نمایش متمایز، کدگذاری عددی پروفر و نمایش اولویت محور، برای جواب‌های مسأله به منظور یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پارتو ارائه و برای تعدادی مسأله نمونه تصادفی در ابعاد مختلف حل و با الگوریتم NSGA-II مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی

زنجیره تأمین سبز،
طراحی شبکه،
بهینه‌سازی چند هدفه،
الگوریتم جستجوی گرانشی

۱. مقدمه

جهانی شدن اقتصاد و توسعه فناوری اطلاعات باعث گردیده بازار عرضه محور به بازار تقاضا محور تغییر یابد و سازمان‌ها برای حفظ و بقای خود به اهمیت ارضای نیاز مشتریان پی بردند. بر این اساس مدیریت زنجیره تأمین اهمیت پیدا کرد، زیرا ارضای نیازها و علایق مشتریان نه فقط توسط آخرین حلقه متصل به مشتری، یعنی محصول نهایی است، بلکه توسط سایر تأمین‌کنندگان بالا دست صورت می‌گیرد.

تاریخ وصول: ۹۱/۱۰/۵

تاریخ تصویب: ۹۲/۷/۲

بهناز جعفرمزده: دانشگاه علوم و فنون مازندران،
jmazdeh.behnaz@gmail.com
صابر ملاعلیزاده زواردهی: مربی دانشگاه آزاد اسلامی، مسجد سلیمان،
saber.alizadeh@iaumis.ac.ir
^{*}نویسنده مسئول مقاله: دکتر رضا توکلی مقدم، : استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران،
tavakoli@ut.ac.ir

در دیدگاه مرسوم و گذشته، مدیریت زنجیره تأمین شامل هدایت تمام اعضای زنجیره تأمین به صورت یکپارچه و هماهنگ با هدف بهبود عملکرد، جهت ارتقا بهره‌وری و سود بیشتر بود و مدیران زنجیره تأمین به دنبال تحویل سریعتر کالا و خدمات، کاهش هزینه و افزایش کیفیت بودند [۱]. اما بهبود عملکرد زیست محیطی زنجیره تأمین و اهمیت هزینه‌های اجتماعی و تخریب محیط زیست لحاظ نمی‌گردید. فشار مقررات دولتی برای اخذ استانداردهای زیست محیطی از یک طرف و رشد فزاینده تقاضای مشتریان برای عرضه محصولات سبز (بدون اثرمخرب بر محیط زیست) از طرف دیگر مفهوم زنجیره تأمین سبز و مدیریت آن را پدیدار ساخت. امروزه مدیران زنجیره تأمین سبز در شرکت‌های پیشرو از طریق ایجاد مطلوبیت و رضایت‌مندی از منظر زیست محیطی در سراسر زنجیره تأمین می‌کوشند تا از لجستیک سبز و بهبود عملکرد زیست‌محیطی خود در کل زنجیره تأمین بعنوان یک سلاح استراتژیک جهت کسب مزیت رقابتی پایدار سود ببرند و اهداف

پارتو برای دستیابی به جواب‌های نزدیک بهینه پیشنهاد کردند. پیشوایی و همکاران [۱۳] مدل ریاضی فازی دو هدفه بر اساسرتبندی، برای طراحی پیکربندی استراتژیک یک شبکه لجستیک سبز با اهداف کمینه‌سازی هزینه و تأثیرات محیطی پیشنهاد دادند. آزیو و همکاران [۱۴] تأثیر عملیات سبز را بر مدیریت زنجیره تأمین بررسی نمودند. آنها داده‌های تجربی از ۵ مورد مطالعاتی را تحلیل کرده و مدلی را طراحی کردند که نشان دهنده عملیات سبزی است که تأثیر مثبت بر روی کیفیت، رضایت مشتریان و کارایی زنجیره تأمین دارد.

بوس و پل [۱۵] سؤال آیا مدیریت زنجیره سبز بر روی قیمت موجودی شرکت تأثیر دارد یا نه را مطرح نموده و در راستای این سؤال ۱۰۴ گروه داده را با استفاده از یک تحقیق تحلیل نمودند. تی سنگ [۱۶] مدیریت زنجیره تأمین سبز چندهدفه را با وجود اطلاعات ناقص و مزیت زبانی بررسی کرد. اهداف لحاظ شده در این تحقیق کاهش دادن آلودگی شرکتها و سایر تأثیرات محیطی تعریف شده است که وزن این اهداف بوسیله مزیت‌های زبانی که با تئوری مجموعه فازی حل شده است، توصیف شده‌اند. وانگ و همکاران [۱۷] یک مدل سلسله مراتبی فازی دو مرحله‌ای را برای تشخیص ریسک راه‌اندازی قوانین سبز در یک زنجیره تأمین ارائه دادند. آنها از ترکیب منطق فازی با یک روش بر پایه جمعیت برای حل مدل مورد نظر با پارامترهای نامعین استفاده کردند. کوو و همکاران [۱۸] برای انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین سبز الگوریتم ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی - تحلیل دوگانه چندصفتی را ارائه داده و برای تحلیل داده‌ها از طراحی آزمایشات و پردازش شبکه تحلیلی استفاده کردند. شوو و جی‌چن [۱۹] مدل تئوری بازی سه مرحله‌ای را برای تحلیل تأثیر مداخله‌های اقتصادی و مالی حکومتی بر رقابت بین زنجیره‌های تأمین سبز پیشنهاد کردند. نتایج تحلیلی آنها نشان می‌دهد که برای مثبت بودن سود تولید محصولات سبز، حکومت باید مالیات‌های سبز و کمک‌های مالی منطبق را وضع کند. خان و همکاران [۲۰] برای طراحی پروسه سبز و پاکیزگی، مدلی با هدف کمینه سازی تأثیرات محیطی ارائه داده و برای حل مدل و طراحی پروسه، یک متدولوژی جدید که تا آن زمان مطرح نشده بود، پیشنهاد دادند. شوو [۲۱] به بررسی مدیریت زنجیره تأمین سبز، لجستیک معکوس و تولید انرژی هسته‌ای پرداخت. وی یک مدل خطی چندهدفه به همراه یک الگوریتم بهینه‌سازی که عملیات تولید انرژی هسته‌ای و لجستیک معکوس را بهینه می‌کند، ارائه کرد.

زوو و همکاران [۲۲] مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی مختلفی جهت بهبود انتخاب و ارزیابی استراتژی تولید سبز مطالعه کردند. دیابات و گویندان [۲۳] مدلی جهت بررسی تأثیر

خود را بر اساس سه موضوع مهم: طراحی سبز (محصول)، تولید سبز (فرآیند) و بازیافت محصول، پایه‌گذاری می‌کنند [۲]. اتخاذ استراتژی سرمایه‌گذاری در زمینه بهبود عملکرد زیست محیطی زنجیره تأمین مزایا و منافع زیادی را مانند صرفه‌جویی در منابع انرژی، کاهش آلاینده‌ها، حذف یا کاهش ضایعات، ایجاد ارزش برای مشتریان و درنهایت ارتقای بهره‌وری را برای شرکتها و سازمانها به همراه خواهد داشت [۳]. فعالیت‌های مربوط به فاز تولید و ساختار شبکه حمل و نقل در زنجیره تأمین، بیشترین تأثیر را در آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله گاز دی‌اکسید کربن دارد. تصمیم‌گیری در رابطه با میزان سرمایه‌گذاری زیست محیطی در زنجیره تأمین، جهت انتخاب تجهیزات و تکنولوژی تولید، نقش مهمی را در فاز تولید سبز می‌تواند داشته باشد.

یکپارچه‌سازی و هماهنگی سیستم‌های مجتمع خرید- تولید- توزیع موضوع بسیاری از تحقیقات مسائل زنجیره تأمین در سالهای اخیر شده است. بیلگن و اوزکاراهان [۴]، آرشیندر و همکاران [۵]، میولا و همکاران [۶] یک مرور کامل بر روی مدل‌های تولید و توزیع انجام دادند. کاندر و فیشر [۷] یک مقاله بنیادی در مورد سیستم یکپارچه تولید، موجودی و توزیع منتشر کردند که به بررسی یک سیستم دو مرحله‌ای شامل تنها یک تولیدکننده که محصول نهایی را تولید می‌کند و مسیریابی این محصولات بطوری که تقاضای خرده‌فروشها تأمین گردد، می‌پرداخت.

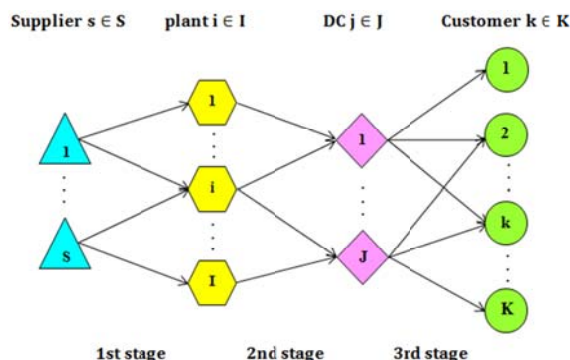
به دلیل اهمیت زنجیره تأمین سبز در دنیای واقعی محققان بسیاری نیز در این زمینه به تحقیق پرداخته‌اند که در ادامه به ذکر بعضی از آنها خواهیم پرداخت. سارکیز و همکاران [۸] بطور نظری به مرور تحقیقات صورت گرفته در مسأله مدیریت زنجیره تأمین سبز پرداختند. فورتر [۹] بر تحقیقات صورت گرفته در سال‌های قبل پرداخت. وی بر روی عملیات سبز، طراحی سبز، کارخانجات سبز و لجستیک معکوس تمرکز کرده است. دکر و همکاران [۱۰] به مسأله لجستیک سبز و مرور تحقیقات صورت گرفته در این زمینه پرداختند. آنها به بررسی جنبه‌های مختلف، عملکرد، مشارکت و چالش‌های لجستیک سبز پرداختند. وانگ و همکاران [۱۱] مسأله طراحی زنجیره‌تأمین را با توجه به جنبه زیست محیطی مطالعه کردند. آنها در فاز طراحی مطالعه‌شان به تصمیمات سرمایه‌گذاری محیطی توجه کرده و یک مدل دو هدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه کلی و تأثیرات محیطی را ارائه دادند. یه و چانگ [۱۲] با توجه به اهمیت قوانین محیط زیست برای شبکه زنجیره تأمین سبز یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با چهار معیار هزینه، زمان، کیفیت محصول و درجه ارزیابی سبز ارائه دادند. آنها برای حل مسأله مطرح شده دو الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر پایه آرشیو

نتایج محاسباتی و مقایسه الگوریتم‌ها با شاخص‌های معرفی شده، در بخش ۴ ارائه می‌شود. نهایتاً در بخش ۵، نتیجه‌گیری و برخی از زمینه‌های تحقیقاتی آتی در ارتباط با موضوع تحقیق بیان خواهد شد.

۲. بیان مسأله و مدل‌سازی ریاضی

همانند شکل از زنجیره تأمین را در نظر بگیرید که در سطح اول آن S تأمین‌کننده با ظرفیت محدود وجود دارد که R نوع ماده اولیه یا محصول نیمه‌ساخته را برای کارخانه‌ها فراهم می‌کند. در سطح دوم I کارخانه با ظرفیت تولید محدود، در سطح سوم J مرکز توزیع با ظرفیت محدود و در سطح چهارم K مشتری با تقاضای قطعی و معین وجود دارد. مجموعاً L سطح حفاظتی زیست محیطی برای کارخانه‌ها در نظر گرفته شده که متناظر با هر سطح، تکنولوژی تولید و تجهیزات و ماشین‌های متمایزی بکار گرفته می‌شود. هرچه سطح حفاظتی زیست محیطی تصمیم‌گیری شده بیشتر باشد، هزینه ناشی از سرمایه‌گذاری‌های زیست محیطی افزایش می‌یابد. اما در مقابل، میزان دی‌اکسید کربن انتشار یافته در اثر تولید محصول کاهش می‌یابد. سایر مفروضات مسأله به شرح زیر است:

- تمامی تقاضاهای مشتریان باید ارضا شود، ضمن اینکه تقاضای هر مشتری می‌تواند توسط چند توزیع‌کننده^۱ تأمین گردد.
- حمل و نقل درون شبکه از نوع حمل و نقل با هزینه ثابت^۲ (FCT) است.
- ظرفیت تولید، میزان مصرف مواد اولیه به ازای تولید واحد محصول و هزینه تولید واحد محصول برای کارخانه‌ها، متغیر و متناسب با سطح حفاظتی زیست محیطی تصمیم‌گیری شده برای هر کارخانه، تعیین می‌گردد.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین سه مرحله‌ای

پارامترها

- SP_{sr} ظرفیت تأمین‌کننده s برای ماده اولیه r
 M_{il} ظرفیت کارخانه i با سطح حفاظتی زیست محیطی l

محركهای پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین سبز با استفاده از پیکربندی مدل‌سازی تصویری ارائه کردند. شارما و آر لیر [۲۴] به بررسی روشهای توسعه محصولات سبز با در نظر گرفتن محدودیت منابع در کشورهای چین و هند که کارخانجاتشان توانایی تغییر مدل‌های سنتی تولید محصولات را دارند، پرداختند. کوچیلا و همکاران [۲۵] به بررسی مسأله زنجیره تأمین سبز و کارخانجات بازیافت انرژی پرداختند. آنها مکان‌یابی این کارخانه‌ها با اهداف کمینه‌سازی آلودگی هوا و حداکثر کردن سود را مطالعه کردند. لی و همکاران [۲۶] یک مدل برای ارزیابی تأمین‌کنندگان سبز در صنایع با تکنولوژی پیشرفته ارائه دادند. آنها از روش دلفی ابتدا برای تفاوت قائل شدن بین تأمین‌کنندگان سنتی و تأمین‌کنندگان سبز و سپس برای ارزیابی معیارهای انتخاب و کارایی تأمین‌کنندگان سبز استفاده کردند. لای و وانگ [۲۷] مسأله مدیریت لجستیک سبز و کارایی را در بعضی از کارخانجات چین مطالعه کردند. عبدالله و همکاران [۲۸] به مطالعه زنجیره تأمین سبز در داد و ستد الماس و منابع محیطی پرداختند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه کردن اوراق قرضه در زنجیره تأمین با رعایت قوانین زیست محیطی و سبز ارائه نمودند. لان [۲۹] به بررسی عناصر مدیریت سبز و ارتباطش با کارایی کارخانه پرداخته و مدلی را برای انطباق این عناصر و کارایی کارخانه ارائه داده است.

در این مقاله، ابتدا یک مدل یکپارچه خرید - تولید - توزیع در یک زنجیره تأمین چهار سطحی (شامل تأمین‌کننده‌ها، تولیدکننده‌ها، توزیع‌کننده‌ها و مشتریان) با سه هدف متناقض کمینه‌سازی کل هزینه‌های سیستم، به عنوان هدفی کمی، کمینه‌سازی کل تأخیرها در تحویل کالاها به مشتریان، به عنوان هدفی کیفی و کمینه‌سازی کل میزان دی‌اکسیدکربن منتشر شده در سیستم، به عنوان هدف سازگاری هرچه بیشتر با محیط زیست توسعه داده می‌شود. به دلیل پیچیدگی محاسباتی مدل‌های زنجیره تأمین در ابعاد بزرگ، این مسائل در کلاس مسائل چند جمله‌ای غیر قطعی سخت (NP-hard) [۳۰] قرار می‌گیرند. از این رو معمولاً برای حل اینگونه مسائل از روش‌های فراابتکار استفاده می‌شود که در زمان معقولی نسبت به روش‌های دقیق، جواب‌های بهینه یا نزدیک بهینه تولید می‌کنند. بر این اساس، رویکرد حل مبتنی بر آرشو بهینه پارتو برای الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه و الگوریتم مرتب سازی نامغلوب ژنتیک ۲ (NSGA-II) با دو نحوه نمایش جواب عدد پروفر و اولویت محور بکار گرفته شده است.

ساختار مطالب این مقاله به شرح زیر می‌باشد؛ در بخش ۲، بیان مسأله و مدل‌سازی ریاضی آن ارائه می‌شود. در بخش ۳، الگوریتم‌های حل توسعه داده شده برای مسأله، تشریح می‌گردد.

<p>به این ترتیب مدل ریاضی مسأله عبارتست از:</p> $\min f_1 = \sum_s \sum_i \sum_r c_{sir}^{(1)} \cdot x_{sir}^{(1)} + \sum_s \sum_i f_{si}^{(1)} \cdot y_{si}^{(1)} + \sum_i \sum_l G_{il} \cdot z_{il} + \sum_i \sum_l V_{il} \cdot x_{il} + \sum_i \sum_j (c_{ij}^{(2)} \cdot x_{ij}^{(2)} + f_{ij}^{(2)} \cdot y_{ij}^{(2)}) + \sum_j \sum_k (c_{jk}^{(3)} \cdot x_{jk}^{(3)} + f_{jk}^{(3)} \cdot y_{jk}^{(3)})$ $\min f_2 = \sum_k \sum_j p_k \cdot ma x(0, h_{jk} - t_k) \cdot x_{jk}^{(3)}$ $\min f_3 = \sum_i \sum_l W_{il} \cdot x_{il} + \sum_s \sum_i \sum_r e_{si}^{(1)} \cdot x_{sir}^{(1)} + \sum_i \sum_j e_{ij}^{(2)} \cdot x_{ij}^{(2)} + \sum_j \sum_k e_{jk}^{(3)} \cdot x_{jk}^{(3)}$ <p>s.t.</p> $\sum_j x_{jk}^{(3)} = D_k \quad \forall k$ $\sum_k x_{jk}^{(3)} = \sum_i x_{ij}^{(2)} \quad \forall j$ $\sum_i x_{ij}^{(2)} \leq N_j \quad \forall j$ $\sum_l u_{ril} \cdot x_{il} \leq \sum_s x_{sir}^{(1)} \quad \forall i, r$ $x_{il} \leq M_{il} \cdot z_{il} \quad \forall i, l$ $\sum_j x_{ij}^{(2)} = \sum_l x_{il} \quad \forall i$ $\sum_l z_{il} = 1 \quad \forall i$ $\sum_i x_{sir}^{(1)} \leq SP_{sr} \quad \forall s, r$ $\sum_r x_{sir}^{(1)} \leq y_{si}^{(1)} \cdot \sum_k D_k \cdot \max_{i,l} (u_{ril}) \quad \forall s, i$ $x_{ij}^{(2)} \leq y_{ij}^{(2)} \cdot \sum_k D_k \quad \forall i, j$ $x_{jk}^{(3)} \leq y_{jk}^{(3)} \cdot \sum_k D_k \quad \forall j, k$ $y_{si}^{(1)}, y_{ij}^{(2)}, y_{jk}^{(3)}, z_{il} \in \{0,1\} \quad \forall s, i, j, k, l$ $x_{sir}^{(1)}, x_{ij}^{(2)}, x_{jk}^{(3)}, x_{il} \geq 0 \quad \forall s, i, j, k, r, l$	<p>ظرفیت توزیع کننده j N_j</p> <p>تقاضای مشتری k D_k</p> <p>هزینه ثابت ارسال از تأمین کننده s به کارخانه i $f_{si}^{(1)}$</p> <p>هزینه ثابت ارسال از کارخانه i به توزیع کننده j $f_{ij}^{(2)}$</p> <p>هزینه ثابت ارسال از توزیع کننده j به مشتری k $f_{jk}^{(3)}$</p> <p>هزینه تولید واحد محصول کارخانه i با سطح حفاظتی زیست محیطی l V_{il}</p> <p>هزینه خرید و ارسال واحد ماده اولیه r از تأمین کننده s به کارخانه i $c_{sir}^{(1)}$</p> <p>هزینه ارسال واحد کالا از کارخانه i به توزیع کننده j $c_{ij}^{(2)}$</p> <p>هزینه ارسال واحد کالا از توزیع کننده j به مشتری k $c_{jk}^{(3)}$</p> <p>میزان مصرف ماده اولیه r به ازای تولید واحد کالا توسط کارخانه i با سطح حفاظتی زیست محیطی l u_{ril}</p> <p>حداکثر زمان تحویل قابل قبول برای مشتری k t_k</p> <p>زمان ارسال کالا از توزیع کننده j به مشتری k h_{jk}</p> <p>جریمه وزنی دیرکرد تحویل واحد کالا در واحد زمان برای مشتری k p_k</p> <p>میزان CO_2 منتشر شده در اثر ارسال یک واحد ماده اولیه از تأمین کننده s به کارخانه i $e_{si}^{(1)}$</p> <p>میزان CO_2 منتشر شده در اثر ارسال یک واحد کالا از تولیدکننده i به توزیع کننده j $e_{ij}^{(2)}$</p> <p>میزان CO_2 منتشر شده در اثر ارسال یک واحد کالا از توزیع کننده j به مشتری k $e_{jk}^{(3)}$</p> <p>میزان CO_2 منتشر شده در اثر تولید یک واحد کالا توسط کارخانه i با سطح حفاظتی زیست محیطی l W_{il}</p> <p>میزان سرمایه‌گذاری برای کارخانه i با سطح حفاظتی زیست محیطی l G_{il}</p> <p>متغیرهای تصمیم</p> <p>اگر تأمین کننده s به کارخانه i ماده اولیه ارسال کند ۱ و در غیر اینصورت ۰ $y_{si}^{(1)}$</p> <p>اگر کارخانه i به توزیع کننده j کالا ارسال کند ۱ و در غیر اینصورت ۰ $y_{ij}^{(2)}$</p> <p>اگر توزیع کننده j به مشتری k کالا ارسال کند ۱ و در غیر اینصورت ۰ $y_{jk}^{(3)}$</p> <p>میزان ماده اولیه از نوع r آرسالی از تأمین کننده s به کارخانه i $x_{sir}^{(1)}$</p> <p>میزان کل کالای تولید شده توسط کارخانه i با سطح حفاظتی زیست محیطی l x_{il}</p> <p>میزان کالای آرسالی از کارخانه i به توزیع کننده j $x_{ij}^{(2)}$</p> <p>میزان کالای آرسالی از توزیع کننده j به مشتری k $x_{jk}^{(3)}$</p> <p>اگر برای کارخانه i سطح حفاظتی زیست محیطی l تصمیم‌گیری شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ z_{il}</p>
---	--

تابع هدف (۱) شامل حداقل ساختن مجموع هزینه‌های خرید و ارسال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها (هزینه‌های ثابت و متغیر ارسال)، سرمایه‌گذاری‌های زیست محیطی در کارخانه‌ها، تولید محصول در کارخانه‌ها، ارسال محصول نهایی از کارخانه‌ها به مراکز توزیع (هزینه‌های ثابت و متغیر ارسال) و از مراکز توزیع به مراکز فروش (هزینه‌های ثابت و متغیر ارسال) می‌باشد. تابع هدف (۲) مجموع کل کالاهایی که با تأخیر بر حسب تعداد و در واحد زمان به دست مشتریان می‌رسد را با ضرایب وزنی جریمه دیرکرد برای هر مشتری، که لزوماً از جنس هزینه نیستند و می‌توانند با توجه به اولییتی که هر مشتری

مدل ریاضی پیشنهادی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح^۳ (ILP) می‌باشد که در بخش بعد، رویه حل آن بر اساس روش‌های فراابتکاری^۴ توسعه داده می‌شود.

۳. رویکرد حل مسأله

اخیراً استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری تکاملی مبتنی بر جمعیت برای بهینه‌سازی چندهدفه، جهت یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پارتوی نامغلوبی که هیچ یک بر دیگری برتری ندارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس برای حل مدل ارائه شده در این مقاله، رویکرد چندهدفه الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم مرتب سازی نامغلوب ژنتیک^۲ توسعه داده می‌شوند. الگوریتم جستجوی گرانشی که توسط راشدی و همکاران [۳۱] ارائه شد، بر پایه قوانین جاذبه نیوتن و حرکت ذرات استوار است. رویکرد چندهدفه آن در ادامه تشریح می‌گردد، اما قبل از آن دو روش نمایش در نظر گرفته شده برای جواب‌های مسأله بیان می‌گردند.

۳-۱. نحوه نمایش جواب‌ها

با توجه ساختار شبکه‌ای مسأله و تعداد زیاد متغیرهای آن خصوصاً در مسائل با ابعاد بزرگ، انتخاب روشی مناسب برای نمایش جواب‌ها که در عین ساده بودن و حافظه کمی را اشغال کردن، کل فضای جواب مسأله را هم پوشش بدهد، از اهمیت زیادی برخوردار است.

۳-۱-۱. نمایش عدد پروفر^۵

در این مقاله از روش عدد پروفر اصلاح شده‌ای که توسط حاجی آقایی و همکاران [۳۲] ارائه شده است، استفاده می‌شود. در این روش برای یک شبکه حمل و نقل متشکل از m مبدأ و n مقصد، یک کروموزوم به صورت یک رشته عددی $2-m+n$ بیتی از مجموعه $\{1, 2, \dots, m, m+1, \dots, m+n\}$ است. شرط شدنی بودن کروموزوم این است که به تعداد $n-1$ بیت از مجموعه $\{1, 2, \dots, m\}$ و $m-1$ بیت از مجموعه $\{m+1, \dots, m+n\}$ انتخاب شده باشد. بعنوان مثال برای یک شبکه با $m=3$ و $n=5$ ، یک کروموزوم شدنی به صورت شکل ۲ می‌باشد.

$P(T):$

۱	۷	۳	۲	۶	۳
---	---	---	---	---	---

شکل ۲. نمایش یک کروموزوم شدنی عدد پروفر

در ادامه طریقه کدگشایی عدد پروفر برای تبدیل یک کروموزوم به جوابی از فضای حل مسأله ارائه می‌گردد. باید توجه داشت که مجموع ظرفیت‌ها، حداقل می‌بایست برابر با مجموع تقاضاها باشد.

برای زنجیره دارد تعیین گردند، حداقل می‌سازد. تابع هدف (۳) مجموع میزان دی‌اکسید کربن منتشر شده در اثر: تولید محصول در کارخانه‌ها، ارسال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها، ارسال محصول نهایی از کارخانه‌ها به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به مراکز فروش را کمینه می‌سازد. در رابطه با تضاد موجود بین اهداف؛ کاهش میزان دی‌اکسید کربن ناشی از تولید در کارخانه‌ها مستقیماً منجر به افزایش سرمایه‌گذاری زیست محیطی در کارخانه‌ها می‌گردد (تضاد اهداف ۱ و ۳). از آنجایی که هزینه و زمان ارسال کالا بین دو گره از شبکه، لزوماً متناسب با مسافت بین گره‌ها نیست و با توجه به موقعیت جغرافیایی گره‌ها و نوع وسیله نقلیه موجود بین آن‌ها تعیین می‌گردد، لذا دو گره‌ای که فاصله زمانی کمتری دارند ممکن است هزینه ارسال بیشتری را داشته باشند (تضاد اهداف ۱ و ۲). با توجه به نوع وسایط نقلیه موجود بین گره‌ها، میزان دی-اکسید کربن منتشر شده در اثر ارسال لزوماً متناسب با فاصله زمانی بین گره‌ها نیست (تضاد اهداف ۲ و ۳).

با توجه به فرض برآورده شدن کلیه تقاضاهای مشتریان، محدودیت (۴) تضمین می‌کند که کلیه کالاهای ارسالی از توزیع‌کنندگان به هر مشتری برابر با تقاضای آن مشتری باشد. محدودیت (۵) بیانگر شرط تعادل در ورود و خروج کالاها برای هر توزیع‌کننده است. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که کلیه کالاهای وارد شده به هر توزیع‌کننده بیشتر از ظرفیت آن نباشد. محدودیت (۷) بیانگر این است که کلیه مواد اولیه مصرفی در هر کارخانه جهت تولید محصول، نباید بیشتر از مقداری باشد که به کارخانه ارسال شده است. محدودیت (۸) متضمن آنست که کل کالاهای تولید و ارسالی از هر کارخانه بیشتر از ظرفیت تولید آن نباشد. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که کل کالاهای ارسالی از هر کارخانه به مراکز توزیع، برابر با کل تولید آن کارخانه باشد. محدودیت (۱۰) مبین آنست که برای هر کارخانه تنها یک سطح حفاظتی زیست محیطی تصمیم‌گیری شود. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که کلیه مواد اولیه ارسالی از هر تأمین‌کننده به کارخانه‌ها بیشتر از ظرفیت آن تأمین‌کننده نباشد. با توجه به اینکه حمل و نقل‌ها در این مدل از نوع هزینه ثابت (FCT) می‌باشد، علاوه بر هزینه‌های متغیر به ازای تعداد واحدهای ارسالی بین هر دو گره در شبکه، هزینه ثابت بازگشایی مسیر هم در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) متضمن آنند که در هر مرحله از شبکه، اگر کالا یا ماده اولیه ارسال می‌شود، متغیر باینری مربوطه برای در نظر گرفتن هزینه ثابت ارسال، یک گردد. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب صفر یا یک بودن و نامنفی بودن متغیرهای تصمیم مدل را بیان می‌کنند.

رویه ۱: کدگشایی عدد پروف

ورودی: کروموزوم شدنی $P(T)$ ، مقادیر ظرفیت‌های مبادی $(a_i; i \in O)$ و تقاضاهای مقاصد $(b_j; j \in D)$

خروجی: گراف شبکه حمل‌ونقل (x_{ij})

قدم ۱: قرار دهید: $x_{ij} = 0; i \in O, j \in D$ را $P(T)$ کروموزوم اصلی و $P'(T)$ را مجموعه کلیه گره‌هایی از $\{1, 2, \dots, m, m+1, \dots, m+n\}$ در نظر بگیرید که در $P(T)$ وجود ندارند.

قدم ۲: مراحل a تا e را تا زمانی که در $P(T)$ عددی باقی نماند، تکرار کنید.

(a) قرار دهید i را کوچکترین عدد در $P'(T)$ و j را چپ‌ترین عدد در $P(T)$.

(b) اگر i و j در دو در مجموع مبادی یا مقاصد قرار ندارند، کمان (i, j) را به گراف اضافه کنید. در غیر این صورت، عدد بعدی (از سمت چپ) k را از $P(T)$ که در مجموعه $P(T)$ ندارد، انتخاب و جایگزین j کنید و کمان (i, k) را اضافه کنید.

(c) j (یا k) را از $P(T)$ و i را از $P'(T)$ حذف کنید. اگر j (یا k) در باقیمانده $P(T)$ تکرار نشده، آن را به $P'(T)$ اضافه کنید.

(d) قرار دهید $x_{ij} = \min\{a_i, b_j\}$ برای کمان (i, j) (یا $x_{ik} = \min\{a_i, b_k\}$ برای کمان (i, k))، در شرایطی که $i \in O, j, k \in D$

(e) بروز رسانی کنید: $a_i = a_i - x_{ij}$ و $b_j = b_j - x_{ij}$ (یا $b_k = b_k - x_{ik}$)

قدم ۳: در شرایطی که در $P(T)$ عددی باقی نمانده، دقیقاً دو گره نو زرد $P'(T)$ باقی است. کمان (i, j) را به گراف اضافه کنید تا درختی با $m+n-1$ کمان بدست آید.

قدم ۴: اگر کلیه تقاضاها برآورده شده است، توقف کنید. در غیر این صورت، γ مبدأ با مجموع ظرفیت $\gamma > 0$ و مقصد با مجموع تقاضای $\delta > 0$ هنوز وجود دارد. در این حالت چهار وضعیت زیر ممکن است اتفاق بیفتند:

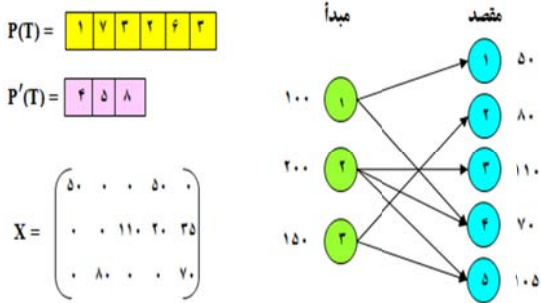
I. اگر $\gamma = 1$ و $\delta = 1$ ، در این صورت کمان واصل دو گره با مقدار تقاضای مقصد به درخت اضافه می‌شود.

II. اگر $\gamma > 1$ و $\delta = 1$ ، در این صورت تا برآورده شدن تمامی تقاضای مقصد باقیمانده یکی از مبادی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و کمان واصل آن دو با حداقل مقدار بین ظرفیت و تقاضا، به درخت اضافه می‌شود و ظرفیت و تقاضا بروز می‌گردد.

III. اگر $\gamma = 1$ و $\delta > 1$ ، در این صورت تقاضای مقصدهای ارضاء نشده توسط تنها مبدأ باقیمانده برآورده می‌گردد و کمان واصل آن‌ها با مقدار تقاضای هر مقصد به درخت اضافه می‌شود.

IV. اگر $\gamma > 1$ و $\delta > 1$ ، در این صورت یک زیر مسأله حمل و نقل با γ مبدأ و δ مقصد بوجود می‌آید. ابتدا یک کروموزوم شدنی برای آن تولید و سپس قدم‌های اول تا چهارم تکرار می‌گردد.

شبکه حمل و نقل حاصل از کدگشایی کروموزوم شکل ۲، به صورت شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۲. شبکه حاصل از کدگشایی عدد پروف

۳-۲. نمایش اولویت محور

در این بخش روش نمایشی که گن و همکاران [۳۳] ارائه کردند را شرح می‌دهیم. در این روش، برای یک شبکه حمل و نقل متشکل از m مبدأ و n مقصد، یک کروموزوم شدنی به صورت یک جایگشت $m+n$ بیتی در نظر گرفته می‌شود که مقادیر متناظر با هر گره در واقع اولویتی است که به آن گره، جهت مشارکت در ساختن درخت شبکه حمل و نقل، داده می‌شود. بعنوان مثال برای شبکه حمل و نقل با $m=3$ و $n=5$ مورد بررسی در بخش قبل، یک کروموزوم شدنی به صورت شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴. نمایش یک کروموزوم شدنی اولویت محور

این روش نمایش نسبت به روش قبلی، چه در تولید کروموزوم شدنی و چه در کدگشایی، از ساختار ساده‌تری برخوردار است. ضمن اینکه در کدگشایی آن از ماتریس هزینه ارسال، برای تولید جوابی با مجموع هزینه حمل و نقل کمتر، استفاده می‌شود. در ادامه طریقه کدگشایی روش اولویت محور ارائه می‌گردد.

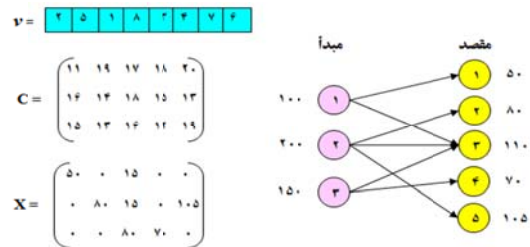
رویه ۲: کدگشایی اولویت محور

ورودی: a_i : ظرفیت مبادی، b_j : تقاضای مقاصد، c_{ij} : ماتریس هزینه حمل‌ونقل واحد کالا و $v(k)$: کروموزوم خروجی: گراف شبکه حمل و نقل (x_{ij})

جرم ذره نام در تکرار نام	$M_i(t)$
نیروی گرانشی بعد نام وارد بر ذره نام در تکرار نام	$F_i^d(t)$
فاصله اقلیدسی بین ذره نام و نام در تکرار نام	$R_{ij}(t)$
آرشیو بهینه پارتو در تکرار نام	$Pareto-opt(t)$
عددی تصادفی در بازه (۰ و ۱)	$rand$
ثابت گرانشی در تکرار نام	$g(t)$
ثابت گرانشی در ابتدای الگوریتم	g_0
مقدار ثابت کوچک	ϵ
مقدار ثابت	β
تعداد کل ذرات	$Npop$
حداکثر زمان اجرای الگوریتم	$Maxtime$

- قدم ۱: قرار دهید: $x_{ij} = 0; i \in O, j \in D$
- قدم ۲: انتخاب گره با بیشترین اولویت؛
 $l = \operatorname{argmax}\{v(k); k = 1:m+n\}$
- قدم ۳: اگر $l \in O$ ، قرار دهید: $l \leftarrow i^*$ و
V. $j^* = \operatorname{argmin}\{c_{i^*j}; v(m+j) \neq 0, j \in D\}$
در غیر اینصورت قرار دهید: $l \leftarrow j^*$
- VI. $i^* = \operatorname{argmin}\{c_{ij^*}; v(i) \neq 0, i \in O\}$
- قدم ۴: قرار دهید: $x_{i^*j^*} = \min\{a_{i^*}, b_{j^*}\}$
- VII. $a_{i^*} = a_{i^*} - x_{i^*j^*}$
- VIII. $b_{j^*} = b_{j^*} - x_{i^*j^*}$
- قدم ۵: اگر $a_{i^*} = 0$ آنگاه $v(i^*) = 0$ و اگر $b_{j^*} = 0$ آنگاه $v(m+j^*) = 0$
- قدم ۶: اگر $v(m+j) = 0, \forall j \in D$ آنگاه توقف کنید، در غیر اینصورت به قدم دوم بروید.

برای تشریح الگوریتم کدگشایی فوق، مثال قبل را در نظر بگیرید. شبکه حمل و نقل حاصل از کدگشایی کروموزوم ارائه شده در شکل ۴، به صورت شکل ۵ می‌باشد.



شکل ۵. شبکه حاصل از کدگشایی اولویت محور

۲-۳. الگوریتم MOGSA

در الگوریتم جستجوی گرانشی، یک مجموعه از ذرات دارای جرم، جهت یافتن جواب بهینه به کمک شبیه‌سازی قوانین گرانش و حرکت نیوتن بکار گرفته می‌شوند. در ادامه رویکرد چندهدفه این الگوریتم برای حل مسئله مورد بررسی توسعه داده می‌شود.

۳-۱-۲. پارامترها و اجزای الگوریتم

پیش از تشریح ساختار کلی الگوریتم، ابتدا پارامترها و اجزای بکار رفته در آن بیان می‌گردند.

$$m_i^k(t) = \frac{fit_i^k(t) - worst^k(t)}{best^k(t) - worst^k(t)}; \quad (18)$$

$$M_i(t) = \frac{\sum_{k=1}^K m_i^k(t)}{\sum_{j=1}^{Npop} \sum_{k=1}^K m_j^k(t)}; \quad (19)$$

در رابطه (۱۸) بهترین و بدترین مقدار توابع هدف برای مسئله حداقل‌سازی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$best^k(t) = \min_{j \in \{1, 2, \dots, Npop\}} fit_j^k(t) \quad (20)$$

موقعیت بعد نام ذره نام در تکرار نام	$x_i^d(t)$
سرعت بعد نام ذره نام در تکرار نام	$v_i^d(t)$
شتاب بعد نام ذره نام در تکرار نام	$a_i^d(t)$
مقدار تابع هدف نام ذره نام در تکرار نام	$fit_i^k(t)$
بهترین مقدار تابع هدف نام ذره نام در تکرار نام	$best^k(t)$
بدترین مقدار تابع هدف نام ذره نام در تکرار نام	$worst^k(t)$
جرم حاصل از تابع هدف نام ذره نام در تکرار نام	$m_i^k(t)$

$$worst^k(t) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, N_{pop}\}} fit_j^k(t) \quad (21)$$

گام ۴ در این مرحله ابتدا فاصله اقلیدسی $R_{ij}(t)$ بین ذرات طبق رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود. سپس مقدار ثابت گرانشی $g(t)$ طبق رابطه (۲۳) بروز می‌گردد و نهایتاً نیروی گرانشی $F_i^d(t)$ وارد بر ذرات طبق رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$R_{ij}(t) = \sqrt{(x_i^1 - x_j^1)^2 + \dots + (x_i^D - x_j^D)^2} \quad (22)$$

$$g(t) = g_0 e^{-\beta(t/Maxtime)} \quad (23)$$

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in Pareto-opt(t)} rand_j \cdot g(t) \cdot \frac{M_j(t) \cdot M_i(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} \cdot (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (24)$$

گام ۵ با محاسبه $F_i^d(t)$ ابتدا شتاب ذرات $a_i^d(t)$ طبق رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود و به دنبال آن سرعت $v_i^d(t)$ و موقعیت $x_i^d(t)$ ذرات طبق روابط (۲۶) و (۲۷) بروز می‌گردد.

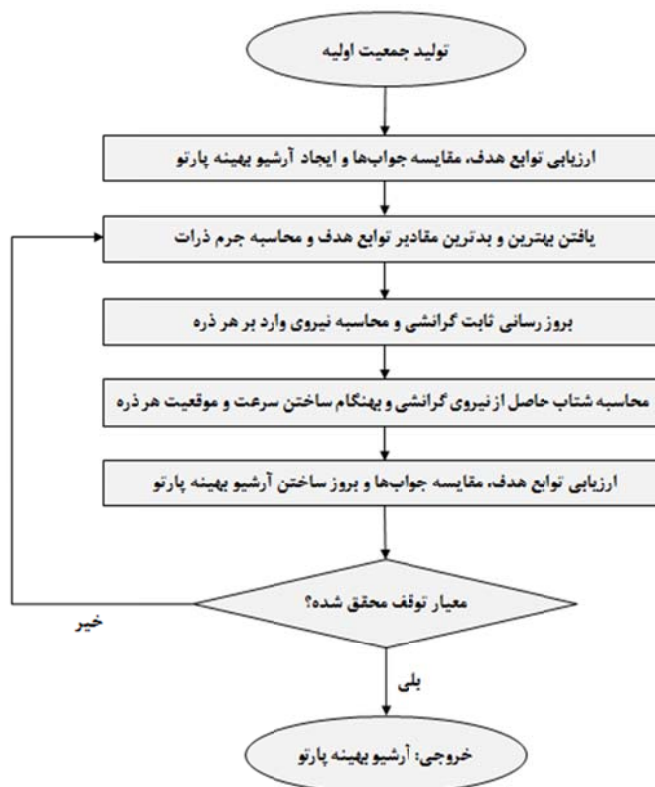
$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \quad (25)$$

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (26)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (27)$$

گام ۶ برای ذرات بهنگام شده همانند گام دوم، توابع هدف محاسبه می‌شود و ذرات با یکدیگر مقایسه می‌گردند. در این هنگام نوبت به بروز رسانی آرشیو بهینه پارتو می‌رسد. ذرات نامغلوب حاضر با ذرات موجود در آرشیو $Pareto-opt(t)$ مقایسه شده و ذرات نامغلوب نهایی، عناصر آرشیو بهینه پارتو $Pareto-opt(t+1)$ را تشکیل می‌دهند. قابل ذکر است که اندازه آرشیو بهینه پارتو نامحدود در نظر گرفته شده است.

گام ۷ اگر شرط توقف الگوریتم برآورده شده است، الگوریتم پایان می‌یابد. در غیر اینصورت به گام سوم برگردید.



شکل ۶. نمودار جریان الگوریتم MOGSA

۳-۲-۳. تولید جمعیت اولیه

از آنجا که شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی سه مرحله‌ایست، ساختار کروموزوم‌ها هم از سه بخش تشکیل می‌یابد؛ بخش اول مربوط به مرحله اول و شبکه حمل و نقل بین تأمین‌کنندگان و کارخانه‌ها می‌باشد. بخش دوم که متعلق به مرحله دوم است،

ابتدا شامل سطوحی است که برای کارخانه‌ها در نظر گرفته می‌شود و سپس شبکه حمل و نقل بین کارخانه‌ها و انبارها را ترسیم می‌کند. نهایتاً بخش سوم، مربوط به شبکه حمل و نقل بین انبارها و مشتریان می‌باشد.

سه سطح حفاظتی زیست محیطی برای کارخانه‌ها و یک نوع ماده اولیه جهت مونتاژ محصول نهایی در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷ یک نمونه کروموزوم شدنی تصادفی برای هر دو روش نمایش ارائه می‌شود، در شرایطی که زنجیره تأمین دارای دو تأمین کننده، سه کارخانه، سه انبار و چهار مشتری است و

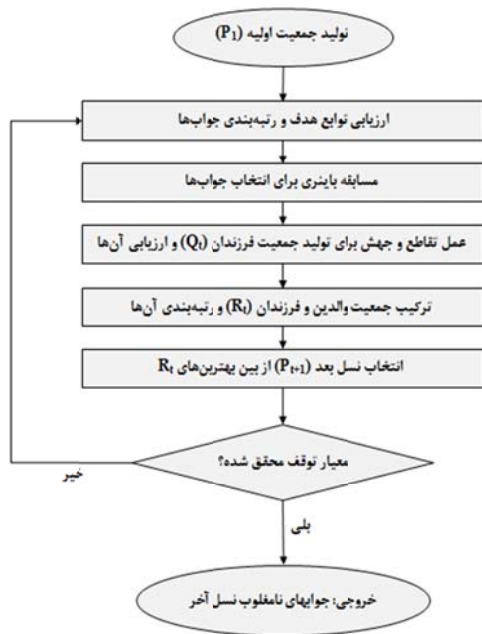


شکل ۷. نمونه کروموزوم شدنی با هر دو روش نمایش

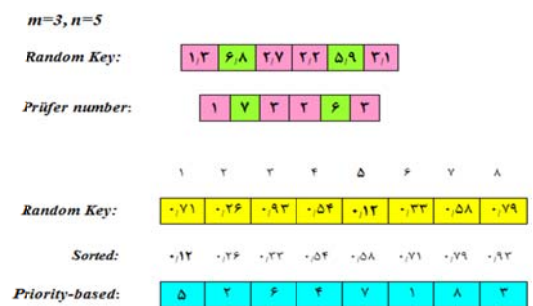
ارزیابی شده و با یک روش مرتب‌سازی نامغلوب سریع، سطح‌بندی می‌گردد. به هر جواب، رتبه‌ای با توجه به سطح نامغلوب‌اش اختصاص می‌یابد (رتبه ۱ برای جواب‌های نامغلوبی که در بهترین سطح یعنی سطح اول قرار دارند، رتبه ۲ برای جواب‌های سطح دوم و الی آخر). در ادامه با استفاده از روش انتخاب مسابقه باینری مبتنی بر عملگر مقایسه تراکمی ($<_n$)، و عملگرهای تقاطع و جهش، جمعیت فرزندان (Q_t) تولید می‌گردد. از ترکیب دو جمعیت والدین و فرزندان، جمعیت $R_t = P_t \cup Q_t$ حاصل می‌شود. بعد از مرتب‌سازی R_t ، به کمک یک روش نخبه‌گرایانه، جمعیت نسل بعد والدین (P_{t+1}) از بین بهترین‌های R_t انتخاب می‌گردد. رویه تولید نسل تا محقق شدن شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد. نهایتاً جواب‌های نامغلوب با رتبه یک نسل آخر به عنوان مجموعه جواب‌های بهینه پارتو معرفی می‌شوند.

با توجه به اینکه الگوریتم جستجوی گرانشی جزء الگوریتم‌های با فضای حل پیوسته به شمار می‌آید، لذا از روش کلید تصادفی^۸ برای تولید کروموزوم موقعیت ذرات استفاده می‌شود. در این صورت دو مرحله کدگشایی باید صورت پذیرد؛ ابتدا تبدیل کلید تصادفی به یکی از روش‌های نمایش و سپس کدگشایی کروموزوم به جوابی شدنی از فضای حل مسأله. برای توضیح بیشتر در رابطه با ساختار کلید تصادفی، به مثال‌های زیر توجه کنید. قابل ذکر است که ساختار در نظر گرفته شده، همانگونه که در شکل ۸ قابل مشاهده است، جواب‌های موجه و شدنی برای مسأله تولید می‌کند.

بعد از مقداردهی تصادفی اولیه موقعیت ذرات، سرعت آنها نیز در ابتدا صفر در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که در مرحله کدگشایی، کروموزوم‌ها مرحله به مرحله و از انتها به ابتدا کدگشایی می‌شوند. به عبارت دیگر ابتدا بخش سوم کروموزوم، سپس بخش دوم و در نهایت بخش اول آن رمزگشایی می‌گردد.



شکل ۹. نمودار جریان الگوریتم NSGA-II

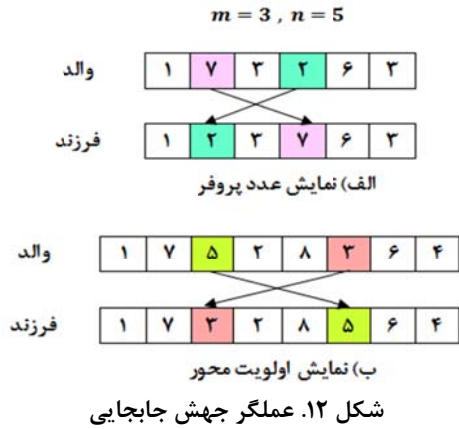


شکل ۸. ساختار کلید تصادفی و تبدیل آن به

کروموزومها

۳-۲. الگوریتم NSGA-II^۹

مطابق با الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک ۲ ارائه شده توسط دب و همکاران [۳۴]، ابتدا جمعیت اولیه والدین (P_1) از کروموزوم‌های طراحی شده برای مسأله به صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس جمعیت تولید شده بر اساس مقادیر توابع هدف،



۴. نتایج محاسباتی

در این بخش، ابتدا چگونگی تولید داده‌های آزمایشی برای مسائل نمونه در اندازه‌های مختلف تشریح می‌شود. سپس مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی، به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی تنظیم می‌گردد. در ادامه نتایج حاصل از حل مسائل نمونه توسط الگوریتم‌ها، ارائه و مقایسه می‌شود. کلیه الگوریتم‌ها در محیط نرم افزار متلب R2009a توسط کامپیوتری با CPU Intel® Core™ Due و RAM 2.2GB برنامه‌نویسی شده‌اند.

۴-۱. طراحی مسائل نمونه

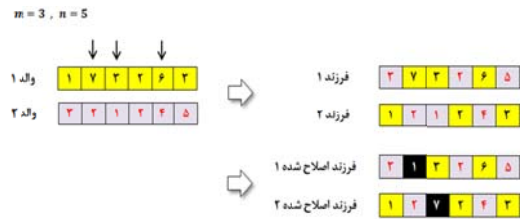
مطابق با جدول ۱، نه اندازه متفاوت با توجه به تعداد تأمین-کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان برای مسائل نمونه در نظر گرفته شده است که در هر اندازه، چهار نوع مسئله متمایز بر اساس تعداد مواد اولیه و بازه‌های انتخابی برای هزینه‌های ثابت ارسال در هر مرحله بکار گرفته می‌شود. در مجموع ۳۶ مسئله نمونه برای آزمایش طراحی شده است. سایر پارامترهای مورد نیاز برای مسائل، به شرح جدول ۲ تنظیم می‌گردند.

جدول ۱. ساختار مسائل نمونه

اندازه مسائل (S × I × J × K)	نوع مسائل	تعداد مواد اولیه (R)	بازه هزینه‌های متغیر ارسال			بازه هزینه‌های ثابت ارسال		
			c_1	c_2	c_3	f_1	f_2	f_3
5 × 3 × 5 × 10	I	1	(20,3)	(5,10)	(10,15)	(80,160)	(50,100)	(100,200)
5 × 4 × 10 × 15	II	1	(20,3)	(5,10)	(10,15)	(400,800)	(250,500)	(500,1000)
5 × 5 × 15 × 20	III	2	(20,3)	(5,10)	(10,15)	(80,160)	(50,100)	(100,200)
10 × 6 × 10 × 20	IV	2	(20,3)	(5,10)	(10,15)	(400,800)	(250,500)	(500,1000)
10 × 8 × 15 × 25								
10 × 10 × 20 × 30								
20 × 10 × 15 × 30								
20 × 12 × 20 × 35								
20 × 15 × 25 × 40								

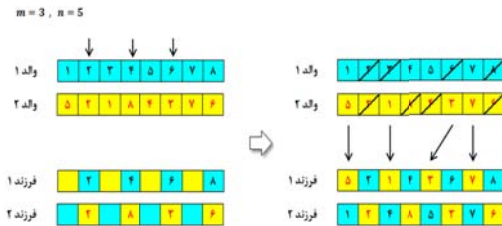
۳-۱. عملگر تقاطعی^{۱۰}

در فرآیند ترکیب، یک جفت کروموزوم از جمعیت والدین انتخاب و با هم ترکیب می‌گردد تا یک جفت کروموزوم جدید به عنوان فرزند تولید شود. در این مقاله، از روش تقاطعی PX^{۱۱} استفاده شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، طریقه عملکرد این عملگر برای هر دو روش نمایش پیشنهادی تشریح می‌گردد.



شکل ۱۰. عملگر تقاطعی PX برای نمایش عدد پروفر

باید توجه داشت که عمل تقاطع روی هر سه بخش کروموزوم مفروض برای مسئله، به صورت جداگانه انجام می‌شود.



شکل ۱۱. عملگر تقاطعی PX برای نمایش اولویت محور

۳-۲. عملگر جهش^{۱۲}

به کمک عملگر جهش، $(1 - p_c)\%$ از جمعیت فرزندان تولید می‌گردد. در این روش، یک کروموزوم از جمعیت والدین انتخاب و به کروموزومی جدید تبدیل می‌شود. در این مقاله، از عملگر جهش جابجایی^{۱۳} استفاده شده است که در شکل ۱۲ برای هر دو روش نمایش تشریح می‌گردد. قابل ذکر است که عملگر جهش تنها بر روی یکی از سه بخش کروموزوم مفروض برای مسئله، که به تصادف انتخاب می‌شود، اعمال می‌گردد.

جدول ۲. طراحی پارامترهای مسائل

پارامتر	تنظیم پارامتر
L	3
D_k	$U[50,200]$
$\sum_j N_j$	$\alpha \sum_k D_k ; 1 < \alpha < 2$
$\sum_i M_{i,1}$	$\alpha \sum_k D_k ; 1 < \alpha < 2$
$M_{i,2}$	$1.5 M_{i,1}$
$M_{i,3}$	$2 M_{i,1}$
$\sum_r SP_{r,r}$	$\alpha \max_{ij} \{u_{r,ij}\} \sum_k D_k ; 1 < \alpha < 2$
$V_{i,1}$	$U[4,12]$
$V_{i,2}$	$0.9 V_{i,1}$
$V_{i,3}$	$0.75 V_{i,1}$
$u_{r,ij}$	$U[1,3]$
t_k	$U[2,7]$
$h_{j,k}$	$U[3,8]$
p_k	$U[1,4]$
$e_{ij}^{(1)}, e_{ij}^{(2)}, e_{jk}^{(3)}$	$U[90,130]$
$W_{i,1}$	$U[15,30]$
$W_{i,2}$	$0.8 W_{i,1}$
$W_{i,3}$	$0.65 W_{i,1}$
$G_{i,1}$	$U[5000,8000]$
$G_{i,2}$	$1.8 G_{i,1}$
$G_{i,3}$	$2.5 G_{i,1}$

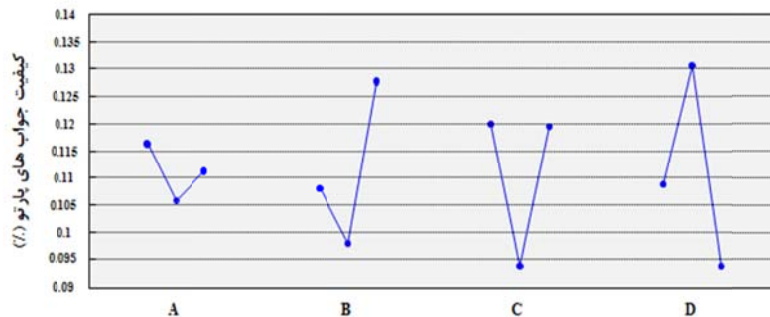
ممکن، بهترین مقدار برای هر پارامتر تعیین می‌گردد. در جدول ۳، پارامترهای مؤثر بر الگوریتم‌های پیشنهادی به همراه سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها ارائه شده است. با توجه به اینکه الگوریتم‌های MOGSA و NSGA-II به ترتیب، چهار و دو پارامتر سه سطحی دارند و درجه آزادی آنها به ترتیب، $9=4(3-1)+1$ و $5=2(3-1)+1$ می‌باشد، لذا بر اساس جداول تاگوچی، طرح ترکیبی $L_9(3^4)$ برای هر الگوریتم جهت انجام آزمایش انتخاب می‌شود. مدت زمان اجرای هر الگوریتم، به عنوان شرط توقف آن، متناسب با اندازه هر مسأله و معادل با $5 \times (S + I + J + K + R + L)$ ثانیه در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. پارامترها و سطوح آن‌ها

پارامتر	نماد	سطوح
اندازه جمعیت (pop_size)	A	A(1) - 50 A(2) - 100 A(3) - 200
ثابت گرانشی g_0	B	B(1) - 50 B(2) - 100 B(3) - 150
ثابت ϵ	C	C(1) - 0.1 C(2) - 0.2 C(3) - 0.3
ثابت β	D	D(1) - 10 D(2) - 20 D(3) - 30
نرخ تقاطع (r_c)	E	E(1) - 0.7 E(2) - 0.8 E(3) - 0.9

۲-۴. تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها

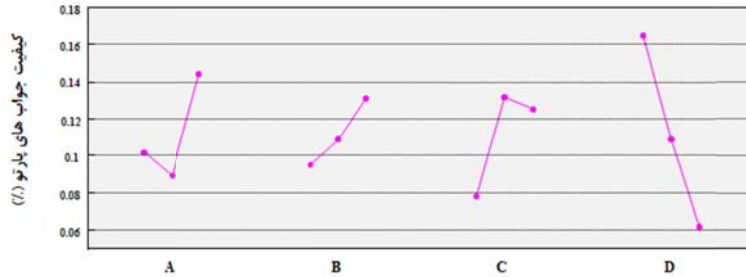
با توجه به اینکه کارایی یک الگوریتم فرابتنکاری تا حدود زیادی به تعیین مناسب پارامترهای آن بستگی دارد، لذا برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های توسعه داده شده در این تحقیق، از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی [۳۵] استفاده شده است. در این روش با توجه به تعداد پارامترهای هر الگوریتم و سطوح در نظر گرفته شده برای آنها، بر اساس جداول تاگوچی، یک طرح ترکیبی از سطوح مختلف پارامترها جهت آزمایش انتخاب می‌شود که با کمترین تعداد آزمایش



شکل ۱۳. نمودار میانگین درصد کیفیت برای سطوح مختلف پارامترهای (1) MOGSA با نمایش عدد پروف

نمودار میانگین درصد کیفیت جواب‌ها، برای هر سطح پارامتر MOGSA با هر دو روش نمایش ارائه شده است.

نتایج حاصل از آزمایشات برای ۳۶ مسأله نمونه بر اساس شاخص کیفیت جواب‌های پارتو، که در بخش بعد معرفی می‌گردد، تحلیل و ارزیابی می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴



شکل ۱۴. نمودار میانگین درصد کیفیت برای سطوح مختلف پارامترهای (2) MOGSA با نمایش اولویت محور

داشته است. برای محاسبه درصد کیفیت جواب‌های بهینه پارتو، همه جواب‌های بدست آمده توسط چهار الگوریتم برای هر مسأله، با هم ترکیب و مقایسه شده و مجموعه جواب‌های نامغلوب نهاییت تشکیل می‌گردد. سهم هر الگوریتم از مجموعه نهایی بدست آمده به صورت درصد، کیفیت آن الگوریتم را مشخص می‌سازد. فاصله و تنوع جواب‌ها به ترتیب طبق روابط (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شوند:

$$S = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{d} - d_i)^2 \right]^{1/2} \quad (28)$$

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N \max_j (\|x_i - y_j\|)} \quad (29)$$

در شرایطی که d_i فاصله اقلیدسی جواب i ام با جواب مجاورش در مجموعه پارتو، \bar{d} میانگین فواصل اقلیدسی d_i ، $\|x_i - y_j\|$ فاصله اقلیدسی بین دو جواب پارتوی x_i و y_j و N تعداد جواب‌های مجموعه پارتو می‌باشد.

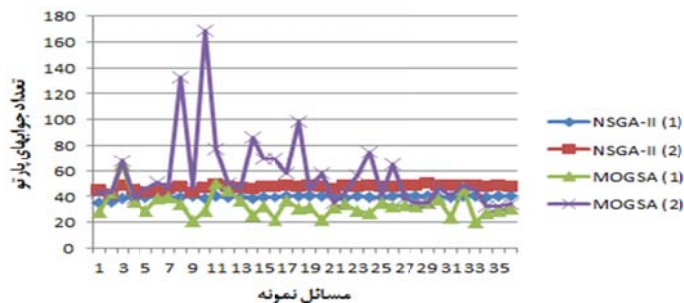
به این ترتیب، پارامترهای هر الگوریتم مطابق با جدول ۴ تنظیم می‌گردد.

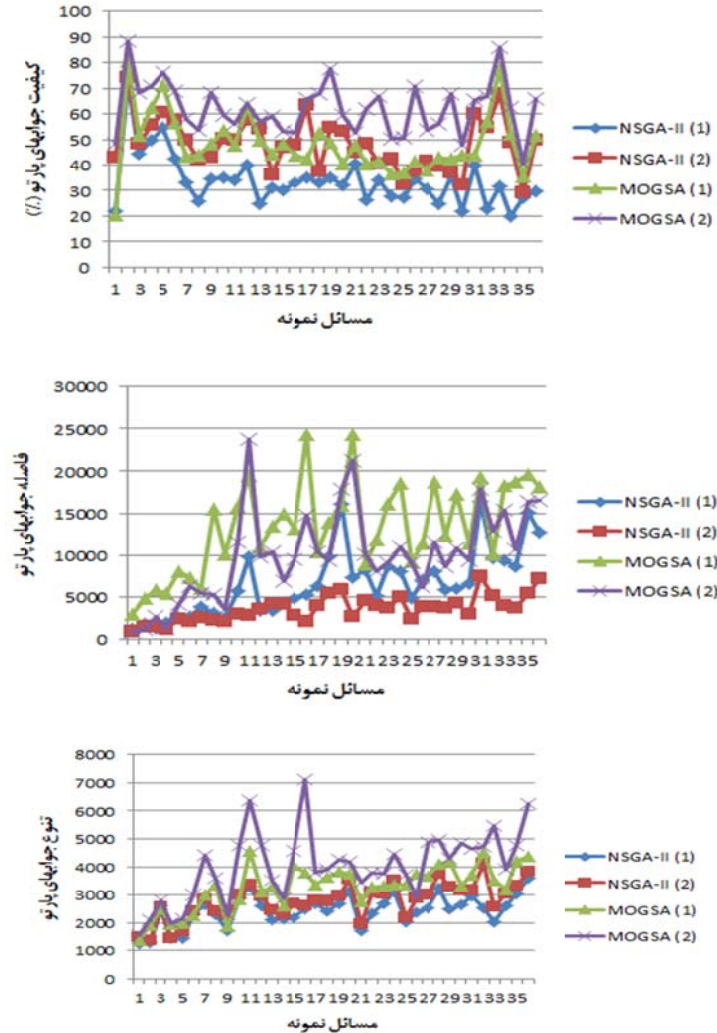
جدول ۴. پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم‌ها

	pop_size	g_0	ε	β	r_c
MOGSA (1)	50	150	0.1	20	-
MOGSA (2)	200	150	0.2	10	-
NSGA-II (1)	100	-	-	-	0.9
NSGA-II (2)	200	-	-	-	0.7

۳-۴. نتایج آزمایش‌ها

در این بخش، ۳۶ مسأله نمونه، به کمک الگوریتم‌های جستجوی گرانشی چند هدفه و مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک ۲، با هر دو روش نمایش عدد پروفر و اولویت محور، حل شده‌اند. میانگین نتایج حاصل از ۵ بار اجرای هر مسأله توسط هر الگوریتم، بر پایه‌ی چهار شاخص؛ تعداد جواب‌های بهینه پارتو^{۱۴}، کیفیت^{۱۵}، فاصله^{۱۶} و تنوع^{۱۷} جواب‌های پارتو در نمودارهای شکل ۱۵ ارائه شده است. هرچه تعداد، کیفیت و تنوع جواب‌های بهینه پارتو در الگوریتمی بیشتر و در مقابل، فاصله جواب‌ها کمتر باشد، آن الگوریتم عملکرد بهتری را





شکل ۱۵. نمودارهای نتایج حاصل از حل مسائل نمونه

عملکرد بهتری را نسبت به سایرین داشته است. اما جواب-های پارتوی تولید شده توسط الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک ۲ با نمایش اولویت محور (NSGA-II (2)، بر اساس شاخص فاصله، از یکنواختی توزیع بیشتری برخوردارند.

بعلاوه در مقایسه دو روش نمایش، نمایش اولویت محور نقش مؤثرتری را نسبت به روش عدد پروفردر عملکرد هر دو الگوریتم، برای تولید جواب‌های پارتوی بیشتر و با کیفیت‌تر و در عین حال یکنواخت و متنوع داشته است.

جدول ۵. مقایسه میانگین نتایج الگوریتم‌ها

	تعداد	کیفیت (%)	فاصله	تنوع
NSGA-II (1)	۰٫۳۲	۳۳٫۹	۰٫۲۹	۰٫۰۰۲
NSGA-II (2)	۰٫۷۴	۴۸٫۱۵	۰٫۰۱	۰٫۲۵
MOGSA (1)	۰٫۱	۴۸٫۴۵	۰٫۹۷	۰٫۵۴
MOGSA (2)	۰٫۷۸	۶۲٫۲۳	۰٫۶	۰٫۹۸

به منظور تحلیل نتایج حاصله جهت مقایسه الگوریتم‌ها، ابتدا نتایج بدست آمده برای معیارهای تعداد، فاصله و تنوع جواب‌های پارتو، با استفاده از شاخص انحراف نسبی^{۱۸} (RDI) بصورت زیر نرمالیزه می‌شوند.

$$RDI_i^j = \frac{f_i^j - \min(f_i^j)}{\max(f_i^j) - \min(f_i^j)} \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)، منظور از f_i^j مقدار بدست آمده شاخص برای مسأله i ام با الگوریتم j ام می‌باشد.

در جدول ۵، میانگین نتایج نرمالیزه شده حاصل از ۳۶ مسأله نمونه، محاسبه شده است. با توجه به این نتایج، الگوریتم جستجوی گرانشی چندهدفه با نمایش اولویت محور MOGSA (2)، بر اساس شاخص‌های تعداد، کیفیت و تنوع جواب‌ها،

۵. نتیجه گیری

یکپارچه سازی و هماهنگی عناصر موجود در زنجیره تأمین، شامل خرید مواد اولیه و نیمه ساخت، تولید، توزیع و فروش محصولات، تأثیر چشمگیری در کاهش هزینه های زنجیره، کاهش زمانهای ارسال و تأخیرها در تحویل کالاها از مراکز توزیع به بازارها و مراکز فروش و به تبع آن افزایش رضایتمندی مشتری را در بر دارد. بعلاوه با یک برنامه ریزی صحیح و منسجم، همزمان می توان در راستای بهبود عملکرد زیست محیطی زنجیره تأمین گام برداشت.

در این مقاله، برای مسأله برنامه ریزی یکپارچه خرید - تولید - توزیع در شبکه زنجیره تأمین سبز، مدلی قطعی و چندهدفه توسعه داده شد که سه هدف متناقض را در بر دارد: (۱) کمینه سازی هزینه های سیستم (هدف کمی) که در برگیرنده هزینه های خرید، تولید، توزیع و ارسال می باشد، (۲) کمینه سازی کل تأخیرها در تحویل کالاها از مراکز توزیع به مشتریان (هدف کیفی) و (۳) کمینه سازی کل میزان دی اکسید کربن منتشر شده در اثر تولید و توزیع جریانهای ارسالی در هر مرحله از زنجیره تأمین (هدف سبز).

با توجه به تضاد موجود بین توابع هدف و پیچیدگی مدل، رویکرد حل فراابتکاری پارتو (همزمانی) تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه (MOGSA)، با دو روش نمایش جواب عدد پروفر و اولویت محور بکار گرفته شد. در ادامه برای اثبات کارایی الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم مرتب سازی نامغلوب ژنتیک ۲ (NSGA-II) برای مسأله پیاده سازی گردید. نتایج حاصل از حل ۳۶ مسأله نمونه تصادفی طراحی شده، بر اساس چهار شاخص تعداد، کیفیت، فاصله و تنوع جواب های بهینه پارتو، برای مقایسه الگوریتم ها مورد تحلیل قرار گرفت. تنظیم پارامترهای الگوریتم ها به روش طراحی آزمایش های تاگوچی انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، الگوریتم MOGSA جواب های پارتوی بیشتر، با کیفیت تر و متنوع تری را تولید کرده، در حالی که جواب های پارتوی تولید شده توسط الگوریتم NSGA-II، یکنواخت تر می باشند. در مقایسه دو روش نمایش بکار گرفته شده، کدگذاری اولویت محور با توجه به ساختار ساده تر آنها در تولید کروموزوم شدنی و هم در کدگذاری، در عین حال نقش تأثیرگذارتری را هم در بهبود عملکرد هر دو الگوریتم نسبت به روش عدد پروفر داشته است.

برای تحقیقات آتی در این زمینه می توان جهت توسعه مدل، فاز مکان یابی کارخانه ها و انبارها یا فاز مسیریابی وسائط نقلیه در هر مرحله از زنجیره و در نظر گرفتن چند نوع وسیله نقلیه برای هر مسیر را به مدل اضافه کرد. ضمن اینکه می توان مدل را به مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته^{۱۹} تعمیم

داد و موضوع باز یافت محصول را مطرح کرد. در رابطه با روش حل مدل نیز می توان سایر روشهای فراابتکاری نظیر الگوریتم های رقابت استعماری (ICA)، جستجوی پراکنده (SS)، الکترو مغناطیس (EM) و غیره را بکار گرفت. بعلاوه با ترکیب کردن الگوریتم ها به منظور استفاده همزمان از مزایای آنها، می توان الگوریتمی کارا و مؤثرتر طراحی کرد. همچنین برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ها می توان از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده کرد.

پی نوشت

1. Multi-Sourcing
2. Fixed Charge Transportation
3. Integer Linear Programming
4. Meta-heuristic Methods
5. Prefer Number Representation
6. Priority-based Representation
7. Multi-Objective Gravitational Search Algorithm
8. Random Key
9. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
10. Crossover Operator
11. Position-based Crossover
12. Mutation Operator
13. Swap
14. Quantity Metric
15. Quality Metric
16. Spacing Metric
17. Diversity Metric
18. Relative Deviation Index
19. Closed-loop

مراجع

- [1] Beamon BM. Supply chain design and analysis: models and methods, International Journal of Production Economics, (1998), Vol. 55, pp. 281-294.
- [2] Srivasta SK. Green Supply Chain Management: A State of the Art Literature Review, International Journal of Management Reviews, (2007), Vol. 9 No. (1), pp. 53-80.
- [3] Boks C, Stevels A. Essential perspectives for design for environment experiences from the electronics industry, International Journal of Production Research, (2007), Vol. 45 (18-19), pp. 4021-4039.
- [4] Bilgen B, Ozkarahan I. Strategic, tactical and operational production distribution models: A review, International Journal of Technology Management, (2004), Vol. 28, pp. 151-171.

- [15] Bose I, Pal R. Do green supply chain management initiatives impact stock prices of firms?, *Decision Support Systems*, (2012), Vol. 52, No. (3), pp. 624-634.
- [16] Tseng ML. Green supply chain management with linguistic preferences and incomplete information”, *Applied Soft Computing*, (2011), Vol. 11, No. (8), pp. 4894-4903.
- [17] Wang X, Chan HK, Yee R, Diaz-Rainey I.A two-stage fuzzy-AHP model for risk assessment of implementing green initiatives in the fashion supply chain, *International Journal of Production Economics*, (2012), Vol. 135, No. (2), pp. 595-606.
- [18] Kuo RJ, Wang YC, Tien FC. Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection, *Journal of Cleaner Production*, (2010), Vol. 18, No. (12), pp. 1161-1170.
- [19] Sheu JB, Chen YJ. Impact of government financial intervention on competition among green supply chains, *International Journal of Production Economics*, (2012), Vol. 138, No. (1), pp. 201-213.
- [20] Khan FI, Natrajan BR, Revathi P. A new methodology for cleaner and greener process design, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, (2001), Vol. 14, No. (4), pp. 307-328.
- [21] Sheu JB. Green supply chain management, reverse logistics and nuclear power generation, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, (2008), Vol. 44, No. (1), pp. 19-46.
- [22] Zhou M, Pan Y, Chen ZH, Yang W, Li B. Selection and evaluation of green production strategies: analytic and simulation models, *Journal of Cleaner Production*, (2012), Vol. 26, pp. 9-17
- [23] Diabat A, Govindan K. An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management, *Resources Conservation and Recycling*, (2011), Vol. 55, No. (6), pp. 659-667.
- [24] Sharma A, R. Iyer G. Resource-constrained product development: Implications for green marketing and green supply chains, *Industrial Marketing Management*, In Press, Corrected Proof, Available online 5 May (2012).
- [5] Kanda AA, Deshmukh SG. Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies, and research directions, *International Journal of Production Economics*, (2008), Vol. 115, pp. 316-335.
- [6] Pedro D, Mula J, Poler R, Verdegay JL. Fuzzy optimization for supply chain planning under supply demand, and process uncertainties, *Fuzzy Sets and Systems*, (2009), Vol. 160, pp. 2640-2657.
- [7] Mula J, Pedro D, Poler R. The effectiveness of a fuzzy mathematical programming approach for supply chain production planning with fuzzy demand, *International Journal of Production Economics*, (2010), Vol. 128, No. (1), pp. 136-143.
- [8] Sarkis J, Zhu Q, Lai KH. An organizational theoretic review of green supply chain management literature, *International Journal of Production Economics*, (2011), Vol. 130, No. (1), pp. 1-15.
- [9] Fortes J. Green supply chain management: A literature review, *Otago Management Graduate Review*, (2009), Vol. 7.
- [10] Dekker R, Bloemhof J, Mallidis I. Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges, *European Journal of Operational Research*, (2012), Vol. 219, pp. 671-679.
- [11] Wang F, Lai X, Shi SH. A multi-objective optimization for green supply chain network design”, *Decision Support Systems*, (2011), Vol. 51, No. (2), pp. 262-269.
- [12] Yeh WC, Chuang MC. Using multi-objective genetic algorithm for partner selection in green supply chain problems, *Expert Systems with Applications*, (2011), Vol. 38, No. (4), pp. 4244-4253.
- [13] Pishvae MS, Torabi SA, Razmi J. Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty, *Computers & Industrial Engineering*, (2012), Vol. 62, No. (2), pp. 624-632.
- [14] Azevedo SG, Carvalho H, Machado VC. The influence of green practices on supply chain performance: A case study approach, *Transportation Research - Part E: Logistics and Transportation Review*, (2011), Vol. 47, No. (6), pp. 850-871.

- algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation,(2002),Vol. 6, No. (2), pp. 182-197.
- [35] Taguchi G. Introduction to quality engineering, White Plains: Asian Productivity Organization/ UNIPUB, (1986).
- [25] Cucchiella F, D.Adamo I, Gastaldi M.Green Supply Chain and the Energy Recovery Plant in Abruzzo,Procedia - Social and Behavioral Sciences, (2011), Vol. 25, pp. 54-72.
- [26] Lee AHI, Kang HY, Hsu CF, Hung HC.A green supplier selection model for high-tech industry, Expert Systems with Applications, (2009), Vol. 36, No. (4), pp. 7917-7927.
- [27] Lai KH, WY Wong CH.Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters, Omega, (2012), Vol. 40, No. (3).
- [28] Abdallah T, Farhat A, Diabat A, Kennedy S.Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment, Applied Mathematical Modeling, In Press, Corrected Proof, Available online 28 November (2011).
- [29] Venus Lun YH.Green management practices and firm performance: A case of container terminal operations, Resources Conservation and Recycling, (2011), Vol. 55, No. (6), pp. 559-566.
- [30] Dimopoulos C, Zalzala AMS. Recent Developments in Evolutionary Computation for Manufacturing Optimization: problems, solutions and comparisons, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, (2000), Vol. 4, No. (2), pp. 93-113.
- [31] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: A Gravitational Search Algorithm, Information Sciences, (2009), Vol. 179, pp. 2232-2248.
- [32] Hajiaghahi-Keshteli M, Molla-Alizadeh-Zavardehi S, Tavakkoli-Moghaddam R. Addressing a nonlinear fixed-charge transportation problem using a spanning tree-based genetic algorithm, Computers & Industrial Engineering,(2010),Vol. 59, pp. 259-271.
- [33] Gen M, Altiparmak F, Lin L. A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding, Published online: 8 February (2006) © Springer-Verlag.
- [34] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast elitist multi-objective genetic