Journal of Operational Research in its Applications
Vol.23, NO.2, Summer 2026
ISSN: 2251-7286
DOI:10.71773/jamlu-2026-2-2323

Design of a Sustainable Biomass Supply Chain Network with Uncertainty of Parameters: A New Robust Optimization Method

E. Jabarpour[1], F. Saghafi[2*]
[1] *Ph.D., Industrial management and technology faculty, Management college, University of Tehran, Tehran, Iran*
[2] *Assistant Professor, Industrial management and technology faculty, Management college, University of Tehran, Tehran, Iran.*

Research Paper

Received: 3 August 2025
Accepted: 3 February 2026

Abstract: In this paper, regarding the importance of biomass energy and biofuel, a new mathematical model of a biomass supply chain network has been presented aimed to maximize profits, the number of jobs, and reliability. Regarding the uncertainty of some of the parameters of the problem, the new robust optimization method was used and the results showed a reducing effect of uncertainty rate on the total net profit and reliability. MOPSO, NSGA II, and MOGWO algorithms were used to solve sample problems of larger size. Hence, 15 sample problems of larger size were designed and the model of a sustainable biomass chain network was solved using the above algorithm. The results of this model and comparison of indicators (means of objective functions, spacing index, distance index from the ideal point, max-domain index, number of Pareto solutions index and computational time) with MOPSO, NSGA II, and MOGWO algorithms show rapid convergence and high efficiency of MOPSO algorithm in solving the problem of a sustainable biomass supply chain network.

Introduction: The main goal of this research is to provide a new mathematical model of a biomass supply chain network to maximize profits, the number of jobs, and reliability.

Materials & Methods: Regarding the uncertainty of some of the parameters of the problem, the new robust optimization method was used and the results showed a reducing effect of uncertainty rate on the total net profit and reliability. MOPSO, NSGA II, and MOGWO algorithms were used to solve sample problems of larger size. Hence, 15 sample problems of larger size were designed and the model of a sustainable biomass chain network was solved using the above algorithm.

Results & Discussion: The results of this model and comparison of indicators (means of objective functions, spacing index, distance index from the ideal point, max-domain index, number of Pareto solutions index and computational time) with MOPSO, NSGA II, and MOGWO algorithms show rapid convergence and high efficiency of MOPSO algorithm in solving the problem of a sustainable biomass supply chain network.

** Corresponding Author: fsaghafi@ut.ac.ir*

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

Journal of Operational Research in its Applications
Vol.23, NO.2, Summer 2026
ISSN: 2251-7286
DOI:10.71773/jamlu-2026-2-2323

Conclusions: The results of solving the problem on larger sizes showed the very high efficiency of the MOPSO algorithm compared to other algorithms.

Keywords: Biomass Supply Chain, Probable Robust Optimization, Meta-Heuristic Algorithm.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال بیست و سوم، شماره دوم (پیاپی ۸۹)،تابستان ۰۵، ص ص ۶۸-۳۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱
DOI:10.71773/jamlu-2026-2-2323

طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار تحت عدم قطعیت پارامترها: یک روش نوین بهینه‌سازی استوار احتمالی

عفت جبارپور[۱]، فاطمه ثقفی[۲]*
۱- دکتری، دانشکدگان مدیریت، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری،دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار، دانشکدگان مدیریت، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری،دانشگاه تهران، تهران، ایران

رسید مقاله: ۱۲ مرداد ۱۴۰۴
پذیرش مقاله: ۱۴ بهمن ۱۴۰۴

چکیده

با توجه به اهمیت موضوع انرژی زیست‌توده و سوخت‌های زیستی در این مقاله، یک مدل ریاضی نوین از شبکه زنجیره تامین زیست‌توده با اهداف بیشینه‌سازی سود، بیشینه‌سازی تعداد شغل ایجادشده و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان ارایه‌شده است. با توجه به غیرقطعی بودن برخی از پارامترهای مساله از روش نوین بهینه‌سازی استوار احتمالی استفاده و نتایج نشان از تاثیر کاهنده نرخ عدم قطعیت بر روی سود کل شبکه و قابلیت اطمینان بود. برای حل مسایل نمونه در سایزهای بزرگ‌تر از الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II و MOGWO استفاده شد. ازاین‌رو ۱۵ مساله نمونه در سایزهای بزرگ‌تر طراحی و مدل شبکه زنجیره زیست‌توده پایدار با الگوریتم بیان‌شده حل گردید. نتایج حاصل از اجرای این مدل و مقایسه شاخص‌های (میانگین‌های توابع هدف، شاخص فاصله‌گذاری، شاخص فاصله از نقطه ایده آل، شاخص بیشترین گستردگی، شاخص تعداد جواب پارتو و زمان محاسباتی) با الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II و MOGWO نشان از همگرایی سریع و کارایی بالای الگوریتم MOPSO در حل مساله شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار است.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین زیست توده، بهینه‌سازی استوار احتمالی، الگوریتم فرا ابتکاری.

۱ مقدمه

افزایش قیمت جهانی نفت، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، افزایش گرمای جهانی، ارتقای سطح کیفی زندگی مردم، افزایش جمعیت جهان، مسایل زیست‌محیطی و اجتماعی منجر به سوق کشورهای مختلف جهان به استفاده از رویکرد "زنجیره تامین زیست‌توده و استفاده از انرژی‌های غیرفسیلی " شده است. بدین‌صورت که در سال‌های اخیر کشورهای مختلف جهان به‌طور گسترده‌ای به استفاده از انرژی‌ها نوین و سوخت‌های غیر فسیلی، مخصوصاً

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: fsaghafi@ut.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

انرژی زیست‌توده و سوخت‌های زیستی روی آورده‌اند؛ بنابراین استفاده از انرژی‌های زیست‌توده در سراسر جهان در حال رشد بوده و بحث میان موافقان و مخالفان استفاده از چنین انرژی‌های در حال گسترش است [۱].

با توجه به افزایش رغبت افراد برای استفاده از چنین انرژی‌هایی پیش‌بینی می‌شود تا اواسط قرن بیست و یکم، تقاضای انرژی زیست‌توده و سوخت‌های زیستی دو برابر گردد؛ درنتیجه انتظار می‌رود سوخت‌های زیستی و انرژی زیست توده به بخش مهمی از ترکیب انرژی جهانی تبدیل شود و کمک بسیاری به تقاضای انرژی گردد [۲]. جایگزینی اسلوبمند و تدریجی منابع فسیلی با زیست‌توده و احداث حساب‌شده پالایشگاه‌های هم‌بسته (که خود نیز مستلزم گسترش کشاورزی و تولید مواد غذایی راهبردی است) و تولید و مصرف و صادرات فراورده‌های زیستی پالایشگاهی ازجمله زیست سوخت‌ها نه‌تنها یک انتخاب بلکه یک ضرورت قطعی راهبردی به نظر می‌رسد [۳]. ازجمله دلایل مهم این ضرورت این است که انسان در برابر سلامتی و محیط‌زیست، اشتغال و امنیت غذایی خود و مردم و نیز توسعه پایدار مسئول است [۴].

به‌بیان‌دیگر می‌توان اظهار داشت که در بین منابع انرژی‌های تجدید پذیر (باد، خورشید، هیدروژن، امواج دریا، زمین گرمایشی)، انرژی زیست‌توده حایز اهمیت فراوانی است. حدود دوسوم از منابع تجدیدپذیر مصرفی، مربوط به زیست‌توده بوده و استفاده از آن به‌سرعت در حال رشد می‌باشد. زیست‌توده شامل کلیه موادی در طبیعت است که درگذشته نزدیک، جاندار بوده، از موجودات زنده به‌عمل‌آمده و یا زایدات و ضایعات آن‌ها هستند.[۵] اگرچه منشا منابع فسیلی نیز منابع زیست‌توده می‌باشد؛ ولی زیست‌توده مواد زیستی مانند سوخت فسیلی (زغال‌سنگ یا نفت) که طی میلیون‌ها سال فرایندهای زمین‌شناسی، در شرایط فشار و دمای خاصی تغییر شکل داده‌اند را شامل نمی‌شود. [۶] اهمیت انرژی زیست‌توده و مدیریت آن در قالب یک شبکه زنجیره تامین که مراحل تامین، تولید و توزیع آن را بر عهده دارد، موجب شده در این مقاله به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده حلقه بسته که به‌طور هم‌زمان به مسایل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در بر می‌گیرد، پرداخته شود. مدل شبکه زنجیره تامین زیست‌توده به‌صورت غیرقطعی بوده که از روش نوین بهینه‌سازی استوار-احتمالی به کنترل پارامترهای غیرقطعی پرداخته‌شده است. درنهایت از الگوریتم های MOPSO، NSGA II و MOGWO برای حل مدل سه هدفه در این تحقیق استفاده شده است.

ساختار مقاله بدین‌صورت می‌باشد، در بخش دوم، به بیان پیشینه تحقیقات انجام‌شده و ارایه شکاف تحقیقاتی پرداخته‌شده است. در بخش سوم به مدل‌سازی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده تحت عدم قطعیت پرداخته‌شده است. در این بخش از روش بهینه‌سازی استوار احتمالی برای کنترل مدل استفاده شده است. در بخش چهارم به ارایه روش‌های حل یعنی کروموزوم مبتنی بر اولویت و رمز گشایی آن، تنظیم پارامتر الگوریتم های فراابتکاری و همچنین شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته‌شده است. در بخش پنجم به بررسی نتایج خروجی و طراحی آزمایشات پرداخته‌شده است. درنهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری حاصل از مقاله ارایه‌شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

۲ پیشینه تحقیقات

۲-۱ زنجیره تامین زیست‌توده

برای اولین بار مول و همکاران (۱۹۹۷) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده‌اند که در آن، مکان سایت‌ها پردازش به‌وسیله حداقل کردن هزینه‌های لجستیک زیست‌توده شامل هزینه‌های تاسیس پالایشگاه، تولید اتانول، تامین مواد اولیه، حمل‌ونقل و ...، بهینه‌شده است [۷]. برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تامین زیست‌توده و تخصیص بهینه زیست‌توده تحت تصمیمات مکان‌یابی غیرقطعی [۸] و طراحی و تولید بهینه زنجیره تامین اتانول زیستی همراه با تعیین برداشت [۹]، چند نمونه از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده هستند. مانع اصلی برای تجاری‌سازی سوخت زیستی، فرایندهای تولید پیچیده آن است. این پیچیدگی به دلیل اشکال مختلفی از پارامترهای متنوع ساخته‌شده است. عدم قطعیت یکی از شکل‌های رایج تنوع در پارامترهای زنجیره تامین سوخت‌های زیستی است. تامین مواد اولیه زیست‌توده، تولید سوخت زیستی و تقاضا، قیمت و لجستیک، پارامترهای متداولی هستند که همراه با عدم قطعیت هستند [۱۰].

عثمانی و ژانگ [۱۱] به بهینه‌سازی تصادفی یک شبکه زنجیره برای تولید اتانول نسل دوم پایدار پرداختند. هدف اصلی آن‌ها در این مقاله بیشینه‌سازی عملکردهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بود. آن‌ها برای حل مدل از روش تجزیه بندرز استفاده کردند و به‌منظور اثبات اثربخشی مدل ریاضی پیشنهادی خود، یک مطالعه موردی لجستیک در آمریکا انجام دادند. ربانی و همکاران [۱۲] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار باهدف‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی متضاد پرداختند. آن‌ها برای حل مدل خود از روش اپسیلون محدودیت استفاده نمودند و نشان دادند جهت دستیابی به یک سطح عملکرد مطلوب اجتماعی و زیست‌محیطی، بایستی ۱۵ درصد از سهم تابع اقتصادی افزایش یابد. پارک و همکاران [۱۳] یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلف برای زنجیره تامین بیو اتانول ارایه کردند. هدف این مقاله، کمینه‌سازی هزینه‌های کل کاشت، و برداشت، ایجاد زیرساخت‌ها، فرایندهای ذخیره‌سازی، تولید بیو اتانول و حمل‌ونقل بود. آن‌ها مدل خود را با استفاده از داده‌های در دسترس در شمال داکوتا اجرا کردند و نتیجه گرفتند که سناریو حمل‌ونقل توسط چندین نوع وسیله نقلیه از یک نوع حمل‌ونقل (کامیون) هزینه کمتری دارد. رنتیزلاس و همکاران [۱۴] یک مساله ذخیره‌سازی محصولات زیست‌توده در یک شبکه زنجیره تامین را مدل‌سازی نمودند. هدف اصلی آن‌ها در این مقاله بررسی روش‌های مختلف ذخیره‌سازی زیست‌توده‌ای بود که کمترین هزینه ذخیره‌سازی را داشته باشد. پتریدیس و همکاران [۱۵] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار پرداختند. آن‌ها یک چارچوب ریاضی یکپارچه برای حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی زیست‌توده در گره‌های مختلف شبکه زنجیره تامین ارایه کردند و از روش برنامه‌ریزی آرمانی به کمینه‌سازی اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مساله پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که تاکید بر جنبه‌های زیست‌محیطی منجر به کاهش میزان انتشار کربن دی‌اکسید شده و در بررسی جواب‌های کارا با کاهش میزان معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی، معیار اجتماعی افزایش می‌یابد. فو [۱۶] یک مدل ساده خطی برای تخصیص بهینه زیست‌توده نخل در یک شبکه زنجیره تامین چند سطحی ارایه کردند. هدف اصلی در این مقاله بیشینه‌سازی سود ناشی از طراحی شبکه در کنار کمینه‌سازی هزینه انتشار گاز

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

کربن دی‌اکسید بود. براگادو و همکاران [۱۷] یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی سیستم جریان انتقال محصولات شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پرداختند. آن‌ها در این مقاله در نظر داشتند تا سود حاصل از طراحی کل شبکه را افزایش داده و بهینه‌ترین منبع ذخیره انرژی زیست‌توده و میزان توزیع محصولات را به دست آورند. آن‌ها برای حل مساله از نرم‌افزار GAMS استفاده نمودند و پیکربندی بهینه آن در چهار سناریو واقع‌بینانه مورد تجزیه‌وتحلیل قراردادند. اختری و همکاران [۱۸] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده شامل یکپارچگی تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی پرداختند. نوآوری مدل آن‌ها شامل تصمیم‌گیری در مورد تاسیس تسهیلات در هرسال، نه‌فقط در ابتدای افق برنامه‌ریزی، چند محصولی بودن، تاثیر قیمت انرژی در مدل و استفاده از روش بهینه‌سازی جهت دستیابی به یک‌راه حل مطلوب در مدت‌زمان کوتاه‌تر بود. موتینیرو و همکاران [۱۹] به مدل‌سازی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به‌منظور ایجاد تقاضای شکر، مواد اولیه و محصولات مختلف و همچنین توزیع آن‌ها برای رسیدن به تولید بیو اتانول پرداختند. این مدل به دو مطالعه موردی وابسته به قابلیت دسترسی زیست‌توده می‌باشد که نتایج آن نشان می‌دهد که شبکه زنجیره تامین بیوتکنول و شکر در آفریقای جنوبی قابل‌اعتماد است. هزینه حمل‌ونقل مربوط به بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های زنجیره تامین بوده، درحالی‌که بالاترین سود زمانی که مقادیر بالای مواد خام وجود دارد و محدودیت‌های مربوط به تولید اتانول وجود ندارد. نیل و همکاران [۲۰] به یکپارچه‌سازی مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پرداختند. در این مقاله به طور منسجم سیستم تولید سوخت از مزرعه تا سوخت تجزیه و تحلیل شده است و همچنین تاثیر میزان انتشار گازهای گلخانه ای با در نظر گرفتن معیارهای پایداری بررسی شده است. جی و همکاران [۲۱] یک مدل جدید برای زنجیره تامین سوخت زیستی سلولزی چهارسطحی با ۱۲ مسیر طراحی نموده تا با در نظر گرفتن دوره های زمانی متعدد ، انواع مختلف زیست توده و توزیع های مکانی، موجودی‌های زیست توده و سوخت‌های زیستی، تدارکات و سطح تقاضای مختلف، هزینه کل زنجیره تامین را به حداقل برساند. اسمعیلی و همکاران [۲۲] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر پرداختند. بررسی تاثیرات دو مشوق مالی (پرداخت انگیزه و جریمه های انتشار) در این مقاله بررسی شده است که تولیدکنندگان نسل اول اتانول زیستی را به استفاده از زیست توده نسل دوم ترغیب می‌کنند. این مشوق‌های مالی برای به حداکثر رساندن سود زنجیره‌های تامین بیواتانول در ایالت داکوتای شمالی در مدل‌های برنامه‌ریزی خطی ادغام شده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهد که تولید نسل اتانول زیستی کارآمدتر از نسل اتانول زیستی است. نور و همکاران [۲۳] یک مدل جدید برنامه‌نویسی تصادفی دو مرحله‌ای را ارایه دادند که پارامترهای مختلف کیفیت زیست توده وابسته به آب و هوا (به عنوان مثال، محتوای رطوبت، خاکستر و از دست دادن ماده خشک) و تاثیر آنها بر روی طراحی کلی زنجیره تامین در نظر گرفته شده است. برای حل مدل یک الگوریتم تجزیه ترکیبی موازی ارایه شده است. آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد که تنوع کیفی زیست توده با نیاز به انبارهای اضافی بر طراحی زنجیره تامین تاثیر می‌گذارد ، بنابراین سرمایه گذاری را افزایش می‌دهد. شرارا و همکاران [۲۴] نقش مکانی و تغییرات مکانی را در برآورد تاثیرات زیست محیطی و تصمیم‌گیری برای برداشت ذرت دانه‌ای برای تولید سوخت‌های زیستی ارزیابی کردند. برای هر تفکیک مکانی، تصمیم‌گیری با استفاده از یک روال بهینه‌سازی انجام شده است تا اثرات مختلف زیست محیطی

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

مرتبط برای پاسخگویی به تقاضاهای مختلف زیست توده به حداقل برسد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که برداشت انتخابی در وضوح بالاتر (یا سطح تجمع کمتر) می‌تواند به طور قابل توجهی در اثرات زیست محیطی ، به ویژه در سطح تقاضای کم تاثیر بگذارد. قاانی و همکاران [۱] یک سیستم پشتیبانی تصمیم با استفاده از یک برنامه خطی در مقیاس بزرگ با هدف به حداکثر رساندن سود با و بدون هزینه انتشار ایجاد طراحی کرده‌اند. آنها مدل خود را در ایالت داکوتای شمالی پیاده کردند. نتایج نشان می‌دهد انگیزه‌ای معادل ۷/۲۰ دلار به ازای هر تن دانه ذرت که به ۲۰٪ ظرفیت ریلی اختصاص می‌یابد، به اتانول تبدیل می‌شود ایده‌آل است. بیجارچیان و همکاران [۲۵] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار برای تولید انرژی از طریق فرایند هضو بی‌هوازی پرداختند. این مدل که به ترتیب عملکرد اقتصادی و اجتماعی را به حداکثر می‌رساند، به ترتیب نشان‌دهنده سود اقتصادی مستقیم و تاثیرات مثبت اجتماعی مانند ایجاد شغل و توسعه اقتصادی است. رحیمی و همکاران [۲۶] یک مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای فرمول‌بندی طراحی و برنامه‌ریزی مطلوب یک شبکه زنجیره تامین بیواتانول با توجه به رقابت مواد غذایی و مواد اولیه زیست توده بر روی زمین‌های زراعی موجود ارایه دادند. مدل پیشنهادی قادر به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک (به عنوان مثال مکان‌ها و ظرفیت‌های تاسیسات، تامین منابع و تخصیص مواد اولیه زیست توده به پالایشگاه‌های زیستی)، همراه با برخی تصمیمات تاکتیکی (به عنوان مثال برنامه‌ریزی زمین، موجودی و تولید مواد اولیه زیست توده و اتانول زیستی) است. این مدل شامل دو هدف حداقل هزینه و حداکثر مناسب بودن محصولات با گیاهان زراعی اختصاص‌یافته آنها می‌باشد. رونی و همکاران [۲۷] یک مطالعه موردی مقایسه‌ای با منابع زیست توده متعدد برای تجزیه و تحلیل طرح‌های تدارکات مواد اولیه تولید پالایشگاه با داشتن انبارهای متقاطع و یک انبار اولیه مشترک با تصفیه خانه ارایه دادند. نتایج حاصل از مطالعه موردی در ایالات متحده نشان داد که یک پالایشگاه زیستی می‌تواند با افزایش اتخاذ مخزن توزیع شده در طرح زنجیره تامین مواد غذایی ، سطح کشش مواد اولیه و حجم عرضه خود را به ترتیب ۵۷/۳٪ ، ۱۷۷٪/۴ بدون افزایش هزینه تحویل مواد اولیه افزایش دهد.

۲-۲ زنجیره تامین زیست‌توده در شرایط عدم قطعیت

با بررسی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، می‌توان مطالعات بسیاری را مشاهده کرد که مرتبط با مدل‌های بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده تحت عدم قطعیت هستند. برای مثال، دال مس و همکاران [۲۸] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تصادفی پویا برای طراحی یک زنجیره تامین سوخت زیستی تحت شرایط عدم قطعیت بازار طراحی کردند. گیارولا و همکاران [۲۹] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای-چندسطحی برای بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تامین اتانول زیستی با در نظر گرفتن عدم قطعیت بازار زیست‌توده و کربن پیشنهاد دادند. قادری و همکاران [۳۰] به ارایه یک مدل بهینه‌سازی استوار امکانی چندهدفه در طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار پرداختند که به‌طور هم‌زمان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را مدنظر قرار می‌داد. آن‌ها برای حل مدل سه هدفه خود از روش تصمیم‌گیری چندهدفه ترابی-حسینی استفاده کردند. قادری و همکاران [۳۱]یک مدل ریاضی عدد صحیح

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

مختلط برای شبکه زنجیره تامین زیست‌توده که در آن تقاضا به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته‌شده بود طراحی کردند. آن‌ها مطالعه خود را بر روی یک مساله واقعی در دولت داکوتای شمالی در ایالات‌متحده انجام دادند. گلیچی و همکاران [۳۲] یک مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده ارایه دادند. آن‌ها در مدل خود چندین محصول مختلف را در چند دوره زمانی در نظر گرفتند و از روش برنامه‌ریزی احتمالی به کنترل پارامترهای غیرقطعی مساله پرداختند. نتایج مشتق‌شده و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها، کارایی و کاربرد مدل را تایید کرد. فتاحی و همکاران [۳۳] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده تحت عدم قطعیت عرضه و تقاضا پرداختند. آن‌ها در مدل خود از روش برنامه‌ریزی تصادفی استفاده کردند و مقادیر مختلف عرضه و تقاضا را در سناریوهای مختلف مورد بررسی قراردادند. در مدل آن‌ها توابع هدف شامل اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی بود. نتایج محاسباتی در یک مطالعه موردی واقعی نشان داد که قابلیت استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی پیشنهادشده و همچنین ریسک خرابی و ابعاد پایداری بر روی برنامه‌ریزی زیست‌محیطی زیست‌توده تاثیر دارد. خویشتن‌دار [۳۴] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی در شرایط عدم قطعیت برای شبکه زنجیره تامین بیو گاز طراحی کرد. وی در این مقاله، نیروی کار، تقاضای زیست‌توده و قیمت زیست‌توده را نامعلوم در نظر گرفته بود و از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم‌های تکاملی (الگوریتم ژنتیک و تکامل دیفرانسیل) برای یافتن راه‌حل بهینه مطلوب استفاده کرد. وی برای کنترل پارامترهای غیرقطعی مساله از روش برنامه‌ریزی فازی استفاده نمود. همچنین آن‌ها تاثیرات عدم قطعیت در موجودی زیست‌توده، تقاضای زیست‌توده و نیروی کار موجود بر روی هزینه کلی زنجیره تامین بیوگاز، از طریق تجزیه‌وتحلیل حساسیت مورد مطالعه قرار داد. حبیب و همکاران [۳۵] یک مدل بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تامین بیودیزل مبتنی بر چربی حیوانی را ارایه دادند. مدل بهینه سازی پیشنهادی علاوه بر به حداقل رساندن انتشار کربن در طول عملیات درگیر، هزینه کل عملیات زنجیره تامین بیودیزل را به حداقل می‌رساند. فضای پیچیده و پویای تجاری زنجیره تامین زیست توده منجر به عدم اطمینان بالایی می‌شود، در نتیجه، اثربخشی تصمیمات سطح استراتژیک به خطر می‌افتد. برای مدل سازی این عدم اطمینان ، از یک روش راه حل مبتنی بر برنامه نویسی استوار امکانی استفاده شده است. پودل و همکاران [۳۶] یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی دو مرحله‌ای ارایه دادند که برای طراحی و مدیریت یک شبکه زنجیره تامین سوخت گیری زیست توده تحت عدم اطمینان عرضه مواد اولیه استفاده می‌شود. آنها از یک الگوریتم تجزیه جدید برای حل مساله استفاده نمودند. در نهایت با استفاده از داده‌های ایالت های می سی سی پی و آلاباما یک مطالعه موردی را توسعه دادند و از این مناطق برای آزمایش و اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده کردند. علیزاده و همکاران [۳۷] یک مدل برنامه نویسی تصادفی سه مرحله‌ای استوار برای توصیف و بهینه سازی یک شبکه زنجیره تامین الفین ارایه کردند. در این شبکه با هدف ارایه یک شبکه لجستیکی قابل اعتماد و اقتصادی برای پشتیبانی از تولید الفین ارایه شده است.گیلانی و همکاران [۳۸]یک مدل بهینه سازی طراحی شبکه زنجیره تامین استوار سه مرحله‌ای برای تولید اتانول زیستی از نیشکر را ارایه کردند. آنها از روش تجزیه و تحلیل پوششی یکپارچه فازی برای انتخاب زمین‌های زیر کشت مناسب به عنوان نقاط بالقوه تامین استفاده کردند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

با توجه به مطالعه ادبیات موضوع و شکاف‌های تحقیقاتی مطالعه شده، می‌توان بیان کرد تاکنون مطالعه جامعی در خصوص شبکه زنجیره تامین زیست‌توده حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت انجام نیافته است. ازاین‌رو در این مقاله به ارایه یک مدل نوین شبکه زنجیره تامین زیست‌توده با هدف بیشینه‌سازی سود، نرخ استخدام و قابلیت اطمینان پرداخته‌شده است. همچنین با توجه به غیرقطعی در نظر گرفتن برخی از پارامترهای مدل از روش بهینه‌سازی استوار احتمالی برای کنترل این پارامترهای استفاده شده است. لذا با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی ارایه‌شده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری چند هدفه برای حل مدل استفاده شده است.

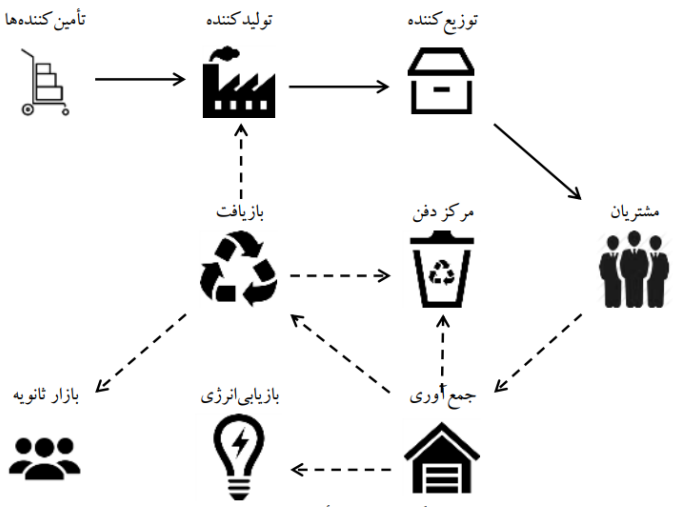
۳ تعریف مساله و مدل‌سازی

در این مقاله به مدل‌سازی یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار تحت عدم قطعیت برخی از مهم‌ترین پارامترهای مساله (تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل) پرداخته‌شده است. شکل ۱ نمایی از شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار را نشان می‌دهد که در این شبکه هدف اصلی تامین مواد بیو زیستی مشتریان در بازار دست‌اول و افزایش میزان بازیابی انرژی و تامین تقاضای بازار دست‌دوم از محصولات برگشتی مواد زیست‌توده است. در این مساله تامین‌کننده‌ها که درواقع تامین مواد زیست‌توده را بر عهده‌دارند، مواد زیست‌توده را جهت تولید فراورده‌های بیو زیستی به تولیدکننده‌ها ارسال می‌کنند. تولیدکننده‌ها بر اساس ترکیب مواد از پیش تعیین‌شده، اقدام به تولید فراورده‌های بیو زیستی کرده و محصولات نهایی تولیدشده را به توزیع‌کنندگان ارسال می‌کند. توزیع‌کنندگان نیز با توجه به تقاضای غیرقطعی مشتریان از هر محصول، توزیع محصولات نهایی را با در نظر گرفتن کمبود انجام می‌دهند.

از سویی دیگر در این مقاله، زنجیره تامین معکوس زیست‌توده پایدار نیز در نظر گرفته‌شده است. هدف اصلی طراحی چنین شبکه‌ای، مدیریت صحیح و استفاده مجدد از محصولات بیو زیستی برگشتی از مشتریان است. در این شبکه با توجه به مسایل مختلف، درصدی از فراورده‌های زیست‌توده تولیدشده توسط مراکز جمع‌آوری، جمع‌آوری‌شده و پس از بازرسی به یکی از مراکز مربوطه جهت بازیابی انرژی، بازیافت مجدد و با انهدام ارسال می‌گردد. محصولات بازیافت شده در حقیقت آن فراورده‌هایی را شامل می‌شود که با افزودن برخی مواد اولیه و یا تغییر در ساختار فراورده بیوزیستی، قابل‌استفاده مجدد در بازار اولیه و یا فروش به‌عنوان محصول باکیفیت پایین برای بازار ثانویه است. در این میان ممکن است برخی از مواد زیست‌توده، دیگر قابلیت استفاده مجدد، حتی بعد از بازیافت را نداشته (کیفیت مواد بسیار پایین باشد)؛ در این صورت جهت انهدام به مراکز انهدام ارسال می‌گردد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]



شکل ۱. شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار

در این مساله ۳ نوع تصمیم استراتژیکی، تاکتیکی و عملیاتی وجود دارد. در سطح تصمیمات استراتژیکی، مساله درصدد تعیین تعداد و ظرفیت تسهیلات بالقوه شبکه شامل (مراکز تولید، توزیع، بازیافت و جمع‌آوری) است. در سطح تصمیمات تاکتیکی، مقدار بهینه تولید، توزیع و انتقال محصولات فراوری‌شده بین سطوح مختلف شبکه زنجیره تامین مدنظر می‌باشد. در سطح تصمیمات عملیاتی نیز، تعیین وسیله نقلیه مناسب بین هر دو سطح شبکه زنجیره تامین برای انتقال محصولات فراوری‌شده، هدف اصلی به شمار می‌رود.

با توجه به مفروضات زیر، مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار، قابل مدل‌سازی خواهد بود:

۱- توابع هدف مساله، شامل بیشینه‌سازی سود کل شبکه زنجیره تامین، بیشینه‌سازی تعداد شغل‌های ایجادشده و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار می‌باشد.

۲- پارامترهای تقاضا، ظرفیت تامین‌کننده، هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل و هزینه‌های عملیاتی به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته‌شده است.

۳- کمبود مجاز می‌باشد.

۴- ناوگان حمل‌ونقل به‌صورت غیرهمگن در نظر گرفته‌شده است.

۵- هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان جزئی از تابع هدف اول در نظر گرفته‌شده است.

۶- ظرفیت تسهیلات در سطوح مختلف دارای هزینه‌های مختلفی است.

با توجه به مفروضات ذکرشده، مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم‌گیری مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار به‌صورت زیر می‌باشد:

۳-۱ مجموعه‌ها

A	مجموعه نقاط ثابت مشتری $a=\{1,2,\ldots,A\}$
K	مجموعه مراکز بالقوه توزیع $k=\{1,2,\ldots,K\}$
J	مجموعه مراکز بالقوه تولید $j=\{1,2,\ldots,J\}$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

I	مجموعه مراکز تامین‌کننده مواد اولیه $i = \{۱,۲,\ldots,I\}$
L	مجموعه مراکز انهدام $l = \{۱,۲,\ldots,L\}$
N	مجموعه مراکز بالقوه بازیافت $n = \{۱,۲,\ldots,N\}$
M	مجموعه مراکز بالقوه جمع‌آوری $m = \{۱,۲,\ldots,M\}$
E	مجموعه مراکز بازیابی انرژی $e = \{۱,۲,\ldots,E\}$
B	مجموعه نقاط ثابت بازار ثانویه $b = \{۱,۲,\ldots,B\}$
G	مجموعه سطوح ظرفیت تسهیلات بالقوه $g = \{۱,۲,\ldots,G\}$
P	مجموعه محصولات (محصولات فراوری‌شده بیو زیستی) $p = \{۱,۲,\ldots,P\}$
H	مجموعه مواد اولیه (مواد اولیه زیست‌توده) $h = \{۱,۲,\ldots,H\}$
V	مجموعه وسایل نقلیه $v = \{۱,۲,\ldots,V\}$

۳-۲ پارامترها

Dem_{ap}	تقاضای مشتری a از محصول p
O_{hp}	تعداد مواد اولیه h موردنیاز برای تولید یک محصول p
α_{ap}	درصدی از محصول p بازگشت داده‌شده توسط مشتری a
β_{mp}	درصدی از محصول p قابل‌انتقال به مرکز بازیابی انرژی توسط مرکز جمع‌آوری m
γ_{mp}	درصدی از محصول p قابل‌انتقال به مرکز بازیافت توسط مرکز جمع‌آوری m $\forall m,p \quad \beta_{mp}+\gamma_{mp}<۱,$
δ_{np}	درصدی از محصول p انتقال‌یافته به مرکز انهدام توسط مرکز بازیافت n
σ_{np}	درصدی از محصول p انتقال‌یافته به مرکز تولید توسط مرکز بازیافت n $\forall n,p \quad \delta_{np}+\sigma_{np}<۱,$
$CapJ_{jpg}$	ظرفیت تولیدکننده j از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapK_{kpg}$	ظرفیت توزیع‌کننده k از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapM_{mpg}$	ظرفیت مرکز جمع‌آوری m از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapN_{npg}$	ظرفیت مرکز بازیافت n از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapI_{ih}$	ظرفیت تامین‌کننده i از ماده اولیه h
$CapL_{lp}$	ظرفیت مرکز انهدام l از محصول g
$Capw_{v}$	ظرفیت وزنی وسیله نقلیه v
$Capv_{v}$	ظرفیت حجمی وسیله نقلیه v
w_{h}	وزن یک واحد ماده اولیه h
w_{p}	وزن یک واحد محصول p
v_{h}	حجم یک واحد ماده اولیه h
v_{p}	حجم یک واحد محصول p
Pr_{ap}	قیمت فروش یک واحد محصول p برای مشتری دست‌اول a
Pr_{ep}	قیمت فروش یک واحد محصول p برای مرکز بازیابی انرژی e
Pr_{bp}	قیمت فروش یک واحد محصول p برای بازار ثانویه b

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

F_{jg} هزینه ثابت احداث مرکز تولید j با سطح ظرفیت g

F_{kg} هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g

F_{mg} هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g

F_{ng} هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g

FC_v هزینه ثابت به‌کارگیری وسیله نقلیه v

FV_v هزینه متغیر وسیله نقلیه v به ازای یک واحد حرکت بین دو تسهیل

D_{ka} فاصله مرکز توزیع k از مشتری a

D_{jk} فاصله مرکز تولید j از مرکز توزیع k

D_{ij} فاصله تامین‌کننده i از مرکز تولید j

D_{nj} فاصله مرکز بازیافت n از مرکز تولید j

D_{am} فاصله مشتری a از مرکز جمع‌آوری m

D_{me} فاصله مرکز جمع‌آوری m از مرکز بازیابی انرژی e

D_{mn} فاصله مرکز جمع‌آوری m از مرکز بازیافت n

D_{ml} فاصله مرکز جمع‌آوری m از مرکز انهدام l

D_{nl} فاصله مرکز بازیافت n از مرکز انهدام l

D_{nb} فاصله مرکز بازیافت n از بازار ثانویه b

π_{ap} هزینه عدم برآورد تقاضای مشتری a از محصول p

Pc_{jp} هزینه تولید محصول p در مرکز تولید j

Sc_{ih} هزینه تامین ماده اولیه h از تامین‌کننده i

Dc_{kp} هزینه توزیع محصول p در مرکز توزیع k

Cc_{mp} هزینه جمع‌آوری محصول p در مرکز جمع‌آوری m

Rc_{np} هزینه بازیافت محصول p در مرکز بازیافت n

Lc_{lp} هزینه انهدام محصول p در مرکز انهدام I

RPc_{jp} هزینه بازتولید محصول p در مرکز تولید j

$Co_{۲v}$ میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید توسط وسیله نقلیه v به ازای یک واحد حرکت بین دو تسهیل

$Co_{۲}^{GOV}$ مقدار مجاز انتشار دی‌اکسید کربن در شبکه زنجیره تامین که دولت تعیین می‌کند.

E_{jg} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز تولید j با سطح ظرفیت g

E_{kg} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g

E_{mg} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g

E_{ng} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g

Pe_{jp} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر تولید محصول p در مرکز تولید j

Ce_{mp} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر جمع‌آوری محصول p در مرکز جمع‌آوری m

Re_{np} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر بازیافت محصول p در مرکز بازیافت n

Le_{lp} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر انهدام محصول p در مرکز انهدام l

RPe_{jp} میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر بازتولید محصول p در مرکز تولید j

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

ϑ	هزینه ثابت انتشار بیش‌ازحد مجاز دی‌اکسید کربن
JOB_{jg}	تعداد فرصت شغلی ایجادشده در اثر احداث مرکز تولید j با سطح ظرفیت g
JOB_{kg}	تعداد فرصت شغلی ایجادشده در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g
JOB_{mg}	تعداد فرصت شغلی ایجادشده در اثر احداث مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g
JOB_{ng}	تعداد فرصت شغلی ایجادشده در اثر احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g
ALD_{jg}	متوسط تعداد روزهای ازدست‌رفته به دلیل آسیب‌دیدگی کاری در اثر احداث مرکز تولید j با سطح ظرفیت g
ALD_{kg}	متوسط تعداد روزهای ازدست‌رفته به دلیل آسیب‌دیدگی کاری در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g
ALD_{mg}	متوسط تعداد روزهای ازدست‌رفته به دلیل آسیب‌دیدگی کاری در اثر احداث مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g
ALD_{ng}	متوسط تعداد روزهای ازدست‌رفته به دلیل آسیب‌دیدگی کاری در اثر احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g
φ_{ALD}	ضریب اهمیت تعداد کل روزهای ازدست‌رفته ناشی از آسیب‌دیدگی در محیط کار
θ_{job}	ضریب اهمیت تعداد فرصت شغلی ایجادشده
Re_{ijh}	قابلیت اطمینان مسیر ارسال ماده اولیه h از تامین‌کننده i به مرکز تولید j
Re_{jkp}	قابلیت اطمینان مسیر ارسال محصول p از مرکز تولید j به مرکز توزیع k
Re_{kap}	قابلیت اطمینان مسیر ارسال محصول p از مرکز توزیع k به مشتری ثابت a

۳-۳ متغیرهای تصمیم‌گیری

Q_{kap}	مقدار محصول p انتقال‌یافته از مرکز توزیع k به مشتری a
Q_{jkp}	مقدار محصول p انتقال‌یافته از مرکز تولید j به مرکز توزیع k
Q_{ijh}	مقدار ماده اولیه h انتقال‌یافته از تامین‌کننده i به مرکز تولید j
Q_{njp}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مرکز بازیافت n به مرکز تولید j
Q_{amp}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مشتری a به مرکز جمع‌آوری m
Q_{mep}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری m به مرکز بازیابی انرژی e
Q_{mnp}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری m به مرکز بازیافت n
Q_{mlp}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری m به مرکز انهدام l
Q_{nlp}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مرکز بازیافت n به مرکز انهدام l
Q_{nbp}	مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته از مرکز بازیافت n به بازار ثانویه b
S_{ap}	کمبود رخ‌داده از محصول p برای مشتری a
U_{jg}	اگر مرکز تولید j با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
U_{kg}	اگر مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
U_{mg}	اگر مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
U_{ng}	اگر مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
Y_{kav}	اگر وسیله نقلیه v از مرکز توزیع k به مشتری a تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
Y_{jkv}	اگر وسیله نقلیه v از مرکز تولید j به مرکز توزیع k تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
Y_{ijv}	اگر وسیله نقلیه v از تامین‌کننده i به مرکز تولید j تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
Y_{njv}	اگر وسیله نقلیه v از مرکز بازیافت n به مرکز تولید j تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

Y_{amv} اگر وسیله نقلیه v از مشتری a به مرکز جمع‌آوری m تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

Y_{mev} اگر وسیله نقلیه v از مرکز جمع‌آوری m به مرکز بازیابی انرژی e تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

Y_{mnv} اگر وسیله نقلیه v از مرکز جمع‌آوری m به مرکز بازیافت n تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

Y_{mlv} اگر وسیله نقلیه v از مرکز جمع‌آوری m به مرکز انهدام l تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

Y_{nlv} اگر وسیله نقلیه v از مرکز بازیافت n به مرکز انهدام l تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

Y_{nbv} اگر وسیله نقلیه v از مرکز بازیافت n به بازار ثانویه b تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

پس از ارایه مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم‌گیری، مدل پیشنهادی غیرقطعی مساله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

۳-٤ مدل پیشنهادی

$$\max Z_1 = \sum_{k\ a\ p}\sum\sum Pr_{ap}Q_{kap} + \sum_{m\ e\ p}\sum\sum Pr_{ep}Q_{mep} + \sum_{n\ b\ p}\sum\sum Pr_{bp}Q_{nbp}$$

$$-\left\{\sum_{j\ g}\sum F_{jg}U_{jg} + \sum_{k\ g}\sum F_{kg}U_{kg} + \sum_{m\ g}\sum F_{mg}U_{mg} + \sum_{n\ g}\sum F_{ng}U_{ng}\right\}$$

$$-\left\{\begin{array}{l}\sum_{i\ j\ v}\sum\sum FC_v Y_{ijv} + \sum_{j\ k\ v}\sum\sum FC_v Y_{jkv} + \sum_{k\ a\ v}\sum\sum FC_v Y_{kav} + \\ \sum_{a\ m\ v}\sum\sum FC_v Y_{amv} + \sum_{m\ l\ v}\sum\sum FC_v Y_{mlv} + \sum_{m\ e\ v}\sum\sum FC_v Y_{mev} + \\ \sum_{m\ n\ v}\sum\sum FC_v Y_{mnv} + \sum_{n\ l\ v}\sum\sum FC_v Y_{nlv} + \sum_{n\ b\ v}\sum\sum FC_v Y_{nbv} + \\ \sum_{n\ j\ v}\sum\sum FC_v Y_{njv}\end{array}\right\}$$

$$-\left\{\begin{array}{l}\sum_{i\ j\ v}\sum\sum FV_v D_{ij} Y_{ijv} + \sum_{j\ k\ v}\sum\sum FV_v D_{jk} Y_{jkv} + \sum_{k\ a\ v}\sum\sum FV_v D_{ka} Y_{kav} + \\ \sum_{a\ m\ v}\sum\sum FV_v D_{am} Y_{amv} + \sum_{m\ l\ v}\sum\sum FV_v D_{ml} Y_{mlv} + \sum_{m\ e\ v}\sum\sum FV_v D_{me} Y_{mev} + \\ \sum_{m\ n\ v}\sum\sum FV_v D_{mn} Y_{mnv} + \sum_{n\ l\ v}\sum\sum FV_v D_{nl} Y_{nlv} + \sum_{n\ b\ v}\sum\sum FV_v D_{nb} Y_{nbv} + \\ \sum_{n\ j\ v}\sum\sum FV_v D_{nj} Y_{njv}\end{array}\right\} \qquad (۱)$$

$$-\left\{\begin{array}{l}\sum_{i\ j\ h}\sum\sum Sc_{ih}Q_{ijh} + \sum_{j\ k\ p}\sum\sum Pc_{jp}Q_{jkp} + \sum_{k\ a\ p}\sum\sum Dc_{kp}Q_{kap} + \\ \sum_{a\ m\ p}\sum\sum Cc_{mp}Q_{amp} + \sum_{m\ n\ p}\sum\sum Rc_{np}Q_{mnp} + \sum_{m\ l\ p}\sum\sum Lc_{lp}Q_{mlp} + \\ \sum_{n\ l\ p}\sum\sum Lc_{lp}Q_{nlp} + \sum_{n\ j\ p}\sum\sum PRc_{jp}Q_{njp}\end{array}\right\}$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$$-\vartheta\left\{\begin{array}{l}\sum_{i}\sum_{j}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{ij}Y_{ijv}+\sum_{j}\sum_{k}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{jk}Y_{jkv}+\sum_{k}\sum_{a}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{ka}Y_{kav}+\\ \sum_{a}\sum_{m}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{am}Y_{amv}+\sum_{m}\sum_{l}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{ml}Y_{mlv}+\sum_{m}\sum_{e}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{me}Y_{mev}+\\ \sum_{m}\sum_{n}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{mn}Y_{mnv}+\sum_{n}\sum_{b}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{nb}Y_{nbv}+\sum_{n}\sum_{l}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{nl}Y_{nlv}+\\ \sum_{n}\sum_{j}\sum_{v}\mathrm{Co}_{v}^{\mathrm{r}}D_{nj}Y_{njv}+\sum_{j}\sum_{g}E_{jg}U_{jg}+\sum_{k}\sum_{g}E_{kg}U_{kg}+\sum_{m}\sum_{g}E_{mg}U_{mg}+\\ \sum_{n}\sum_{g}E_{ng}U_{ng}+\sum_{j}\sum_{k}\sum_{p}\mathrm{Pe}_{jp}Q_{jkp}+\sum_{a}\sum_{m}\sum_{p}\mathrm{Ce}_{mp}Q_{amp}+\sum_{m}\sum_{n}\sum_{p}\mathrm{Re}_{np}Q_{mnp}\\ +\sum_{m}\sum_{l}\sum_{p}\mathrm{Le}_{lp}Q_{mlp}+\sum_{n}\sum_{l}\sum_{p}\mathrm{Le}_{lp}Q_{nlp}+\sum_{n}\sum_{j}\sum_{p}\mathrm{RPe}_{jp}Q_{njp}-\mathbf{Co}_{\mathrm{r}}^{\mathbf{GOV}}\end{array}\right\}$$

$$-\sum_{a}\sum_{p}\pi_{ap}S_{ap}$$

$$\max Z_{\mathrm{r}}=\theta_{job}\left\{\sum_{j}\sum_{g}\mathrm{JOB}_{jg}U_{jg}+\sum_{k}\sum_{g}\mathrm{JOB}_{kg}U_{kg}+\sum_{m}\sum_{g}\mathrm{JOB}_{mg}U_{mg}+\sum_{n}\sum_{g}\mathrm{JOB}_{ng}U_{ng}\right\}$$

$$-\varphi_{\mathrm{ALD}}\left\{\sum_{j}\sum_{g}\mathrm{ALD}_{jg}U_{jg}+\sum_{k}\sum_{g}\mathrm{ALD}_{kg}U_{kg}+\sum_{m}\sum_{g}\mathrm{ALD}_{mg}U_{mg}+\sum_{n}\sum_{g}\mathrm{ALD}_{ng}U_{ng}\right\} \quad (۲)$$

$$\max Z_{\mathrm{r}}=\mathrm{1}-\prod_{i}\prod_{a}\left(\mathrm{1}-\left(\mathrm{1}-\prod_{j}\prod_{k}\prod_{h}\prod_{p}\prod_{v}\left(\mathrm{1}-\left(\begin{array}{c}\mathrm{Re}_{ijh}Y_{ijv}^{*}\\ \mathrm{Re}_{jkp}Y_{jkv}^{*}\\ \mathrm{Re}_{kap}Y_{kav}\end{array}\right)\right)\right)\right) \quad (۳)$$

s. t.:

$$\sum_{k}Q_{kap}+S_{ap}=\mathrm{Dem}_{ap},\qquad \forall a,p \quad (۴)$$

$$\sum_{a}Q_{kap}=\sum_{j}Q_{jkp},\qquad \forall k,p \quad (۵)$$

$$\sum_{i}\sum_{h}O_{hp}Q_{ijh}+\sum_{n}Q_{njp}=\sum_{k}Q_{jkp},\qquad \forall j,p \quad (۶)$$

$$\alpha_{ap}\sum_{k}Q_{kap}=\sum_{m}Q_{amp},\qquad \forall a,p \quad (۷)$$

$$\beta_{mp}\sum_{a}Q_{amp}=\sum_{e}Q_{mep},\qquad \forall m,p \quad (۸)$$

$$\gamma_{mp}\sum_{a}Q_{amp}=\sum_{n}Q_{mnp},\qquad \forall m,p \quad (۹)$$

$$\sum_{a}Q_{amp}=\sum_{l}Q_{mlp}+\sum_{n}Q_{mnp}+\sum_{e}Q_{mep},\qquad \forall m,p \quad (۱۰)$$

$$\delta_{np}\sum_{m}Q_{mnp}=\sum_{l}Q_{nlp},\qquad \forall n,p \quad (۱۱)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$$\sigma_{np}\sum_{m}Q_{mnp}=\sum_{j}Q_{njp},\qquad \forall n,p \tag{۱۲}$$

$$\sum_{m}Q_{mnp}=\sum_{l}Q_{nlp}+\sum_{j}Q_{njp}+\sum_{b}Q_{nbp},\qquad \forall n,p \tag{۱۳}$$

$$\sum_{k}Q_{jkp}\le\sum_{g}CapJ_{jpg}U_{jg},\qquad \forall j,p \tag{۱۴}$$

$$\sum_{a}Q_{kap}\le\sum_{g}CapK_{kpg}U_{kg},\qquad \forall k,p \tag{۱۵}$$

$$\sum_{a}Q_{amp}\le\sum_{g}CapM_{mpg}U_{mg},\qquad \forall m,p \tag{۱۶}$$

$$\sum_{m}Q_{mnp}\le\sum_{g}CapN_{npg}U_{ng},\qquad \forall n,p \tag{۱۷}$$

$$\sum_{j}Q_{ijh}\le CapI_{ih},\qquad \forall i,h \tag{۱۸}$$

$$\sum_{m}Q_{mlp}+\sum_{n}Q_{nlp}\le CapL_{lp},\qquad \forall l,p \tag{۱۹}$$

$$\sum_{g}U_{ng}\le ۱,\qquad \forall n \tag{۲۰}$$

$$\sum_{g}U_{mg}\le ۱,\qquad \forall m \tag{۲۱}$$

$$\sum_{g}U_{jg}\le ۱,\qquad \forall j \tag{۲۲}$$

$$\sum_{g}U_{kg}\le ۱,\qquad \forall k \tag{۲۳}$$

$$\sum_{h}Q_{ijh}w_{h}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{ijv},\qquad \forall i,j,v \tag{۲۴}$$

$$\sum_{p}Q_{jkp}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{jkv},\qquad \forall j,k,v \tag{۲۵}$$

$$\sum_{p}Q_{kap}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{kav},\qquad \forall k,a,v \tag{۲۶}$$

$$\sum_{p}Q_{amp}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{amv},\qquad \forall a,m,v \tag{۲۷}$$

$$\sum_{p}Q_{mlp}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{mlv},\qquad \forall m,l,v \tag{۲۸}$$

$$\sum_{p}Q_{mnp}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{mnv},\qquad \forall m,n,v \tag{۲۹}$$

$$\sum_{p}Q_{mep}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{mev},\qquad \forall m,e,v \tag{۳۰}$$

$$\sum_{p}Q_{nlp}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{nlv},\qquad \forall n,l,v \tag{۳۱}$$

$$\sum_{p}Q_{njp}w_{p}\le\sum_{v}Capw_{v}Y_{njv},\qquad \forall n,j,v \tag{۳۲}$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$$\sum_{p} Q_{nbp} w_p \le \sum_{v} Capw_v Y_{nbv}, \quad \forall n, b, v \tag{۳۳}$$

$$\sum_{h} Q_{ijh} v_h \le \sum_{v} Capv_v Y_{ijv}, \quad \forall i, j, v \tag{۳۴}$$

$$\sum_{p} Q_{jkp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{jkv}, \quad \forall j, k, v \tag{۳۵}$$

$$\sum_{p} Q_{kap} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{kav}, \quad \forall k, a, v \tag{۳۶}$$

$$\sum_{p} Q_{amp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{amv}, \quad \forall a, m, v \tag{۳۷}$$

$$\sum_{p} Q_{mlp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{mlv}, \quad \forall m, l, v \tag{۳۸}$$

$$\sum_{p} Q_{mnp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{mnv}, \quad \forall m, n, v \tag{۳۹}$$

$$\sum_{p} Q_{mep} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{mev}, \quad \forall m, e, v \tag{۴۰}$$

$$\sum_{p} Q_{nlp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{nlv}, \quad \forall n, l, v \tag{۴۱}$$

$$\sum_{p} Q_{njp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{njv}, \quad \forall n, j, v \tag{۴۲}$$

$$\sum_{p} Q_{nbp} v_p \le \sum_{v} Capv_v Y_{nbv}, \quad \forall n, b, v \tag{۴۳}$$

$$Q_{kap}, Q_{jkp}, Q_{ijh}, Q_{njp}, Q_{amp}, Q_{mep}, Q_{mnp}, Q_{mlp}, Q_{nlp}, Q_{nbp}, S_{ap} \ge ۰ \tag{۴۴}$$

$$U_{jg}, U_{kg}, U_{mg}, U_{ng}, Y_{kav}, Y_{jkv}, Y_{ijv}, Y_{njv}, Y_{amv}, Y_{mev}, Y_{mnv}, Y_{mlv}, Y_{nlv}, Y_{nbv} \in \{۰, ۱\} \tag{۴۵}$$

رابطه (۱) مقدار تابع هدف اول مساله را نشان می‌دهد و شامل بیشینه‌سازی سود حاصل از طراحی شبکه زنجیره تامین می‌باشد. در این رابطه درآمد حاصل از شبکه شامل فروش محصولات بیو زیستی در بازار اولیه، فروش محصولات بیو زیستی باکیفیت پایین‌تر در بازار ثانویه و تولید انرژی از محصولات بیو زیستی باکیفیت پایین‌تر و فروش آن می‌باشد. هزینه‌های شبکه زنجیره تامین نیز شامل، هزینه‌های ثابت احداث، هزینه‌های ثابت و متغیر به‌کارگیری وسیله نقلیه، هزینه‌های تولید مازاد کربن دی‌اکسید از مقدار مجاز، هزینه‌های عملیاتی تولید محصولات فراوری‌شده بیو زیستی می‌باشد. رابطه (۲) مقدار تابع هدف دوم مساله را نشان می‌دهد و شامل بیشینه‌سازی تعداد شغل‌های ایجادشده در اثر تاسیس مراکز بالقوه جدید می‌باشد. در این رابطه نیز متوسط تعداد روزهای ازدست‌رفته به دلیل آسیب‌دیدگی کاری نیز لحاظ شده است. رابطه (۳) مقدار تابع هدف سوم مساله را نشان می‌دهد و شامل بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان مسیر انتقال فراورده‌های زیست‌توده از سمت تامین‌کننده مواد اولیه به سمت مشتریان بازار دست‌اول می‌باشد. رابطه (۴)، نحوه تامین تقاضای مشتریان بازار دست‌اول را با لحاظ کردن کمبود نشان می‌دهد. رابطه (۵) رابطه تعادل در توزیع محصولات فراوری‌شده زیست‌توده از مرکز تولید به مشتریان نهایی می‌باشد. رابطه (۶) مقدار و نحوه تولید محصولات فراوری‌شده بیو زیستی را از مواد زیست‌توده

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

تامین‌شده نشان می‌دهد. رابطه (۷) کسری از مواد بیو زیستی که توسط مشتری دورریز شده و دارای کیفیت پایین‌تر می‌باشد را محاسبه می‌کند. رابطه (۸) کسری از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل‌تبدیل شده به انرژی و فروش هستند را نشان می‌دهد. رابطه (۹) کسری از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل‌تولید مجدد و یا فروش هستند را نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) رابطه تعادلی در نحوه جمع‌آوری محصولات بیو زیستی دورریز شده توسط مشتری را در مرکز جمع‌آوری نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) کسری از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل‌استفاده به‌هیچ‌عنوان نیستند و بایستی انهدام و یا دفن شوند را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) درصدی از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل‌فروش مجدد و بازتولید در مرکز تولید هستند را نشان می‌دهد. رابطه (۱۳) رابطه تعادلی در مرکز بازیافت را نشان می‌دهد. روابط (۱۴) تا (۱۹) روابط مربوط به ظرفیت تسهیلات بالقوه و ثابت را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که درصورتی‌که مرکز بالقوه با یک سطح ظرفیت خاص انتخاب شود، سطح ظرفیت مربوط به آن نیز بایستی تامین گردد. روابط (۲۰) تا (۲۳) تضمین می‌کند که حداکثر از یک سطح ظرفیت مراکز بالقوه می‌توان استفاده نمود. روابط (۲۴) تا (۳۳) معادلات مربوط به انتخاب وسیله نقلیه غیر همگن را بر اساس وزن مواد اولیه زیست‌توده و محصولات فراوری‌شده بیو زیستی نشان می‌دهد. روابط (۳۴) تا (۴۳) معادلات مربوط به انتخاب وسیله نقلیه غیر همگن را بر اساس حجم مواد اولیه زیست‌توده و محصولات فراوری‌شده بیو زیستی نشان می‌دهد. روابط (۴۴) و (۴۵) نوع و جنس متغیرهای تصمیم‌گیری مساله را نشان می‌دهد.

۳-۵ روش برنامه‌ریزی فازی احتمالی بر روی اعداد غیرقطعی

فرض کنید پارامتر a_{ij} یک پارامتر غیرقطعی می‌باشد که به‌صورت احتمالی در نظر گرفته‌شده که دارای میانگین μ_{ij} و انحراف معیار σ_{ij} می‌باشد. همچنین تصور می‌شود که همه پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته‌شده به‌صورت مستقل از هم می‌باشند؛ لذا میانگین و انحراف معیار تخمین زده‌شده برای مجموعه اعداد تصادفی احتمالی به‌صورت زیر قابل‌بیان است [۳۹]:

$$S_{ij} = \{x_k \mid x_k \in \text{assumed dustribution}; k = ۱,\ldots,N\} \quad (۴۶)$$

که در رابطه فوق x_k مقدار داده تصادفی احتمالی تولیدشده است. N تعداد کافی از مجموعه‌های تصادفی بیان‌شده است که همه شرایط لازم برای تولید داده تصادفی احتمالی را در بر گیرد. همچنین برای تخمین دقیق داده‌های احتمالی در نظر گرفته‌شده، ضریب محدودیت فازی اعداد $T = \tilde{A} = \left(A^-, A^o, A^+\right)$ در نظر گرفته‌شده است.درنتیجه تابع توزیع فازی مثلثی به‌صورت زیر می‌باشد.

A^o قابل‌اطمینان‌ترین ارزش که به اعداد فازی تخصیص‌یافته است و زمانی که مقدار ارزش ۱ به آن تخصیص یابد به‌عنوان میانگین تابع توزیع تصادفی S_{ij} شناخته می‌شود

$$A^o = \frac{\sum_{i=۱}^{N} X_i}{N}$$

A^- به‌عنوان حداقل مقدار تابع تصادفی S_{ij} شناخته می‌شود

$$A^- = \inf_{i=۱,\ldots,N} \left(X_i\right)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

A^+ به‌عنوان حداکثر مقدار تابع تصادفی S_{ij} شناخته می‌شود $A^+ = \sup_{i=1,\dots,N}(X_i)$

در نتیجه با توجه به روابط فوق بیان‌شده برای کنترل پارامتر احتمالی a_{ij} با میانگین μ_{ij} و انحراف معیار σ_{ij} از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} &\max C^T X \\ &\text{s.t.} \\ &\frac{A^- + 4A^o + A^+}{6} X \le b \\ &x > 0 \end{aligned} \qquad (47)$$

۳-۶ روش برنامه‌ریزی استوار احتمالی بر روی اعداد غیرقطعی

مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} &\min E = cx + fy \\ &\text{s.t.} \\ &Ax \ge_f d \\ &Bx = 0 \\ &Sx \le_f Ny \\ &Ty \le 1 \\ &y \in \{0,1\}, x \ge 0 \end{aligned} \qquad (48)$$

در رابطه فوق، هزینه ثابت احداث مراکز f و هزینه‌های متغیر حمل‌ونقل و عملیاتی با c در نظر گرفته‌شده است. همچنین پارامترهای مربوط به ضرایب محدودیت با S، B، A و T در نظر گرفته‌شده است. N و d نیز به ترتیب ظرفیت تسهیلات و تقاضای مشتری از محصولات را نشان می‌دهد. x و y نیز به ترتیب متغیرهای پیوسته و صفر و یک را نشان می‌دهد. در روابط فوق پارامترهای ظرفیت و تقاضا فرض شده است که به‌صورت غیرقطعی و احتمالی فازی در نظر گرفته‌شده باشد. لذا محدودیت مربوط به کنترل پارامترهای احتمالی فازی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} &\min E = cx + fy \\ &\text{s.t.} \\ &Ax \ge d - \tilde{t}(1-\alpha) \\ &Bx = 0 \\ &Sx \le Ny + \left[\tilde{r}(1-\beta)\right] y \\ &Ty \le 1 \\ &y \in \{0,1\}, x \ge 0 \end{aligned} \qquad (49)$$

دو عدد فازی $\tilde{t}$ و $\tilde{r}$ برای نشان دادن چگونگی مقابله با محدودیت‌های نرم تعریف‌شده است. در رابطه فوق α و β حداقل شاخص سطح رضایت از محدودیت‌های انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد. همچنین فرض می‌شود که $\tilde{t}$ و $\tilde{r}$ به‌صورت داده‌های فازی مثلثی در نظر گرفته‌شده است که به‌صورت داده‌های فازی مثلثی

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$\tilde{t}=(t^p,t^m,t^o)$ و $\tilde{r}=(r^p,r^m,r^o)$ نشان داده می‌شود. همچنین از آنجایی که α و β پارامترهایی مابین صفر و یک هستند؛ کران هر یک از پارامترها به‌صورت $0\le\alpha,\beta\le 1$ می‌باشد.

برای تضمین اینکه پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته‌شده، در منطقه موجه مساله قرار بگیرد، نیاز است تا با استفاده از روش برنامه‌ریز استوار انعطاف‌پذیر، کنترل شود. بدین ترتیب که درصورتی‌که پارامترهای تقاضا و ظرفیت منجر به غیرموجه شدن مساله شوند، تابع جریمه در نظر گرفته‌شده، مانع از انجام این کار می‌گردد. لذا پارامترهای غیرقطعی احتمالی فازی موجود در محدودیت‌های مساله با در نظر گرفتن تابع جریمه به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned}
&\min E = cx + fy + \theta\left[t(1-\alpha)\right] + \lambda\left[r(1-\beta)\right]y \\
&\text{s.t.} \\
&Ax \ge d - \tilde{t}(1-\alpha) \\
&Bx = 0 \\
&Sx \le Ny + \left[\tilde{r}(1-\beta)\right]y \\
&Ty \le 1 \\
&y \in \{0,1\}, x \ge 0
\end{aligned} \tag{50}$$

λ و θ توابع جریمه مربوط به موجه سازی مدل استوار احتمالی است. مدل نهایی کنترل‌شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
\max Z_1 = {} & \sum_k\sum_a\sum_p Pr_{ap}Q_{kap} + \sum_m\sum_e\sum_p Pr_{ep}Q_{mep} + \sum_n\sum_b\sum_p Pr_{bp}Q_{nbp} \\
& - \left\{ \sum_j\sum_g F_{jg}U_{jg} + \sum_k\sum_g F_{kg}U_{kg} + \sum_m\sum_g F_{mg}U_{mg} + \sum_n\sum_g F_{ng}U_{ng} \right\} \\
& - \left\{ \begin{array}{l}
\sum_i\sum_j\sum_v FC_v Y_{ijv} + \sum_j\sum_k\sum_v FC_v Y_{jkv} + \sum_k\sum_a\sum_v FC_v Y_{kav} + \\
\sum_a\sum_m\sum_v FC_v Y_{amv} + \sum_m\sum_l\sum_v FC_v Y_{mlv} + \sum_m\sum_e\sum_v FC_v Y_{mev} + \\
\sum_m\sum_n\sum_v FC_v Y_{mnv} + \sum_n\sum_l\sum_v FC_v Y_{nlv} + \sum_n\sum_b\sum_v FC_v Y_{nbv} + \\
\sum_n\sum_j\sum_v FC_v Y_{njv}
\end{array} \right\}
\end{aligned} \tag{51}$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$$
-\left\{\begin{array}{l}
\sum_{i}\sum_{j}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{ij}Y_{ijv} + \sum_{j}\sum_{k}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{jk}Y_{jkv} + \\
\sum_{m}\sum_{e}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{me}Y_{mev} + \sum_{k}\sum_{a}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{ka}Y_{kav} + \\
\sum_{a}\sum_{m}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{am}Y_{amv} + \sum_{m}\sum_{l}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{ml}Y_{mlv} + \\
\sum_{n}\sum_{b}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{nb}Y_{nbv} + \sum_{n}\sum_{j}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{nj}Y_{njv} + \\
\sum_{m}\sum_{n}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{mn}Y_{mnv} + \sum_{n}\sum_{l}\sum_{v}\left(\frac{Fv_v^- + 4Fv_v^o + Fv_v^+}{6}\right)D_{nl}Y_{nlv}
\end{array}\right\}
$$

$$
-\left\{\begin{array}{l}
\sum_{i}\sum_{j}\sum_{h}\left(\frac{Sc_{ih}^- + 4Sc_{ih}^o + Sc_{ih}^+}{6}\right)Q_{ijh} + \sum_{j}\sum_{k}\sum_{p}\left(\frac{Pc_{jp}^- + 4Pc_{jp}^o + Pc_{jp}^+}{6}\right)Q_{jkp} + \\
\sum_{a}\sum_{m}\sum_{p}\left(\frac{Cc_{mp}^- + 4Cc_{mp}^o + Cc_{mp}^+}{6}\right)Q_{amp} + \sum_{m}\sum_{n}\sum_{p}\left(\frac{Rc_{np}^- + 4Rc_{np}^o + Rc_{np}^+}{6}\right)Q_{mnp} + \\
\sum_{m}\sum_{l}\sum_{p}\left(\frac{Lc_{lp}^- + 4Lc_{lp}^o + Lc_{lp}^+}{6}\right)Q_{mlp} + \sum_{k}\sum_{a}\sum_{p}\left(\frac{Dc_{kp}^- + 4Dc_{kp}^o + Dc_{kp}^+}{6}\right)Q_{kap} + \\
\sum_{n}\sum_{l}\sum_{p}\left(\frac{Lc_{lp}^- + 4Lc_{lp}^o + Lc_{lp}^+}{6}\right)Q_{nlp} + \sum_{n}\sum_{j}\sum_{p}\left(\frac{Prc_{jp}^- + 4Prc_{jp}^o + Prc_{jp}^+}{6}\right)Q_{njp}
\end{array}\right\}
$$

$$
-\vartheta\left\{\begin{array}{l}
\sum_{i}\sum_{j}\sum_{v}Co2_v D_{ij}Y_{ijv} + \sum_{j}\sum_{k}\sum_{v}Co2_v D_{jk}Y_{jkv} + \sum_{k}\sum_{a}\sum_{v}Co2_v D_{ka}Y_{kav} + \\
\sum_{a}\sum_{m}\sum_{v}Co2_v D_{am}Y_{amv} + \sum_{m}\sum_{l}\sum_{v}Co2_v D_{ml}Y_{mlv} + \sum_{m}\sum_{e}\sum_{v}Co2_v D_{me}Y_{mev} + \\
\sum_{m}\sum_{n}\sum_{v}Co2_v D_{mn}Y_{mnv} + \sum_{n}\sum_{b}\sum_{v}Co2_v D_{nb}Y_{nbv} + \sum_{n}\sum_{l}\sum_{v}Co2_v D_{nl}Y_{nlv} + \\
\sum_{n}\sum_{j}\sum_{v}Co2_v D_{nj}Y_{njv} + \sum_{j}\sum_{g}E_{jg}U_{jg} + \sum_{k}\sum_{g}E_{kg}U_{kg} + \sum_{m}\sum_{g}E_{mg}U_{mg} + \\
\sum_{n}\sum_{g}E_{ng}U_{ng} + \sum_{j}\sum_{k}\sum_{p}Pe_{jp}Q_{jkp} + \sum_{a}\sum_{m}\sum_{p}Ce_{mp}Q_{amp} + \sum_{m}\sum_{n}\sum_{p}Re_{np}Q_{mnp} \\
+\sum_{m}\sum_{l}\sum_{p}Le_{lp}Q_{mlp} + \sum_{n}\sum_{l}\sum_{p}Le_{lp}Q_{nlp} + \sum_{n}\sum_{j}\sum_{p}RPe_{jp}Q_{njp} - \mathbf{Co_2^{GOV}}
\end{array}\right\}
$$

$$
-\sum_{a}\sum_{p}\pi_{ap}S_{ap} - \sum_{a}\sum_{p}\theta\left[Dem_{ap}^+(1-\alpha_1)\right] - \sum_{i}\sum_{h}\lambda\left[CapI_{ih}^-(1-\beta_1)\right]
$$

$$
\max Z_2 = \theta_{job}\left\{\sum_{j}\sum_{g}JOB_{jg}U_{jg} + \sum_{k}\sum_{g}JOB_{kg}U_{kg} + \sum_{m}\sum_{g}JOB_{mg}U_{mg} + \sum_{n}\sum_{g}JOB_{ng}U_{ng}\right\} \qquad (52)
$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$$-\varphi_{ALD}\left\{\sum_{j}\sum_{g}ALD_{jg}U_{jg}+\sum_{k}\sum_{g}ALD_{kg}U_{kg}+\sum_{m}\sum_{g}ALD_{mg}U_{mg}+\sum_{n}\sum_{g}ALD_{ng}U_{ng}\right\}$$

$$\max Z_{۳}=۱-\prod_{i}\prod_{a}\left(۱-\left(۱-\prod_{j}\prod_{k}\prod_{h}\prod_{p}\prod_{v}\left(۱-\begin{pmatrix}Re_{ijh}Y_{ijv}^{*}\\Re_{jkp}Y_{jkv}^{*}\\Re_{kap}Y_{kav}\end{pmatrix}\right)\right)\right) \quad (۵۳)$$

s.t.

$$\sum_{k}Q_{kap}+S_{ap}=\left(Dem_{ap}^{o}+\left[Dem_{ap}^{+}\left(۱-\alpha۱\right)\right]\right),\qquad \forall a,p \quad (۵۴)$$

$$\sum_{j}Q_{ijh}\le\left(CapI_{ih}^{o}+\left[CapI_{ih}^{-}\left(۱-\beta۱\right)\right]\right),\qquad \forall i,h \quad (۵۵)$$

(۵۶) معادله (۱۷)-(۵) و (۴۵)-(۱۹)

٤ روش حل

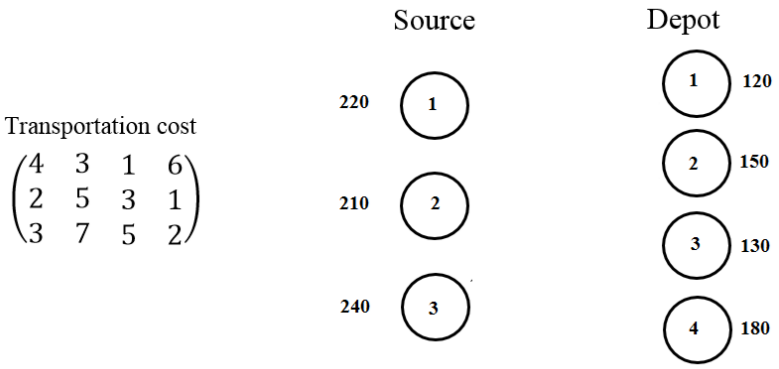
٤-١ طراحی کروموزوم اولیه برای حل مساله

NP-Hard بودن مدل‌های شبکه زنجیره تامین در بسیاری از مقالات نشان داده شده است. با توجه به اینکه مدل شبکه زنجیره تامین زیست توده طراحی‌شده شامل دو مساله مکان یابی تسهیلات ظرفیت دار و بهینه‌سازی جریان می‌باشد [۴۰] ازاین‌رو پیچیدگی مدل قابلیت کاهش به پیچیدگی مساله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت را دارد. از سوی دیگر Np-Hard بودن مسایل مکان یابی تسهیلات ظرفیت‌دار در مقالات مختلف اثبات شده است [۴۱] در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبکه زنجیره تامین زیست‌توده طراحی‌شده NP-Hard است. مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه از شایع‌ترین مدل‌های ریاضی هستند که دارای اهداف متضاد و متناقضی هستند[۴۲] و برای حل این مساله از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه MOPSO، NSGA II و MOGWO استفاده‌شده است. ازاین‌رو برای استفاده از این سه الگوریتم نیاز به طراحی کروموزوم اولیه که در هر یک از الگوریتم‌ها یکسان می‌باشد، هست.

کروموزوم اولیه به رمزگذاری مبتنی بر اولویت مشهور است که توسط جن و همکاران [۴۳]معرفی‌شده است. در این رمزگذاری شبکه زنجیره تامین به سطوح تشکیل‌دهنده آن تقسیم‌شده و هر سطح متناسب با ظرفیت، تقاضا، نوع وسیله نقلیه و غیره در طراحی کروموزوم اولیه در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲ نمونه‌ای از شبکه زنجیره تامین دو سطحی را با سه منبع و ۴ دپو نشان می‌دهد. در این شکل مکان یابی بر روی منابع صورت گرفته و منابع بایستی تقاضاهای دپو را برآورد کنند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]



شکل ۲. نمونه ای از شبکه زنجیره تامین دو سطحی

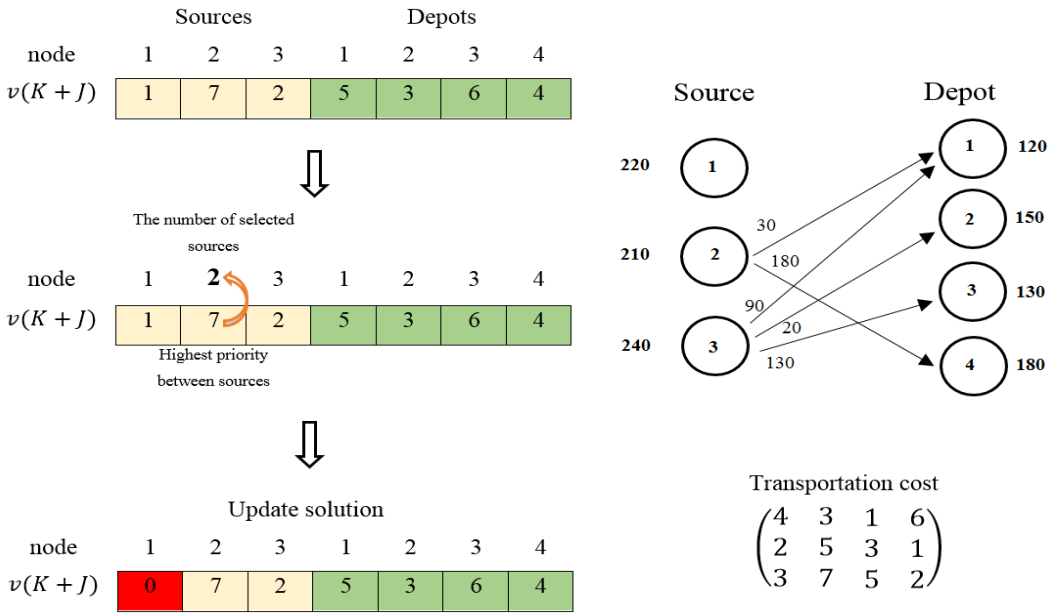
شکل ۳ نمونه ای کروموزوم اولیه و رمز گشایی آن را نشان می‌دهد. رمز گشایی مبتنی بر اولویت اصلاح شده در شکل ۳ مطابق با ۴ گام زیر می‌باشد:

گام ۱– ابتدا بزرگ‌ترین اولویت (عدد) از بین کروموزوم مربوط به منابع انتخاب می‌شود. در صورتی که منبع قادر به تامین کل دپوها باشد، اولویت بقیه منابع به صفر کاهش می‌یابد. در این صورت مکان یابی بر روی منابعی که دارای اولویت صفر نیستند انجام می‌پذیرد.

گام ۲– بزرگ‌ترین اولویت (عدد) از بین کل کروموزوم به عنوان اولین سطح تخصیص انتخاب می‌شود.

گام ۳– بر اساس هزینه حمل و نقل، کمترین هزینه حمل و نقل از سطح تخصیص انتخاب شده از گام (۲)، (منبع / دپو) با سطح قابل تخصیص جدید (دپو / منبع)، برآورد شده و دومین سطح تخصیص مشخص می‌شود.

گام ٤– بعد از تعیین منبع و دپو، حداقل مقدار تقاضای دپو و ظرفیت منبع به‌عنوان مقدار بهینه تخصیص، در نظر گرفته می‌شود. پس از انجام عمل تخصیص، مقدار تقاضای دپو و همچنین ظرفیت منبع به‌روزرسانی می‌شود.



شکل ۳. نحوه رمز گذاری و رمز گشایی مبتنی بر اولویت اصلاح شده

در شکل ۴ شبه کد رمز گشایی مبتنی بر اولویت در یک شبکه زنجیره تامین دو سطحی نشان داده شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

Inputs:

K: Set of sources

J: Set of depots

P: Set of Product

Dem_{jp}: Demand on depot j of product p

Cap_k: Capacity of source k

Tr_{kj}: Transportation cost of one unit of product from source k to depot j

$v(K+J)$: Encoded solution

X_{kjp}: Quantity of shipment between source k and depot j

S_{jp}: Shortage of depot j of product p

Y_k: Opening of a center at location k

Step۱. For $p = ۱$ to P

Select a node on $l = \arg\max\{v(k), \quad \forall k \in K\}$, so $\sum_k Y_k = 1$

Step۲. While $|\{d\}| < 1$

Select a node on $d = \arg\max\{v(k), k \in K\}$

If $|\{d\}| = 1$ then $v(k-l) = ۰, \quad \forall k \in K, l \in L$

$Tr_{(k-l)j} = \inf, \quad \forall j \in |J|, k \in K, l \in L$

$Cap_{(k-l)} = ۰, \quad \forall k \in K, l \in L$

Step۳. While $v(|k| + j) \neq ۰, \forall j \in J$

Step۴. $X_{kjp} = ۰, \; S_{jp} = ۰, \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P$

Step۵. Select a node based on $l = \arg\max\{v(p), \quad p \in |K| + |J|\}, \; \forall j \in J, k \in K$

Step۶. If $l \in k$ a source is selected $k^* = l$

Then $j^* = \arg\min\{Tr_{kj} \mid v(j) \neq ۰\}, \; \forall j \in J$ select a depot with minimum cost

Else $l \in j$ a depot is selected $j^* = l$

Then $k^* = \arg\min\{Tr_{kj} \mid v(k) \neq ۰\}, \; \forall k \in K$ select a source with minimum cost

Step۷. Update demands and capacities

$$X_{k^*j^*p} = \min\left(Cap_{k^*}, Dem_{j^*p} + S_{j^*p}\right)$$

$$Cap_{k^*} = Cap_{k^*} - X_{k^*j^*p}$$

$$Dem_{j^*p} = Dem_{j^*p} + S_{j^*p} - X_{k^*j^*p}$$

Step۸. If $Cap_{k^*} = ۰$ then $v(k^*) = ۰$

If $Dem_{j^*p} = ۰$ then $v(j^*) = ۰$

Step۹. If $\sum_{j,p} X_{kjp} > ۰$ then $Y_k = ۱$

شکل ٤. شبه کد رمز گشایی مبتنی بر اولویت در یک شبکه زنجیره تامین دو سطحی

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

با توجه به ۱۰ سطحی بودن شبکه زنجیره تامین زیست‌توده طراحی شده، کروموزوم نهایی طراحی‌شده به شرح شکل ۵ می‌باشد. از آنجایی که مساله به‌صورت چند محصولی در نظر گرفته شده است. لذا به ازای هر محصول بایستی یک کروموزوم نهایی از شکل ۵ تولید و مطابق با شبه کد ارایه‌شده در شکل ۴ رمز گشایی گردد.

Product (P)

Nodes	I J	J K	K A	A M	M L
Priority	$v(\|I\|+\|J\|)$	$v(\|J\|+\|K\|)$	$v(\|K\|+\|A\|)$	$v(\|A\|+\|M\|)$	$v(\|M\|+\|L\|)$

Nodes	M N	M E	N L	N J	N B
Priority	$v(\|M\|+\|N\|)$	$v(\|M\|+\|E\|)$	$v(\|N\|+\|L\|)$	$v(\|N\|+\|J\|)$	$v(\|N\|+\|B\|)$

شکل ۵. کروموزوم نهایی طراحی شده برای شبکه زنجیره تامین زیست‌توده

درنهایت با توجه به پیوسته بودن فضای جستجوی الگوریتم‌ها و همچنین گسسته بودن کروموزم طراحی شده؛ با استفاده از شکل ۶، فضای پیوسته کروموزوم به فضای گسسته تبدیل می‌شود. در این شکل بزرگترین عدد در کروموزم پیوسته مشخص شده و شماره خانه مربوط به آن به عنوان اولین اولویت کروموزوم گسسته انتخاب می‌شود.

Node	1	2	3	4	5	6
Random number in continuous space	0.94	1.19	0.17	5.98	4.16	4.27

Sort of biggest to smaller

Priority in discrete space	4	6	5	2	1	3
Random number in continuous space	5.98	4.27	4.16	1.19	0.94	0.7

شکل ٦. نحوه تبدیل فضای پیوسته به فضای گسسته

٤-۲ شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه

با توجه به حل مساله توسط الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II و MOGWO، جهت بررسی کارایی این الگوریتم‌ها و مقایسه بین نتایج به‌دست آمده از آنها، شاخص‌های زیر تعریف شده است [۴۴].

میانگین‌های توابع هدف: ازآنجایی‌که هدف اصلی کسب جواب‌های کارای مطلوب می‌باشد، یعنی به‌طور هم‌زمان به بهترین مقدار سه تابع هدف نائل شدن؛ ازاین‌رو میانگین‌های سه تابع هدف مساله نیز جزو شاخص‌های محاسباتی به کار می‌رود. ازآنجایی‌که مقادیر توابع هدف از نوع بیشینه‌سازی می‌باشد. بیشتر بودن میانگین‌های توابع هدف، نتیجه کارایی بالای الگوریتم می‌باشد.

زمان محاسباتی: الگوریتمی که زمان محاسبات کمتری داشته باشد، مطلوب‌تر خواهد بود.

تعداد جواب‌های کارا: تعداد جواب‌های نامغلوب در مجموعه پارتو به‌دست‌آمده برای هر مساله را نشان می‌دهد و هر مقدار تعداد این نقاط بیشتر باشد بدین معنی است که الگوریتم کارایی بیشتری دارد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

بیش‌ترین گسترش: این معیار نشان می‌دهد که چه میزان از جواب‌های یک مجموعه پارتو در فضای جواب توزیع‌شده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. بزرگ‌تر بودن مقدار این معیار، نشان‌دهنده تنوع مناسب جواب‌های مجموعه پارتو است.

$$MSI = \sqrt{\sum_{m=1}^{M}\left(\max_{i=1:|Q|} f_m^i - \max_{i=1:|Q|} f_m^i\right)^2} \quad (57)$$

فاصله‌گذاری: نشان‌دهنده میزان قرار گرفتن جواب‌ها به‌طور یکنواخت در کنار هم بوده که از رابطه (۵۸) محاسبه می‌شود.

$$SM = \sqrt{\frac{1}{|Q|}\sum_{i=1}^{|Q|}\left(d_i - \bar{d}\right)^2} \quad (58)$$

در رابطه بالا، $|Q|$ بیانگر اندازه آرشیو پارتو می‌باشد و مقدار $\bar{d}$ را می‌توان از رابطه (۵۹) محاسبه کرد. الگوریتمی که میزان این معیار کمتر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود.

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{|Q|}\frac{\min_{k\in Q\cap k\neq i}\sum_{m=1}^{M}\left|f_m^i - f_m^k\right|}{|Q|} \quad (59)$$

فاصله از نقطه ایده‌ال: این معیار که برای اندازه‌گیری میزان نزدیکی به سطح بهینه پارتو واقعی، به کار می‌رود که از رابطه (۶۰) محاسبه می‌شود. الگوریتمی که کمترین مقدار این شاخص را داشته باشد، کارایی بالاتری دارد.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(f_{1i} - f_1^*)^2 + (f_{2i} - f_2^*)^2 + \ldots + (f_{mi} - f_m^*)^2}}{n} \quad (60)$$

در این رابطه n تعدادجواب‌ها در مجموعه بهینه پارتو است.

۳-٤ تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری

در این بخش به تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی در حل مدل چندهدفه شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار با استفاده از روش تاگوچی پرداخته شده است. در این روش برای هر پارامتر الگوریتم فراابتکاری، سه سطح پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود و بر اساس جدول تاگوچی، آزمایشات مربوطه با استفاده از روابط (۶۱) و (۶۲) انجام می‌پذیرد. نتایج آزمایشات پس از تجزیه و تحلیل بهترین مقدار پارامتر الگوریتم مذکور را نشان می‌دهد. [۴۵] در رابطه (۶۱)، S_i مقدار شاخص به‌دست آمده از انجام هر آزمایش تاگوچی و S_i^* بهترین مقدار شاخص در بین کلیه آزمایش‌های تاگوچی می‌باشد.

$$S_i = \left|\frac{NPF + MSI + SM + MID + CPU_time}{5}\right| \quad (61)$$

$$RPD = \frac{S_i - S_i^*}{S_i^*} \quad (62)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

جدول (۱) سطوح پیشنهاد و بهینه پارامتر الگوریتم‌های NSGA II، MOPSO و MOGWO را نشان میدهد.

جدول ۱. سطوح پارامتر پیشنهادی برای تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری به روش تاگوچی

الگوریتم	پارامتر	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح بهینه
MOGWO	تعداد جمعیت	N Wolf	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰
	حداکثر تعداد تکرار	Max it	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۲۰۰
	نرخ ترکیب	A	۱	۲	۴	۴
	نرخ جهش	C	۱	۲	۴	۱
NSGA II	حداکثر تعداد تکرار	Max it	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰
	تعداد جمعیت	N pop	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۲۰۰
	نرخ ترکیب	Pc	۰/۱	۰.۳	۰/۵	۰/۵
	نرخ جهش	Pm	۰/۱	۰.۳	۰/۵	۰/۱
MOPSO	حداکثر تعداد تکرار	Max it	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰
	تعداد ذرات	Nparticle	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۲۰۰
	ضریب یاگیری فردی	C1	۱	۱.۵	۲	۲
	ضریب یادگیری جمعی	C2	۱	۱.۵	۲	۲
	ضریب گرانشی	W	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۵

۵ نتایج محاسباتی

۵-۱ حل مساله نمونه در سایز کوچک با نرم‌افزار GAMS

در این بخش از مقاله برای نشان دادن خروجی‌های حاصل از مساله شامل مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص بهینه جریان، یک مساله نمونه در سایز کوچک متناسب با اندازه مسایل ارایه‌شده در جدول ۲ طراحی‌شده است. همچنین با توجه به توسعه‌ای بودن مدل شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار و همچنین عدم دسترسی به داده‌های واقعی مساله، از داده‌های تصادفی بر اساس توزیع یکنواخت متناسب با جدول ۳ استفاده‌شده است.

جدول ۲. اندازه مساله نمونه در سایز کوچک

مجموعه	A	K	J	M	E	B	H	V	P	L	N	I	G
تعداد	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۳

جدول ۳ مقدار پارامترهای قطعی و غیرقطعی مساله از تابع توزیع فازی ذوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. کلیه پارامترهای تولیدشده در جداول ۳ به‌صورت تصادفی و بر اساس توزیع یکنواخت صورت پذیرفته است.

جدول ۳. حدود بازه‌ای پارامترهای مساله بر اساس توزیع یکنواخت

پارامتر	حدود بازه‌ای	پارامتر	حدود بازه‌ای
O_{hp}	(۱ ، ۲)~U	w_h	(۰/۰۳ ، ۰/۰۵)~U
α_{ap}	(۰/۱ ، ۰/۲)~U	w_p	(۰/۰۸ ، ۰/۱)~U
β_{mp}, γ_{mp}	(۰/۳ ، ۰/۴)~U	v_h	(۰/۳ ، ۰/۵)~U
δ_{np}, σ_{np}	(۰/۲ ، ۰/۳)~U	v_p	(۰/۵ ، ۰/۸)~U
$Pr_{ap}, Pr_{ep}, Pr_{bp}, CapL_{lp}$	(۱۰۰۰ ، ۱۲۰۰)~U	$F_{jg}, F_{kg}, F_{mg}, F_{ng}$	(۱۰۰۰۰ ، ۱۲۰۰۰۰)~U

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

$CapJ_{jpg}, CapK_{kpg}$	(۵۰۰۰ ، ۶۰۰۰)~U	FC_v	(۱۰۰۰ ، ۱۲۰۰)~U
$CapM_{mpg}, CapN_{npg}$	(۲۰۰۰ ، ۳۰۰۰)~U	$D_{ka}, D_{jk}, D_{ij}, D_{nj}, D_{am}$	(۱۰ ، ۱۰۰)~U
$Capw_v, Capv_v$	(۵۰۰ ، ۷۰۰)~U	$D_{me}, D_{mn}, D_{ml}, D_{nl}, D_{nb}$	(۱۰ ، ۱۰۰)~U
π_{ap}	(۵۰ ، ۸۰)~U	$Co۲_v$	(۵ ، ۸)~U
$Co_۲^{GOV}$	۱۰۰۰۰	$E_{jg}, E_{kg}, E_{mg}, E_{ng}$	(۵۰ ، ۱۰۰)~U
$Pe_{jp}, Ce_{mp}, Re_{np}$	(۱ ، ۳)~U	ϑ	۰.۵
Le_{lp}, RPe_{jp}	(۱ ، ۳)~U	$\varphi_{ALD}, \theta_{job}$	۱
$JOB_{jg}, JOB_{kg}, JOB_{mg}, JOB_{ng}$	(۵۰۰ ، ۱۰۰۰)~U	$Re_{ijh}, Re_{jkp}, Re_{kap}$	(۰/۱ ، ۰/۴)~U
$ALD_{jg}, ALD_{kg}, ALD_{mg}, ALD_{ng}$	(۱۰ ، ۲۰)~U		

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Dem_{ap}	(۱۰۰۰ ، ۱۵۰۰)~U	(۱۵۰۰ ، ۲۰۰۰)~U	(۲۰۰۰ ، ۳۰۰۰)~U
$CapI_{ih}$	(۶۰۰۰ ، ۷۰۰۰)~U	(۷۰۰۰ ، ۸۰۰۰)~U	(۸۰۰۰ ، ۹۰۰۰)~U
FV_v	(۵ ، ۷)~U	(۷ ، ۸)~U	(۸ ، ۱۰)~U
$Rc_{np}, Lc_{lp}, RPc_{jp}$	(۱ ، ۲)~U	(۲ ، ۳)~U	(۳ ، ۴)~U
$Pc_{jp}, Sc_{ih}, Dc_{kp}, Cc_{mp}$	(۱ ، ۲)~U	(۲ ، ۳)~U	(۳ ، ۴)~U

پس از تولید اعداد تصادفی و طراحی مساله نمونه سایز کوچک، در ادامه برای حل مساله شبکه زنجیره تامین ۳ هدفه با نرم‌افزار GAMS از روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع نرم ۱ استفاده‌شده است. ازاین‌رو مقدار بهینه تابع هدف اول ۱۸۸۳۸۶۹۰، مقدار بهینه تابع هدف دوم ۹۸۸۳ و مقدار بهینه تابع هدف سوم ۱ به‌دست آمده است. در نتیجه با عمال وزن یکسان به هر سه تابع هدف جواب کارای به‌دست آمده از حل مساله شامل مقدار ۱۸۲۶۶۸۲۰/۱۴برای تابع هدف اول، ۹۶۸۳ برای تابع هدف دوم و ۰/۹۹۸برای تابع هدف سوم می‌باشد. جدول ۴ مکان بهینه تسهیلات حاصل از جواب کارا را نشان می‌دهد.

جدول ٤. مکان بهینه تسهیلات انتخاب شده به همراه سطح ظرفیت

تسهیلات	مکان انتخاب شده به همراه سطح ظرفیت	تسهیلات	مکان انتخاب شده به همراه سطح ظرفیت
مرکز تولید	مرکز ۱ با سطح ظرفیت ۲ مرکز ۲ با سطح ظرفیت ۱ مرکز ۳ با سطح ظرفیت ۳	مرکز جمع آوری	مرکز ۱ با سطح ظرفیت ۲ مرکز ۲ با سطح ظرفیت ۳ مرکز ۳ با سطح ظرفیت ۳
مرکز توزیع	مرکز ۱ با سطح ظرفیت ۳ مرکز ۲ با سطح ظرفیت ۲ مرکز ۳ با سطح ظرفیت ۱	مرکز بازیافت	مرکز ۱ با سطح ظرفیت ۳ مرکز ۲ با سطح ظرفیت ۳ مرکز ۳ با سطح ظرفیت ۲

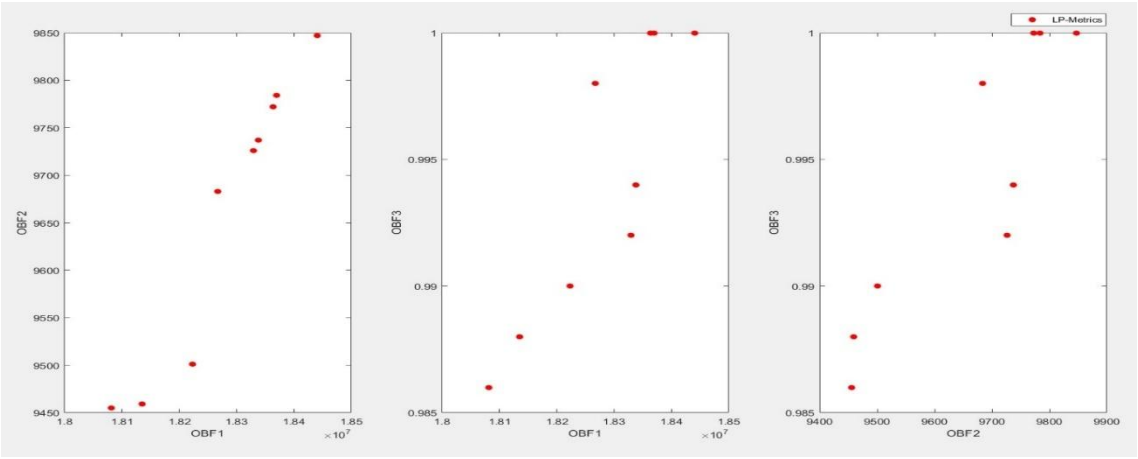
با در نظر گرفتن روابط ارایه‌شده برای روش معیار جامع، مجموعه‌ای از جواب‌های کارای به‌صورت جدول ۵ می‌باشد. شکل ۷ نیز جبهه پارتو به‌دست‌آمده از حل مساله نمونه سایز کوچک را روش معیار جامع نشان می‌دهد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

جدول ۵. مجموعه جواب‌های کارای به‌دست‌آمده از حل مساله نمونه سایز کوچک

جواب کارا	OBF1	OBF2	OBF3
۱	۱۸۰۸۱۱۰۴/۶۷	۹۴۵۵	۰/۹۸۶
۲	۱۸۱۳۵۲۹۴/۶۸	۹۴۵۹	۰/۹۹۸
۳	۱۸۲۲۳۷۱۰/۸۱	۹۵۰۱	۰/۹۹۰
۴	۱۸۲۶۶۸۲۰/۱۴	۹۶۸۳	۰/۹۹۸
۵	۱۸۳۲۹۱۱۶/۲۸	۹۷۲۶	۰/۹۹۲
۶	۱۸۳۳۸۳۱۴/۰۶	۹۷۳۷	۰/۹۹۴
۷	۱۸۳۶۴۰۷۲/۹۹	۹۷۷۲	۱/۰۰۰
۸	۱۸۳۶۹۹۱۶/۰۵	۹۷۸۴	۱/۰۰۰
۹	۱۸۴۴۰۴۱۷/۳۰	۹۸۴۷	۱/۰۰۰

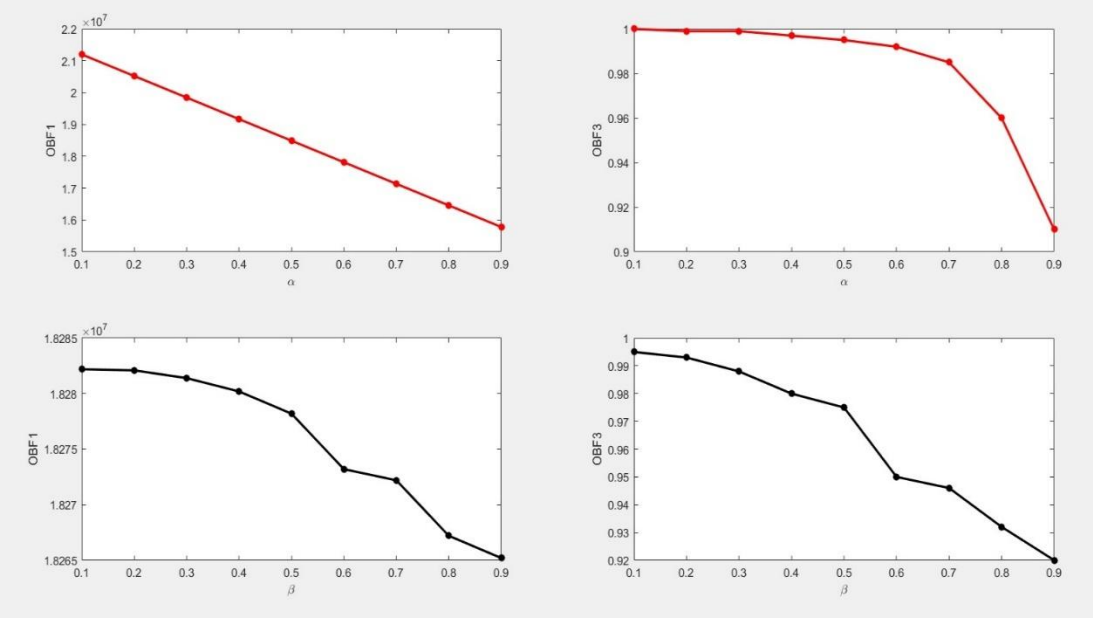


شکل ۷. جبهه پارتو به‌دست‌آمده از حل مسایل نمونه سایز کوچک با روش معیار جامع

مطابق با نتایج جدول ۵ و شکل ۷ مشاهده می‌گردد با افزایش تعداد تسهیلات شامل تامین‌کننده‌ها و مراکز تولیدی، مقدار هزینه‌های کل افزایش‌یافته و درعین‌حال تعداد شغل های ایجادشده و نرخ قابلیت اطمینان به دلیل افزایش تعداد تسهیلات افزایش‌یافته است. ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که رابطه مستقیمی بین هزینه‌ها، تعداد شغل های ایجادشده و قابلیت اطمینان وجود دارد. در ادامه به تحلیل حساسیت مدل شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار طراحی‌شده تحت پارامترهای روش بهینه‌سازی استوار احتمالی پرداخته‌شده است. ازاین‌رو شکل (۸) تغییرات مقادیر تابع هدف اول مساله را به ازای پارامترهای مختلف α_1 و β_1 با فرض ثابت بودن مقدار θ و λ برابر با ۱ در نظر گرفته‌شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]



شکل ۸. تغییرات مقادیر تابع هدف اول به ازای پارامترهای بهینه‌سازی استوار احتمالی

با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت، مشاهده می‌گردد با افزایش پارامترهای α_1 و β_1 ، تنها مقدار تابع هدف اول و سوم افزایش می‌یابد. این امر نشان دهنده آن است که با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار تقاضا افزایش یافته و در نتیجه هزینه‌های حمل و نقل افزایش و قابلیت اطمینان برای برآورده سازی تقاضای مشتریان کاهش می‌یابد. از سویی با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار ظرفیت تامین کننده کاهش یافته و به همین منظور مقدار هزینه‌های حمل و نقل افزایش می‌یابد. با افزایش هزینه‌های حمل و نقل، سود حاصل از طراحی شبکه کاهش می‌یابد.

۵-۲ بررسی متغیرهای خروجی مساله نمونه سایز کوچک با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

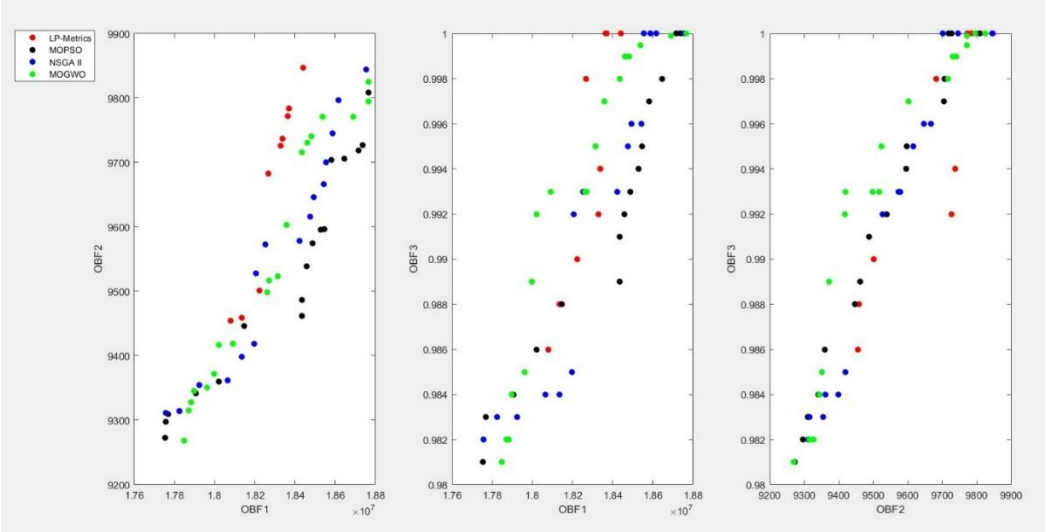
جهت بررسی و ارزیابی الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II و MOGWO، مساله نمونه سایز کوچک با الگوریتم‌های مذکور حل و شاخص‌های مقایسه جواب‌های کارا و همچنین جبهه پارتو به‌دست آمده از حل سه روش نشان داده‌شده است. جدول ۶ شاخص‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری MOPSO، NSGA II و MOGWO را در مقایسه با روش معیار جامع در حل مساله نمونه سایز کوچک را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از این جدول، روش معیار جامع در کسب میانگین توابع هدف اول و سوم، فاصله از نقطه ایده آل کاراترین روش حل بوده است. الگوریتم MOPSO در کسب شاخص میانگین تابع هدف دوم، NSGA II در کسب شاخص بیشترین گسترش و شاخص فاصله متریک و درنهایت الگوریتم MOGWO در کسب شاخص‌های تعداد جواب کارا و زمان محاسباتی روش حل بوده‌اند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

جدول ٦. شاخص‌های به‌دست‌آمده از حل مساله نمونه سایز کوچک با روش‌های مختلف حل

شاخص	روش معیار جامع	MOPSO	NSGA II	MOGWO
MOBF1	۱۸۲۸۳۱۹۶/۳۳	۱۸۳۳۴۹۶۱/۹۵	۱۸۳۰۰۵۰۵/۸۶	۱۸۲۵۸۴۳۱/۲۶
MOBF2	۹۶۶۲/۶۷	۹۵۲۶/۲۹	۹۵۵۳/۴۸	۹۵۴۲/۳۶
MOBF3	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۵
NPF	۹	۱۷	۱۶	۱۹
MSI	۳۵۹۳۱۲/۸۴	۳۵۱۶۴۶/۱۸	۳۶۷۳۵۵/۸۳	۳۳۶۲۹۸/۷۱
MID	۱۵۷۲۲۱/۰۸	۱۸۴۶۵۶/۴۹	۲۰۴۱۹۳/۵	۱۷۰۰۳۹/۶۱
SM	۰/۶۲۷۲	۰/۵۲۹	۰/۴۹۵	۰/۶۸۴
cputime	۱۴/۶۷	۷/۶۴	۸/۱۶	۵/۹۹



شکل ۹. جبهه پارتو به‌دست‌آمده از حل مسایل نمونه سایز کوچک توسط روش‌های حل مختلف

۵-۳ حل مسایل نمونه سایز های بزرگ‌تر با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

در ادامه ۱۵ مساله نمونه در سایزهای بزرگ‌تر مطابق با داده‌های ارایه‌شده در جدول ۳ طراحی شده است. هر یک از مسایل نمونه طراحی شده در سایز بزرگ‌تر توسط الگوریتم‌های MOPSO، MOGWO و NSGA II۵ بار اجراشده‌اند که میانگین‌های مجموعه شاخص‌های هر یک از اجراها در جدول ۷ و ۸ نشان داده‌شده است. با توجه به کسب مقادیر مختلف شاخص‌های توسط الگوریتم های فراابتکاری در هر مساله نمونه، برای بررسی معناداری میانگین‌های هر یک از توابع هدف بین روش‌های حل، از آزمون T-Test در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شده است. ازاین‌رو، درصورتی‌که مقدار آماره آزمون P به‌دست‌آمده برای هر تابع هدف، کمتر از مقدار ۰/۰۵ باشد؛ رد صفر رد شده و نشان می‌دهد بین میانگین‌های آن تابع هدف اختلاف معناداری وجود دارد و درصورتی‌که مقدار آماره آزمون P بیشتر از ۰/۹۵ باشد؛ فرض یک رد شده و نشان‌دهنده عدم اختلاف معناداری در میانگین‌های آن شاخص است. جدول ۹ نتایج خروجی آزمون T-Test را بر روی میانگین‌های توابع هدف نشان می‌دهد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

جدول ۷. میانگین توابع هدف جواب‌های کارا بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری در سایز بزرگ

	NSGA II			MOGWO			MOPSO		
مساله نمونه	MOBF1	MOBF2	MOBF3	MOBF1	MOBF2	MOBF3	MOBF1	MOBF2	MOBF3
۱	۲۹۲۲۲۳۰۱/۸۴۰	۱۷۰۱/۲۹۰	۰/۹۸۶	۲۹۰۳۶۲۵۸/۰۶۰	۱۶۹۱/۲۴۰	۰/۹۸۲	۲۹۱۶۰۲۸۷/۲۴۷	۱۶۹۷/۹۴۰	۰/۹۸۵
۲	۳۵۴۹۳۷۲۳/۸۰۰	۳۰۵۲/۳۸۰	۰/۹۹۴	۳۵۳۴۵۱۶۵/۶۹۰	۳۱۲۸/۳۴۰	۰/۹۸۷	۳۵۴۴۴۲۰۴/۴۳۰	۳۰۷۷/۷۰۰	۰/۹۹۲
۳	۳۸۰۱۵۶۷۱/۱۶۰	۳۸۱۸/۰۲۰	۰/۹۹۳	۳۷۷۰۹۶۲۸/۴۱۰	۴۰۶۸/۳۷۰	۰/۹۸۴	۳۷۹۱۳۶۵۶/۹۱۰	۳۹۰۱/۴۷۰	۰/۹۹۰
۴	۴۱۵۶۷۴۳۳/۰۴۰	۶۳۲۱/۹۲۰	۰/۹۹۱	۴۱۳۹۸۵۲۳/۸۱۰	۶۳۵۳/۹۲۰	۰/۹۹۰	۴۱۵۱۱۱۲۹/۹۶۳	۶۳۳۲/۵۸۷	۰/۹۹۱
۵	۶۰۳۲۹۲۰۹/۸۹۰	۷۲۹۳/۰۸۰	۰/۹۹۴	۶۰۹۶۲۶۰۰/۷۱۰	۷۳۵۶/۰۴۰	۰/۹۸۷	۶۰۵۴۰۳۴۰/۱۶۳	۷۳۱۴/۰۶۷	۰/۹۹۲
۶	۷۶۷۵۰۰۱۹/۰۸۰	۷۲۹۹/۵۷۰	۰/۹۹۳	۷۶۸۸۶۴۱۶/۱۵۰	۷۵۲۹/۴۸۰	۰/۹۹۹	۷۶۷۹۵۴۸۴/۷۷۰	۷۳۷۶/۲۰۷	۰/۹۹۵
۷	۸۲۱۴۱۱۹۹/۵۷۰	۸۱۲۰/۲۲۰	۰/۹۸۴	۸۵۸۰۷۷۰/۳۸۰	۸۲۴۷/۰۳۰	۰/۹۹۸	۸۳۳۶۳۳۶۶/۸۴۰	۸۱۶۲/۴۹۰	۰/۹۸۹
۸	۸۵۶۴۵۳۴۱/۱۲۰	۸۶۵۰/۶۸۰	۰/۹۸۳	۸۶۵۱۱۶۰۲/۴۱۰	۸۷۵۹/۱۳۰	۰/۹۸۱	۸۵۹۳۴۰۹۴/۸۸۳	۸۶۸۶/۸۳۰	۰/۹۸۲
۹	۸۸۰۶۸۹۷۶/۹۰۰	۱۱۱۸۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۸۷۴۴۶۹۵۸/۲۶۰	۱۰۹۳۱/۷۱۰	۰/۹۹۵	۸۷۸۶۱۶۳۷/۳۵۳	۱۱۰۹۷/۲۳۷	۰/۹۹۸
۱۰	۱۰۲۶۶۲۲۰۱/۱۷۰	۱۳۱۸۸/۶۰۰	۰/۹۸۳	۱۰۷۱۱۱۷۵۲/۱۹۰	۱۳۳۰۲/۹۱۰	۰/۹۸۵	۱۰۴۱۴۵۳۸۴/۸۴۳	۱۳۲۲۶/۷۰۳	۰/۹۸۴
۱۱	۱۱۷۳۶۰۶۶۹/۷۶۰	۱۵۲۷۷/۵۱۰	۰/۹۸۱	۱۲۳۰۶۲۳۳۱/۱۸۰	۱۵۷۶۸/۶۷۰	۰/۹۸۹	۱۱۹۲۶۱۲۲۳/۵۶۷	۱۵۴۴۱/۲۳۰	۰/۹۸۴
۱۲	۱۵۲۴۲۳۱۰۳/۶۸۰	۱۵۴۶۸/۲۳۰	۰/۹۹۱	۱۵۴۰۵۷۲۱۶/۲۵۰	۱۵۸۵۲/۵۵۰	۰/۹۹۱	۱۵۲۹۶۸۰۷/۸۷۰	۱۵۵۹۶/۳۳۷	۰/۹۹۱
۱۳	۱۷۲۹۰۹۲۰۷/۷۴۰	۱۸۰۶۹/۱۸۰	۰/۹۹۸	۱۷۰۷۹۵۹۷۱/۱۷۰	۱۷۶۸۰/۲۲۰	۰/۹۹۹	۱۷۲۲۰۴۷۹۵/۵۵۰	۱۷۹۳۹/۵۲۷	۰/۹۹۸
۱۴	۱۸۰۰۹۰۶۵۱/۰۲۰	۲۰۲۲۴/۳۵	۰/۹۹۳	۱۷۹۷۴۲۰۹۰/۷۴۰	۲۰۱۷۳/۰۲۰	۰/۹۸۸	۱۷۹۹۷۴۴۶۴/۲۶۰	۲۰۲۰۷/۲۴۰	۰/۹۹۱
۱۵	۱۸۲۴۹۹۰۰۶/۳۸۰	۲۳۲۹۲/۵۰	۰/۹۸۴	۱۸۴۰۷۰۳۹۳/۸۶۰	۲۴۸۸۹/۳۸۰	۱/۰۰۰	۱۸۳۰۲۲۸۰۲/۲۰۷	۲۳۸۲۴/۷۹۳	۰/۹۸۹

جدول ۸. میانگین شاخص های مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری در سایز بزرگ

	NSGA II					MOGWO					MOPSO				
مساله نمونه	NPF	MSI	SM	MID	CPU TIME	NPF	MSI	SM	MID	CPU TIME	NPF	MSI	SM	MID	CPU TIME
۱	۱۵	۲۵۷۸۷/۹	۳۰۱۹۱/۶	۰/۶۳	۱۸/۲۳	۱۴	۴۸۲۷۱/۶	۴۳۱۰۴/۷	۰/۸۵	۱۱/۲۳	۱۷	۳۵۴۲۳/۷	۳۵۷۲۵/۸	۰/۷۲	۱۵/۲۳
۲	۱۷	۳۹۸۸۴/۰	۲۸۹۶۱/۶	۰/۸۸	۵۴/۰۰	۱۴	۵۱۳۶۱/۱	۲۹۶۷۴/۱	۰/۶۲	۱۲/۹۹	۱۹	۴۴۸۰۲/۸	۲۹۲۶۶/۹	۰/۷۶	۳۶/۴۲
۳	۲۵	۳۵۹۴۵/۱	۴۶۷۱۳/۳	۰/۵۹	۸۵/۱۵	۱۹	۴۵۱۹۰/۰	۴۳۵۴۲/۱	۰/۵۶	۱۶/۸۸	۳۰	۳۹۹۰۷/۴	۴۵۳۵۴/۲	۰/۵۷	۵۵/۸۹
۴	۱۲	۳۰۶۵۱/۹	۵۳۷۷۵/۶	۰/۶۰	۱۲۱/۲۶	۱۴	۵۵۴۹۹/۰	۳۴۱۴۰/۷	۰/۸۰	۳۱/۴۵	۱۵	۴۱۳۰۰/۹	۴۵۳۶۰/۶	۰/۷۰	۸۲/۷۷
۵	۳۲	۳۱۲۵۶/۸	۳۳۷۷۵/۵	۰/۵۵	۱۶۷/۷۵	۲۳	۵۲۹۵۸/۰	۲۱۰۷۲/۸	۰/۷۳	۴۳/۴۵	۳۰	۴۰۵۵۷/۷	۲۸۳۳۳/۲	۰/۶۲	۱۱۴/۴۸
۶	۲۰	۳۹۸۰۱/۰	۵۱۲۲۰/۷	۰/۷۹	۲۱۷/۲۰	۲۵	۵۹۲۱۶/۲	۲۵۲۷۶/۲	۰/۷۳	۹۱/۸۸	۳۴	۴۸۱۲۱/۸	۴۰۱۰۱/۶	۰/۷۶	۱۶۳/۴۹
۷	۱۶	۲۸۲۹۸/۰	۴۷۰۱۳/۲	۰/۸۴	۲۷۲/۸۸	۲۱	۴۸۲۸۳/۳	۴۱۶۵۲/۷	۰/۸۳	۱۱۸/۷۱	۳۶	۳۶۸۶۳/۱	۴۴۷۱۵/۹	۰/۸۳	۲۰۶/۸۱
۸	۱۳	۴۵۹۴۸/۳	۲۰۲۶۸/۶	۰/۷۷	۳۳۴/۵۵	۱۵	۴۳۱۲۸/۶	۳۴۲۰۴/۵	۰/۸۹	۱۶۵/۱۲	۳۴	۴۴۷۳۹/۸	۲۶۲۴۱/۱	۰/۸۲	۲۶۱/۹۲
۹	۱۶	۴۱۴۸۲/۳	۴۴۰۸۶/۸	۰/۷۱	۴۰۹/۸۰	۱۹	۳۷۶۴۰/۷	۲۴۵۸۱/۶	۰/۶۸	۲۴۱/۴۴	۱۸	۳۹۸۳۵/۹	۳۵۷۲۷/۴	۰/۶۹	۳۳۷/۶۴
۱۰	۱۷	۴۹۳۵۸/۲	۳۵۴۷۰/۸	۰/۸۲	۴۷۹/۸۳	۱۱	۵۰۲۷۳/۹	۳۰۲۳۳/۷	۰/۸۳	۳۲۵/۸۸	۲۰	۴۹۷۵۰/۶	۳۳۲۲۶/۳	۰/۸۲	۴۱۳/۸۵
۱۱	۱۱	۴۹۴۹۶/۰	۵۶۶۳۹/۶	۰/۸۲	۵۲۰/۰۶	۲۴	۵۴۴۷۰/۰	۳۸۲۲۱/۶	۰/۷۱	۴۴۲/۶۶	۳۴	۵۱۶۲۷/۷	۴۸۷۴۶/۲	۰/۷۷	۴۸۶/۸۹
۱۲	۱۹	۴۷۳۴۸/۵	۲۰۰۴۶/۰	۰/۸۴	۶۶۲/۹۷	۲۴	۴۵۵۸۶/۳	۲۵۷۵۲/۳	۰/۹۲	۶۱۸/۷۸	۳۶	۴۶۵۹۳/۳	۲۲۴۹۱/۶	۰/۸۷	۶۴۴/۰۳
۱۳	۱۳	۲۶۱۷۶/۱	۳۸۴۹۷/۹	۰/۸۲	۷۶۳/۶۸	۲۳	۳۷۲۷۰/۵	۴۲۱۵۲/۸	۰/۹۲	۷۷۴/۵۶	۳۷	۳۰۹۳۰/۸	۴۰۰۶۴/۳	۰/۸۶	۷۶۸/۳۴
۱۴	۱۶	۲۷۴۰۸/۲	۳۶۹۷۳/۹	۰/۹۷	۹۰۵/۱۸	۱۴	۴۱۶۶۱/۷	۲۷۲۸۵/۴	۰/۶۳	۹۹۳/۴۵	۴۰	۳۳۵۱۶/۸	۳۲۸۲۱/۷	۰/۸۲	۹۴۳/۰۱
۱۵	۱۹	۳۶۱۸۵/۹	۳۸۴۳۶/۶	۰/۶۰	۱۳۳۸/۱۶	۱۹	۳۸۸۴۱/۴	۴۷۵۲۲/۷	۰/۸۱	۱۳۳۴/۴۵	۳۹	۴۲۳۳۰/۶	۳۷۳۲۴/۰	۰/۶۹	۱۳۳۶/۵۷

جدول ۹. نتایج خروجی آزمون T-Test بر روی میانگین‌های توابع هدف

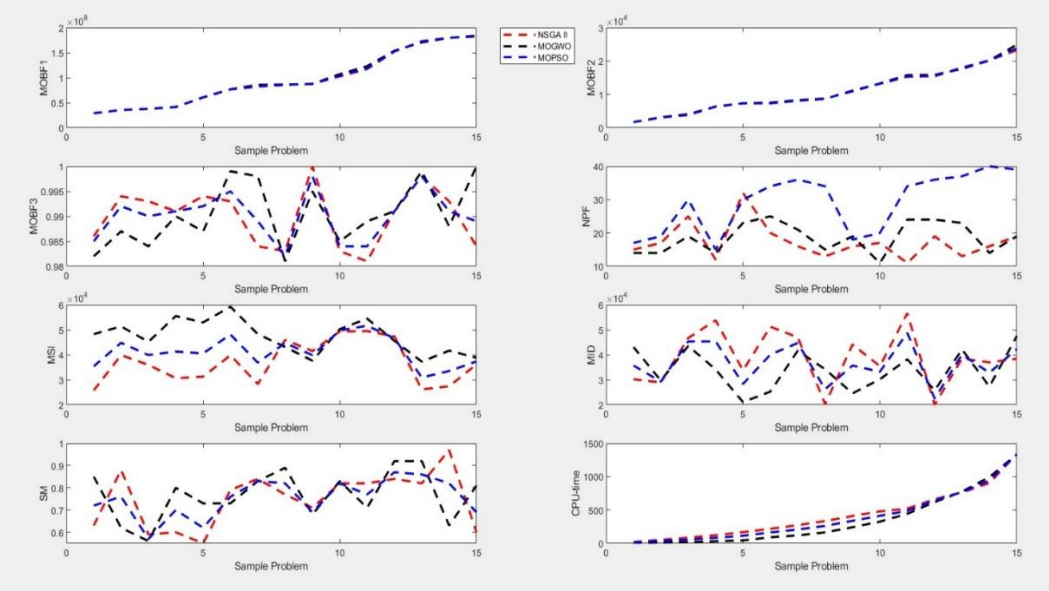
شاخص	الگوریتم	اختلاف میانگین	P-value	T-value
MOBF1	NSGA II– MOPSO	۳۲۸۱۳۰/۹۸	۰/۰۹	۱/۸۰
	NSGA II– MOGWO	۹۸۴۳۹۲/۹۴	۰/۰۹	۱/۸۰
	MOGWO– MOPSO	۶۵۶۲۶۱/۹۶	۰/۰۹	۱/۸۰
MOBF2	NSGA II– MOPSO	۶۱/۶۶	۰/۱۳	۱/۶۰
	NSGA II– MOGWO	۱۸۴/۹۶	۰/۱۳	۱/۶۰
	MOGWO– MOPSO	۱۲۳/۳۱	۰/۱۳	۱/۶۰
MOBF3	NSGA II– MOPSO	۰/۰۰۰	۰/۷۶	۰/۳۰
	NSGA II– MOGWO	۰/۰۰۰	۰/۸۱	۰/۲۴
	MOGWO– MOPSO	۰/۰۰۰	۰/۸۴	۰/۲۰

مطابق با جدول ۹ و با در نظر گرفتن مقدار آماره آزمون P مشاهده می‌شود بین میانگین‌های توابع هدف به‌دست‌آمده اختلاف معناداری وجود ندارد. ازاین‌رو بایستی برای انتخاب کاراترین الگوریتم از حیث

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

شاخص‌های مورد مقایسه از دیگر روش‌های تصمیم گیری چند شاخصه استفاده شود. در ادامه و در شکل ۱۰ به مقایسه میانگین‌های توابع هدف و شاخص‌های مقایسه در مسایل نمونه مختلف با الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته‌شده است.



شکل ۱۰. مقایسه میانگین‌های توابع هدف و شاخص‌های مقایسه در مسایل نمونه با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

با دقت در شکل ۱۰ می‌توان دریافت که زمان محاسباتی با افزایش اندازه مسایل نمونه به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد که دلیلی بر NP-Hard بودن مساله می‌باشد. بااین‌حال الگوریتم MOGWO تا مسایل سایز متوسط ازنظر زمان محاسباتی بهتر از الگوریتم‌های دیگر می‌باشد ولی با افزایش سایز مساله زمان محاسباتی کسب‌شده توسط این الگوریتم به‌شدت افزایش‌یافته است.

٤-٥- انتخاب کاراترین الگوریتم با روش TOPSIS

در بخش قبل مقایسات معناداری به‌منظور تعیین اختلاف معناداری بین میانگین‌های شاخص محاسباتی به‌دست‌آمده از حل مسایل نمونه با الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II و MOGWO انجام شد و نتایج نشان داد که بین هیچ کدام از شاخص‌های مورد محاسبه اول اختلاف معناداری وجود ندارد. در این بخش به‌منظور انتخاب کاراترین الگوریتم از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS که گزینه ها را بر اساس فاصله آنها از ایده آل‌های مثبت و منفی ارزیابی و اولویت بندی می‌کند [۴۶] استفاده‌شده است. لذا جدول ۱۰ میانگین‌های کلی کسب‌شده از ۷۵ مساله نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. میانگین‌های شاخص‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

الگوریتم	MOBF1	MOBF2	MOFB3	NPF	MSI	MID	SM	Cpu time
NSGA II	۹۶۳۴۵۲۴۷/۷	۱۰۸۶۳/۸	۰/۹۹	۱۷/۴	۳۷۰۰۱/۸	۳۸۸۰۴/۹	۰/۷۵	۴۲۳/۳۸
MOGWO	۹۷۳۲۹۶۴۰/۶	۱۱۰۴۷/۸	۰/۹۹	۱۸/۶	۴۷۳۱۰/۱	۳۳۸۹۴/۵	۰/۷۷	۳۴۸/۲
MOPSO	۹۶۶۷۳۳۷۸/۷	۱۰۹۲۵/۴	۰/۹۹	۲۹/۲	۴۱۴۱۹/۷	۳۶۷۰۰/۴	۰/۷۵	۳۹۱/۱

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

پس از بی مقیاس سازی نتایج جدول (۸)، نتیجه نشان از کارایی الگوریتم MOPSO با کسب وزن مطلوبیت ۰/۷۶۰۶ می‌باشد.

٦ نتیجه‌گیری

شرایط اقتصادی جهانی و اهمیت زیست‌محیطی منجر به توجه هر چه بیشتر دولت‌ها، سازمان‌های خصوصی و دولتی و شرکت‌های زیست‌محیطی به توسعه مدل‌های ریاضی شبکه زنجیره تامین شده است. در این مقاله با ارایه یک مدل ریاضی تلاش شد تا شبکه‌ای جامع از تامین، تولید، پالایش و عرضه محصولات زیست‌توده به مشتریان طراحی گردد که در آن مسایل اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی رعایت شده باشد. با توجه به غیرقطعی بودن برخی از مهم‌ترین پارامترهای مساله از روش بهینه‌سازی استوار احتمالی برای کنترل پارامترها استفاده شد. نتایج استفاده ازاین‌روش، نشان‌دهنده افزایش هزینه‌ها و کاهش قابلیت اطمینان در مقابل افزایش نرخ عدم قطعیت بود. برای حل مساله از الگوریتم‌های فرا ابتکاری MOPSO، NSGA II و MOGWO چندهدفه استفاده شد. نتایج حل مساله در سایزهای بزرگ‌تر نشان از کارایی بسیار بالای الگوریتم MOPSO در مقابل الگوریتم‌های دیگر بود. جهت مقایسه دو الگوریتم شاخص‌های (میانگین های توابع هدف، شاخص فاصله گذاری، شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل، شاخص بیشترین گستردگی، شاخص تعداد جواب پارتو و زمان محاسباتی) مورد مقایسه قرار گرفت. برای بهبود کیفیت کار پیشنهاد می‌شود تا مطالعه موردی بر روی یک مورد واقعی اجرا شود. همچنین در نظر گرفتن زنجیره رقابتی برای مساله زیست توده نیز یکی دیگر از پیشنهادهای محققین برای بهبود کیفیت کار است.

منابع

[1] Ghani, N. M. A. M. A., Vogiatzis, C., & Szmerekovsky, J. (2018). Biomass feedstock supply chain network design with biomass conversion incentives

[2] Kostin, A, Guillén-Gosálbez, G, Mele, F. D, & Jiménez, L. (2012). Identifying key life cycle assessment metrics in the multiobjective design of bioethanol supply chains using a rigorous mixed-integer linear programming approach. Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(14), 5282-5291.

[3] Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 712-725.

[4] How, B. S. (2019). An overview of palm biomass supply chain modelling. In Green Technologies for the Oil Palm Industry (pp. 131-172). Springer, Singapore.

[5] Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., & Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: basis, overview, modeling, challenges, and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 608-627.

[6] Popa, V. I., & Volf, I. (Eds.). (2018). Biomass as renewable raw material to obtain bioproducts of high-tech value. Elsevier.

[7] Mol, R., Jogems, M. A. H., Van Beek, P., & Gigler, J. K. (1997). Simulation and optimization of the logistics of biomass fuel collection. NJAS wageningen journal of life sciences, 45(1), 217-228.

[8] Chen, C. W., & Fan, Y. (2012). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(1), 150-164.

[9] Awudu, I., & Zhang, J. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1359-1368.

[10] Awudu, I., & Zhang, J. (2013). Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties. Applied Energy, 103, 189-196.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

[11] Osmani, A., & Zhang, J. (2017). Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain− A logistic case study in Midwestern United States. Land Use Policy, 61, 420-450.
[12] Rabbani, M., Saravi, N. A., Farrokhi-Asl, H., Lim, S. F. W., & Tahaei, Z. (2018). Developing a sustainable supply chain optimization model for switchgrass-based bioenergy production: A case study. Journal of Cleaner Production, 200, 827-843.
[13] Park, Y. S., Szmerekovsky, J., Osmani, A., & Aslaam, N. M. (2017). Integrated Multimodal Transportation Model for a Switchgrass-Based Bioethanol Supply Chain: Case Study in North Dakota. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2628), 32-41.
[14] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (2009). Logistics issues of biomass: the storage problem and the multi-biomass supply chain. Renewable and sustainable energy reviews, 13(4), 887-894.
[15] Petridis, K., Grigoroudis, E., & Arabatzis, G. (2018). A goal programming model for a sustainable biomass supply chain network. International Journal of Energy Sector Management, 12(1), 79-102.
[16] Foo, D. C. (2019). A Simple Mathematical Model for Palm Biomass Supply Chain. In Green Technologies for the Oil Palm Industry (pp. 115-130). Springer, Singapore.
[17] Bragado, M. V., Broz, D., & Dondo, R. (2018). Design and optimization of a supply chain for cogeneration of electrical and thermal energy from forest biomass. In I Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO 2018)-JAIIO 47 (CABA, 2018).
[18] Akhtari, S., Sowlati, T., & Griess, V. C. (2018). Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider medium-term supply and demand variations. Applied Energy, 213, 626-638
[19] Mutenure, M., Čuček, L., Egieya, J., Isafiade, A. J., & Kravanja, Z. (2018). Optimization of bioethanol and sugar supply chain network: a South African case study. Clean Technologies and Environmental Policy, 1-24.
[20] O'Neill, E. G., & Maravelias, C. T. (2021). Towards integrated landscape design and biofuel supply chain optimization. Current Opinion in Chemical Engineering, 31, 100666.
[21] Ge, Y., Li, L., & Yun, L. (2021). Modeling and economic optimization of cellulosic biofuel supply chain considering multiple conversion pathways. Applied Energy, 281, 116059.
[22] Esmaeili, S. A. H., Szmerekovsky, J., Sobhani, A., Dybing, A., & Peterson, T. O. (2020). Sustainable biomass supply chain network design with biomass switching incentives for first-generation bioethanol producers. Energy policy, 138, 111222.
[23] Nur, F., Aboytes-Ojeda, M., Castillo-Villar, K. K., & Marufuzzaman, M. (2020). A two-stage stochastic programming model for biofuel supply chain network design with biomass quality implications. IISE Transactions, 1-24.
[24] Sharara, M. A., Sahoo, K., Reddy, A. D., Kim, S., Zhang, X., Dale, B. & Runge, T. M. (2020). Sustainable feedstock for bioethanol production: Impact of spatial resolution on the design of a sustainable biomass supply-chain. Bioresource technology, 302, 122896.
[25] Bijarchiyan, M., Sahebi, H., & Mirzamohammadi, S. (2020). A sustainable biomass network design model for bioenergy production by anaerobic digestion technology: using agricultural residues and livestock manure. Energy, Sustainability and Society, 10, 1-17.
[26] 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.
[27] Roni, M. S., Thompson, D. N., & Hartley, D. S. (2019). Distributed biomass supply chain cost optimization to evaluate multiple feedstocks for a biorefinery. Applied Energy, 254, 113660.
[28] Dal-Mas, M., Giarola, S., Zamboni, A., & Bezzo, F. (2011). Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. Biomass and bioenergy, 35(5), 2059-2071.
[29] Giarola, S., Shah, N., & Bezzo, F. (2012). A comprehensive approach to the design of ethanol supply chains including carbon trading effects. Bioresource technology, 107, 175-185.
[30] Ghaderi, H., Moini, A., & Pishvaee, M. S. (2018). A multi-objective robust possibilistic programming approach to sustainable switchgrass-based bioethanol supply chain network design. Journal of Cleaner Production, 179, 368-406.
[31] Ghaderi, H., Asadi, M., & Shavvalpour, S. (2016). A switchgrass-based bioethanol supply chain network design model under auto-regressive moving average demand. Journal of Renewable Energy and Environment, 3(3), 1-10.
[32] Ghelichi, Z., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvaee, M. S. (2018). A stochastic programming approach toward optimal design and planning of an integrated green biodiesel supply chain network under uncertainty: A case study. Energy, 156, 661-687.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]

[33] Fattahi, M., & Govindan, K. (2018). A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: A real-life case study. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 118, 534-567.
[34] Khishtandar, S. (2019). Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design. Applied Energy, 236, 183-195.
[35] Habib, M. S., Asghar, O., Hussain, A., Imran, M., Mughal, M. P., & Sarkar, B. (2021). A robust possibilistic programming approach toward animal fat-based biodiesel supply chain network design under uncertain environment. Journal of Cleaner Production, 278, 122403.
[36] Poudel, S. R., Quddus, M. A., Marufuzzaman, M., & Bian, L. (2019). Managing congestion in a multi-modal transportation network under biomass supply uncertainty. Annals of Operations Research, 273(1-2), 739-781.
[37] Alizadeh, M., Ma, J., Marufuzzaman, M., & Yu, F. (2019). Sustainable olefin supply chain network design under seasonal feedstock supplies and uncertain carbon tax rate. Journal of Cleaner Production, 222, 280-299.
[38] Gilani, H., Sahebi, H., & Oliveira, F. (2020). Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model. Applied Energy, 278, 115653.
[39] Nasiri, M. M., Shakouhi, F., & Jolai, F. (2019). A fuzzy robust stochastic mathematical programming approach for multi-objective scheduling of the surgical cases. OPSEARCH, 1-21.
[40] Pishvaee, M. S., Kianfar, K., & Karimi, B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 47(1-4), 269-281.
[41] Davis, P. S., & Ray, T. L. (1969). A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem. Naval Research Logistics Quarterly, 16(3), 331-344.Durmaz, Y. G., &
[42] Jabarpour E. A Neutrosophic Fuzzy Programming Method to Solve a Facility Layout Problem under Uncertainty. jor 2023; 20 (1) :139-155(In Persian)
[43] Gen, M., Cheng, R., & Lin, L. (2008). Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach. Springer Science & Business Media.
[44] Salehi M, Jabarpour E. Multi-objective fuzzy modeling of project scheduling with limitations of multi-skilled resources able to change skill levels and interrupt activities. IJIEPR 2021; 32 (3) :1-16
[45] Salehi, M., & Jabarpour, E. (2020). Modeling and solving a multi-objective location-routing problem considering the evacuation of casualties and homeless people and fuzzy paths in relief logistics. Control and Optimization in Applied Mathematics, 5(1), 41-65.
[46] Salehi M, Rezaei A, Jabarpour E. A New Approach to Managing Physical Assets in the Industry. jor 2025; 22 (3),161-190.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2323]