

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

E. Jabarpour¹, 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

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.

طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار تحت عدم قطعیت پارامترها: یک روش نوین بهینه سازی استوار احتمالی

عفت جبارپور^۱، فاطمه ثقفی^{۲*}

۱- دکتری، دانشکده گان مدیریت، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده گان 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 زیست توده و سوخت های زیستی در این مقاله، یک مدل ریاضی نوین از شبکه زنجیره تامین زیست توده با اهداف بیشینه سازی سود، بیشینه سازی تعداد شغل ایجاد شده و بیشینه سازی قابلیت اطمینان ارائه شده است. با توجه به غیرقطعی بودن برخی از پارامترهای مساله از روش نوین بهینه سازی 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 بزرگ تر از الگوریتم های MOPSO، NSGA II و MOGWO استفاده شد. از این رو ۱۵ مساله نمونه در سایزهای بزرگ تر طراحی و مدل شبکه زنجیره زیست توده پایدار با الگوریتم بیان شده حل گردید. نتایج حاصل از اجرای این مدل و مقایسه شاخص های (میانگین های توابع هدف، شاخص فاصله گذاری، شاخص فاصله از نقطه ایده آل، شاخص بیشترین گستردگی، شاخص تعداد جواب پارتو و زمان محاسباتی) با الگوریتم های MOPSO، NSGA II و MOGWO نشان از همگرایی سریع و کارایی بالای الگوریتم MOPSO در حل مساله شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار است.

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

۱ مقدمه

افزایش قیمت جهانی نفت، کاهش ذخایر سوخت های فسیلی، افزایش گرمای جهانی، ارتقای سطح کیفی زندگی مردم، افزایش جمعیت جهان، مسایل زیست محیطی و اجتماعی منجر به سوق کشورهای مختلف جهان به استفاده از رویکرد "زنجیره تامین زیست توده و استفاده از انرژی های غیر فسیلی" شده است. بدین صورت که در سال های اخیر کشورهای مختلف جهان به طور گسترده ای به استفاده از انرژی ها نوین و سوخت های غیر فسیلی، مخصوصاً

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: fsaghafi@ut.ac.ir

انرژی زیست توده و سوخت های زیستی روی آورده اند؛ بنابراین استفاده از انرژی های زیست توده در سراسر جهان در حال رشد بوده و بحث میان موافقان و مخالفان استفاده از چنین انرژی های در حال گسترش است [۱].

با توجه به افزایش رغبت افراد برای استفاده از چنین انرژی هایی پیش بینی می شود تا اواسط قرن بیست و یکم، تقاضای انرژی زیست توده و سوخت های زیستی دو برابر گردد؛ در نتیجه انتظار می رود سوخت های 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 زیست توده و احداث حساب شده پالایشگاه های هم بسته (که خود نیز مستلزم گسترش کشاورزی و تولید مواد غذایی راهبردی است) و تولید و مصرف و صادرات فراورده های زیستی پالایشگاهی از جمله زیست سوخت ها نه تنها یک انتخاب بلکه یک ضرورت قطعی راهبردی به نظر می رسد [۳]. از جمله دلایل مهم این ضرورت این است که انسان در برابر سلامتی و محیط زیست، اشتغال و امنیت غذایی خود و مردم و نیز توسعه پایدار مسئول است [۴].

به بیان دیگر می توان اظهار داشت که در بین منابع انرژی های تجدید پذیر (باد، خورشید، هیدروژن، امواج دریا، زمین گرمایی)، انرژی زیست توده حایز اهمیت فراوانی است. حدود دوسوم از منابع تجدیدپذیر مصرفی، مربوط به زیست توده بوده و استفاده از آن به سرعت در حال رشد می باشد. زیست توده شامل کلیه موادی در طبیعت است که در گذشته نزدیک، جاندار بوده، از موجودات زنده به عمل آمده و یا زایدات و ضایعات آن ها هستند [۵]. اگرچه منشأ منابع فسیلی نیز منابع زیست توده می باشد؛ ولی زیست توده مواد زیستی مانند سوخت فسیلی (زغال سنگ یا نفت) که طی میلیون ها سال فرایندهای زمین شناسی، در شرایط فشار و دمای خاصی تغییر شکل داده اند را شامل نمی شود. [۶] اهمیت انرژی زیست توده 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 زیست توده حلقه بسته که به طور هم زمان به مسایل اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را در بر می گیرد، پرداخته شود. مدل شبکه زنجیره تامین زیست توده به صورت غیرقطعی بوده که از روش نوین بهینه سازی استوار-احتمالی به کنترل پارامترهای غیرقطعی پرداخته شده است. در نهایت از الگوریتم های MOPSO، NSGA II و MOGWO برای حل مدل سه هدفه در این تحقیق استفاده شده است.

ساختار مقاله بدین صورت می باشد، در بخش دوم، به بیان پیشینه تحقیقات انجام شده و ارایه شکاف تحقیقاتی پرداخته شده است. در بخش سوم به مدل سازی شبکه زنجیره تامین زیست توده تحت عدم قطعیت پرداخته شده است. در این بخش از روش بهینه سازی استوار احتمالی برای کنترل مدل استفاده شده است. در بخش چهارم به ارایه روش های حل یعنی کروموزوم مبتنی بر اولویت و رمز گشایی آن، تنظیم پارامتر الگوریتم های فراابتکاری و همچنین شاخص های مقایسه الگوریتم های فرا ابتکاری پرداخته شده است. در بخش پنجم به بررسی نتایج خروجی و طراحی آزمایشات پرداخته شده است. در نهایت در بخش ششم نتیجه گیری حاصل از مقاله ارایه شده است.

۲ پیشینه تحقیقات

۲-۱ زنجیره تامین زیست توده

برای اولین بار مول و همکاران (۱۹۹۷) یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده اند که در آن، مکان سایت ها پردازش به وسیله حداقل کردن هزینه های لجستیک زیست توده شامل هزینه های تاسیس پالایشگاه، تولید اتانول، تامین مواد اولیه، حمل و نقل و ... بهینه شده است [۷]. برنامه ریزی استراتژیک زنجیره تامین زیست توده و تخصیص بهینه زیست توده تحت تصمیمات مکان یابی غیرقطعی [۸] و طراحی و تولید بهینه زنجیره تامین اتانول زیستی همراه با تعیین برداشت [۹]، چند نمونه از مدل های برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط در طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده هستند. مانع اصلی برای تجاری سازی سوخت زیستی، فرایندهای تولید پیچیده آن است. این پیچیدگی به دلیل اشکال مختلفی از پارامترهای متنوع ساخته شده است. عدم قطعیت یکی از شکل های رایج تنوع در پارامترهای زنجیره تامین سوخت های زیستی است. تامین مواد اولیه زیست توده، تولید سوخت زیستی و تقاضا، قیمت و لجستیک، پارامترهای متداولی هستند که همراه با عدم قطعیت هستند [۱۰].

عثمانی و ژانگ [۱۱] به بهینه سازی تصادفی یک شبکه زنجیره برای تولید اتانول نسل دوم پایدار پرداختند. هدف اصلی آن ها در این مقاله بیشینه سازی عملکردهای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی بود. آن ها برای حل مدل از روش تجزیه بندرز استفاده کردند و به منظور اثبات اثربخشی مدل ریاضی پیشنهادی خود، یک مطالعه موردی لجستیک در آمریکا انجام دادند. ربانی و همکاران [۱۲] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار با هدف های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی متضاد پرداختند. آن ها برای حل مدل خود از روش اپسیلون محدودیت استفاده نمودند و نشان دادند جهت دستیابی به یک سطح عملکرد مطلوب اجتماعی و زیست محیطی، بایستی ۱۵ درصد از سهم تابع اقتصادی افزایش یابد. پارک و همکاران [۱۳] یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلف برای زنجیره تامین بيو اتانول ارایه کردند. هدف این مقاله، کمینه سازی هزینه های کل کاشت، و برداشت، ایجاد زیرساخت ها، فرایندهای ذخیره سازی، تولید بيو اتانول و حمل و نقل بود. آن ها مدل خود را با استفاده از داده های در دسترس در شمال داکوتا اجرا کردند و نتیجه گرفتند که سناریو حمل و نقل توسط چندین نوع وسیله نقلیه از یک نوع حمل و نقل (کامیون) هزینه کمتری دارد. رنتیزلاس و همکاران [۱۴] یک مساله ذخیره سازی محصولات زیست توده در یک شبکه زنجیره تامین را مدل سازی نمودند. هدف اصلی آن ها در این مقاله بررسی روش های مختلف ذخیره سازی زیست توده ای بود که کمترین هزینه ذخیره سازی را داشته باشد. پتریدیس و همکاران [۱۵] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار پرداختند. آن ها یک چارچوب ریاضی یکپارچه برای حمل و نقل و ذخیره سازی زیست توده در گره های مختلف شبکه زنجیره تامین ارایه کردند و از روش برنامه ریزی آرمانی به کمینه سازی اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مساله پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که تاکید بر جنبه های زیست محیطی منجر به کاهش میزان انتشار کربن دی اکسید شده و در بررسی جواب های کارا با کاهش میزان معیارهای زیست محیطی و اقتصادی، معیار اجتماعی افزایش می یابد. فو [۱۶] یک مدل ساده خطی برای تخصیص بهینه زیست توده نخل در یک شبکه زنجیره تامین چند سطحی ارایه کردند. هدف اصلی در این مقاله بیشینه سازی سود ناشی از طراحی شبکه در کنار کمینه سازی هزینه انتشار گاز

کربن دی اکسید بود. براگادو و همکاران [۱۷] یک مدل ریاضی برای بهینه سازی سیستم جریان انتقال محصولات شبکه زنجیره تامین زیست توده پرداختند. آن‌ها در این مقاله در نظر داشتند تا سود حاصل از طراحی کل شبکه را افزایش داده و بهینه ترین منبع ذخیره انرژی زیست توده و میزان توزیع محصولات را به دست آورند. آن‌ها برای حل مساله از نرم افزار GAMS استفاده نمودند و پیکربندی بهینه آن در چهار سناریو واقع بینانه مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. اختری و همکاران [۱۸] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده شامل یکپارچگی تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی پرداختند. نوآوری مدل آن‌ها شامل تصمیم گیری در مورد تاسیس تسهیلات در هر سال، نه فقط در ابتدای افق برنامه ریزی، چند محصولی بودن، تاثیر قیمت انرژی در مدل و استفاده از روش بهینه سازی جهت دستیابی به یک راه حل مطلوب در مدت زمان کوتاه تر بود. موتینرو و همکاران [۱۹] به مدل سازی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به منظور 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 زیست توده می باشد که نتایج آن نشان می دهد که شبکه زنجیره تامین بیو تکنول و شکر در آفریقای جنوبی قابل اعتماد است. هزینه حمل و نقل مربوط به بخش قابل توجهی از هزینه های زنجیره تامین بوده، در حالی که بالاترین سود زمانی که مقادیر بالای مواد خام وجود دارد و محدودیت های مربوط به تولید اتانول وجود ندارد. نیل و همکاران [۲۰] به یکپارچه سازی 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 چهار سطحی با ۱۲ مسیر طراحی نموده تا با در نظر گرفتن دوره های زمانی متعدد، انواع مختلف زیست توده و توزیع های مکانی، موجودی های زیست توده و سوخت های 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 تجدید پذیر پرداختند. بررسی تاثیرات دو مشوق مالی (پرداخت انگیزه و جریمه های انتشار) در این مقاله بررسی شده است که تولید کنندگان نسل اول اتانول زیستی را به استفاده از زیست توده نسل دوم ترغیب می کنند. این مشوق های مالی برای به حداکثر رساندن سود زنجیره های تامین بیواتانول در ایالت داکوتای شمالی در مدل های برنامه ریزی خطی ادغام شده اند. نتایج عددی نشان می دهد که تولید نسل اتانول زیستی کارآمدتر از نسل اتانول زیستی است. نور و همکاران [۲۳] یک مدل جدید برنامه نویسی تصادفی دو مرحله ای را ارائه 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 ارائه شده است. آزمایش های عددی نشان می دهد که تنوع کیفی زیست توده با نیاز به انبارهای اضافی بر طراحی زنجیره تامین تاثیر می گذارد، بنابراین سرمایه گذاری را افزایش می دهد. شرارا و همکاران [۲۴] نقش مکانی و تغییرات مکانی را در برآورد تاثیرات زیست محیطی و تصمیم گیری برای برداشت ذرت دانه ای برای تولید سوخت های زیستی ارزیابی کردند. برای هر تفکیک مکانی، تصمیم گیری با استفاده از یک روال بهینه سازی انجام شده است تا اثرات مختلف زیست محیطی

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. قانی 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 هضم 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 ارائه 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 اختصاص یافته 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 ارائه 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 کشتش 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 زیست توده 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 زیست توده 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 زیست توده و کربن پیشنهاد دادند. قادری و همکاران [۳۰] به ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار امکانی چندهدفه در طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده 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

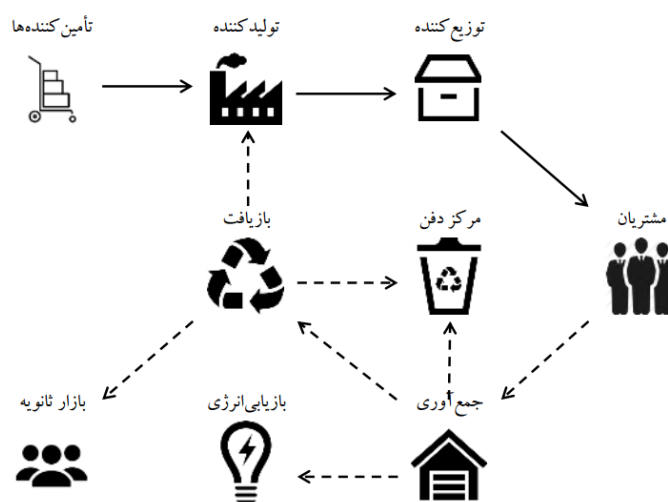
مختلط برای شبکه زنجیره تامین زیست توده که در آن تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده بود طراحی کردند. آن‌ها مطالعه خود را بر روی یک مساله واقعی در دولت داکوتای شمالی در ایالات متحده انجام دادند. گلیچی و همکاران [۳۲] یک مدل برنامه ریزی دومارحله‌ای تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده ارائه دادند. آن‌ها در مدل خود چندین محصول مختلف را در چند دوره زمانی در نظر گرفتند و از روش برنامه ریزی احتمالی به کنترل پارامترهای غیرقطعی مساله پرداختند. نتایج مشتق شده و تجزیه و تحلیل آن‌ها، کارایی و کاربرد مدل را تایید کرد. فتاحی و همکاران [۳۳] به طراحی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده تحت عدم قطعیت عرضه و تقاضا پرداختند. آن‌ها در مدل خود از روش برنامه ریزی تصادفی استفاده کردند و مقادیر مختلف عرضه و تقاضا را در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. در مدل آن‌ها توابع هدف شامل اهداف زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی بود. نتایج محاسباتی در یک مطالعه موردی واقعی نشان داد که قابلیت استفاده از ابزارهای بهینه سازی پیشنهاد شده و همچنین ریسک خرابی و ابعاد پایداری بر روی برنامه ریزی زیست محیطی زیست توده تاثیر دارد. خویشتن دار [۳۴] یک مدل برنامه ریزی ریاضی در شرایط عدم قطعیت برای شبکه زنجیره تامین بیو گاز طراحی کرد. وی در این مقاله، نیروی کار، تقاضای زیست توده و قیمت زیست توده را نامعلوم در نظر گرفته بود و از شبیه سازی مونت کارلو و الگوریتم های تکاملی (الگوریتم ژنتیک و تکامل دیفرانسیل) برای یافتن راه حل بهینه مطلوب استفاده کرد. وی برای کنترل پارامترهای غیرقطعی مساله از روش برنامه ریزی فازی استفاده نمود. همچنین آن‌ها تاثیرات عدم قطعیت در موجودی زیست توده، تقاضای زیست توده و نیروی کار موجود بر روی هزینه کلی زنجیره تامین بیو گاز، از طریق تجزیه و تحلیل حساسیت مورد مطالعه قرار داد. حبیب و همکاران [۳۵] یک مدل بهینه سازی طراحی شبکه زنجیره تامین بیودیزل مبتنی بر چربی حیوانی را ارائه 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 می رساند. فضای پیچیده و پویای تجاری زنجیره تامین زیست توده منجر به عدم اطمینان بالایی می شود، در نتیجه، اثربخشی تصمیمات سطح استراتژیک به خطر می افتد. 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 برنامه نویسی تصادفی دو مرحله‌ای ارائه دادند که برای طراحی و مدیریت یک شبکه زنجیره تامین سوخت گیری زیست توده تحت عدم اطمینان عرضه مواد اولیه استفاده می شود. آن‌ها از یک الگوریتم تجزیه جدید برای حل مساله استفاده نمودند. در نهایت با استفاده از داده های 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. عزیزاده و همکاران [۳۷] یک مدل برنامه نویسی تصادفی سه مرحله‌ای استوار برای توصیف و بهینه سازی یک شبکه زنجیره تامین الفین ارائه کردند. در این شبکه با هدف ارائه یک شبکه لجستیکی قابل اعتماد و اقتصادی برای پشتیبانی از تولید الفین ارائه شده است. گیلانی و همکاران [۳۸] یک مدل بهینه سازی طراحی شبکه زنجیره تامین استوار سه مرحله‌ای برای تولید اتانول زیستی از نیشکر را ارائه کردند. آن‌ها از روش تجزیه و تحلیل پوششی یکپارچه فازی برای انتخاب زمین های زیر کشت مناسب به عنوان نقاط بالقوه تامین استفاده کردند.

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. از این رو در این مقاله به ارائه یک مدل نوین شبکه زنجیره تامین زیست‌توده با هدف بهینه‌سازی سود، نرخ استخدام و قابلیت اطمینان پرداخته شده 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 ارائه شده 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) پرداخته شده 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 بازایی انرژی و تامین تقاضای بازار دست‌دوم از محصولات برگشتی مواد زیست‌توده است. در این مساله تامین‌کننده‌ها که درواقع تامین مواد زیست‌توده را بر عهده دارند، مواد زیست‌توده را جهت تولید فرآورده‌های بیو زیستی به تولیدکننده‌ها ارسال می‌کنند. تولیدکننده‌ها بر اساس ترکیب مواد از پیش تعیین شده، اقدام به تولید فرآورده‌های 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 گرفته شده 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 فرآورده‌های زیست‌توده تولیدشده توسط مراکز جمع‌آوری، جمع‌آوری شده و پس از بازرسی به یکی از مراکز مربوطه جهت بازایی انرژی، بازیافت مجدد و با انهدام ارسال می‌گردد. محصولات بازیافت شده در حقیقت آن فرآورده‌هایی را شامل می‌شود که با افزودن برخی مواد اولیه و یا تغییر در ساختار فرآورده بیو زیستی، قابل استفاده مجدد در بازار اولیه و یا فروش به عنوان 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.



شکل ۱. شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار

در این مساله ۳ نوع تصمیم استراتژیکی، تاکتیکی و عملیاتی وجود دارد. در سطح تصمیمات استراتژیکی، مساله درصد تعیین تعداد و ظرفیت تسهیلات بالقوه شبکه شامل (مراکز تولید، توزیع، بازیافت و جمع آوری) است. در سطح تصمیمات تاکتیکی، مقدار بهینه تولید، توزیع و انتقال محصولات فراوری شده بین سطوح مختلف شبکه زنجیره تامین مدنظر می باشد. در سطح تصمیمات عملیاتی نیز، تعیین وسیله نقلیه مناسب بین هر دو سطح شبکه زنجیره تامین برای انتقال محصولات فراوری شده، هدف اصلی به شمار می رود.

با توجه به مفروضات زیر، مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار، قابل مدل سازی خواهد بود:

- ۱- توابع هدف مساله، شامل بیشینه سازی سود کل شبکه زنجیره تامین، بیشینه سازی تعداد شغل های ایجاد شده و بیشینه سازی قابلیت اطمینان شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار می باشد.
- ۲- پارامترهای تقاضا، ظرفیت تامین کننده، هزینه های مربوط به حمل و نقل و هزینه های عملیاتی به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
- ۳- کمبود مجاز می باشد.
- ۴- ناوگان حمل و نقل به صورت غیرهمگن در نظر گرفته شده است.
- ۵- هزینه انتشار گازهای گلخانه ای به عنوان جزئی از تابع هدف اول در نظر گرفته شده است.
- ۶- ظرفیت تسهیلات در سطوح مختلف دارای هزینه های مختلفی است.

با توجه به مفروضات ذکر شده، مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم گیری مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار به صورت زیر می باشد:

۳-۱ مجموعه ها

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

I	مجموعه مراکز تامین کننده مواد اولیه $i = \{1, 2, \dots, I\}$
L	مجموعه مراکز انهدام $l = \{1, 2, \dots, L\}$
N	مجموعه مراکز بالقوه بازیافت $n = \{1, 2, \dots, N\}$
M	مجموعه مراکز بالقوه جمع آوری $m = \{1, 2, \dots, M\}$
E	مجموعه مراکز بازیابی انرژی $e = \{1, 2, \dots, E\}$
B	مجموعه نقاط ثابت بازار ثانویه $b = \{1, 2, \dots, B\}$
G	مجموعه سطوح ظرفیت تسهیلات بالقوه $g = \{1, 2, \dots, G\}$
P	مجموعه محصولات (محصولات فراوری شده بیو زیستی) $p = \{1, 2, \dots, P\}$
H	مجموعه مواد اولیه (مواد اولیه زیست توده) $h = \{1, 2, \dots, H\}$
V	مجموعه وسایل نقلیه $v = \{1, 2, \dots, V\}$

۳-۲ پارامترها

Dem_{ap}	تقاضای مشتری a از محصول p
O_{hp}	تعداد مواد اولیه h مورد نیاز برای تولید یک محصول p
α_{ap}	درصدی از محصول p بازگشت داده شده توسط مشتری a
β_{mp}	درصدی از محصول p قابل انتقال به مرکز بازیابی انرژی توسط مرکز جمع آوری m
γ_{mp}	درصدی از محصول p قابل انتقال به مرکز بازیافت توسط مرکز جمع آوری m $\forall m, p \quad \beta_{mp} + \gamma_{mp} < 1$
δ_{np}	درصدی از محصول p انتقال یافته به مرکز انهدام توسط مرکز بازیافت n
σ_{np}	درصدی از محصول p انتقال یافته به مرکز تولید توسط مرکز بازیافت n $\forall n, p \quad \delta_{np} + \sigma_{np} < 1$
$CapJ_{jpg}$	ظرفیت تولید کننده j از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapK_{kpg}$	ظرفیت توزیع کننده k از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapM_{mpg}$	ظرفیت مرکز جمع آوری m از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapN_{npg}$	ظرفیت مرکز بازیافت n از محصول p در سطح ظرفیت g
$CapI_{ih}$	ظرفیت تامین کننده i از ماده اولیه h
$CapL_{lp}$	ظرفیت مرکز انهدام l از محصول p
$Capw_v$	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 دست اول a
Pr_{ep}	قیمت فروش یک واحد محصول p برای مرکز بازیابی انرژی e
Pn_{bp}	قیمت فروش یک واحد محصول p برای بازار ثانویه b

هزینه ثابت احداث مرکز تولید j با سطح ظرفیت g	F_{jg}
هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g	F_{kg}
هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g	F_{mg}
هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g	F_{ng}
هزینه ثابت به کارگیری وسیله نقلیه v	FC_v
هزینه متغیر وسیله نقلیه v به ازای یک واحد حرکت بین دو تسهیل	FV_v
فاصله مرکز توزیع k از مشتری a	D_{ka}
فاصله مرکز تولید j از مرکز توزیع k	D_{jk}
فاصله تامین‌کننده i از مرکز تولید j	D_{ij}
فاصله مرکز بازیافت n از مرکز تولید j	D_{nj}
فاصله مشتری a از مرکز جمع‌آوری m	D_{am}
فاصله مرکز جمع‌آوری m از مرکز بازیابی انرژی e	D_{me}
فاصله مرکز جمع‌آوری m از مرکز بازیافت n	D_{mn}
فاصله مرکز جمع‌آوری m از مرکز انهدام l	D_{ml}
فاصله مرکز بازیافت n از مرکز انهدام l	D_{nl}
فاصله مرکز بازیافت n از بازار ثانویه b	D_{nb}
هزینه عدم برآورد تقاضای مشتری a از محصول p	π_{ap}
هزینه تولید محصول p در مرکز تولید j	Pc_{jp}
هزینه تامین ماده اولیه h از تامین‌کننده i	Sc_{ih}
هزینه توزیع محصول p در مرکز توزیع k	Dc_{kp}
هزینه جمع‌آوری محصول p در مرکز جمع‌آوری m	Cc_{mp}
هزینه بازیافت محصول p در مرکز بازیافت n	Rc_{np}
هزینه انهدام محصول p در مرکز انهدام l	Lc_{lp}
هزینه بازتولید محصول p در مرکز تولید j	RPc_{jp}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید توسط وسیله نقلیه v به ازای یک واحد حرکت بین دو تسهیل	Co_{2v}
مقدار مجاز انتشار دی‌اکسید کربن در شبکه زنجیره تامین که دولت تعیین می‌کند.	Co_2^{GOV}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز تولید j با سطح ظرفیت g	E_{jg}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g	E_{kg}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز جمع‌آوری m با سطح ظرفیت g	E_{mg}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g	E_{ng}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر تولید محصول p در مرکز تولید j	Pe_{jp}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر جمع‌آوری محصول p در مرکز جمع‌آوری m	Ce_{mp}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر بازیافت محصول p در مرکز بازیافت n	Re_{np}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر انهدام محصول p در مرکز انهدام l	Le_{lp}
میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در اثر بازتولید محصول p در مرکز تولید j	RPe_{jp}

هزینه ثابت انتشار بیش از حد مجاز دی اکسید کربن	9
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز تولید z با سطح ظرفیت g	JOB _{jg}
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g	JOB _{kg}
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز جمع آوری m با سطح ظرفیت g	JOB _{mg}
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g	JOB _{ng}
متوسط تعداد روزهای ازدست رفته به دلیل آسیب دیدگی کاری در اثر احداث مرکز تولید z با سطح ظرفیت g	ALD _{jg}
متوسط تعداد روزهای ازدست رفته به دلیل آسیب دیدگی کاری در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g	ALD _{kg}
متوسط تعداد روزهای ازدست رفته به دلیل آسیب دیدگی کاری در اثر احداث مرکز جمع آوری m با سطح ظرفیت g	ALD _{mg}
متوسط تعداد روزهای ازدست رفته به دلیل آسیب دیدگی کاری در اثر احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g	ALD _{ng}
ضریب اهمیت تعداد کل روزهای ازدست رفته ناشی از آسیب دیدگی در محیط کار	φ_{ALD}
ضریب اهمیت تعداد فرصت شغلی ایجاد شده	θ_{job}
قابلیت اطمینان مسیر ارسال ماده اولیه h از تامین کننده i به مرکز تولید z	Re _{ijh}
قابلیت اطمینان مسیر ارسال محصول p از مرکز تولید z به مرکز توزیع k	Re _{jkp}
قابلیت اطمینان مسیر ارسال محصول p از مرکز توزیع k به مشتری ثابت a	Re _{kap}

۳-۳ متغیرهای تصمیم گیری

مقدار محصول p انتقال یافته از مرکز توزیع k به مشتری a	Q _{kap}
مقدار محصول p انتقال یافته از مرکز تولید z به مرکز توزیع k	Q _{jkp}
مقدار ماده اولیه h انتقال یافته از تامین کننده i به مرکز تولید z	Q _{ijh}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مرکز بازیافت n به مرکز تولید z	Q _{njp}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مشتری a به مرکز جمع آوری m	Q _{amp}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مرکز جمع آوری m به مرکز بازیابی انرژی e	Q _{mep}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مرکز جمع آوری m به مرکز بازیافت n	Q _{mnp}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مرکز جمع آوری m به مرکز انهدام l	Q _{mlp}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مرکز بازیافت n به مرکز انهدام l	Q _{nlp}
مقدار محصول p برگشتی و انتقال یافته از مرکز بازیافت n به بازار ثانویه b	Q _{nbp}
کمبود رخ داده از محصول p برای مشتری a	S _{ap}
اگر مرکز تولید z با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	U _{jg}
اگر مرکز توزیع k با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	U _{kg}
اگر مرکز جمع آوری m با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	U _{mg}
اگر مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت g تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	U _{ng}
اگر وسیله نقلیه v از مرکز توزیع k به مشتری a تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	Y _{kav}
اگر وسیله نقلیه v از مرکز تولید z به مرکز توزیع k تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	Y _{jkv}
اگر وسیله نقلیه v از تامین کننده i به مرکز تولید z تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	Y _{ijv}
اگر وسیله نقلیه v از مرکز بازیافت n به مرکز تولید z تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد.	Y _{njv}

اگر وسیله نقلیه v از مشتری a به مرکز جمع آوری m تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد. Y_{amv}

اگر وسیله نقلیه v از مرکز جمع آوری m به مرکز بازایی انرژی e تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد. Y_{mev}

اگر وسیله نقلیه v از مرکز جمع آوری m به مرکز بازافت n تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد. Y_{mnv}

اگر وسیله نقلیه v از مرکز جمع آوری m به مرکز انهدام l تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد. Y_{mlv}

اگر وسیله نقلیه v از مرکز بازافت n به مرکز انهدام l تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد. Y_{nlv}

اگر وسیله نقلیه v از مرکز بازافت n به بازار ثانویه b تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 می گیرد. Y_{nbv}

پس از ارایه مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم گیری، مدل پیشنهادی غیرقطعی مساله به صورت زیر تعریف می شود:

۳-۴ مدل پیشنهادی

$$\begin{aligned} \max Z_1 = & \sum_k \sum_a \sum_p Pr_{ap} Q_{kap} + \sum_m \sum_e \sum_p Pr_{ep} Q_{mep} + \sum_n \sum_b \sum_p Pr_{bp} Q_{nbp} \\ & - \left\{ \sum_{j,g} F_{jg} U_{jg} + \sum_{k,g} F_{kg} U_{kg} + \sum_{m,g} F_{mg} U_{mg} + \sum_{n,g} F_{ng} U_{ng} \right\} \\ & - \left\{ \sum_i \sum_j \sum_v FC_v Y_{ijv} + \sum_j \sum_k \sum_v FC_v Y_{jkv} + \sum_k \sum_a \sum_v FC_v Y_{kav} + \right. \\ & \sum_a \sum_m \sum_v FC_v Y_{amv} + \sum_m \sum_l \sum_v FC_v Y_{mlv} + \sum_m \sum_e \sum_v FC_v Y_{mev} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_v FC_v Y_{mnv} + \sum_n \sum_l \sum_v FC_v Y_{nlv} + \sum_n \sum_b \sum_v FC_v Y_{nbv} + \\ & \left. \sum_n \sum_j \sum_v FC_v Y_{njv} \right\} \\ & - \left\{ \sum_i \sum_j \sum_v FV_v D_{ij} Y_{ijv} + \sum_j \sum_k \sum_v FV_v D_{jk} Y_{jkv} + \sum_k \sum_a \sum_v FV_v D_{ka} Y_{kav} + \right. \\ & \sum_a \sum_m \sum_v FV_v D_{am} Y_{amv} + \sum_m \sum_l \sum_v FV_v D_{ml} Y_{mlv} + \sum_m \sum_e \sum_v FV_v D_{me} Y_{mev} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_v FV_v D_{mn} Y_{mnv} + \sum_n \sum_l \sum_v FV_v D_{nl} Y_{nlv} + \sum_n \sum_b \sum_v FV_v D_{nb} Y_{nbv} + \\ & \left. \sum_n \sum_j \sum_v FV_v D_{nj} Y_{njv} \right\} \\ & - \left\{ \sum_i \sum_j \sum_h Sc_{ih} Q_{ijh} + \sum_j \sum_k \sum_p Pc_{jp} Q_{jkp} + \sum_k \sum_a \sum_p Dc_{kp} Q_{kap} + \right. \\ & \sum_a \sum_m \sum_p Cc_{mp} Q_{amp} + \sum_m \sum_n \sum_p Rc_{np} Q_{mnp} + \sum_m \sum_l \sum_p Lc_{lp} Q_{mlp} + \\ & \left. \sum_n \sum_l \sum_p Lc_{lp} Q_{nlp} + \sum_n \sum_j \sum_p PRc_{jp} Q_{njp} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 -\theta \left\{ \begin{aligned} & \sum_i \sum_j \sum_v \text{Co}\tau_v D_{ij} Y_{ijv} + \sum_j \sum_k \sum_v \text{Co}\tau_v D_{jk} Y_{jkv} + \sum_k \sum_a \sum_v \text{Co}\tau_v D_{ka} Y_{kav} + \\ & \sum_a \sum_m \sum_v \text{Co}\tau_v D_{am} Y_{amv} + \sum_m \sum_l \sum_v \text{Co}\tau_v D_{ml} Y_{mlv} + \sum_m \sum_e \sum_v \text{Co}\tau_v D_{me} Y_{mev} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_v \text{Co}\tau_v D_{mn} Y_{mnv} + \sum_n \sum_b \sum_v \text{Co}\tau_v D_{nb} Y_{nbv} + \sum_n \sum_l \sum_v \text{Co}\tau_v D_{nl} Y_{nlv} + \\ & \sum_n \sum_j \sum_v \text{Co}\tau_v D_{nj} Y_{njv} + \sum_j \sum_g E_{jg} U_{jg} + \sum_k \sum_g E_{kg} U_{kg} + \sum_m \sum_g E_{mg} U_{mg} + \\ & \sum_n \sum_g E_{ng} U_{ng} + \sum_j \sum_k \sum_p \text{Pe}_{jp} Q_{jkp} + \sum_a \sum_m \sum_p \text{Ce}_{mp} Q_{amp} + \sum_m \sum_n \sum_p \text{Re}_{np} Q_{mnp} \\ & + \sum_m \sum_l \sum_p \text{Le}_{lp} Q_{mlp} + \sum_n \sum_l \sum_p \text{Le}_{lp} Q_{nlp} + \sum_n \sum_j \sum_p \text{RPe}_{jp} Q_{njp} - \text{Co}\tau^{\text{GOV}} \end{aligned} \right\} \\
 - \sum_a \sum_p \pi_{ap} S_{ap} \\
 \max Z_{\tau} = \theta_{\text{job}} \left\{ \sum_j \sum_g \text{JOB}_{jg} U_{jg} + \sum_k \sum_g \text{JOB}_{kg} U_{kg} + \sum_m \sum_g \text{JOB}_{mg} U_{mg} + \sum_n \sum_g \text{JOB}_{ng} U_{ng} \right\}
 \end{aligned} \tag{۲}$$

$$-\Phi_{\text{ALD}} \left\{ \sum_j \sum_g \text{ALD}_{jg} U_{jg} + \sum_k \sum_g \text{ALD}_{kg} U_{kg} + \sum_m \sum_g \text{ALD}_{mg} U_{mg} + \sum_n \sum_g \text{ALD}_{ng} U_{ng} \right\}$$

$$\max Z_{\tau} = 1 - \prod_i \prod_a \left(1 - \left(1 - \prod_j \prod_k \prod_h \prod_p \prod_v \left(1 - \left(\frac{\text{Re}_{ijh} Y_{ijv}^*}{\text{Re}_{jkp} Y_{jkv}^*} \right) \right) \right) \right) \tag{۳}$$

s. t.:

$$\sum_k Q_{kap} + S_{ap} = \text{Dem}_{ap}, \quad \forall a, p \tag{۴}$$

$$\sum_a Q_{kap} = \sum_j Q_{jkp}, \quad \forall k, p \tag{۵}$$

$$\sum_i \sum_h O_{hp} Q_{ijh} + \sum_n Q_{njp} = \sum_k Q_{jkp}, \quad \forall j, p \tag{۶}$$

$$\alpha_{ap} \sum_k Q_{kap} = \sum_m Q_{amp}, \quad \forall a, p \tag{۷}$$

$$\beta_{mp} \sum_a Q_{amp} = \sum_e Q_{mep}, \quad \forall m, p \tag{۸}$$

$$\gamma_{mp} \sum_a Q_{amp} = \sum_n Q_{mnp}, \quad \forall m, p \tag{۹}$$

$$\sum_a Q_{amp} = \sum_l Q_{mlp} + \sum_n Q_{mnp} + \sum_e Q_{mep}, \quad \forall m, p \tag{۱۰}$$

$$\delta_{np} \sum_m Q_{mnp} = \sum_l Q_{nlp}, \quad \forall n, p \tag{۱۱}$$

$$\sigma_{np} \sum_m Q_{mnp} = \sum_j Q_{njp}, \quad \forall n, p \quad (12)$$

$$\sum_m Q_{mnp} = \sum_l Q_{nlp} + \sum_j Q_{njp} + \sum_b Q_{nbp}, \quad \forall n, p \quad (13)$$

$$\sum_k Q_{jkp} \leq \sum_g \text{Cap}J_{jpg} U_{jg}, \quad \forall j, p \quad (14)$$

$$\sum_a Q_{kap} \leq \sum_g \text{Cap}K_{kpg} U_{kg}, \quad \forall k, p \quad (15)$$

$$\sum_a Q_{amp} \leq \sum_g \text{Cap}M_{mpg} U_{mg}, \quad \forall m, p \quad (16)$$

$$\sum_m Q_{mnp} \leq \sum_g \text{Cap}N_{npg} U_{ng}, \quad \forall n, p \quad (17)$$

$$\sum_j Q_{ijh} \leq \text{Cap}I_{ih}, \quad \forall i, h \quad (18)$$

$$\sum_m Q_{mlp} + \sum_n Q_{nlp} \leq \text{Cap}L_{lp}, \quad \forall l, p \quad (19)$$

$$\sum_g U_{ng} \leq 1, \quad \forall n \quad (20)$$

$$\sum_g U_{mg} \leq 1, \quad \forall m \quad (21)$$

$$\sum_g U_{jg} \leq 1, \quad \forall j \quad (22)$$

$$\sum_g U_{kg} \leq 1, \quad \forall k \quad (23)$$

$$\sum_h Q_{ijh} w_h \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{ijv}, \quad \forall i, j, v \quad (24)$$

$$\sum_p Q_{jkp} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{jkv}, \quad \forall j, k, v \quad (25)$$

$$\sum_p Q_{kap} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{kav}, \quad \forall k, a, v \quad (26)$$

$$\sum_p Q_{amp} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{amv}, \quad \forall a, m, v \quad (27)$$

$$\sum_p Q_{mlp} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{mlv}, \quad \forall m, l, v \quad (28)$$

$$\sum_p Q_{mnp} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{mnv}, \quad \forall m, n, v \quad (29)$$

$$\sum_p Q_{mep} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{mev}, \quad \forall m, e, v \quad (30)$$

$$\sum_p Q_{nlp} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{nlv}, \quad \forall n, l, v \quad (31)$$

$$\sum_p Q_{njp} w_p \leq \sum_v \text{Cap}w_v Y_{njv}, \quad \forall n, j, v \quad (32)$$

$$\sum_p Q_{nbp} w_p \leq \sum_v Capv_v Y_{nbv}, \quad \forall n, b, v \quad (33)$$

$$\sum_h Q_{ijh} v_h \leq \sum_v Capv_v Y_{ijv}, \quad \forall i, j, v \quad (34)$$

$$\sum_p Q_{jkp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{jkv}, \quad \forall j, k, v \quad (35)$$

$$\sum_p Q_{kap} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{kav}, \quad \forall k, a, v \quad (36)$$

$$\sum_p Q_{amp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{amv}, \quad \forall a, m, v \quad (37)$$

$$\sum_p Q_{mlp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{mlv}, \quad \forall m, l, v \quad (38)$$

$$\sum_p Q_{mnp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{mnv}, \quad \forall m, n, v \quad (39)$$

$$\sum_p Q_{mep} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{mev}, \quad \forall m, e, v \quad (40)$$

$$\sum_p Q_{nlp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{nlv}, \quad \forall n, l, v \quad (41)$$

$$\sum_p Q_{njp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{njv}, \quad \forall n, j, v \quad (42)$$

$$\sum_p Q_{nbp} v_p \leq \sum_v Capv_v Y_{nbv}, \quad \forall n, b, v \quad (43)$$

$$Q_{kap}, Q_{jkp}, Q_{ijh}, Q_{njp}, Q_{amp}, Q_{mep}, Q_{mnp}, Q_{mlp}, Q_{nlp}, Q_{nbp}, S_{ap} \geq 0 \quad (44)$$

$$U_{jg}, U_{kg}, U_{mg}, U_{ng}, Y_{kav}, Y_{jkv}, Y_{ijv}, Y_{njv}, Y_{amv}, Y_{mev}, Y_{mnv}, Y_{mlv}, Y_{nlv}, Y_{nbv} \in \{0, 1\} \quad (45)$$

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 به کارگیری 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

تامین شده نشان می دهد. رابطه (۷) کسری از مواد بیو زیستی که توسط مشتری دورریز شده و دارای کیفیت پایین تر می باشد را محاسبه می کند. رابطه (۸) کسری از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل تبدیل شده به انرژی و فروش هستند را نشان می دهد. رابطه (۹) کسری از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل تولید مجدد و یا فروش هستند را نشان می دهد. رابطه (۱۰) رابطه تعادلی در نحوه جمع آوری محصولات بیو زیستی دورریز شده توسط مشتری را در مرکز جمع آوری نشان می دهد. رابطه (۱۱) کسری از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل استفاده به هیچ عنوان نیستند و بایستی انهدام و یا دفن شوند را نشان می دهد. رابطه (۱۲) درصدی از مواد بیو زیستی کم کیفیت که قابل فروش مجدد و بازتولید در مرکز تولید هستند را نشان می دهد. رابطه (۱۳) رابطه تعادلی در مرکز بازیافت را نشان می دهد. روابط (۱۴) تا (۱۹) روابط مربوط به ظرفیت تسهیلات بالقوه و ثابت را نشان می دهد و تضمین می کند که در صورتی که مرکز بالقوه با یک سطح ظرفیت خاص انتخاب شود، سطح ظرفیت مربوط به آن نیز بایستی تامین گردد. روابط (۲۰) تا (۲۳) تضمین می کند که حداکثر از یک سطح ظرفیت مراکز بالقوه می توان استفاده نمود. روابط (۲۴) تا (۳۳) معادلات مربوط به انتخاب وسیله نقلیه غیر همگن را بر اساس وزن مواد اولیه زیست توده و محصولات فراوری شده بیو زیستی نشان می دهد. روابط (۳۴) تا (۴۳) معادلات مربوط به انتخاب وسیله نقلیه غیر همگن را بر اساس حجم مواد اولیه زیست توده و محصولات فراوری شده بیو زیستی نشان می دهد. روابط (۴۴) و (۴۵) نوع و جنس متغیرهای تصمیم گیری مساله را نشان می دهد.

۳-۵ روش برنامه ریزی فازی احتمالی بر روی اعداد غیرقطعی

فرض کنید پارامتر a_{ij} یک پارامتر غیرقطعی می باشد که به صورت احتمالی در نظر گرفته شده که دارای میانگین μ_{ij} و انحراف معیار σ_{ij} می باشد. همچنین تصور می شود که همه پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده به صورت مستقل از هم می باشند؛ لذا میانگین و انحراف معیار تخمین زده شده برای مجموعه اعداد تصادفی احتمالی به صورت زیر قابل بیان است [۳۹]:

$$S_{ij} = \{x_k \mid x_k \in \text{assumed distribution}; k = 1, \dots, N\} \quad (46)$$

که در رابطه فوق x_k مقدار داده تصادفی احتمالی تولید شده است. N تعداد کافی از مجموعه های تصادفی بیان شده است که همه شرایط لازم برای تولید داده تصادفی احتمالی را در بر گیرد. همچنین برای تخمین دقیق داده های احتمالی در نظر گرفته شده، ضریب محدودیت فازی اعداد $T = \tilde{A} = (A^-, A^0, A^+)$ در نظر گرفته شده است. در نتیجه تابع توزیع فازی مثلی به صورت زیر می باشد.

$$A^0 \quad \text{قابل اطمینان ترین ارزش که به اعداد فازی تخصیص یافته است و زمانی که مقدار ارزش ۱ به آن تخصیص یابد به عنوان میانگین تابع توزیع تصادفی} \quad S_{ij} \text{ شناخته می شود}$$

$$A^- = \inf_{i=1, \dots, N} (X_i) \quad \text{به عنوان حداقل مقدار تابع تصادفی} \quad S_{ij} \text{ شناخته می شود}$$

$$A^+ = \sup_{i=1, \dots, N} (X_i) \quad \text{به عنوان حداکثر مقدار تابع تصادفی } S_{ij} \text{ شناخته می شود}$$

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

$$\begin{aligned} \max & C^T X \\ \text{s.t.} & \\ & \frac{A^- + \epsilon A^0 + A^+}{\epsilon} X \leq b \\ & x > 0 \end{aligned} \quad (47)$$

۳-۶ روش برنامه ریزی استوار احتمالی بر روی اعداد غیرقطعی

مدل برنامه ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \min & E = cx + fy \\ \text{s.t.} & \\ & Ax \geq_f d \\ & Bx = 0 \\ & Sx \leq_f Ny \\ & Ty \leq 1 \\ & y \in \{0, 1\}, x \geq 0 \end{aligned} \quad (48)$$

در رابطه فوق، هزینه ثابت احداث مراکز f و هزینه های متغیر حمل و نقل و عملیاتی با c در نظر گرفته شده است. همچنین پارامترهای مربوط به ضرایب محدودیت با S, B, A و T در نظر گرفته شده است. N و d نیز به ترتیب ظرفیت تسهیلات و تقاضای مشتری از محصولات را نشان می دهد. X و Y نیز به ترتیب متغیرهای پیوسته و صفر و یک را نشان می دهد. در روابط فوق پارامترهای ظرفیت و تقاضا فرض شده است که به صورت غیرقطعی و احتمالی فازی در نظر گرفته شده باشد. لذا محدودیت مربوط به کنترل پارامترهای احتمالی فازی به صورت زیر خواهد بود:

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

دو عدد فازی $\tilde{t}$ و $\tilde{r}$ برای نشان دادن چگونگی مقابله با محدودیت های نرم تعریف شده است. در رابطه فوق α و β حداقل شاخص سطح رضایت از محدودیت های انعطاف پذیر را نشان می دهد. همچنین فرض می شود که $\tilde{t}$ و $\tilde{r}$ به صورت داده های فازی مثلی در نظر گرفته شده است که به صورت داده های فازی مثلی

یک هستند؛ کران هر یک از پارامترها به صورت $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ می باشد. همچنین از آنجایی که α و β پارامترهایی مابین صفر و

برای تضمین اینکه پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده، در منطقه موجه مساله قرار بگیرد، نیاز است تا با استفاده از روش برنامه ریز استوار انعطاف پذیر، کنترل شود. بدین ترتیب که در صورتی که پارامترهای تقاضا و ظرفیت منجر به غیرموجه شدن مساله شوند، تابع جریمه در نظر گرفته شده، مانع از انجام این کار می گردد. لذا پارامترهای غیرقطعی احتمالی فازی موجود در محدودیت های مساله با در نظر گرفتن تابع جریمه به صورت زیر تعریف می شود.

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

λ و θ توابع جریمه مربوط به موجه سازی مدل استوار احتمالی است. مدل نهایی کنترل شده به صورت زیر می باشد:

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

$$\begin{aligned}
 & - \left\{ \sum_i \sum_j \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{ij} Y_{ijv} + \sum_j \sum_k \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{jk} Y_{jkv} + \right. \\
 & \quad \sum_m \sum_e \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{me} Y_{mev} + \sum_k \sum_a \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{ka} Y_{kav} + \\
 & \quad \sum_a \sum_m \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{am} Y_{amv} + \sum_m \sum_l \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{ml} Y_{mlv} + \\
 & \quad \sum_n \sum_b \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{nb} Y_{nbv} + \sum_n \sum_j \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{nj} Y_{njv} + \\
 & \quad \left. \sum_m \sum_n \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{mn} Y_{mnv} + \sum_n \sum_l \sum_v \left(\frac{Fv_v^- + \epsilon Fv_v^0 + Fv_v^+}{\epsilon} \right) D_{nl} Y_{nlv} \right\} \\
 & - \left\{ \sum_i \sum_j \sum_h \left(\frac{Sc_{ih}^- + \epsilon Sc_{ih}^0 + Sc_{ih}^+}{\epsilon} \right) Q_{ijh} + \sum_j \sum_k \sum_p \left(\frac{Pc_{jp}^- + \epsilon Pc_{jp}^0 + Pc_{jp}^+}{\epsilon} \right) Q_{jkp} + \right. \\
 & \quad \sum_a \sum_m \sum_p \left(\frac{Cc_{mp}^- + \epsilon Cc_{mp}^0 + Cc_{mp}^+}{\epsilon} \right) Q_{amp} + \sum_m \sum_n \sum_p \left(\frac{Rc_{np}^- + \epsilon Rc_{np}^0 + Rc_{np}^+}{\epsilon} \right) Q_{mnp} + \\
 & \quad \sum_m \sum_l \sum_p \left(\frac{Lc_{lp}^- + \epsilon Lc_{lp}^0 + Lc_{lp}^+}{\epsilon} \right) Q_{mlp} + \sum_k \sum_a \sum_p \left(\frac{Dc_{kp}^- + \epsilon Dc_{kp}^0 + Dc_{kp}^+}{\epsilon} \right) Q_{kap} + \\
 & \quad \left. \sum_n \sum_l \sum_p \left(\frac{Lc_{lp}^- + \epsilon Lc_{lp}^0 + Lc_{lp}^+}{\epsilon} \right) Q_{nlp} + \sum_n \sum_j \sum_p \left(\frac{Pr_{jp}^- + \epsilon Pr_{jp}^0 + Pr_{jp}^+}{\epsilon} \right) Q_{njp} \right\} \\
 & - 9 \left\{ \sum_i \sum_j \sum_v Co_{rv} D_{ij} Y_{ijv} + \sum_j \sum_k \sum_v Co_{rv} D_{jk} Y_{jkv} + \sum_k \sum_a \sum_v Co_{rv} D_{ka} Y_{kav} + \right. \\
 & \quad \sum_a \sum_m \sum_v Co_{rv} D_{am} Y_{amv} + \sum_m \sum_l \sum_v Co_{rv} D_{ml} Y_{mlv} + \sum_m \sum_e \sum_v Co_{rv} D_{me} Y_{mev} + \\
 & \quad \sum_m \sum_n \sum_v Co_{rv} D_{mn} Y_{mnv} + \sum_n \sum_b \sum_v Co_{rv} D_{nb} Y_{nbv} + \sum_n \sum_l \sum_v Co_{rv} D_{nl} Y_{nlv} + \\
 & \quad \sum_n \sum_j \sum_v Co_{rv} 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} + \\
 & \quad \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} \\
 & \quad + \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} - Co_{rv}^{GOV} \\
 & \quad - \sum_a \sum_p \pi_{ap} S_{ap} - \sum_a \sum_p \theta \left[Dem_{ap}^+ (1 - \alpha) \right] - \sum_i \sum_h \lambda \left[CapI_{ih}^- (1 - \beta) \right] \Big\} \\
 & \max Z_{\gamma} = \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\} \quad (52)
 \end{aligned}$$

$$-\phi_{ALD} \left\{ \sum_j \sum_g ALD_{jg} U_{jg} + \sum_k \sum_g ALD_{kg} U_{kg} + \sum_m \sum_g ALD_{mg} U_{mg} + \sum_n \sum_g ALD_{ng} U_{ng} \right\}$$

$$\max Z_p = 1 - \prod_i \left(1 - \prod_a \left(1 - \prod_j \left(1 - \prod_k \left(1 - \prod_h \left(1 - \prod_p \left(1 - \prod_v \left(1 - \left(\frac{Re_{ijh} Y_{ijv}^*}{Re_{jkh} Y_{jkv}^*} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (53)$$

s.t.

$$\sum_k Q_{kap} + S_{ap} = \left(Dem_{ap}^0 + \left[Dem_{ap}^+ (1 - \alpha) \right] \right), \quad \forall a, p \quad (54)$$

$$\sum_j Q_{ijh} \leq \left(CapI_{ih}^0 + \left[CapI_{ih}^- (1 - \beta) \right] \right), \quad \forall i, h \quad (55)$$

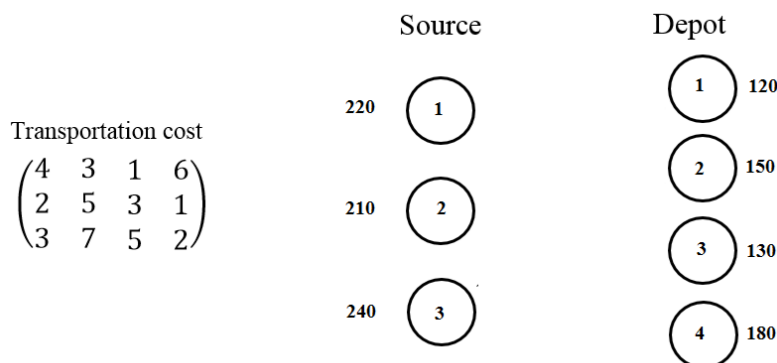
$$(56) \quad \text{معادله (17)-(5) و (45)-(19)}$$

۴ روش حل

۴-۱ 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 طراحی شده شامل دو مساله مکان یابی تسهیلات ظرفیت دار و بهینه‌سازی جریان می‌باشد [۴۰] از این رو پیچیدگی مدل قابلیت کاهش به پیچیدگی مساله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت دار دارد. از سوی دیگر Np-Hard بودن مسایل مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت دار در مقالات مختلف اثبات شده است [۴۱] در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبکه زنجیره تامین زیست توده طراحی شده 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 استفاده شده است. از این رو 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] معرفی شده است. در این رمزگذاری شبکه زنجیره تامین به سطوح تشکیل دهنده آن تقسیم شده 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 مکان‌یابی بر روی منابع صورت گرفته و منابع بایستی تقاضاهای دپو را برآورد کنند.



شکل ۲. نمونه ای از شبکه زنجیره تامین دو سطحی

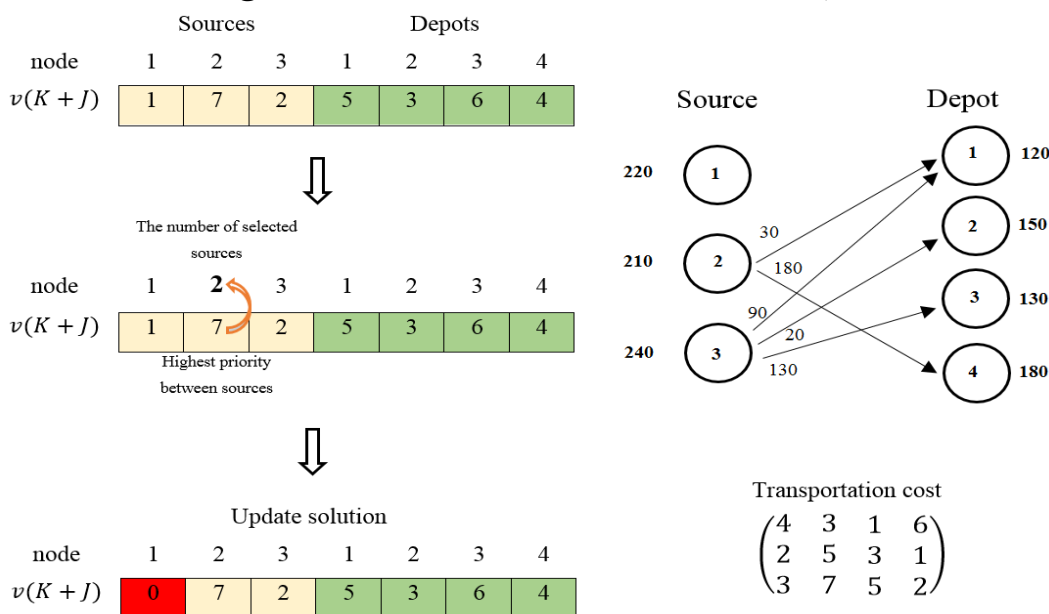
شکل ۳ نمونه ای کروموزوم اولیه و رمز گشایی آن را نشان می دهد. رمز گشایی مبتنی بر اولویت اصلاح شده در شکل ۳ مطابق با گام ۴ زیر می باشد:

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

گام ۲- بزرگترین اولویت (عدد) از بین کل کروموزوم به عنوان اولین سطح تخصیص انتخاب می شود.

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 می شود.

گام ۴- بعد از تعیین منبع و دپو، حداقل مقدار تقاضای دپو و ظرفیت منبع به عنوان مقدار بهینه تخصیص، در نظر گرفته می شود. پس از انجام عمل تخصیص، مقدار تقاضای دپو و همچنین ظرفیت منبع به روزرسانی می شود.



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.

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

Step α . For $p = 1$ to P

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

Step β . While $|\{d\}| < 1$

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

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

$Tr_{(k-1)j} = \inf, \forall j \in J, k \in K, l \in L$

$Cap_{(k-1)} = \cdot, \forall k \in K, l \in L$

Step γ . While $v(|k| + j) \neq \cdot, \forall j \in J$

Step δ . $X_{kjp} = \cdot, S_{jp} = \cdot, \forall j \in J, k \in K, p \in P$

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

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

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

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

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

Step ν . Update demands and capacities

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

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

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

Step λ . If $Cap_{k^*} = \cdot$ then $v(k^*) = \cdot$

If $Dem_{j^*p} = \cdot$ then $v(j^*) = \cdot$

Step η . If $\sum_{j,p} X_{kjp} > \cdot$ then $Y_k = 1$

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

با توجه به ۱۰ سطحی بودن شبکه زنجیره تامین زیست توده طراحی شده، کروموزوم نهایی طراحی شده به شرح شکل ۵ می‌باشد. از آنجایی که مساله به صورت 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 ارایه شده 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 زیست توده

در نهایت با توجه به پیوسته بودن فضای جستجوی الگوریتم‌ها و همچنین گسسته بودن کروموزوم طراحی شده؛ با استفاده از شکل ۶، فضای پیوسته کروموزوم به فضای گسسته تبدیل می‌شود. در این شکل بزرگترین عدد در کروموزوم 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 ۶. نحوه تبدیل فضای پیوسته به فضای گسسته

۴-۲ 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 به دست آمده از آنها، شاخص‌های زیر تعریف شده است [۴۴].

میانگین‌های توابع هدف: از آنجایی که هدف اصلی کسب جواب‌های کارای مطلوب می‌باشد، یعنی به طور هم‌زمان به بهترین مقدار سه تابع هدف نائل شدن؛ از این رو میانگین‌های سه تابع هدف مساله نیز جزو شاخص‌های محاسباتی به کار می‌رود. از آنجایی که 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 به دست آمده برای هر مساله را نشان می‌دهد و هر مقدار تعداد این نقاط بیشتر باشد بدین معنی است که الگوریتم کارایی بیشتری دارد.

بیشترین گسترش: این معیار نشان می دهد که چه میزان از جواب های یک مجموعه پارتو در فضای جواب توزیع شده که از رابطه زیر محاسبه می شود. بزرگ تر بودن مقدار این معیار، نشان دهنده تنوع مناسب جواب های مجموعه پارتو است.

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

فاصله گذاری: نشان دهنده میزان قرار گرفتن جواب ها به طور یکنواخت در کنار هم بوده که از رابطه (58) محاسبه می شود.

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

در رابطه بالا، $|Q|$ بیانگر اندازه آرشیو پارتو می باشد و مقدار $\bar{d}$ را می توان از رابطه (59) محاسبه کرد. الگوریتمی که میزان این معیار کمتر باشد، مطلوب تر خواهد بود.

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

فاصله از نقطه ایده آل: این معیار که برای اندازه گیری میزان نزدیکی به سطح بهینه پارتو واقعی، به کار می رود که از رابطه (60) محاسبه می شود. الگوریتمی که کمترین مقدار این شاخص را داشته باشد، کارایی بالاتری دارد.

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

در این رابطه n تعداد جواب ها در مجموعه بهینه پارتو است.

۴-۳ تنظیم پارامتر الگوریتم های فرا ابتکاری

در این بخش به تنظیم پارامتر الگوریتم های فرا ابتکاری پیشنهادی در حل مدل چندهدفه شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار با استفاده از روش تاگوجی پرداخته شده است. در این روش برای هر پارامتر الگوریتم فرا ابتکاری، سه سطح پیشنهادی در نظر گرفته می شود و بر اساس جدول تاگوجی، آزمایشات مربوطه با استفاده از روابط (61) و (62) انجام می پذیرد. نتایج آزمایشات پس از تجزیه و تحلیل بهترین مقدار پارامتر الگوریتم مذکور را نشان می دهد. [45] در رابطه (61)، S_i مقدار شاخص به دست آمده از انجام هر آزمایش تاگوجی و S_i^* بهترین مقدار شاخص در بین کلیه آزمایش های تاگوجی می باشد.

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

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

جدول (۱) سطوح پیشنهاد و بهینه پارامتر الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II 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 یادگیری 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 ساینز کوچک با نرم افزار GAMS

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

جدول ۲. اندازه مساله نمونه در ساینز 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 دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. کلیه پارامترهای تولید شده در جداول ۳ به صورت 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}	$(۱, ۲)^{\sim}U$	w_h	$(۰/۰۳, ۰/۰۵)^{\sim}U$
α_{ap}	$(۰/۱, ۰/۲)^{\sim}U$	w_p	$(۰/۰۸, ۰/۱)^{\sim}U$
β_{mp}, γ_{mp}	$(۰/۳, ۰/۴)^{\sim}U$	v_h	$(۰/۳, ۰/۵)^{\sim}U$
δ_{np}, σ_{np}	$(۰/۲, ۰/۳)^{\sim}U$	v_p	$(۰/۵, ۰/۸)^{\sim}U$
$Pr_{ap}, Pr_{ep}, Pr_{bp}, CapL_{lp}$	$(۱۰۰۰, ۱۲۰۰)^{\sim}U$	$F_{jg}, F_{kg}, F_{mg}, F_{ng}$	$(۱۰۰۰۰, ۱۲۰۰۰)^{\sim}U$

$(1000, 1200) \sim U$	FC_v	$(5000, 6000) \sim U$	$CapJ_{jpg}, CapK_{kpg}$
$(10, 100) \sim U$	$D_{ka}, D_{jk}, D_{ij}, D_{nj}, D_{am}$	$(2000, 3000) \sim U$	$CapM_{mpg}, CapN_{npg}$
$(10, 100) \sim U$	$D_{me}, D_{mn}, D_{ml}, D_{nl}, D_{nb}$	$(500, 700) \sim U$	$Capw_v, Capv_v$
$(5, 8) \sim U$	Co_{2v}	$(50, 80) \sim U$	π_{ap}
$(50, 100) \sim U$	$E_{jg}, E_{kg}, E_{mg}, E_{ng}$	۱۰۰۰۰	Co_{γ}^{GOV}
۰.۵	g	$(1, 3) \sim U$	$Pe_{jp}, Ce_{mp}, Re_{np}$
۱	$\varphi_{ALD}, \theta_{job}$	$(1, 3) \sim U$	Le_{lp}, RPe_{jp}
$(0.1, 0.4) \sim U$	$Re_{ijh}, Re_{jkg}, Re_{kap}$	$(500, 1000) \sim U$	$JOB_{jg}, JOB_{kg}, JOB_{mg}, JOB_{ng}$
		$(10, 20) \sim U$	$ALD_{jg}, ALD_{kg}, ALD_{mg}, ALD_{ng}$
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	پارامتر
$(2000, 3000) \sim U$	$(1500, 2000) \sim U$	$(1000, 1500) \sim U$	Dem_{ap}
$(8000, 9000) \sim U$	$(7000, 8000) \sim U$	$(6000, 7000) \sim U$	$CapI_{ih}$
$(8, 10) \sim U$	$(7, 8) \sim U$	$(5, 7) \sim U$	FV_v
$(3, 4) \sim U$	$(2, 3) \sim U$	$(1, 2) \sim U$	$Rc_{np}, Lc_{lp}, RPe_{jp}$
$(3, 4) \sim U$	$(2, 3) \sim U$	$(1, 2) \sim U$	$Pc_{jp}, Sc_{ih}, Dc_{kp}, Cc_{mp}$

پس از تولید اعداد تصادفی و طراحی مساله نمونه ساینز کوچک، در ادامه برای حل مساله شبکه زنجیره تامین ۳ هدفه با نرم افزار GAMS از روش تصمیم گیری چندهدفه معیار جامع نرم ۱ استفاده شده است. از این رو مقدار بهینه تابع هدف اول ۱۸۸۳۸۶۹۰، مقدار بهینه تابع هدف دوم ۹۸۸۳ و مقدار بهینه تابع هدف سوم ۱ به دست آمده است. در نتیجه با اعمال وزن یکسان به هر سه تابع هدف جواب کارای به دست آمده از حل مساله شامل مقدار ۱۸۲۶۶۸۲۰/۱۴ برای تابع هدف اول، ۹۶۸۳ برای تابع هدف دوم و ۰/۹۹۸ برای تابع هدف سوم می باشد. جدول ۴ مکان بهینه تسهیلات حاصل از جواب کارا را نشان می دهد.

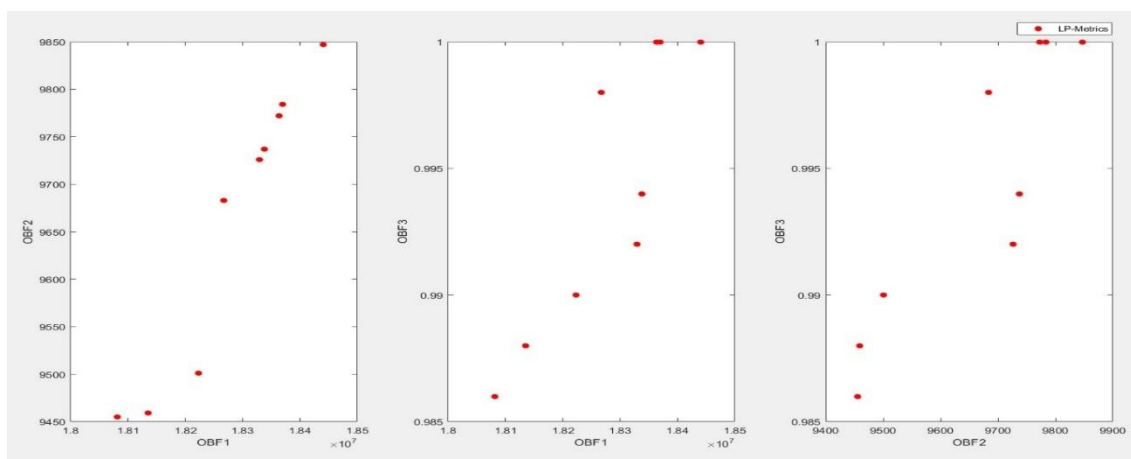
جدول ۴. مکان بهینه تسهیلات انتخاب شده به همراه سطح ظرفیت

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 ارایه شده برای روش معیار جامع، مجموعه ای از جواب های کارای به صورت جدول ۵ می باشد. شکل ۷ نیز جبهه پارتو به دست آمده از حل مساله نمونه ساینز کوچک را روش معیار جامع نشان می دهد.

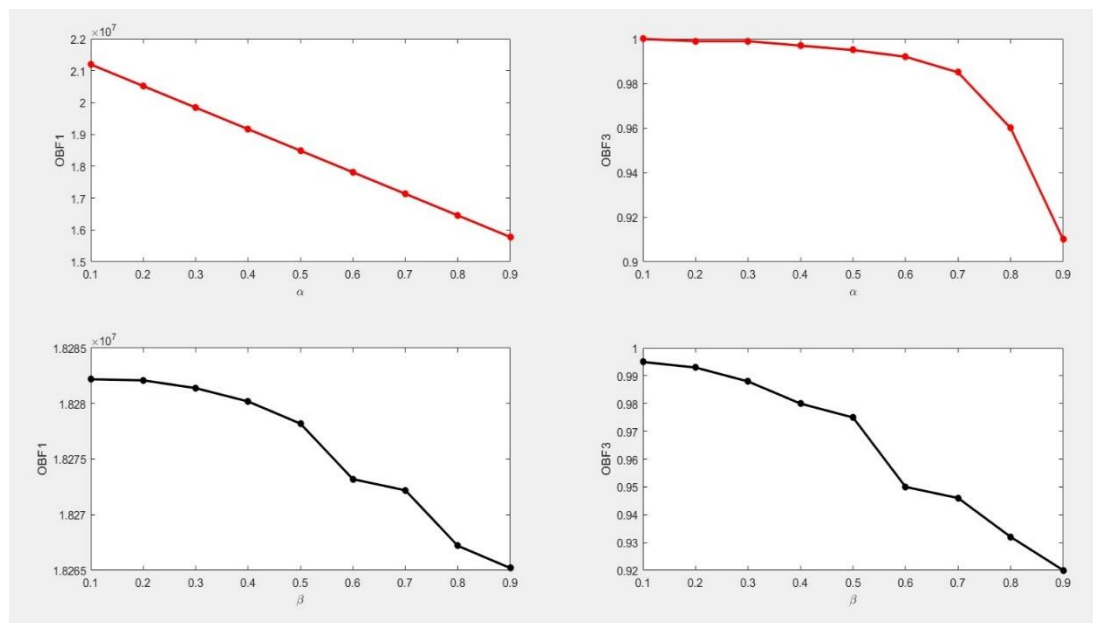
جدول ۵. مجموعه جواب‌های کارای به‌دست‌آمده از حل مساله نمونه سائز کوچک

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 سائز 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 درعین حال تعداد شغل‌های ایجادشده و نرخ قابلیت اطمینان به دلیل افزایش تعداد تسهیلات افزایش‌یافته است. ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که رابطه مستقیمی بین هزینه‌ها، تعداد شغل‌های 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.



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

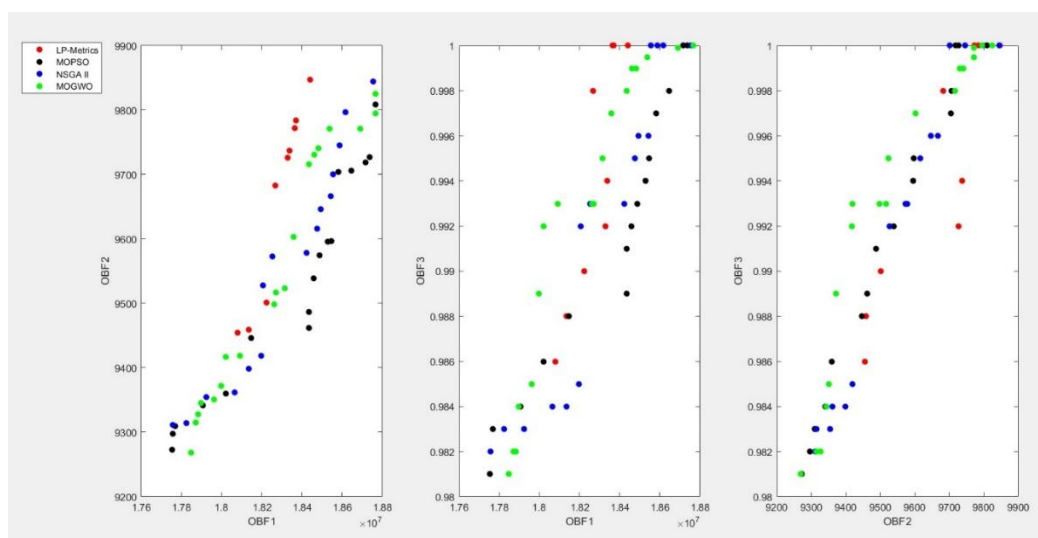
با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت، مشاهده می‌گردد با افزایش پارامترهای α_1 و β_1 ، تنها مقدار تابع هدف اول و سوم افزایش می‌یابد. این امر نشان دهنده آن است که با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار تقاضا افزایش یافته و در نتیجه هزینه‌های حمل و نقل افزایش و قابلیت اطمینان برای برآورده سازی تقاضای مشتریان 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 سائز کوچک با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

جهت بررسی و ارزیابی الگوریتم‌های MOPSO، NSGA II و MOGWO، مساله نمونه سائز کوچک با الگوریتم‌های مذکور حل و شاخص‌های مقایسه جواب‌های کارا و همچنین جبهه پارتو به‌دست آمده از حل سه روش نشان داده شده است. جدول ۶ شاخص‌های به‌دست آمده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری MOPSO، NSGA II و MOGWO را در مقایسه با روش معیار جامع در حل مساله نمونه سائز کوچک را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست آمده 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 در نهایت الگوریتم MOGWO در کسب شاخص‌های تعداد جواب کارا و زمان محاسباتی روش حل بوده‌اند.

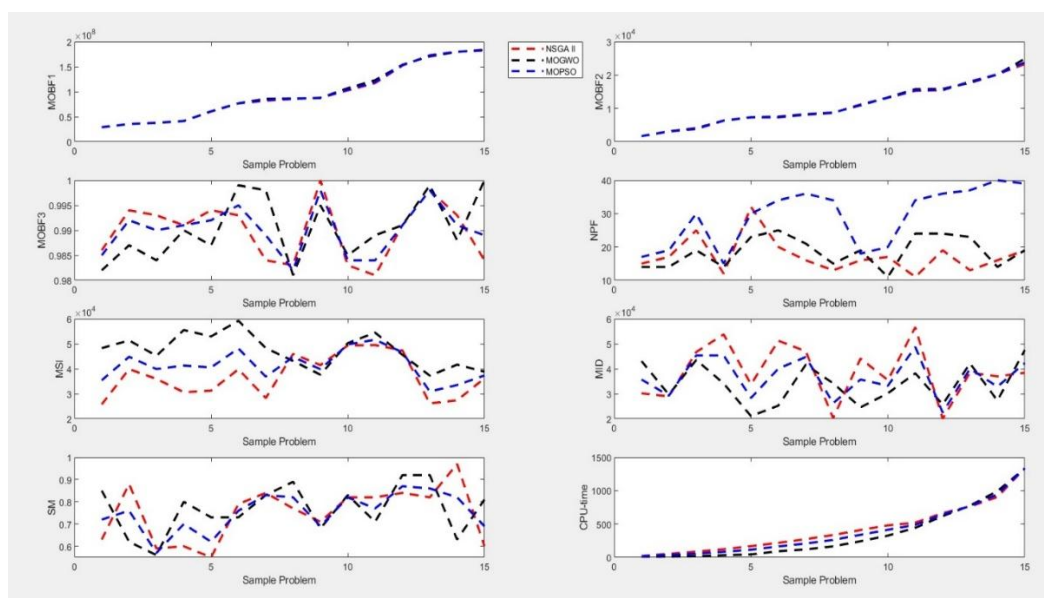
جدول ۶. شاخص‌های به‌دست‌آمده از حل مساله نمونه سائز کوچک با روش‌های مختلف حل

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 سائز کوچک توسط روش‌های حل مختلف**۵-۳ حل مسایل نمونه سائز های بزرگ‌تر با الگوریتم‌های فرا ابتکاری**

در ادامه ۱۵ مساله نمونه در سائزهای بزرگ‌تر مطابق با داده‌های ارایه‌شده در جدول ۳ طراحی شده است. هر یک از مسایل نمونه طراحی شده در سائز بزرگ‌تر توسط الگوریتم‌های MOPSO، MOGWO و NSGA II ۵ بار اجرا شده‌اند که میانگین‌های مجموعه شاخص‌های هر یک از اجراها در جدول ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به کسب مقادیر مختلف شاخص‌های توسط الگوریتم‌های 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. از این رو، در صورتی که 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 در صورتی که مقدار آماره آزمون P بیشتر از ۰/۰۵ 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.

شاخص‌های مورد مقایسه از دیگر روش‌های تصمیم‌گیری 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 پرداخته شده 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 به صورت نمایی افزایش می‌یابد که دلیلی بر NP-Hard بودن مساله می‌باشد. باین حال الگوریتم MOGWO تا مسایل سائز متوسط از نظر زمان محاسباتی بهتر از الگوریتم‌های دیگر می‌باشد ولی با افزایش سائز مساله زمان محاسباتی کسب‌شده توسط این الگوریتم به شدت افزایش یافته است.

۴-۵- انتخاب کاراترین الگوریتم با روش TOPSIS

در بخش قبل مقایسات معناداری به منظور تعیین اختلاف معناداری بین میانگین‌های شاخص محاسباتی به دست آمده 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 به منظور انتخاب کاراترین الگوریتم از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS که گزینه‌ها را بر اساس فاصله آنها از ایده آل‌های مثبت و منفی ارزیابی و اولویت بندی می‌کند [۴۶] استفاده شده است. لذا جدول ۱۰ میانگین‌های کلی کسب‌شده از ۷۵ مساله نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. میانگین‌های شاخص‌های به دست آمده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

الگوریتم	MOBF1	MOBF2	MOBF3	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

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

۶ نتیجه گیری

شرایط اقتصادی جهانی و اهمیت زیست محیطی منجر به توجه هر چه بیشتر دولت ها، سازمان های خصوصی و دولتی و شرکت های زیست محیطی به توسعه مدل های ریاضی شبکه زنجیره تامین شده است. در این مقاله با ارایه یک مدل ریاضی تلاش شد تا شبکه ای جامع از تامین، تولید، پالایش و عرضه محصولات زیست توده به مشتریان طراحی گردد که در آن مسایل اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی رعایت شده باشد. با توجه به غیرقطعی بودن برخی از مهم ترین پارامترهای مساله از روش بهینه سازی استوار احتمالی برای کنترل پارامترها استفاده شد. نتایج استفاده از این روش، نشان دهنده افزایش هزینه ها و کاهش قابلیت اطمینان در مقابل افزایش نرخ عدم قطعیت بود. برای حل مساله از الگوریتم های فرا ابتکاری MOPSO، NSGA II و MOGWO چندهدفه استفاده شد. نتایج حل مساله در سائزهای بزرگ تر نشان از کارایی بسیار بالای الگوریتم MOPSO در مقابل الگوریتم های دیگر بود. جهت مقایسه دو الگوریتم شاخص های (میانگین های توابع هدف، شاخص فاصله گذاری، شاخص فاصله از نقطه ایده آل، شاخص بیشترین گستردگی، شاخص تعداد جواب پارتو و زمان محاسباتی) مورد مقایسه قرار گرفت. برای بهبود کیفیت کار پیشنهاد می شود تا مطالعه موردی بر روی یک مورد واقعی اجرا شود. همچنین در نظر گرفتن زنجیره رقابتی برای مساله زیست توده نیز یکی دیگر از پیشنهاد های 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.

- [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., & Pishvae, 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., & Pishvae, 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.

- [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] Pishvaei, 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.
- [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.