

طراحی شبکه زنجیره تامین چندسطحی، چنددوره‌ای، چندمحصولی زیست توده پایدار با در نظر گرفتن تنوع مواد ورودی

احمد رجبیان^۱، سید محمد حسن حسینی^{۲*}، حسین عموزاد خلیلی^۳، محمد امیرخان^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

رسید مقاله: ۲۵ اسفند ۱۴۰۲

پذیرش مقاله: ۱ مرداد ۱۴۰۳

چکیده

مدل سازی ریاضی در زمینه طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار چندسطحی و چندمحصولی، به بررسی رفتار و ارتباط بین عوامل موثر بر این شبکه می پردازد. این موارد شامل ابعاد مختلف شبکه، میزان تقاضا و عرضه، نیازهای منابع، قیود و محدودیت های مختلف است. مدل سازی و حل این مسایل با در نظر گرفتن جنبه های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به طور هم زمان، این امکان را می دهد تا بتوانیم ضمن بهینه سازی فاکتورهای موثر در اجرای شبکه زنجیره تامین، گزینه های کاهش هزینه با حفظ کیفیت خدمات و افزایش رفاه اجتماعی را نیز جستجو کنیم. در این تحقیق یک مدل برنامه ریزی ریاضی چندهدفه عدد صحیح مختلط برای به کارگیری در یک زنجیره تامین زیست توده چند سطحی و چندمحصولی ارایه شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II مورد ارزیابی قرار گرفته است که با استفاده از این مدل می توانیم مقادیر بهینه برای اجزای اصلی زنجیره تامین در دراز مدت را تعیین نماییم. مهم ترین مقادیری که با استفاده از این مدل می توانیم محاسبه نماییم عبارت است از: مقدار بهینه تولید گلیسرین، بیودیزل، جاتروفا، جلبک و مقدار ضایعات روغن در پالایشگاه های زیستی، تعیین مقدار بهینه روغن جاتروفا و جلبک، تعیین مقدار تولید مواد اولیه دارو و تولید کود در مراکز استخراج، میزان حمل و نقل جاتروفا، جلبک، بیودیزل، مقدار ضایعات روغن، نوروزک، کود و خرزهره، تعیین ظرفیت مراکز جمع آوری و استخراج روغن. علاوه بر این، یک تحلیل حساسیت با تغییراتی روی مقدار افسیلون انجام شده است. بر طبق نتایج به دست آمده سطح تغییرات معنی دار افسیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ به عنوان بردار بهبود دهنده تعیین شده است. به طوری که دامنه تغییرات افسیلون برای جستجوی جواب بهینه محلی برای تابع هدف اول ۶۵۰ و برای تابع هدف دوم در افسیلون ۶۰۰ تعیین شده است. همچنین، تغییرات مقدار توابع هدف را در صورت تغییر در مقدار ظرفیت میادین محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین زیست توده، چند دوره‌ای، پایداری، چند محصولی، تنوع مواد ورودی.

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: sh.hosseini@shahroodut.ac.ir

۱ مقدمه

استفاده گسترده‌تر از فناوری زیست‌توده در زندگی روزمره و افزایش جمعیت جهان منجر به افزایش چشمگیر مصرف انرژی شده است [۱]. از طرف دیگر، الزام کاهش انتشار کربن، در تولیدات و اجرای مستمر و توسعه محصول در حالت انتشار کم کربن در صنایع مختلف توجه به رشد و توسعه انرژی‌های جایگزین از اهمیت خاصی برخوردار است [۲]؛ زیرا، وابستگی به مصرف انرژی نیز در حال افزایش است. در سراسر جهان، بخش عمده‌ای از انرژی موردنیاز در حال حاضر از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. باین‌حال، انتظار می‌رود که این منابع عمدتاً مورد استفاده تا قرن آینده کاهش یابد [۳]. همچنین، به دلیل سوزاندن سوخت‌های فسیلی، سطح دی‌اکسید کربن (CO_2) در اتمسفر افزایش یافته است که مستقیماً با گرم شدن کره زمین مرتبط است [۴]. زیرا، انرژی نقش حیاتی در معیشت و امنیت غذایی مردم در سراسر جهان ایفا می‌کند و منجر به چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی می‌شود [۵]. بنابراین، مدیریت انرژی صحیح می‌تواند تاثیر مثبتی برای توسعه پایدار داشته باشد و به عنوان یک منبع حیاتی و انرژی به صورت سبز عمل کند [۶]. به همین دلیل، محققان همواره بر تاثیرات منفی زیست‌محیطی و منابع محدود آن تاکید می‌کنند که منبع فسیلی برای تولید انرژی پایدار مناسب نیست [۷]. علاوه بر توجه به مسایل زیست‌محیطی اخیراً توجهاتی به ارزیابی چرخه زندگی اجتماعی که به عملکرد اجتماعی محصولات می‌پردازد در مسایل تولید انرژی‌های پاک نیز توسعه یافته است [۸]. بر این اساس، این رویکردها می‌توانند به رفع چالش‌ها و نگرانی‌های مرتبط با پایداری تولید تجاری انرژی کمک کنند [۹].

در چنین شرایطی، استفاده از سوخت‌های زیستی می‌تواند ضمن کاهش آلاینده‌های جوی، به پایداری در جامعه نیز کمک کند. سوخت‌های زیستی از مواد خام زیست‌توده در شکل‌های مختلف مایع، جامد یا گاز تولید می‌شوند. بیودیزل و اتانول زیستی رایج‌ترین سوخت زیستی مایع هستند که به‌عنوان جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی و گازوییل در بخش حمل‌ونقل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بیودیزل به‌عنوان یک سوخت زیستی مایع از آلکیل استرهای اسید چرب ساخته‌شده از تری‌گلیسیریدها، دی‌آسیل‌گلیسرول‌ها، اسیدهای چرب آزاد و فسفولیپیدها تشکیل می‌شود که به‌طور سنتی از روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی حاصل می‌شود [۱۰]. فرایندهای مختلفی در تولید زیست‌توده از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی وجود دارند که در آن تبادل استری فرآیند کلیدی است و مهم‌ترین فرآیند برای تولید سوخت پاک و سازگار با محیط‌زیست است [۱۱]. تبادل استری معمولاً با استفاده از الکل‌های اولیه و ثانویه انجام می‌شود. یک تنگنای عمده محدود کردن توسعه صنعت زیست‌توده، تهیه و قیمت مواد اولیه است [۱۲]. سوخت زیستی ۱/۵ تا ۲ برابر از سوخت دیزل گران‌تر است که ۷۰ تا ۹۵ درصد به خاطر هزینه روغن گیاهی یا چربی حیوانی است. همچنین، برخی از مواد خام خوراکی هستند و استفاده از آن‌ها برای تولید زیست‌توده توسط فائو نقد می‌شود [۷]. از این رو، هزینه اولیه زیست‌توده را می‌توان به میزان قابل توجهی با استفاده از ماده خام ارزان‌تر مثل روغن‌های غیرخوراکی یا روغن پسماند کاهش داد. در این میان ریز جلبک به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین مواد برای تولید زیست‌توده در آینده محسوب می‌شود که قادر به پاسخگویی به تقاضای جهانی برای سوخت‌های حمل‌ونقل است.

در بخش‌های مختلف صنعت، زنجیره تامین زیست‌توده شامل رشد (تولید)، برداشت، انتقال، جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تبدیل زیست‌توده به محصول نهایی است و بهره‌وری و فناوری در هر بخش روی دیگر بخش‌ها اثر می‌گذارد. انتخاب نوع زیست‌توده، پایداری و سوددهی در تولید ماده خام و هم‌چنین مقیاس تولید و تبدیل زیست‌توده به مواد ارزشمند در مقیاس بالا از جمله موارد مهم در این زمینه به شمار می‌رود. با توجه به این که طراحی بهینه و پایدار شبکه زنجیره تامین سوخت‌های زیستی نقش اساسی در کاهش هزینه‌ها و تجاری‌سازی آن‌ها دارد، از این رو در این پژوهش به طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده که شامل تعیین مکان بهینه برای احداث پالایشگاه و تولید از منابع زیست‌توده غیرخوراکی نظیر جاتروفا، نوروزک، خرزهره زرد، ریز جلبک و روغن پسماند پرداخته می‌شود. مدل پیشنهادی شامل یک برنامه‌ریزی ریاضی بر اساس مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است که تمامی لایه‌های مربوط به زنجیره تامین زیست‌توده از مراکز تهیه فیداستاک تا مراکز مصرف زیست‌توده را در نظر می‌گیرد. بنابراین، با توجه به این که مطالعات اخیر در زمینه تامین انرژی بر منابع انرژی پایدار در بسیاری از جنبه‌ها متمرکز است [۱۳]، سوخت‌های زیستی را می‌توان به‌عنوان جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی در نظر گرفت [۱۴].

بر اساس موارد اشاره‌شده در بالا، مهم‌ترین هدف تحقیق حاضر طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار با در نظر گرفتن الزامات اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی چند سطحی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن تنوع مواد ورودی می‌باشد که برای راه‌اندازی تاسیسات زیست‌توده لازم و ضروری است. بنابراین، مهم‌ترین مزیت‌های حاصل از این تحقیق این است که، چگونه یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده را می‌توان طراحی و مدیریت کرد که تمام سطوح زنجیره تامین از منابع تامین زیست‌توده تا تاسیسات بیوگاز را باهم ترکیب نماید. برای این منظور، مرتبط‌ترین و جدیدترین منابع نظری و کاربردی در این حوزه بررسی شده است تا بر اساس آن‌ها یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده طراحی شود و به‌عنوان روش پیشنهادی ارائه گردد. سرانجام، مدل پیشنهادی با توجه به اینکه سه جنبه پایداری را همزمان لحاظ می‌کند با استفاده از روش اپسیلون محدودیت به یک مساله تک هدفه تبدیل شده و سپس با استفاده از روش فراابتکاری NSGA-II نیز حل شده است.

در بخش دوم یک مرور ادبیات برای مشخص کردن شکاف تحقیق ارائه‌شده است. در بخش سوم روش مدل‌سازی تحقیق ارائه‌شده است. در بخش چهارم، نتایج به‌کارگیری مدل به همراه تحلیل حساسیت ارائه‌شده است. در بخش پنجم، یک نتیجه‌گیری کلی به همراه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه‌شده است.

۲ مرور ادبیات

در این بخش به معرفی مطالعاتی که در حوزه زنجیره تامین زیست‌توده طی سال‌های گذشته به انجام رسیده است می‌پردازیم. برای مثال، حسینعلی زاده و همکاران [۱۵]، یک مدل چندهدفه چند دوره‌ای جامع برای طراحی یک برنامه توسعه بیودیزل با استفاده از منابع اولیه روغن پسماند خوراکی، سویا، آفتابگردان و کلزا تشکیل دادند و ترکیبات مختلف بیودیزل و منابع اولیه را مقایسه کردند. یک مجموعه پارتو با استفاده از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده به‌دست آمده است. بر اساس نتایج آن‌ها، B5 و B40 مناسب‌ترین گزینه‌های موجود در مجموعه پارتو

هستند. دل خوش و سجادی [۳]، یک زنجیره تامین سوخت زیستی ریز جلبک را از طریق یک رویکرد دومارحله‌ای جهت تجاری‌سازی تولید سوخت زیستی از جلبک به‌عنوان منبع جدید انرژی توسعه دادند. در مرحله اول آن‌ها از روش بهترین بدترین (BWM) برای تعیین بهترین سیستم کشت استفاده کردند و در مرحله دوم یک مدل ریاضی دو هدفه ارائه دادند که به‌طور هم‌زمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را بهینه می‌کند. همچنین یک مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو برای مقابله با ماهیت غیرقطعی زنجیره تامین سوخت زیستی پیشنهاد کردند. آن‌ها برای اولین بار در ادبیات، استفاده مجدد از گازها و تصفیه فاضلاب در مراحل مختلف به‌عنوان مواد خام برای مراحل دیگر را مورد بررسی قرار دادند. دورماز و بلگین [۱۶] یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه پایدار برای طراحی زنجیره تامین زیست توده ارائه داده‌اند. برای این منظور، یک برنامه‌ریزی بهینه‌سازی شبکه زنجیره تامین زیست توده در قالب یک رویه روش سه مرحله‌ای برای حل مساله ارائه شده که با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه نسبت به حل یک مساله در دنیای واقعی اقدام شده است. محجوب و همکاران [۱۷]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای طراحی بالادست و پایین دست زنجیره تامین زیست توده با استفاده از سه نوع زیست توده شامل جاتروفا (نسل دوم)، پسماندهای کشاورزی و کود دامی (نسل دوم) و ریز جلبک (نسل سوم) برای تولید انرژی زیستی ارائه کردند. آن‌ها این مدل را با استفاده از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده راه‌حل‌های بهینه پارتو، حل کردند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مقدار انرژی زیستی تولید شده بدون توجه به نوع آن، تولید انرژی از ریز جلبک و جاتروفا بیشتر از پسماندهای زیستی قابل دوام است. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که هزینه تولید و هزینه سرمایه‌گذاری به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را بر هزینه کل شبکه زنجیره تامین دارند. در تحقیق دیگری که توسط رضایی و همکاران [۱۸] صورت گرفته، منابع غیرخوراکی مانند نوروک، جاتروفا، و روغن پخت‌وپز پسماند در نظر گرفته و یک مدل بهینه‌سازی استوار بر اساس سناریو برای طراحی شبکه‌های زنجیره تامین بیودیزل تحت عدم قطعیت ارائه شده است. در این مدل برخی از پارامترها از جمله تقاضا، عرضه، هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی دارای ماهیت غیرقطعی هستند از این رو برای اولین بار در ادبیات، مقدار پارامترهای نامعین بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی سناریو در هر سناریو تخمین زده و احتمال وقوع سناریوها مشخص شده است. علاوه بر این، یک محدودیت محیطی در نظر گرفته می‌شود که در آن مقدار انتشار گاز کربن دی‌اکسید نباید از حد مجاز فراتر رود. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده اثربخشی رویکرد ارائه شده در طراحی شبکه‌های زنجیره تامین بیودیزل تحت عدم قطعیت‌ها است و تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات را باهدف به حداقل رساندن هزینه کلی زنجیره تامین تعیین می‌کند. گولر و همکاران [۱۹] یک رویکرد مدل‌سازی مناسب و تجزیه و تحلیل حساسیت برای تاسیسات انرژی زیست توده ارائه کرده‌اند. برای این منظور، این مطالعه رویکردی برای تعیین مکان تاسیسات زیست توده ارائه می‌دهد که سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، منطق فازی و بهترین راه‌حل بدترین روش (BWM) را که یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) و به‌تازگی توسعه یافته است، با یکدیگر ترکیب می‌کنند. پوراتیچ و همکاران [۱۳] یک رویکرد بهینه‌سازی دوهدفه برای عرضه زباله‌های متعدد کشاورزی و صنعتی به یک سیستم تولید هم‌زمان و ترویج اقتصاد زیستی قابل بازیافت ارائه دادند. هدف از این تحقیق ارزیابی کمی است که نشان دهد آیا حمل انواع مختلف زیست توده به نیروگاه به‌جای دفن زباله، اقتصادی و زیست‌محیطی است و تعیین

زیست توده مورد نیاز با توجه به در دسترس بودن نیروی تولید برای هر زیست توده با منشا کشاورزی و صنعتی چه میزان است. سانچز گارسیا و همکاران [۲۰] مساله طراحی زنجیره تامین زیست توده را در شرایط چندهدفه بررسی کرده و بر روی به حداقل رساندن هم زمان هزینه کل و انتشار کربن از وسایل حمل و نقل تمرکز کرده اند. ایشان در تحقیق خود، مدل های تصادفی و فازی برای تصمیم گیری استراتژیک (مکان های بهینه کارخانه) و تصمیم گیری های تاکتیکی (جریان های مواد، انواع کامیون و غیره)، تحت عدم قطعیت تقاضا را توسعه داده و برای حل این مدل ها از رویکرد اپسیلون محدودیت استفاده کرده اند. احمدوند و همکاران [۱۴] یک مدل بهینه سازی دوهدفه برای برنامه ریزی تاکتیکی زنجیره های تامین زیست توده مبتنی بر جنگل به منظور تعیین معاوضه بین هزینه های کل و انحرافات احتمالی از ذخیره ایمنی توسعه دادند. در تحقیق ایشان، هدف اول به حداقل رساندن هزینه های زنجیره تامین بالادستی و هدف دوم به حداقل رساندن انحرافات منفی موجودی ماهیانه از موجودی ایمنی است. متغیرهای تصمیم گیری شامل جریان بهینه زیست توده ماهانه، پیش پردازش و سطوح موجودی است. نتایج نشان می دهد که در صورت انحراف سطح موجودی از موجودی ایمنی، حداکثر ۱۸ درصد صرفه جویی در هزینه امکان پذیر است. در مطالعه دیگری، مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده مبتنی بر جنگل برای تولید گاز سنتز در سطح تاکتیکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها توسط احمدوند و صولتی [۲۱] بررسی شده است. در این تحقیق، یک مدل بهینه سازی استوار توسعه یافته و برای یک آسیاب خمیرسازی کاغذ کرافت در بریتیش کلمبیای کانادا به عنوان مطالعه موردی اعمال شده است. کل هزینه زنجیره تامین مطالعه موردی بر اساس مدل بهینه سازی استوار ۶۷ درصد بیشتر از مدل قطعی است، با این حال، مدل قوی یک راه حل بهینه واحد ارائه می دهد که برای همه مقادیر پارامتر در بازه های عدم قطعیت در نظر گرفته شده امکان پذیر است. خدیوی [۲۲] در مطالعه خود به گازی شدن به عنوان یکی از فناوری های پردازش برای تبدیل زیست توده به گاز سنتز و گاز طبیعی تجدیدپذیر پرداخته است. همچنین، در مطالعه خود به امکان سنجی اقتصادی و میزان کاهش انتشار به عنوان عوامل مهمی که بر تصمیمات سرمایه گذاری مربوط به گاز سازی زیست توده تاثیر گذارند، توجه کرده اند. بنابراین، پس از شناسایی بهترین جایگزین برای تبدیل به گاز برای سرمایه گذاری، به حداقل رساندن هزینه ها و انتشارات زنجیره تامین زیست توده بسیار مهم است، زیرا هزینه های زنجیره تامین می تواند تا ۵۰٪ از کل هزینه تبدیل به گاز باشد و انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از فعالیت های زنجیره تامین می تواند جبران شود. ونگ و همکاران [۳] یک مطالعه تطبیقی بر روی دو پروژه تصفیه بیوگاز از زباله های آبی پروری، به عنوان یک صنعت معمولی با مصرف منابع بالا و صنعت کشاورزی انجام دادند. روش ارزیابی چرخه عمر برای تجزیه و تحلیل شدت اثرات زیست محیطی و ارزیابی طرح های بهبود و بهینه سازی هدفمند اتخاذ شده است. شوچنکو و همکاران [۲۳] در مطالعه خود ترکیب، خواص، ساختار و کاربرد تولید خمیر کرافت سفید شده زیستی اصلاح شده با تبدیل کاتالیزوری با به کارگیری آنزیم های پنی سلیم و روکولوزوم نشان دادند. در نتیجه بیو کاتالیز انجام شده، محصولات محلول قند که شامل عمدتاً گلوکز، زایلوبیوز، زایلوز و همچنین سایر قندهای احیا کننده جزئی هستند به دست آمد. بای و همکاران [۶] در تحقیق خود سناریوهای پرورش خوگ و استفاده از منابع کود اصلی ناشی از آن را از دیدگاه های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی برای تولید زیست توده را بررسی کرده اند. نتایج نشان می دهد که پرورش خوگ در چین خطرات زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی

بالقوه قابل توجهی دارد. حسین زاده و همکاران [۹]، یک تجزیه و تحلیل برای ابعاد پایداری در دنیای واقعی با استفاده از ارزیابی چرخه زندگی زیست محیطی و اجتماعی برای منابع زیست توده پایدار ارائه کرده‌اند. بنابراین، در مطالعه خود بر سه رکن اصلی پایداری، یعنی زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی تمرکز کرده‌اند و نشان داد که به طور سنتی، ارزیابی چرخه حیات زیست محیطی به طور گسترده برای ارزیابی اثرات زیست محیطی محصولات در طول چرخه عمر آنها پذیرفته شده است.

بر اساس بررسی‌هایی که در ادبیات تحقیق انجام شده است، طبق دانش به دست آمده مطالعه‌ای که به طور هم‌زمان یک رویکرد راه‌حل چندمرحله‌ای با ترکیب یک مدل‌سازی برای مکان‌یابی و مسیریابی مراکز پالایشگاهی تولید زیست‌توده که قادر باشد ضمن تعیین مکان‌های مستعد جریان زنجیره تامین پایدار زیست‌توده را مدیریت کند، وجود ندارد. در این راستا برای رفع شکاف شناسایی شده در ادبیات مربوط به موضوع تحقیق، این مطالعه در درجه اول یک مدل یکپارچه که به طور هم‌زمان هم مکان‌یابی و هم مسیریابی در طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار زیست‌توده ارائه می‌دهد. از طرفی، پایداری محیطی با ارزیابی فاصله مربوط به واحدهای اکولوژیکی مدیریت می‌شود. بنابراین، تحقیق حاضر یک مدل چندمنظوره را پیشنهاد می‌کند که سود کل را حداکثر می‌کند و فاصله بین تاسیسات زیست‌توده در زنجیره تامین را به حداقل می‌رساند.

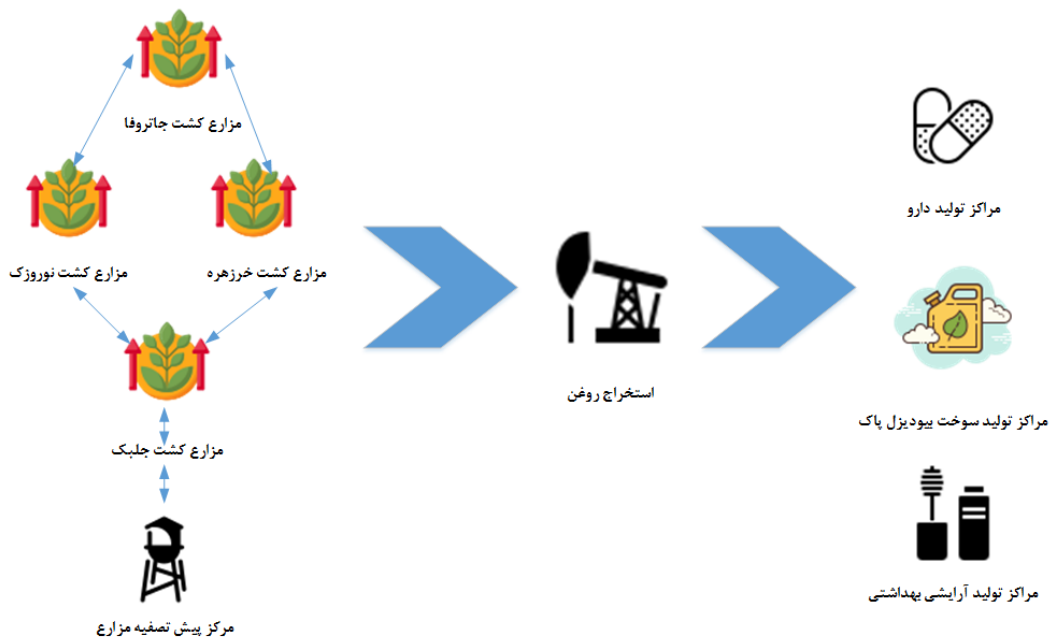
در جدول ۱، طبقه‌بندی مهم‌ترین مقالات مورد مطالعه بر اساس نوع زیست‌توده و نوع رویکرد مدل‌سازی طبقه‌بندی شده است.

جدول ۱. مطالعات پیشین در زمینه شبکه زنجیره تامین زیست‌توده

منبع	ویژگی‌های مسئله مورد بررسی				محصول	مواد ورودی	توابع هدف								
	تعداد لایه	چند محصولی	چند دوره‌ای	تنوع موارد ورودی			تنوع محصول	سود	هزینه	انتشار آلاینده	مصرف انرژی	اجتماعی	قطعی	ایستکاری	فراایستکاری
[۱۵]	دو	*	*	*	محصول بیودیزل	روغن پسماند، سویا، آفتابگردان، کلزا	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۳]	دو	*	*	*	ریزجلبک	گازها و فاضلاب	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۱۷]	دو	*	*	*	ریزجلبک	جاتروفه، پسماند کشاورزی، کود دامی	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۱۸]	دو	*	*	*	محصول بیودیزل	نوروزک، جاتروفه	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۱۳]	دو	*	*	*	سیستم بازیافت	زباله‌های کشاورزی	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۲۱]	سه	*	*	*	گاز سنتز	زباله جنگلی	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۲۲]	دو	*	*	*	گاز سنتز و گاز طبیعی	خمیر کاغذ	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۲۳]	دو	*	*	*	خمیر کرافت	آزمیم‌های پنی سیلیم و رو کولوزوم	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۶]	سه	*	*	*	برق	کود خوک	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۹]	دو	*	*	*	زیست توده	کود حیوانی	*	*	*	*	*	*	*	*	*
تحقیق حاضر	چهار	*	*	*	سوخخت بیودیزل، خرزهره و ریزجلبک و روغن‌های پسماند خوراکی	جاتروفه، نوروزک، خرزهره و ریزجلبک و روغن‌های پسماند خوراکی	*	*	*	*	*	*	*	*	*

۳ روش تحقیق

شبکه زنجیره تامین پیشنهادی یک شبکه ۴ لایه شامل مراکز تامین شامل، مزارع کاشت جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریز جلبک و مراکز تامین روغن های پسماند خوراکی، مراکز جمع آوری شامل، استخراج روغن و مراکز پیش تصفیه ضایعات روغن، مرکز پالایش شامل پالایشگاه های زیستی و مراکز تولید شامل مراکز تولید بیودیزل، تولید لوازم آرایشی و بهداشتی و تولید دارو هست. مدل ارایه شده یک مدل ریاضی چندهدفه عدد صحیح مختلط (MILP) است که هزینه های زنجیره تامین اعم از هزینه احداث، تولید، نگهداری موجودی و حمل و نقل و اثرات زیست محیطی را حداقل می کند. چارچوب مدل پیشنهادی برای انجام این تحقیق به صورت زیر است. در ادامه نماد گذاری که برای اندیس، متغیر و پارامترهای مدل در نظر گرفته شده، معرفی می گردد. در شکل ۱، ساختار زنجیره تامین این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار زنجیره تامین

۳-۱ مفروضات مدل

مفروضاتی که در ساختن مدل ریاضی ارایه شده به کاررفته اند مطابق زیر هستند:

- مدل زنجیره تامین ارایه شده یک مدل چندلایه و چند محصولی است. محصولات نهایی شبکه زنجیره تامین پیشنهادی سوخت دیزل، لوازم آرایشی و بهداشتی، مواد اولیه دارو هست.
- تمامی تقاضاهای مربوط به بیودیزل، لوازم آرایشی و بهداشتی و مواد اولیه دارو باید برآورده شوند و کمبود مجاز نیست.
- مواد اولیه مورد نیاز برای تامین تقاضای بیودیزل، لوازم آرایشی و بهداشتی و مواد اولیه دارو از مزارع داخلی جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریز جلبک و روغن های پسماند خوراکی فراهم می شود و واردات ماده خام مجاز نیست.
- مکان های مراکز مصرف بیودیزل، لوازم آرایشی و بهداشتی و مواد اولیه دارو مشخص و ثابت هستند.

- مکان‌های بالقوه برای کاشت جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریز جلبک، مراکز استخراج و مراکز پیش تصفیه روغن و احداث پالایشگاه مشخص هستند.
- حمل و نقل درون شبکه زنجیره تامین بیودیزل مورد مطالعه فقط به وسیله یک مد جاده‌ای صورت می‌گیرد.
- امکان توسعه ظرفیت برای مزارع و کلیه تسهیلات باز شده وجود ندارد.
- تسهیلات باز شده در هر دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی فعال خواهند بود.
- همه پارامترها ماهیت قطعی دارند.
- امکان نگهداری موجودی تنها برای بیودیزل در پالایشگاه زیستی وجود دارد و مقدار موجودی آن باید کوچک تر مساوی بیشترین حد موجودی باشد.

۳-۲ نمادگذاری

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای به کاررفته در مدل ریاضی به شرح زیر هستند.

اندیس‌ها: اندیس‌های مورد استفاده در مدل‌سازی ریاضی در زیر معرفی شده‌اند.

j	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جاتروفا	$j = 1, 2, 3, \dots, J$
n	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت نوروزک	$n = 1, 2, 3, \dots, N$
o	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت خرزهره	$o = 1, 2, 3, \dots, O$
m	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جلبک	$m = 1, 2, 3, \dots, M$
w	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز تامین ضایعات روغن	$w = 1, 2, 3, \dots, W$
i	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن جاتروفا، خرزهره، نوروزک و جلبک	$i = 1, 2, 3, \dots, I$
p	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن	$p = 1, 2, 3, \dots, P$
k	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز پالایشگاه زیستی	$k = 1, 2, 3, \dots, K$
b	اندیس پالایشگاه‌های دیزل	$b = 1, 2, 3, \dots, B$
s	اندیس مراکز تولید لوازم آرایشی و بهداشتی	$s = 1, 2, 3, \dots, S$
h	اندیس مراکز تولید دارو	$h = 1, 2, 3, \dots, H$
t	اندیس دوره زمانی	$t = 1, 2, 3, \dots, T$
$\eta = \{j, n, o\}$ اجتماع اندیس‌های j, n, o		

پارامترها: پارامترهای به کار گرفته شده در این تحقیق بر دو قسم طبقه‌بندی می‌شوند. پارامترهای فنی و پارامترهای هزینه‌ای.

(الف) پارامترهای فنی: پارامترهای فنی مورداستفاده در زیر معرفی شده‌اند.

D_{bt}^1 تقاضای پالایشگاه‌های دیزل برای بیودیزل در دوره t

D_t^2 تقاضای گلیسرین در دوره t

تقاضای مواد اولیه دارو در دوره t	D_t^r
مقدار روغن پسماند عرضه شده توسط مرکز تامین W در دوره t	Ro_{wt}
حداقل زمین اختصاص داده شده برای مرکز کاشت جاتروفا در مکان j	LF_j^1
حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت جاتروفا در مکان j	UF_j^1
حداقل زمین اختصاص داده شده برای مرکز کاشت نوروژک در مکان n	LF_n^r
حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت نوروژک در مکان n	UF_n^r
حداقل زمین اختصاص داده شده برای مرکز کاشت خرزهره در مکان o	LF_o^r
حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت خرزهره در مکان o	UF_o^r
حداقل زمین اختصاص داده شده برای مرکز کاشت جلبک در مکان m	LF_m^e
حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت جلبک در مکان m	UF_m^e
حد پایین ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن در مکان i	LC_i^e
حد بالای ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن در مکان i	UC_i^1
حد پایین ظرفیت مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن در مکان p	LC_p^r
حد بالای ظرفیت مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن در مکان p	UC_p^r
حد پایین ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k	LC_k^r
حد بالای ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k	UC_k^r
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت جاتروفا انتخاب می شود	$Maxu^1$
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت نوروژک انتخاب می شود	$Maxu^2$
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت خرزهره انتخاب می شود	$Maxu^3$
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت جلبک انتخاب می شود	$Maxu^e$
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز جمع آوری و استخراج روغن انتخاب می شود	$Maxu^o$
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن انتخاب می شود	$Maxu^p$
ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز پالایشگاه زیستی انتخاب می شود	$Maxu^y$
میزان بهره وری جاتروفا در هر هکتار در مکان j در دوره t	μ_{jt}^1
میزان بهره وری نوروژک در هر هکتار در مکان n در دوره t	μ_{nt}^r
میزان بهره وری خرزهره در هر هکتار در مکان o در دوره t	μ_{ot}^r
میزان بهره وری جلبک هر واحد مساحت در مکان m در دوره t	μ_{mt}^e
ضریب تبدیل جاتروفا به روغن جاتروفا	α^1
ضریب تبدیل نوروژک به روغن نوروژک	α^r
ضریب تبدیل خرزهره به روغن خرزهره	α^r
ضریب تبدیل جلبک به روغن جلبک	α^e

α^0	ضریب تبدیل ضایعات روغن جمع آوری شده به ضایعات روغن پیش تصفیه
ρ^1	ضریب تبدیل جاتروفا به مواد اولیه دارو
ρ^2	ضریب تبدیل نوروزک به مواد اولیه دارو
ρ^3	ضریب تبدیل خرزهره به مواد اولیه دارو
ρ^4	ضریب تبدیل جلبک به مواد اولیه دارو
B	ضریب تبدیل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک به بیودیزل
Ω	ضریب تبدیل ضایعات روغن پیش تصفیه به بیودیزل
$\max I^1$	حداکثر موجودی بیودیزل در پالایشگاه زیستی

ب) پارامترهای هزینه: پارامترهای هزینه عبارت اند از هزینه ثابت، متغیر، تولید، نگهداری موجودی، حمل و نقل نشان داده شده است.

• **هزینه ثابت**

FC_j^1	هزینه ثابت کاشت جاتروفا در مکان j
FC_n^2	هزینه ثابت کاشت نوروزک در مکان n
FC_o^3	هزینه ثابت کاشت خرزهره در مکان o
FC_m^4	هزینه ثابت کاشت جلبک در مکان m
FC_i^0	هزینه ثابت استقرار مرکز جمع آوری و استخراج روغن در مکان i
FC_p^1	هزینه ثابت استقرار مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن در مکان p
FC_k^Y	هزینه ثابت استقرار مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k

• **هزینه متغیر**

VC_j^1	هزینه متغیر کاشت جاتروفا در هر هکتار در مکان j
VC_n^2	هزینه متغیر کاشت نوروزک در مکان n
VC_o^3	هزینه متغیر کاشت خرزهره در مکان o
VC_{mt}^4	هزینه متغیر کاشت جلبک در مکان m در دوره t
VC_{it}^0	هزینه متغیر هر واحد ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن در مکان i در دوره t
VC_{pt}^1	هزینه متغیر هر واحد ظرفیت مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن در مکان p در دوره t
VC_{kt}^Y	هزینه متغیر هر واحد ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k در دوره t

• **هزینه تولید**

PC_{jt}^1	هزینه تولید هر واحد جاتروفا در مکان j در دوره t
PC_{nt}^2	هزینه تولید هر واحد نوروزک در مکان n در دوره t

هزینه تولید هر واحد خرزهره در مکان o در دوره t	PC_{ot}^r
هزینه تولید هر واحد جلبک در مکان m در دوره t	PC_{mt}^{ϵ}
هزینه واحد CO_2 برای تولید جلبک در مکان m در دوره t	CCO_{2mt}
هزینه جمع آوری ضایعات روغن در مرکز تامین w در دوره t	PC_{wt}^o
هزینه تولید هر واحد روغن جاتروفا در مرکز استخراج روغن در مکان i در دوره t	PC_{it}^{γ}
هزینه تولید هر واحد روغن نوروک در مرکز استخراج روغن در مکان i در دوره t	PC_{it}^{ν}
هزینه تولید هر واحد روغن خرزهره در مرکز استخراج روغن در مکان i در دوره t	PC_{it}^{\wedge}
هزینه تولید هر واحد روغن جلبک در مرکز استخراج روغن در مکان i در دوره t	PC_{it}^{\wedge}
هزینه پیش تصفیه ضایعات روغن در مکان p در دوره t	$PC_{pt}^{1\cdot}$
هزینه تولید بیودیزل در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t	PC_{kt}^{11}
هزینه تولید گلیسرین در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t	PC_{kt}^{1r}
هزینه تولید هر واحد ماده اولیه دارو در مرکز استخراج روغن i در دوره t	PC_{it}^{1r}
هزینه تولید کود در مرکز استخراج روغن i در دوره t	$PC_{it}^{1\epsilon}$

• هزینه نگهداری موجودی

هزینه واحد نگهداری موجودی بیودیزل در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t	IC_{kt}^1
---	-------------

• هزینه حمل و نقل

هزینه واحد حمل و نقل جاتروفا از مرکز کاشت j به مرکز استخراج روغن i در دوره t	TC_{jit}^1
هزینه واحد حمل و نقل نوروک از مرکز کاشت n به مرکز استخراج روغن i در دوره t	TC_{nit}^r
هزینه واحد حمل و نقل خرزهره از مرکز کاشت o به مرکز استخراج روغن i در دوره t	TC_{oit}^r
هزینه واحد حمل و نقل جلبک از مرکز کاشت m به مرکز استخراج روغن i توسط در دوره t	TC_{mit}^{ϵ}
هزینه واحد حمل و نقل ضایعات روغن از مرکز تامین w به مرکز پیش تصفیه p توسط در دوره t	TC_{wpt}^o
هزینه واحد حمل و نقل روغن جاتروفا، نوروک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن i به پالایشگاه زیستی k در دوره t	TC_{ikt}^1
هزینه واحد حمل و نقل ضایعات روغن پیش تصفیه شده از مرکز پیش تصفیه p به پالایشگاه زیستی k در دوره t	TC_{pkt}^{ν}
هزینه واحد حمل و نقل بیودیزل از مرکز پالایشگاه زیستی k به مرکز مصرف بیودیزل b در دوره t	TC_{kbt}^{\wedge}
هزینه واحد حمل و نقل کود از مرکز استخراج روغن i به مراکز کاشت در دوره t	TC_{it}^{\wedge}
هزینه واحد حمل و نقل گلیسرین ارسالی از پالایشگاه k به مشتری در دوره t	C_{ppit}^{1r}

هزینه واحد حمل و نقل مقدار مواد اولیه دارو ارسالی از مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن i به مشتری در دوره t Cpp_{it}^1

ج) پارامترهای اجتماعی

hr_{jt}^1 تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت جاتروفا در محل j در دوره t
 hr_{nt}^2 تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت نوروژک در محل n در دوره t
 hr_{ot}^3 تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت خرزهره در محل o در دوره t
 hr_{mt}^4 تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت جلبک در محل m در دوره t
 hr_{st}^0 تعداد نیروی انسانی موجود در مراکز تولید لوازم آرایشی در دوره t
 hr_{bt}^6 تعداد نیروی انسانی موجود در مراکز تولید سوخت دیزل در دوره t
 hr_{ht}^7 تعداد نیروی انسانی موجود در مراکز تولید دارو در دوره t

متغیرهای تصمیم: متغیرها در این تحقیق بر دو نوع باینری و پیوسته یا گسسته هستند.

الف) متغیرهای تصمیم باینری: متغیرهای تصمیم باینری مورد استفاده عبارت‌اند از:

u_j^1 اگر مکان j برای مرکز کاشت جاتروفا انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
 u_n^2 اگر مکان n برای مرکز کاشت نوروژک انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
 u_o^3 اگر مکان o برای مرکز کاشت خرزهره انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
 u_m^4 اگر مکان m برای مرکز کاشت جلبک انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
 u_i^0 اگر مکان i برای باز کردن مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
 u_p^6 اگر مکان p برای باز کردن مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه روغن انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
 u_k^7 اگر مکان k برای باز کردن مرکز پالایشگاه زیستی انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر

ب) متغیرهای تصمیم پیوسته و گسسته: متغیرهای پیوسته عبارت‌اند از:

I_{kt}^1 مقدار موجودی بیودیزل در مرکز پالایشگاه زیستی k در دوره t
 P_{jt}^1 مقدار جاتروفا تولیدشده در مرکز کاشت جاتروفا در مکان j در دوره t
 P_{nt}^2 مقدار نوروژک تولیدشده در مکان n در دوره t
 P_{ot}^3 مقدار خرزهره تولیدشده در مکان o در دوره t
 P_{mt}^4 مقدار جلبک تولیدشده در مرکز کاشت m در دوره t
 CO_2_{mt} مقدار مصرف‌شده در مرکز کاشت جلبک m در دوره t
 P_{it}^6 مقدار روغن جاتروفای تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t
 P_{it}^7 مقدار روغن نوروژک تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t
 P_{it}^8 مقدار روغن خرزهره تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t

مقدار روغن جلبک تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t	P_{it}^A
مقدار ضایعات روغن پیش تصفیه تولیدشده در مکان p در دوره t	$P_{pt}^{1\circ}$
مقدار تولید بیودیزل در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t	P_{kt}^{11}
مقدار تولید گلیسرین در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t	P_{kt}^{12}
مقدار تولید مواد اولیه دارو در مرکز استخراج روغن i در دوره t	P_{it}^{13}
مقدار تولید کود در مرکز استخراج روغن i در دوره t	P_{it}^{14}
مقدار حمل و نقل جاتروفا از مرکز کاشت j به مرکز استخراج روغن i در دوره t	T_{jit}^1
مقدار حمل و نقل نوروزک از مرکز کاشت n به مرکز استخراج روغن i در دوره t	T_{nit}^2
مقدار حمل و نقل خرزهره از مرکز کاشت o به مرکز استخراج روغن i در دوره t	T_{oit}^3
مقدار حمل و نقل جلبک از مرکز کاشت m به مرکز استخراج روغن i در دوره t	T_{mit}^4
مقدار حمل و نقل ضایعات روغن از مرکز تامین w به مرکز پیش تصفیه p در دوره t	T_{wpt}^0
مقدار حمل و نقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن i به پالایشگاه زیستی k در دوره t	T_{ikt}^1
مقدار حمل و نقل ضایعات روغن پیش تصفیه شده از مرکز پیش تصفیه p به پالایشگاه زیستی k در دوره t	T_{pkt}^y
مقدار حمل و نقل بیودیزل از مرکز پالایشگاه زیستی k به مرکز مصرف b در دوره t	T_{kbt}^A
مقدار حمل و نقل کود از مرکز استخراج روغن i به مراکز کاشت در دوره t	T_{it}^A
مقدار ناحیه کشت شده جاتروفا در مکان j	V_j^1
مقدار ناحیه کشت شده نوروزک در مکان n	V_n^2
مقدار ناحیه کشت شده خرزهره در مکان o	V_o^3
مقدار ناحیه کشت شده جلبک در مکان m	V_{mt}^4
مقدار کل ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن i در دوره t	V_{it}^0
مقدار کل ظرفیت مرکز جمع آوری و پیش تصفیه p در دوره t	V_{pt}^1
مقدار کل ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی k در دوره t	V_{kt}^y
مقدار گلیسرین ارسالی از پالایشگاه k به مشتری در دوره t	PP_{kt}^{12}
مقدار مواد اولیه دارو ارسالی از مراکز جمع آوری و استخراج روغن i به مشتری در دوره t	PP_{it}^{13}

۳-۳ محدودیت‌ها و توابع هدف

الف) توابع هدف:

در این قسمت توابع هدف در نظر گرفته شده که شامل کاهش هزینه‌های ثابت، متغیر، تولید، نگهداری موجودی و حمل و نقل و تاثیرات زیست محیطی و تابع اثرات اجتماعی می‌باشد. مدل زنجیره تامین زیست توده پایدار حاضر

دربرگیرنده توجه به جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی به صورت هم‌زمان است. در تابع هدف اقتصادی، مجموع کل هزینه‌های ثابت و متغیر شامل هزینه احداث انواع مراکز، هزینه‌های تولید، هزینه‌های نگهداری موجودی، و هزینه‌های حمل و نقل حداقل می‌گردد. علاوه بر این، حفظ و مراقبت از محیط زیست در تمام زنجیره تامین، از تولید تا مصرف، دارای اهمیت است. این مهم در مدل پیشنهادی با تبدیل پسماند به محصولات مورد نیاز و مفید با استفاده از فناوری‌های سبز تامین می‌شود. سرانجام، به منظور تکمیل اهداف توسعه مدلی پایدار، افزایش اشتغال‌زایی و حداکثر کردن مجموع شغل‌های ایجاد شده در مراکز مختلف طول زنجیره تامین و دوره‌های زمانی به عنوان هدف و مسئولیت مهم اجتماعی لحاظ شده است. نحوه محاسبه و بهینه‌سازی این سه تابع هدف در ادامه آمده است.

الف- (۱) تابع هدف هزینه:

$$\begin{aligned} \min z_1 = & \sum_k \sum_t V_{kt}^y \times V_{kt}^y + \sum_j \sum_t PC_{jt}^1 \times P_{jt}^1 + \sum_n \sum_t PC_{nt}^y \times P_{nt}^y + \sum_o \sum_t PC_{ot}^r \times P_{ot}^r + \sum_m \sum_t PC_{mt}^\xi \times P_{mt}^\xi + \sum_m \sum_t CCO_{mt}^2 \times CO_{mt}^2 + \\ & \sum_p \sum_t PC_{pt}^{1r} \times P_{pt}^{1r} + \sum_k \sum_t PC_{kt}^{1l} \times P_{kt}^{1l} + \sum_k \sum_t PC_{kt}^{1*} \times P_{kt}^{1*} + \sum_i \sum_t PC_{it}^{1r} \times P_{it}^{1r} + \sum_i \sum_t PC_{it}^{1\xi} \times P_{it}^{1\xi} + \sum_k \sum_t IC_{kt}^1 \times I_{kt}^1 + \\ & \sum_j \sum_i \sum_t TC_{jit}^1 \times T_{jit}^1 + \sum_k \sum_t cpp_{kt}^{1l} \times pp_{kt}^{1l} + \sum_k \sum_t cpp_{kt}^{1r} \times pp_{kt}^{1r} + \sum_n \sum_i \sum_t TC_{nit}^y \times T_{nit}^y + \\ & \sum_o \sum_i \sum_t TC_{oit}^r \times T_{oit}^r + \sum_m \sum_i \sum_t TC_{mit}^\xi \times T_{mit}^\xi + \sum_w \sum_p \sum_t TC_{wpt}^o \times T_{wpt}^o + \\ & \sum_i \sum_k \sum_t TC_{ikt}^1 \times T_{ikt}^1 + \sum_p \sum_k \sum_t TC_{pkt}^y \times T_{pkt}^y + \sum_k \sum_b \sum_t TC_{kbt}^A \times T_{kbt}^A + \sum_i \sum_t \sum_\eta TC_{it}^A \times T_{it}^A \end{aligned}$$

الف- (۲) تابع هدف تاثیرات زیست محیطی:

$$\begin{aligned} \text{Min} z_2 = & \sum_i \sum_t \alpha_1 P_{it}^1 + \sum_i \sum_t \alpha_{1r} P_{it}^y + \sum_i \sum_t \alpha_r P_{it}^A + \sum_i \sum_t \alpha_\xi P_{it}^A \\ & + \sum_i \sum_t \alpha_o P_{it}^{1r} + \sum_p \sum_t \rho_p P_{pt}^{1r} + \sum_w \sum_t \rho_w RO_{wt} + \sum_k \sum_t \rho_r P_{kt}^{1l} \\ & + \sum_k \sum_t \rho_\xi P_{kt}^{1r} + \sum_i \sum_t \beta P_{it}^{1\xi} \end{aligned}$$

الف- (۳) تابع هدف اجتماعی

$$\begin{aligned} \text{Max} z_3 = & \sum_j \sum_t hr_{jt}^1 u_{jt}^1 + \sum_n \sum_t hr_{nt}^y u_{nt}^y + \sum_o \sum_t hr_{ot}^r u_{ot}^r \\ & + \sum_m \sum_t hr_{mt}^\xi u_{mt}^\xi + \sum_i \sum_t hr_{it}^o u_{it}^o + \sum_p \sum_t hr_{pt}^1 u_{pt}^1 + \sum_k \sum_t hr_{kt}^y u_{kt}^y \end{aligned}$$

(ب) محدودیت‌ها: در زیر تمامی محدودیت‌های مورداستفاده در این تحقیق معرفی شده‌اند.

$$\sum_k T_{kbt}^A = D_{bt}^1 \quad \forall b, t \quad (1)$$

$$\sum_k P_{kt}^{1r} = D_t^r \quad \forall t \quad (2)$$

$$\sum_i P_{it}^{1r} = D_t^r \quad \forall t \quad (3)$$

$$\sum_i T_{jit}^1 = P_{jt}^1 \quad \forall j, t \quad (4)$$

$$\sum_i T_{nit}^y = P_{nt}^y \quad \forall n, t \quad (5)$$

$$\sum_i T_{oit}^r = P_{ot}^r \quad \forall o, t \quad (6)$$

$$\sum_i T_{mit}^\xi = P_{mt}^\xi \quad \forall m, t \quad (7)$$

$$\sum_p T_{wpt}^o \leq RO_{wt} \quad \forall w, t \quad (8)$$

$$P_{jt}^1 \leq \mu_{jt}^1 \times V_j^1 \quad \forall j, t \quad (9)$$

$$P_{nt}^v \leq \mu_{nt}^v \times V_n^v \quad \forall n, t \quad (10)$$

$$P_{ot}^r \leq \mu_{ot}^r \times V_o^r \quad \forall o, t \quad (11)$$

$$P_{mt}^\xi \leq \mu_{mt}^\xi \times V_{mt}^\xi \quad \forall m, t \quad (12)$$

$$CO_{mt}^v = v \times P_{mt}^\xi \quad \forall m, t \quad (13)$$

$$P_{it}^1 = \alpha^1 \sum_j T_{jit}^1 \quad \forall i, t \quad (14)$$

$$P_{it}^v = \alpha^v \sum_n T_{nit}^v \quad \forall i, t \quad (15)$$

$$P_{it}^r = \alpha^r \sum_o T_{oit}^r \quad \forall i, t \quad (16)$$

$$P_{it}^\xi = \alpha^\xi \sum_m T_{mit}^\xi \quad \forall i, t \quad (17)$$

$$P_{pt}^{1\cdot} = \alpha^\circ \sum_w T_{wpt}^\circ \quad \forall p, t \quad (18)$$

$$P_{kt}^{11} = \beta \cdot \sum_i T_{ikt}^1 + \omega \cdot \sum_p T_{pkt}^v \quad \forall k, t \quad (19)$$

$$P_{kt}^{1v} = (1-\beta) \cdot \sum_i T_{ikt}^1 + (1-\omega) \cdot \sum_p T_{pkt}^v \quad \forall k, t \quad (20)$$

$$P_{it}^{1v} = \rho^1 \sum_j T_{jit}^1 + \rho^v \sum_n T_{nit}^v + \rho^r \sum_o T_{oit}^r + \rho^\xi \sum_m T_{mit}^\xi \quad \forall i, t \quad (21)$$

$$P_{it}^{1\xi} = (1-\alpha^1 - \rho^1) \sum_j T_{jit}^1 + (1-\alpha^v - \rho^v) \sum_n T_{nit}^v + (1-\alpha^r - \rho^r) \sum_o T_{oit}^r + (1-\alpha^\xi - \rho^\xi) \sum_m T_{mit}^\xi \quad \forall i, t \quad (22)$$

$$P_{pt}^{1\cdot} = \sum_k T_{pkt}^v \quad \forall p, t \quad (23)$$

$$I_{kt}^1 = I_{k,t-1}^1 + P_{kt}^{11} - \sum_b T_{kbt}^1 \quad \forall k, t \quad (24)$$

$$P_{it}^{1\xi} = \sum_\eta T_{i\eta t}^1 \quad \forall i, t \quad (25)$$

$$LF_j^1 u_j^1 \leq V_j^1 \leq UF_j^1 u_j^1 \quad \forall j \quad (26)$$

$$LF_n^v u_n^v \leq V_n^v \leq UF_n^v u_n^v \quad \forall n \quad (27)$$

$$LF_o^r u_o^r \leq V_o^r \leq UF_o^r u_o^r \quad \forall o \quad (28)$$

$$LF_m^\xi u_m^\xi \leq V_{mt}^\xi \leq UF_m^\xi u_m^\xi \quad \forall m, t \quad (29)$$

$$LC_i^1 u_i^1 \leq V_{it}^1 \leq UC_i^1 u_i^1 \quad \forall i, t \quad (30)$$

$$LC_p^v u_p^v \leq V_{pt}^v \leq UC_p^v u_p^v \quad \forall p, t \quad (31)$$

$$LC_k^r u_k^r \leq V_{kt}^r \leq UC_k^r u_k^r \quad \forall k, t \quad (32)$$

$$\sum_j T_{jit}^1 + \sum_n T_{nit}^v + \sum_o T_{oit}^r + \sum_m T_{mit}^\xi \leq V_{it}^\circ \quad \forall i, t \quad (33)$$

$$\sum_w T_{wpt}^\circ \leq V_{pt}^1 \quad \forall p, t \quad (34)$$

$$\sum_i T_{ikt}^1 + \sum_p T_{pkt}^v \leq V_{kt}^v \quad \forall k, t \quad (35)$$

$$P_{it}^1 + P_{it}^v + P_{it}^r + P_{it}^\xi \leq V_{it}^\circ \quad \forall i, t \quad (36)$$

$$P_{pt}^{1\cdot} \leq V_{pt}^1 \quad \forall p, t \quad (37)$$

$$I_{kt}^{\wedge} \leq \text{Max} I^{\wedge} \quad \forall k, t \quad (38)$$

$$\sum_j u_j^{\wedge} \leq \text{Max} u^{\wedge} \quad (39)$$

$$\sum_n u_n^{\vee} \leq \text{Max} u^{\vee} \quad (40)$$

$$\sum_o u_o^{\vee} \leq \text{Max} u^{\vee} \quad (41)$$

$$\sum_m u_m^{\xi} \leq \text{Max} u^{\xi} \quad (42)$$

$$\sum_i u_i^{\circ} \leq \text{Max} u^{\circ} \quad (43)$$

$$\sum_p u_p^{\wedge} \leq \text{Max} u^{\wedge} \quad (44)$$

$$\sum_k u_k^{\vee} \leq \text{Max} u^{\vee} \quad (45)$$

$$\sum_i T_{ikt}^{\wedge} = P_{it}^{\wedge} + P_{it}^{\vee} + P_{it}^{\wedge} + P_{it}^{\vee} \quad \forall i, t \quad (46)$$

$$P_{kt}^{\wedge} \leq V_{kt}^{\vee} \quad \forall k, t \quad (47)$$

$$\text{Continuous variables} \geq 0 \quad (48)$$

$$u_j^{\wedge}, u_n^{\vee}, u_o^{\vee}, u_m^{\xi}, u_i^{\circ}, u_p^{\wedge}, u_k^{\vee} \in \{0, 1\} \quad (49)$$

محدودیت (۱) نشان دهنده ارضای تمام تقاضای بیودیزل در دوره‌های مختلف است. محدودیت (۲) نشان دهنده ارضای تمام تقاضای گلیسرین در دوره‌های مختلف است. محدودیت (۳) نشان دهنده ارضای تمام تقاضای مواد اولیه دارو در دوره‌های مختلف است. محدودیت (۴) تضمین می کند تمام دانه جاتروفای تولید شده در مرکز کاشت جاتروفا به مرکز جمع آوری و استخراج روغن انتقال می یابد. محدودیت (۵) تضمین می کند تمام دانه نوروزک تولید شده در مرکز کاشت نوروزک به مرکز جمع آوری و استخراج روغن انتقال می یابد. محدودیت (۶) تضمین می کند تمام دانه خرزهره تولید شده در مرکز کاشت خرزهره به مرکز جمع آوری و استخراج روغن انتقال می یابد. محدودیت (۷) تضمین می کند تمام جلبک تولید شده در مرکز کاشت جلبک به مرکز جمع آوری و استخراج روغن انتقال می یابد. محدودیت (۸) تضمین می کند تمام روغن پسماند تولید شده در مرکز تامین به مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن انتقال می یابد. محدودیت (۹) نشان دهنده مقدار دانه جاتروفا تولید شده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۰) نشان دهنده مقدار دانه نوروزک تولید شده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۱) نشان دهنده مقدار دانه خرزهره تولید شده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۲) نشان دهنده مقدار جلبک تولید شده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۳) میزان کربن دی اکسید مصرف شده در مرکز کشت جلبک را محاسبه می کند. [۲۲] نشان دادند برای تولید هر تن زیست توده دو تن کربن دی اکسید مورد نیاز است. محدودیت (۱۴) میزان روغن جاتروفای تولید شده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل جاتروفا به روغن نمایش می دهد. محدودیت (۱۵) میزان روغن نوروزک تولید شده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل نوروزک به روغن نمایش می دهد. محدودیت (۱۶) میزان روغن خرزهره تولید شده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل خرزهره به روغن نمایش می دهد. محدودیت (۱۷) میزان روغن جلبک تولید شده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل جلبک به روغن نمایش می دهد. محدودیت (۱۸) میزان روغن ضایعات

روغن تولیدشده در مرکز جمع آوری و پیش تصفیه را با توجه به ضریب تبدیل روغن نمایش می دهد. محدودیت (۱۹) مقدار تولید بیودیزل در پالایشگاه زیستی k ام را بر اساس ضرایب تبدیل تعیین می کند و نشان می دهد مقدار تولید بیودیزل برابر است با مقدار روغن حاصل از جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک بر اساس ضریب تبدیل آن که از مرکز استخراج روغن به پالایشگاه منتقل شده و مقدار روغنی که از مرکز پیش تصفیه به پالایشگاه منتقل شده است. محدودیت (۲۰) مقدار تولید گلیسرین در پالایشگاه زیستی k ام را تعیین می کند. محدودیت (۲۱) مقدار مواد اولیه دارو تولیدشده در مرکز جمع آوری و استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل مواد اولیه کشت شده تعیین می کند. محدودیت (۲۲) مقدار کود تولیدشده در مرکز جمع آوری و استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل مواد اولیه کشت شده تعیین می کند. محدودیت (۲۳) تضمین می کند تمام روغن پیش تصفیه تولیدشده در مرکز جمع آوری و پیش تصفیه به مرکز پالایشگاه زیستی انتقال می یابد. محدودیت (۲۴) مقدار سطح موجودی بیودیزل را در پالایشگاه زیستی در هر دوره تعیین می کند که برابر موجودی بیودیزل در پالایشگاه زیستی در دوره قبل به اضافه مقدار بیودیزلی که در همان دوره در پالایشگاه تولیدشده منهای مقدار بیودیزلی است که برای ارضای تقاضا به دست مشتری می رسد. محدودیت (۲۵) تضمین می کند تمام کود تولیدشده در مرکز جمع آوری و استخراج روغن به مراکز کاشت انتقال می یابد. محدودیت (۲۶) بیان می کند مقدار ناحیه اختصاص داده شده برای کشت جاتروفا بین حداقل زمین اختصاص داده شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۲۷) بیان می کند مقدار ناحیه اختصاص داده شده برای کشت نوروزک بین حداقل زمین اختصاص داده شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۲۸) بیان می کند مقدار ناحیه اختصاص داده شده برای کشت خرزهره بین حداقل زمین اختصاص داده شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۲۹) بیان می کند مقدار ناحیه اختصاص داده شده برای کشت جلبک بین حداقل زمین اختصاص داده شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۳۰) بیان می کند مقدار کل ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن بین حد پایین و حد بالای ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن است. محدودیت (۳۱) بیان می کند مقدار کل ظرفیت مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن بین حد پایین و حد بالای ظرفیت مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن است. محدودیت (۳۲) بیان می کند مقدار کل ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی بین حد پایین و حد بالای ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی است. محدودیت (۳۳) بیان می کند مجموع میزان جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک ارسالی از مراکز کاشت به مرکز استخراج روغن باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز استخراج روغن باشد. محدودیت (۳۴) بیان می کند مجموع میزان ضایعات روغن ارسالی از مراکز تامین به مرکز پیش تصفیه باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز پیش تصفیه روغن باشد. محدودیت (۳۵) بیان می کند مجموع میزان روغن مواد اولیه و روغن پیش تصفیه ارسالی از مراکز استخراج روغن و پیش تصفیه ضایعات روغن به مرکز پالایشگاه زیستی باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی باشد. محدودیت (۳۶) بیان می کند مجموع تولید روغن جاتروفا، روغن نوروزک، روغن خرزهره، روغن جلبک باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن باشد. محدودیت (۳۷) بیان می کند مقدار روغن پیش تصفیه تولیدی در مرکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت (۳۸) بیان می کند مقدار موجودی بیودیزل در مرکز پالایشگاه زیستی باید

کوچک تر یا مساوی پارامتر ماکسیمم موجودی باشد. محدودیت (۳۹) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت جاتروفا ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۰) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت نوروک ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۱) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت خرزهره ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۲) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت جلبک ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۳) یک حد بالا برای تعداد مراکز جمع آوری و استخراج روغن ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۴) یک حد بالا برای تعداد مراکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۵) یک حد بالا برای تعداد مراکز پالایشگاه زیستی ایجاد شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۶) بیان می‌کند مقدار روغن ارسالی از مرکز استخراج روغن به مرکز پالایشگاه زیستی برابر با مقادیر تولید روغن جاتروفا، روغن نوروک، روغن خرزهره و روغن جلبک است. محدودیت (۴۷) بیان می‌کند مقدار گلیسرین تولیدی در مرکز پالایشگاه زیستی باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت ۴۸ و ۴۹ تضمین می‌کند که متغیرهای تحقیق از نوع پیوسته و باینری هستند.

۳-۴ رویکرد حل مساله

در این تحقیق مساله به دو روش قطعی و فراابتکاری حل شده است. برای حل قطعی از روش اپسیلون محدودیت و برای حل فراابتکاری از روش فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است.

۳-۴-۱ روش اپسیلون محدودیت

مساله بهینه‌سازی در این تحقیق بر اساس روش اپسیلون محدودیت حل شده است. در روش اپسیلون محدودیت از بین توابع هدف مختلف، یکی انتخاب و سایر توابع هدف با در نظر گرفتن یک کران بالا به محدودیت تبدیل می‌شوند و مساله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی یک هدفه تبدیل می‌شود و به طریقه معمول برنامه‌ریزی خطی حل می‌شود. یکی از روش‌های دقیق به دست آوردن راه‌حل‌های پارتوی بهینه استفاده از روش اپسیلون محدودیت است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها بهینه‌سازی چندهدفه کاربرد آن برای فضاهای حل غیر محدب است زیرا روش‌هایی از قبیل ترکیب وزنی اهداف در فضای نامحدب کارایی خود را از دست می‌دهند. زمان محاسباتی یک الگوریتم از ویژگی‌های مهم هر الگوریتم جهت ارزیابی آن است از آنجایی که یکی از ضعف‌های اساسی الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی دقیق از جمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آن‌هاست، بدیهی است که به کارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد. یکی از نسخه‌های اصلاح شده روش اپسیلون محدودیت، چارچوبی است که پیروز و خرم [۲۴] ارائه دادند و اخیراً جهانگیری و همکاران [۲۵] استفاده از آن را به دلیل داشتن دو مزیت عمده توصیه کرده‌اند. یکی از مزایای این روش کاهش فضای جستجو برای یافتن نقاط غیرغالب است. یکی دیگر از مزایای این روش اجرا کمتر آن در مقایسه با روش اصلی است. طبق این روش ابتدا مساله بهینه‌سازی تک هدفه برای هر هدف را حل می‌کنیم. سپس طول گام را تعیین می‌کنیم. سپس مجموعه نقاط مناسب را تولید می‌کنیم و در نهایت بهینه‌سازی تک هدفه را حل کرده و مرز

پارتو را تخمین می‌زنیم. در این روش همواره به بهینه‌سازی یکی از اهداف می‌پردازیم به شرطی که بالاترین حد قابل قبول را برای سایر اهداف در قالب محدودیت‌ها تعریف کنیم. برای یک مساله دو هدفه نمایش ریاضی طبق معادله ۵۰ را خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \min f_1(x) & \quad (50) \\ \text{s.t.} & \\ f_2(x) & \leq \varepsilon_2 \\ f_3(x) & \leq \varepsilon_3 \\ x & \in S \end{aligned}$$

با تغییر مقادیر سمت راست محدودیت‌های جدید اسپیلون‌ها، لبه پارتوی مساله به دست خواهد آمد.

۳-۴-۲ روش حل فراابتکاری NSGA-II

در این مقاله برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است. از جمله نقاط مثبت این الگوریتم این است که برخلاف برخی الگوریتم‌های دیگر که فضای جواب مساله را فقط در یک جهت جستجو می‌کنند، به‌طور هم‌زمان در چندین جهت به جستجوی جواب می‌پردازد. عدم نیاز الگوریتم ژنتیک به پیوستگی و تحدب تابع هدف را نیز می‌توان از دیگر ویژگی‌های مثبت این الگوریتم قلمداد نمود [۲۶]. عملکرد الگوریتم NSGA-II مطابق با شبه کد زیر است.

//Start:

Step ۱: Generate an initial population

Begin loop /* Loop until a termination condition is met */

Step ۲: Evaluate the fitness of a subset of individuals from the population

Step ۳: Select pairs of the fittest individuals for reproduction

Step ۴: Create offspring using a crossover operator

Step ۵: Introduce genetic variation in the offspring using a mutation operator

Step ۶: Replace some of the least fit individuals in the current population with the new

offspring

End loop

Finish//.

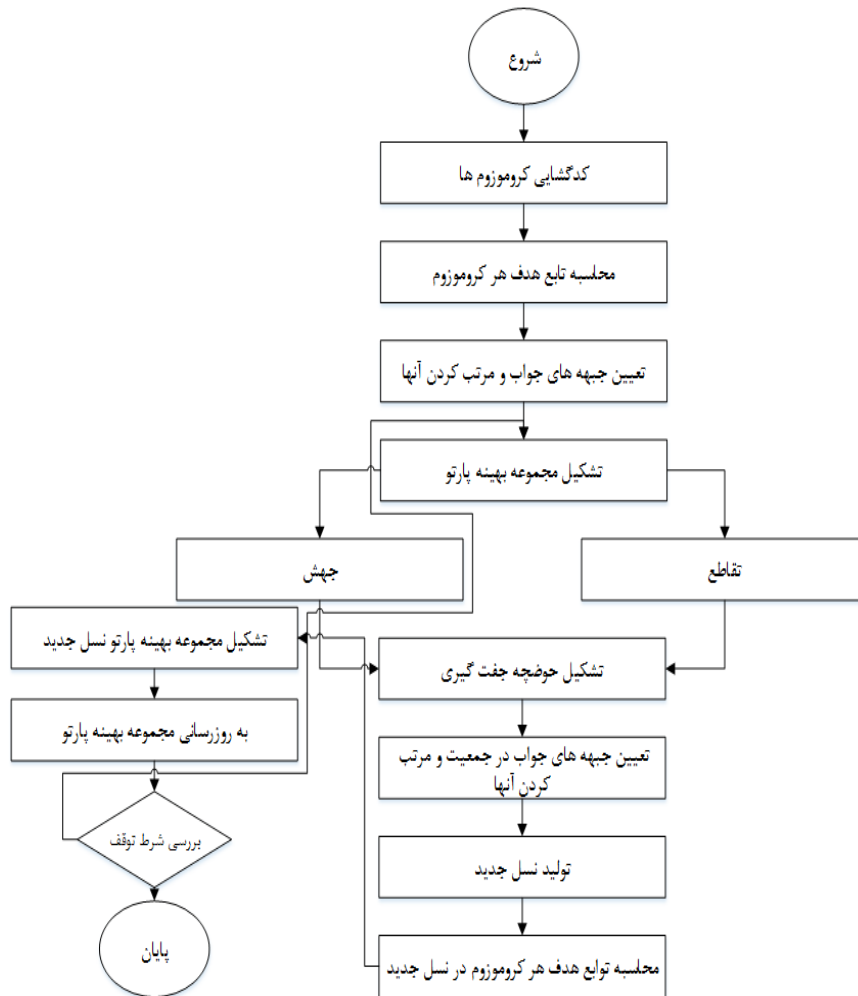
همچنین، فلوجارت اجرای آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴ حل مساله و تحلیل نتایج

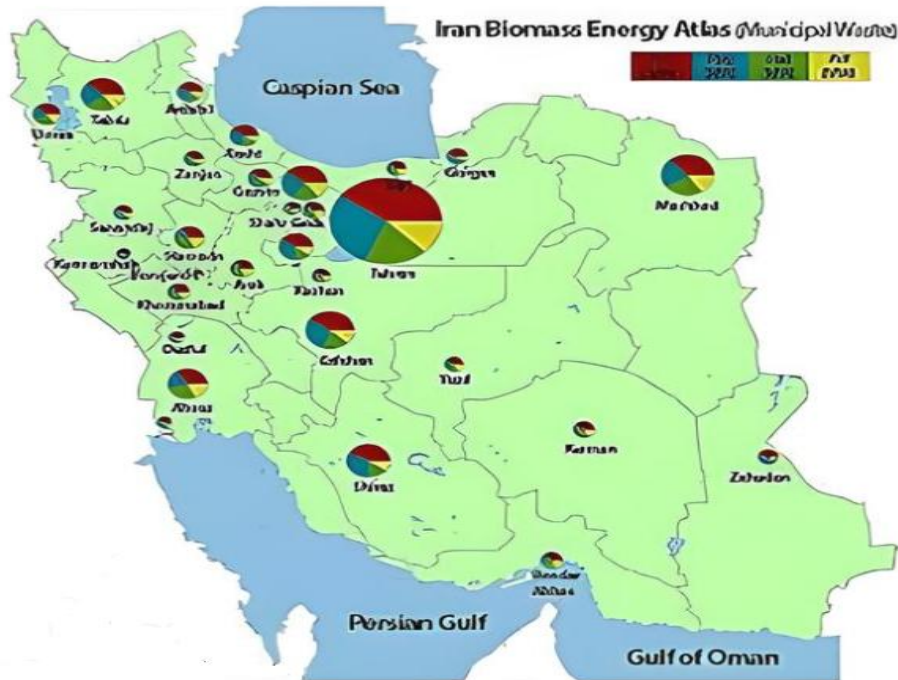
۴-۱ مطالعه موردی

سازمان بهره‌وری انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق با هدف ارتقای بهره‌وری انرژی و استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر و پاک با فراهم آوردن زیرساخت‌های لازم در کشور ایران تاسیس شده است. همچنین، افزایش بهره‌وری، تامین انرژی، کاهش اتلاف انرژی در انتقال، توزیع و مصرف در کشور و استفاده از روش‌های تولید

برق تجدیدپذیر و پاک را هدف قرار داده است. بنابراین، توسعه تولید انرژی زیستی از منابع زیست‌توده یک نیاز حیاتی برای شناخت راه‌های دسترسی به منابع مختلف در مناطق انباشت منابع ایران و همچنین، شناسایی فناوری‌های مختلف و الزامات فنی و اجرایی است. براین اساس، یک مطالعه موردی در سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی ایران انجام شده است. در شکل ۳، نقشه استان‌های بالقوه ایران از نظر تنوع منابع و فناوری در زمینه زیست‌توده نشان داده شده است. نتایج حل مدل براساس داده‌های ورودی به شرح جدول ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. فلورچارت اجرایی الگوریتم NSGA-II



شکل ۳. پراکنندگی منابع زیست توده در ایران

بنابراین، مدل توسعه داده شده توسط یک مثال واقعی برای بررسی مدل از لحاظ شدنی بودن و تحلیل نتایج مربوط به متغیرهای اصلی از طریق پارامترهای در نظر گرفته شده، مورد بررسی قرار می گیرد. مدل یاد شده به شکل قطعی در نرم افزار GAMS با ملحوظ دانستن مقادیر از پیش تعیین شده موجود در جدول ۲ به اجرا درآمده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترها در مطالعه موردی

مقدار	نماد	نام اندیس
۱	j	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جاتروفا
۱	n	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت نوروژک
۱	o	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت خرزهره
۲و۱	m	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جلبک
۲و۱	w	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز تامین ضایعات روغن
۱	i	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع آوری و استخراج روغن جاتروفا، خرزهره، نوروژک و جلبک
۱	p	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع آوری و پیش تصفیه ضایعات روغن
۱	k	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز پالایشگاه زیستی
۲و۱	b	اندیس پالایشگاه‌های دیزل
۲و۱	t	اندیس دوره زمانی

۴-۲ حل مساله در ابعاد کوچک و متوسط

با ملحوظ دانستن اطلاعات فوق، مدل پیشنهاد شده در نرم افزار GAMS حل شده است. در جدول ۳، نتایج مربوط به مقادیر I_{kt}^1 ، P_{kt}^{11} ، P_{kt}^{12} که به ترتیب برابر با مقدار تولید گلیسرین در پالایشگاه زیستی k در دوره t ؛ مقدار تولید

بیودیزل در پالایشگاه زیستی k در دوره t و مقدار موجودی بیودیزل در پالایشگاه زیستی k در دوره t نشان داده شده است.

جدول ۳. مقدار متغیرهای $I_{kt}^1, P_{kt}^{11}, P_{kt}^{12}$

متغیر	مکان $k = 1$	دوره زمانی	
		اول	دوم
P_{kt}^{12}	پالایشگاه زیستی اول	۱۰۹۶۰	۱۳۴۱۰
P_{kt}^{11}	پالایشگاه زیستی اول	۶۱۷۷۷/۴۷۷	۷۵۵۹۳/۳۲۴
I_{kt}^1	پالایشگاه زیستی اول	۵۲۸۳۷/۴۷۷	۱۱۷۵۱۰/۸۰۱

با توجه به نتایج حاصل شده، مشخص می‌شود که مقدار تولید بیودیزل از مقدار تولید گلیسرین همواره در هر دو دوره زمانی بیشتر است. این درحالی است که همواره در طی هر دو دوره سهم قابل توجهی به عنوان موجودی برای دوره‌های بعدی باقی می‌ماند. برای مثال، در دوره اول مقدار ۶۱۷۷۷/۴۷۷ تن بیودیزل در پالایشگاه زیستی تولید می‌شود. از این مقدار ۸۹۴۰ تن مصرف می‌شود و مقدار ۵۲۸۳۷/۴۷۷ تن به عنوان موجودی پایان دوره برای مصرف در دوره دوم باقی می‌ماند. بنابراین، در دوره دوم با تولید ۲۲۷۵۵/۸۴۷ تن بیودیزل که با جمع باقیمانده از دوره اول که برابر با ۵۲۸۳۷/۴۷۷ تن است مقدار ۷۵۵۹۳/۳۲۴ تن بیودیزل تولید می‌گردد. در جدول ۴، مقدار T_{kbt}^A حمل و نقل بیودیزل از مرکز پالایشگاه زیستی k به مرکز مصرف b در دوره t نشان داده شده است.

جدول ۴. مقدار متغیرهای T_{kbt}^A

از \ به	دوره اول		دوره دوم	
	مرکز مصرف ۱	مرکز مصرف ۲	مرکز مصرف ۱	مرکز مصرف ۲
مرکز پالایشگاه زیستی	۴۳۶۰	۴۵۸۰	۵۳۲۰	۵۶۰۰

بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۴ مشخص می‌شود که تواتر جابجایی بین مرکز پالایشگاه زیستی و مراکز مصرف در دوره دوم برنامه‌ریزی نسبت به دوره اول همواره بیشتر است. بیشترین میزان حمل و نقل مربوط به جابجایی بین پالایشگاه و مرکز مصرف دوم در دوره دوم برنامه‌ریزی است و کم‌ترین میزان جابجایی مربوط به جابجایی بین پالایشگاه و مرکز مصرف اول در دوره اول است. در جدول ۵، مقدار جلبک کاشت شده در ناحیه مکان m در دوره t ؛ مقدار P_{mt}^E ؛ مقدار جلبک تولید شده در مرکز کاشت m در دوره t ؛ مقدار CO_{2mt} مصرف شده در مرکز کاشت جلبک در مکان m در دوره t نشان داده شده است.

جدول ۵. مقدار تولید $CO_{2mt}, P_{mt}^E, V_{mt}^E$

متغیر	مرکز کاشت	دوره زمانی	
		اول	دوم
V_{mt}^E	$k = 1$	۵۰۰۰۰	۰
	$k = 2$	۵۰۰۰۰	۰
	$k = 1$	۱۵۶۷/۵۶۸	۶۳۰

P_{mt}^{ξ}	$k = 2$	۰	۹۰۰
CO_{2mt}	$k = 1$	۳۱۳۵/۱۳۵	۱۲۶۰
	$k = 2$	۰	۱۸۰۰

بر اساس جدول ۵، مقدار کاشت جلبک در هر دو مرکز کاشت فقط در دوره اول کاشت انجام می‌شود و میزان کاشت جلبک در هر دو مرکز کاشت در دوره دوم برابر با صفر است. همچنین، بیشترین تولید شده مربوط به مرکز کاشت اول است که در دوره اول برنامه‌ریزی اتفاق می‌افتد. نظر به همین مساله که در دوره اول بیشترین تولید در مرکز کاشت اول تولید شده است، در دوره دوم کمترین میزان تولید جلبک را این مرکز به همراه دارد. علاوه بر این، بر اساس میزان تولیداتی که در مرکز کاشت اول حاصل می‌شود، طبیعی است که میزان مصرف گاز دی‌اکسید کربن نیز بیشتر باشد از همین روی، در مرکز کاشت اول بیشترین مصرف گاز کربن دی‌اکسید در دوره اول مصرف می‌شود و در مرحله دوم در همین مرکز کمترین میزان مصرف را دارد. در جدول ۶، مقدار تولید جاتروفا تولید شده در مرکز کاشت جاتروفا در مکان j در دوره زمانی t یعنی P_{jt}^1 و همچنین، مقدار حمل و نقل جاتروفا از مرکز کاشت j به مرکز استخراج روغن i در دوره زمانی t یعنی T_{jit}^1 در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶. مقدار تولید جاتروفا در دو دوره زمانی

مرکز کاشت جاتروفا	دوره زمانی اول	دوره زمانی دوم
$j = 1$	۰	۴۱۱/۱۴۳

جدول ۷. مقدار حمل و نقل جاتروفا در هر دوره زمانی

مرکز استخراج روغن $i = 1$		
	دوره اول	دوره دوم
به		
از		
$j = 1$ مرکز کاشت اول	۰	۴۱۱/۱۴۳

با توجه به جدول ۶ که مقدار تولید جاتروفا در دو دوره زمانی نشان داده شده است، طبق مقدار محاسبه شده در دوره اول هیچ مقداری برای تولید جاتروفا در نظر گرفته نمی‌شود. و فقط در دوره دوم مقدار ۴۱۱/۱۴۳ تن جاتروفا تولید می‌شود. بنابراین، با توجه به میزان تولید جاتروفا در دوره دوم، به میزان تولید آن حمل و نقل صورت می‌گیرد. در جدول ۸، مقدار حمل و نقل جلبک از مرکز کاشت m ، به مرکز استخراج روغن i در دوره زمانی t یعنی T_{mit}^{ξ} نشان داده شده است. مقدار حمل و نقل جلبک بر اساس مقدار تولید جلبک در مرکز کاشت m در دوره زمانی t یعنی P_{mt}^{ξ} برآورد می‌شود.

جدول ۸. مقدار حمل و نقل جلبک در دوره زمانی t

از \ به	مرکز استخراج روغن $i = 1$	
	دوره اول	دوره دوم
$m = 1$ مرکز کاشت اول	۱۵۶۷/۵۶۸	۶۳۰
$m = 2$ مرکز کاشت دوم	۰	۹۰۰

جدول ۸ میزان حمل و نقل جلبک تولید شده از مراکز کاشت در دوره زمانی t را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به دست آمده، متناسب با میزان تولید جلبک، میزان حمل و نقل نیز افزایش می‌یابد. جدول ۹ نیز مقادیر به دست آمده برای متغیرها حاصل از حل مساله در دوره t را نشان می‌دهد. در این جدول، P_{it}^6 مقدار روغن جاتروفای تولید شده در مرکز استخراج روغن i در دوره t ؛ P_{it}^9 مقدار روغن جلبک تولید شده در مرکز استخراج روغن i در دوره t ؛ P_{it}^{10} مقدار ضایعات روغن پیش تصفیه شده در مرکز استخراج روغن i در دوره t ؛ P_{it}^{13} مقدار مواد اولیه دارو در مرکز استخراج روغن i در دوره t ؛ P_{it}^{14} تولید کود در مرکز استخراج روغن i در دوره t محاسبه شده است.

با توجه به اینکه حمل و نقل WCO تولید شده دارای دو مرحله است، در جدول ۱۰، مقدار حمل و نقل ضایعات روغن از مرکز تامین W به مرکز پیش تصفیه در دوره t نشان داده شده است. در جدول ۱۱ نیز مقدار حمل و نقل ضایعات روغن تولید شده از مرکز پیش تصفیه به پالایشگاه زیستی در دوره‌های زمانی نشان داده شده است. در توضیح جدول ۱۱ لازم به ذکر است که همان میزان ضایعات روغن تولید شده در طی دوره‌های زمانی به طور مستقیم به پالایشگاه زیستی منتقل می‌شود.

جدول ۹. مقدار متغیرهای $P_{it}^6, P_{it}^9, P_{it}^{10}, P_{it}^{13}, P_{it}^{14}$

متغیر	مکان $i = 1$	دوره زمانی	
		اول	دوم
P_{it}^6	مرکز استخراج روغن	۰	۲۲۶/۱۲۹
P_{it}^9	مرکز استخراج روغن	۹۸۷/۵۶۸	۹۶۳/۹۰۰
P_{it}^{10}	مرکز استخراج روغن	۷۱۷۴۹/۹۱۰	۸۷۸۱۳/۲۹۵
P_{it}^{13}	مرکز استخراج روغن	۵۸۰	۷۱۰
P_{it}^{14}	مرکز استخراج روغن	۰	۴۱/۱۱۴

جدول ۱۰. مقدار حمل و نقل ضایعات روغن از مرکز تامین W به مرکز پیش تصفیه در دوره t

از \ به	مرکز پیش تصفیه $p = 1$	
	دوره اول	دوره دوم
$W = 1$ مرکز تامین اول	۳۳۳۹۰۰	۳۱۱۶۰۰
$W = 2$ مرکز تامین دوم	۲۴۸۴۹/۵۵۰	۱۲۷۴۶۶/۴۷۶

جدول ۱۱. مقدار حمل و نقل ضایعات روغن از مرکز پیش تصفیه p به پالایشگاه زیستی k در دوره t

از	به	پالایشگاه زیستی $i = 1$	
		دوره اول	دوره دوم
$p = 1$ مرکز پیش تصفیه اول		۷۱۷۴۹/۹۱۰	۸۷۸۱۳/۲۹۵

علاوه بر این، در جدول ۱۲، مقدار حمل و نقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن i به پالایشگاه زیستی k در دوره t یعنی T_{ikt}^1 نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده نشان می دهد که مقدار حمل و نقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن به پالایشگاه در دوره دوم بیشترین مقدار را دارد.

جدول ۱۲. مقدار T_{ikt}^1

از	به	پالایشگاه زیستی $i = 1$	
		دوره اول	دوره دوم
$i = 1$ مرکز استخراج روغن		۹۸۷/۵۶۸	۱۱۹۰/۰۲۹

سرانجام، مقدار کل ظرفیت مرکز جمع آوری و استخراج روغن i در طی دوره های زمانی اول و دوم برابر با ۵۰۰۰ در هر دوره برآورد می شود. با ملحوظ دانستن کلیه عوامل فوق مقدار تابع هدف و هزینه بهینه برابر با 10^{14} \times ۱۱۳۵۲۱ طی مدت زمان ۳۵ ثانیه هست. علاوه بر حصول نتایج مساله از حل در ابعاد کوچک، مقدار بعد مساله را بیشتر در نظر می گیریم. برای این منظور، پارامترهای ورودی حل مساله را مطابق با جدول ۱۳ در نظر می گیریم.

جدول ۱۳. پارامترهای مساله در ابعاد متوسط

زمان محاسبات (ثانیه)	مقدار تابع هدف $\times 10^4$	مقدار ورودی ها										نمونه
		t	b	k	p	i	w	m	o	n	j	
۱۲۸	۲۱۳۲۵۶	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۱
۳۵۹	۳۲۴۶۸۹	۳	۳	۲	۲	۳	۴	۴	۳	۲	۲	۲
۵۵۶	۳۸۹۶۵۷	۳	۴	۳	۳	۴	۴	۴	۳	۲	۲	۳
۶۰۲	۴۱۲۵۶۹	۳	۳	۴	۴	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۴
۶۱۳	۴۲۵۶۹۸	۳	۳	۳	۳	۵	۴	۴	۳	۳	۳	۵

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۳، مشخص است که در صورت افزایش ابعاد مساله از کوچک به متوسط مدت زمان پاسخگویی مدل به طور چشم گیری افزایش پیدا می کند. این مساله نشان می دهد که مدل با افزایش ابعاد با پیچیدگی روبه رو می شود که حتی ممکن است در ابعاد بزرگتر قادر به حل مساله نباشد.

۴-۳ حل مساله در ابعاد بزرگ با استفاده از روش فراابتکاری

برای حل مدل با استفاده از روش فراابتکاری ابتدا لازم است پارامترهای تحقیق تعیین شوند. به منظور تعیین پارامترهای الگوریتم از طراحی آزمایشات استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا برای پارامترهای آن ۳ سطح مختلف (کم با کد ۱، متوسط با کد ۲ و زیاد با کد ۳) تعریف می‌شود. سپس آزمایش‌های از پیش تعریف شده در این الگوریتم به ازای تمام ترکیبات ممکن اجرا می‌شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای این الگوریتم مطابق جدول ۱۴ می‌باشد.

جدول ۱۴. پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم NSGA-II

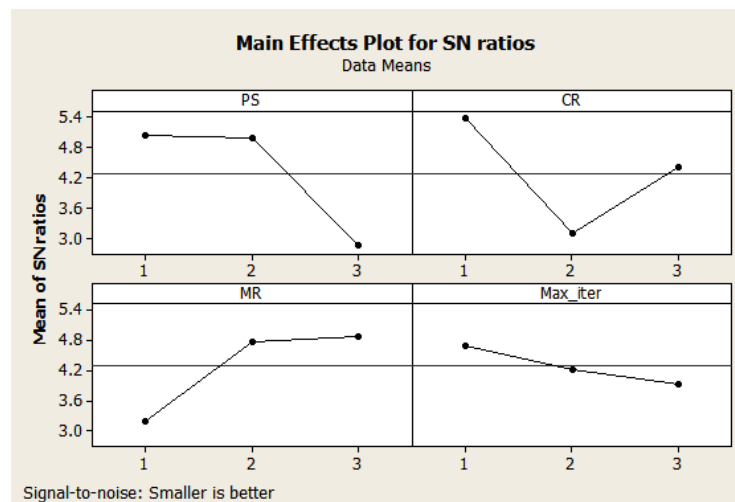
مقادیر هر سطح			پارامتر
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۲۰۰	۱۰۰	۵۰	Population size (PS)
۰/۹	۰/۷	۰/۵	Crossover rate (CR)
۰/۵	۰/۳	۰/۲	Mutation rate (MR)
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	Maximum iterations (Max_iter)

سپس با طرح L9 تاگوجی آزمایشات مختلف را ایجاد و برای هر کدام الگوریتم NSGA-II اجرا شده است. نتایج اجرا در جدول ۱۵ ارائه شده است. در این جدول کلیه حالات ممکن به ازای سطوح مختلفی که برای فاکتورهای الگوریتم NSGA-II مدنظر هستند، نشان داده شده است. برای مثال در آزمایش اول، کلیه فاکتورهای به ازای کمترین سطح خود در آزمایش شرکت دارند. در آزمایش دوم، فاکتور PS با مقدار کمترین سطح و سایر فاکتورها با مقدار متوسط مربوط به خود حضور دارند. به همین ترتیب سایر حالت ممکن براساس قاعده جایگشت در آمار تکمیل می‌شود. با اجرای هر آزمایش و محاسبه مقدار شاخص MID سطح پاسخ مورد نظر با استفاده از این شاخص برآورد می‌شود.

جدول ۱۵. مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوجی برای NSGA-II

شاخص MID	پارامترهای الگوریتم				شماره اجرا
	Max iter	MR	CR	PS	
۰/۵۳۴	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۶۱۲	۲	۲	۲	۱	۲
۰/۵۳۷	۳	۳	۳	۱	۳
۰/۴۹۱	۳	۲	۱	۲	۴
۰/۵۷۶	۱	۳	۲	۲	۵
۰/۶۳۷	۲	۱	۳	۲	۶
۰/۵۹۹	۲	۳	۱	۳	۷
۰/۹۷۳	۳	۱	۲	۳	۸
۰/۶۴۲	۱	۲	۳	۳	۹

حال با ارایه این خروجی‌ها به نرم افزار MINITAB نمودار S/N به صورت شکل ۴ ارایه می‌شود. براساس مقدار محاسبه شده نسبت سیگنال به نویز به ازای کلیه سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از فاکتورها، هر چه این مقدار برای سطح مورد نظر کمتر باشد، مقدار آن سطح برای آن فاکتور انتخاب می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است، کم‌ترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتور PS در زمانی اتفاق می‌افتد که این شاخص در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار دارد. بنابراین، مقداری که برای این پارامتر در الگوریتم NSGA-II در نظر می‌گیریم برابر با ۲۰۰ خواهد بود. همچنین، کم‌ترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای شاخص CR مربوط به سطح متوسط با کد ۲ این فاکتور است. بنابراین، فاکتور CR با مقدار ۰/۷ در الگوریتم حضور خواهد داشت. علاوه بر این، کم‌ترین مقدار برای فاکتور MR مربوط به زمانی است که این فاکتور در سطح پایین خود با کد ۱ قرار دارد. بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۰/۲ حضور خواهد داشت. سرانجام، فاکتور Max_iter در شرایطی کم‌ترین مقدار نسبت به نویز را دارد که در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار داشته باشد. بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۲۰۰ حضور خواهد داشت.



شکل ۴. خروجی مینی تب برای روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II

حال بر اساس خروجی ارایه شده در نمودار فوق بهترین مقدار هر پارامتر در جدول ۱۶ مشخص شده است و سایر مثال‌ها با این مقادیر پارامترهای الگوریتم، اجرا می‌شود. در جدول ۱۶ مقدار بهینه پارامترها ارایه شده است.

جدول ۱۶. مقدار بهینه متغیرها در NSGA-II

مقدار بهینه	پارامتر
۲۰۰	Population size (PS)
۰/۷	Crossover rate (CR)
۰/۲	Mutation rate (MR)
۲۰۰	Maximum iterations (Max_iter)

۴-۴ مقایسه نتایج قطعی و فراابتکاری

در این بخش به منظور مقایسه حل قطعی با حل از طریق الگوریتم فراابتکاری آزمایش‌هایی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مطابق با جدول ۱۷ انجام می‌شود. در این جدول ابعاد نمونه‌های عددی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ۱۰ نمونه عددی موجود می‌باشد. نمونه‌های ۱ تا ۴ برای ابعاد کوچک و نمونه‌های ۵ تا ۸ مربوط به نمونه‌های متوسط و نمونه‌های ۹ تا ۱۰ مربوط به نمونه‌های بزرگ می‌باشد. طبیعی است هر چه ابعاد مساله بیشتر شود تعداد گره‌های مساله نیز بیشتر می‌شود. این آزمایش‌ها براساس مفروضات اولیه مدل براساس مراکز کشت جاتروفا، مراکز کشت نوروک، مراکز کاشت خرزهره، مراکز کشت جلبک، مراکز پالایشگاه‌های زیستی و دوره‌های زمانی می‌باشد.

جدول ۱۷. ابعاد نمونه‌های عددی

ابعاد	نمونه‌ها	مراکز کشت جاتروفا	مراکز کشت نوروک	مراکز کشت خرزهره	مراکز کشت جلبک	مراکز پالایشگاه زیستی	دوره زمانی
کوچک	نمونه ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	نمونه ۲	۲	۲	۲	۱	۲	۱
	نمونه ۳	۲	۲	۳	۱	۲	۱
	نمونه ۴	۲	۳	۳	۱	۳	۱
متوسط	نمونه ۵	۳	۳	۳	۲	۳	۲
	نمونه ۶	۳	۳	۴	۲	۳	۲
	نمونه ۷	۴	۴	۴	۲	۳	۲
	نمونه ۸	۴	۴	۳	۲	۴	۲
بزرگ	نمونه ۹	۵	۵	۴	۳	۴	۳
	نمونه ۱۰	۶	۶	۵	۴	۵	۳

جدول ۱۸. نتایج مقایسه‌ای حل در ابعاد کوچک و متوسط

ردیف	GAMS			زمان حل	NSGA-II			زمان حل	خطا		
	f_3	f_2	f_1		f_3	f_2	f_1		ARE_p	ARE_r	ARE_1
۱	۱	۲۸۹/۴	۵۰۹	۱۰	۱	۲۸۹/۴	۵۰۹	۵	۰	۰	۰
۲	۳۷	۳۰۰/۲	۵۴۲	۱۲	۳۵	۳۰۰/۲	۵۴۲	۷	۰/۰۵	۰	۰/۰۰۱
۳	۴۹	۳۰۲/۱	۶۴۹	۱۵	۴۶	۳۰۳/۳	۶۵۰	۱۲	۰/۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱
۴	۹۹	۳۲۰/۳	۶۹۱	۱۷	۹۴	۳۲۱/۹	۶۹۳	۱۵	۰/۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
۵	۱۰۲۱	۶۲۹	۱۴۵۴	۲۰	۹۹۸	۶۳۱/۶	۱۴۵۷	۱۸	۰/۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
۶	۱۴۱۳	۷۳۷/۵	۱۵۶۸	۲۵	۱۳۹۸	۷۴۰/۴	۱۵۷۲	۲۲	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
۷	۲۹۳۴	۸۰۴/۶	۱۶۰۰	۳۵	۲۹۰۵	۸۰۶/۳	۱۶۰۴	۳۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۰
۸	۷۳۷۱	۹۸۳/۳	۱۹۰۹	۵۰	۷۳۷۰	۹۸۷/۶	۱۹۱۱	۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱
۹	-	-	-	-	۷۶	۱۰۰۰/۶۵	۲۵۰۲	۵۰	-	-	-
۱۰	-	-	-	-	۸۲	۱۱۲۵/۵	۳۵۴۶	۵۵	-	-	-
میانگین خطاها در هر تابع هدف											
	۰/۰۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱								

جدول ۱۸ نتایج حل مدل را در سایزهای کوچک، متوسط و بزرگ نشان می‌دهد. چهار نمونه اول مربوط به میانگین جواب‌های مدل در حالت کوچک و چهار نمونه بعدی مربوط به میانگین جواب‌های مدل در سایز متوسط و دو نمونه آخر نیز مربوط به ابعاد بزرگ مساله می‌باشد. دو نمونه آخر از این جهت در ابعاد بزرگ قرار می‌گیرند، زیرا مدل ریاضی قادر به حل و ارایه پاسخ برای مقدار تابع هدف نمی‌باشد. در این جدول نتایج حل دقیق با نتایج روش NSGA-II مقایسه شده است. در ستون خطا، خطای مطلق نسبی از طریق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\left| \frac{\text{mathematical model} - \text{metaheuristic model}}{\text{mathematical model}} \right|$$

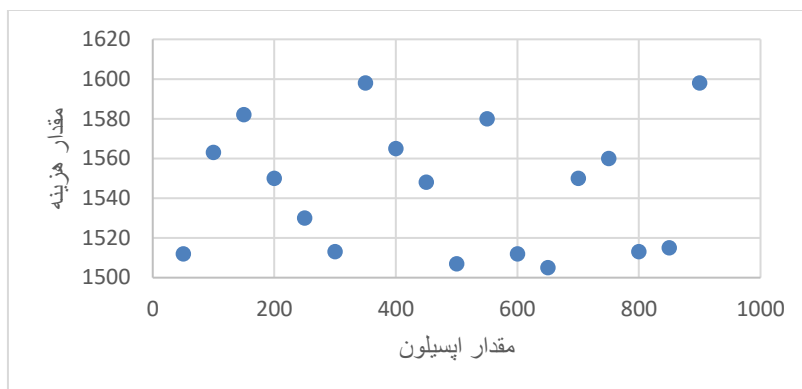
mathematical model

این خطای محاسباتی توسط جهانگیری و همکاران [۲۵] توصیه شده است. براساس آن می‌توانیم مقدار خطا بین دو سری نتایج را محاسبه نماییم. در صورتی که مقدار خطای محاسباتی بین دو سری داده کمتر از ۰/۰۵ باشد خطای بین دو سری داده قابل اغماض خواهد بود. بنابراین، در این صورت می‌توانیم به نتایج مدل فراابتکاری در حل مسایل با ابعاد بزرگ اعتماد نماییم. با توجه به اختلاف کم در خطای روش‌های مدل‌سازی ضمن تایید صحت مدل ریاضی توسعه داده شده، صحت عملکرد و کارایی الگوریتم NSGA-II اثبات می‌شود و می‌توان برای حل مسایل در ابعاد بزرگ نیز به NSGA-II اعتماد کرد. نتایج حل بیانگر آن است که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مساله پیچیدگی حل آن در هر دو روش محاسباتی افزایش می‌یابد. زیرا، زمان حل از مساله‌ای به مساله دیگر تغییر یافته و افزایش پیدا می‌کند. البته مدت زمان حل توسط الگوریتم فراابتکاری NSGA-II نسبت به روش قطعی به مراتب کمتر است بنابراین با توجه به نتایج جدول ۱۴ می‌توان برای حل مسایل در ابعاد بزرگ به الگوریتم NSGA-II اعتماد کرد و عملکرد مناسبی را پیش‌بینی کرد.

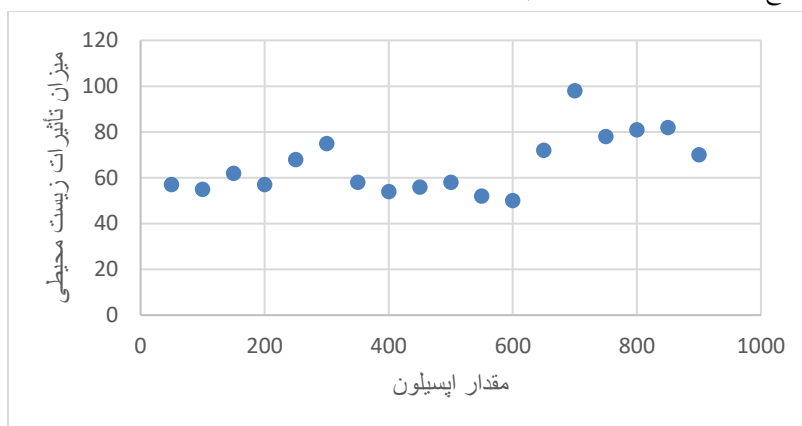
۴-۵ تحلیل حساسیت

در این بخش حساسیت مقادیر اسپیلون بر روی مقدار توابع هدف سنجیده خواهد شد و نتایج حاصل شامل مقادیر قابل اطمینان با تعیین فاصله اسپیلون برای توابع هدف گزارش می‌شود. برای این منظور، در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ مقادیر مختلفی برای اسپیلون تعریف شده و توابع هدف با آنها حل شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، مقادیر تابع هدف با افزایش اسپیلون تا مقدار مشخصی، تغییر قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهند. اما از جایی به بعد (برای مثال تابع هدف دوم) افزایش در مقدار اسپیلون، افزایش و با شیب قابل ملاحظه‌ای در مقادیر توابع هدف را گزارش می‌کند (تغییر اسپیلون از ۶۰۰ تا ۹۰۰). بر اساس نتایج به‌دست آمده، به ازای آزمایش مقادیر مختلف اسپیلون، ناحیه شدنی و بردار بهبوددهنده توابع هدف نشان ایجاد شده است. برطبق نتایج به‌دست آمده سطح تغییرات معنی‌دار اسپیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ به‌عنوان بردار بهبود دهنده تعیین شده است. تعیین این بازه مشخص می‌کند که اگر چنانچه مقدار اسپیلون کمتر از ۵۰ و بیشتر از ۹۰۰ در نظر گرفته شود پاسخ مساله خارج از ناحیه شدنی قرار می‌گیرد. بنابراین، دامنه تغییرات اسپیلون برای جستجوی جواب بهینه محلی برای تابع هدف اول ۶۵۰ قرار دارد زیرا در روی این نقطه جواب بهینه برای تابع هدف اول رخ می‌دهد. وضعیت بهینه برای تابع هدف دوم در اسپیلون ۶۰۰ به‌دست می‌آید. در شکل‌های ۵ تا ۷ نتایج حل مدل با طول گام برابر با ۵۰ نشان داده شده است.

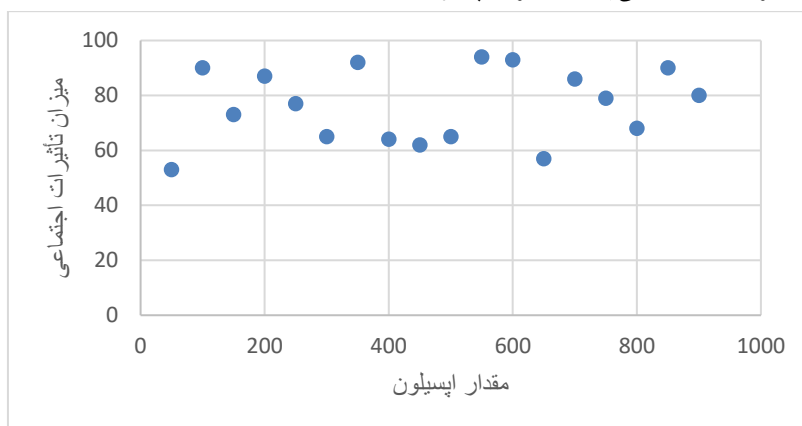
رجیان و همکاران، طراحی شبکه زنجیره تامین چندسطحی، چنددوره‌ای، چندمحصولی زیست توده پایدار با در نظر گرفتن تنوع مواد ورودی



شکل ۵. میزان تغییرات تابع هدف به ازای تغییر در مقدار اِپسیلون



شکل ۶. میزان تغییرات تأثیرات زیست محیطی به ازای تغییرات اِپسیلون



شکل ۷. میزان تغییرات تأثیرات اجتماعی به ازای تغییرات اِپسیلون

علاوه بر این، با در نظر گرفتن پارامتر تاثیرگذار بر روی مقدار تابع هدف میزان اثر تغییرات آن پارامتر را بر روی تابع هدف بررسی می کنیم. برای این منظور، پارامتر حداکثر ظرفیت مراکز جمع آوری و استخراج روغن را در نظر می گیریم. بدیهی است در صورت اعمال تغییر روی ظرفیت این مراکز، بر روی میزان هزینه های مربوط به آنها تاثیر می گذارد. در این بخش می خواهیم حالتی را بررسی کنیم که ظرفیت هر یک از مراکز ۱۰۰ واحد زیاد و کم گردد. در این صورت تاثیر این تغییرات را بر روی مقدار تابع هدف بررسی می کنیم. در جدول ۱۹، ظرفیت میادین در صورت اضافه کردن ۱۰۰ واحد و همچنین، در صورت کم کردن ۱۰۰ واحد نشان داده شده است.

جدول ۱۹. ظرفیت میدین با اضافه کردن ۱۰۰ واحد

ظرفیت مراکز فعلی $+100$ $Cap_{current}$	
مقدار تابع هدف	12452×10^{14}
ظرفیت مراکز فعلی -100 $Cap_{current}$	
مقدار تابع هدف	12452×10^{14}

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار، مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق با استفاده از چند سطحی و چند محصولی بودن شبکه، می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل استفاده برای بهبود کارایی شبکه زنجیره تامین به منظور افزایش پایداری زیست توده، مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به ویژگی‌های زیست توده، از جمله حساسیت آن به شرایط محیطی و اجتماعی، طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، استفاده از مدل ریاضی چند سطحی و چند محصولی، که به دقت و به صورت یکپارچه تمامی عوامل مؤثر در زنجیره تامین را بررسی می‌کند، می‌تواند بهبود کارایی و افزایش پایداری شبکه را به همراه داشته باشد. به علاوه، استفاده از این مدل، در بهبود هزینه‌ها و کاهش آثار منفی بر محیط زیست نیز موثر خواهد بود. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مختلط عدد صحیح برای به کارگیری در یک زنجیره تامین زیست توده چند سطحی و چند محصولی ارائه شده است. کارایی مدل پیشنهادی برای استفاده طولانی مدت در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم فراابتکاری مورد مقایسه قرار گرفته است. با استفاده از این مدل می‌توانیم مقادیر بهینه برای اجزای اصلی زنجیره را تعیین نماییم. مهم‌ترین مقادیری که با استفاده از این مدل می‌توانیم محاسبه نماییم عبارت است از: مقدار بهینه تولید گلیسرین، بیودیزل، جاتروفا، جلبک و مقدار WCO در پالایشگاه‌های زیستی، تعیین مقدار بهینه روغن جاتروفا و جلبک، تعیین مقدار تولید مواد اولیه دارو و تولید کود در مراکز استخراج، میزان حمل و نقل جاتروفا، جلبک، بیودیزل، WCO ، نوروژک، کود و خرزهره، تعیین ظرفیت مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن. در نظر گرفتن هزینه‌های ناشی از استفاده از تکنولوژی جذب و انتقال و ذخیره کربن دی‌اکسید منتشر شده از دودکش نیروگاه‌ها و واحدهای صنعتی شامل هزینه جداسازی کربن دی‌اکسید پس از احتراق، هزینه حمل کربن دی‌اکسید به وسیله خطوط انتقال به سایت‌های ذخیره سازی و هزینه ذخیره سازی امن کربن دی‌اکسید می‌تواند برای تحقیقات آتی در ساخت و توسعه مدل مدنظر محققان قرار بگیرد.

منابع

- [1] Lin, T., Rodríguez, L. F., Shastri, Y. N., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2013). GIS-enabled biomass-ethanol supply chain optimization: model development and Miscanthus application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(3), 314-333.
- [2] Wang, X., Dong, X., Wang, X. C., Zhang, P., Liu, R., Klemeš, J. J., & Zheng, J. (2022). A life cycle assessment of an enterprise's low-carbon emissions model: The Xinjiang Shihezi pig farm faecal treatment biogas project as a case study. *Journal of Environmental Management*, 304, 114251.
- [3] Delkosh, F., & Sadjadi, S. J. (2020). A robust optimization model for a biofuel supply chain under demand uncertainty. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(2), 229-245.

- [4] Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32.
- [5] Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., & Daneshmand-Mehr, M. (2022). Simulation-based multiobjective optimization of open-pit mine haulage system: a modified-NBI method and meta modeling approach. *Complexity*, 2022.
- [6] Bai, Y., Zhai, Y., Zhang, T., Ren, K., Jia, Y., Zhou, X., & Hong, J. (2023). Sustainable assessment and resource recycling opportunities identification for China's pig industry: Integrating environmental, economic and social perspectives. *Sustainable Production and Consumption*.
- [7] FAO (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations 3–5 June 2008, Bioenergy, Food Security and Sustainability – Towards an International Framework, High Level Conference on World Food Security: the Challenges of Climate Change and Bioenergy, FAO, Rome, Italy, 2018.
- [8] Heydari Kushalshah, T., Daneshmand-Mehr, M., & Abolghasemian, M. (2023). Hybrid modelling for urban water supply system management based on a bi-objective mathematical model and system dynamics: A case study in Guilan province. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 15(1), 260-279.
- [9] Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Aghaei, S., Aghbashlo, M., Kiehadrouinezhad, M., Gupta, V. K., Mohammadi, P., & Tabatabaei, M. (2024). Biodiesel plants: real-world sustainability analysis using environmental and social life cycle assessment. In *Sustainable Biodiesel* (pp. 301-332). Academic Press.
- [10] Leung, D. Y., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4), 1083-1095.
- [11] Wang, H., Yang, X., & Ou, X. (2014). A study on future energy consumption and carbon emissions of China's transportation sector. *Low Carbon Economy*, 5(04), 133.
- [12] Greenwell, H. C., Laurens, L. M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., & Flynn, K. J. (2010). Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of the royal society interface*, 7(46), 703-726.
- [13] Fernández-Puratich, H., Rebolledo-Leiva, R., Hernández, D., Gómez-Lagos, J. E., Armengot-Carbo, B., & Oliver-Villanueva, J. V. (2021). Bi-objective optimization of multiple agro-industrial wastes supply to a cogeneration system promoting local circular bioeconomy. *Applied Energy*, 300, 117333.
- [14] Ahmadvand, S., Khadivi, M., Arora, R., & Sowlati, T. (2021). Bi-objective optimization of forest-based biomass supply chains for minimization of costs and deviations from safety stock. *Energy Conversion and Management: X*, 11, 100101.
- [15] Hosseinalizadeh, R., Khamseh, A. A., & Akhlaghi, M. M. (2019). A multi-objective and multi-period model to design a strategic development program for biodiesel fuels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100545.
- [16] Durmaz, Y. G., & Bilgen, B. (2020). Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design. *Applied Energy*, 272, 115259.
- [17] Mahjoub, N., Sahebi, H., Mazdeh, M., & Teymouri, A. (2020). Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120355.
- [18] Rezaei, M., Chaharsooghi, S. K., Husseinzadeh Kashan, A., & Babazadeh, R. (2020). Optimal design and planning of biodiesel supply chain network: a scenario-based robust optimization approach. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 111-128.
- [19] Guler, D., Charisoulis, G., Battenfield, B. P., & Yomralioglu, T. (2021). Suitability modeling and sensitivity analysis for biomass energy facilities in Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-17.
- [20] Sánchez-García, S., Athanassiadis, D., Martínez-Alonso, C., Tolosana, E., Majada, J., & Canga, E. (2017). A GIS methodology for optimal location of a wood-fired power plant: Quantification of available wood fuel, supply chain costs and GHG emissions. *Journal of Cleaner Production*, 157, 201-212.
- [21] Ahmadvand, S., & Sowlati, T. (2022). A robust optimization model for tactical planning of the forest-based biomass supply chain for syngas production. *Computers & Chemical Engineering*, 159, 107693.
- [22] Khadivi, M. (2022). Economic analysis and supply chain optimization of biomass gasification at a kraft pulp mill (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- [23] Shevchenko, A. R., Tyshkunova, I. V., Chukhchin, D. G., Malkov, A. V., Toptunov, E. A., Telitsin, V. D., Aksenov, A. S. (2023). Production of Biomodified Bleached Kraft Pulp by Catalytic Conversion Using *Penicillium verruculosum* Enzymes: Composition, Properties, Structure, and Application. *Catalysts*, 13(1), 103.
- [24] Pirouz, B., & Khorram, E. (2016). A computational approach based on the ϵ -constraint method in multi-objective optimization problems. *Adv. Appl. Stat*, 49(6), 453-483.

- [25] Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., & Chobar, A. P. (2023). Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering*, 43(1), 1-19.
- [26] Hasani, A., & Hosseini, S. M. H. (2023). Green Scheduling in Flexible Flow Shop with Machine-Dependent Processing Stages, Machines Eligibility, and Release Time. *Journal of Operational Research In Its Applications (Applied Mathematics)*, 20(2), 25-48. (In Persian)