مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال بیست و یکم، شماره سوم (پیاپی ۸۲)،پاییز ۰۳، ص ص ۷۹-۴۷
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

طراحی شبکه زنجیره تامین چندسطحی، چنددوره‌ای، چندمحصولی زیست‌توده 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

مدل‌سازی ریاضی در زمینه طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار چندسطحی و چندمحصولی، به بررسی رفتار و ارتباط بین عوامل موثر بر این شبکه می‌پردازد. این موارد شامل ابعاد مختلف شبکه، میزان تقاضا و عرضه، نیازهای منابع، قیود و محدودیت‌های مختلف است. مدل‌سازی و حل این مسایل با در نظر گرفتن جنبه های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به طور هم‌زمان، این امکان را می‌دهد تا بتوانیم ضمن بهینه‌سازی فاکتورهای موثر در اجرای شبکه زنجیره تامین، گزینه‌های کاهش هزینه با حفظ کیفیت خدمات و افزایش رفاه اجتماعی را نیز جستجو کنیم. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه عدد صحیح مختلط برای به‌کارگیری در یک زنجیره تامین زیست‌توده چند سطحی و چندمحصولی ارایه‌شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II مورد ارزیابی قرار گرفته است که با استفاده از این مدل می‌توانیم مقادیر بهینه برای اجزای اصلی زنجیره تامین در دراز مدت 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 ضایعات روغن در پالایشگاه‌های زیستی، تعیین مقدار بهینه روغن جاتروفا و جلبک، تعیین مقدار تولید مواد اولیه دارو و تولید کود در مراکز استخراج، میزان حمل‌ونقل جاتروفا، جلبک، بیودیزل، مقدار ضایعات روغن، نوروزک، کود و خرزهره، تعیین ظرفیت مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن. علاوه بر این، یک تحلیل حساسیت با تغییراتی روی مقدار اپسیلون انجام شده است. برطبق نتایج به‌دست‌آمده سطح تغییرات معنی‌دار اپسیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ به‌عنوان بردار بهبود دهنده تعیین‌شده است. به طوری که دامنه تغییرات اپسیلون برای جستجوی جواب بهینه محلی برای تابع هدف اول ۶۵۰ و برای برای تابع هدف دوم در اپسیلون ۶۰۰ تعیین شده است. همچنین، تغییرات مقدار توابع هدف را در صورت تغییر در مقدار ظرفیت میادین محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین زیست‌توده، چند دوره‌ای، پایداری، چند محصولی، تنوع موارد ورودی.

* عهده‌دار مکاتبات

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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 انرژی های 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. بااین‌حال، انتظار می‌رود که این منابع عمدتاً مورداستفاده 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 زیست محیطی 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 زیست محیطی اخیرا توجهاتی به ارزیابی چرخه زندگی اجتماعی که به عملکرد اجتماعی محصولات می پردازد در مسایل تولید انرژی های پاک نیز توسعه یافته است [۸]. بر این اساس، این رویکردها می‌توانند به رفع چالش‌ها و نگرانی های 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 مورداستفاده قرارگرفته‌اند. بیودیزل به‌عنوان یک سوخت زیستی مایع از آلکیل استرهای اسید چرب ساخته‌شده از تری گلیسیریدها، دی آسیل گلیسرول‌ها، 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]. ازاین‌رو، هزینه اولیه زیست‌توده را می‌توان به میزان قابل‌توجهی 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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 ازجمله موارد مهم در این زمینه به شمار می‌رود. با توجه به این‌که طراحی بهینه و پایدار شبکه زنجیره تامین سوخت‌های زیستی نقش اساسی در کاهش هزینه‌ها و تجاری‌سازی آن‌ها دارد، ازاین‌رو 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 این‌که 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].

براساس 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 بررسی‌شده است تا بر اساس آن‌ها یک شبکه زنجیره تامین زیست‌توده طراحی شود و به‌عنوان روش پیشنهادی ارایه 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 ارایه‌شده است. در بخش سوم روش مدل‌سازی تحقیق ارایه‌شده است. در بخش چهارم، نتایج به‌کارگیری مدل به همراه تحلیل حساسیت ارایه‌شده است. در بخش پنجم، یک نتیجه‌گیری کلی به همراه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارایه‌شده 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 تقویت‌شده به‌دست‌آمده است. بر اساس نتایج آن‌ها، B۵ و B۴۰ مناسب‌ترین گزینه‌های موجود در مجموعه پارتو

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

هستند. دل‌خوش و سجادی [۳]، یک زنجیره تامین سوخت زیستی ریز جلبک را از طریق یک رویکرد دومرحله‌ای 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 ارایه 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 باردر ادبیات، استفاده مجدد از گازها و تصفیه فاضلاب در مراحل مختلف به‌عنوان مواد خام برای مراحل دیگر را موردبررسی قراردادند. دورماز و بلگین [۱۶] یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه پایدار برای طراحی زنجیره تامین زیست‌توده ارایه داده‌اند. برای این منظور، یک برنامه‌ریزی بهینه‌سازی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده در قالب یک رویه روش سه مرحله‌ای برای حل مساله ارایه‌شده 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 پایین‌دست زنجیره تامین زیست‌توده با استفاده از سه نوع زیست‌توده شامل جاتروفا (نسل دوم)، پسماندهای کشاورزی و کود دامی (نسل دوم) و ریز جلبک (نسل سوم) برای تولید انرژی زیستی ارایه کردند. آن‌ها این مدل را با استفاده از روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده راه‌حل‌های بهینه پارتو، حل کردند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مقدار انرژی زیستی تولیدشده بدون توجه به نوع آن، تولید انرژی از ریز جلبک و جاتروفا بیشتر از پسماندهای زیستی قابل‌دوام 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 نوروزک، 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 ارایه شده است. در این مدل برخی از پارامترها ازجمله تقاضا، عرضه، هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی دارای ماهیت غیرقطعی هستند ازاین‌رو برای اولین بار در ادبیات، مقدار پارامترهای نامعین بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی سناریو در هر سناریو تخمین زده و احتمال وقوع سناریوها مشخص‌شده 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 ارایه‌شده 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 تجزیه‌وتحلیل حساسیت برای تاسیسات انرژی زیست‌توده ارایه کرده‌اند. برای این منظور، این مطالعه رویکردی برای تعیین مکان تاسیسات زیست‌توده ارایه می‌دهد که سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، منطق فازی و بهترین راه‌حل بدترین روش (BWM) را که یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) و به‌تازگی توسعه‌یافته 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 ارایه دادند. هدف از این تحقیق ارزیابی کمی است که نشان دهد آیا حمل انواع مختلف زیست‌توده به نیروگاه به‌جای دفن زباله، اقتصادی و زیست‌محیطی است و تعیین

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

زیست‌توده موردنیاز با توجه به در دسترس بودن نیروی تولید برای هر زیست‌توده با منشا کشاورزی و صنعتی چه میزان است. سانچز گارسیا و همکاران [۲۰] مساله طراحی زنجیره تامین زیست‌توده را در شرایط چندهدفه بررسی کرده و بر روی به حداقل رساندن هم‌زمان هزینه کل و انتشار کربن از وسایل حمل‌ونقل تمرکز کرده‌اند. ایشان در تحقیق خود، مدل‌های تصادفی و فازی برای تصمیم‌گیری استراتژیک (مکان‌های بهینه کارخانه) و تصمیم‌گیری‌های تاکتیکی (جریان‌های مواد، انواع کامیون و غیره)، تحت عدم قطعیت تقاضا را توسعه داده و برای حل این مدل‌ها از رویکرد اپسیلون محدودیت استفاده کرده‌اند. احمدوند و همکاران [۱۴] یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه برای برنامه‌ریزی تاکتیکی زنجیره‌های تامین زیست‌توده مبتنی بر جنگل به‌منظور تعیین معاوضه بین هزینه‌های کل و انحرافات احتمالی از ذخیره ایمنی توسعه دادند. در تحقیق ایشان، هدف اول به حداقل رساندن هزینه‌های زنجیره تامین بالادستی و هدف دوم به حداقل رساندن انحرافات منفی موجودی ماهیانه از موجودی ایمنی است. متغیرهای تصمیم‌گیری شامل جریان بهینه زیست‌توده ماهانه، پیش‌پردازش و سطوح موجودی است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت انحراف سطح موجودی از موجودی ایمنی، حداکثر ۱۸ درصد صرفه‌جویی در هزینه امکان‌پذیر است. در مطالعه دیگری، مساله طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده مبتنی بر جنگل برای تولید گاز سنتز در سطح تاکتیکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها توسط احمدوند و صولتی [۲۱] بررسی شده است. در این تحقیق، یک مدل بهینه‌سازی استوار توسعه‌یافته و برای یک آسیاب خمیرسازی کاغذ کرافت در بریتیش کلمبیای کانادا به عنوان مطالعه موردی اعمال‌شده است. کل هزینه زنجیره تامین مطالعه موردی بر اساس مدل بهینه‌سازی استوار ۶۷ درصد بیشتر از مدل قطعی است، بااین‌حال، مدل قوی یک راه‌حل بهینه واحد ارایه می‌دهد که برای همه مقادیر پارامتر در بازه‌های عدم قطعیت در نظر گرفته‌شده امکان‌پذیر است. خدیوی [۲۲] در مطالعه خود به گازی شدن به‌عنوان یکی از فناوری‌های پردازش برای تبدیل زیست‌توده به گاز سنتز و گاز طبیعی تجدیدپذیر پرداخته است. همچنین، در مطالعه خود به امکان‌سنجی اقتصادی و میزان کاهش انتشار به‌عنوان عوامل مهمی که بر تصمیمات سرمایه‌گذاری مربوط به گاز سازی زیست‌توده تاثیر گذارند، توجه کرده‌اند. بنابراین، پس از شناسایی بهترین جایگزین برای تبدیل به گاز برای سرمایه‌گذاری، به حداقل رساندن هزینه‌ها و انتشارات زنجیره تامین زیست‌توده بسیار مهم است، زیرا هزینه‌های زنجیره تامین می‌تواند تا ۵۰٪ از کل هزینه تبدیل به گاز باشد و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های زنجیره تامین می‌تواند جبران شود. ونگ و همکاران [۳] یک مطالعه تطبیقی بر روی دو پروژه تصفیه بیوگاز از زباله‌های آبزی‌پروری، 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 ارایه طرح‌های بهبود و بهینه‌سازی هدفمند اتخاذ شده است. شوچنکو و همکاران [۲۳] در مطالعه خود ترکیب، خواص، ساختار و کاربرد تولید خمیر کرافت سفیدشده زیستی اصلاح‌شده با تبدیل کاتالیزوری با به‌کارگیری آنزیم‌های پنی سیلیم وروکولوزوم نشان دادند. درنتیجه بیوکاتالیز انجام‌شده، محصولات محلول قند که شامل عمدتاً گلوکز، زایلوبیوز، زایلوز و همچنین سایر قندهای احیاکننده جزیی هستند به‌دست آمد. بای و همکاران [۶] در تحقیق خود سناریوهای پرورش خوک و استفاده از منابع کود اصلی ناشی از آن را از دیدگاه های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی برای تولید زیست توده را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که پرورش خوک در چین خطرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

بالقوه قابل‌توجهی 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 ارایه 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 انجام‌شده است، طبق دانش به‌دست‌آمده مطالعه‌ای که به‌طور 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 شناسایی‌شده در ادبیات مربوط به موضوع تحقیق، این مطالعه در درجه اول یک مدل یکپارچه که به‌طور هم‌زمان هم مکان‌یابی و هم مسیریابی در طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار زیست‌توده ارایه 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 موردمطالعه بر اساس نوع زیست‌توده و نوع رویکرد مدل‌سازی طبقه‌بندی‌شده است.

جدول ۱. مطالعات پیشین در زمینه شبکه زنجیره تامین زیست‌توده

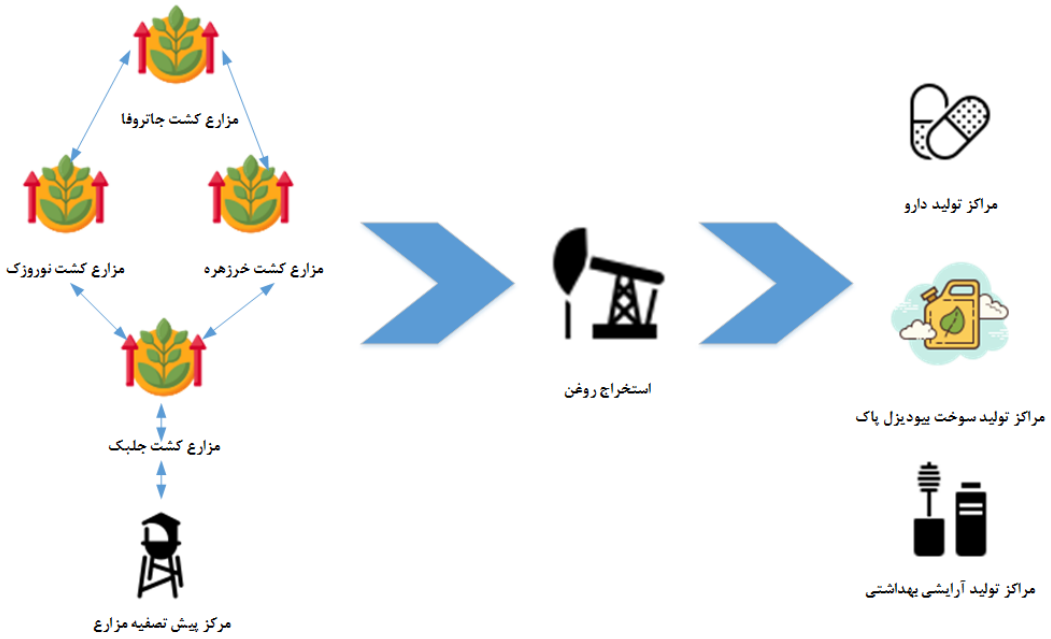
منبع	ویژگی‌های مسئله موردبررسی					مواد ورودی	محصول	توابع هدف						رویکرد حل			
	تعداد لایه	چند محصولی	چند دوره‌ای	تنوع موارد ورودی	تنوع محصول			سود	هزینه	انتشار آلاینده	مصرف انرژی	اجتماعی	قطعی	ابتکاری	فرا‌ابتکاری	استوار
[۱۵]	دو		*	*		روغن پسماند، سویا، آفتابگردان، کلزا	محصول بیودیزل	*	*				*				
[۳]	دو			*		گازها و فاضلاب	ریزجلبک		*				*				*
[۱۷]	دو			*		جاتروفا، پسماند کشاورزی، کود دامی	ریزجلبک		*				*				
[۱۸]	دو	*		*		نوروزک، جاتروفا	محصول بیودیزل		*	*		*					*
[۱۳]	دو		*			زباله‌های کشاورزی	سیستم بازیافت			*			*				
[۲۱]	سه					زباله جنگلی	گاز سنتز		*								*
[۲۲]	دو	*				خمیرکاغذ	گاز سنتز و گاز طبیعی		*	*							*
[۲۳]	دو			*		آنزیم‌های پنی سیلیم وروکولوزوم	خمیر کرافت	*									
[۶]	سه				*	کود خوک	برق		*	*		*	*				
[۹]	دو				*	کود حیوانی	زیست توده				*		*				
تحقیق حاضر	چهار	*	*	*	*	جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریز جلبک و روغن‌های پسماند خوراکی	سوخت بیودیزل، مواد اولیه دارو لوازم‌آرایشی و بهداشتی	*	*	*	*	*	*			*	

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

۳ روش تحقیق

شبکه زنجیره تامین پیشنهادی یک شبکه ۴ لایه شامل مراکز تامین شامل، مزارع کاشت جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریزجلبک و مراکز تامین روغن‌های پسماند خوراکی، مراکز جمع‌آوری شامل، استخراج روغن و مراکز پیش‌تصفیه ضایعات روغن، مرکز پالایش شامل پالایشگاه‌های زیستی و مراکز تولید شامل مراکز تولید بیودیزل، تولید لوازم‌آرایشی و بهداشتی و تولید دارو هست. مدل ارایه‌شده یک مدل ریاضی چندهدفه عدد صحیح مختلط (MILP) است که هزینه‌های زنجیره تامین اعم از هزینه احداث، تولید، نگهداری موجودی و حمل‌ونقل و اثرات زیست‌محیطی را حداقل می‌کند. چارچوب مدل پیشنهادی برای انجام این تحقیق به‌صورت زیر است. در ادامه نمادگذاری که برای اندیس، متغیر و پارامترهای مدل در نظر گرفته‌شده، معرفی می‌گردد. در شکل ۱، ساختار زنجیره تامین این تحقیق نشان داده‌شده است.



شکل ۱. ساختار زنجیره تامین

۳-۱ مفروضات مدل

مفروضاتی که در ساختن مدل ریاضی ارایه‌شده به‌کاررفته‌اند مطابق زیر هستند:

- مدل زنجیره تامین ارایه‌شده یک مدل چندلایه و چند محصولی است. محصولات نهایی شبکه زنجیره تامین پیشنهادی سوخت دیزل، لوازم‌آرایشی و بهداشتی، مواد اولیه دارو هست.
- تمامی تقاضاهای مربوط به بیودیزل، لوازم‌آرایشی و بهداشتی و مواد اولیه دارو باید برآورده شوند و کمبود مجاز نیست.
- مواد اولیه موردنیاز برای تامین تقاضای بیودیزل، لوازم‌آرایشی و بهداشتی و مواد اولیه دارو از مزارع داخلی جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریز جلبک و روغن‌های پسماند خوراکی فراهم می‌شود و واردات ماده خام مجاز نیست.
- مکان‌های مراکز مصرف بیودیزل، لوازم‌آرایشی و بهداشتی و مواد اولیه دارو مشخص و ثابت هستند.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

- مکان‌های بالقوه برای کاشت جاتروفا، نوروزک، خرزهره و ریز جلبک، مراکز استخراج و مراکز پیش‌تصفیه روغن و احداث پالایشگاه مشخص هستند.
- حمل‌ونقل درون شبکه زنجیره تامین بیودیزل موردمطالعه فقط به‌وسیله یک مد جاده‌ای صورت می‌گیرد.
- امکان توسعه ظرفیت برای مزارع و کلیه تسهیلات بازشده وجود ندارد.
- تسهیلات بازشده 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 کوچک‌تر مساوی بیشترین حد موجودی باشد.

۳-۲ نمادگذاری

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

اندیس‌ها: اندیس‌های مورد استفاده در مدل‌سازی ریاضی در زیر معرفی‌شده‌اند.

j	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جاتروفا $j = ۱,۲,۳,\ldots,J$
n	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت نوروزک $n = ۱,۲,۳,\ldots,N$
o	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت خرزهره $o = ۱,۲,۳,\ldots,O$
m	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جلبک $m = ۱,۲,۳,\ldots,M$
w	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز تامین ضایعات روغن $w = ۱,۲,۳,\ldots,W$
i	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن جاتروفا، خرزهره، نوروزک و جلبک $i = ۱,۲,۳,\ldots,I$
p	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن $p = ۱,۲,۳,\ldots,P$
k	اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز پالایشگاه زیستی $k = ۱,۲,۳,\ldots,K$
b	اندیس پالایشگاه‌های دیزل $b = ۱,۲,۳,\ldots,B$
s	اندیس مراکز تولید لوازم‌آرایشی و بهداشتی $s = ۱,۲,۳,\ldots,S$
h	اندیس مراکز تولید دارو $h = ۱,۲,۳,\ldots,H$
t	اندیس دوره زمانی $t = ۱,۲,۳,\ldots,T$
$\eta = \{j,n,o\}$	اجتماع اندیس‌های j,n,o

پارامترها: پارامترهای به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق بر دو قسم طبقه‌بندی می‌شوند. پارامترهای فنی و پارامترهای هزینه‌ای.

الف) پارامترهای فنی: پارامترهای فنی مورداستفاده در زیر معرفی‌شده‌اند.

$\mathbf{D'_{bt}}$	تقاضای پالایشگاه‌های دیزل برای بیودیزل در دوره t
$\mathbf{D'_{t}}$	تقاضای گلیسیرین در دوره t

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

D^{3}_{t} تقاضای مواد اولیه دارو در دوره t

Ro_{wt} مقدار روغن پسماند عرضه‌شده توسط مرکز تامین w در دوره t

LF^{1}_{j} حداقل زمین اختصاص داده‌شده برای مرکز کاشت جاتروفا در مکان j

UF^{1}_{j} حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت جاتروفا در مکان j

LF^{2}_{n} حداقل زمین اختصاص داده‌شده برای مرکز کاشت نوروزک در مکان n

UF^{2}_{n} حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت نوروزک در مکان n

LF^{3}_{o} حداقل زمین اختصاص داده‌شده برای مرکز کاشت خرزهره در مکان o

UF^{3}_{o} حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت خرزهره در مکان o

LF^{4}_{m} حداقل زمین اختصاص داده‌شده برای مرکز کاشت جلبک در مکان m

UF^{4}_{m} حداکثر زمین در دسترس برای مرکز کاشت جلبک در مکان m

LC^{4}_{i} حد پایین ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن در مکان i

UC^{1}_{i} حد بالای ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن در مکان i

LC^{2}_{p} حد پایین ظرفیت مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن در مکان p

UC^{2}_{p} حد بالای ظرفیت مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن در مکان p

LC^{3}_{k} حد پایین ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k

UC^{3}_{k} حد بالای ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k

$Maxu^{1}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت جاتروفا انتخاب می‌شود

$Maxu^{2}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت نوروزک انتخاب می‌شود

$Maxu^{3}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت خرزهره انتخاب می‌شود

$Maxu^{4}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز کاشت جلبک انتخاب می‌شود

$Maxu^{5}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتخاب می‌شود

$Maxu^{6}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن انتخاب می‌شود

$Maxu^{7}$ ماکسیمم تعداد مناطقی که برای مرکز پالایشگاه زیستی انتخاب می‌شود

μ^{1}_{jt} میزان بهره‌وری جاتروفا در هر هکتار در مکان j دردوره t

μ^{2}_{nt} میزان بهره‌وری نوروزک در هر هکتار در مکان n در دوره t

μ^{3}_{ot} میزان بهره‌وری خرزهره در هر هکتار در مکان o در دوره t

μ^{4}_{mt} میزان بهره‌وری جلبک هر واحد مساحت در مکان m در دوره t

α^{1} ضریب تبدیل جاتروفا به روغن جاتروفا

α^{2} ضریب تبدیل نوروزک به روغن نوروزک

α^{3} ضریب تبدیل خرزهره به روغن خرزهره

α^{4} ضریب تبدیل جلبک به روغن جلبک

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

α^{5} ضریب تبدیل ضایعات روغن جمع‌آوری‌شده به ضایعات روغن پیش‌تصفیه

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 پیش‌تصفیه به بیودیزل

$maxI^{6}$ حداکثر موجودی بیودیزل در پالایشگاه زیستی

ب) پارامترهای هزینه: پارامترهای هزینه عبارت‌اند از هزینه ثابت، متغیر، تولید، نگهداری موجودی، حمل‌ونقل نشان داده‌شده است.

- **هزینه ثابت**

FC^{1}_{j} هزینه ثابت کاشت جاتروفا در مکان j

FC^{2}_{n} هزینه ثابت کاشت نوروزک در مکان n

FC^{3}_{o} هزینه ثابت کاشت خرزهره در مکان o

FC^{4}_{m} هزینه ثابت کاشت جلبک در مکان m

FC^{5}_{i} هزینه ثابت استقرار مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن در مکان i

FC^{6}_{p} هزینه ثابت استقرار مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن در مکان p

FC^{7}_{k} هزینه ثابت استقرار مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k

- **هزینه متغیر**

VC^{1}_{j} هزینه متغیر کاشت جاتروفا در هر هکتار در مکان j

VC^{2}_{n} هزینه متغیر کاشت نوروزک در مکان n

VC^{3}_{o} هزینه متغیر کاشت خرزهره در مکان o

VC^{4}_{mt} هزینه متغیر کاشت جلبک در مکان mدر دوره t

VC^{5}_{it} هزینه متغیر هر واحد ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن در مکان i در دوره t

VC^{6}_{pt} هزینه متغیر هر واحد ظرفیت مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن در مکان p در دوره t

VC^{7}_{kt} هزینه متغیر هر واحد ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی در مکان k در دوره t

- **هزینه تولید**

PC^{1}_{jt} هزینه تولید هر واحد جاتروفا در مکان j در دوره t

PC^{2}_{nt} هزینه تولید هر واحد نوروزک در مکان n در دوره t

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

PC^{3}_{ot} هزینه تولید هر واحد خرزهره در مکان o در دوره t

PC^{4}_{mt} هزینه تولید هر واحد جلبک در مکان m در دوره t

$CCO2_{mt}$ هزینه واحد CO_2 برای تولید جلبک در مکان m در دوره t

PC^{5}_{wt} هزینه جمع‌آوری ضایعات روغن در مرکز تامین w در دوره t

PC^{6}_{it} هزینه تولید هر واحد روغن جاتروفا در مرکز استخراج روغن در مکان i در دوره t

PC^{7}_{it} هزینه تولید هر واحد روغن نوروزک در مرکز استخراج روغن در مکان iدر دوره t

PC^{8}_{it} هزینه تولید هر واحد روغن خرزهره در مرکز استخراج روغن در مکان iدر دوره t

PC^{9}_{it} هزینه تولید هر واحد روغن جلبک در مرکز استخراج روغن در مکان i در دوره t

PC^{10}_{pt} هزینه پیش‌تصفیه ضایعات روغن در مکان p در دوره t

PC^{11}_{kt} هزینه تولید بیودیزل در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t

PC^{12}_{kt} هزینه تولید گلیسیرین در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t

PC^{13}_{it} هزینه تولید هر واحد مواد اولیه دارو در مرکز استخراج روغن iدر دوره t

PC^{14}_{it} هزینه تولید کود در مرکز استخراج روغن iدر دوره t

- **هزینه نگهداری موجودی**

IC^{6}_{kt} هزینه واحد نگهداری موجودی بیودیزل در مکان پالایشگاه زیستی kدر دوره t

- **هزینه حمل‌ونقل**

TC^{1}_{jit} هزینه واحد حمل‌ونقل جاتروفا از مرکز کاشت j به مرکز استخراج روغن i در دوره t

TC^{2}_{nit} هزینه واحد حمل‌ونقل نوروزک از مرکز کاشت n به مرکز استخراج روغن i در دوره t

TC^{3}_{oit} هزینه واحد حمل‌ونقل خرزهره از مرکز کاشت o به مرکز استخراج روغن i در دوره t t

TC^{4}_{mit} هزینه واحد حمل‌ونقل جلبک از مرکز کاشت m به مرکز استخراج روغن i توسط در دوره t

TC^{5}_{wpt} هزینه واحد حمل‌ونقل ضایعات روغن از مرکز تامین w به مرکز پیش‌تصفیه p توسط در دوره t

TC^{6}_{ikt} هزینه واحد حمل‌ونقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن iبه پالایشگاه زیستی k در دوره t

TC^{7}_{pkt} هزینه واحد حمل‌ونقل ضایعات روغن پیش‌تصفیه شده از مرکز پیش‌تصفیه p به پالایشگاه زیستی k در دوره t

TC^{8}_{kbt} هزینه واحد حمل‌ونقل بیودیزل از مرکز پالایشگاه زیستی k به مرکز مصرف بیودیزل b در دوره t

TC^{9}_{it} هزینه واحد حمل‌ونقل کود از مرکز استخراج روغن i به مراکز کاشت در دوره t

Cpp^{12}_{it} هزینه واحد حمل‌ونقل گلیسیرین ارسالی از پالایشگاه k به مشتری در دوره t

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

$Cpp_{it}^{۱۳}$ هزینه واحد حمل‌ونقل مقدار مواد اولیه دارو ارسالی از مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن i به مشتری در دوره t

ج) پارامترهای اجتماعی

$\mathbf{hr}^{۱}_{jt}$ تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت جاتروفا در محل j در دوره t

$\mathbf{hr}^{۲}_{nt}$ تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت نوروزک در محل n در دوره t

$\mathbf{hr}^{۳}_{ot}$ تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت خرزهره در محل o در دوره t

$\mathbf{hr}^{٤}_{mt}$ تعداد نیروی انسانی موجود در مرکز کاشت جلبک در محل m در دوره t

$\mathbf{hr}^{٥}_{st}$ تعداد نیروی انسانی موجود در مراکز تولید لوازم آرایشی در دوره t

$\mathbf{hr}^{٦}_{bt}$ تعداد نیروی انسانی موجود در مراکز تولید سوخت دیزل در دوره t

$\mathbf{hr}^{۷}_{ht}$ 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 مورداستفاده عبارت‌اند از:

$\mathbf{u}^{۱}_{j}$ اگر مکان j برای مرکز کاشت جاتروفا انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر

$\mathbf{u}^{۲}_{n}$ اگر مکان n برای مرکز کاشت نوروزک انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر

$\mathbf{u}^{۳}_{o}$ اگر مکان o برای مرکز کاشت خرزهره انتخاب شود ۱ در غیراینصورت صفر

$\mathbf{u}^{٤}_{m}$ اگر مکان m برای مرکز کاشت جلبک انتخاب شود ۱ در غیراینصورت صفر

$\mathbf{u}^{٥}_{i}$ اگر مکان iبرای باز کردن مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر

$\mathbf{u}^{٦}_{p}$ اگر مکان p برای باز کردن مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه روغن انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر

$\mathbf{u}^{۷}_{k}$ 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:

$\mathbf{I}^{٦}_{kt}$ مقدار موجودی بیودیزل در مرکز پالایشگاه زیستی k در دوره t

$\mathbf{P}^{۱}_{jt}$ مقدار جاتروفا تولیدشده در مرکز کاشت جاتروفا در مکان jدر دوره t

$\mathbf{P}^{۲}_{nt}$ مقدار نوروزک تولیدشده در مکان n در دوره t

$\mathbf{P}^{۳}_{ot}$ مقدار خرزهره تولیدشده در مکان o در دوره t

$\mathbf{P}^{٤}_{mt}$ مقدار جلبک تولیدشده در مرکز کاشت mدر دوره t

$\mathbf{CO۲}_{mt}$ مقدار $CO_۲$ مصرف‌شده در مرکز کاشت جلبک mدر دوره t

$\mathbf{P}^{٦}_{it}$ مقدار روغن جاتروفای تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t

$\mathbf{P}^{۷}_{it}$ مقدار روغن نوروزک تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t

$\mathbf{P}^{۸}_{it}$ مقدار روغن خرزهره تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

P^{9}_{it} مقدار روغن جلبک تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t

P^{10}_{pt} مقدار ضایعات روغن پیش‌تصفیه تولیدشده در مکان p در دوره t

P^{11}_{kt} مقدار تولید بیودیزل در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t

P^{12}_{kt} مقدار تولید گلیسیرین در مکان پالایشگاه زیستی k در دوره t

P^{13}_{it} مقدار تولید مواد اولیه دارو در مرکز استخراج روغن iدر دوره t

P^{14}_{it} مقدار تولید کود در مرکز استخراج روغن iدر دوره t

T^{1}_{jit} مقدار حمل‌ونقل جاتروفا از مرکز کاشت jبه مرکز استخراج روغن i در دوره t

T^{2}_{nit} مقدار حمل‌ونقل نوروزک از مرکز کاشت n به مرکز استخراج روغن i در دوره t

T^{3}_{oit} مقدار حمل‌ونقل خرزهره از مرکز کاشت o به مرکز استخراج روغن i در دوره t

T^{4}_{mit} مقدار حمل‌ونقل جلبک از مرکز کاشت m به مرکز استخراج روغن i در دوره t

T^{5}_{wpt} مقدار حمل‌ونقل ضایعات روغن از مرکز تامین w به مرکز پیش‌تصفیه p در دوره t

T^{6}_{ikt} مقدار حمل‌ونقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن i به پالایشگاه زیستی kدر دوره t

T^{7}_{pkt} مقدار حمل‌ونقل ضایعات روغن پیش‌تصفیه شده از مرکز پیش‌تصفیه p به پالایشگاه زیستی k در دوره t

T^{8}_{kbt} مقدار حمل‌ونقل بیودیزل از مرکز پالایشگاه زیستی k به مرکز مصرف b در دوره t

T^{9}_{it} مقدار حمل‌ونقل کود از مرکز استخراج روغن i به مراکز کاشت در دوره t

V^{1}_{j} مقدار ناحیه کشت‌شده جاتروفا در مکان j

V^{2}_{n} مقدار ناحیه کشت‌شده نوروزک در مکان n

V^{3}_{o} مقدار ناحیه کشت‌شده خرزهره در مکان o

V^{4}_{mt} مقدار ناحیه کشت‌شده جلبک در مکان m

V^{5}_{it} مقدار کل ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن i در دوره t

V^{6}_{pt} مقدار کل ظرفیت مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه p در دوره t

V^{7}_{kt} مقدار کل ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی k در دوره t

pp^{12}_{kt} مقدار گلیسیرین ارسالی از پالایشگاه k به مشتری در دوره t

pp^{13}_{it} مقدار مواد اولیه دارو ارسالی از مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن i به مشتری در دوره t

۳-۳ محدودیت‌ها و توابع هدف

الف) توابع هدف:

در این قسمت توابع هدف در نظر گرفته‌شده که شامل کاهش هزینه‌های ثابت، متغیر، تولید، نگهداری موجودی و حمل‌ونقل و تاثیرات زیست‌محیطی و تابع اثرات اجتماعی می‌باشد. مدل زنجیره تامین زیست توده پایدار حاضر

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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 نیازو 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:

$$\min z_1=\sum_k\sum_t VC^{7}_{kt}\times V^{7}_{kt}+\sum_j\sum_t PC^{1}_{jt}\times P^{1}_{jt}+\sum_n\sum_t PC^{2}_{nt}\times P^{2}_{nt}+\sum_o\sum_t PC^{3}_{ot}\times P^{3}_{ot}+\sum_m\sum_t PC^{4}_{mt}\times P^{4}_{mt}+\sum_m\sum_t CCO2_{mt}\times CO2_{mt}+$$
$$\sum_p\sum_t PC^{10}_{pt}\times P^{10}_{pt}+\sum_k\sum_t PC^{11}_{kt}\times P^{11}_{kt}+\sum_k\sum_t PC^{12}_{kt}*P^{12}_{kt}+\sum_i\sum_t PC^{13}_{it}*P^{13}_{it}+\sum_i\sum_t PC^{14}_{it}\times P^{14}_{it}+\sum_k\sum_t IC^{6}_{kt}\times I^{6}_{kt}+$$
$$\sum_j\sum_i\sum_t TC^{1}_{jit}\times T^{1}_{jit}+\sum_k\sum_t cpp^{11}_{kt}\times pp^{11}_{kt}+\sum_k\sum_t cpp^{12}_{kt}\times pp^{12}_{kt}+\sum_n\sum_i\sum_t TC^{2}_{nit}\times T^{2}_{nit}+$$
$$\sum_o\sum_i\sum_t TC^{3}_{oit}\times T^{3}_{oit}+\sum_m\sum_i\sum_t TC^{4}_{mit}\times T^{4}_{mit}+\sum_w\sum_p\sum_t TC^{5}_{wpt}\times T^{5}_{wpt}+$$
$$\sum_i\sum_k\sum_t TC^{6}_{ikt}\times T^{6}_{ikt}+\sum_p\sum_k\sum_t TC^{7}_{pkt}\times T^{7}_{pkt}+\sum_k\sum_b\sum_t TC^{8}_{kbt}\times T^{8}_{kbt}+\sum_i\sum_t\sum_\eta TC^{9}_{it}\times T^{9}_{\eta it}$$

الف-۲) تابع هدف تاثیرات زیست‌محیطی:

$$Minz_2=\sum_i\sum_t\alpha_1P^{6}_{it}+\sum_i\sum_t\alpha_{12}P^{7}_{it}+\sum_i\sum_t\alpha_3P^{8}_{it}+\sum_i\sum_t\alpha_4P^{9}_{it}$$
$$+\sum_i\sum_t\alpha_5P^{13}_{it}+\sum_p\sum_t\rho_1P^{10}_{pt}+\sum_w\sum_t\rho_2RO_{wt}+\sum_k\sum_t\rho_3P^{11}_{kt}$$
$$+\sum_k\sum_t\rho_4P^{12}_{kt}+\sum_i\sum_t\beta P^{14}_{it}$$

الف-۳) تابع هدف اجتماعی

$$Maxz_3=\sum_j\sum_t hr^{1}_{jt}u^{1}_{jt}+\sum_n\sum_t hr^{2}_{nt}u^{2}_{nt}+\sum_o\sum_t hr^{3}_{ot}u^{3}_{ot}$$
$$+\sum_m\sum_t hr^{4}_{mt}u^{4}_{mt}+\sum_i\sum_t hr^{5}_{it}u^{5}_{it}+\sum_p\sum_t hr^{6}_{pt}u^{6}_{pt}+\sum_k\sum_t hr^{7}_{kt}u^{7}_{kt}$$

ب) محدودیت‌ها: در زیر تمامی محدودیت‌های مورداستفاده در این تحقیق معرفی‌شده‌اند.

$$\sum_k T^{8}_{kbt}=D^{1}_{bt} \qquad \forall b,t \qquad (1)$$
$$\sum_k P^{12}_{kt}=D^{2}_{t} \qquad \forall t \qquad (2)$$
$$\sum_i P^{13}_{it}=D^{3}_{t} \qquad \forall t \qquad (3)$$
$$\sum_i T^{1}_{jit}=P^{1}_{jt} \qquad \forall j,t \qquad (4)$$
$$\sum_i T^{2}_{nit}=P^{2}_{nt} \qquad \forall n,t \qquad (5)$$
$$\sum_i T^{3}_{oit}=P^{3}_{ot} \qquad \forall o,t \qquad (6)$$
$$\sum_i T^{4}_{mit}=P^{4}_{mt} \qquad \forall m,t \qquad (7)$$
$$\sum_p T^{5}_{wpt}\le RO_{wt} \qquad \forall w,t \qquad (8)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

$$P^{1}_{jt} \le \mu^{1}_{jt} \times V^{1}_{j} \quad \forall \mathrm{j,t} \quad (9)$$

$$P^{2}_{nt} \le \mu^{2}_{nt} \times V^{2}_{n} \quad \forall \mathrm{n,t} \quad (10)$$

$$P^{3}_{ot} \le \mu^{3}_{ot} \times V^{3}_{o} \quad \forall \mathrm{o,t} \quad (11)$$

$$P^{4}_{mt} \le \mu^{4}_{mt} \times V^{4}_{mt} \quad \forall m,t \quad (12)$$

$$CO2_{mt} = 2 \times P^{4}_{mt} \quad \forall m,t \quad (13)$$

$$P^{6}_{it} = \alpha^{1} \sum_{j} T^{1}_{jit} \quad \forall i,t \quad (14)$$

$$P^{7}_{it} = \alpha^{2} \sum_{n} T^{2}_{nit} \quad \forall i,t \quad (15)$$

$$P^{8}_{it} = \alpha^{3} \sum_{o} T^{3}_{oit} \quad \forall i,t \quad (16)$$

$$P^{9}_{it} = \alpha^{4} \sum_{m} T^{4}_{mit} \quad \forall i,t \quad (17)$$

$$P^{10}_{pt} = \alpha^{5} \sum_{w} T^{5}_{wpt} \quad \forall p,t \quad (18)$$

$$P^{11}_{kt} = \beta . \sum_{i} T^{6}_{ikt} + \omega . \sum_{p} T^{7}_{pkt} \quad \forall k,t \quad (19)$$

$$P^{12}_{kt} = (1-\beta) . \sum_{i} T^{6}_{ikt} + (1-\omega) . \sum_{p} T^{7}_{pkt} \quad \forall k,t \quad (20)$$

$$P^{13}_{it} = \rho^{1} \sum_{j} T^{1}_{jit} + \rho^{2} \sum_{n} T^{2}_{nit} + \rho^{3} \sum_{o} T^{3}_{oit} + \rho^{4} \sum_{m} T^{4}_{mit} \quad \forall i,t \quad (21)$$

$$P^{14}_{it} = \left(1-\alpha^{1}-\rho^{1}\right) \sum_{j} T^{1}_{jit} + \left(1-\alpha^{2}-\rho^{2}\right) \sum_{n} T^{2}_{nit} + \left(1-\alpha^{3}-\rho^{3}\right) \sum_{o} T^{3}_{oit} + \left(1-\alpha^{4}-\rho^{4}\right) \sum_{m} T^{4}_{mit} \quad \forall i,t \quad (22)$$

$$P^{10}_{pt} = \sum_{k} T^{7}_{pkt} \quad \forall p,t \quad (23)$$

$$I^{6}_{kt} = I^{6}_{k,t-1} + P^{11}_{kt} - \sum_{b} T^{8}_{kbt} \quad \forall k,t \quad (24)$$

$$P^{14}_{it} = \sum_{\eta} T^{9}_{i\eta t} \quad \forall i,t \quad (25)$$

$$LF^{1}_{j} u^{1}_{j} \le V^{1}_{j} \le UF^{1}_{j} u^{1}_{j} \quad \forall j \quad (26)$$

$$LF^{2}_{n} u^{2}_{n} \le V^{2}_{n} \le UF^{2}_{n} u^{2}_{n} \quad \forall \mathrm{n} \quad (27)$$

$$LF^{3}_{o} u^{3}_{o} \le V^{3}_{o} \le UF^{3}_{o} u^{3}_{o} \quad \forall \mathrm{o} \quad (28)$$

$$LF^{4}_{m} u^{4}_{m} \le V^{4}_{mt} \le UF^{4}_{m} u^{4}_{m} \quad \forall m,t \quad (29)$$

$$LC^{1}_{i} u^{5}_{i} \le V^{5}_{it} \le UC^{1}_{i} u^{5}_{i} \quad \forall i,t \quad (30)$$

$$LC^{2}_{p} u^{6}_{p} \le V^{6}_{pt} \le UC^{2}_{p} u^{6}_{p} \quad \forall p,t \quad (31)$$

$$LC^{3}_{k} u^{7}_{k} \le V^{7}_{kt} \le UC^{3}_{k} u^{7}_{k} \quad \forall k,t \quad (32)$$

$$\sum_{j} T^{1}_{jit} + \sum_{n} T^{2}_{nit} + \sum_{o} T^{3}_{oit} + \sum_{m} T^{4}_{mit} \le V^{5}_{it} \quad \forall i,t \quad (33)$$

$$\sum_{w} T^{5}_{wpt} \le V^{6}_{pt} \quad \forall p,t \quad (34)$$

$$\sum_{i} T^{6}_{ikt} + \sum_{p} T^{7}_{pkt} \le V^{7}_{kt} \quad \forall k,t \quad (35)$$

$$P^{6}_{it} + P^{7}_{it} + P^{8}_{it} + P^{9}_{it} \le V^{5}_{it} \quad \forall i,t \quad (36)$$

$$P^{10}_{pt} \le V^{6}_{pt} \quad \forall p,t \quad (37)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

$$I_{kt}^{6} \le MaxI^{6} \qquad \forall k,t \qquad (۳۸)$$

$$\sum_j u_j^{1} \le Maxu^{1} \qquad (۳۹)$$

$$\sum_n u_n^{2} \le Maxu^{2} \qquad (۴۰)$$

$$\sum_o u_o^{3} \le Maxu^{3} \qquad (۴۱)$$

$$\sum_m u_m^{4} \le Maxu^{4} \qquad (۴۲)$$

$$\sum_i u_i^{5} \le Maxu^{5} \qquad (۴۳)$$

$$\sum_p u_p^{6} \le Maxu^{6} \qquad (۴۴)$$

$$\sum_k u_k^{7} \le Maxu^{7} \qquad (۴۵)$$

$$\sum_i T_{ikt}^{6} = P_{it}^{6} + P_{it}^{7} + P_{it}^{8} + P_{it}^{9} \qquad \forall i,t \qquad (۴۶)$$

$$P_{kt}^{12} \le V_{kt}^{7} \qquad \forall k,t \qquad (۴۷)$$

$$Continuous\,variables \ge 0 \qquad (۴۸)$$

$$u_j^{1}, u_n^{2}, u_o^{3}, u_m^{4}, u_i^{6}, u_p^{6}, u_k^{7} \in \{0,1\} \qquad (۴۹)$$

محدودیت (۱) نشان‌دهنده ارضای تمام تقاضای بیودیزل در دوره‌های مختلف است. محدودیت (۲) نشان‌دهنده ارضای تمام تقاضای گلیسیرین در دوره‌های مختلف است. محدودیت (۳) نشان‌دهنده ارضای تمام تقاضای مواد اولیه دارو در دوره‌های مختلف است. محدودیت (۴) تضمین می‌کند تمام‌دانه جاتروفای تولیدشده در مرکز کاشت جاتروفا به مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتقال می‌یابد. محدودیت (۵) تضمین می‌کند تمام‌دانه نوروزک تولیدشده در مرکز کاشت نوروزک به مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتقال می‌یابد. محدودیت (۶) تضمین می‌کند تمام‌دانه خرزهره تولیدشده در مرکز کاشت خرزهره به مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتقال می‌یابد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند تمام جلبک تولیدشده در مرکز کاشت جلبک به مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن انتقال می‌یابد. محدودیت (۸) تضمین می‌کند تمام روغن پسماند تولیدشده در مرکز تامین به مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن انتقال می‌یابد. محدودیت (۹) نشان‌دهنده مقدار دانه جاتروفا تولیدشده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۰) نشان‌دهنده مقدار دانه نوروزک تولیدشده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۱) نشان‌دهنده مقدار دانه خرزهره تولیدشده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۲) نشان‌دهنده مقدار جلبک تولیدشده در ناحیه کشت با توجه به میزان بهره‌وری آن است. محدودیت (۱۳) میزان کربن دی‌اکسید مصرف‌شده در مرکز کشت جلبک را محاسبه می‌کند. [۲۲] نشان دادند برای تولید هر تن زیست‌توده دو تن کربن دی‌اکسید موردنیاز است. محدودیت (۱۴) میزان روغن جاتروفای تولیدشده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل جاتروفا به روغن نمایش می‌دهد. محدودیت (۱۵) میزان روغن نوروزک تولیدشده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل نوروزک به روغن نمایش می‌دهد. محدودیت (۱۶) میزان روغن خرزهره تولیدشده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل خرزهره به روغن نمایش می‌دهد. محدودیت (۱۷) میزان روغن جلبک تولیدشده در مرکز استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل جلبک به روغن نمایش می‌دهد. محدودیت (۱۸) میزان روغن ضایعات

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

روغن تولیدشده در مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه را با توجه به ضریب تبدیل روغن نمایش می‌دهد. محدودیت (۱۹) مقدار تولید بیودیزل در پالایشگاه زیستی k ام را بر اساس ضرایب تبدیل تعیین می‌کند و نشان می‌دهد 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 منتقل‌شده و مقدار روغنی که از مرکز پیش‌تصفیه به پالایشگاه منتقل‌شده است. محدودیت (۲۰) مقدار تولید گلیسیرین در پالایشگاه زیستی k ام را تعیین می‌کند. محدودیت (۲۱) مقدار مواد اولیه دارو تولیدشده در مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل مواد اولیه کشت‌شده تعیین می‌کند. محدودیت (۲۲) مقدار کود تولیدشده در مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن را با توجه به ضریب تبدیل مواد اولیه کشت‌شده تعیین می‌کند. محدودیت (۲۳) تضمین می‌کند تمام روغن پیش‌تصفیه تولیدشده در مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه به مرکز پالایشگاه زیستی انتقال می‌یابد. محدودیت (۲۴) مقدار سطح موجودی بیودیزل را در پالایشگاه زیستی در هر دوره تعیین می‌کند که برابر موجودی بیودیزل در پالایشگاه زیستی در دوره قبل به‌اضافه مقدار بیودیزلی که در همان دوره در پالایشگاه تولیدشده منهای مقدار بیودیزلی است که برای ارضای تقاضا به دست مشتری می‌رسد. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند تمام کود تولیدشده در مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن به مراکز کاشت انتقال می‌یابد. محدودیت (۲۶) بیان می‌کند مقدار ناحیه اختصاص داده‌شده برای کشت جاتروفا بین حداقل زمین اختصاص داده‌شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۲۷) بیان می‌کند مقدار ناحیه اختصاص داده‌شده برای کشت نوروزک بین حداقل زمین اختصاص داده‌شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۲۸) بیان می‌کند مقدار ناحیه اختصاص داده‌شده برای کشت خرزهره بین حداقل زمین اختصاص داده‌شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۲۹) بیان می‌کند مقدار ناحیه اختصاص داده‌شده برای کشت جلبک بین حداقل زمین اختصاص داده‌شده و حداکثر زمین در دسترس است. محدودیت (۳۰) بیان می‌کند مقدار کل ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن بین حد پایین و حد بالای ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن است. محدودیت (۳۱) بیان می‌کند مقدار کل ظرفیت مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن بین حد پایین و حد بالای ظرفیت مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن است. محدودیت (۳۲) بیان می‌کند مقدار کل ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی بین حد پایین و حد بالای ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی است.محدودیت (۳۳) بیان می‌کند 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 می‌کند مجموع میزان ضایعات روغن ارسالی از مراکز تامین به مرکز پیش‌تصفیه باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز پیش‌تصفیه روغن باشد. محدودیت (۳۵) بیان می‌کند مجموع میزان روغن مواد اولیه و روغن پیش‌تصفیه ارسالی از مراکز استخراج روغن و پیش‌تصفیه ضایعات روغن به مرکز پالایشگاه زیستی باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز پالایشگاه زیستی باشد. محدودیت (۳۶) بیان می‌کند مجموع تولید روغن جاتروفا، روغن نوروزک، روغن خرزهره، روغن جلبک باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن باشد. محدودیت (۳۷) بیان می‌کند مقدار روغن پیش‌تصفیه تولیدی در مرکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت (۳۸) بیان می‌کند مقدار موجودی بیودیزل در مرکز پالایشگاه زیستی باید

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

کوچک‌تر یا مساوی پارامتر ماکسیمم موجودی باشد. محدودیت (۳۹) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت جاتروفا ایجادشده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۰) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت نوروزک ایجادشده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۱) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت خرزهره ایجادشده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۲) یک حد بالا برای تعداد مراکز کاشت جلبک ایجادشده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۳) یک حد بالا برای تعداد مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن ایجادشده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۴) یک حد بالا برای تعداد مراکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن ایجادشده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۴۵) یک حد بالا برای تعداد مراکز پالایشگاه زیستی ایجادشده 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 نوروزک، روغن خرزهره و روغن جلبک است. محدودیت (۴۷) بیان می‌کند مقدار گلیسیرین تولیدی در مرکز پالایشگاه زیستی باید حداکثر برابر مقدار کل ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت ۴۸ و ۴۹ تضمین می کند که متغیرهای تحقیق از نوع پیوسته و باینری هستند.

۳-٤ 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.

۳-٤-۱ روش اپسیلون محدودیت

مساله بهینه‌سازی در این تحقیق بر اساس روش اپسیلون محدودیت حل‌شده 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 به‌دست 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 ازآنجایی‌که یکی از ضعف‌های اساسی الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی دقیق ازجمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آن‌هاست، بدیهی است که به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد. یکی از نسخه‌های اصلاح‌شده روش اپسیلون محدودیت، چارچوبی است که پیروز و خرم [۲۴] ارایه 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 زمان 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 درنهایت بهینه‌سازی تک هدفه را حل کرده و مرز

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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

$$\min f_1(x) \qquad (۵۰)$$
$$s.t.$$
$$f_2(x) \le \varepsilon_2$$
$$f_3(x) \le \varepsilon_3$$
$$x \in S$$

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

۳-٤-۲ روش حل فراابتکاری NSGA-II

در این مقاله برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است. ازجمله 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 ٤: Create offspring using a crossover operator
Step ٥: Introduce genetic variation in the offspring using a mutation operator
Step ٦: Replace some of the least fit individuals in the current population with the new offspring
End loop
Finish//.

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

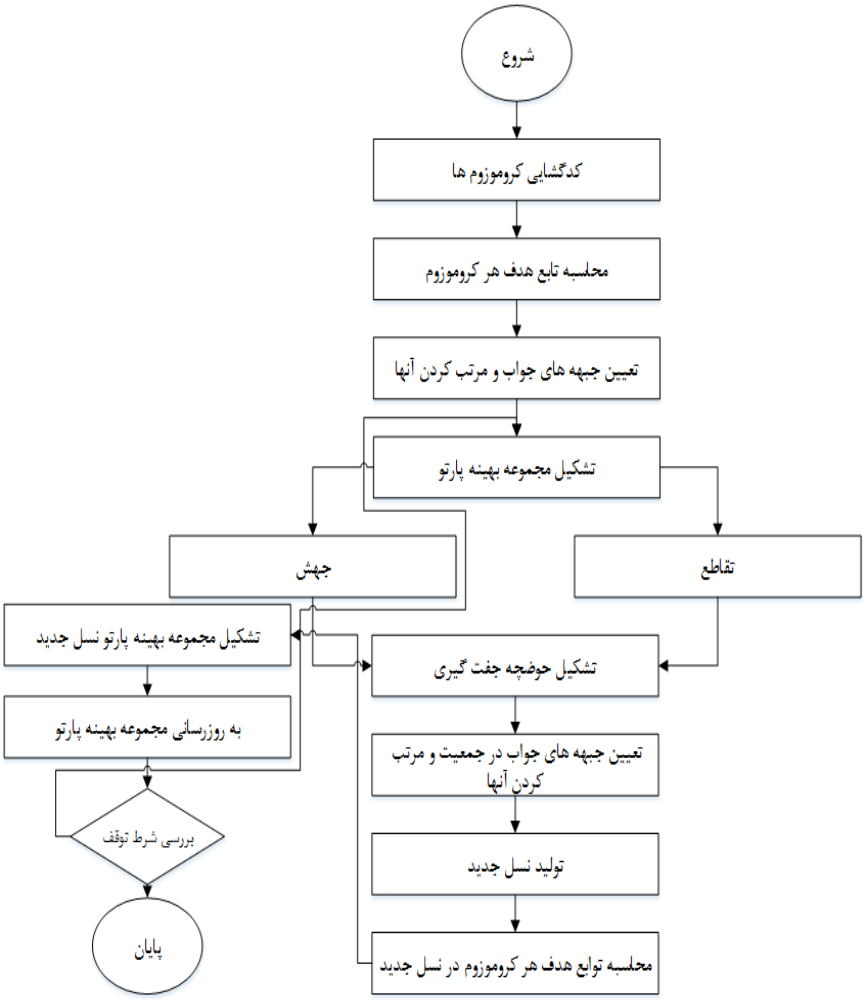
٤ حل مساله و تحلیل نتایج

٤-۱ مطالعه موردی

سازمان بهره‌وری انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق با هدف ارتقای بهره‌وری انرژی و استفاده بیشتر ازمنابع تجدیدپذیر و پاک با فراهم آوردن زیرساخت های 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 روش های تولید

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

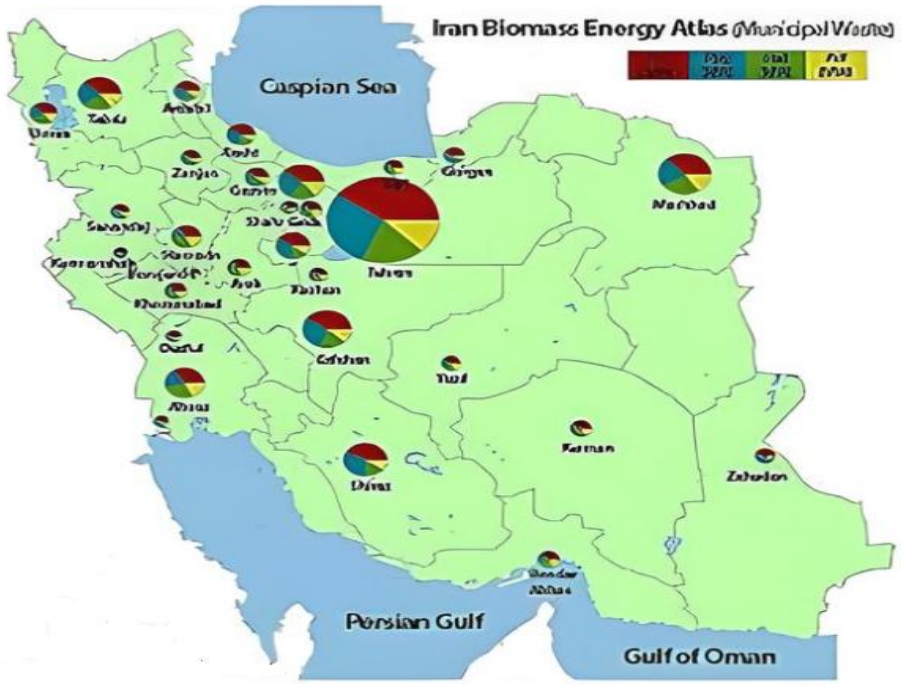
برق تجدیدپذیر و پاک را هدف قرار داده است. بنابراین، توسعه تولید انرژی زیستی از منابع زیست‌توده یک نیاز حیاتی برای شناخت راه های دسترسی به منابع مختلف در مناطق انباشت منابع ایران و همچنین، شناسایی فناوری‌های مختلف و الزامات فنی و اجرایی است. براین اساس، یک مطالعه موردی در سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و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



شکل ۲. فلوچارت اجرایی الگوریتم NSGA-II

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]



شکل ۳. پراکندگی منابع زیست توده در ایران

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

جدول ۲. مقادیر پارامترها در مطالعه موردی

نام اندیس	نماد	مقدار
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جاتروفا	j	۱
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت نوروزک	n	۱
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت خرزهره	o	۱
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز کاشت جلبک	m	۱و۲
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز تامین ضایعات روغن	w	۱و۲
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن جاتروفا، خرزهره، نوروزک و جلبک	i	۱
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری و پیش‌تصفیه ضایعات روغن	p	۱
اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز پالایشگاه زیستی	k	۱
اندیس پالایشگاه‌های دیزل	b	۱و۲
اندیس دوره زمانی	t	۱و۲

٤-۲ حل مساله در ابعاد کوچک و متوسط

با ملحوظ دانستن اطلاعات فوق، مدل پیشنهادشده در نرم‌افزار GAMS حل‌شده است. در جدول ۳، نتایج مربوط به مقادیر P_{kt}^{12}، P_{kt}^{11}، I_{kt}^{6} که به ترتیب برابر با مقدار تولید گلیسیرین در پالایشگاه زیستی k در دوره t؛ مقدار تولید

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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

جدول ۳. مقدار متغیرهای $I_{kt}^{۶}$ ،$P_{kt}^{۱۱}$ ،$P_{kt}^{۱۲}$

متغیر	مکان $k=۱$	دوره زمانی	
		اول	دوم
$P_{kt}^{۱۲}$	پالایشگاه زیستی اول	۱۰۹۶۰	۱۳۴۱۰
$P_{kt}^{۱۱}$	پالایشگاه زیستی اول	۶۱۷۷۷/۴۷۷	۷۵۵۹۳/۳۲۴
$I_{kt}^{۶}$	پالایشگاه زیستی اول	۵۲۸۳۷/۴۷۷	۱۱۷۵۱۰/۸۰۱

با توجه به نتایج حاصل‌شده، مشخص می‌شود که مقدار تولید بیودیزل از مقدار تولید گلیسیرین همواره در هر دو دوره زمانی بیشتر است. این درحالی است که همواره در طی هر دو دوره سهم قابل‌توجهی به‌عنوان 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 مقدار۵۲۸۳۷/۴۷۷ تن به‌عنوان موجودی پایان دوره برای مصرف در دوره دوم باقی می‌ماند. بنابراین، در دوره دوم با تولید ۸۴۷/ ۲۲۷۵۵ تن بیودیزل که با جمع باقیمانده از دوره اول که برابر با ۵۲۸۳۷/۴۷۷ تن است مقدار۷۵۵۹۳/۳۲۴ تن بیودیزل تولید می‌گردد. در جدول ۴، مقدار $T_{kbt}^{۸}$ حمل‌ونقل بیودیزل از مرکز پالایشگاه زیستی k به مرکز مصرف b در دوره t نشان داده‌شده است.

جدول ٤. مقدار متغیرهای $T_{kbt}^{۸}$

به / از	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 به‌دست‌آمده 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 حمل‌ونقل 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، $V_{mt}^{٤}$ مقدار جلبک کاشت شده در ناحیه مکان m در دوره t ؛ $P_{mt}^{٤}$ مقدار جلبک تولیدشده در مرکز کاشت m در دوره t ؛ مقدار $CO_{۲mt}$ مصرف‌شده در مرکز کاشت جلبک در مکان m در دوره t نشان داده‌شده است.

جدول ۵. مقدار تولید $V_{mt}^{٤}$، $P_{mt}^{٤}$، $CO_{۲mt}$

متغیر	مرکز کاشت	دوره زمانی	
		اول	دوم
$V_{mt}^{٤}$	$k=۱$	۵۰۰۰۰	۰
	$k=۲$	۵۰۰۰۰	۰
	$k=۱$	۱۵۶۷/۵۶۸	۶۳۰

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

۹۰۰	۰	$k = ۲$	$P^{٤}_{mt}$
۱۲۶۰	۳۱۳۵/۱۳۵	$k = ۱$	$CO_{۲mt}$
۱۸۰۰	۰	$k = ۲$	

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 جلبک تولیدشده مربوط به مرکز کاشت اول است که در دوره اول برنامه‌ریزی اتفاق می افتد. نظر به همین مساله که در دوره اول بیشترین تولید در مرکز کاشت اول تولیدشده 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 تولیدشده در مرکز کاشت جاتروفا در مکان j دردوره زمانی t یعنی $P^{۱}_{jt}$ و همچنین، مقدار حمل‌ونقل جاتروفا از مرکز کاشت j به مرکز استخراج روغن i دردوره زمانی t یعنی $T^{۱}_{jit}$ در جدول ۷ نشان داده‌شده است.

جدول ٦. مقدار تولید جاتروفا در دو دوره زمانی

دوره زمانی دوم	دوره زمانی اول	مرکز کاشت جاتروفا
۴۱۱/۱۴۳	۰	$j = ۱$

جدول ۷. مقدار حمل‌ونقل جاتروفا در هر دوره زمانی

مرکز استخراج روغن $i = ۱$		
دوره دوم	دوره اول	به / از
۴۱۱/۱۴۳	۰	$j = ۱$ مرکز کاشت اول

با توجه به جدول ۶ که مقدار تولید جاتروفا در دو دوره زمانی نشان داده‌شده است، طبق مقدار محاسبه‌شده 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 حمل‌ونقل صورت می‌گیرد. در جدول ۸، مقدار حمل‌ونقل جلبک از مرکز کاشت m، به مرکز استخراج روغن i در دوره زمانی t یعنی $T^{٤}_{mit}$ نشان داده‌شده است. مقدار حمل‌ونقل جلبک بر اساس مقدار تولید جلبک در مرکز کاشت m در دوره زمانی t یعنی $P^{٤}_{mt}$ برآورد می‌شود.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

جدول ۸. مقدار حمل‌ونقل جلبک در دوره زمانی t

از \ به	مرکز استخراج روغن $i=۱$	
	دوره اول	دوره دوم
مرکز کاشت اول $m=۱$	۱۵۶۷/۵۶۸	۶۳۰
مرکز کاشت دوم $m=۲$	۰	۹۰۰

جدول ۸ میزان حمل‌ونقل جلبک تولیدشده از مراکز کاشت در دوره زمانی t را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، متناسب با میزان تولید جلبک، میزان حمل‌ونقل نیز افزایش می‌یابد. جدول ۹ نیز مقادیر به‌دست آمده برای متغیرها حاصل از حل مساله در دوره t را نشان می‌دهد. در این جدول، $P_{it}^{۶}$ مقدار روغن جاتروفای تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t؛ $P_{it}^{۹}$ مقدار روغن جبلک تولیدشده در مرکز استخراج روغن i در دوره t؛ $P_{it}^{۱۰}$ مقدار ضایعات روغن پیش‌تصفیه شده در مرکز استخراج روغن i در دوره t؛ $P_{it}^{۱۳}$ مقدار مواد اولیه دارو در مرکز استخراج روغن i در دوره t؛ $P_{it}^{۱۴}$ تولید کود در مرکز استخراج روغن i در دوره t محاسبه شده است.

با توجه به اینکه حمل‌ونقل wco تولیدشده دارای دو مرحله است، درجدول ۱۰، مقدار حمل‌ونقل ضایعات روغن از مرکز تامین w به مرکز پیش‌تصفیه در دوره t نشان داده‌شده است. در جدول ۱۱ نیز مقدار حمل‌ونقل ضایعات روغن تولیدشده از مرکز پیش‌تصفیه به پالایشگاه زیستی در دوره‌های زمانی نشان داده‌شده است. در توضیح جدول ۱۱ لازم به ذکر است که همان میزان ضایعات روغن تولیدشده در طی دوره‌های زمانی به‌طور مستقیم به پالایشگاه زیستی منتقل می‌شود.

جدول ۹. مقدار متغیرهای $P_{it}^{۶}, P_{it}^{۹}, P_{it}^{۱۰}, P_{it}^{۱۳}, P_{it}^{۱۴}$

متغیر	مکان $i=۱$	دوره زمانی	
		اول	دوم
$P_{it}^{۶}$	مرکز استخراج روغن	۰	۲۲۶/۱۲۹
$P_{it}^{۹}$	مرکز استخراج روغن	۹۸۷/۵۶۸	۹۶۳/۹۰۰
$P_{it}^{۱۰}$	مرکز استخراج روغن	۷۱۷۴۹/۹۱۰	۸۷۸۱۳/۲۹۵
$P_{it}^{۱۳}$	مرکز استخراج روغن	۵۸۰	۷۱۰
$P_{it}^{۱۴}$	مرکز استخراج روغن	۰	۴۱/۱۱۴

جدول ۱۰. مقدار حمل‌ونقل ضایعات روغن از مرکز تامین wبه مرکز پیش‌تصفیه در دوره t

از \ به	مرکز پیش‌تصفیه $p=۱$	
	دوره اول	دوره دوم
مرکز تامین اول $w=۱$	۳۳۳۹۰۰	۳۱۱۶۰۰
مرکز تامین دوم $w=۲$	۲۴۸۴۹/۵۵۰	۱۲۷۴۶۶/۴۷۶

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

جدول ۱۱. مقدار حمل‌ونقل ضایعات روغن از مرکز پیش‌تصفیه p به پالایشگاه زیستی k در دوره t

از \ به	پالایشگاه زیستی $i=۱$	
	دوره اول	دوره دوم
مرکز پیش‌تصفیه اول $p=۱$	۷۱۷۴۹/۹۱۰	۸۷۸۱۳/۲۹۵

علاوه بر این، در جدول ۱۲، مقدار حمل‌ونقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن i به پالایشگاه زیستی k در دوره t یعنی $T^{۶}_{ikt}$ نشان داده‌شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مقدار حمل‌ونقل روغن جاتروفا، نوروزک، خرزهره و جلبک از مرکز استخراج روغن به پالایشگاه در دوره دوم بیشترین مقدار را دارد.

جدول ۱۲. مقدار $T^{۶}_{ikt}$

از \ به	پالایشگاه زیستی $i=۱$	
	دوره اول	دوره دوم
مرکز استخراج روغن $i=۱$	۹۸۷/۵۶۸	۱۱۹۰/۰۲۹

سرانجام، مقدار کل ظرفیت مرکز جمع‌آوری و استخراج روغن i در طی دوره‌های زمانی اول و دوم برابر با ۵۰۰۰ در هر دوره برآورد می‌شود. با ملحوظ دانستن کلیه عوامل فوق مقدار تابع هدف و هزینه بهینه برابر با $۱۰^{۱۴}$ × ۱۱۳۵۲۱ طی مدت زمان ۳۵ ثانیه هست. علاوه بر حصول نتایج مساله از حل در ابعاد کوچک، مقدار بعد مسأله را بیشتر در نظر می گیریم. برای این منظور، پارامترهای ورودی حل مساله را مطابق با جدول ۱۳ در نظر می‌گیریم.

جدول ۱۳. پارامترهای مساله در ابعاد متوسط

نمونه	مقدار ورودی ها										زمان محاسبات	مقدار تابع هدف
	j	n	o	m	w	i	p	k	b	t	(ثانیه)	$\times ۱۰^{۴}$
۱	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۱۲۸	۲۱۳۲۵۶
۲	۲	۲	۳	۴	۴	۳	۲	۲	۳	۳	۳۵۹	۳۲۴۶۸۹
۳	۲	۲	۳	۴	۴	۴	۳	۳	۴	۳	۵۵۶	۳۸۹۶۵۷
۴	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۳	۳	۶۰۲	۴۱۲۵۶۹
۵	۳	۳	۳	۴	۴	۵	۳	۳	۳	۳	۶۱۳	۴۲۵۶۹۸

با توجه به نتایج ارایه شده در جدول ۱۳، مشخص است که در صورت افزایش ابعاد مساله از کوچک به متوسط مدت زمان پاسخگویی مدل به طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. این مساله نشان می دهد که مدل با افزایش ابعاد با پیچیدگی روبه‌رو می‌شود که حتی ممکن است در ابعاد بزرگتر قادر به حل مساله نباشد.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

٤-٣ 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 می شود. 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 آزمایش های از پیش تعریف شده در این الگوریتم به ازای تمام ترکیبات ممکن اجرا می‌شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامتر های این الگوریتم مطابق جدول ۱۴ می‌باشد.

جدول ١٤. پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم **NSGA-II**

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

سپس با طرح L9 تاگوچی آزمایشات مختلف را ایجاد و برای هر کدام الگوریتم NSGA-II اجرا شده است. نتایج اجرا در جدول ۱۵ ارایه 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 سطح 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.

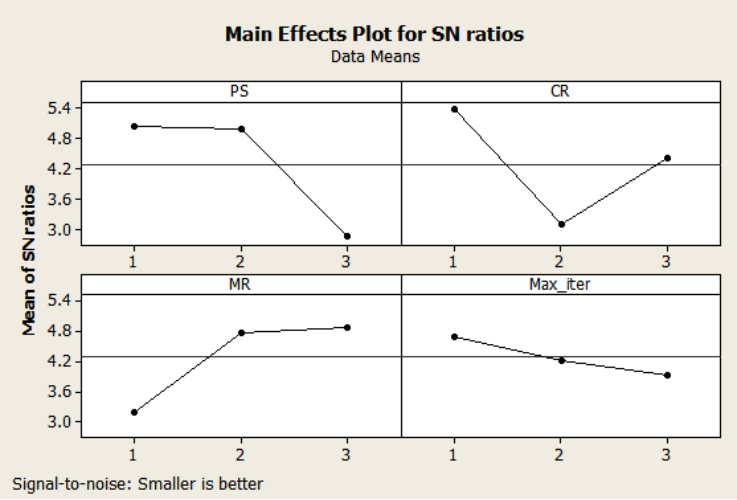
جدول ۱۵. مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای **NSGA-II**

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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 می شود. 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 می گیریم 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 ٤. 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 مثال ها با این مقادیر پارامتر های الگوریتم، اجرا می شود. در جدول ۱۶ مقدار بهینه پارامتر ها ارایه شده است.

جدول ١٦. مقدار بهینه متغیرها در **NSGA-II**

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

٤-٤ 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 نمونه های عددی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ۱۰ نمونه عددی موجود می باشد. نمونه های ۱ تا ۴ برای ابعاد کوچک و نمونه‌های ۵ تا ۸ مربوط به نمونه‌های متوسط و نمونه های ۹ تا ۱۰ مربوط به نمونه‌های بزرگ می‌باشد. طبیعی است هر چه ابعاد مساله بیشتر شود تعداد گره‌های مساله نیز بیشتر می‌شود. این آزمایش ها براساس مفروضات اولیه مدل براساس مراکز کشت جاتروفا، مراکز کشت نوروزک، مراکز کاشت خرزهره، مراکز کشت جلبک، مراکز پالایشگاه‌های زیستی و دوره‌های زمانی می‌باشد.

جدول ۱۷. ابعاد نمونه‌های عددی

ابعاد	نمونه ها	مراکز کشت جاتروفا	مراکز کشت نوروزک	مراکز کشت خرزهره	مراکز کشت جلبک	مراکز پالایشگاه زیستی	دوره زمانی
کوچک	نمونه۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	نمونه۲	۲	۲	۲	۱	۲	۱
	نمونه۳	۲	۲	۳	۱	۲	۱
	نمونه۴	۲	۳	۳	۱	۳	۱
متوسط	نمونه۵	۳	۳	۳	۲	۳	۲
	نمونه۶	۳	۳	۴	۲	۳	۲
	نمونه۷	۴	۴	۴	۲	۳	۲
	نمونه۸	۴	۴	۳	۲	۴	۲
بزرگ	نمونه۹	۵	۵	۴	۳	۴	۳
	نمونه۱۰	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_1	f_2	f_3		f_1	f_2	f_3		ARE_1	ARE_2	ARE_3
۱	۵۰۹	۲۸۹/۴	۱	۱۰	۵۰۹	۲۸۹/۴	۱	۵	۰	۰	۰
۲	۵۴۱	۳۰۰/۲	۳۷	۱۲	۵۴۲	۳۰۰/۲	۳۵	۷	۰/۰۰۱	۰	۰/۰۵
۳	۶۴۹	۳۰۲/۱	۴۹	۱۵	۶۵۰	۳۰۳/۳	۴۶	۱۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۶
۴	۶۹۱	۳۲۰/۳	۹۹	۱۷	۶۹۳	۳۲۱/۹	۹۴	۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۵
۵	۱۴۵۴	۶۲۹	۱۰۲۱	۲۰	۱۴۵۷	۶۳۱/۶	۹۹۸	۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲
۶	۱۵۶۸	۷۳۷/۵	۱۴۱۳	۲۵	۱۵۷۲	۷۴۰/۴	۱۳۹۸	۲۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۱
۷	۱۶۰۰	۸۰۴/۶	۲۹۳۴	۳۵	۱۶۰۴	۸۰۶/۳	۲۹۰۵	۳۳	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۹
۸	۱۹۰۹	۹۸۳/۳	۷۳۷۱	۵۰	۱۹۱۱	۹۸۷/۶	۷۳۷۰	۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱
۹	–	–	–		۲۵۰۲	۱۰۰۰/۶۵	۷۶	۵۰	–	–	–
۱۰	–	–	–		۳۵۴۶	۱۱۲۵/۵	۸۲	۵۵	–	–	–
میانگین خطاها در هر تابع هدف									۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۸

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

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.

$$\frac{|mathematical\ model - metaheuristic\ model|}{mathematical\ model}$$

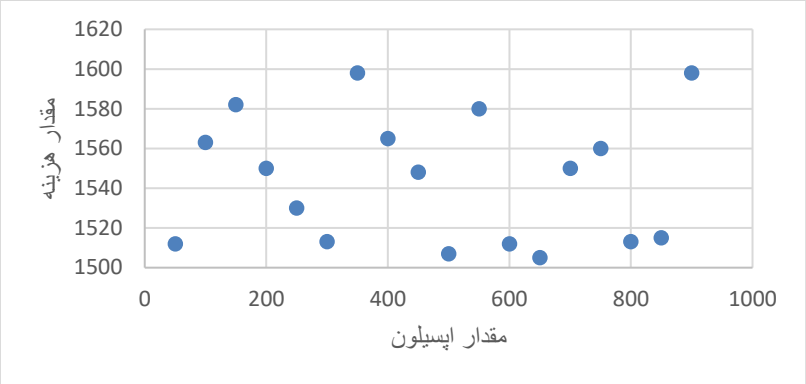
این خطای محاسباتی توسط جهانگیری و همکاران [۲۵] توصیه شده است. براساس آن می‌توانیم مقدار خطا بین دو سری نتایج را محاسبه نماییم. در صورتی که مقدار خطای محاسباتی بین دو سری داده کمتر از ۰/۰۵باشد خطای بین دو سری داده قابل اغماض خواهد بود. بنابراین، در این صورت می‌توانیم به نتایج مدل فراابتکاری در حل مسایل 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 تغییریافته 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.

٤-٥ تحلیل حساسیت

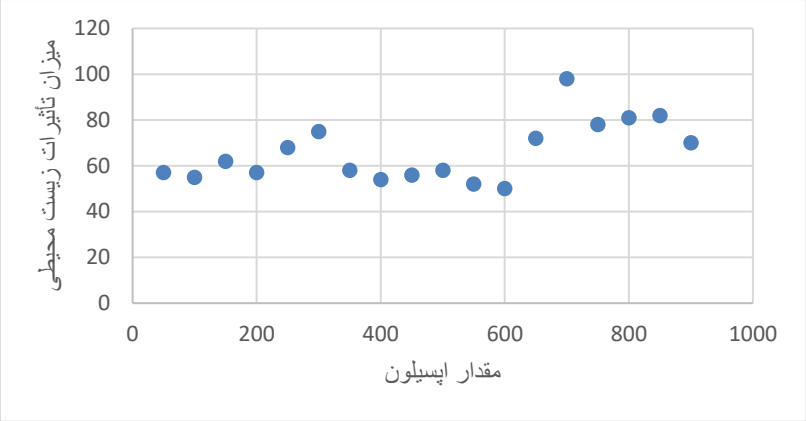
در این بخش حساسیت مقادیر اپسیلون بر روی مقدار توابع هدف سنجیده خواهد شد و نتایج حاصل شامل مقادیر قابل اطمینان با تعیین فاصله اپسیلون برای توابع هدف گزارش می‌شود. برای این منظور، در شکل های ۵، ۶ و ۷ مقادیر مختلفی برای اپسیلون تعریف‌شده و توابع هدف با آنها حل‌شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، مقادیر تابع هدف با افزایش اپسیلون تا مقدار مشخصی، تغییر قابل‌توجهی از خود نشان نمی‌دهند. اما از جایی به بعد (برای مثال تابع هدف دوم) افزایش در مقدار اپسیلون، افزایش و با شیب قابل ملاحظه‌ای در مقادیر توابع هدف را گزارش می‌کند (تغییر اپسیلون از ۶۰۰ تا ۹۰۰). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، به ازای آزمایش مقادیر مختلف اپسیلون، ناحیه شدنی و بردار بهبوددهنده توابع هدف نشان ایجادشده است. برطبق نتایج به‌دست‌آمده سطح تغییرات معنی دار اپسیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ به‌عنوان بردار بهبود دهنده تعیین‌شده است. تعیین این بازه مشخص می‌کند که اگر چنانچه مقدار اپسیلون کمتر از ۵۰ و بیشتر از ۹۰۰ در نظر گرفته شود پاسخ مساله خارج از ناحیه شدنی قرار می‌گیرد. بنابراین، دامنه تغییرات اپسیلون 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 اپسیلون ۶۰۰ به‌دست می‌آید. در شکل های ۵ تا ۷ نتایج حل مدل با طول گام برابر با ۵۰ نشان داده‌شده است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

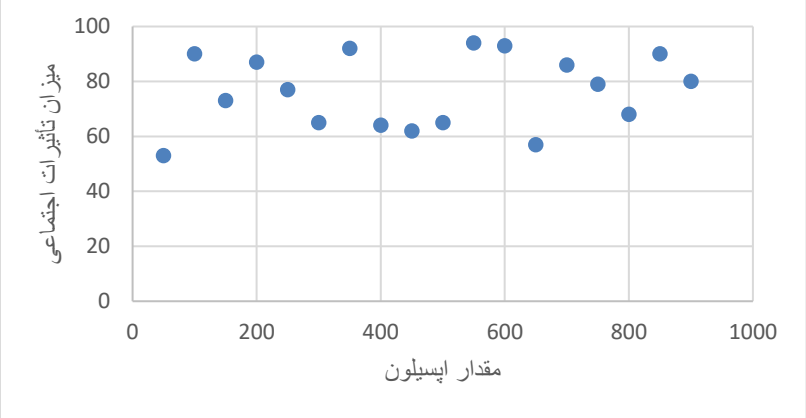
[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]



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



شکل ٦. میزان تغییرات تاثیرات زیست محیطی به ازای تغییرات اپسیلون



شکل ۷. میزان تغییرات تاثیرات اجتماعی به ازای تغییرات اپسیلون

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 می‌کنیم. برای این منظور، پارامتر حداکثر ظرفیت مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن را در نظر می‌گیریم. بدیهی است در صورت اعمال تغییر روی ظرفیت این مراکز، بر روی میزان هزینه‌های مربوط به آنها تاثیر می‌گذارد. در این بخش می‌خواهیم 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 می‌کنیم. در جدول ۱۹، ظرفیت میادین در صورت اضافه کردن ۱۰۰ واحد و همچنین، در صورت کم کردن ۱۰۰ واحد نشان داده‌شده است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

جدول ۱۹. ظرفیت میادین با اضافه کردن ۱۰۰ واحد

ظرفیت مراکز فعلی $Cap_{current}+$ ۱۰۰	
۱۲۴۵۲×۱۰^{۱۴}	مقدار تابع هدف
ظرفیت مراکز فعلی $Cap_{current}-$ ۱۰۰	
۱۲۴۵۲×۱۰^{۱۴}	مقدار تابع هدف

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات انجام‌شده در زمینه طراحی شبکه زنجیره‌تامین زیست‌توده پایدار، مدل ریاضی ارایه‌شده در این تحقیق با استفاده از چند سطحی و چندمحصولی بودن شبکه، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قابل استفاده برای بهبود کارایی شبکه زنجیره تامین به‌منظور افزایش پایداری زیست‌توده، مورداستفاده قرار گیرد. با توجه به ویژگی‌های زیست‌توده، از جمله حساسیت آن به شرایط محیطی و اجتماعی، طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، استفاده از مدل ریاضی چند سطحی و چندمحصولی، که به دقت و به‌صورت 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 به‌کارگیری در یک زنجیره تامین زیست‌توده چند سطحی و چندمحصولی ارایه‌شده 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 حمل‌ونقل جاتروفا، جلبک، بیودیزل، wco، نوروزک، کود و خرزهره، تعیین ظرفیت مراکز جمع‌آوری و استخراج روغن. در نظر گرفتن هزینه‌های ناشی از استفاده از تکنولوژی جذب و انتقال و ذخیره کربن‌دی‌اکسید منتشر شده از دودکش نیروگاه‌ها و واحدهای صنعتی شامل هزینه جداسازی کربن‌دی‌اکسید پس از احتراق، هزینه حمل کربن‌دی‌اکسید به‌وسیله خطوط انتقال به سایت‌های ذخیره سازی و هزینه ذخیره سازی امن کربن‌دی‌اکسید 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] Delkhosh, 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

[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., Kiehbadroudinezhad, 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., Buttenfield, 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]

[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)

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2024-1-2246]