فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیستم / شماره ۸۲/ پاییز ۱۴۰۳ / صفحات ۱۱۵-۸۱

بهینه‌سازی عملیات زنجیره تأمین سوخت زیستی مبتنی بر نسل دوم زیست‌توده در فضای عدم قطعیت و با درنظرگرفتن رابطه آب و انرژی: مطالعه موردی کشور ایران

وحید ناصری طاهری

کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، Naseri.Vahid96@gmail.com

هادی صاحبی[۱]

دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، hadi_sahebi@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

چکیده

افزایش جمعیت جهان و مصرف روزانه سوخت در طی سالیان اخیر، سیاست‌گذاران و مدیران را بر آن داشته است تا در پی راهکاری به‌منظور جایگزینی سوخت‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی و تجدیدناپذیر باشند. در این میان، استفاده از سوخت زیستی، یکی از گزینه‌هایی است که توجه همگان را به خود جلب کرده است. ازاین‌رو، سعی بر آن بوده تا در این پژوهش، مدلی به‌منظور بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی مبتنی بر جاتروفا، ارائه گردد. مدل ارائه شده در این پژوهش، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی، شامل سه هدف کمینه‌سازی هزینه عملیاتی کل، کمینه‌سازی کربن منتشر شده در طی زنجیره و بیشینه‌سازی تولید سوخت است. در تعریف مسئله برخی پارامترها از جمله، هزینه کشت زیست‌توده و میزان آب موردنیاز به‌صورت اعداد فازی و غیرقطعی لحاظ شده‌اند. رویکرد مورداستفاده برای حل مدل بهینه‌سازی شامل اعداد فازی، رویکرد لای و هوانگ بوده است که برای حل مدل‌های بهینه‌سازی دارای اعداد فازی مورداستفاده قرار می‌گیرد. مدل مذکور با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تقویت یافته حل گردیده تا نقاط پارتو به‌ازای مقادیر مختلف توابع هدف سه‌گانه مدل به دست آید. به‌ازای تولید سوخت زیستی به میزان ۲۰,۷ کیلومترمکعب، میزان هزینه عملیاتی کل ۱۴۹،۰۰۰میلیون تومان و میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید کل نیز ۱۹،۱۰۰ تن به دست آمد. پس از بدست آوردن نتایج، به منظور صحت و کارایی مدل، تحلیل حساسیت روی جواب بدست آمده صورت گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد، کشت زیست توده، بخش عمده‌ای از هزینه کل را تشکیل میدهد. از این رو مدیران و تصمیم‌گیرندگانی می‌توانند با توسعه روش‌های کارآمد تر با بازه بالاتر به منظور کشت زیست توده در صدد کاهش هزینه‌ها برآیند.

طبقه‌بندی JEL: Q16، C61، Q2

کلیدواژه: زنجیره تأمین سوخت زیستی؛ جاتروفا؛ مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی؛ زیست‌توده نسل دوم؛ سوخت تجدیدپذیر.

---

۱. نویسنده مسئول

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

۱- مقدمه

در طی سالیان اخیر، افزایش تقاضا برای انرژی، منجر به افزایش مصرف سوخت و همچنین افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است (غلامی و همکاران ۱۴۰۲). این افزایش در انتشار گازهای گلخانه‌ای یک تهدید جدی است که منجر به تغییرات آب و هوایی می‌گردد. پیش بینی شده است که دمای زمین در سالیان آتی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن بین ۱,۸ تا ۴ درجه سانتی گراد افزایش خواهد یافت (سلیمی و همکاران، ۱۴۰۲؛ احمد و سرکار[1]، ۲۰۱۹). تنوع منابع زیست توده، آن را به یک انتخاب مناسب به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر برای جایگزینی با سوخت‌های فسیلی کرده است. (مفاخری و نصیری، ۲۰۱۴؛ ظاهری عبده وند و همکاران، ۱۴۰۳). انواع مختلف زیست‌توده به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. اولین دسته شامل موادی مانند دانه ذرت، نیشکر، سویا و غیره است که عموما ارزش غذایی دارند (کوربیر[2] و همکاران، ۲۰۱۱). ازآنجایی‌که زیست‌توده‌های نسل اول دارای ارزش غذایی هستند، استفاده از آن‌ها به‌عنوان سوخت موجب کاهش منابع غذایی خواهد شد (اسکوبار[3] و همکاران، ۲۰۰۹) . به همین جهت، زیست‌توده‌های نسل دوم، همچون پسماندهای کشاورزی و گیاهان فاقد ارزش غذایی همچون جاتروفا بیشتر موردتوجه قرار گرفته اند (شارما[4] و همکاران، ۲۰۱۳). انرژی زیستیی حاصل از مواد اولیه نسل سوم مانند ریزجلبک‌ها دارای پتانسیل بالایی است، اما باز هم موانع علمی و فنی متعددی در ارتباط با طراحی فتوبایوریکتور، برداشت زیست‌توده میکروجلبکی، خشک کردن، و فرآوری آن وجود دارد (دراگونه[5] و همکاران، ۲۰۱۰). انواع مختلف زیست‌توده را می‌توان با استفاده از فناوری‌های خاص به گرما، نیرو، سوختی زیست دیزلی یا ترکیبی تبدیل کرد (پاپاپستوله[6] و همکاران، ۲۰۱۱). تولید گرما و برق یکی از رایج ترین و پرکاربردترین اشکال انرژی زیستی است. فناوری تبدیل مواد اولیه نسل اول به سوخت زیستی نیز به خوبی توسعه یافته و تجاری شده است. مانع اصلی در تجاری سازی

1. Sarkar
2. Corbiere
3. Esckobar
4. Sharma
5. Dragone
6. Papapostole

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

سوخت‌های زیستی مربوط به مواد اولیه نسل دوم و نسل سوم است. جنبه‌های اقتصادی و فنی مربوط به فرآیند پیچیده تبدیل زیست‌توده و مدیریت زنجیره تأمین مواد اولیه نسل دوم، کاربرد آن را در پالایشگاه‌های زیستی بزرگ محدود می‌کند (دراگونه و همکاران، ۲۰۱۰). محققان به شدت درگیر یافتن راه‌هایی برای بهبود امکان‌سنجی تجاری تولید سوخت‌های زیستی نسل دوم هستند. جاتروفا به‌عنوان امیدوارکننده ترین محصول انرژی غیرخوراکی برای تولید بیودیزل نسل دوم شناخته شده است (آشتن[1] و همکاران، ۲۰۰۸). هسته دانه جاتروفا دارای محتوای روغن بالایی در حدود ۳۰-۴۰٪ است و محتوای روغن آن پس از خرما در بین محصولات انرژی زا خوراکی و غیرخوراکی در رتبه دوم قرار دارد (پندی[2] و همکاران، ۲۰۱۲). چندین کشور از جمله چین، اتیوپی، هند، نپال و تانزانیا، منافع و سرمایه گذاری‌های اولیه قابل توجهی را در مزرعه جاتروفا و تولید بیودیزل نشان داده است (اپنشاو[3]، ۲۰۰۰).

زیست‌توده تحت فرایندهای مختلفی قرار می‌گیرد و پردازش‌های متعددی روی آن صورت می‌گیرد که زنجیره تأمین زیست‌توده نامیده می‌شود. به سرانجام رساندن هر بخش از زنجیره تأمین از جمله رشد، برداشت، حمل‌ونقل، یکپارچه‌سازی، ذخیره‌سازی، تبدیل، توزیع و مصرف نیاز به دانش، فناوری و فعالیت‌های خاصی دارد. علاوه بر این، بسته به نوع زیست‌توده، ممکن است محصول نهایی و فناوری تبدیل در برخی مراحل دیگر همچون تصفیه پیش از پردازش در زنجیره تأمین متفاوت باشد (قادری و همکاران، ۲۰۱۶). مشابه زنجیره‌های تأمین صنعتی، زنجیره تأمین زیست‌توده می‌تواند مراحل مختلف متفاوتی را با بازیگران گوناگون مانند کشاورزان، صاحبان پالایشگاه‌های زیستی، حمل‌ونقل، مشتریان نهایی شامل شود و عملکرد آن به شدت به طراحی، برنامه‌ریزی و فعالیت‌های عملیاتی شبکه بستگی دارد (زندی و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، توسعه و طراحی یک زنجیره تأمین سوخت زیستی پایدار که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد، تهدیدات زیست‌محیطی را به حداقل برساند و مزایای اجتماعی را بهبود بخشد، ضروری به نظر می‌رسد. مدیریت و طراحی چنین کاری شامل تصمیمات زیادی است که باید بهینه شوند (احمد و سرکار، ۲۰۱۹).

1. Achten
2. Pandey
3. Openshaw

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

ازاین‌رو پژوهش حاضر به دنبال مدل‌سازی یک مدل زنجیره تأمین انرژی زیستی مبتنی بر سوخت جاتروفا در لایه عملیاتی است. به جهت بررسی دقیق‌تر سعی بر آن بوده است تا برخی از پارامترهای مورداستفاده به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شود. در قسمت‌های بعدی، ابتدا مروری بر پژوهش‌های پیشین صورت‌گرفته در خصوص بهینه‌سازی مدل زنجیره تأمین انرژی زیستی صورت خواهد گرفت. پس از آن مدل ریاضی زنجیره تأمین انرژی زیستی مورداستفاده در پژوهش، بررسی خواهد شد. در قسمت بررسی نتایج پژوهش، ابتدا پارامترهای مدل معرفی خواهد شد و پس از آن جواب به‌دست‌آمده برای مدل و همچنین تحلیل حساسیت مدل به‌ازای تغییر پارامترهای مختلف، موردبحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مرور ادبیات

پژوهشگران و مدیران صنایع مختلف همواره به دنبال مدلی جامع بوده‌اند تا بتواند به طور هم‌زمان ضرورت‌های اقتصادی، الزامات زیست‌محیطی و نیازهای اجتماعی را محقق سازد. ازاین‌رو مطالعات بسیاری در خصوص زنجیره تأمین پایدار صورت‌گرفته است. در حوزه زنجیره تأمین انرژی‌های زیستی نیز این مهم، همواره موردتوجه بوده است. در طی سالیان اخیر مطالعات کثیری در خصوص زنجیره تأمین انرژی زیستی صورت‌گرفته است که شامل هر سه نسل زیست‌توده می‌گردد. این پژوهش به طور خاص، جاتروفا را به‌عنوان زیست‌توده مورداستفاده در زنجیره تأمین در نظر گرفته است.

مطالعات داخلی

عبداله زاده فرد و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی گیاه جاتروفا و امکان پرورش این گیاه در ایران پرداخته اند. ایشان امکان پذیری کشت جاتروفا را در از جنبه محیطی و اقتصادی قرار داده اند و راهکارهایی برای افزایش بازده تولید سوخت زیستی این گیاه ارائه داده‌اند.

گیلانی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود یک مدل بهینه سازی چند هدفه به منظور بیشینه سازی سود ناشی از تولید سوخت زیستی را بیشینه و کمینه سازی میزان مصرف آب ارائه داده اند. مدل ایشان یک مدل فازی است که احتمال وقوع سناریوهای مربوط به شدت خشکسالی در آن غیرقطعی فرض شده است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

جندقی و همکاران (۱۴۰۲) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای شبکه زنجیره تامین زیست توده ارائه داده اند. ایشان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه فازی که به دنبال حداقل کردن هزینه ها, حداقل کردن اثرات محیط زیستی و حداقل کردن زمان رسیدن محصول به مشتری در یک زنجیره تامین زیست توده می‌باشد, ارایه کرده اند. ایشان در پژوهش خود مکان و ظرفیت تسهیلات, میزان تولید زیست دیزل و گلیسرین, میزان روغن استخراج شده جاتروفا و روغن پسماند تصفیه شده را استخراج کرده اند.

مطالعات خارجی

رینکان[1] و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه خود که در خصوص زنجیره تأمین بیودیزل در کشور کلمبیا بوده است، به بررسی شرایط بهینه بیودیزل زنجیره تأمین از طریق تحلیل فنی - اقتصادی و محیطی می‌پردازند. ایشان، منطقه شرقی کلمبیا را برای کشت جاتروفا با مدنظر قراردادن کمینه‌کردن هزینه‌های کشت و تولید، حداقل نمودن انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تغییر کاربری زمین ارزیابی کرده‌اند و در نهایت مناسب‌ترین مکان را انتخاب می‌کنند. المیدا[2] و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های مربوط به پتانسیل گرمایش جهانی و درنظرگرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تغییر کاربری زمین مدل بهینه‌سازی را ارائه دادند. هدف ایشان ارائه زنجیره ارزش برق‌رسانی درون شبکه و خارج از شبکه مبتنی بر جاتروفا (مانند کشت، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی، تولید سوخت زیستی و تولید برق) را در مالی جنوبی با حداقل گرمایش جهانی ایجاد شده بوده است تا به جایگزینی ۱۰ درصدی سوخت‌های فسیلی برای جاتروفا برسد.

خویشتندار (۲۰۱۹) مدلی جهت طراحی زنجیره تأمین بیوگاز پیشنهاد کرده است. پارامترهای غیرقطعی مدل مذکور عبارت‌اند از: نیروی کار موجود، تقاضای زیست‌توده، زیست‌توده موجود و قیمت زیست‌توده. وی در نهایت یک چارچوب حل ترکیبی متشکل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم‌های تکاملی (الگوریتم ژنتیک و تکامل دیفرانسیل) برای یافتن راه‌حل بهینه به‌منظور حل مدل تصادفی محدود فازی ارائه می‌دهد. محجوب و همکاران (۲۰۲۰) مدل‌سازی چند دوره‌ای و چندهدفه از یک شبکه تأمین انرژی

1. Rincon
2. Almeida

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

زیستی ارائه داده‌اند که از سه نوع زیست‌توده (یعنی بقایای کشاورزی و کود دامی، ریزجلبک‌ها و جاتروفا) به طور هم‌زمان به‌عنوان ماده اولیه برای تولید انرژی استفاده می‌کند. مدل پیشنهادی ایشان قادر به انتخاب منابع مواد خام، محل تأسیسات تولید، مکان انبارها و جریان بهینه مواد برای به‌حداقل‌رساندن هزینه کل و به حداکثر رساندن است. بارال[1] و همکاران (۲۰۲۰) مجموعه‌ای از پارامترهای ضروری برای جغرافیا، آب‌وهوا، شرایط خاک، و آبیاری را ارائه داده‌اند که می‌تواند برای طبقه‌بندی زمین‌های کشاورزی جاتروفا استفاده شود. مدل ایشان که بر روی مطالعه موردی کشور نپال پیاده‌سازی شده است، قادر به افزایش بازده تولید سوخت زیستی از طریق جاتروفا بوده است. افخمی و زرین پور (۲۰۲۱) یک شبکه زنجیره تأمین بیودیزل نسل دوم چند دوره‌ای، چندهدفه و چندمحصولی با درنظرگرفتن توسعه پایدار و منابع و تقاضای بین‌المللی را ارائه داده‌اند. موردمطالعه ایشان کشور ایشان بوده و نتیجه پژوهش ایشان نشان می‌دهد، تجارت جهانی سوخت زیستی می‌تواند سود را تا حد زیادی افزایش دهد.

رضایی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین بیودیزل تحت عدم قطعیت ارائه داده‌اند. در مدل پیشنهادی ایشان برخی از پارامترها از جمله تقاضا، عرضه، هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش علاوه بر جاتروفا و ضایعات روغن، برای اولین بار نوروزک را به‌عنوان یکی از منابع در طراحی زنجیره تأمین بیودیزل در نظر گرفته شده است. نجفی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی استان‌های ایران به‌منظور تولید بیودیزل از گیاهان جاتروفا می‌پردازند. ایشان با استفاده از روش ارزیابی نسبت افزایشی استان گلستان به‌عنوان بهترین مکان کاندید در ایران برای ایجاد کارخانه بیودیزل با استفاده از گیاهان جاتروفا انتخاب کرده‌اند. آلهربوی[2] و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهش خود به بررسی تولید سوخت جت از گیاه جاتروفا پرداخته اند. این مطالعه ایشان نتیجه‌گیری می‌کند که تولید سوخت جت از طریق گیاه جاتروفا با پردازش آبی می‌تواند تا ۷۵ درصد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را همراه آورد.

1. Baral
2. Alherbawi

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

محتشمی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی، با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های وزنی، با درنظرگرفتن مجموعه‌ای جامع از معیارهای پایداری به بررسی مطلوبیت مکان‌های مختلف ایران برای کشت جاتروفا می‌پردازند . رحمانی و گلی (۲۰۲۳) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی اعداد صحیح مختلط چندهدفه را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین بیودیزل مبتنی بر روغن کانولا تحت عدم قطعیت عرضه و تقاضا را ارائه داده‌اند. مورد مطالعاتی پژوهش مذکور کشور ایران است و تابع هدف مدل بهینه‌سازی مذکور به‌حداقل‌رساندن هزینه کل و بیشینه‌کردن فرصت‌های شغلی ایجاد شده است.

در پژوهش‌های مرور شده به طور عمده توجه بر لایه استراتژیک شبکه تامین انرژی زیستی بوده است. در حالیکه به نظر می‌رسد تمرکز به لایه عملیاتی شبکه تامین انرژی زیستی نیز می‌تواند بینش عمیق و نگاه کامل تری به مسئله مدیریت شبکه تامین انرژی زیستی دهد. به بیان دیگر بررسی بهینه سازی شبکه تامین انرژی زیستی در لایه عملیاتی، تحلیل دقیق تری از هزینه‌ها و بازدهی شبکه تامین انرژی زیستی به مدیران و تصمیم گیرندگان ارائه خواهد داد.

پژوهش حاضر، مطالعه‌ای در خصوص زنجیره تأمین انرژی زیستی بر پایه گیاه جاتروفا است. ازاین‌رو مدل ریاضی زنجیره تأمین انرژی زیستی در ادامه تشریح خواهد شد و نتایج آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مهم‌ترین مواردی که در این پژوهش موردمطالعه قرار گرفته است به شرح زیر است:

- طراحی و توسعه مدل ریاضی بهینه‌سازی زنجیره تأمین انرژی زیستی مبتنی بر زیست‌توده جاتروفا ناظر بر لایه عملیاتی زنجیره. تمرکز بر لایه عملیاتی زنجیره تامین، می‌تواند منجر به تحلیل عمیق‌تر و جامع‌تر نقاط تاثیرگذار بر هزینه کل زنجیره و همچنین میزان کربن دی اکسید منتشر شده گردد. در نهایت تصمیم‌گیرندگان دید بهتری در خصوص اینکه تکنولوژی‌ها و فرایندهای جایگزین در زنجیره تامین انرژی چگونه و به چه میزان بر بهبود بازده اثر می‌گذارند، خواهند داشت.
- به‌کارگیری مفهوم عدم قطعیت در پارامترهایی چون تقاضا، هزینه‌های کشت و تأمین و میزان آب موردنیاز و استفاده از رویکرد لای و هوانگ به‌منظور حل مدل

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

بهینه‌سازی به‌طوری‌که مقادیر مختلف غیرقطعی پارامترها، به‌صورت هم‌زمان در مدل در نظر گرفته شود. زیرا این رویکرد جواب دقیق‌تری نسبت به حالتی به دست می‌آورد که ابتدا اعداد غیرقطعی به‌صورت قطعی دربیایند و سپس مدل حل گردد.

- درنظرگرفتن رابطه آب و انرژی در مدل زنجیره تأمین به‌طوری‌که میزان آب در دسترس برای زنجیره تأمین انرژی زیستی به میزان محدود فرض گردد. این امر سبب می‌گردد در بهینه‌سازی مدل زنجیره تأمین، یتاثیر کمبود آب بر عملکرد زنجیره تامین و در نهایت تولید انرژی مورد بررسی قرار گیرد.

۳- تعریف مسئله و مدل ریاضی

گیاه جاتروفا، از جمله زیست‌توده‌های نسل دوم است که یکی از مشخصه‌های بارز آن مقاومت در برابر خشکی است. این موضوع یکی از دلایل اهمیت استفاده از این زیست‌توده در کشورهایی است که دچار کم آب هستند (آشتن و همکاران، ۲۰۰۹). از روغن این گیاه، می‌توان ماده‌ای استخراج کرد که برای مصارف سوختی کاربرد مناسبی دارد (جانگسشاپ[1] و همکاران، ۲۰۰۷). موضوع این پژوهش، بهینه‌سازی مدل ریاضی زنجیره تأمین انرژی زیستی بر پایه گیاه جاتروفا است. مدل مورداستفاده در این مطالعه سعی بر شناسایی و مدل‌سازی فعالیت‌های مختلف صورت‌گرفته در زنجیره تأمین سوخت زیستی دارد که نهایتاً منجر بر افزایش بهره‌وری گردد.

مدل‌سازی زنجیره تأمین انرژی زیستی

در این بخش، سعی شده است تا ساختار زنجیره تأمین پایدار برای انرژی زیستی با استفاده از یک زنجیره از مواد خام، به‌صورت یکپارچه و با تخصیص کمیت مناسب و برنامه‌ریزی مکانی، مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که پیش از مدلسازی زنجیره تامین لازم است مالک آن مشخص گردد، لازم به توضیح است به دلیل اینکه زنجیره تامین انرژی زیستی سرمایه‌گذاری قابل توجهی می‌طلبد، دولت به عنوان مالک زنجیره تامین مدل این پژوهش فرض شده است. باتوجه به اینکه دولت به عنوان مالک این زنجیره در نظر گرفته شده است، مطلوبیت‌های دولت نیز به عنوان اهداف مدل بهینه سازی عنوان

1. Jongschaap

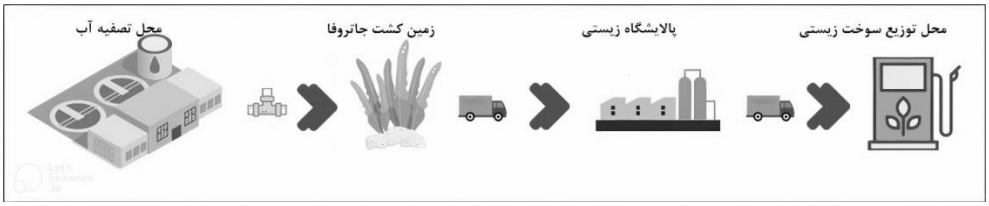
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

شده اند. بدین منظور یک مدل ریاضی چندهدفه برای زنجیره تأمین پایدار سوخت زیستی نسل دوم ارائه شده است که با درنظرگرفتن جوانب زیست‌محیطی و اقتصادی، یک راه‌حل بهینه را ارائه دهد. همچنین، محدودیت‌هایی برای حداکثر مجاز انتشار کربن و طرح مالیات نیز در مدیریت زنجیره تأمین در نظر گرفته شده‌اند که می‌توانند به‌عنوان بخشی از اقدامات حفاظتی محیط‌زیستی مورداستفاده قرار گیرند. این مدل باهدف طراحی زنجیره تأمین پایدار مبتنی بر زیست‌توده جاتروفا برای تولید سوخت زیستی نسل دوم مورداستفاده قرار می‌گیرد. اهداف مدل عبارت‌اند از: (۱) تشکیل شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی نسل دوم، (۲) تخصیص کمیت مواد خام به‌عنوان منابع زیست‌توده جاتروفا از مناطق کشاورزی متعدد به پالایشگاه‌های زیستی، (۳) توزیع سوخت زیستی با پاسخگویی به تقاضاهای مطرح، (۴) ایجاد یک راه‌حل بهینه با موازنه بین اهداف متضاد. مهم‌ترین مفروضات مدل به شرح زیر است: ۱) مالیات بر انتشار کربن یکی از عواملی است که می‌تواند بر میزان تولید تأثیر می‌گذارد و در این مدل نیز در نظر گرفته شده است. همچنین محدودیت انتشار کربن نیز از جمله سیاست هایی است که بر زنجیره تأمین سوخت تأثیر گذار است و در این مدل لحاظ شده است. ۲) مدل موردبحث ناظر بر جنبه عملیاتی زنجیره تأمین است و پارامترهای مربوط به احداث پالایشگاه و هزینه‌های تاسیس و احداث در این مدل در نظر گرفته نشده اند. ۳) فرض مدل بر این است که سوخت تولید شده از زیست‌توده انبار نمی شوند و مستقیم به بازار ارسال می‌گردند.

زنجیره تأمین سوخت زیستی موردمطالعه در شکل نمایش داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، تمامی مراحل تأمین سوخت زیستی از تأمین آب موردنیاز تا توزیع سوخت زیستی در این زنجیره تأمین دربر گرفته می‌شود. آب موردنیاز برای کشت زیست‌توده از محل تصفیه آب تأمین می‌گردد و به زمین‌های محل کشت جاتروفا می‌رسد. جاتروفا حاصل از کشت به محل پالایشگاه‌های زیستی ارسال می‌گردد و پس از فرآوری در نهایت به بازار (محل توزیع سوخت زیستی) فرستاده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی این زنجیره تأمین، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه که دربرگیرنده سه هدف است، تعریف شده است. اهداف مدل شامل کمینه‌کردن هزینه‌های عملیاتی زنجیره تأمین، کمینه‌کردن میزان انتشار کربن و بیشینه‌کردن میزان

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

کل سوخت تولید شده است. در نهایت با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، میزان بهینه متغیرهای تعریف شده با درنظرگرفتن هر سه تابع هدف به طور هم‌زمان به دست خواهد آمد. مدل مذکور در پایتون و با استفاده از کتابخانه داکپلکس[1] نوشته شده است. در ادامه توضیحات مربوط به نمادهای مدل ریاضی ارائه شده است.



شکل ۱. تصویر مراحل زنجیره تأمین سوخت زیستی بر پایه جاتروفا

نمادهای مدل ریاضی

پارامترها، متغیرها و مجموعه‌های مورداستفاده در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1. نماد و علائم مورداستفاده در مدل ری‌اضی

مجموعه‌ها	
f	مجموعه زمین‌های محل کشت جاتروفا
b	مجموعه پالایشگاه‌های زیستی
m	مجموعه محل بازار عرضه سوخت زیستی
متغیرها	
q_{fb}	میزان زیست‌توده انتقال داده شده از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
q_{bm}	میزان سوخت انتقال داده شده از پالایشگاه B به بازار M
N_{fb}	تعداد سفرهای پیموده شده از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
N_{bm}	تعداد سفرهای پیموده شده از پالایشگاه B به بازار M
پارامترهای اقتصادی	
$\widetilde{Coha_f}$	هزینه کشت هر واحد جاتروفا در زمین کشاورزی F
$\widetilde{Coco_f}$	هزینه جمع‌آوری هر واحد جاتروفا در زمین کشاورزی F
$\widetilde{Cohl_f}$	هزینه نگهداری هر واحد جاتروفا در زمین کشاورزی F
$\widetilde{Colo_f}$	هزینه بارگذاری هر واحد جاتروفا در زمین کشاورزی F

1. Docplex

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

$Cotr_{fb}$	هزینه متغیر حمل هر واحد جاتروفا از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
$Cotr_{bm}$	هزینه متغیر حمل هر واحد سوخت زیستی از پالایشگاه B به بازار M
Ftr_{fb}	هزینه ثابت حمل هر واحد جاتروفا از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
Ftr_{bm}	هزینه ثابت حمل هر واحد سوخت زیستی از پالایشگاه B به بازار M
$Coxtr_{fb}$	هزینه مالیات بر هر واحد انتشار کربن برای انتقال هر واحد جاتروفا از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
$Coxtr_{bm}$	هزینه مالیات بر هر واحد انتشار کربن برای انتقال هر واحد سوخت زیستی از پالایشگاه B به بازار M
$Coxag_f$	هزینه مالیات بر هر واحد انتشار کربن برای تولید هر واحد زیست‌توده در زمین کشاورزی F
$Coxag_b$	هزینه مالیات بر هر واحد انتشار کربن برای تولید هر واحد سوخت زیستی در پالایشگاه B
$Copr_b$	هزینه تولید هر واحد سوخت زیستی در پالایشگاه B
پارامترهای فنی	
CaP_b	حداکثر ظرفیت تولید سوخت در پالایشگاه B
CaF_f	حداکثر ظرفیت کشت جاتروفا در زمین کشاورزی F
$Cptr_{bm}$	حداکثر ظرفیت کامیون برای انتقال سوخت از پالایشگاه B به بازار M
$Cptr_{fb}$	حداکثر ظرفیت کامیون برای انتقال زیست‌توده از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
γ	نرخ بازدهی کشت جاتروفا
β	نرخ تبدیل جاتروفا به سوخت زیستی
De_m	میزان تقاضا در بازار M
dis_{bm}	مسافت لازم برای انتقال سوخت از پالایشگاه B به بازار M
dis_{fb}	مسافت لازم برای انتقال زیست‌توده از زمین کشاورزی F پالایشگاه B
پارامترهای زیست‌محیطی	
em_f	میزان انتشار کربن به‌ازای کشت هر واحد زیست‌توده در زمین F
em_b	میزان انتشار کربن به‌ازای هر تولید واحد سوخت زیستی در پالایشگاه B
em_{fb}	میزان انتشار کربن به‌ازای انتقال هر واحد زیست‌توده در زمین F به پالایشگاه B

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

em_{bm}	میزان انتشار کربن به‌ازای انتقال هر واحد سوخت زیستی از پالایشگاه B به بازار M
$CaEm_b$	حداکثر ظرفیت انتشار کربن در پالایشگاه B
$CaEm_f$	حداکثر ظرفیت انتشار کربن در زمین F
پارامترهای تأمین آب	
wa_f	میزان آب موردنیاز برای کشت هر واحد زیست‌توده در زمین F
$CapWa_f$	میزان کل آب در دسترس در زمین F

توابع هدف

۱- کمینه‌کردن هزینه‌های کل

اولین عبارت تابع هدف پیشنهادی در معادله ۱، هزینه صرف شده در مناطق کشاورزی است که شامل هزینه کشت و تولید زیست‌توده جاتروفا و هزینه انتشار کربن به شکل مالیات میشود. دومین عبارت در تابع هزینه حمل‌ونقل زیست‌توده جاتروفا از زمین‌های کشاورزی به پالایشگاه‌ها است. عبارت سوم شامل هزینه انتشار کربن برای حمل‌ونقل زیست‌توده جاتروفا به پالایشگاه زیستی از مناطق کشاورزی است. چهارمین عبارت تابع هدف، هزینه تولید سوخت زیستی در کارخانه‌های زیست پالایشگاه‌ها و هزینه انتشار کربن برای تولید واحد سوخت زیستی در پالایشگاه‌های زیستی است. عبارت پنجم شامل هزینه حمل‌ونقل سوخت زیستی است. عبارت نهایی تابع هدف اول، هزینه انتشار کربن برای حمل‌ونقل سوخت زیستی به مراکز بازار معین است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

$$
\begin{aligned}
&Min\ Total\ Cost \\
&= \sum_{f=1}^{F}\sum_{b=1}^{B}[\left(\widetilde{Coha_f} + \widetilde{Coco_f} + \widetilde{Cohl_f} + \widetilde{Colo_f}\right) \\
&+ (Coxag_f \times em_f)] \times q_{fb} \\
&+ \sum_{f=1}^{F}\sum_{b=1}^{B}(\left(\left(Cotr_{fb} \times dis_{fb}\right) + Ftr_{fb}\right)) \\
&\times Cptr_{fb}) \times N_{fb} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{b=1}^{B} Coxtr_{fb} \times em_{fb} \\
&\times dis_{fb} \times Cptr_{fb} \times N_{fb} \\
&+ \sum_{b=1}^{B}\sum_{m=1}^{M}(Copr_b + (Coxag_b \times em_b)) \times q_{bm} \\
&+ \sum_{b=1}^{B}\sum_{m=1}^{M}(((Cotr_{bm} \times dis_{bm}) + Ftr_{bm})) \\
&\times Cptr_{bm}) \times N_{bm} + \sum_{b=1}^{B}\sum_{m=1}^{M} Coxtr_{bm} \times em_{bm} \\
&\times dis_{bm} \times Cptr_{bm} \times N_{bm}
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

۲- کمینه‌کردن میزان انتشار کربن

هدف دوم، هدف زیست‌محیطی است که در معادله ۲ نشان داده شده است و شامل به‌حداقل‌رساندن انتشار کربن کل ناشی از فعالیت‌های مختلف کشاورزی برای تأمین جاتروفا، حمل‌ونقل جاتروفا، تولید سوخت زیستی در پالایشگاه‌های زیستی و حمل‌ونقل سوخت زیستی است. این مدل، انتشار کربن منتشر شده از مصرف سوخت را در طول حمل‌ونقل جاتروفا از مناطق کشاورزی به کارخانه‌های پالایشگاه‌های زیستی و حمل‌ونقل سوخت زیستی از کارخانه‌های پالایشگاه‌های زیستی به مراکز بازار نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی همچنین انتشار کربن ناشی از فعالیت‌های مزرعه کشاورزی، یعنی برداشت، ذخیره، جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و بارگیری را در بر می‌گیرد. علاوه بر این، انتشار کربن به دلیل عملیات در طول فعالیت‌های تولید سوخت زیستی در پالایشگاه‌های زیستی نیز مدل ریاضی طراحی‌شده ثبت می‌شود.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

$$Min\ Total\ Emission = \sum_{f=1}^{F}\sum_{b=1}^{B} em_f \times q_{fb} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{b=1}^{B} em_{fb} \times q_{fb} + \sum_{b=1}^{B}\sum_{m=1}^{M} em_{bm} \times q_{bm} + \sum_{b=1}^{B}\sum_{m=1}^{M} em_b \times q_{bm} \quad ۲$$

۳- بیشینه‌کردن میزان سوخت تولید شده

سومین تابع هدف که در معادله ۳ نشان داده شده است، بیشینه‌کردن میزان سوخت تولید شده در زنجیره تأمین است که شامل کل میزان سوختی است که از پالایشگاه سوخت زیستی به بازار انتقال پیدا می‌کند.

$$Max\ Fuel\ Prodution = \sum_{b=1}^{B}\sum_{m=1}^{M} q_{bm} \quad ۳$$

محدودیت‌ها

$$\sum_{b=1}^{B} q_{bm} \geq De_m \qquad \forall m \in M \quad ۴$$

از آنجایی که برآورده کردن تقاضا طی این شبکه تامین الزامی است، محدودیت ۴، تضمین میکند که میزان تولید سوخت زیستی می‌بایست بیشتر یا برابر از میزان تقاضای شناسایی شده باشد.

$$\sum_{m=1}^{M} q_{bm} \leq CaP_b \qquad \forall b \in B \quad ۵$$

محدودیت ۵، بدین منظور در نظر گرفته شده است که میزان سوخت تولید شده، نمی تواند بیش از ظرفیت تولید پالایشگاه باشد.

$$\sum_{b=1}^{B} q_{fb} \leq \gamma \times CaF_f \quad ۶$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

بدیهی است که میزان خروجی از یک گره شبکه تامین از میزان ورودی نمی تواند بیشتر باشد. محدودیت ۶، اذعان دارد که میزان زیست‌توده‌ای که از محل کشت به سمت پالایشگاه روانه می‌گردد، حداکثر به میزان ضریب ثمردهی زمین در ظرفیت کشت زمین است.

$$\sum_{b=1}^{B} em_{fb} \times q_{fb} \leq CaEm_f \qquad \forall f \in F \qquad ۷$$

$$\sum_{m=1}^{M} em_{bm} \times q_{bm} \leq CaEm_b \qquad \forall b \in B \qquad ۸$$

یکی از مفروضات مسئله این است که برای انتشار کربن در حین تولید سوخت زیستی محدودیت قانونی وجود دارد و میزان مجموع میزان کربن منتشر شده در حین تولید زیست‌توده و همچنین تولید سوخت زیستی، نباید بیش از میزان مجاز قانونی باشد. محدودیت ۷ و ۸، به دلیل محدودیت انتشار کربنی است که از نظر قانونی وجود دارد.

$$\sum_{b=1}^{B} q_{fb} \times \widetilde{wa}_f \leq CapWa_f \qquad \forall f \in F \qquad ۹$$

محدودیت ۹، تضمین می‌کند که میزان آب مورداستفاده برای تولید زیست‌توده، به اندازه ظرفیت آب در دسترس باشد.

$$\sum_{f=1}^{F} q_{fb} \times \beta \geq \sum_{m=1}^{M} q_{bm} \qquad \forall b \in B \qquad ۱۰$$

محدودیت ۱۰، بدین معناست که حداکثر سوخت زیستی تولید شده، نمی تواند بیش از زیست‌توده در دسترس در ضریب نرخ تبدیل باشد.

$$N_{bm} = (q_{bm})/(Cptr_{bm}) \qquad ۱۱$$

$$N_{fb} = (q_{fb})/(Cptr_{fb}) \qquad ۱۲$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ ، تعداد سفرهایی را نشان میدهند که برای انتقال زیست‌توده از محل کشت به پالایشگاه و انتقال سوخت زیستی از پالایشگاه به بازار باید صورت می‌گیرد. تعداد سفرهای لازم، با تقسیم میزان زیست توده انتقالی بر ظرفیت وسیله مورد استفاده برای حمل و نقل بدست می‌آید.

رویکرد لای و هووانگ برای برنامه‌ریزی فازی

ازآنجایی‌که در مدل موردبحث برخی پارامترهای تابع هدف و برخی پارامترهای مورداستفاده در محدودیت‌ها به‌صورت فازی تعریف شده است، لازم است که از روش‌های حل مدل برنامه‌ریزی فازی استفاده گردد. یکی از رویکردهایی که برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی فازی ارائه شده در سال ۱۹۹۲ توسط لای و هوانگ بوده است (لای[1] و هوانگ[2]، ۱۹۹۲؛ کائو[3] و همکاران، ۲۰۰۳). اگر معادله ۱۳ به‌عنوان تابع هدف و معادله ۱۴ به‌عنوان محدودیت مدل با پارامترهای فازی در نظر گرفته شود، آنگاه می‌توان با روش لای و هوانگ این مدل فازی را حل نمود. عدد فازی مثلثی A و B به ترتیب در ۱۵ و ۱۶ قابل مشاهده است. پیشنهاد رویکرد لای و هوانگ این است که چنین محدودیتی به سه محدودیت جدید شکسته شود و این سه محدودیت جایگزین محدودیت قبلی گردد. محدودیت‌های جدید در معادلات ۱۷ تا ۱۹ قابل مشاهده است. در نتیجه محدودیت با پارامترهای فازی تبدیل به سه محدودیت با پارامترهای قطعی می‌گردد.

$$Max\ z = CX \qquad ۱۳$$

$S.t$

$$\tilde{A}_i X \leq \tilde{B}_i \qquad ۱۴$$

$$\tilde{A} = (a^p, a^m, a^o) \qquad ۱۵$$

$$\tilde{B} = (b^p, b^m, b^o) \qquad ۱۶$$

$$a_i^p X \leq b_i^p \qquad ۱۷$$

$$a_i^m X \leq b_i^m \qquad ۱۸$$

1. Lai
2. Hwang
3. Cao

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

$$a_i^o X \le b_i^o \qquad ۱۹$$

در خصوص تابع هدف با پارامترهای فازی، یکی از روش‌هایی که می‌توان مورداستفاده قرار داد، استفاده از سه مقدار فازی با اوزان مختلف است. بدین منظور اگر عدد فازی مثلثی را برای پارامتر C مطابق ۲۱ در نظر گرفته شود، می‌توان معادله ۲۱ را جایگزین معادله ۱۳ کرد. در نهایت تابع هدف با ضرایب فازی تبدیل به تابع هدف با ضرایب قطعی می‌گردد.

$$\tilde{C} = (c^p, c^m, c^o) \qquad ۲۰$$

$$\tilde{C}X = c^p X + c^m X + c^o X \qquad ۲۱$$

روش محدودیت اپسیلون تقویت یافته برای حل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه

برای حل مدل چندهدفه پیشنهادی، از محدودیت اپسیلون تقویت یافته استفاده شده است. محدودیت اپسیلون تقویت یافته رویکردی برای دستیابی به پاسخ‌های کارآمد پارتو است. برای دستیابی به پاسخ‌های پارتو باید یکی از اهداف را به‌عنوان هدف اصلی انتخاب کرد و سپس سایر اهداف را به‌عنوان محدودیت در نظر گرفت. در معادله (۲۰) می‌توان دید که یکی از اهداف به مقددار بهینه می‌رسد. معادله (۲۱) و معادله (۲۲) هدف دیگری را نشان می‌دهد که به‌عنوان یک محدودیت در نظر گرفته شده است. تفاوت بین مقدار ایده آل و مقدار به‌دست‌آمده از یک هدف به‌عنوان جریمه در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی مدل این جریمه را به حداقل می‌رساند. برای نرمال کردن مقدار جریمه‌های مختلف می‌توان از r_i که در معادله (۲۳) نشان داده شده است استفاده کرد (موروتاس[1]، ۲۰۰۹). در مدل این پژوهش، تابع هزینه عملیاتی کل، به عنوان تابع اصلی درنظر گرفته شده است و سایر توابع به محدودیت تبدیل شده‌اند.

$$Min/Max\left(f_1(x) + \vartheta * \left(\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3} + \cdots + \frac{s_i}{r_i} \ldots + \frac{s_n}{r_n}\right)\right) \qquad ۲۰$$

1. Mavrotas

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

$$St: \quad f_2(x) - s_2 = \varepsilon_2 \qquad (۲۱)$$

$$f_n(x) - s_n = \varepsilon_n$$
$$i \in [2, n] \qquad (۲۲)$$
$$s_i \in R^+$$

$$r_i = PIS_{fi} - NIS_{fi} \qquad (۲۳)$$

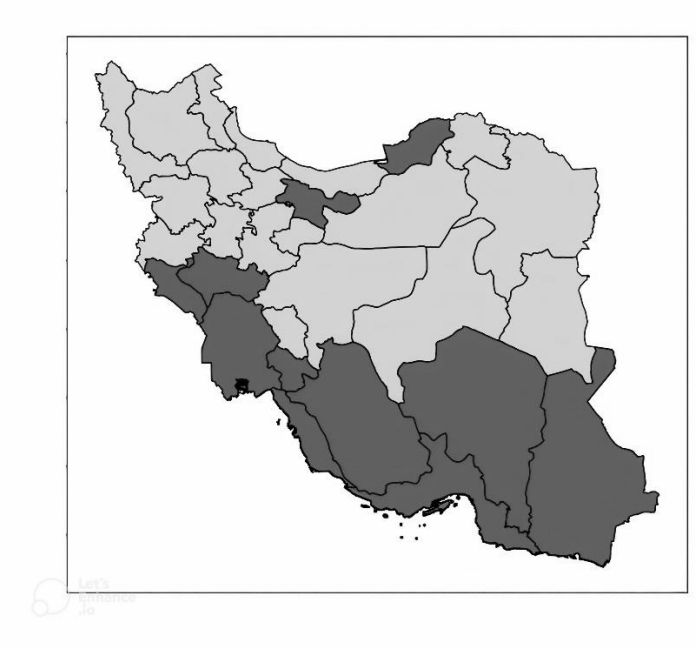
۴- مطالعه موردی

این پژوهش، سعی بر آن دارد تا یک مدل ریاضی را جهت به‌دست‌آوردن مقادیر بهینه متغیرهای زنجیره تأمین سوخت زیستی مبتنی بر جاتروفا در کشور ایران توسعه دهد. همان‌طور که پیش‌تر در مفروضات مسئله عنوان شد، مدل ریاضی این پژوهش ناظر بر لایه عملیاتی زنجیره تأمین انرژی زیستی است. در ابتدا لازم است نقاطی از کشور که در پژوهش‌های پیشین به‌عنوان مکان مناسب برای محل کشت جاتروفا و همچنین نقاطی که جهت احداث تسهیلات عنوان شده‌اند، بررسی گردد. در مرحله بعد پارامترهای مسئله معرفی و مشخص گردد. در نهایت نیز مدل ریاضی حل گردد و جواب بهینه به‌دست‌آمده مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

نقاط کاندید جهت کشت جاتروفا

محجوب و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهش خود با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی ، فرایند واکاوی سلسله مراتبی و درنظرگرفتن عواملی مانند کاربری اراضی، نزدیکی به منابع، مسیرهای ارتباطی و شرایط اقلیمی، نقاطی از کشور ایران را به‌عنوان نقاط مناسب جهت کشت جاتروفا، عنوان کرده‌اند. استان هایی که در پژوهش مذکور برای کشت جاتروفا عنوان شده‌اند عبارت اند از: تهران، کرمان، خوزستان، سیستان و بلوچستان، ایلام، لرستان، هرمزگان، بوشهر، خوزستان، گلستان و کهگیلویه و بویراحمد که در شکل۲. مشخص شده‌اند.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]



شکل۲. استان‌های مناسب برای کشت جاتروفا

پارامترهای کشت و تولید

پارامترهای مربوط به تولید جاتروفا با استفاده از مقادیری که در پژوهش بابازاده و همکاران (۲۰۱۷) عنوان شده است، استخراج گردیده است. برخی از پارامترهای مورداستفاده در پژوهش به دلیل غیرقطعی بودن، به‌صورت اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. یکی از این پارامترها، مقدار آب موردنیاز برای هر واحد جاتروفا است. مقادیر مذکور در جدول ۲ قید شده است (محجوب و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۲. پارامترهای مربوط به کشت و تولید

عنوان	مقدار
نرخ تبدیل روغن جاتروفا به بیودیزل	۰,۹۳
نرخ تبدیل جاتروفا به روغن جاتروفا	۰,۳۵
نرخ بازدهی زمین برای کشت جاتروفا	۷ هکتار/تن
مقدار آب لازم برای جاتروفا	(۰,۰۰۱،۰,۰۰۲،۰,۰۰۳)

منبع: (محجوب و همکاران، ۲۰۲۱)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

پارامترهای زیست‌محیطی و هزینه

پارامترهای زیست‌محیطی و هزینه‌های مربوط به زنجیره تأمین سوخت زیستی بر پایه جاتروفا، از پژوهش محجوب و همکاران (۲۰۲۱) و همچنین پژوهش بابازاده و همکاران (۲۰۱۷) استخراج شده است.

نتایج حل عددی مدل بهینه‌سازی شبکه تأمین

حل مدل فازی با استفاده از روش لای و هوانگ و محدودیت اپسیلون

همان‌طور که پیش‌تر مطرح شد، در مدل ریاضی موردبحث، برخی پارامترهای مدل شامل اعداد فازی هستند و مدل در برخی از پارامترها از جمله مقدار آب موردنیاز و هزینه‌های کشاورزی دارای عدم قطعیت است. ازاین‌رو لازم است با روش لای و هوانگ مدل با اعداد فازی مطابق آنچه در بخش روش حل مسئله توضیح داده شده است، مجدداً بازنویسی گردد. پس از بازنویسی مدل بهینه‌سازی فازی، مدل چندهدفه با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، حل می‌گردد.

با استفاده از روش حل محدودیت اپسیلون، می‌توان مقادیر بهینه اهداف چندگانه را در سطوح مختلف به دست آورد. بدین ترتیب نمودارهای پارتو به‌صورت دو به دو برای اهداف سه‌گانه مدل زنجیره تأمین که شامل بیشینه‌سازی مقدار تولید سوخت، کمینه‌سازی هزینه عملیاتی کل و مقدار دی‌اکسیدکربن ساتع شده است، به دست خواهد آمد. جواب‌های پارتو برای اهداف سه‌گانه مدل در جدول ۳ و نمودار پارتو به‌صورت دو به دو برای اهداف سه‌گانه مدل زنجیره تأمین انرژی زیستی در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که قابل انتظار است، افزایش میزان تولید سوخت منجر به افزایش میزان هزینه کل و همچنین میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده می‌گردد. میزان کربن‌دی‌اکسید تولید شده و میزان هزینه کل با یکدیگر رابطه مستقیم دارند و هر دو با یکدیگر افزایش می‌یابند.

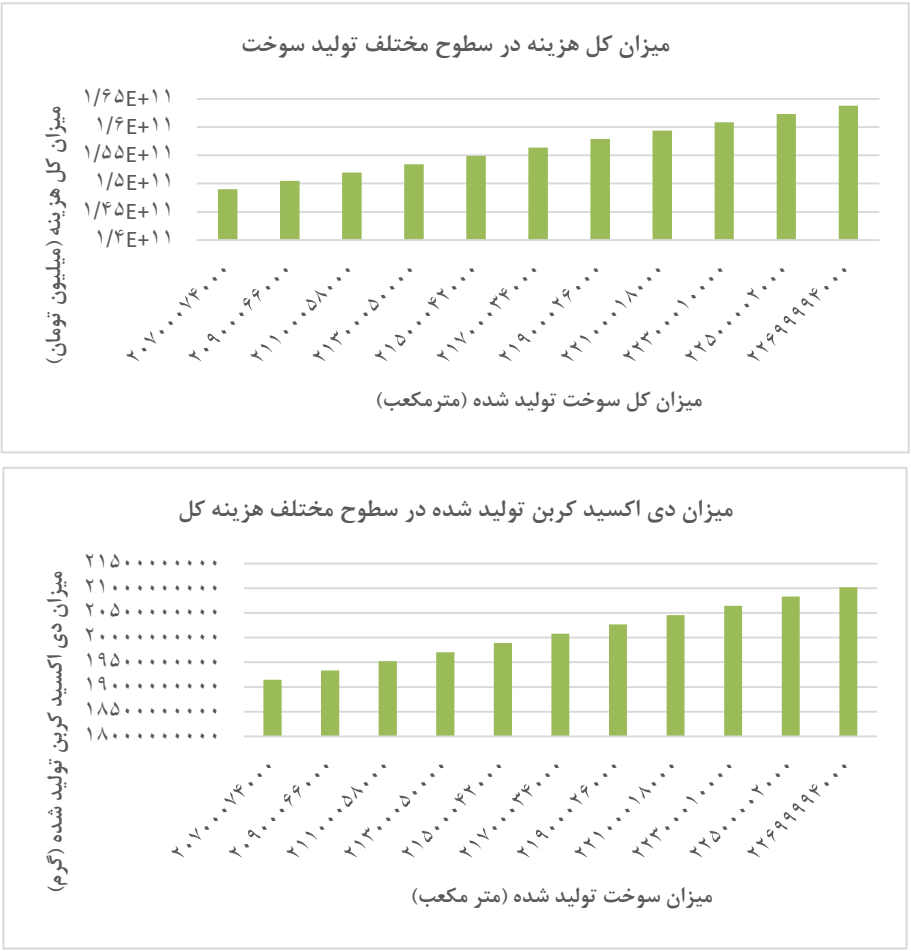
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

جدول۳. جواب‌های پارتو برای توابع هدف سه‌گانه مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین

میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (گرم)	هزینه عملیاتی کل (میلیون تومان)	تولید سوخت زیستی (مترمکعب)
۱۹۱۴۵۴۴۸۱۷۲	۱۱E+۱,۴۸۹۹۹	۲۰۷۰۰۰۷۴۰۰۰
۱۹۳۳۲۵۸۹۲۴۳	۱۱E+۱,۵۰۴۷۸	۲۰۹۰۰۰۶۶۰۰۰
۱۹۵۱۹۷۳۲۹۱۵	۱۱E+۱,۵۱۹۵۷	۲۱۱۰۰۰۵۸۰۰۰
۱۹۷۰۶۸۶۷۶۱۹	۱۱E+۱,۵۳۴۳۶	۲۱۳۰۰۰۵۰۰۰۰
۱۹۸۹۳۹۹۹۴۶۴	۱۱E+۱,۵۴۹۱۵	۲۱۵۰۰۰۴۲۰۰۰
۲۰۰۸۱۱۵۳۲۸۰	۱۱E+۱,۵۶۳۹۵	۲۱۷۰۰۰۳۴۰۰۰
۲۰۲۶۸۲۷۹۲۱۰	۱۱E+۱,۵۷۸۷۴	۲۱۹۰۰۰۲۶۰۰۰
۲۰۴۵۵۴۱۶۷۴۰	۱۱E+۱,۵۹۳۵۳	۲۲۱۰۰۰۱۸۰۰۰
۲۰۶۴۲۵۶۰۸۶۷	۱۱E+۱,۶۰۸۳۲	۲۲۳۰۰۰۱۰۰۰۰
۲۰۸۲۹۷۱۴۸۸۴	۱۱E+۱,۶۲۳۱۱	۲۲۵۰۰۰۰۲۰۰۰
۲۱۰۱۶۸۳۲۴۸۴	۱۱E+۶۳۷۹.۱	۲۲۶۹۹۹۹۴۰۰۰

منبع: محاسبات محقق

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]



شکل ۳. نمودار جواب‌های پارتو برای توابع هدف سه گانه به صورت دو به دو

در پایین‌ترین سطح تولید سوخت، مدل زنجیره تأمین تنها قادر به برآورده‌کردن حداقل تقاضایی است که در محدودیت قید شده است. سطوح بالاتر تولید سوخت بیش از حداقل تقاضایی است که در محدودیت مدل عنوان شده است. تصمیم‌گیرندگان با بررسی نمودار پارتو و افزایش هزینه کل و دی‌اکسیدکربن به‌ازای افزایش تولید سوخت، می‌توانند تحلیل کنند که تا چه میزان تولید سوخت مازاد بر حداقل تقاضا، برایشان مقدور خواهد بود. در واقع نمودار پارتو کمک می‌کند تا بتوان تأثیر میزان افزایش تولید سوخت بر میزان افزایش هزینه کل و تولید کربن‌دی‌اکسید را مشاهده کرد. نرخ تغییرات

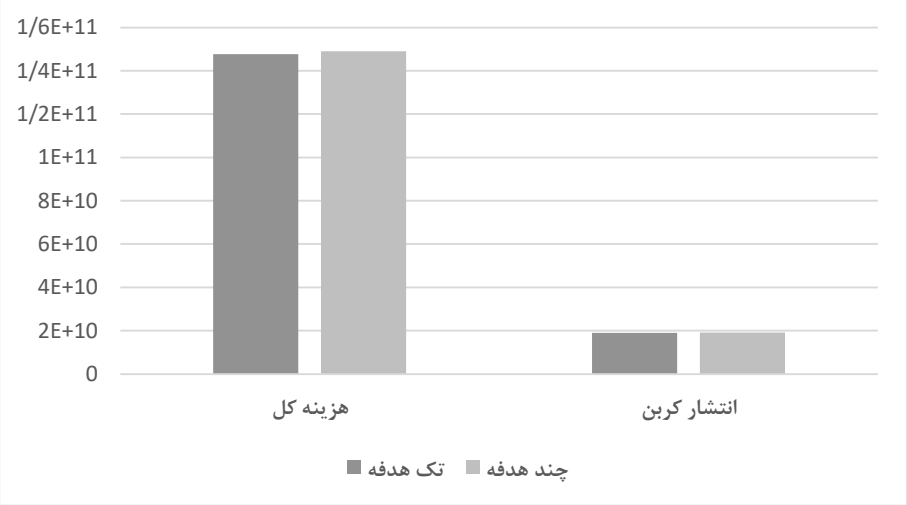
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

نسبی هزینه عملیاتی کل و میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده نیز در سطوح مختلف تقریباً ثابت است و به ترتیب بین ۰,۹۱۱٪ تا ۰,۹۹۳٪ و بین ۰,۸۹۸٪ تا ۰,۹۷۷٪ متغیر است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر سه پارامتر به طور نسبی به نسبت‌های مشابهی افزایش می‌یابند. بررسی نقاط پارتو نشان می‌دهد که هر افزایش در تولید سوخت زیستی به میزان تقریباً یکسانی منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی و میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده می‌شود. برای انتخاب نقطه بهینه، می‌توان از روش‌های چندهدفه بهینه‌سازی با اولویت‌بندی کاهش هزینه، کاهش دی‌اکسیدکربن، یا تعادلی بین این دو استفاده کرد تا مطلوب ترین سطح مورد نظر را برگزید.

نمودار شکل تفاوت جواب‌های بهینه بدست آمده برای توابع توابع هدف به ازای حل تک هدفه و چند هدفه را نشان می‌دهد. این نمودار کمک می‌کند تا سطح کارایی مدل در مواجه با تضاد بین اهداف مدل بررسی و تحلیل گردد. همانطور که انتظار می‌رود، در حالت حل تک هدفه، توابع هدف مقادیر بهتری دارند و حال حل چند هدفه مقدار هزینه کل و انتشار کربن کمی افزایش داشته است.

از جنبه مدیریتی، ضروری است تحلیل‌های هزینه-فایده باید برای هر مرحله از افزایش تولید انجام شود تا اطمینان حاصل شود که افزایش تولید واقعاً منجر به بهره‌وری اقتصادی می‌شود. فرآیندهای تولید باید بهینه‌سازی شوند تا هزینه‌های عملیاتی به حداقل ممکن برسد. این می‌تواند شامل استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر و بهبود کارایی عملیاتی باشد. در انتها، انتخاب سطح تولید سوخت زیستی به تعیین اولویت‌های استراتژیک بر اساس اهداف زنجیره تامین برمیگردد. اگر کاهش هزینه یا کاهش اثرات زیست‌محیطی اولویت دارند، باید نقاط بهینه در پارتو برای آن اهداف انتخاب شوند.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]



شکل۴. نمودار مقایسه جواب‌های بهینه بدست آمده برای توابع توابع هدف به ازای حل تک هدفه و چند هدفه،

منبع: محاسبات محقق

فرض مدل بهینه‌سازی بر این است که ۶ استان دارای مزارع کشت جاتروفا هستند که شامل البرز، هرمزگان، کرمان، سیستان و بلوچستان، خوزستان و ایلام می‌گردد. ۳ استان از بین این ۶ استان دارای پالایشگاه سوخت زیستی هستند که شامل کرمان، خوزستان، البرز و ایلام می‌گردد. استان‌های تهران، اصفهان، خراسان رضوی، فارس و زنجان نیز به‌عنوان نقاط دارای تقاضای سوخت زیستی در نظر گرفته شده‌اند. پس از حل بهینه مدل میزان جابه جایی زیست‌توده بین مزارع و پالایشگاه زیستی در استان‌های مختلف در جدول ۴ به‌دست‌آمده است. مطابق آنچه در جدول ۴ مشاهده می‌گردد، هرمزگان به دلیل نزدیکی بیشتر به محل پالایشگاه ها، مقدار بسیار بیشتری از سایر استان‌ها، زیست‌توده انتقال می‌دهد. در واقع اینطور می‌توان گفت که انتقال زیست‌توده از هرمزگان به سایر پالایشگاه‌ها در مجموع هزینه کمتری به دنبال دارد. در جدول ۵ مقدار سوخت زیستی که از پالایشگاه به بازارهای مختلف باید انتقال پیدا کند، قابل مشاهده است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

جدول ۴. مقدار زیست‌توده انتقال داده شده بین محل کشت و محل پالایشگاه‌ها

مقدار زیست‌توده انتقال داده شده (تن)	محل پالایشگاه	محل کشت
۲۶۷۲۷۸۴۰	کرمان	هرمزگان
۱۶۵۸۹۷۹۰	خوزستان	هرمزگان
۹۸۳۱۱۳۳	البرز	هرمزگان
۱۰۴۴۵۰۸۸	ایلام	هرمزگان
۴۸	البرز	س‌ی‌ستان و بلوچستان
۲۱۰	کرمان	خوزستان
۱۳۲	البرز	خوزستان
۱۷۲	ایلام	خوزستان
۱۶۸	البرز	ای‌لام
۱۲۶	ایلام	ای‌لام

منبع: محاسبات محقق

جدول ۵. میزان سوخت انتقال داده شده از محل پالایشگاه‌ها به مراکز تقاضا

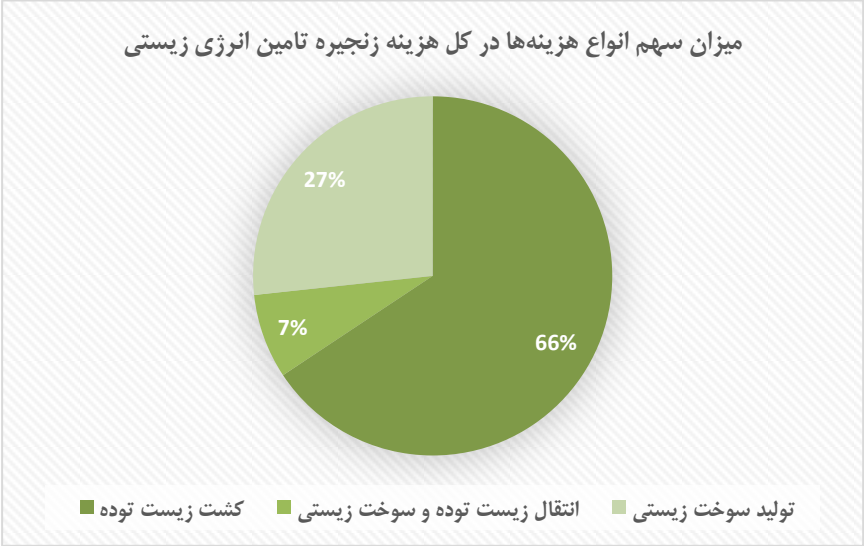
مقدار سوخت انتقال داده شده به بازار (مترمکعب)	مرکز تقاضا	محل پالایشگاه
۲۹۹۹۹۹۲	تهران	کرمان
۴۳۹۹۹۷۶	اصفهان	کرمان
۱۳۰۰۰۱۲	زنجان	کرمان
۵۸	تهران	خوزستان
۴۲۹۹۸۹۰	خراسان رضوی	خوزستان
۱۱۰۰۰۲۸	فارس	خوزستان
۳۲۰۰۰۳۴	تهران	البرز
۵۸	اصفهان	البرز
۵۵	خراسان رضوی	البرز
۱۶۹۹۹۴۰	تهران	ای‌لام
۵۸	خراسان رضوی	ای‌لام
۱۶۹۹۹۷۵	فارس	ای‌لام

منبع: محاسبات محقق

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

انواع هزینه‌ها

تابع تعریف شده برای هزینه عملیاتی کل متشکل از سه بخش است. یک بخش از هزینه‌ها مربوط به هزینه‌های کشت جاتروفا، بخش دیگر مربوط به هزینه‌های انتقال و آخرین بخش مربوط به هزینه‌های تولید سوخت زیستی است. نمودار شکل ۵ نشان دهنده سهم هزینه‌های مختلف در کل جریان عملیات زنجیره تأمین است. مطابق نمودار شکل ۵ بیشترین سهم از هزینه کل مربوط به کشت زیست توده است که ۶۶٪ از کل هزینه را شامل می‌شود. این نشان می‌دهد که فرآیند کشت زیست توده بسیار هزینه‌بر است و نیاز به بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌ها در این بخش به شدت احساس می‌شود. بررسی دقیق هزینه‌های کشت زیست توده و شناسایی فرصت‌های کاهش هزینه، استفاده از تکنولوژی‌های مدرن کشاورزی برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها، و تحقیق و توسعه برای یافتن روش‌های جایگزین کشت زیست توده با هزینه کمتر از جمله راهکارهای موثر برای بهینه‌سازی فرآیند کشت زیست توده هستند.



شکل ۵. سهم انواع هزینه‌های مختلف در کل هزینه

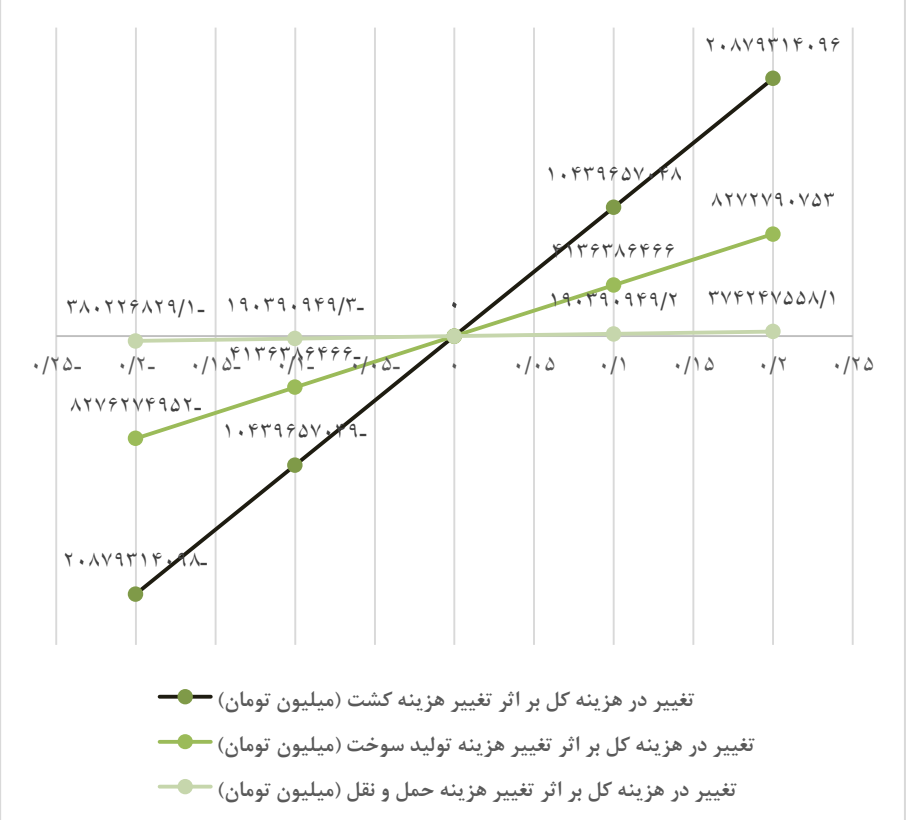
منبع: محاسبات محقق

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

تحلیل حساسیت

در این قسمت تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا، شکل ۶ مشاهده می‌گردد که تغییرات کل هزینه عملیاتی زنجیره تأمین را به‌ازای درصد تغییر در پارامترهای مربوط به هرنوع از پارامترهای هزینه نشان می‌دهد. مطابق آنچه مشاهده می‌گردد، تغییرات پارامتر مربوط به هزینه‌های کشت زیست‌توده، بیشترین تغییرات را در هزینه کل به دنبال دارد. از سوی دیگر میزان تغییرات در پارامترهای مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل، کمترین تغییرات را در هزینه کل به دنبال دارد. دلیل این امر، سهم هریک از انواع هزینه‌ها در هزینه کل است. مطابق بررسی انواع هزینه‌ها در قسمت قبل، ازآنجایی‌که هزینه کشت زیست‌توده، سهم بیشتری در هزینه کل دارد، تغییرات آن نیز تأثیر بیشتری در تغییرات هزینه کل به‌جای می‌گذارد. هر ۰,۱ واحد تغییر در هزینه کشت و هزینه تولید سوخت زیستی به ترتیب منجر به حدود ۱۰۴۳۹,۶۶ میلیون تومان و حدود ۴۱۳۶,۳۹ میلیون تومان در هزینه کل زنجیره تأمین می‌شود. از این رو بهبود کارایی تولید سوخت زیستی از طریق بهینه‌سازی فرآیندها و استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته برای کاهش هزینه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به این ترتیب تغییرات پارامترهای هزینه مربوط به تولید سوخت زیستی و حمل‌ونقل، تأثیر کمتری در تغییرات هزینه کل دارد.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]



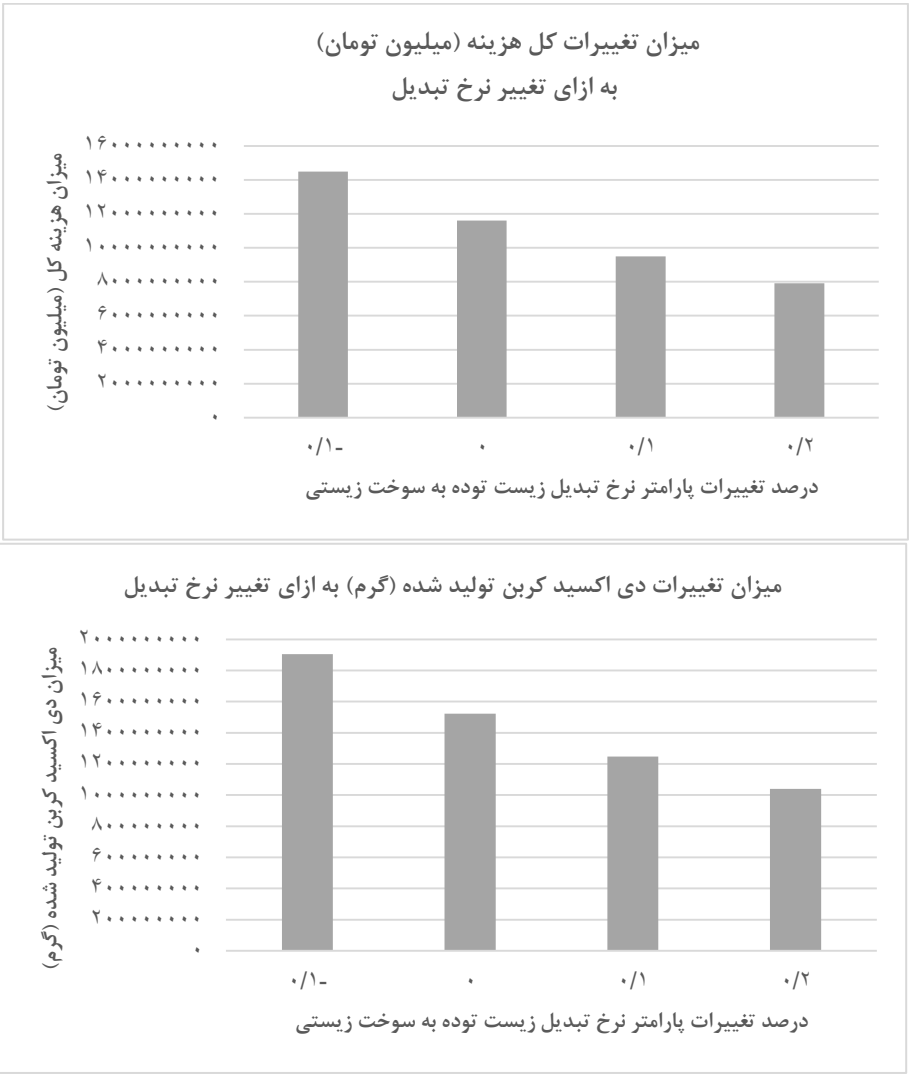
شکل۶. نمودار میزان تغییرات کل هزینه به‌ازای درصد تغییرات پارامتر هزینه‌های مختلف

منبع: محاسبات محقق

نمودار شکل ۷ تغییرات هزینه کل و میزان کربن‌دی‌اکسید تولید شده را به‌ازای تغییرات در پارامتر نرخ تبدیل گیاه جاتروفا به سوخت زیستی نشان می‌دهد. بدیهی است که کاهش نرخ تبدیل منجر به افزایش هزینه کل و میزان کربن‌دی‌اکسید تولید شده می‌گردد. به بیان دیگر کاهش نرخ تبدیل، کاهش بازدهی تولید و افزایش نرخ تبدیل نشان دهنده افزایش بازدهی تولید را نشان می‌دهد. افزایش نرخ تبدیل زیست توده به سوخت زیستی به میزان ۰,۱ یا ۰,۲ واحد، منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه کل می‌شود. همین امر در خصوص نسبت افزایش نرخ تبدیل و کاهش میزان دی اکسید کربن صدق می‌کند. از منظر استفاده از فناوری‌های مختلف در تولید، با استفاده از نمودار شکل ۷ می‌توان دریافت، چگونه استفاده از فناوری‌های به روز با بازده تولید

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

بیشتر و اصلاح فرایند تولید انرژی زیستی باهدف بالا بردن بهره‌وری به چه میزان موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی کل و انتشار دی‌اکسیدکربن خواهد شد. بنابراین سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای یافتن روش‌های بهینه‌تر تبدیل زیست توده به سوخت زیستی در آینده امری ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۷. نمودار میزان تغییرات دی‌اکسیدکربن تولید شده و کل هزینه‌ها به‌ازای درصد تغییر نرخ تبدیل

منبع: محاسبات محقق

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، ارائه مدل بهینه‌سازی در لایه عملیاتی زنجیره تأمین انرژی زیستی بوده است. محدودیت منابع سوخت فسیلی و تجدیدناپذیر، سیاست‌گذاران حوزه انرژی را بر آن داشته است تا استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر همچون زیست‌توده را موردتوجه بیشتری قرار دهند. ازاین‌رو در مدل ارائه شده در این پژوهش زیست‌توده مورداستفاده گیاه جاتروفا بوده است که جزو زیست‌توده‌های نسل دوم به شمار می‌آید. از مزایای قابل‌توجه این زیست‌توده، فاقد ارزش غذایی بودن آن است که موجب می‌گردد، استفاده از این گیاه به‌منظور تولید سوخت، دسترسی به منابع غذایی را مورد تهدید قرار ندهد. با توجه به اهمیت مدنظر قراردادن آب در زنجیره تأمین انرژی، موضوع رابطه متقابل آب و انرژی بیش از پیش موردتوجه قرار گرفته است. مزیت دیگر استفاده از جاتروفا نیاز کمتر آن به آب نسبت به سایر زیست‌توده‌ها است.

به دلیل اینکه برخی پارامترهای یک مدل زنجیره تأمین در شرایط واقعی غیرقطعی هستند، در مدل ارائه شده نیز پارامترهایی چون تقاضا، هزینه‌های مختلف عملیاتی و مصرف آب به‌صورت اعداد فازی و غیرقطعی در نظر گرفته شدند. پس از حل مدل بهینه سازی، به‌ازای تولید سوخت زیستی به میزان ۲۰,۷ کیلومترمکعب، میزان هزینه عملیاتی کل ۱۴۹،۰۰۰ میلیون تومان و میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید کل نیز ۱۹،۱۰۰ تن به دست آمد. تحلیل جواب‌های پارتو نشان داد که با افزایش تولید سوخت زیستی، هزینه‌های عملیاتی و میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده به طور خطی افزایش می‌یابد. در نهایت انتخاب نقطه بهینه بستگی به اولویت مدیران و تصمیم گیرندگان در تامین تقاضا، کاهش هزینه‌ها و کاهش آلایندگی دارد.

با نگاهی به پژوهش‌های دیگر درمیابیم که برخی نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر همخوانی دارد. به عنوان مثال در پژوهش صورت گرفته توسط گیرالدی دیاز[1] و همکاران (۲۰۱۸) تحت سناریوهای مختلف، هزینه کشت جاتروفا از سایر هزینه‌های زنجیره تامین انرژی زیستی بالاتر بوده است. در برخی پژوهش‌های دیگر مثل پژوهش گیلانی و همکاران (۱۳۹۹) هزینه حمل و نقل کمترین سهم را در شبکه تامین انرژی زیستی به خود اختصاص داده است.

1. Giraldi-Díaz

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

با توجه به نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد، کشت زیست توده، بخش عمده‌ای از هزینه کل را تشکیل میدهد. به همین دلیل مدیران و تصمیم‌گیرندگانی که قصد مدیریت شبکه تامین انرژی زیستی مبتنی بر جاتروفا را دارند لازم است درصدد توسعه روش‌های کارآمد تر با بازه بالاتر به منظور کشت زیست توده برآیند. به عنوان مثال استفاده از تکنولوژی‌های مدرن کشاورزی و تحقیق و توسعه برای یافتن روش‌های جایگزین کشت زیست توده می‌تواند در آینده منجر به کاهش هزینه کل عملیاتی شبکه تامین انرژی زیستی گردد.

از جمله موضوعاتی که در پژوهش‌های آینده می‌تواند مورد تحقیق و بررسی بیشتر قرار گیرد، فرض عدم قطعیت در سایر پارامترهای مورداستفاده در زنجیره تأمین انرژی زیستی همچون نرخ بازدهی زمین محل کشت زیست‌توده و میزان آب در دسترس است. همچنین به‌کارگیری سایر روش‌های برخورد با عدم قطعیت در مدل بهینه‌سازی نیز می‌تواند حائز موارد مفیدی برای تحلیل و بررسی باشد. توجه بیشتر به رابطه آب و انرژی در زنجیره تأمین سوخت زیستی و نیز مفاهیم تاب‌آور در زنجیره تأمین به اغنای بیشتر تحقیقات آتی کمک خواهد کرد..

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

منابع

- سلیمی وحید، پیری مهدی. الزامات قانونی گذار از انرژی فسیلی به تجدیدپذیر با مقایسه نظام حقوقی اتحادیه اروپا، چین و ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۴۰۲; ۱۹ (۷۷):۳۳-۵۷
- ظاهری عبده وند محمد، سرلک احمد، شریف نژاد مریم. بررسی تأثیر سرمایه اجتماعی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای منتخب اسلامی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۴۰۳; ۲۰ (۸۰):۹۱-۱۳۰
- غلامی آرین، نیک‌پور ساغر، میرکی فائزه. بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر شاخص توسعه انسانی در ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۴۰۲; ۱۹ (۷۸):۶۹-۱۰۱
- عبداله زاده فرد علیرضا، استخر علی، استخر سعید، استخر فاطمه، بررسی فضای سبز شهری با تاکید بر کشت گیاه سوخت زیستی جاتروفا در نواحی جنوبی ایران. ۱۳۹۴
- گیلانی هانی، غضنفری مهدی، حیدرپور فرناز. رابطه متقابل آب و انرژی در شبکه تولید انرژی زیستی: رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی. فصلنامه پژوهش‌های سیاست گذاری وبرنامه‌ریزی انرژی. ۱۳۹۹; ۶ (۳) :۷-
- جندقی، غلامرضا و فتحی، محمد رضا و ملکی، محمد حسن و مولوی، میثم، طراحی شبکه زنجیره تامین زیست دیزل با در نظر گرفتن عوامل محیط زیستی تحت شرایط عدم قطعیت و حل آن با استفاده از الگوریتم، ۱۴۰۲.
- Achten, W. M., L. Verchot, Y. J. Franken, E. Mathijs, V. P. Singh, R. Aerts and B. Muys (2008). "Jatropha bio-diesel production and use." Biomass and bioenergy 32(12): 1063-1084.
- Afkhami, P. and N. Zarrinpoor (2021). "Optimization design of a supply chain for Jatropha-based biofuel from a sustainable development perspective considering international resources and demand: a case study." Industrial & Engineering Chemistry Research 60(17): 6188-6207.
- Ahmed, W. and B. Sarkar (2019). "Management of next-generation energy using a triple bottom line approach under a supply chain framework." Resources, Conservation and Recycling 150: 104431.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

- Alherbawi, M., G. McKay, H. R. Mackey and T. Al-Ansari (2021). "Jatropha curcas for jet biofuel production: Current status and future prospects." Renewable and Sustainable Energy Reviews 135: 110396.
- Almeida, J., A. De Meyer, D. Cattrysse, J. Van Orshoven, W. M. Achten and B. Muys (2016). "Spatial optimization of Jatropha based electricity value chains including the effect of emissions from land use change." Biomass and Bioenergy 90: 218-229.
- Babazadeh, R. (2017). "Optimal design and planning of biodiesel supply chain considering non-edible feedstock." Renewable and Sustainable Energy Reviews 75: 1089-1100.
- Babazadeh, R., J. Razmi, M. S. Pishvaee and M. Rabbani (2017). "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk." Omega 66: 258-277.
- Babazadeh, R., J. Razmi, M. Rabbani and M. S. Pishvaee (2017). "An integrated data envelopment analysis–mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem." Journal of cleaner production 147: 694-707.
- Baral, N. R., P. Neupane, B. B. Ale, C. Quiroz-Arita, S. Manandhar and T. H. Bradley (2020). "Stochastic economic and environmental footprints of biodiesel production from Jatropha curcas Linnaeus in the different federal states of Nepal." Renewable and Sustainable Energy Reviews 120: 109619.
- Corbière-Nicollier, T., I. Blanc and S. Erkman (2011). "Towards a global criteria based framework for the sustainability assessment of bioethanol supply chains: Application to the Swiss dilemma: Is local produced bioethanol more sustainable than bioethanol imported from Brazil?" Ecological Indicators 11(5): 1447-1458.
- Dragone, G., B. Fernandes, A. Vicente and J. Teixeira (2010). Third generation biofuels from microalgae. 2: 1355-1366.
- Escobar, J. C., E. S. Lora, O. J. Venturini, E. E. Yáñez, E. F. Castillo and O. Almazan (2009). "Biofuels: environment, technology and food security." Renewable and sustainable energy reviews 13(6-7): 1275-1287.
- Ghaderi, H., M. S. Pishvaee and A. Moini (2016). "Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis." Industrial crops and products 94: 972-1000.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

- Giraldi-Díaz MR, De Medina-Salas L, Castillo-González E, De la Cruz-Benavides M. Environmental impact associated with the supply chain and production of biodiesel from Jatropha curcas L. through life cycle analysis. Sustainability. 2018 May 7;10(5):1451.
- Jongschaap, R., W. Corré, P. Bindraban and W. Brandenburg (2007). Claims and facts on Jatropha curcas L.: global Jatropha curcas evaluation. breeding and propagation programme, Plant Research International.
- Kao, C. and S.-T. Liu (2003). "A mathematical programming approach to fuzzy efficiency ranking." International journal of production economics 86(2): 145-154.
- Khishtandar, S. (2019). "Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design." Applied Energy 236: 183-195.
- Lai, Y.-J., C.-L. Hwang, Y.-J. Lai and C.-L. Hwang (1992). Fuzzy mathematical programming, Springer.
- Maes, W. H., W. M. Achten, B. Reubens, D. Raes, R. Samson and B. Muys (2009). "Plant–water relationships and growth strategies of Jatropha curcas L. seedlings under different levels of drought stress." Journal of Arid Environments 73(10): 877-884.
- Mafakheri, F. and F. Nasiri (2014). "Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions." Energy policy 67: 116-126.
- Mahjoub, N. and H. Sahebi (2020). "The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model." Ecological Indicators 119: 106799.
- Mavrotas, G. (2009). "Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems." Applied mathematics and computation 213(2): 455-465.
- Mohtashami, Z., A. Bozorgi-Amiri and R. Tavakkoli-Moghaddam (2023). "A data envelopment analysis model for location optimization of feedstock cultivation in a biodiesel supply chain: a case study." Environment, Development and Sustainability: 1-20.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]

- Najafi, F., A. Sedaghat, A. Mostafaeipour and A. Issakhov (2021). "Location assessment for producing biodiesel fuel from Jatropha Curcas in Iran." Energy 236: 121446.
- Openshaw, K. (2000). "A review of Jatropha curcas: an oil plant of unfulfilled promise." Biomass and bioenergy 19(1): 1-15.
- Pandey, V. C., K. Singh, J. S. Singh, A. Kumar, B. Singh and R. P. Singh (2012). "Jatropha curcas: A potential biofuel plant for sustainable environmental development." Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(5): 2870-2883.
- Papapostolou, C., E. Kondili and J. K. Kaldellis (2011). Modelling biomass and biofuels supply chains. Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier. 29: 1773-1777.
- Rahmani, S. and A. Goli (2023). "Robust sustainable canola oil-based biodiesel supply chain network design under supply and demand uncertainty." Environmental Science and Pollution Research 30(36): 86268-86299.
- Rezaei, M., S. Chaharsooghi, A. Husseinzadeh Kashan and R. Babazadeh (2020). "Optimal design and planning of biodiesel supply chain network: a scenario-based robust optimization approach." International Journal of Energy and Environmental Engineering 11: 111-128.
- Rincón, L. E., M. J. Valencia, V. Hernández, L. G. Matallana and C. A. Cardona (2015). "Optimization of the Colombian biodiesel supply chain from oil palm crop based on techno-economical and environmental criteria." Energy Economics 47: 154-167.
- Sharma, B., R. G. Ingalls, C. L. Jones and A. Khanchi (2013). "Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future." Renewable and Sustainable Energy Reviews 24: 608-627.
- Zandi Atashbar, N., N. Labadie and C. Prins (2018). "Modelling and optimisation of biomass supply chains: a review." International Journal of Production Research 56(10): 3482-3506..

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-23]