نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال ششم/ شماره ۲۰/ پاییز ۱۳۹۹/ صفحات ۴۴ - ۷

رابطه متقابل آب و انرژی در شبکه تولید انرژی زیستی: رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی

هانی گیلانی
دانشجو دکتری،گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
hani_gilani@ind.iust.ac.ir
مهدی غضنفری
استاد، گروه مهندسی سیستم، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
mehdi@iust.ac.ir
فرناز حیدرپور
دانشجو دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
f_heidarpoor@ind.iust.ac.ir

محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و اثرات مخرب آن‌ها بر محیط‌زیست موجب شده است منابع انرژی تجدیدپذیر حاصل از زیست‌توده بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. هدف از این مقاله، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه و چند-دوره‌ای می‌باشد که به طراحی زنجیره تأمین تبدیل انواع مختلف زیست‌توده (ریزجلبک و جاتروفا) به انرژی با استفاده از فرآیندهای هضم بی‌هوازی و تبادل استری می‌پردازد. توابع هدف شامل بیشینه‌سازی سود حاصل از فعالیت‌های زنجیره و حداقل‌سازی مقدار آب مصرفی است. به منظور بررسی کارایی و اعتبار مدل، آنرا با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی و با داده‌های حقیقی برای استان‌های کشور ایران حل کرده و نتایج بر طبق مقادیر مختلف اهمیت اهداف ارائه و تحلیل شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، پیاده‌سازی مدل آب و انرژی با رویکرد حل جدید می‌تواند با توجه به ماهیت فازی خود و قابلیت تطبیق‌پذیری بالا نقش بسزایی را با هر نوع تصمیم‌گیری ایفا کند که درنهایت منجر به تصمیمات استراتژیک مکان احداث پالایشگاه‌ها در دو استان گیلان و اصفهان و بهینه‌سازی مکان انبارها در مطالعه موردی گردید.

واژگان کلیدی: رابطه متقابل آب و انرژی، طراحی زنجیره تأمین انرژی زیستی، ریزجلبک، جاتروفا، برنامه‌ریزی آرمانی فازی.

تاریخ دریافت: ۲۷ / ۵ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۱۴ / ۷ / ۱۳۹۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

۱- مقدمه

کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و اثرات زیستی آن‌ها از دلایل اصلی توجه و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. در این میان انرژی زیست‌توده به دلیل تنوع زیاد منابع از جذابیت بالایی برخوردار است (Mafakheri & Nasiri, 2014). به طور معمول انواع زیست‌توده در سه نسل مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. زیست‌توده نسل اول شامل موادی مانند دانه ذرت، نیشکر، دانه سویا و دانه‌های روغنی است که اغلب کاربرد خوراکی نیز دارند (Banerjee et al., 2010). از آن‌جا که استفاده از زیست‌توده نسل یک موجب به خطر افتادن امنیت تأمین غذا می‌شود این روند به سوی استفاده از مواد غیرغذایی (نسل دوم) تغییر کرده است. موادی همچون پسماندهای محصولات کشاورزی مانند غلاف ذرت، پسماندهای بعد از قطع درختان و یا محصولات گیاهی دارای انرژی بدون کاربرد خوراکی مانند جاتروفا از زیست‌توده‌های نسل دوم هستند (Sharma et al., 2013). نسل سوم که می‌توان آن‌ها را تحت عنوان زیست‌توده‌های آبزی معرفی کرد، شامل جلبک‌ها و ریزجلبک‌ها هستند. در عین حال باید توجه نمود که درنظرگرفتن بیش از یک نوع زیست‌توده به عنوان منبع تولید انرژی موجب می‌شود که در تمامی شرایط آب و هوایی، جغرافیایی و اقلیمی و حتی در مناطق دور افتاده امکان تولید انرژی پاک وجود داشته باشد و وابستگی به منابع انرژی‌های فسیلی تا حد امکان کاهش یابد. علاوه بر این، با توجه به اهمیت طراحی، اجرا و مدیریت زنجیره تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر طی سال‌های اخیر، همه‌ی فعالیت‌های شبکه زنجیره تأمین تبدیل زیست‌توده به انرژی باید به گونه‌ای طراحی شوند که بهره‌وری جریان مواد، اطلاعات و جریان مالی در شبکه تضمین شود (Eksioglu et al., 2015).

موضوع اصلی دیگر در فرآیندهای استحصال انرژی از انواع زیست‌توده، میزان آب مصرفی در زنجیره تأمین این فرآیندهاست. با توجه به خشکسالی اخیر حاکم بر کشور و کاهش قابل توجه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ذخایر آبی و افزایش قیمت، همواره میزان مصرف آب برای مدیران حائز اهمیت بوده است. از این رو، در نظر گرفتن میزان مصرف آب در چنین فرآیندهایی در قالب یک هدف ریاضی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی بالایی شود. از طرف دیگر، ایجاد تعادل در بین اهداف اقتصادی حاصل از فروش سوخت‌های زیستی تولید شده و میزان مصرف آب در بین مدیران با اختلاف نظرهای متعدد همراه بوده است. هریک از افراد با توجه به دید خود اهمیت متفاوتی برای هر یک از این اهداف متصور هستند. از این رو، نیاز به یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه که در عین توجه به آرمان‌ها توجه ویژه‌ای به سلیقه تصمیم‌گیرنده نیز داشته باشد به شدت احساس می‌شود. البته که پیاده‌سازی چنین رویکردهایی در فضای ریاضی فازی امکان‌پذیرتر می‌باشد. لذا، نیاز به یک مدل یکپارچه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی که در عین توجه به انواع مختلف زیست‌توده در یک مدل، میزان مصرف آب را در فرآیند استحصال انرژی بهینه سازد مشهود است. همان‌طور که اشاره شد توجه همزمان به این موضوعات با توجه به سلیقه متفاوت تصمیم‌گیرندگان می‌بایست با یک رویکرد فازی در بهینه‌سازی مدل‌های چندهدفه ارائه شود. بنابراین، مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه و چند دوره‌ای برای طراحی بخش بالادستی و میانی زنجیره تأمین تبدیل زیست‌توده به انرژی با استفاده از فرآیندهای هضم بی‌هوازی و تبادل استری[1] است که از دو نوع زیست‌توده شامل جاتروفا (نسل دوم) و ریزجلبک (نسل سوم) بعنوان منابع تولید انرژی استفاده کرده است. محصولات نهایی اصلی برق و بیودیزل بوده که در قالب تابع هدف سود بیشینه‌سازی می‌گردد. تابع هدف دیگر کمینه‌سازی آب مصرفی درنظرگرفته شده است و به منظور بهینه‌سازی این اهداف از یک رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی تحت تاثیر ترجیحات تصمیم‌گیرندگان استفاده شده است.

1 Transesterification

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

نوآوری‌های انجام شده در این مقاله به صورت موردی عبارت‌اند از: ۱- طراحی مدل دوهدفه (سود حاصل از تولید انرژی و آب) زنجیره تأمین بایوانرژی از انواع مختلف زیست‌توده (نسل دوم و سوم) با استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی و تبادل استری ۲- استفاده همزمان از زیست‌توده‌های نسل دوم و سوم با درنظرگیری فرآیندها و شرایط خاص تولیدی هر یک از آن‌ها به عنوان مواد اولیه ۳- تعیین نواحی پتانسیل تولید انرژی از زیست‌توده‌های نسل دوم و سوم در ایران ۴- استفاده از دانه جاتروفا به عنوان یکی از منابع تولید انرژی و به دنبال آن ایجاد اثرات مثبت همچون عدم تهدید منابع غذایی و کاهش مصرف آب ۵- انعکاس رابطه آب-انرژی در مدل ۶- حل مدل ارائه شده برای کشور ایران به عنوان مطالعه موردی و تحلیل نتایج ۷- بهینه سازی مدل دو هدفه آب و انرژی در فضای فازی هم بر اساس آرمان‌های اصلی صنعت و هم تحت تاثیر ترجیحات تصمیم‌گیرنده.

در ادامه، مروری بر ادبیات تحقیق در حوزه زنجیره تأمین زیست‌توده ارائه شده است. در بخش سوم، تعریف مساله و مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین تبدیل زیست‌توده‌های مختلف به انرژی با استفاده از فرآیندهای هضم بی‌هوازی و تبادل استری انجام گرفته است. در بخش چهارم روش حل مورد استفاده بیان شده است. در پایان، عملکرد مدل پیشنهادی در محیط دنیای واقعی ارزیابی و نتایج حاصل از مدل تحلیل شده است.

۲- مرور ادبیات

زیست‌توده به عنوان یکی از انرژی‌های جایگزین دارای منابع بسیار متنوع بوده و به دلیل مزایای فراوان، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. ریزجلبک‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون رشد سریع و درصد بالای روغن می‌توانند به عنوان یک منبع مناسب جهت تولید بیودیزل استفاده شوند (محسنی و پیشوایی، ۱۳۹۷). در ادامه به تحقیقات موجود در این حوزه خواهیم پرداخت و در انتهای این بخش به صورت خلاصه در جدول (۱) مورد بازبینی قرار خواهد گرفت. آن و همکاران

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

(Ahn et al., 2015) یک برنامه‌ریزی استراتژیک جهت طراحی زنجیره تأمین تبدیل ریزجلبک‌ها به زیست‌توده در کشور کره ارائه کرده‌اند. در این مقاله، سیستمی یکپارچه جهت عرضه مواد خام ارائه شده است. همچنین، مدل ارائه شده در تصمیم‌گیری راجع به مواردی همچون تعیین مقدار و محل مواد خام جهت حمل‌ونقل و تعداد و محل پالایشگاه‌ها با درنظرگرفتن حداقل‌سازی هزینه‌ها بسیار کمک‌کننده است. درنهایت نشان داده شد که قیمت سوخت تولیدی ۵/۹۱ دلار به ازای هر گالن خواهد بود. محسنی و پیشوایی (2016) مدلی برای طراحی شبکه تأمین تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها پیشنهاد داده‌اند و عدم قطعیت‌هایی نظیر هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل را درنظرگرفته‌اند و با روش‌های برخورد با عدم قطعیت عمیق به مدل‌سازی مساله پرداخته‌اند. در ادامه کار قبلی، محسنی و همکاران (2016) بحث رقابت بین توزیع‌کننده و مشتریان و همچنین رقابت بین توزیع‌کنندگان را مطرح کرده‌اند. آن‌ها در مدل خود ابتدا از یک روش مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی[1] برای مکان‌یابی تسهیلات استفاده کرده و سپس با ارائه یک مدل طراحی شبکه علاوه بر یافتن تصمیمات شبکه اعم از مکان‌یابی تسهیلات و جریان بین تسهیلات با استفاده از نظریه‌ی بازی‌ها و مفهوم رقابت نیز به بحث قیمت‌گذاری این نوع از سوخت‌ها پرداخته‌اند. به طور کلی، می‌توان گفت تعداد مطالعات صورت گرفته بر روی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی از منبع ریزجلبک‌ها، بسیار اندک است. همچنین، در مطالعات انجام شده تنها یک نوع زیست‌توده یعنی ریزجلبک به عنوان منبع تولید انرژی درنظرگرفته شده است. این درحالی است که ممکن است شرایط جغرافیایی و آب و هوایی مناسب جهت تولید و پرورش ریزجلبک‌ها در تمامی مناطق وجود نداشته باشد. همچنین، در صورت مناسب بودن شرایط با توجه به ظرفیت و امکانات موجود مقدار انرژی تولیدی پاسخگوی نیاز موجود نباشد. از این رو درنظرگرفتن یک یا بیش از یک منبع

1 Geographic Information System (GIS)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

تولید انرژی پاک در کنار آن می‌تواند هدف اصلی "کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی" را بیشتر و بهتر محقق نماید. در این مقاله جهت حل مشکل ذکر شده زیست‌توده نیز به عنوان دیگر منبع تولید انرژی درنظرگرفته شده است.

جاتروفا یکی از انواع زیست‌توده‌های نسل دو است که در سال‌های اخیر به عنوان منبع تولید دیزل زیستی مورد توجه بسیار قرار گرفته است. در ادامه برخی مطالعات انجام شده در این زمینه بیان شده است. بابازاده و همکاران (2017a) به طراحی زنجیره‌ی تأمین بیودیزل از جاتروفا پرداختند و یک مدل ریاضی دوهدفه (تابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی) با استفاده از برنامه‌ریزی امکانی برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها ارائه کردند. مدل ارائه شده در مقاله در ابتدا برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط غیرخطی بوده و با تکنیک‌های خطی‌سازی به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط[1] تبدیل شده است. برای حل مدل دوهدفه نیز از یک روش ترکیبی اپسیلون بهبود یافته[2] و روش بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک[3] استفاده شده است. بابازاده و همکاران (2017b) نیز به طراحی زنجیره‌ی تأمین دیزل زیستی از جاتروفا و روغن آشپزی استفاده شده[4] پرداخته‌اند. مدل ارائه شده در این مقاله ترکیبی از یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها[5] و مدل برنامه‌ریزی ریاضی است. به این ترتیب که ابتدا با توجه به شرایط اقلیمی و معیارهای اجتماعی با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها به رتبه‌بندی استان‌های کشور برای تعیین نقاط مناسب کاشت جاتروفا پرداختند. سپس، با در دست داشتن این نقاط کاندید یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره ارائه کردند. علاوه بر این، بابازاده (2017) به طراحی زنجیره‌ی تأمین دیزل زیستی از جاتروفا و روغن آشپزی استفاده شده پرداخته است. مدل ارائه شده مدلی

1 Mixed Integer Linear Programming (MILP)
2 Augmented ε-constraint
3 Lexicographic Optimization
4 Waste Cooking Oil (WCO)
5 Data Envelopment Analysis (DEA)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

قطعی، چند دوره‌ای و چند محصولی بوده و قادر به اتخاذ تصمیماتی همچون تعداد، مکان و ظرفیت بهینه تسهیلات، نوع مناسب حمل و نقل، تکنولوژی مناسب و برنامه‌ریزی جریان‌ها در دوره‌های مختلف است.

به دلیل مقاومت بالا در برابر خشکسالی و نیاز کم به آب و مواد مغذی می‌توان گیاه جاتروفا را در مناطق خشک و نیمه خشک و زمین‌هایی که امکان کاشت سایر محصولات خوراکی را ندارند پرورش داد. از این رو کاشت این گیاه به عنوان منبع تولید انرژی نه تنها امنیت تولید غذا را به خطر نمی‌اندازد بلکه موجب بیابان‌زدایی و جلوگیری از فرسایش خاک می‌شود. بنابراین، درنظرگرفتن مناطقی جهت کاشت این گیاه در زنجیره به جای خرید از تأمین‌کننده می‌تواند از جهات بیان شده مفید واقع شود. به خصوص در کشوری مانند ایران که جاتروفا تاکنون در آن کشت نشده است؛ درصورت عدم کاشت، باید از سایر کشورها وارد شود که هزینه بالایی در بر خواهد داشت. در این مقاله کشت و پرورش جاتروفا به عنوان یکی از لایه‌های زنجیره درنظرگرفته شده است. در مدل ارائه شده همان‌طور که بیان شد حتی اگر در برخی مناطق به دلیل شرایط اقلیمی و آب و هوایی (آب و هوای سرد و شرایط غرقابی) امکان کاشت جلبک و تهیه انرژی از آن وجود نداشته باشد از منبع زیست‌توده جایگزین یعنی جاتروفا می‌توان استفاده کرد. مدل ارائه شده در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط (MILP) چند دوره‌ای و دوهدفه است که به طراحی زنجیره تأمین تولید انرژی زیستی از دو نوع مختلف زیست‌توده یعنی ریزجلبک و جاتروفا می‌پردازد.

همان‌طور که در جدول (۱) قابل مشاهده است، در اکثر مقالات بررسی شده تنها از یک زیست توده در زنجیره به عنوان تولید انرژی استفاده شده است. در حالی که، درنظرگرفتن بیش از یک نوع زیست‌توده به عنوان منبع تولید انرژی موجب می‌شود که در تمامی شرایط آب و هوایی، جغرافیایی و اقلیمی و حتی در مناطق دور افتاده امکان تولید انرژی پاک وجود داشته باشد و وابستگی به منابع انرژی‌های فسیلی تا حد امکان کاهش یابد. به طور خلاصه، با توجه به شبکه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

زنجیره تأمین انرژی‌های زیستی در مسئله دو هدفه با برنامه‌ریزی آرمانی فازی، این تحقیق به تصمیمات استراتژیک همچون مکانیابی بهینه پالایشگاه‌ها و انبارها و چگونگی توزیع و جریان کالا می‌پردازد. این تصمیمات باید به گونه‌ای اتخاذ شوند که اهداف اقتصادی تولید انرژی و میزان مصرف آب تحقق پیدا کنند. همان‌طور که اشاره شد ادبیات این بخش بسیار غنی بوده است؛ از این رو اصلی‌ترین نوآوری‌های مطالعه حاضر عبارتند از:

- تصمیمات استراتژیک برنامه‌ریزی تولید انرژی زیستی (مکان احداث پالایشگاه‌ها و انبارهای ذخیره‌سازی جلبک و جاتروفا و بهینه‌سازی جریان کالا در سطوح مختلف زنجیره تأمین)
- تولید انرژی زیستی از دو نوع زیست توده نسل دوم جاتروفا و نسل سوم جلبک‌های آبزی
- ارائه یک مدل دو هدفه آب و انرژی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی به منظور رعایت اصول حرفه‌ای زنجیره تأمین و آرمان‌های خبرگان در عین توجه به ترجیحات تصمیم‌گیرنده در تعیین اهمیت اهداف
- در نظر گرفتن سناریوهای مختلف آب و هوایی به صورت رخ داد اختلال در سطوح مختلف زنجیره تأمین
- تعیین نواحی پتانسیل تولید انرژی از زیست‌توده‌های نسل دوم و سوم در ایران

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۱. مرور ادبیات (ماخذ: جمع‌بندی مقاله)

نویسنده و سال	مطالعه موردی	دوره	نوع زیست‌توده			محصول نهایی			تابع هدف				روش حل چندهدفه			رویکرد مکانیابی		همبست آب و انرژی
			جاتروفا	ریزجلبک	بقایای کشاورزی و دامی	بیودیزل	الکتریسیته	محصول جانبی	اقتصادی	زیست‌محیطی	تولید انرژی	مصرف آب	جمع وزنی	برنامه‌ریزی آرمانی	محدودیت اپسیلون	GIS	UDEA	
Balaman & Selim, 2014a	ترکیه	۳۶ ماه			×		×		×	×			×					
Balaman & Selim, 2014b	ترکیه	۲۰ سال			×		×		×									
Ahn et al., 2015	کره	۷ سال		×		×			×									
Mohseni & Pishvaee, 2016	ایران	۱۲ ماه		×		×			×									
Mohseni et al., 2016	ایران	۱۲ ماه		×		×			×							×		
Balaman & Selim, 2016	ترکیه	۱۲ ماه			×		×		×									
Balaman, 2016	ترکیه	۲۰ سال			×		×		×	×					×			

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

نویسنده و سال	مطالعه موردی	دوره	نوع زیست‌توده			محصول نهایی			تابع هدف				روش حل چندهدفه			رویکرد مکانیابی		همبست آب و انرژی
			جاتروفا	ریزجلبک	بقایای کشاورزی و دامی	بیودیزل	الکتریسیته	محصول جانبی	اقتصادی	زیست‌محیطی	تولید انرژی	مصرف آب	جمع وزنی	برنامه‌ریزی آرمانی	محدودیت اپسیلون	GIS	UDEA	
Babazadeh et al., 2017a	ایران	۲۱ سال	×			×	×	×	×	×					×		×	
Babazadeh et al., 2017b	ایران	۴۰ فصل	×			×			×									
Babazadeh, 2017	ایران	۴۰ فصل	×			×		×	×									
Kesharwani et al., 2018	آمریکا	تک دوره			×	×			×	×			×					
Gilani et al.,2020	ایران	۱۲ سال			×	×			×	×							×	
Mahjoub et al.,2020	ایران	۱۰ سال	×	×	×	×	×		×			×			×	×		×
پژوهش حاضر	ایران	۱۰ سال	×	×		×	×		×			×		×				×
منظور از تابع هدف زیست‌محیطی اثرات ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای و کربن‌دی‌اکسید می‌باشد.																		

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

همچنین، در مدل‌های زنجیره تأمین زیست‌توده، داشتن مطالعه موردی برای بررسی صحت مدل بسیار حائز اهمیت است. بنابراین، جهت بررسی صحت و کارایی مدل ارائه شده، مدل با استفاده از داده‌های حقیقی برای کشور ایران به عنوان مطالعه موردی توسعه داده شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. توابع هدف درنظرگرفته شده بیشینه‌سازی کل سود حاصل از زنجیره و تولید انرژی و حداقل‌سازی مقدار آب مصرفی است. در واقع، مدل می‌تواند متناسب با شرایط و امکانات بهترین منبع (منابع) تولید انرژی و فرآیند مناسب جهت گرفتن انرژی از آن منبع را انتخاب کرده و با کمترین مقدار هزینه بیشترین مقدار انرژی را تولید کند.

۳- تعریف و مدل ریاضی مساله

از طریق فرآیندهای گوناگون می‌توان زیست‌توده‌های مختلف را به اشکال مختلف انرژی زیستی همچون اتانول، بوتانول، متان، هیدروژن، برق و دیزل زیستی تبدیل کرد (Rao et al., 2010). در ادامه فرآیندهای تولید مورد نیاز متناسب با زیست‌توده‌های موردنظر بیان شده است.

گیاه جاتروفا شبیه به یک درخت یا درختچه است که در مقابل خشکی و آب و هوای بیابانی مقاوم است و در این نوع آب و هوا بار می‌دهد. از میوه این درخت دانه جاتروفا حاصل می‌شود که حاوی مقدار زیادی روغن است (van Eijck et al., 2014). بذرهای جاتروفا حاوی روغن چسبناکی است که برای اهداف سوختی و روشنایی قابل استفاده است. کیفیت روغن جاتروفا برای مصارف سوختی بسیار عالی است. این روغن پس از فرآوری طی فرآیند تبادل استری به بیودیزل تبدیل می‌شود. روش بیان شده در این حوزه، معمول و اقتصادی است که توسط بسیاری از کارخانه‌های بیودیزل استفاده می‌شود (Jongschaap et al., 2007).

ریزجلبک‌ها مقدار زیادی روغن در خود ذخیره می‌کنند که می‌تواند برای تولید بیودیزل استفاده شود (Mata et al., 2010). چرخه متداول تولید سوخت از ریزجلبک‌ها از

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

چندین مرحله تشکیل شده است: ۱-کشت و تکثیر ریزجلبک‌ها ۲- برداشت ۳- خشک کردن زیست‌توده ۴- استخراج روغن از زیست‌توده خشک شده ۵- تبدیل آن به سوخت (Nicolò et al., 2017). ریزجلبک‌ها برای رشد و نمو نیاز به مواد اولیه همچون آب، کربن‌دی اکسید، نور خورشید و مواد مغذی دارند. نیاز ریزجلبک‌ها به این مواد نسبت به سایر زیست‌توده‌ها به مراتب کمتر است.

شبکه زنجیره تأمین

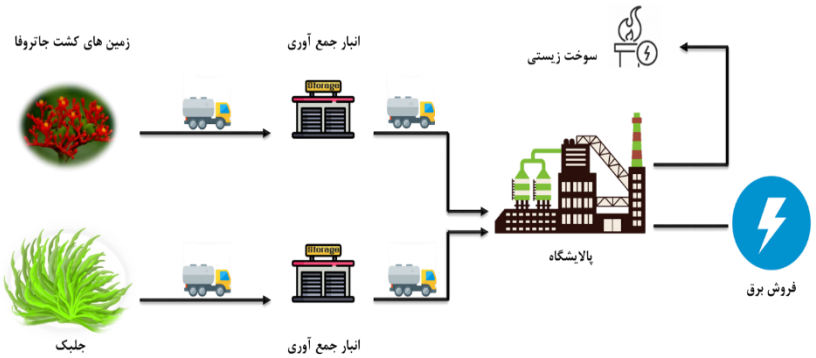
در این مطالعه، یک تحقیق توسعه‌ای- کاربردی با مطالعات کتابخانه‌ای برای حل مسئله دو هدفه MILP ارائه شده است. بدین منظور در ابتدا با مطالعه پژوهش‌های مرتبط ضرورت حل مسئله به تصویر کشیده شد و سپس اهداف و محدودیت‌ها مشخص می‌گردد. در این پژوهش، رویکرد پیشنهادی حل مسئله استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی تحت ترجیحات تصمیم‌گیرنده است که برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی استوار دو هدفه پیشنهاد شده است. تصمیمات استراتژیک و عملیاتی طراحی شبکه زنجیره تأمین تولید انرژی‌های زیستی شکل (۱) را می‌توان بدین صورت بیان کرد: ۱- تعیین مکان بهینه پالایشگاه‌های تبدیلی جاتروفا و جلبک ۲- تعیین مکان بهینه انبارهای نگهداری هر یک از انواع زیست توده ۳- تعیین ظرفیت پالایشگاه‌های هضم بی‌هوازی ۴- تعیین ظرفیت انبارهای ذخیره‌سازی جلبک و جاتروفا ۵- تعیین میزان خوراک‌های خورانده شده به دستگاه در هر بازه زمانی ۶- تعیین میزان بهینه سطح موجودی هر یک از انبارهای ذخیره‌سازی.

همچنین مفروضات درنظرگرفته شده در مدل‌سازی و حل مسئله دو هدفه عبارت‌اند از: ۱- تعیین یازده استان بالقوه برای کشت جاتروفا در ایران بر اساس مطالعه بابازاده و همکاران (Babazadeh et al., 2017b) که با پیاده‌سازی یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها به این نتایج دست یافتند. ۲- تعیین بیست مکان بالقوه کشت جلبک در مطالعه محسنی و همکاران (Mohseni et al.,

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

2016) که با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به این نتایج دست یافتند. ۳- در نظر گرفتن سطح موجودی برای خوراک‌ها در انبارهای قابل احداث در سطح کشور ۴- محاسبه ساعت کاری پالایشگاه به منظور هرچه واقعی‌تر شدن میزان تولید ۵- ایجاد سناریوهای متفاوت آب و هوایی به منظور رخداد اختلال در سطوح مختلف زنجیره.

زنجیره تأمین بیوانرژی از زیست‌توده‌های جاتروفا و جلبک در شکل (۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهد می‌شود زنجیره تأمین مورد بررسی از مرحله تأمین مواد تا مرحله تولید محصولات نهایی را دربرمی‌گیرد. مدل‌سازی و حل مسئله MILP دو هدفه تعریف شده با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی تحت ترجیحات تصمیم‌گیرنده انجام می‌شود که در آن اهداف میزان عواید اقتصادی ناشی از تولید انرژی و میزان مصرف آب به ترتیب بیشینه و کمینه می‌شود. همچنین، این بهینه‌سازی تحت سناریوهای مختلف اختلال ناشی از تغییرات آب و هوایی مورد توجه قرار می‌گیرد. به کارگیری رویکرد پیشنهادی، بهترین موازنه را بین اهداف اقتصادی و مصرف آب تحت آرمان‌های موجود در تاریخچه فرآیندها و نیز تحت ترجیحات تصمیم‌گیرندگان با سلایق مختلف نتیجه می‌دهد. برای اجرای مدل و رویکرد حل پیشنهادی، نرم افزار GAMS بکار گرفته می‌شود که حل بهینه سرتاسری را تضمین می‌کند. در ادامه توضیحات مربوط به نمادهای مدل ریاضی آورده شده است.



شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تأمین

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

نمادهای مورد استفاده

پارامترها، متغیرها و مجموعه‌های مورد استفاده در مدل به شرح زیر ارائه شده است.

مجموعه‌ها:

O مجموعه زمین‌های کشت جاتروفا $(o \in O)$

B مجموعه زمین‌های کشت جلبک $(b \in B)$

S مجموعه مکان‌های کاندید انبار $(s \in S)$

P مجموعه مکان‌های کاندید پالایشگاه $(p \in P)$

C مجموعه سطوح ظرفیت پالایشگاه $(c \in C)$

E مجموعه سطوح ظرفیت انبار $(e \in E)$

W مجموعه انواع محصولات $(w \in W)$

SC مجموعه سناریوهای اختلال $(sc \in SC)$

T مجموعه بازه‌های زمانی $(t \in T)$

پارامترهای فنی:

v_{pc}^{sc} ظرفیت دریافت خوراک در هر دوره در مکان p با سطح ظرفیت c تحت سناریو sc

ec_{pc}^{sc} ظرفیت تولید برق پالایشگاه در مکان p با سطح ظرفیت c تحت سناریو sc

h ساعت کار یک پالایشگاه در هر دوره

e_w نرخ تبدیل محصول w به انرژی

ss_{pt}^{sc} میزان خوراک در مکان p و در زمان t و تحت سناریو sc

ow_{ot}^{sc} میزان جاتروفا موجود زمین کشت در مکان o و در زمان t و تحت سناریو sc

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

γ_o درصد باروری زمین کشت جاتروفا در مکان o

cb_{bt}^{sc} میزان جلبک خام موجود در مکان کشت b در زمان t و تحت سناریو sc

$\tilde{\varphi}_{osc}$ درصد کاهش کشت جاتروفا در زمین o درصورت وقوع سناریو sc

$\tilde{\theta}_{bsc}$ درصد کاهش کشت جلبک در زمین b درصورت وقوع سناریو sc

$\tilde{\varepsilon}_{psc}$ درصد کاهش خوراک موجود در مکان pدرصورت وقوع سناریو sc

CO_{se}^{sc} ظرفیت ذخیره‌سازی جاتروفا در مکان s و با سطح ظرفیت e و تحت سناریو sc

CG_{se}^{sc} ظرفیت ذخیره‌سازی جلبک در مکان s و با سطح ظرفیت e و تحت سناریو sc

π^{sc} احتمال سناریو sc

re_w درصد مصرف آب در محصول w

d_{os} فاصله بین زمین کشت جاتروفا در مکان o و انبار در مکان s

d_{bs} فاصله بین زمین کشت جلبک در مکان b و انبار در مکان S

d_{sp} فاصله بین انبار در مکان s و پالایشگاه در مکان p

پارامترهای اقتصادی:

ep قیمت فروش انرژی الکتریکی

cp هزینه کشت جلبک

tcc هزینه حمل جلبک

tco هزینه حمل جاتروفا

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

po درصد تخصیص‌یافته برای سهم هزینه عملیاتی سالیانه از هزینه‌های سرمایه‌گذاری

cc_{se} هزینه ساخت انبار در مکان s و با سطح ظرفیت e

ic_c هزینه خرید تجهیزات برای پالایشگاه با سطح ظرفیت c

متغیرهای تصمیم:

X_{ost}^{sc} مقدار جاتروفا که از زمین کشت جاتروفا در نقطه o به انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو sc انتقال می‌یابد.

X'^{sc}_{spt} مقدار جاتروفا که از انبار در نقطه s به پالایشگاه در نقطه p در بازه زمانی t تحت سناریو sc انتقال می‌یابد.

Y_{bst}^{sc} مقدار جلبک که از زمین کشت در نقطه b به انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو sc انتقال می‌یابد.

Y'^{sc}_{spt} مقدار جلبک که از انبار در نقطه s به پالایشگاه در نقطه p در بازه زمانی t تحت سناریو sc انتقال می‌یابد.

Z_{pt}^{sc} مقدار خوراکی که در بازه زمانی t به پالایشگاه در نقطه p تحت سناریو sc به فرآیند خورانده می‌شود.

RO_{st}^{sc} مقدار جاتروفا که در انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو sc موجود است.

RC_{st}^{sc} مقدار جلبک که در انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو sc موجود است.

OE_{wpt}^{sc} مقدار سوخت زیستی که در پالایشگاه در مکان p که با محصول w در دوره زمانی t تحت سناریو sc تولید می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

متغیرهای صفر و یک:

β_p اگر پالایشگاه در مکان p از جاتروفا و جلبک استفاده کند برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.

α_{pc} اگر نیروگاه در مکان p با سطح ظرفیت c احداث شود برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.

δ_{se} اگر انبار جلبک در مکان s با سطح ظرفیت e احداث شود برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.

δ'_{se} اگر انبار جاتروفا در مکان s با سطح ظرفیت e احداث شود برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.

توابع هدف

تابع هدف اول: بیشینه‌سازی سود کل

- درآمد کل: در این مقاله تنها درآمد، درآمد فروش سوخت زیستی است.

$$\text{درآمد کل} = \left(\sum_{p,w,t,sc} ep.\pi^{sc}.OE^{sc}_{wpt}\right) \quad (۱)$$

- هزینه کل: هزینه کل شامل هزینه خرید و راه‌اندازی تجهیزات پالایشگاه، هزینه ساخت انبار، هزینه عملیاتی، هزینه حمل و نقل مواد از زمین‌های کشت به انبار و از انبار به پالایشگاه‌ها و هزینه خرید است. هزینه عملیاتی بصورت درصدی از هزینه سرمایه‌گذاری (IVC) پالایشگاه و انبار درنظرگرفته شده است.

$$\begin{aligned}\text{هزینه کل} = &\left(\sum_{p,c} \mathrm{ic}_c.\alpha_{pc}\right)+\left(\sum_{s,e} cc_{se}.(\delta_{se}+\delta'_{se})\right)+(po.IVC)+\left(\sum_{o,s,t,sc}\pi^{sc}.tco.d_{os}.X^{sc}_{ost}\right)\\ &+\left(\sum_{\mathrm{b},s,t,sc}\pi^{sc}.tcc.d_{bs}.\mathrm{Y}^{sc}_{bst}\right)+\left(\sum_{s,\mathrm{p},t,sc}\pi^{sc}.tco.d_{sp}.X'^{sc}_{spt}\right)+\left(\sum_{s,\mathrm{p},t,sc}\pi^{sc}.tcc.d_{sp}.\mathrm{Y}'^{sc}_{spt}\right)+\left(\sum_{\mathrm{b},s,t,sc}\pi^{sc}.cp.\mathrm{Y}^{sc}_{bst}\right)\end{aligned} \quad (۲)$$

لذا، تابع هدف بیشینه‌سازی سود کل طبق رابطه (هزینه − درآمد $= Max\ z_1$) حاصل می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

تابع هدف دوم، کمینه‌سازی مصرف آب ناشی از کشت: مصرف آب، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش در زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی است. مصرف آب مورد نیاز کشت یک خوراک، عبارت است از میزان آب مورد نیاز برای کشت هر تن خوراک در زمین. هر چه مقدار مصرف آب بیشتر باشد توجیه‌پذیری زنجیره پایین‌تر آمده و هدف اصلی آن که کمک به منابع زیرزمینی به منظور تولید انرژی از زیست‌توده است روند کاهشی خواهد داشت. از نکات مثبت فرآیند هضم بی‌هوازی و تبادل استری کاهش وابستگی به خوراک تر می‌باشد، در اینجا هدف کمینه‌سازی مصرف آب است.

$$Min\ z_2 = \sum_{s,p,t,sc} re_{w=1}.\pi^{sc}.X'^{sc}_{spt} + \sum_{s,p,t,sc} re_{w=2}.\pi^{sc}.Y'^{sc}_{spt} \qquad (۳)$$

محدودیت‌ها

محدودیت‌های تأمین زیست‌توده: محدودیت‌های (۶) - (۴) تضمین می‌کنند که در هر بازه زمانی میزان مواد اولیه جمع‌آوری شده از هر منطقه تأمین بیشتر از کل مقدار موجود در آن منطقه نیست.

$$\sum_{s} X^{sc}_{ost} \le ow^{sc}_{ot}.(1-\beta_p).\gamma_o.(1-\tilde{\varphi}_{osc}) \qquad \forall o,p,t,sc \qquad (۴)$$

$$\sum_{s} Y^{sc}_{bst} \le cb^{sc}_{bt}.\beta_p.(1-\tilde{\theta}_{bsc}) \qquad \forall b,p,t,sc \qquad (۵)$$

$$Z^{sc}_{pt} \le ss^{sc}_{pt}.(1-\tilde{\varepsilon}_{psc}) \qquad \forall p,t,sc \qquad (۶)$$

محدودیت‌های جریان: محدودیت (۷) برای انبار جاتروفا و محدودیت (۸) برای انبار جلبک است. همان‌طور که نشان‌داده شده است برای انبارها امکان ذخیره‌سازی و انتقال به دوره بعد وجود دارد.

$$\sum_{o} X^{sc}_{ost} + RO^{sc}_{s(t-1)} = \sum_{p} X'^{sc}_{spt} + RO^{sc}_{st} \qquad \forall s,t,sc \qquad (۷)$$

$$\sum_{b} Y^{sc}_{bst} + RC^{sc}_{s(t-1)} = \sum_{p} Y'^{sc}_{spt} + RC^{sc}_{st} \qquad \forall s,t,sc \qquad (۸)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

محدودیت‌های ظرفیت: محدودیت‌های (۹) و (۱۰) میزان ظرفیت ذخیره‌سازی را محاسبه می‌کنند.

$$\sum_{b} Y_{bst}^{sc} + RC_{s(t-1)}^{sc} \le \sum_{e} CG_{se}^{sc}.\delta_{se} \qquad \forall s,t,sc \qquad (۹)$$

$$\sum_{o} X_{ost}^{sc} + RO_{s(t-1)}^{sc} \le \sum_{e} CO_{se}^{sc}.\delta'_{se} \qquad \forall s,t,sc \qquad (۱۰)$$

محدودیت مواد ورودی به هاضم: محدودیت (۱۱) نسبت ترکیب مواد را در هاضم نشان می‌دهد.

$$Z_{pt}^{sc} = (\sum_{s} Y'^{sc}_{spt}) + (\sum_{s} X'^{sc}_{spt}) \qquad \forall p,t,sc \qquad (۱۱)$$

محدودیت (۱۲) بیان می‌کند کل خوراک‌هایی که در هر بازه زمانی به سمت نیروگاه‌ها در مکان p خورانده می‌شود از میزان بیشینه ظرفیت آن مکان برای بارگیری کمتر است.

$$Z_{pt}^{sc} + (\sum_{s} Y'^{sc}_{spt}) + (\sum_{s} X'^{sc}_{spt}) \le \sum_{c} v_{pc}^{sc}.\alpha_{pc} \qquad \forall p,t,sc \qquad (۱۲)$$

محدودیت‌های تولید: محدودیت (۱۳) در مورد میزان تولید سوخت زیستی است. محدودیت(۱۴) تضمین می‌کند کل سوخت زیستی تولیدی در پالایشگاه در مکان p و در هر بازه زمانی نباید بیش از حدود ظرفیت تولید سوخت زیستی در آن بازه زمانی در پالایشگاه باشد.

$$e_{w=۲}.((\sum_{s} \beta_p.Z_{pt}^{sc}) + (\sum_{s} Y'^{sc}_{spt})) + e_{w=۱}.((\sum_{p,t} (۱-\beta_p).Z_{pt}^{sc}) + (\sum_{s} X'^{sc}_{spt})) = \sum_{w} OE_{wpt}^{sc} \qquad \forall p,t,sc \qquad (۱۳)$$

$$OE_{pt}^{sc} \le h.(\sum_{c} ec_{pc}^{sc}) \qquad \forall p,t,sc \qquad (۱۴)$$

محدودیت‌های تعداد انبار و پالایشگاه: محدودیت (۱۵) نشان‌دهنده این است که در هر مکان p حداکثر یک پالایشگاه باید احداث شود. محدودیت (۱۶) بیان می‌کند در هر مکان s حداکثر یک انبار قابل احداث است.

$$\sum_{c} \alpha_{pc} \le ۱ \qquad \forall p \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

$$\sum_{e} \delta_{se} + \sum_{e} \delta'_{se} \leq ۱ \qquad \forall s \qquad (۱۶)$$

استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای حل مدل دوهدفه

مدل پیشنهادی بیان شده به صورت دوهدفه است. از آنجا که جواب بهینه شدنی توابع هدف مختلف با یکدیگر همراستا نبوده و در مواردی با یکدیگر در تعارض هستند، در چنین شرایطی نمی‌توان همه اهداف را به صورت همزمان بهینه کرد. لذا برای رضایت‌بخشی بین فضای چندبعدی متغیرهای تصمیم و توابع هدف با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی مساله به صورت تک‌هدفه بازنویسی خواهد شد. برنامه‌ریزی آرمانی یک الگوی تصمیم‌گیری چند معیاری درحوزه جبرخطی است. این الگو به طور همزمان چند هدف را دربرمی‌گیرد و بر اساس حداقل‌کردن انحراف از اهداف تنظیم می‌شود. هنر اصلی برنامه‌ریزی آرمانی درنظرگرفتن محدودیت‌ها و آرمان‌ها همراه با متغیرهای تصمیم و همچنین از بین بردن و کم‌رنگ نمودن استدلال ضعیف انسانی در هنگام برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری است. این هنر در شرایطی که به دنبال بهینه‌سازی چند عامل به صورت همزمان باشد جلوه ویژه‌ای پیدا می‌کند (charnes, cooper, fergusen, 1955). از سوی دیگر، بسیاری از اطلاعات که از محیط دریافت می‌شود نوعی از نادقیقی و ابهام را در درون خود دارد. در قالب برنامه‌ریزی فازی، پارامترهای مدل از قبیل ضرایب متغیرهای تصمیم، میزان آرمان، اولویت‌ها و اوزان را می‌توان نادقیق انگاشت. آرمانی که میزان آن نادقیق بیان شده باشد، "آرمان فازی" اطلاق می‌شود (Hannan, 1981). به عبارت دیگر، برخلاف مدل‌های برنامه‌ریزی آرمانی، این روش به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد که درجه دسترسی و اهمیت هر آرمان را در مدل مشخص کند. در واقع برنامه‌ریزی آرمانی فازی خود به خود مشکل انتخاب سطوح آرمان در برنامه‌ریزی آرمانی را هموار می‌سازد چرا که در این روش معمولا هیچگونه انتخاب اولیه‌ای توسط تصمیم گیرنده انجام نمی‌شود و تنها خود تابع هدف به کمک مقدار ماکزیمم و مینیمم خود، تابع عضویت خود را می‌سازد. همچنین این روش قادر است مجموعه‌ای از درجات عضویت سازگار

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

با انتظارات تصمیم‌گیرندگان را به وجود آورد. بنابراین، آرمان‌ها یا اهداف نادقیق، استفاده از برنامه‌ریزی فازی را ایجاب می‌کند. برنامه‌ریزی آرمانی فازی، موضوع مجموعه تحقیقاتی است که از اوایل دهه ۱۹۸۰ شروع شده و روشهای متعددی پیشنهاد گردیده است. از نظر ریاضی، برنامه‌ریزی آرمانی فازی با m آرمان فازی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} &find\ x \\ &to\ satisfy\ f_i(x) \tilde{\geq} b_i \qquad i = ۱,\cdots,m \\ &x \geq ۰ \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

علامت ~ نشان‌دهنده فازی بودن مقدار آرمان‌ها و علامت برای (<، > و یا =) بکار رفته است. به عنوان مثال، $f_۱(x) \tilde{\geq} b_۱$ را می‌توان به دستیابی تابع $f_۱(x)$ به میزان "تا حدودی بیشتر" از $b_۱$ اطلاق کرد. در مسایل برنامه‌ریزی ریاضی فازی، با طراحی توابع عضویت مناسب و انتخاب یک عملگر سازگار برای یکنوا کردن تابع عضویت، مساله را به مدل برنامه‌ریزی ریاضی قطعی تبدیل کرده تا بتوان آن را با روش‌های کلاسیک (برنامه‌ریزی ریاضی خطی) حل نمود.

به منظور شروع برنامه‌ریزی، ابتدا به نوشتن تابع عضویت خطی μ_i برای iامین آرمان فازی یا iامین تابع هدف پرداخته خواهد شد. برای ایجاد تابع عضویت، توجه به اینکه آرمان یا هدف مورد نظر از نوع بیشینه‌سازی و یا کمینه‌سازی است ضروری است؛ زیرا، برای آرمان‌هایی از قبیل سود، دسترسی به سطوح بالاتر از آن برای تصمیم‌گیرندگان مطلوب است و برای آرمان‌هایی مانند آب مصرفی، دسترسی به سطوح پایین‌تر از آن مورد نظر مدیران است. اما نکته مهم‌تر سطوح آرمانی است که باید توسط تصمیم‌گیرندگان مشخص شود و معمولا چندان دقیق نیست و در یک محدوده یا بازه تغییر می‌کند. وارد کردن اطلاعات به صورت نقطه‌ای یا قطعی در مدل، ممکن است فرصت‌هایی را در نتایج (تصمیم نهایی) از بین ببرد، ولی چنانچه بتوان به طریقی اطلاعات را به همان صورت نادقیق که در دنیای واقعی است، وارد مدل کرد و قادر به حل مدل شد آنگاه می توان خطای اطلاعات را تا حد ممکن در تصمیم‌گیری کاهش داد. در ادامه ساختار دو نوع

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

آرمان قابل تغییر در یک محدوده مثلثی شکل و چگونگی تبدیل آنها به یک آرمان قطعی به روشنی بیان شده است.

برای اهداف بیشینه‌سازی:

$$\mu = \begin{cases} ۱ & if \quad G_i(x) \geq g_i \\ \dfrac{Z_i(x) - L_i}{g_i - L_i} & if \quad L_i \leq G_i(x) \leq g_i \\ ۰ & if \quad G_i(x) \leq L_i \end{cases} \qquad (۱۸)$$

برای اهداف کمینه‌سازی:

$$\mu = \begin{cases} ۱ & if \quad G_i(x) \leq g_i \\ \dfrac{U_i - Z_i(x)}{U_i - g_i} & if \quad g_i \leq G_i(x) \leq U_i \\ ۰ & if \quad G_i(x) \geq U_i \end{cases} \qquad (۱۹)$$

L_i و U_i به ترتیب حد پایین و بالای هر یک از اهداف می‌باشد. به عبارتی $U_i - L_i$ بازه تحمل هدف iام و g_i سطح آرزوی مطلوب برای دسترسی (آرمان) iامین هدف است. در ادامه به منظور بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آرمانی فازی از مدل موزون ناراسیمهان (Narasimhan, 1980) و همچنین تیواری (Tiwari et al., 1980) استفاده شده است.

$$\max imize\ V(\mu) = w_۱ \mu_۱ + w_۲ \mu_۲ \qquad (۲۰)$$

$$subject\ to:$$

$$\mu_۱ = \frac{Z_۱(x) - L_۱}{g_۱ - L_۱}$$

$$\mu_۲ = \frac{U_۲ - Z_۲(x)}{U_۲ - g_۲}$$

$$Ax \leq b$$

$$\mu_i \leq ۱$$

$$x, \mu_i \geq ۰, \quad i = ۱,۲$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

که آن $V(\mu)$ برداری است از توابع خطی با درجه عضویت موزون (w_i) بر اساس دو آرمان، X بردار متغیرهای تصمیم‌گیری، μ_i درجه عضویت دسترسی به آرمان iام و $Ax \leq b$ بردار محدودیت‌های سیستمی است.

٤- مطالعه موردی

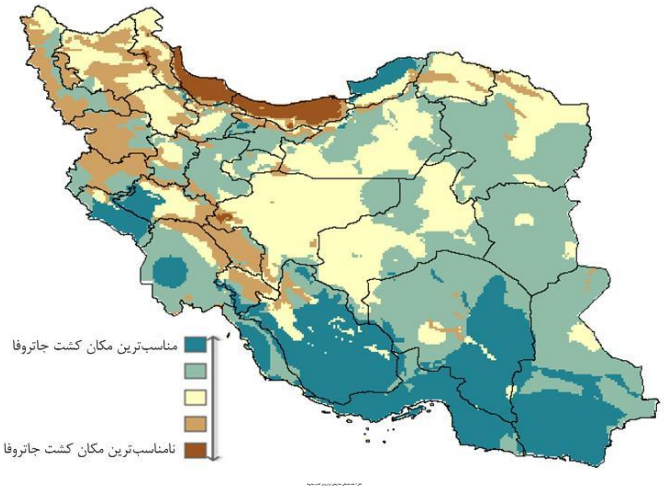
مکان‌های کاندید جهت احداث تسهیلات

بابازاده و همکاران (Babazadeh et al., 2017b) با استفاده از روش تحلیل پوششی داده یکپارچه (UDEA)[1] و درنظرگرفتن فاکتورهای غیرجبرانی و جبرانی جهت کشت جاتروفا، ۱۱ استان ایران که بیشترین پتانسیل کاشت جاتروفا را دارند تعیین کردند. فاکتورهای غیرجبرانی شامل شرایط غرقابی، PH پایین خاک و شرایط هوای سرد طولانی و فاکتورهای جبرانی شامل شاخص توسعه انسانی، بارندگی سالانه، متوسط سالانه دمای میانگین روزانه، مقدار منابع آب در دسترس، وسعت مناطق خشک و نیمه‌خشک، مساحت باغ‌های کشت شده و جمعیت هر استان می‌باشد. یازده استان ذکر شده به عنوان نقاط کاندید کشت جاتروفا و احداث تسهیلات مربوط به آن در این مقاله درنظرگرفته شده است. بنابراین، یازده استان به دست آمده به عنوان مکان‌های بالقوه جهت کاشت جاتروفا و به تبع آن همین یازده استان به عنوان مکان‌های کاندید جهت احداث انبارهای جاتروفا و سایت‌های تولید بیودیزل درنظرگرفته شده‌اند (محسنی و همکاران، ۲۰۱۶). طبق شکل (۲) یازده استان البرز، ایلام، بوشهر، خوزستان، سیستان و بلوچستان، فارس، کرمان، کهکیلویه و بویراحمد، گلستان، لرستان و هرمزگان به عنوان استان‌های کاندید جهت کاشت جاتروفا و انبارهای آن در نظرگرفته شده‌اند. محسنی و همکاران (Mohseni et al., 2016) با استفاده از سیستم اطلاعات

1 Unified Data Envelopment Analysis

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جغرافیایی (GIS) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[1] فاکتورهای کاربری اراضی زمین، نزدیکی به منابع، راه‌های ارتباطی و شرایط اقلیمی مکان‌های مناسب ایران را جهت پروش ریزجلبک‌ها ارائه کردند. با توجه به نظر خبرگان و پژوهش‌های صورت گرفته در کشور، ۲۰ استان جهت احداث سایت‌های پرورش جلبک و تولید بیودیزل از آن درنظرگرفته شده است. در شکل(۳) استان‌های مناسب پرورش ریزجلبک و جاتروفا نمایش داده شده است. لازم به ذکر است افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده ده دوره (سال) می‌باشد.



1 Analytical Hierarchy process

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]



شکل ۳. استان‌های مناسب پرورش ریزجلبک و جاتروفا

پارامترهای مربوط به شرایط تولید

برخی پارامترهای فنی در جدول (۲) بیان شده‌اند. برای نیروگاه‌های تولید بیودیزل از جاتروفا و جلبک سه سطح ظرفیت، برای انبارهای ذخیره‌سازی چهار سطح ظرفیت درنظرگرفته شده است.

جدول ۲. پارامترهای تولید

پارامترهای مربوط به تهیه انرژی از جاتروفا (Babazadeh et al., 2017b)		پارامترهای مربوط به تهیه انرژی از ریزجلبک (Mohseni & Pishvaee, 2016)	
نرخ بازدهی زمین برای کشت جاتروفا	۷ ton/Ha	آب موردنیاز به ازای هر واحد ریزجلبک	۱۵۰
نرخ تبدیل جاتروفا به روغن جاتروفا	۰/۳۵	نرخ تبدیل جلبک به روغن	۰/۲۵
نرخ تبدیل روغن جاتروفا به بیودیزل	۰/۹۳	نرخ تبدیل روغن به بیودیزل	۰/۹۸
آب موردنیاز به ازای هر واحد جاتروفا	۲۰		

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

اختلال در تأمین

در مقاله حاضر سه حالت خشکسالی خفیف/ متوسط/ شدید برای مناطق کشور درنظرگرفته شده است. به همین صورت سه سناریو اختلال خفیف/ متوسط/ شدید برای تأمین هر یک از مواد موردنیاز درنظرگرفته شده است. لازم به ذکر است که تأمین هر دو ماده تحت تاثیر اختلال قرار می‌گیرد. چرا که جاتروفا عموما از کشت دانه‌های روغنی تهیه می‌شود، جلبک نیز با وقوع خشکسالی فرآیند کشت آن دچار مشکل می‌شود. همچنین، به دنبال خشکسالی میزان کشت جاتروفا و جلبک کاهش یافته و بدین ترتیب سطح فعالیت کارخانه‌ها و میزان سوخت زیستی تولیدی نیز تنزل می‌یابد. بدیهی است که احتمال وقوع هر سناریو متفاوت است و لذا احتمال وقوع هر سناریو به شکل π^{sc} تعریف شده است. اختلال در تأمین مواد با سه پارامتر فازی $\tilde{\varphi}_{osc}$, $\tilde{\varepsilon}_{psc}$, $\tilde{\theta}_{bsc}$ نشان داده شده است که در واقع نشان‌دهنده درصد کاهش مواد به دنبال وقوع هر یک از سناریوها است. همچنین درصد اطمینان هر سه محدودیت تأمین ٪۸۰ درنظرگرفته شده است.

۵- نتایج مطالعه موردی

حل مدل با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی

همانطور که بیان شد، مهمترین محدودیت برنامه‌ریزی آرمانی، غیردقیق بودن آرمان‌ها یا اهداف آن است. بنابراین، مدل دو هدفه ارائه شده با روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی حل و با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS اجرا شده است که اهداف فازی را در سطحی غیردقیق مورد بررسی قرار می‌دهد. لذا، این مطالعه به طور همزمان به بهترین و بدترین مقدار هر هدف و سطح آرزوی مطلوب برای دسترسی به هر یک از اهداف توجه می‌کند. این روند کمک به هرچه کاربردی‌تر شدن مدل چند هدفه خواهد کرد. بنابراین، ابتدا مدل به صورت تک‌هدفه با تابع هدف سود حل می‌گردد. بهترین و بدترین مقادیر برای تابع هدف سود به ترتیب ۷۶۲/۹۲۸/۳۸۸ و ۰ حاصل شده است. سپس، برای تابع هدف دوم نیز این روند انجام و به ترتیب بهترین و بدترین جواب ۱۶۲/۲۲۹ و ۶۳۰/ ۷/۹۰۱ حاصل شده است. در

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

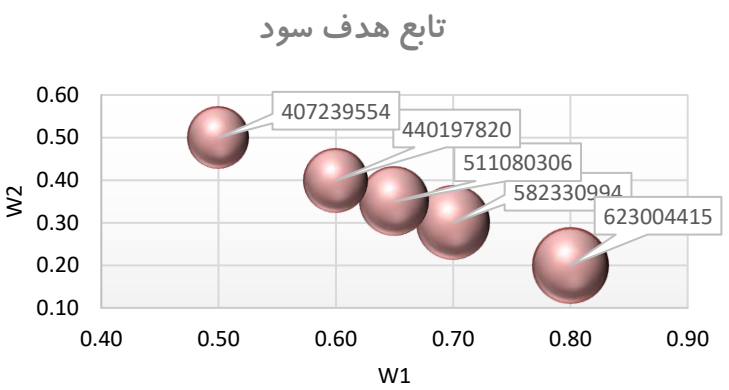
ادامه برای تعیین سطح آرزوی مطلوب برای دسترسی به هر یک از اهداف به منظور فازی‌سازی از دو منبع نظرات خبرگان صنعت بالخصوص انرژی‌های تجدیدپذیر و طرح‌های مشابه پیاده‌سازی شده استفاده شده است. بر این اساس برای هدف میزان سود ۳۰۰/۰۰۰ /۰۰۰ و هدف میزان مصرف آب ۳/۵۰۰ /۰۰۰ به عنوان سطح مطلوبیت تعیین شده است.

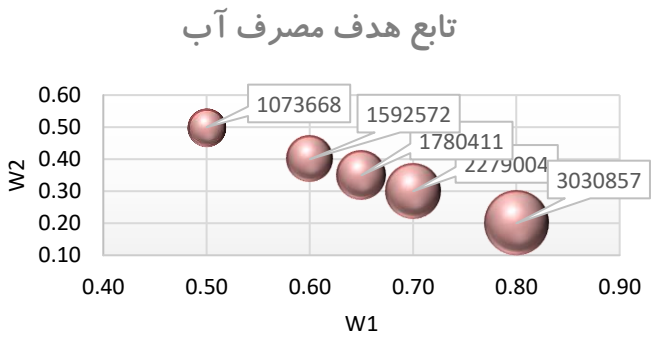
از برتری‌های استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی، نرمال‌سازی اهداف با مقیاس‌های متفاوت است. همان‌طور که در بخش ۳-۳ توضیح داده شده است با استفاده از آرمان‌های هر یک از اهداف، تابع عضویت هر یک نوشته خواهد شد. مزیت اصلی این توابع بی‌مقیاس بودن آن‌ها و بی‌واحد بودن آنهاست. بدین صورت که با توجه به مقادیر بدست آمده، توابع عضویت هر یک از اهداف نوشته می‌شود؛ سپس، با تشکیل تابع هدف ترکیب‌شده‌ی موزون به بهینه‌سازی مساله پرداخته می‌شود. در جدول (۳) در ازای وزن‌های مختلف مقادیر بهینه هر یک از اهداف آورده شده است و در شکل (۴) نیز میزان تابع هدف اول و هدف دوم به صورت دایره‌های توپور در نمودار با ارائه اعداد داخل آن نمایش داده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۳. نتایج حل مدل با اوزان مختلف

w_1	w_2	$\mathbf{V(\mu)}$	z_1 (تابع هدف سود)	z_2 (تابع هدف مصرف آب)
۰/۷	۰/۳	۰/۶۰۲	۵۸۲/۳۳۰ /۹۹۴	۲/۲۷۹ /۰۰۴
۰/۸	۰/۲	۰/۶۱۴	۶۲۳/۰۰۴ /۴۱۵	۳/۰۳۰ /۸۵۷
۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۵۷۸	۵۱۱/۰۸۰ /۳۰۶	۱/۷۸۰ /۴۱۱
۰/۶	۰/۴	۰/۵۴۹	۴۴۰/۱۹۷ /۸۲۰	۱/۵۹۲ /۵۷۲
۰/۵	۰/۵	۰/۴۹۱	۴۰۷/۲۳۹ /۵۵۴	۱/۰۷۳ /۶۶۸



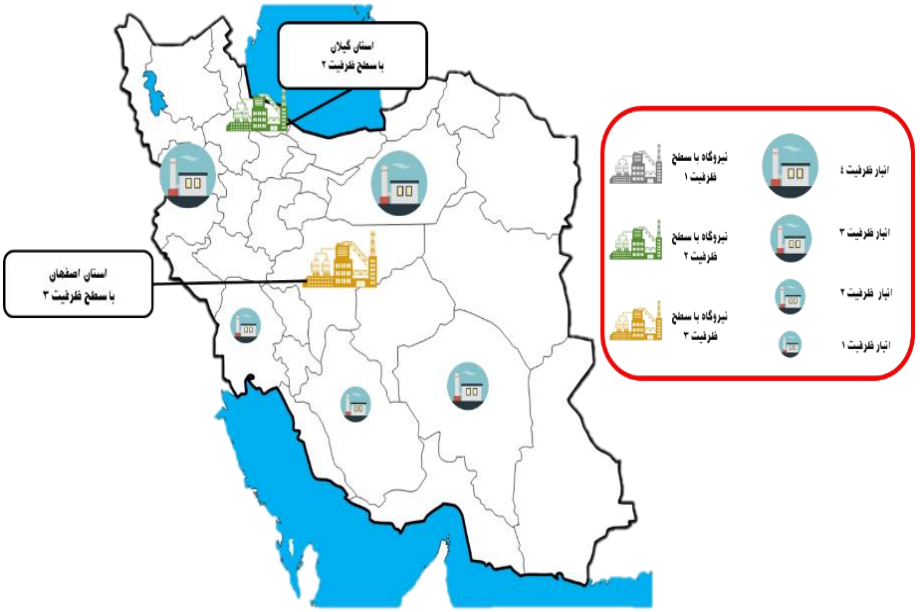


شکل ۴. نتایج حل مدل دو هدفه برنامه‌ریزی آرمانی فازی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

آنچه برای تصمیم‌گیرندگان به عنوان یک مهم تلقی می‌شود تعادل میان اهداف در مسائل چندهدفه است. میزان مصرف آب در جوامع امروزی امری ضروری محسوب می‌شود؛ از این رو، تابع هدف مصرف آب کم اهمیت نیست؛ همان‌طور که در کلیه مسائل زنجیره تأمین مسائل اقتصادی همواره امری مهم به شمار می‌رود. در زنجیره تأمین مذکور با مشاوره خبرگان حوزه انرژی ترکیب وزنی نقطه متناظر با $w_1 = ۰.۶$ و $w_2 = ۰.۴$ نقطه مرجح برای تصمیم‌گیران انتخاب شده است و در ادامه نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر درجه عضویت بهینه هر یک از اهداف به ترتیب در شکل (۴) نشان داده شده است در این نقطه مقدار متناظر با درجه عضویت سود برابر ۴۴۰/۱۹۷/۸۲۰ هزار تومان و کل آب مصرفی برابر ۱/۵۹۲/۵۷۲ لیتر می‌باشد. در شکل (۵) مشخص شده است که در هر مکان چه نوع سایت تولیدی و با چه ظرفیتی باید احداث شود. بدین صورت که در استان گیلان مدل به احداث پالایشگاه با متوسط ظرفیت و در استان اصفهان به احداث با حداکثر ظرفیت بسنده کرده است. در ادامه این نتایج برای توزیع بهتر به احداث پنج انبار با ظرفیت های دو، سه و چهار در خوزستان، فارس، سمنان و کردستان اقدام کرده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]



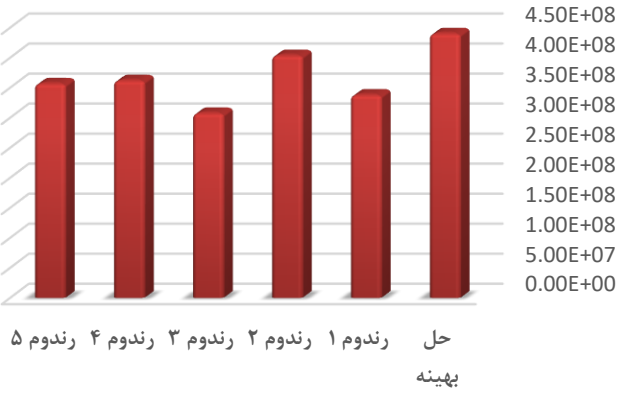
شکل ۵. ساختار پیاده‌سازی مدل حل‌شده در مطالعه موردی

به منظور بررسی کارایی مدل ارائه شده، مدل ریاضی یک مرتبه با ۷ استان دیگر (به غیر از استان‌های انتخابی احداث به دست آمده از مدل در شکل ۵) که به‌طور تصادفی[1] انتخاب شده‌اند حل شده و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج قبلی مقایسه شده است.

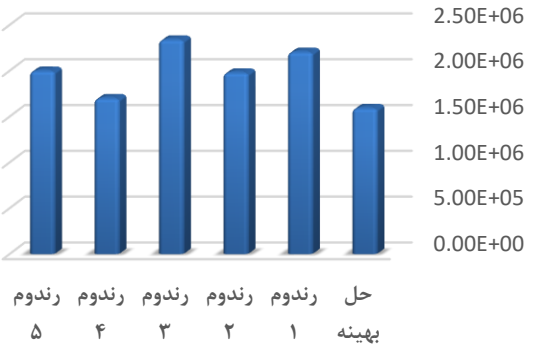
طبق نتایج به دست آمده، دو تابع هدف، یعنی درآمد حاصل از استحصال انرژی و مصرف آب، مقادیر بدتری کسب کرده‌اند. در ضمن از آنجایی‌که این استان‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند ممکن است اصلاً شرایط مناسب جهت احداث انبارها و پالایشگاه‌ها را نداشته باشند. شکل (۶) میزان تفاوت عملکردی این دو وضعیت را نشان می‌دهد.

1 Random

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]



شکل ۶ الف- مقایسه عملکردی جواب بهینه در تابع هدف سود



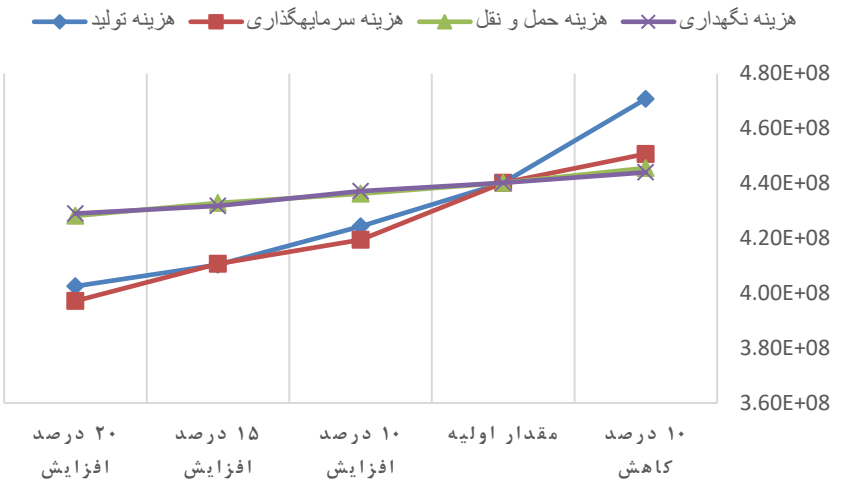
شکل ۶ ب- مقایسه عملکردی جواب بهینه در تابع هدف مصرف آب

آنالیز حساسیت مدل

در این بخش به بررسی تاثیر تغییر پارامترهای مدل بر روی نتایج می‌پردازیم. به منظور بررسی اثر پارامترهای هزینه‌ای بر روی سود کل زنجیره، پارامترهای مربوط به هر دسته از هزینه‌ها با کاهش ۱۰ درصدی و افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی محاسبه شده و مدل به ازای هریک حل شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

افزایش در پارامترهای هر دسته از هزینه‌ها موجب کاهش در سود کل زنجیره شده که امری طبیعی است و نشان‌دهنده عملکرد درست مدل است. هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری به ترتیب بیشترین اثر بر روی سود کل زنجیره را دارند. برای مثال با افزایش ۱۰ درصدی هر یک سود کل به ترتیب ۳.۶٪ و ۴.۰۷ ٪ کاهش داشته است (شکل ۷).



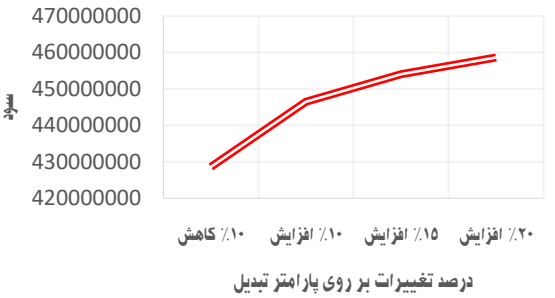
شکل ۷- تغییرات تابع هدف سود در ازای تغییرات کلیه هزینه های قسمت مربوطه

در ادامه به بررسی تاثیر تغییرات سایر پارامترها بر روی توابع هدف پرداخته‌ایم. شکل (الف-۸) میزان افزایش در سود کل را با افزایش نرخ تبدیل زیست‌توده به انرژی نشان می‌دهد که تا ۱۰٪ باعث افزایش شده و پس از آن روند ثابتی پیدا می‌کند. تغییر در ظرفیت منابع موجب تغییر هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری اولیه می‌شود. با فرض عدم تغییر در هزینه‌های سرمایه‌ای اگر ظرفیت منابع شامل زمین‌های تحت کشت را افزایش دهیم تغییرات در میزان سوددهی (در سطح ثابتی از هزینه) به صورت شکل (ب-۸) خواهد بود. برای تولید مقدار مشخصی سوخت زیستی، اثر تغییر در ظرفیت تسهیلات بر میزان آب مصرفی مورد بررسی قرار داده شده است. طبق نتایج افزایش ظرفیت تسهیلات موجب افزایش در آب مصرفی شده است (ج-۸). همچنین در یک سطح هزینه

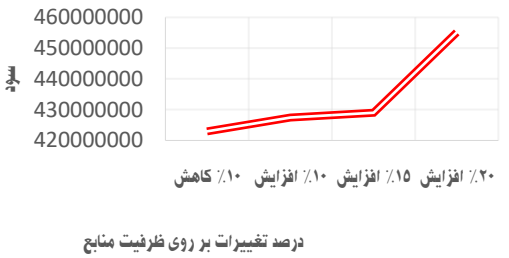
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ثابت (۵۷/۷۵۲/۰۰۰)، اثر تغییر در پارامتر تبدیل بر آب مصرفی مورد بررسی قرار داده شد. طبق نتایج افزایش نرخ تبدیل تا ٪۲۰ موجب کاهش در مصرف آب شده ولی از آن نقطه به بعد تاثیری نداشته است (د-۸).

(الف)

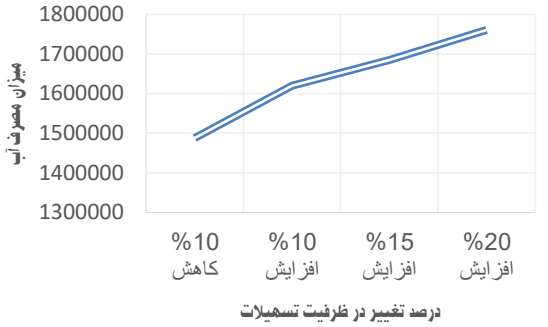


(ب)

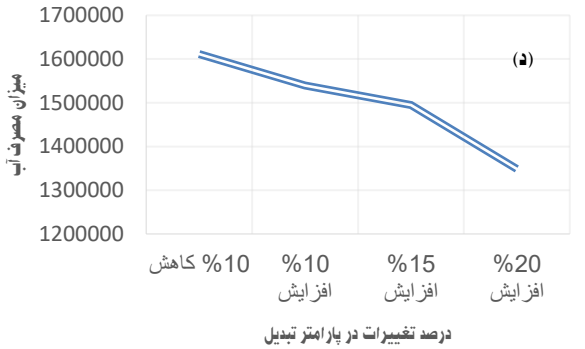


(ج)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]



(د)



شکل ۸. تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر روی توابع هدف

٦- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از مقاله حاضر، ارائه یک مدل MILP دوهدفه جهت طراحی زنجیره تأمین تبدیل زیست‌توده به بیوانرژی بوده است. با توجه به محدودیت منابع فسیلی و اثرات مخرب آن‌ها بر محیط زیست، تولید انرژی از انواع مختلف زیست‌توده می‌تواند جایگزین مناسب و کاربردی باشد. به دلیل شرایط متفاوت آب و هوایی و اقلیمی، جغرافیایی، امکانات و غیره در مناطق مختلف ممکن است استفاده از تنها یک نوع زیست‌توده به عنوان منبع تولید انرژی در زنجیره امکان‌پذیر نبوده و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

یا پاسخگوی تقاضای موجود نباشد. در واقع، استفاده از انواع مختلف زیست‌توده می‌تواند با افزایش انعطاف‌پذیری مدل این اجازه را به مدل بدهد که به فراخور شرایط زیست‌توده و فرآیند مناسب تولید انرژی از آن را انتخاب کند و به این ترتیب وابستگی به منابع فسیلی را تا حد امکان کاهش دهد.

مدل زنجیره تأمین ارائه شده در این مقاله با درنظرگرفتن دو تابع هدف، بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی مقدار آب مصرفی به تولید انرژی زیستی از دو نوع زیست‌توده جاتروفا و جلبک با استفاده از فرآیندهای هضم بی‌هوازی و تبادل استری می‌پردازد. جهت بررسی صحت و اعتبار، مدل با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی با داده‌های حقیقی برای استان‌های کشور ایران حل شده و نتایج بر طبق مقادیر مختلف اهمیت اهداف ارائه و تحلیل شده است.

به منظور تحقیقات آینده می‌توان بحث عدم قطعیت در پارامترهایی همچون هزینه‌های خرید زیست‌توده، نرخ تبدیل زیست‌توده به انرژی و غیره را درنظرگرفته و با روش‌های برخورد با عدم قطعیت مساله را مدل‌سازی کرد. مورد قابل توجه دیگر، استفاده مجدد از محصولات تولیدی جانبی فرآیندها در زنجیره جهت تولید انرژی و یا فروش آنهاست که می‌تواند به کاهش هزینه‌ها کمک کند. همچنین، درنظرگرفتن توابع هدف زیست‌محیطی و اجتماعی جهت ارائه یک مدل زنجیره تأمین پایدار می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

منابع

امین صالحی، فرناز.، نوروز، عارف.، کامبیز رضاپور. ۱۳۹۷. اولویت بندی فناوری‌های تبدیل پسماند شهری به سوخت‌زیستی در ایران. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. دوره ۴، شماره ۱۳ :۱۲۳-۱۵۹.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

تیموری حمزه کلایی، فاطمه.، امجدی، نیما.، و مصطفی جزایری. ۱۳۹۷. تحلیل مالی استفاده از یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت بیوگازسوز در یک دامداری نمونه در ایران. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. دوره ۴، شماره۱۲ :۱۴۷- ۱۸۰

محسنی، شایان.، پیشوایی، میرسامان. ۱۳۹۷. طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین تولید سوخت سبز از پسماندهای فاضلاب شهری در کشور با استفاده از یک روش فرا ابتکاری ترکیبی. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۴، شماره ۱۲: ۱۴۵-۱۱۳.

Ahn, Y.-C., Lee, I.-B., Lee, K.-H., & Han, J.-H. (2015). Strategic planning design of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain network: Multi-period deterministic model. *Applied Energy, 154*, 528-542

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., Razmi, J., Pishvaee, M. S., & Rabbani, M. (2017 a). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega, 66*, 258-277

Babazadeh, R., Razmi, J., Rabbani, M., & Pishvaee, M. S. (2017b). An integrated data envelopment analysis–mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production, 147*, 694-707

Balaman, Ş. Y. (2016). Investment planning and strategic management of sustainable systems for clean power generation: An ε-constraint based multi objective modelling approach. *Journal of Cleaner Production, 137*, 1179-1190

Balaman, Ş. Y., & Selim, H. (2014a). A fuzzy multiobjective linear programming model for design and management of anaerobic digestion based bioenergy supply chains. *Energy, 74*, 928-940

Balaman, Ş. Y., & Selim, H. (2014b). A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems. *Applied Energy, 130*, 289-304

Balaman, Ş. Y., & Selim, H. (2016). Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating systems: A fuzzy optimization approach. *Journal of Cleaner Production, 133*, 863-885

Banerjee, S., Mudliar, S., Sen, R., Giri, B., Satpute, D., Chakrabarti, T., & Pandey, R. (2010). Commercializing lignocellulosic bioethanol: technology bottlenecks and possible remedies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 4*(1), 77-93

Cambero, C., & Sowlati, T. (2016). Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains. *Applied Energy, 178*, 721-735

Charnes, Abraham, William W. Cooper, and Robert O. Ferguson. "Optimal estimation of executive compensation by linear programming." Management science 1, no. 2 (1955): 138-151

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

Du, Y., Xie, L., Liu, J., Wang, Y., Xu, Y., & Wang, S. (2014). Multi-objective optimization of reverse osmosis networks by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. *Desalination,* 333(1), 66-81

Duarte, A., Sarache, W., & Costa, Y. (2016). Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis. *Energy, 100*, 321-331

Eksioglu, S. D., Rebennack, S., & Pardalos, P. M. (2015). *Handbook of Bioenergy*: Springer

El-Sheekh, M. M., Allam, N. G., Shabana, S. A., & Azab, M. M. (2017). Efficiency of lipid accumulating Actinomycetes isolated from soil for biodiesel production: Comparative study with microalgae. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 39*(9), 883-892

Gilani, H., H. Sahebi, and Fabricio Oliveira. "Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model." Applied Energy 278 (2020): 115653.

Hannan, Edward L. (1981). "On fuzzy goal programming." Decision sciences 12, no. 3: 522-531

Jongschaap, R., Corré, W., Bindraban, P., & Brandenburg, W. (2007). *Claims and facts on Jatropha curcas L.: global Jatropha curcas evaluation. breeding and propagation programme*. Retrieved from

Kathirvelu, B., Subramanian, S., Govindan, N., & Santhanam, S. (2017). Emission characteristics of biodiesel obtained from jatropha seeds and fish wastes in a diesel engine. *Sustainable Environment Research, 27*(6), 283-29

Kesharwani, R., Sun, Z., & Dagli, C. (2018). Biofuel supply chain optimal design considering economic, environmental, and societal aspects towards sustainability. International Journal of Energy Research, 42(6), 2169-2198.

Mafakheri, F., & Nasiri, F. (2014). Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: applications, challenges and research directions. *Energy Policy, 67*, 116-126

Mahjoub, Niloufar, Hadi Sahebi, Mohammad Mazdeh, and Ashkan Teymouri. "Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model." Journal of Cleaner Production 256 (2020): 120355.

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(1), 217-232

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation, 213*(2), 455-465

Mohseni, S., & Pishvaee, M. S. (2016). A robust programming approach towards design and optimization of microalgae-based biofuel supply chain. *Computers & Industrial Engineering, 100*, 58-71

Mohseni, S., Pishvaee, M. S., & Sahebi, H. (2016). Robust design and planning of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain: A case study in Iran. *Energy, 111*, 736-755

Narasimhan, Ram. "Goal programming in a fuzzy environment." Decision sciences 11, no. 2 (1980): 325-336

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

Nicolò, M., Guglielmino, S., Solinas, V., & Salis, A. (2017). Biodiesel from Microalgae. *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Production of Fuels and Chemicals*, 55-74

Pishvaee, M., Razmi, J., & Torabi, S. (2014). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 67*, 14-38

Rao, P. V., Baral, S. S., Dey, R., & Mutnuri, S. (2010). Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 14(7), 2086-2094

Sahebjamnia, N., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2015). Integrated business continuity and disaster recovery planning: Towards organizational resilience. *European Journal of Operational Research, 242*(1), 261-273

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

Tiwari, R. N., S. Dharmar, and J. R. Rao. (1987). "Fuzzy goal programming—an additive model." Fuzzy sets and systems 24, no. 1: 27-34.

van Eijck, J., Romijn, H., Balkema, A., & Faaij, A. (2014). Global experience with jatropha cultivation for bioenergy: an assessment of socio-economic and environmental aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32*, 869-889

Yue, D., Slivinsky, M., Sumpter, J., & You, F. (2014). Sustainable design and operation of cellulosic bioelectricity supply chain networks with life cycle economic, environmental, and social optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53*(10), 4008-4029

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]