فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال چهارم/ شماره ۱۲/ پاییز ۱۳۹۷/ صفحات ۱۴۵-۱۱۳

طراحی و بهینه سازی زنجیره تأمین تولید سوخت سبز از پسماندهای فاضلاب شهری در کشور با استفاده از یک روش فراابتکاری ترکیبی

شایان محسنی
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
Shayan_mohseni@ind.iust.ac.ir
میرسامان پیشوایی
دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول)
Pishvaee@iust.ac.ir

یکی از مهم‌ترین مسائلی که آینده کشور را در تأمین انرژی تهدید می‌کند، وابستگی شدید به منابع نفتی و عدم توسعه قابل‌توجه انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد. در سال‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا تولید سوخت سبز به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی گسترش فراوانی داشته است. اگرچه تولید سوخت سبز از مواد خوراکی قیمت تمام‌شده پایینی دارد و در برخی کشورها همچون برزیل به مقدار قابل‌توجهی تولید می‌شود اما به علت تأثیر نامطلوب استفاده از مواد غذایی بر بازار محصولات کشاورزی و افزایش قیمت محصولات کشاورزی، تولید آن محدودشده است. به‌عنوان جایگزینی برای حل این مشکل استفاده از موادی بدون منشأ غذایی همچون غلاف ذرت برای تولید سوخت توسعه‌یافته است. یکی از منابعی که برای تولید سوخت توجهات فراوانی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است، استفاده از فاضلاب‌های شهری است. علت این موضوع این است که فاضلاب حاوی مقدار قابل‌توجهی لیپید است که می‌تواند برای تولید بیودیزل به کار گرفته شود، همچنین نیاز به دفن لجن‌های فاضلاب‌های شهری که فرایندی پرهزینه در تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد را از بین می‌برد. برای بررسی توسعه چنین سوخت‌هایی در کشور این مطالعه به طراحی زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب‌های شهری می‌پردازد که کلیه مراحل از تأمین و انتقال فاضلاب از تصفیه‌خانه‌ها، تبدیل آن‌ها به سوخت و توزیع سوخت را به‌صورت یکپارچه بهینه می‌نماید. با توجه به ابعاد گسترده و غیرخطی بودن مدل حاصل، الگوریتم‌های دقیق از حل آن ناتوان هستند. لذا یک مدل فراابتکاری ترکیبی بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسعه داده‌شده است. نتایج به‌کارگیری الگوریتم توسعه داده‌شده نشان از برتری عملکرد آن نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سوخت حاصل از فاضلاب‌های شهری در حال حاضر اقتصادی نمی‌باشد اما با افزایش نرخ سوخت‌های فسیلی در آینده و بهبود نرخ تبدیل فاضلاب به سوخت، این سوخت قابلیت رقابت با سوخت‌های فسیلی را دارد.

واژگان کلیدی: سوخت‌های سبز، زنجیره تأمین سبز، فاضلاب‌های شهری، الگوریتم‌های فراابتکاری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۸/۲

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

۱. مقدمه

وابستگی شدید به منابع نفتی و محدود بودن این منابع از مهم‌ترین مسائلی است که تأمین انرژی موردنیاز کشور در آینده را تهدید می‌کند. از میان انواع انرژی‌های نو، تولید سوخت‌های سبز[1] اهمیت فراوانی را در سال‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا به خود جلب کرده‌اند. در سال‌های گذشته منابع مختلفی برای تولید سوخت‌های سبز به کار گرفته‌شده است که آن‌ها را در چند نسل طبقه‌بندی می‌کنند (مایتی و همکاران[2]، ۲۰۱۴). نسل اول منابع شامل موادی با ماهیت غذایی است که ازجمله آن‌ها می‌توان به ذرت، سویا، نشاسته و... اشاره نمود. اگرچه سوخت تولیدی از این مواد اقتصادی است اما رفته‌رفته استفاده از آن‌ها به دلیل افزایش قیمت مواد غذایی کاهش‌یافته است (بابازاده و همکاران[3]، ۲۰۱۵). نسل دوم از موادی بدون ماهیت غذایی همانند پسماندهای محصولات کشاورزی مانند غلاف ذرت، محصولات مختص تولید انرژی همچون جاتروفا و پسماندهای صنعتی می‌شوند. تولید سوخت از ریز جلبک‌ها به دلیل ماهیت متفاوت تولید به‌عنوان نسل سوم نام‌گذاری شده است (محسنی، پیشوایی و صاحبی[4]، ۲۰۱۶).

یکی از موضوعات اساسی پیش رو برای توسعه سوخت‌های سبز در مقیاس کلان هماهنگی و مدیریت یکپارچه مراحل مختلف تولید است. لذا لازم است مدل‌های طراحی زنجیر تأمین توسعه یابد که کلیه مراحل از تأمین مواد اولیه تا تولید و عرضه سخت را به‌صورت یکپارچه بهینه نماید (یوی، یو و اسنایدر[5]، ۲۰۱۴). در یک نگاه کلی مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین[6] به

1. Biofuels
2. Maity et al.
3. Babazadeh et al.
4. Mohseni et al.
5. Yue and You and Snyder
6. Supply chain network design

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

بهینه‌سازی تصمیماتی همچون انتخاب تأمین‌کننده؛ ظرفیت، مکان و نوع فنّاوری پالایشگاه‌های تبدیل؛ و روش حمل‌ونقل مواد اولیه و سوخت نهایی می‌پردازند (محسنی و پیشوایی، ۱۳۹۶).

به‌عنوان یکی از منابع تولید سوخت‌های سبز نسل دوم، فاضلاب‌های شهری توجهاتی ویژه‌ای را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. دلایل این موضوع این است که الف) مقادیر قابل‌توجهی فاضلاب شهری در نقاط مختلف دنیا تولید می‌شود و انتظار می‌رود این مقادیر در آینده به جهت رشد صنعتی سازی افزایش یابد، ب) فاضلاب‌های شهری حاوی مقادیر قابل‌توجهی لیپید است که ماده اولیه برای تولید بیودیزل محسوب می‌شود؛ ج) دفع و دفن لجن‌های فاضلاب‌های شهری به‌عنوان دغدغه تصفیه‌خانه‌ها هزینه گزافی را به همراه دارد (کارگو[1]، ۲۰۱۰). با توجه به میزان بالای فاضلابی تولیدی در کشور، فاضلاب‌های شهری به‌عنوان منبع مناسبی برای تولید سوخت در کشور و کاهش هزینه‌های تصفیه‌خانه‌های کشور به کار گرفته شود (داوودی نژاد وهمکاران، ۱۳۹۴). مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین می‌تواند در جهت برنامه‌ریزی در مقیاس کلان برای تولید سوخت از فاضلاب‌های شهری به کار گرفته شود.

یکی از مهم‌ترین موضوعات و دغدغه‌ها در طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین رویکرد حل مسأله می‌باشد. این موضوع ازآنجا ناشی می‌شود که مدل‌های طراحی شبکه اغلب در مسائل سخت[2] دسته‌بندی می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود تنها نمونه‌هایی با ابعاد کوچک مدل‌های زنجیره تأمین حوزه سوخت‌های سبز با استفاده از روش‌های دقیق[3] قابل‌حل باشند (کاستیلو[4]، ۲۰۱۴) . این در حالی است که در مسائل دنیای واقعی ابعاد مدل‌های زنجیره تأمین اغلب آن‌چنان گسترده است که استفاده از رویکردهای دقیق کارا نخواهد بود (چیبلس و همکاران[5]، ۲۰۱۶).

1. Kargbo
2. NP-hard
3. Exact methods
4. Castillo-Villar
5. Chibeles et al.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

برای حل این مشکل رویکردهای حل فراابتکاری[1] که یک جواب نزدیک به جواب بهینه در بازه زمانی منطقی فراهم می‌نمایند به کار گرفته‌شده‌اند. در ادبیات حوزه زنجیره تأمین سوخت‌های سبز تحقیقات اندکی از رویکردهای فراابتکاری برای حل مدل استفاده کرده‌اند. برای مثال لوپز و همکاران[2] در سال ۲۰۰۸ باهدف تولید انرژی الکتریکی از زیست‌توده، یک مدل زنجیره تأمین توسعه دادند که تصمیماتی همچون مکان و مساحت لازم برای کشت زیست‌توده و همچنین مکان احداث نیروگاه‌های تبدیل زیست‌توده به الکتریسیته را با در نظر گرفتن محدودیت‌های تکنیکی فرایند تولید بهینه می‌کند. برای حل مدل دو روش ژنتیک[3] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات[4] به کار گرفته‌شده است و نتایج نشان می‌دهد از این دو روش، ازدحام ذرات عملکرد بهتری دریافتن مقادیر بهینه تقریبی تابع هدف مدل را به همراه داشته است. رنتیزلاس و همکاران[5] در سال ۲۰۰۹ یک مدل زنجیره تأمین تبدیل زیست‌توده به انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن تأسیسات تبدیل انرژی و شبکه‌های گرمایشی و خنک‌کننده‌ها در مناطق مختلف توسعه دادند. آن‌ها برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین توسعه داده‌شده یک مدل ترکیبی دومرحله‌ای توسعه دادند که در مرحله اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک جواب اولیه تقریبی به دست آورده و سپس جواب به‌دست‌آمده را با استفاده از روش برنامه‌ریزی درجه‌دو ترتیبی[6] به جواب بهینه نهایی تبدیل می‌کنند. ورا و همکاران[7] در سال ۲۰۱۰ باهدف توسعه تولید سوخت سبز از روغن‌زیتون در کشورهای اسپانیا، ایتالیا و یونان یک مدل زنجیره تأمین توسعه دادند که مکان و مساحت سایت‌های کشت زیتون و ظرفیت نیروگاه‌های تبدیل را تعیین می‌کند. آن برای حل مدل

1. Metaheuristic
2. López et al.
3. Genetic
4. Particle swarm optimization
5. Rentizelas et al.
6. SQP
7. Vera et al.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

از روش جستجوی هارمونی[1] استفاده کردند و نشان دادند نتایج بهتری در مقایسه با روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات دارد. جیانگ و ژانگ[2] در سال ۲۰۱۶ یک مدل طراحی زنجیره تأمین برای تولید سوخت سبز از پسماندهای روغن پخت‌وپز ارائه دادند و سپس با استفاده از روش ژنتیک مدل توسعه داده‌شده را حل نمودند.آزاده و همکاران[3] در سال ۲۰۱۷ یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مدیریت یکپارچه جریان بالادستی و میانی زنجیره تأمین نفت خام با در نظر گرفتن معیارهای زیست محیطی توسعه و سپس برای حل مدل توسعه داده‌شده که از نوع غیرخطی است، یک روش فراابتکاری چندهدفه ارائه دادند. به‌علاوه آن‌ها با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی خود و سایر روش‌های فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر ژنتیک و ازدحام ذرات برتری روش خود را نشان دادند. خویشتن دار و همکاران در سال ۱۳۹۵ یک مدل برنامه ریزی غیرخطی برای تعیین مکان بهینه رآکتور تولید زیست متان و همچنین چگونگی تخصیص انواع پسماند به عنوان ماده اولیه مورد نیاز توسعه داده و برای حل مدل از الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی استفاده نمودند. بر اساس نتایج به دست آمده الگوریتم تکامل تفاضلی عملکرد بهتری از نظر مقدار تابع هدف در مقایسه با الگوریتم ژنتیک داشته است. در سال ۲۰۱۸ سلیمی و همکاران[4] یک مدل طراحی شبکه تولید سوخت سبز ارائه دادند که علاوه بر بهینه‌سازی مراحل مختلف زنجیره تأمین، بحث قابلت اطمینان خطوط انتقالی بین اجزای مختلف شبکه را نیز در نظر می‌گیرد. برای حل مدل دو روش فراابتکاری ژنتیک و خفاش[5] به کار گرفته‌شده است. باهدف تولید هم‌زمان گرما و الکتریسیته از زیست‌توده، رای و همکاران[6] در سال ۲۰۱۸ یک مدل بهینه سازی چند معیاره توسعه دادند که بهترین ترکیب از مواد مختلف را با توجه به

1. Harmony search
2. Jiang and Zhang
3. Azadeh et al.
4. Salimi and Vahdani
5. Bat algorithm
6. Ray et al.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و کاربری زمین و...مشخص می‌نماید. برای حل مدل از یک روش فراابتکاری استفاده‌شده است و نتایج مدل برای یک مطالعه موردی در یک روستا در کشور هند ارائه‌شده است.

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام‌شده، مطالعات بسیار محدودی درزمینه طراحی زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب شهری انجام‌گرفته است. بنابراین یکی از مهم‌ترین اهداف و نوآوری‌های این مقاله، ارائه یک مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین است که مراحل تولید سوخت از پس‌ماندها فاضلاب‌های شهری در مقیاس کلان را طراحی و بهینه‌سازی می‌نماید. به عبارت دقیق‌تر این مدل، جریان پسماندها از تصفیه‌خانه‌ها به پالایشگاه تبدیل پسماند به سوخت، مکان و ظرفیت پالایشگاه‌ها و جریان سوخت تولیدی از پالایشگاه‌ها به نواحی تقاضا را به‌صورت بهینه تعیین می‌کند. به‌علاوه با توجه به این‌که به‌کارگیری این مدل برای تولید سوخت در مقیاس کشور منجر به مسأله‌ای با ابعاد گسترده خواهد شد، رویکردهای حل دقیق برای این مسأله کارایی مناسبی نداشته باشد. بر این اساس در این مقاله یک روش فراابتکاری ترکیبی با بهره‌گیری از توانمندی‌های الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات به کار گرفته می‌شود که می‌تواند جوابی نزدیک به جواب بهینه در بازه زمانی معقول فراهم کند. این روش ترکیبی از مزیت‌های الگوریتم ازدحام ذرات همچون برخورداری از حافظه و سرعت همگرایی بالا و همچنین مزیت‌های الگوریتم ژنتیک همچون قدرت بالا در جستجوی فضای حل بهره می‌گیرد.

۲. فرایند تولید سوخت از فاضلاب

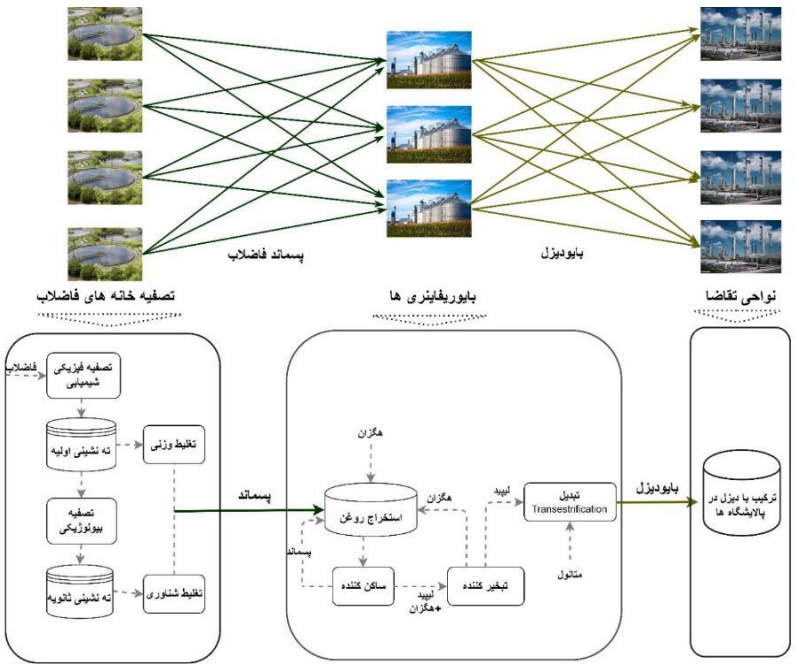
در یک نگاه کلی تولید سوخت از فاضلاب‌های شهری شامل مراحل زیر است: بعد از ورود فاضلاب‌های شهری به داخل تصفیه‌خانه‌ها، در گام اول عملیات تصفیه فیزیکی و شیمیایی انجام می‌گیرد. خروجی این بخش وارد مرحله بعدی تصفیه ثانویه می‌شود که در آن با استفاده از

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

میکروارگانیسم‌ها، تصفیه بیولوژیکی انجام می‌شود (سیدیکو و روحانی[1]، ۲۰۱۱). بخش قابل‌توجهی از پسماندها را آب تشکیل می‌دهد لذا پسماندها به‌وسیله روش‌های تغلیظ وزنی[2] و تغلیظ شناوری[3] مقدار از آب خود را از دست می‌دهند. در ادامه پسماندهای آب‌گرفته تجمیع شده و به‌عنوان ماده اولیه وارد مرحله استخراج روغن می‌شود. برای مرحله استخراج روغن روش‌های مختلفی توسعه داده‌شده است. این روش‌ها در دودسته؛ (۱) استخراج از پسماند آب‌گرفته، (۲) استخراج از پسماند خشک‌شده، قرار می‌گیرند. بر این اساس در صورت استفاده از روش استخراج از پسماندهای خشک‌شده، نیاز است که پسماندهای آب‌گرفته به‌وسیله روش‌های خشک‌کردن، خشک‌شده و رطوبت آن‌ها کاهش یابد. در این تحقیق روش استخراج از پسماندهای آب‌گرفته به‌وسیله هگزان به کار گرفته‌شده است. خروجی این مرحله، لیپید (روغن) به همراه هگزان است که به‌وسیله تبخیر، لیپید از هگزان جداشده و وارد مرحله تبدیل می‌شود. در مرحله تبدیل با استفاده از واکنش ترنس استریفیکاسیون[4]، لیپید به بیودیزل تبدیل می‌شود (الکیویسز و همکاران[5]، ۲۰۱۴). فرایندهای ذکرشده در بالا به همراه مدل زنجیره تأمین پیشنهادی برای تولید سوخت از پسماند فاضلاب‌های شهری در شکل ۱ نشان داده‌شده است. در لایه اول این زنجیره تأمین، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب قرار دارند که ورودی آن‌ها فاضلاب‌های شهری است. بعد از مراحل تصفیه اولیه و ثانویه در تصفیه‌خانه‌ها، پسماندها از تصفیه‌خانه‌ها خارج می‌شوند. سپس، پسماندها از تصفیه‌خانه‌ها به پالایشگاه‌های تبدیل حمل شده و در پالایشگاه‌های تبدیل ابتدا روغن آن‌ها استخراج‌شده و در ادامه روغن استخراجی به بیودیزل تبدیل می‌شود. درنهایت بیودیزل تولیدی به پالایشگاه‌های نفت موجود در نواحی مختلف کشور حمل شده تا در آنجا با سوخت دیزل ترکیب‌شده و سپس به‌جایگاه‌های عرضه سوخت فرستاده شود.

1. Siddiquee and Rohani
2. Gravity thickener
3. Floating thickener
4. Transesterification
5. Olkiewicz et al.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب شهری و مراحل آن

۳. تئوری تحقیق

در این بخش با توجه به توضیحات داده‌شده در بخش قبل، مدل ریاضی زنجیره تأمین تولید سوخت بیودیزل از پسماندهای فاضلاب شهری توسعه داده می‌شود. در ابتدا، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها ارائه‌شده و سپس تابع هدف و محدودیت‌های مدل تشریح می‌شوند.

اندیس‌ها

I مجموعه مکان‌های تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، $i \in I$

J مجموعه مکان‌های ممکن برای احداث پالایشگاه‌ها، $j \in J$

K مجموعه نواحی تقاضای سوخت، $k \in K$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

T مجموعه دوره‌های زمانی، $t \in T$

پارامترها

$S_{i,t}$ مقدار در دسترس پسماند در ناحیه i در دوره زمانی t (تن)

F_j^t هزینه ثابت احداث پالایشگاه در مکان j در دوره زمانی t (ریال)

$V_{j,cpl}^t$ هزینه متغیر هر واحد ظرفیت در پالایشگاه با ظرفیت پایه Q^{cpl} در مکان j در دوره t (ریال)

O_j^t هزینه عملیاتی تبدیل هر واحد فاضلاب در پالایشگاه در مکان i در دوره زمانی t (ریال)

Q^{cpl} ظرفیت پایه (حداقل ظرفیت) پالایشگاه (تن)

Q^{cpu} حداکثر ظرفیت هر پالایشگاه (تن)

D_k^t میزان تقاضای ناحیه تقاضای k در دوره زمانی t (لیتر)

α ضریب کاهش هزینه متغیر در صورت افزایش ظرفیت پالایشگاه

β ضریب تبدیل هر واحد پسماند به بیودیزل (تن/لیتر)

μ سرعت متوسط وسیله نقلیه (کیلومتر/ساعت)

$d_{i,j}$ فاصله میان تصفیه‌خانه i و پالایشگاه j (کیلومتر)

$d_{j,k}$ فاصله میان پالایشگاه j و ناحیه تقاضای k (کیلومتر)

db هزینه حمل‌ونقل وابسته به مسافت برای انتقال هر واحد پسماند در هر بار انتقال (ریال)

tb هزینه حمل‌ونقل وابسته به زمان برای انتقال هر واحد پسماند در هر بار انتقال (ریال)

dq هزینه حمل‌ونقل وابسته به مسافت برای انتقال هر واحد بیودیزل در هر بار انتقال (ریال)

tq هزینه حمل‌ونقل وابسته به زمان برای انتقال هر واحد بیودیزل در هر بار انتقال (ریال)

lb هزینه بارگیری هر واحد پسماند (ریال)

lq هزینه بارگیری هر واحد بیودیزل (ریال)

cab ظرفیت وسیله حمل پسماند از تصفیه‌خانه به پالایشگاه (تن)

caq ظرفیت وسیله حمل بیودیزل از پالایشگاه به نواحی تقاضا (لیتر)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

p_i^t	هزینه دفن هر واحد پسماند در تصفیه‌خانه i در دوره زمانی t (ریال)
متغیرها	
$X_{i,j}^t$	مقدار جریان پسماند از تصفیه‌خانه i به پالایشگاه j در دوره زمانی t (تن)
$Z_{j,k}^t$	مقدار جریان بیودیزل از پالایشگاه j به ناحیه تقاضای k در دوره زمانی t (لیتر)
Q_j	مقدار ظرفیت پالایشگاه احداثی در ناحیه j (تن)
Y_j^t	متغیر ۰-۱، مقدار ۱ در صورت احداث پالایشگاه در مکان j در دوره زمانی t، در غیر این صورت مقدار ۰

مأخذ: نتایج تحقیق

- **تابع هدف مدل ریاضی**

تابع هدف مدل طراحی شبکه تولید سوخت از پسماند فاضلاب شهری (۱) از پنج بخش هزینه‌های احداث پالایشگاه (FC)، هزینه‌هایی عملیاتی شامل هزینه مواد اولیه، انرژی، تعمیرات نگهداری، نیروی کار و... (OC)، هزینه‌های انتقال پسماند از تصفیه‌خانه‌ها به پالایشگاه‌ها (TC1)، هزینه‌های انتقال بیودیزل از پالایشگاه‌ها به نواحی تقاضا (TC2) و صرفه‌جویی حاصل از کاهش هزینه‌های دفن پسماند (PC)، تشکیل‌شده است (معروفزمان، اکسیگلو و هوانگ[1]، ۲۰۱۴). بخش هزینه‌های احداث شامل هزینه ثابت برای احداث (هزینه خرید زمین و...) و هزینه‌های متغیر که با توجه به ظرفیت هر پالایشگاه تغییر می‌کند. لازم به ذکر است هزینه‌های متغیر برای ساخت پالایشگاه با ظرفیت Q، بر اساس هزینه متغیر برای ظرفیت پایه و با در نظر گرفتن ضریب کاهش هزینه ($V_{j,cpl}^t \left(Q_j / Q^{cpl}\right)^{\alpha}$) ناشی از صرفه به مقیاس تعیین می‌شود. هزینه‌های انتقال بخش مهمی از هزینه‌های زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی را در برمی‌گیرد. در این مطالعه برای تخمین دقیق هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های بارگیری هر واحد پسماند و بیودیزل، هزینه وابسته

1. Marufuzzamana and Eksioglu and Huang

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

به زمان برای انتقال در هر بار بارگیری وسیله نقلیه و هزینه وابسته به مسافت برای انتقال در هر بار بارگیری وسیله نقلیه در نظر گرفته‌شده است (هوانگ، چن و فان[1]، ۲۰۱۰). این مقادیر در دو بخش (TC1) و (TC2) لحاظ شده است. صرفه‌جویی حاصل از تبدیل هر واحد پسماند به این دلیل در نظر گرفته‌شده است که هزینه دفن و دفع پسماندها مقدار قابل‌توجهی از هزینه‌های تصفیه فاضلاب را تشکیل می‌دهد و تبدیل پسماند به سوخت این هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

$$\min f = FC + OC + TC1 + TC2 - PC \quad (۱)$$

$$FC = \sum_j \sum_t F_j^t Y_j^t + \sum_j \sum_t V_{j,cpl}^t \left(Q_j / Q^{cpl}\right)^{\alpha} Y_j^t \quad (۲)$$

$$OC = \sum_j \sum_i \sum_t O_j^t X_{i,j}^t \quad (۳)$$

$$TC1 = \sum_i \sum_j \sum_t \left(\frac{(db + tb/\mu) d_{i,j}}{cab} + lb \right) X_{i,j}^t \quad (۴)$$

$$TC2 = \sum_j \sum_k \sum_t \left(\frac{(dq + tq/\mu) d_{j,k}}{caq} + lq \right) Z_{j,k}^t \quad (۵)$$

$$PC = \sum_i \sum_j \sum_t p_i^t X_{i,j}^t \quad (۶)$$

- **محدودیت‌های مدل**

$$\sum_j X_{i,j}^t \le S_{i,t} \qquad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (۷)$$

$$\sum_i X_{i,j}^t \le Qj Y_j^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (۸)$$

$$Q^{cpl} \le Qj \le Q^{cpu} \qquad \forall j \in J, \quad (۹)$$

$$Y_j^t \le Y_j^{t+1} \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (۱۰)$$

1. Huang and Chen and Fan

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

$$\beta\sum_{i} X_{i,j}^{t} = \sum_{k} Z_{j,k}^{t} \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall k \in K, \tag{۱۱}$$

$$\sum_{j} Z_{j,k}^{t} = D_{k}^{t} \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \tag{۱۲}$$

$$Y_{j}^{t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, \tag{۱۳}$$

$$Z_{j,k}^{t}, X_{i,j}^{t}, Qj \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall k \in K, \tag{۱۴}$$

مجموعه محدودیت‌های (۷) تضمین می‌کند که مقدار انتقال پسماند در هر دوره و در هر تصفیه‌خانه از حداکثر میزان در دسترس پسماند موجود تجاوز نکند. مجموعه محدودیت‌های(۸) تضمین می‌کند که مقدار پسماند انتقالی به پالایشگاه از ظرفیت پالایشگاه تجاوز نکند. مجموعه محدودیت‌های (۹) نشان می‌دهد لازم است ظرفیت پالایشگاه‌ها میان حداکثر و حداقل میزان مجاز ظرفیت باشد. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) نشان می‌دهد در صورت احداث پالایشگاه در یک مکان و در دوره زمانی t، لازم است در دوره‌های بعد نیز این پالایشگاه کار کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۱) تضمین می‌کند که جریان ورودی به هر پالایشگاه و در هر دوره ضرب‌در ضریب تبدیل پسماند به بیودیزل برابر با جریان خروجی است. مجموعه محدودیت‌های(۱۲) تضمین می‌کند که تقاضای هر ناحیه در هر دوره با بیودیزل انتقالی از پالایشگاه‌ها ارضا شود. مجموعه محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) باینری و غیر منفی بودن متغیرهای مدل را نشان می‌دهد.

٤. روش حل پیشنهادی

در این بخش یک الگوریتم ترکیبی بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات توسعه داده می‌شود که از توانمندی‌های هرکدام از این الگوریتم‌ها بهره می‌گیرد. به‌طورکلی الگوریتم‌های ترکیبی ژنتیک و ازدحام ذرات موجود در ادبیات را می‌توان در سه دسته الف) الگوریتم‌های ترکیب ترتیبی، ب) الگوریتم‌های ترکیب موازی و ج) الگوریتم‌های ادغامی طبقه‌بندی نمود. در الگوریتم‌های ترکیب ترتیبی در هر تکرار ابتدا یکی از این دو الگوریتم اجراشده و سپس

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

الگوریتم دیگر بر روی خروجی الگوریتم اول اعمال می‌شود (گارگ[1]، ۲۰۱۶). در الگوریتم‌های ترکیب موازی دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به‌صورت موازی و هم‌زمان بر روی یک جمعیت اولیه اعمال می‌شوند (کاو و زاهارا[2]، ۲۰۰۸). در الگوریتم‌های ادغامی بخشی از یک الگوریتم را در دیگری ترکیب می‌کنند، برای نمونه از عملگرهای ترکیب و جهش الگوریتم ژنتیک برای تغییر و ایجاد موقعیت‌های جدید ($P_{i,best}$) و ($P_{g,best}$) استفاده می‌شود (پریمالاتها و نتراجان[3]، ۲۰۰۹).

در این مقاله الگوریتم ترکیبی‌ای بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات به کار گرفته‌شده است که قابلیت این را دارد که تأثیر هر یک از این الگوریتم‌ها را با طول تکرارهای الگوریتم کنترل کند. نقش الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در

شکل(۲) نشان داده‌شده است. در ابتدا یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود. این جمعیت ایجادشده که می‌توانند به‌عنوان کروموزوم در الگوریتم ژنتیک و یا ذره در الگوریتم ازدحام ذرات به‌کاررفته شوند، بر اساس تابع برازندگی رتبه‌بندی می‌شوند. بر روی تعدادی از اعضای جمعیت با بالاترین میزان شایستگی الگوریتم ژنتیک اعمال‌شده و به همان تعداد اعضای جدید ایجاد می‌کنند. الگوریتم ازدحام ذرات بر روی باقی اعضای جمعیت اعمال می‌شود. و بر اساس خروجی به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک، مقادیر سرعت هر ذره را با توجه به مقدار ($P_{g,best}$) تنظیم می‌کند. در الگوریتم پیشنهادی نقش و تأثیر این دو الگوریتم با هر تکرار تغییر می‌کند. به عبارت دقیق‌تر در ابتدا الگوریتم ژنتیک بر روی تعداد NGmin از اعضای جمعیت و الگوریتم ازدحام ذرات بر روی تعداد NPmax از اعضای جمعیت اعمال می‌شود، با هر تکرار از تعدادی اعضای جمعیت الگوریتم ازدحام ذرات کاسته و در مقابل تعداد اعضای جمعیت ژنتیک افزایش پیدا می‌کند.

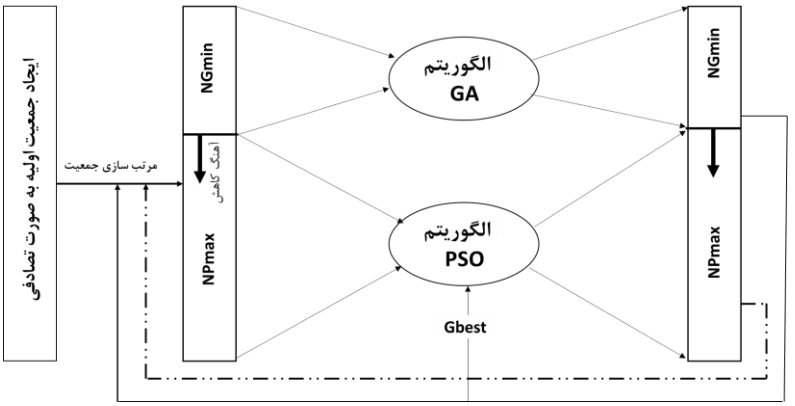
1. Garg
2. Kao & Zahara
3. Premalatha and Natarajan

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

$$NGiter = NG\min + \left(\frac{iter}{Maxiter}\right)^{\beta} \times (NG\max - NG\min) \quad (۱۵)$$

در ایـن معادلـه (NGiter) تعـدادی اعضـای جمعیـت الگـوریتم ژنتیـک در تکـرار (iter)، (NGmax) حداکثر تعداد اعضای الگوریتم ژنتیک، (NGmin) حداقل تعدادی اعضای الگوریتم ژنتیک و (Maxiter) تعداد تکرار الگوریتم و (β) تنظیم‌کننـده سـرعت تغییـرات تعـداد اعضـای جمعیت الگوریتم ژنتیک است. لازم به ذکر است با مشخص‌شده تعداد اعضای جمعیت ژنتیک، تعداد اعضای جمعیت ازدحام ذرات برابر با تعداد کل اعضای جمعیـت منهـای اعضـای جمعیـت ژنتیک خواهد بود. می توان حالت دیگری در نظـر گرفتـه شـود کـه تعـداد اعضـای الگـوریتم از (NGmax) شروع شود و با هر تکرار کاهش یابد تا بـه (NGmin) در تکـرار آخـر برسـد. معادلـه کنترل‌کننده این حالت به‌صورت زیر خواهد بود:

$$NGiter = NG\max - \left(\frac{iter}{Maxiter}\right)^{\beta} \times (NG\max - NG\min) \quad (۱۶)$$



شکل۲. نمایش روابط الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات (کاو و زاهارا[1]، ۲۰۰۸).

1. Kao & Zahara

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

بر اساس توضیحات داده‌شده الگوریتم ترکیبی پیشنهادی دارای گام‌های زیر است:

۱) در ابتدا برای هر یک از اعضای جمعیت ساختار ماتریسی به ابعاد ($|TI+TK+1+1|\times|J|$) در نظر گرفته می‌شود که در شکل (۳) نشان داده‌شده است. ماتریس حاضر دارای $|J|$ ستون می‌باشد که نشان‌دهنده مکان‌های کاندید برای تأسیس پالایشگاه‌ها می‌باشد. سطر اول ماتریس نشان‌دهنده ظرفیت پالایشگاه‌ها و سطر دوم تعیین‌کننده مکان‌های احداث در دوره‌های مختلف است. سطرهای ۱ تا $|T\times I|$ بعدی نشان‌دهنده جریان میان تصفیه‌خانه‌ها و پالایشگاه‌ها در دوره‌های مختلف و سطرهای ۱ تا $|T\times K|$ بعدازآن جریان میان پالایشگاه‌ها و نواحی عرضه را در دوره‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد در این ساختار مکان احداث با یک کروموزوم تک سطری بیان‌شده است و متغیر N_j به کار گرفته‌شده در آن نشان‌دهنده این است که در مکان j پالایشگاه چند دوره فعالیت می‌کرده است. برای مثال کروموزوم مربوط به مکان احداث پالایشگاه‌ها برای ۷ مکان و ۵ دوره در شکل ۴۴ رسم شده است. $N_1=2$ نشان می‌دهد که در مکان ۱ در دوره‌های ۵ و ۴ پالایشگاه فعالیت خواهد داشت. به همین ترتیب سایر مقادیر، وضعیت پالایشگاه در مکان‌ها و دوره‌های مختلف به دست خواهد آمد.

	1	2	3	...	|J|-2	|J|-1	|J|
1	Q_1	Q_2	Q_3	...	Q_{j-2}	Q_{j-1}	Q_j
1	N_1	N_2	N_3	...	N_{j-2}	N_{j-1}	N_j
1	$X^1_{1,1}$	$X^1_{1,2}$	$X^1_{1,3}$	...	$X^1_{1,j-2}$	$X^1_{1,j-1}$	$X^1_{1,j}$
...	...	...	...	...	...	...	...
|T× I|	$X^t_{i,1}$	$X^t_{i,2}$	$X^t_{i,3}$	...	$X^t_{i,j-2}$	$X^t_{i,j-1}$	$X^t_{i,j}$
1	$Z^1_{1,1}$	$Z^1_{1,2}$	$Z^1_{1,3}$	...	$Z^1_{1,j-2}$	$Z^1_{1,j-1}$	$Z^1_{1,j}$
...	...	...	...	...	...	...	...
|K× I|	$Z^t_{i,1}$	$Z^t_{i,2}$	$Z^t_{i,3}$	...	$Z^t_{i,j-2}$	$Z^t_{i,j-1}$	$Z^t_{i,j}$

شکل ۳. ساختار شماتیک هر یک از اعضای جمعیت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

	1	2	3	4	5	6	7
1	2	0	5	0	1	3	4
t=1	0	0	1	0	0	0	0
t=2	0	0	1	0	0	0	1
t=3	0	0	1	0	0	1	1
t=4	1	0	1	0	0	1	1
t=5	1	0	1	0	1	1	1

شکل ۴. تبدیل کروموزوم مرتبط با احداث پالایشگاه‌ها

به ازای متغیرهای $Z^t_{j,k}$، $X^t_{i,j}$ و Q_j، متغیرهایی به‌صورت $Z'^t_{j,k}$، $X'^t_{i,j}$ و Q'_j تعریف می‌شود که در بازه $[0-1]$ مقدار می‌گیرند. این تغییر متغیر باعث می‌شود که متغیرها در بازه‌های یکسانی تغییر کنند، همچنین تضمین می‌کند که متغیرها به صورتی مقدار بگیرند که محدودیت‌های (۹)، (۱۱) و (۱۲) ارضا شوند. محدودیت (۱۰) با توجه به توضیحات بخش قبل ارضا می‌شود و محدودیت‌های (۷) و (۸) با تابع جریمه به تابع هدف منتقل می‌شوند.

$$Q_j = C^{cpl} + (C^{cpu} - C^{cpl})Q_j \quad \forall j, \tag{۱۷}$$

$$Z^t_{j,k} = D^t_k Y^t_j Z'^t_{j,k} \Big/ \sum_j Y^t_j Z'^t_{j,k} \quad \forall k,t, \tag{۱۸}$$

$$X^t_{i,j} = Y^t_j X'^t_{i,j} \sum_k Z^t_{j,k} \Big/ \beta \sum_i X'^t_{i,j} \quad \forall j,t, \tag{۱۹}$$

۲) تعریف مقادیر $NP\max$ و ایجاد یک جمعیت اولیه به تعداد $(NP\max + NG\min)$ به‌صورت تصادفی.

۳) تعریف بردار موقعیت ذره i (X_i)، بردار سرعت ذره i (V_i)، بردار بهترین موقعیت ذره i ($P_{i,best}$) و بردار بهترین موقعیتی که مجموعه ذرات به آن دست‌یافته‌اند ($P_{g,best}$) بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات

۴) محاسبه مقدار شایستگی برای همه اعضای جمعیت بر اساس تابع هدف مدل و رتبه‌بندی آن‌ها.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

۵) انتخاب اعضایی با بالاترین میزان شایستگی به تعداد $NGiter$ با توجه به معادله (۱۵) برای الگوریتم ژنتیک و باقی اعضای جمعیت برای الگوریتم ازدحام ذرات.

۶) انتخاب Nc عضو از اعضای انتخاب‌شده برای الگوریتم ژنتیک در گام قبل به‌وسیله چرخه رولت و اعمال ترکیب تک نقطه‌ای، ترکیب دونقطه‌ای و ترکیب جامع بر روی مقادیر گسسته متناظر با احداث پالایشگاه (سرینیواس و پاتنایک[1]، ۱۹۹۴) و اعمال ترکیب حسابی بر روی متغیرهای پیوسته (هوک، جوینز و کای[2]، ۱۹۹۵).

۷) مقایسه بهترین موقعیت دو والد و اختصاص موقعیت مطلوب‌تر بر اساس تابع برازندگی به فرزندان و همچنین اختصاص تصادفی بردار سرعت والدین به فرزندان.

۸) انتخاب Nm عضو از اعضای الگوریتم ژنتیک به‌صورت تصادفی و اعمال جهش تعویضی بر روی مقادیر گسسته (هوک و همکاران[3]، ۱۹۹۵) و جهش با مقادیر تابع نرمال بر روی مقادیر پیوسته (کاو و زاهارا[4]، ۲۰۰۸).

۹) اختصاص بهترین موقعیت و سرعت عضو قبل از جهش به بهترین موقعیت و سرعت ذره بعد از جهش.

۱۰) رتبه‌بندی اعضای جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک، اعضای ترکیب‌شده و اعضای جهش‌یافته و انتخاب $NGiter$ از آن‌ها با بالاترین میزان شایستگی و به‌روزرسانی بهترین مقدار اعضای جمعیت ($P_{g.best}$).

۱۱) به‌روزرسانی موقعیت و سرعت هر عضو با توجه به معادله‌های زیر و مقدار $P_{g.best}$ به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک.

1. Srinivas and Patnaik
2. Houck and Joines and Kay
3. Houck and Joines and Kay.
4. Kao and Zahara

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

$$V_i(t) = \quad (۲۰)$$
$$w \times V_i(t-1) + w \times c_1 \times rand_1 \times (P_{i.best} - X_i(t-1)) + w \times c_2 \times rand_2 \times (P_{g.best} - X_i(t-1))$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (۲۱)$$

که در آن w ضریب وزنی اینرسی است که نشان‌دهنده میزان تأثیر سرعت در تکرار قبل بر سرعت در تکرار فعلی است، $w.c_1$ و $w.c_2$ به ترتیب وزن حرکت در مسیر بهترین مقدار ذره موردبررسی و در مسیر بهترین مقدار یافت شده در بین کل ذرات را مشخص می‌کند و $rand_1$ و $rand_2$ دو عدد تصادفی با مقادیر یکنواخت بین [0-1] هستند. در ادبیات پیشنهادشده است که مقادیر مناسب برای w به‌وسیله معادله $w = 2/\left|2 - c - \sqrt{c^2 - 4c}\right|$ تعیین شود که در آن $c = c_1 + c_2$ و مقدار c بزرگ‌تر از ۴ است.

۱۲) محاسبه موقعیت هر عضو با مقادیر پیوسته به‌وسیله معادله (۲۱) و موقعیت هر عضو با مقادیر گسسته به‌وسیله تبدیل مقادیر پیوسته به گسسته بر اساس معادله زیر:

$$\min\left(\left\lfloor (T+1)\, sigmoid\,(\mathrm{V}) \right\rfloor, T\right) + rand \quad (۲۲)$$

در این معادله ابتدا مقدار سرعت در تابع سیگمید قرار داده می‌شود و سپس کمینه ضرب (T+1) در تابع سیگمید و مقدار T انتخاب می‌شود. علت استفاده از مقدار کمینه این است که مقدار T نیز امکان انتخاب داشته باشد. نهایتاً مقدار به‌دست‌آمده با یک عدد تصادفی میان ۱ و ۱- جمع می‌شود که از همگرایی زودرس جلوگیری کند.

۱۳) به‌روزرسانی مقادیر $P_{i.best}$ برای اعضای جمعیت ازدحام ذرات و به‌روزرسانی مقدار $P_{g.best}$.

۱۴) ادغام اعضای جمعیت الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک، رتبه‌بندی آن‌ها و تکرار الگوریتم از گام (۶).

۵. پیاده‌سازی و نتایج

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

برای بررسی عملکرد و قابلیت‌های مدل طراحی شبکه توسعه داده، در این بخش مدل برای طراحی شبکه زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب‌های شهری در کشور به‌کاررفته می‌شود. فرضیات و داده‌های موردنیاز برای پارامترهای مختلف مدل به شرح زیر است:

دوره برنامه‌ریزی مدل ۵ ساله درنظرگرفته‌شده است و هر دوره به‌عنوان یک مرحله از مدل لحاظ شده است. بر اساس آخرین آمار منتشرشده در سال ۱۳۹۴ توسط شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور تعداد ۱۶۰ تصفیه‌خانه در مدار بهره‌برداری در کشور قرار دارند (www.sta.nww.ir). برای تولید سوخت از فاضلاب‌های شهری در دوره ساله، از میان تصفیه‌خانه‌های کشور که به فاز اجرایی رسیده‌اند تعداد ۵۰ تصفیه‌خانه در نقاط مختلف کشور انتخاب‌شده است. با توجه به این‌که پسماندها تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مقدار آب بالایی دارند، حمل‌ونقل پسماندها از تصفیه‌خانه‌ها به پالایشگاه‌ها هزینه بالایی به همراه خواهد داشت. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته (معرفزمان، اکیسگلو و هرناندز[1]، ۲۰۱۵) ، شعاع ۵۰ کیلومتری از تصفیه‌خانه‌ها به‌عنوان فاصله اقتصادی برای انتقال در نظر گرفته‌شده است و ۴۰ مکان کاندید در این شعاع با در نظرگیری پوشش کل کشور برای احداث پالایشگاه‌ها انتخاب‌شده است. در این مدل پالایشگاه‌های نفت موجود در کشور به‌عنوان نواحی عرضه در نظر گرفته‌شده است. به این صورت که سوخت تولیدی از فاضلاب‌های شهری به پالایشگاه‌ها منتقل‌شده و بعد از ترکیب با سوخت دیزل تولیدی در پالایشگاه‌ها به‌وسیله زیرساخت‌های حمل‌ونقل و توزیع سوخت موجود به سایر نقاط کشور توزیع خواهد شد. بر این اساس ۹ پالایشگاه نفت آبادان، شازند، اصفهان، بندرعباس، تبریز، تهران، شیراز، کرمانشاه و لاوان به‌عنوان نواحی عرضه به کار گرفته‌شده است. فواصل میان تصفیه‌خانه‌ها و پالایشگاه‌های تولید سوخت از فاضلاب و همچنین فواصل میان پالایشگاه‌های تولید سوخت از نواحی عرضه به‌وسیله نرم‌افزار ArcGIS محاسبه‌شده است. هزینه‌های حمل‌ونقل مربوط به انتقال

1. Marufuzzaman and Ekşioğlu and Hernandez

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

پسماندهای فاضلاب از تصفیه‌خانه‌ها به پالایشگاه‌ها و از پالایشگاه‌ها به نواحی عرضه با در نظرگیری هزینه‌های وابسته به زمان و وابسته به مسافت و هزینه‌های بارگیری بر اساس معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه‌شده است. لازم به ذکر است برخی مقادیر در این معادله بر اساس مقاله (هوانگ و همکاران[1]، ۲۰۱۰) (Huang et al., 2010) استخراج‌شده است و برخی مقادیر از متوسط هزینه باربری در نقاط مختلف کشور محاسبه‌شده است. هزینه‌های ثابت و عملیاتی پالایشگاه‌های تبدیل پسماند فاضلاب به بیودیزل بر اساس فنّاوری به کار گرفته‌شده برای تولید در مقیاس انبوه که در مقالات (معروفزمان، اکسیگلو و هوانگ[2]، ۲۰۱۴) گزارش‌شده است، تخمین زده‌شده است. سپس هزینه‌ها در استان‌های مختلف با توجه به شاخص بهای کالا و خدمات مصرفی در مناطق شهری ایران در سال ۱۳۹۶ محاسبه گردیده است. بر اساس آخرین ترازنامه انرژی منتشرشده کشور در سال ۱۳۹۴ میزان مصرف سوخت دیزل به‌طور متوسط ۸۱ میلیون لیتر در روز بوده است. هدف این مطالعه برنامه‌ریزی برای جایگزینی ۱٪ از کل مصرف سالانه سوخت دیزل کشور با سوخت تولیدی از فاضلاب در سال اول و افزایش یک‌درصدی این میزان در هرسال تا در سال پنجم برنامه‌ریزی به مقدار ۵٪ برسد.

۵-۱. تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها

عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری به میزان قابل‌توجهی وابسته به مقادیر پارامترهای آن الگوریتم است. برای تنظیم پارامترها در این مقاله از روش طراحی آزمایش تاگوچی[3] است. این روش که یکی از روش‌های شناخته‌شده برای تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری است با انجام تعدادی آزمایش مشخص به‌جای بررسی تمام ترکیب‌های ممکن بهترین مقدار را برای هر پارامتر پیشنهاد می‌دهد. روش تاگوچی با استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N) زیر میزان پراکندگی حول یک

1. Huang et al.
2. Marufuzzaman and Ekşioğlu and Huang
3. Taguchi

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

مقدار مشخص را بیان می‌کند. بر اساس روش تاگوچی با توجه به این‌که برای هر الگوریتم ۴ پارامتر و ۳ سطح مقدار برای هر پارامتر در نظر گرفته‌شده است، طرح L_9 به‌کاررفته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقادیر مناسب پارامترهای مختلف الگوریتم‌ها برای مدل‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

جدول ۱. مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم‌ها برای مدل‌های طراحی شبکه

الگوریتم	پارامتر	مقیاس کوچک	مقیاس متوسط	مقیاس بزرگ
ژنتیک	Npop	۱۰۰	۱۲۰	۱۲۰
	Pc	۰/۷	۰/۸	۰/۸
	Pm	۰/۲	۰/۲	۰/۲
	mu	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
ازدحام ذرات	Npop	۸۰	۱۲۰	۱۲۰
	C1	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵
	C2	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵
	w	۰/۹۵	۱	۱/۰۵
ترکیبی	NGmin	۴۰	۴۰	۴۰
	NPmax	۸۰	۸۰	۸۰
	NGmax	۸۰	۸۰	۸۰
	β	۱	۱	۱

مأخذ: نتایج تحقیق

۵-۲. مقایسه و تحلیل نتایج

در ابتدا برای محاسبه مقدار دقیق تابع هدف مدل‌های طراحی شبکه با ابعاد مختلف، انواع الگوریتم‌های حل دقیق مدل‌های غیرخطی در نرم‌افزار گمز[1] مورد ارزیابی قرار گرفت. با اعمال محدودیت زمانی پنج ساعت تنها الگوریتم بارن[2] توانست مقدار بهینه تابع هدف مسائل شماره ۱، ۲ و ۳ از مدل‌های طراحی شبکه با مقیاس کوچک را حل نماید. لازم به ذکر است که مدل

1. GAMS
2. Baron

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

طراحی شبکه توسعه داده‌شده برای تبدیل فاضلاب به سوخت از نوع مدل‌های بهینه‌سازی غیرمحدب می‌باشد، لذا الگوریتم بارن تضمین نمی‌کند که جواب‌های به‌دست‌آمده جواب‌های بهینه سراسری باشند. در ادامه با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و الگوریتم ترکیبی توسعه داده‌شده با استفاده از نرم‌افزار متلب مقدار تابع هدف مدل در مقیاس کوچک محاسبه‌شده است. لازم به ذکر است برای هر مسأله، هرکدام از این الگوریتم‌ها ۵ بار اجراشده است و نتایج در جدول‌های ۲-۴ نشان داده‌شده است. از نتایج به‌دست‌آمده نکات زیر قابل‌برداشت است:

- بر اساس نتایج الگوریتم ترکیبی توسعه داده‌شده در مسائل شماره ۱، ۲ و ۳ اختلاف کمتری با مقدار بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم بارن در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد و لذا بهترین عملکرد را در بین الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و الگوریتم ترکیبی توسعه داده‌شده دارد. در ارتباط با مسائل شماره ۴ و ۵ نیز اگرچه الگوریتم بارن قادر به محاسبه دقیق نبوده است اما الگوریتم ترکیبی بهترین مقدار را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها به دست آورده است.
- جدول ۲ نشان می‌دهد که الگوریتم بارن جواب بهینه مسائل شماره ۱، ۲ و ۳ را در مدت‌زمان ۲ تا ۳ ساعت فراهم کرده است. این در حالی است که نتایج الگوریتم‌های ترکیبی، ژنتیک و ازدحام ذرات در زمان کمتر از ۳۰ ثانیه به‌دست‌آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که محاسبه دقیق تابع هدف مدل طراحی شبکه حتی برای نمونه‌های بسیار کوچک بسیار بالا است اما الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند جواب مناسبی در بازه زمانی محدود ایجاد کنند. به‌علاوه نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی از منظر زمان محاسباتی اختلاف قبل توجهی با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات ندارد.
- در ۵ مسأله مدل طراحی شبکه مقیاس متوسط، الگوریتم ترکیبی عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات دارد. برای مقایسه میزان این عملکرد، تفاوت الگوریتم ترکیبی با الگوریتم ژنتیک در حدود ۵٪ تا ۱۲٪ است این در حالی است که تفاوت الگوریتم ترکیبی با الگوریتم ازدحام ذرات بین ۵٪ تا ۲۷٪ متغیر است. مقایسه عملکرد دو الگوریتم ازدحام

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

ذرات و ژنتیک نشان می‌دهد که در میان ۵ مسأله مقیاس متوسط، در ۴ مسأله الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات داشته است اما در مسأله ۳ الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک برتری دارد.

- در مدل طراحی شبکه مقیاس بزرگ نیز الگوریتم ترکیبی توسعه داده‌شده عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات از خود نشان داده است. به عبارت دقیق‌تر الگوریتم ترکیبی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ۳٪ تا ۷٪ و در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات ۶٪ تا ۱۱٪ عملکرد بهتر داشته است. نتایج همچنان نشان می‌دهد برخلاف مدل طراحی شبکه در مقیاس متوسط که در مسائل مختلف عملکرد الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک نسبت به الگوریتم ترکیبی بسیار متغیر است، در مدل طراحی شبکه مقیاس بزرگ نسبت عملکرد آن‌ها به الگوریتم ترکیبی برای مسائل مختلف تغییرات چندانی نمی‌کند.
- مقایسه زمان محاسباتی الگوریتم ترکیبی با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات نشان می‌دهد که در مدل‌های مقیاس متوسط و مقیاس بزرگ الگوریتم ترکیبی زمان محاسباتی به نسبت بالاتری دارد. اما ازآنجاکه این افزایش زمان مقدار قابل‌توجهی نمی‌باشد و در مقابل الگوریتم ترکیبی بهبود عملکرد قابل‌توجهی نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان داده است لذا می‌توان گفت این افزایش محدود زمان خللی دربرتری الگوریتم ترکیبی وارد نمی‌کند.

جدول ۴. نتایج الگوریتم‌های بارن، ژنتیک، ازدحام ذرات و ترکیبی برای مدل مقیاس کوچک

	الگوریتم بارن		الگوریتم ترکیبی		الگوریتم ژنتیک		الگوریتم ازدحام ذرات	
سایز مسأله $\|I\| \times \|J\| \times \|K\| \times \|T\|$	مقدار بهینه (ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)
$3 \times 3 \times 2 \times 2$	3.75E+11	۶۴۲۰	3.94E+11	۳	3.94E+11	۳	4.43E+11	۳
$5 \times 4 \times 2 \times 2$	4.70E+11	۷۲۳۵	5.15E+11	۱۱	5.15E+11	۹	5.36E+11	۱۰
$7 \times 6 \times 3 \times 2$	6.56E+11	۹۵۸۷	7.13E+11	۱۶	7.13E+11	۱۵	7.79E+11	۱۶
$9 \times 8 \times 3 \times 3$	–	–	2.24E+12	۳۴	2.25E+12	۳۰	2.69E+12	۳۱
$10 \times 9 \times 4 \times 3$	–	–	1.26E+12	۳۱	1.26E+12	۲۹	1.38E+12	۳۰

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

جدول ۵. نتایج الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و ترکیبی برای مدل مقیاس متوسط

	الگوریتم ترکیبی		الگوریتم ژنتیک		الگوریتم ازدحام ذرات	
سایز مسأله $\|I\| \times \|J\| \times \|K\| \times \|T\|$	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)
$21 \times 20 \times 4 \times 3$	1.67E+12	۹۹	1.72E+12	۹۵	2.19E+12	۹۶
$23 \times 21 \times 5 \times 3$	2.13E+12	۱۰۹	2.2E+12	۱۰۱	2.84E+12	۱۰۳
$25 \times 22 \times 5 \times 3$	2.29E+12	۱۱۸	2.29E+12	۱۰۹	2.35E+12	۱۱۰
$27 \times 23 \times 6 \times 4$	4.51E+12	۱۴۴	4.53E+12	۱۳۹	5.65E+12	۱۴۲
$29 \times 24 \times 6 \times 4$	4.53E+12	۱۶۶	4.65E+12	۱۶۰	4.46E+12	۱۶۳

مأخذ: نتایج تحقیق

جدول ۶. نتایج الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و ترکیبی برای مدل مقیاس بزرگ

	الگوریتم ترکیبی		الگوریتم ژنتیک		الگوریتم ازدهام ذرات	
سایز مسأله $\|I\| \times \|J\| \times \|K\| \times \|T\|$	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)	مقدار تقریبی(ریال)	زمان (ثانیه)
$42 \times 36 \times 7 \times 4$	4.75E+12	۳۵۰	5.08E+12	۳۴۱	5.23E+12	۳۳۹
$44 \times 37 \times 8 \times 4$	5.47E+12	۳۶۹	5.65E+12	۳۵۹	5.82E+12	۳۵۷
$46 \times 38 \times 8 \times 5$	9.23E+12	۵۱۶	9.57E+12	۵۰۲	1E+13	۴۹۸
$48 \times 39 \times 9 \times 5$	9.24E+12	۴۹۲	9.62E+12	۴۸۰	9.8E+12	۴۷۸
$50 \times 40 \times 9 \times 5$	9.27E+12	۵۵۰	9.96E+12	۵۴۸	1.03E+13	۵۴۰

مأخذ: نتایج تحقیق

۵-۳. ساختار شبکه زنجیره تأمین

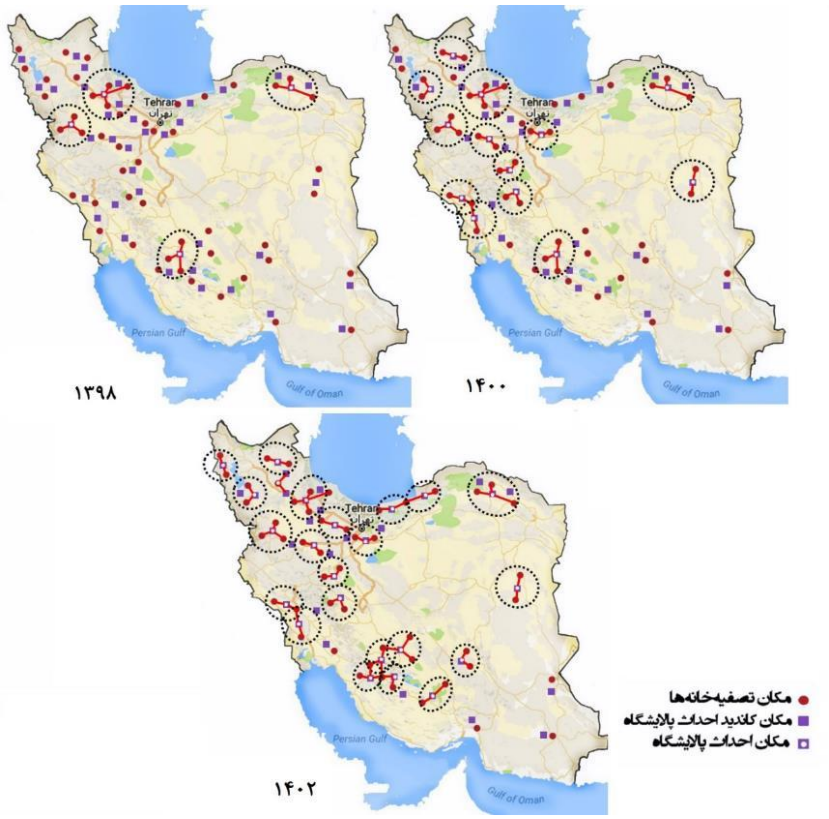
یکی از موضوعات مهم، بررسی ساختار بهینه شبکه زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب شهری در دوره برنامه‌ریزی ۵ ساله است. شکل ۶ ساختار بهینه شبکه را در سال‌های ۱۳۹۸، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ به‌عنوان سال اول، سال میانی و سال انتهایی دوره برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج لازم است در سال ۱۳۹۸ تعداد ۴ پالایشگاه تأسیس شود. همان‌طور که مشخص است هرکدام از این پالایشگاه‌ها تنها از ۳ یا ۴ تصفیه‌خانه پسماند فاضلاب موردنیاز برای تولید سوخت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

را تأمین می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که شبکه زنجیره تأمین تولید سوخت ساختاری غیرمتمرکز دارد که به دنبال تأسیس پالایشگاه‌هایی با ظرفیت محدود در نقاط مختلف کشور و تأمین پسماند از تعداد محدودی تصفیه‌خانه است. این ساختار در مقابل ساختار متمرکز قرار می‌گیرد که در آن تعداد محدودی پالایشگاه‌ها با ظرفیت‌های بالا تأسیس می‌شود و هرکدام از پالایشگاه‌ها با تعداد زیادی تصفیه‌خانه همکاری می‌کند. از منظر هزینه، در ساختار متمرکز هزینه‌های تولید در پالایشگاه‌ها با ظرفیت‌های بالا به علت بهره از صرفه به مقیاس پایین‌تر است اما در مقابل هزینه‌های حمل‌ونقل به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. علت افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل این است که پسماندهای موردنیاز لازم است از تعداد بیشتری تصفیه‌خانه در نقاط دورتر از پالایشگاه تأمین شود و از طرفی پسماندها حجیم هستند و هزینه‌های انتقال آن‌ها بالاست

شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد با افزایش تولید سوخت از سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۰۰ تعداد موردنیاز پالایشگاه از ۴ به ۱۳ افزایش خواهد یافت. همانند ساختار بهینه در سال ۱۳۹۸، در سال ۱۴۰۰ نیز ساختار شبکه به‌صورت غیرمتمرکز با تعداد بالایی پالایشگاه خواهد بود. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش تولید استفاده از پالایشگاه‌هایی با ظرفیت پایین‌تر اقتصادی‌تر است. علت این موضوع می‌تواند این باشد که برای افزایش تولید نیاز به احداث پالایشگاه‌هایی علاوه بر پالایشگاه‌های ساخته‌شده در سال ۱۳۹۸ است و لازم است پالایشگاه‌ها در نقاطی احداث شود که فاصله بیشتری از تصفیه‌خانه‌ها دارند، لذا برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل از ظرفیت پایین‌تری برای پالایشگاه‌ها استفاده می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد در سال ۱۴۰۲ تعداد پالایشگاه‌های موردنیاز از ۱۳ به ۲۲ افزایش خواهد یافت.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]



شکل ۶. ساختار بهینه شبکه زنجیره تأمین در سال‌های ۱۳۹۸، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲

۵-٤. آنالیز حساسیت

پایین بودن قیمت سوخت‌های فسیلی در کشور در مقایسه با سایر کشور باعث می‌شود که سوخت‌های سبز به علت هزینه بالای تولید توانایی رقابت در بازار انرژی کشور را نداشته باشند. این در حالی است که در بسیاری از نقاط جهان به علت هزینه بالای سوخت‌های فسیلی، تولید سوخت‌های سبز صرفه اقتصادی دارد. یکی از مهم‌ترین مواردی که لازم است در ارتباط با تولید سوخت‌های سبز در کشور بررسی شود، یافتن راهکارهایی برای کاهش هزینه تولید این سوخت‌ها است. آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب شهری آشکار می‌کند که استراتژی‌های کاهش هزینه لازم است بر روی چه بخش‌هایی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

متمرکز شود. در این بخش اثر پارامترهایی که در ادبیات به‌عنوان عوامل مؤثر در هزینه کل زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب نقش دارند تحلیل می‌شوند (معروفزمان، اکسیگلو و هوانگ[1]، ۲۰۱۴). این پارامترها شامل (۱) هزینه انتقال فاضلاب از تصفیه‌خانه به پالایشگاه، (۲) هزینه انتقال بیودیزل از پالایشگاه به نواحی عرضه، (۳) نرخ تبدیل فاضلاب به سوخت، (۴) هزینه متغیر ایجاد هر واحد ظرفیت در پالایشگاه، (۵) هزینه ثابت احداث پالایشگاه و (۶) هزینه عملیاتی تولید هر واحد سوخت است. برای بررسی اثر پارامترهای ذکرشده، هر یک از پارامترها به‌طور مستقل بر اساس حدود نشان داده‌شده در جدول ۷ تغییر داده می‌شوند.

بر اساس نتایج، افزایش ۲۰ درصدی در هزینه‌های انتقال فاضلاب از تصفیه‌خانه‌ها به پالایشگاه باعث افزایش هزینه تولید هر لیتر سوخت از ۶.۳۵ به ۶.۶۷ خواهد شد. به‌علاوه کاهش هزینه انتقال هزینه سوخت را از ۶.۳۵ به ۵.۸۹ کاهش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تغییر در هزینه انتقال تأثیر نسبتاً قابل‌توجه می‌باشد. علت این موضوع این است که فاضلاب بسیار حجیم است و سوخت تولیدی از هر واحد از آن بسیار محدود است، لذا تولید هر لیتر سوخت به مقدار زیادی فاضلاب نیاز دارد. این موضوع باعث می‌شود که هزینه‌های حمل‌ونقل فاضلاب سهم بالایی در هزینه زنجیره تأمین تولید سوخت از فاضلاب داشته باشد و تغییر در آن بر هزینه کل تأثیرگذار است. در مقابل اثر تغییرات در هزینه انتقال بیودیزل از پالایشگاه به نواحی عرضه بر هزینه کل زنجیره تأمین ناچیز است. به عبارت دقیق‌تر افزایش و کاهش ۲۰ درصدی هزینه انتقال هزینه کل را از ۶.۳۵ به ترتیب به ۶.۴۸ و ۶.۲۹ تغییر می‌دهد. در بین پارامترهای موردبررسی نرخ تبدیل فاضلاب به بیودیزل بیشترین تأثیر را بر روی هزینه کل دارد. افزایش ۲۰ درصدی این پارامتر هزینه هر لیتر بیودیزل را به ۳.۹۳ کاهش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش نرخ تبدیل موجب کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی، سرمایه‌گذاری و حمل‌ونقل می‌شود. علت این موضوع این است که هر واحد فاضلاب مقدار سوخت بیشتری تولید

1. Marufuzzaman and Ekşioğlu and Huang

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

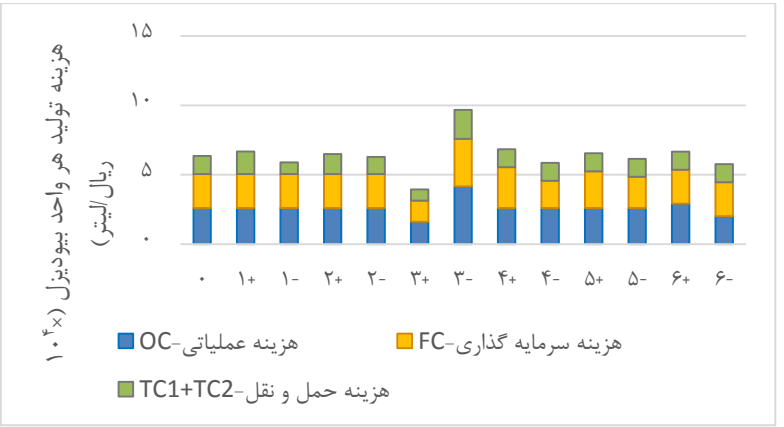
می‌شود لذا برای تولید مقدار مشخصی سوخت مقدار کمتری فاضلاب نیاز است که موجب کاهش هزینه حمل‌ونقل می‌شود. همچنین با ظرفیت قبلی پالایشگاه، بعد از افزایش نرخ تبدیل مقدار سوخت بیشتری می‌توان تولید کرد که این موضوع باعث کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود. افزایش نرخ تبدیل هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد زیرا عملیات بر روی یک واحد بعد از افزایش نرخ تبدیل سوخت بیشتری با همان هزینه قبلی تولید می‌کند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که کاهش نرخ تبدیل هزینه‌ها را به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که لازم است در آینده تمرکز بیشتری بر روی روش‌ها و فناوری‌هایی شود که نرخ تبدیل بالاتری برای تبدیل فاضلاب به سوخت فراهم کنند. هزینه ایجاد هر واحد ظرفیت نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر هزینه کل است. افزایش ۲۰ درصدی آن هزینه را به ۶.۸۴ افزایش و کاهش ۲۰ درصدی آن هزینه را به ۵.۸۶ کاهش می‌دهد. هزینه تابت احداث پالایشگاه تأثیر کمتری بر هزینه دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات در آن موجب تغییر هزینه بین ۶.۵۵ و ۶.۱۵ می‌شود. تغییرات در هزینه‌های عملیاتی تأثیری همانند تغییرات در هزینه متغیر هر واحد ظرفیت بر هزینه کل دارد. درواقع افزایش ۲۰ درصدی آن هزینه را به ۶.۶۲ افزایش و کاهش ۲۰ درصدی آن هزینه را به ۵.۹۲ کاهش می‌دهد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

جدول ۷. محدوده تغییر پارامترهای تحلیل حساسیت

شماره	پارامتر	حدود
0	مدل پایه	
۱+	هزینه انتقال فاضلاب	+۲۰
۱-	هزینه انتقال فاضلاب	-۲۰
۲+	هزینه انتقال بیودیزل	+۲۰
۲-	هزینه انتقال بیودیزل	-۲۰
۳+	نرخ تبدیل فاضلاب به سوخت	+۲۰
۳-	نرخ تبدیل فاضلاب به سوخت	-۲۰
۴+	هزینه متغیر ایجاد هر واحد ظرفیت	+۲۰
۴-	هزینه متغیر ایجاد هر واحد ظرفیت	-۲۰
۵+	هزینه ثابت احداث پالایشگاه	+۲۰
۵-	هزینه ثابت احداث پالایشگاه	-۲۰
۶+	هزینه عملیاتی تولید هر واحد سوخت	+۲۰
۶-	هزینه عملیاتی تولید هر واحد سوخت	-۲۰

مأخذ: نتایج تحقیق



شکل ۷. نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

٦. جمع‌بندی

وابستگی شدید به منابع نفتی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که آینده کشور را در تأمین انرژی تهدید می‌نماید. یکی از راه‌حل‌های این موضوع استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و سوخت‌های سبز می‌باشد. برای تولید سوخت‌های سبز منابع مختلفی همچون ذرت، سویا، نشاسته و ... به‌صورت گسترده در برخی از کشورهای دنیا به کار گرفته‌شده است. اگرچه سوخت تولیدی از این مواد قیمت تمام‌شده پایینی دارد اما به علت محدود بودن منابع غذایی تولید آن‌ها محدودشده است. در سال‌های اخیر یکی از منابع جایگزین برای تولید سوخت‌های سبز، فاضلاب شهری معرفی‌شده است. در این مطالعه برای بررسی تولید سوخت‌های سبز از فاضلاب‌های شهری در کشور، یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین توسعه داده‌شده است که کلیه مراحل از تأمین فاضلاب و انتقال آن به پالایشگاه‌ها، تبدیل آن به سوخت در پالایشگاه‌ها و سپس توزیع آن را در نظر می‌گیرد. با توجه به ابعاد بزرگ مسأله و غیرخطی بودن آن، استفاده از الگوریتم‌های دقیق برای حل آن مقدور نمی‌باشد. لذا یک مدل فراابتکاری ترکیبی که از قابلیت‌های الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات بهره می‌گیرد توسعه داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم توسعه داده‌شده عملکرد مطلوب‌تری در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات دارد. نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل به‌وسیله الگوریتم ترکیبی پیشنهادی نشان می‌دهد که سوخت تولید از فاضلاب‌های شهری در حال حاضر اقتصادی نمی‌باشد اما بهبود نرخ تبدیل فاضلاب می‌تواند قیمت سوخت تولیدی را به مقدار قابل‌توجهی کاهش دهد. بنا براین تمرکز بر توسعه تکنولوژی‌ها و روش‌های تبدیل فاضلاب به سوخت که بازده بالاتری دارد می‌تواند قیمت سوخت تولیدی را به قیمت رقابتی نزدیک نماید.

برای توسعه این مقاله در تحقیقات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود. الف) با توجه به این‌که تولید سوخت از فاضلاب شهری در مقیاس کلان اجرایی نشده است بنابراین تخمین مقدار دقیق پارامترهای مدل امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل ریاضی ارائه شده نتایج دقیق‌تری را به همراه خواهد داشت. ب) در مدل این مقاله تمرکز بر تولید سوخت بیودیزل

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

از فاضلاب شهری بوده است. ازآنجاکه فاضلاب شهری برای تولید بیواتانول و الکتریسیته نیز می‌تواند به کار گرفته شود، در تحقیقات آتی تولید و عرضه این مواد نیز می‌تواند در مدل ریاضی لحاظ شود. ج) همواره یکی از موضوعات مهم در زنجیره تأمین سوخت‌های سبز اثرات زیست‌محیطی آن و میزان انرژی مصرفی در کل زنجیره تأمین است. بنابراین مدل ریاضی این مقاله به یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه بسط داده شود که علاوه بر هزینه معیارهای ذکرشده را نیز بهینه نماید.

منابع

خویشتن دار، سهیلا؛ زندیه، مصطفی؛ دری، بهروز و سید امید رعنایی سیادت (۱۳۹۵)، "الگوریتم‌های تکاملی برای مسأله مکان‌یابی تخصیص زنجیره تأمین زیست‌متان"، *چشم انداز مدیریت صنعتی*، شماره ۲۳، صص ۲۹-۵۴.

داوودی نژاد، مصطفی؛ بی‌پروا، پوریا و احمد اکبرپور طلوتی (۱۳۹۴)،" برآورد پتانسیل تولید بیوگاز و برق از فاضلاب شهری در کشور"، *نشریه بازیافت آب*، شماره ۲، صص ۴۱-۴۸.

محسنی، شایان و میرسامان پیشوایی (۱۳۹۶)، "توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی استوار به‌منظور طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین تولید سوخت سبز از جلبک‌ها در شرایط عدم قطعیت". *مجله مدل سازی پیشرفته ریاضی*، شماره ۷، صص ۵۹-۸۸.

Azadeh, A., Shafiee, F., Yazdanparast, R., Heydari, J., & Fathabad, A. M. (2017). "Evolutionary Multi-objective Optimization of Environmental Indicators of Integrated Crude Oil Supply Chain Under Uncertainty". *Journal of Cleaner Production*, No. 152, pp. 295-311.

Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvaee, M.S. and M. Rabbani (2015). "A Non-radial DEA Model for Location Optimization of Jatropha Curcas L. Cultivation". *Industrial Crops and Products*, No. 69, pp. 197-203.

Castillo-Villar, K. K. (2014). Metaheuristic Algorithms Applied to Bioenergy Supply Chain Problems: Theory Review Challenges and Future". *Energies*, 7(11), pp. 7640-7672.

Chibeles-Martins, N., Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A. P. and A.Q. Novais (2016). "A Multi-objective Meta-heuristic Approach for the Design and Planning of Green Supply Chains-MBSA". *Expert Systems with Applications*, No. 47, pp. 71-84.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

Garg, H. (2016). "A Hybrid PSO-GA Algorithm for Constrained Optimization Problems". *Applied Mathematics and Computation*, No. 274, pp. 292-305.

Houck, C.R., Joines, J. and M.G. Kay (1995). A Genetic Algorithm for Function Optimization: a Matlab Implementation. Ncsu-ie tr, No. 95.

Huang, Y., Chen, C.W. and Y. Fan (2010). "Multistage Optimization of the Supply Chains of Biofuels". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), pp. 820-830.

Jiang, Y. and Y. Zhang (2016). "Supply Chain Optimization of Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil". *Transportation Research Procedia*, No.12, pp. 938-949.

Kao, Y.T. and E. Zahara (2008). "A Hybrid Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Multimodal Functions". *Applied Soft Computing*, 8(2), pp. 849-857.

Kargbo D.M. (2010). "Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges". *Energy & Fuels*, 24(5), pp. 2791-2794.

López P.R., Jurado F., Reyes N.R., Galán, S.G. and M. Gómez (2008). Particle Swarm Optimization for Biomass-fuelled Systems with Technical Constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(8), pp. 1389-1396.

Maity J.P., Bundschuh J., Chen C.Y. and P. Bhattacharya (2014). "Microalgae for third Generation Biofuel Production, Mitigation of Greenhouse Gas Emissions and Wastewater Treatment: Present and Future Perspectives–A Mini Review". *Energy*, No. 78, pp. 104-113.

Marufuzzaman M., Ekşioğlu S.D. and R. Hernandez (2015). "Truck Versus Pipeline Transportation Cost Analysis of Wastewater Sludge. Transportation Research Part A", *Policy and Practice*, No. 74, pp. 14-30.

Marufuzzaman M., Eksioglu S.D. and Y.E.Huang (2014). "Two-stage Stochastic Programming Supply Chain Model for Biodiesel Production via Wastewater Treatment", *Computers & Operations Research*, No. 49, pp. 1-17.

Mohseni S., Pishvaee M.S. and H. Sahebi (2016). "Robust Design and Planning of Microalgae Biomass-to-biodiesel Supply Chain: A Case Study in Iran". *Energy*, No. 111, pp. 736-755.

Olkiewicz M., Caporgno M.P., Fortuny A., Stüber F., Fabregat A., Font J. and C. Bengoa (2014). "Direct liquid–liquid Extraction of lipid from Municipal Sewage Sludge for Biodiesel Production". *Fuel Processing Technology*, No. 128, pp. 331-338.

Premalatha K. and A. Natarajan (2009). Hybrid PSO and GA for Global Maximization. Int. J. Open Problems Compt". *Math*, 2(4), pp. 597-608.

Ray A., Jana K., Assadi M. and S. De (2018). "Distributed Polygeneration Using local Resources for an Indian Village: Multiobjective Optimization Using Metaheuristic Algorithm". *Clean Technologies and Environmental Policy*, pp. 1-19

Rentizelas A., Tatsiopoulos I., and A. Tolis (2009). "An Optimization Model for Multi-biomass Tri-generation Energy Supply". *Biomass and Bioenergy*, 33(2), pp. 223-233.

Salimi F. and B. Vahdani (2018). "Designing a Bio-fuel Network Considering Links Reliability and Risk-pooling Effect in Bio-refineries". *Reliability Engineering & System Safety*, No. 174, pp. 96-107.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]

Siddiquee M.N. and S. Rohani (2011). "Lipid Extraction and Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges: A Review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), pp. 1067-1072.

Srinivas M. and L.M. Patnaik (1994). "Genetic Algorithms: A Survey". *Computer*, 27(6), pp. 17-26.

Vera D., Carabias J., Jurado F. and N. Ruiz-Reyes (2010). "A Honey Bee Foraging Approach for Optimal Location of a Biomass Power Plant". *Applied Energy*, 87(7), pp. 2119-2127.

Yue D., You F. and S.W. Snyder (2014). "Biomass-to-bioenergy and Biofuel Supply Chain Optimization: Overview, Key Issues and Challenges". *Computers & Chemical Engineering*, No. 66, pp. 36-56.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-09]