



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صص ۵۹-۲۶

نوع مقاله: پژوهشی

طراحی زنجیره تامین سوخت‌های زیستی از پسماندهای فاضلاب شهری با هدف بهینه‌سازی سود پالایشگاه زیستی با رویکرد ترکیبی پویایی‌شناسی سیستم و بهینه‌سازی ریاضی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران)

علی نکویی^۱، محمدرضا آرمان‌مهر^{۲*}، محمد رستمی^۳

۱. کارشناسی‌ارشد برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه

صنعتی شاهرود، شاهرود

۲. استادیار اقتصاد، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. استادیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

چکیده

چالش‌های ناشی از مصرف فزاینده سوخت‌های فسیلی، محدودیت منابع تجدیدناپذیر و پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها، لزوم توسعه و بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، سوخت‌های زیستی تولیدشده از پسماندهای شهری، به‌ویژه فاضلاب شهری، به‌عنوان گزینه‌ای پایدار و مقرون‌به‌صرفه مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف پژوهش حاضر، طراحی و مدلسازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی مبتنی بر پسماند فاضلاب شهری در ایران با تأکید بر بهینه‌سازی سود پالایشگاه‌های زیستی است. در این تحقیق، از یک رویکرد ترکیبی شامل مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم و برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح استفاده شده است. ابتدا با بهره‌گیری از روش پویایی‌شناسی سیستم، رفتار متغیرهای کلان مؤثر بر تولید و قیمت سوخت‌های زیستی در دوره زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ شبیه‌سازی و روند آن‌ها تا سال ۱۴۱۰ پیش‌بینی شد. سپس خروجی‌های مدل پویایی‌شناسی سیستم به‌عنوان ورودی مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین و مکان‌یابی پالایشگاه‌های زیستی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد افزایش یارانه سوخت‌های سبز و بهبود نرخ تبدیل پسماند فاضلاب به سوخت، موجب کاهش قیمت سوخت زیستی می‌شود. همچنین با دو برابر شدن قیمت سوخت سبز، ظرفیت تولید آن به میزان ۹/۲ درصد افزایش می‌یابد. نتایج مدل برنامه‌ریزی ریاضی نیز مکان‌های بهینه برای احداث پالایشگاه‌های زیستی، میزان تولید زیست‌توده و سودآوری پالایشگاه‌ها را در سناریوهای مختلف مشخص می‌نماید. یافته‌های پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران حوزه انرژی در جهت توسعه پایدار، مدیریت بهینه پسماندهای شهری و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک نماید.

کلیدواژه‌ها: سوخت‌های زیستی، پسماند فاضلاب شهری، زنجیره تأمین، پویایی‌شناسی سیستم، برنامه‌ریزی ریاضی



۱- مقدمه و بیان مسئله

مصرف روزافزون انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی اگرچه رشد سریع اقتصادی را به همراه داشته است اما به واسطه انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی و افزایش دی اکسید کربن در اتمسفر، جهان را با تغییرات تهدیدآمیزی روبرو ساخته است. محدودیت منابع فسیلی، غیر قابل تجدیدپذیر بودن این منابع و پیش‌بینی افزایش قیمت‌ها موجب شده تا برنامه‌ریزان بخش انرژی با انجام مطالعات ساختاری، تغییر حامل‌های انرژی و حرکت به سوی سوخت‌های پاک را در رأس برنامه‌ها قرار دهند که یکی از این گزینه‌ها، استفاده از انرژی حاصل از منابع زیست توده می‌باشد. تولید سوخت‌های زیستی توجه بسیاری از محققین را به منظور توسعه زنجیره تامین آنها به خود جلب کرده است [۱].

منابع انرژی موجود در جهان به دو گونه‌ی تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی، نفت و فراورده‌های آن و تجدیدپذیر مانند انرژی باد، خورشیدی، زمین گرمایی و انرژی زیستی تقسیم می‌شود. وابستگی بسیار زیاد به منابع نفتی یکی از مهمترین چالش‌هایی است که آینده کشور را در تامین انرژی تهدید می‌کند. یکی از راه حل‌های این مسئله استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سوخت‌های زیستی می‌باشد. مدیریت و بهینه‌یابی و نیز طراحی زنجیره تامین انرژی‌های سبز مسأله مورد بحث میان متخصصان انرژی و اقتصاد بوده است. مدیریت زنجیره تامین پایدار به عنوان یکی از رویکردهای کلیدی در تصمیم‌گیری‌های کلان سازمانی، نقش مهمی در بهبود عملکرد اقتصادی و ارتقای مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی سازمان‌ها ایفا می‌کند [۲]. به طور کلی هدف از طراحی و مدلسازی زنجیره تامین سوخت‌های سبز، حداکثر شدن سود پالایشگاه‌های زیستی و کاهش هزینه‌های تولید، توزیع و مصرف می‌باشد که اجزای اساسی هر زنجیره تামینی از کالا و خدمات می‌باشد، که با استفاده از مدلسازی‌های اقتصادی می‌توان هزینه‌های مربوطه را کاهش داد [۳]. کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی و بهینه‌سازی عدد صحیح در طراحی شبکه زنجیره تامین تحت شرایط عدم قطعیت، در پژوهش‌های پیشین نتایج قابل توجهی در بهبود عملکرد اقتصادی شبکه‌ها به همراه داشته است [۴].

یک راه تولید سوخت سبز و انرژی زیستی، استفاده از زباله‌های جامد و پسماند شهری و نیز فاضلاب شهری و صنعتی به عنوان منبع زیست توده می‌باشد که نسبت به دو روش قبلی



توجیه پذیرتر و از نظر اقتصادی و زیست محیطی دارای منافع بسیار زیادی است [۵]. تحقیق حاضر به بررسی استفاده از پسماند فاضلاب شهری در تولید سوخت زیستی می پردازد. از آن جایی که فرایند تبدیل پسماند فاضلاب به منابع قابل بهره برداری، عملیاتی تخصصی و مستلزم داشتن دانش فنی و تکنولوژی می باشد و نیز با تحقیقات صورت گرفته مشخص شده است که در چند کلان شهر ایران امکان احداث تصفیه خانه های زیستی وجود دارد. با وجود پتانسیل های فوق، توسعه عملی سوخت های زیستی در ایران با چالش های ساختاری مواجه است. این چالش ها ضرورت انجام پژوهش حاضر را دوچندان می سازد. ایران با دارا بودن جمعیت شهری بالا و توسعه صنعتی، با حجم بسیار بالایی از پسماندهای آلی و فاضلاب شهری روبرو است که مدیریت آن سالانه هزینه های گزافی را بر اقتصاد کشور تحمیل می کند [۶ و ۷]. این حجم عظیم، در صورت عدم مدیریت صحیح یک تهدید زیست محیطی است، اما در صورت بهره برداری انرژی، می تواند به یک موهبت اقتصادی تبدیل شود. همچنین اقتصاد ایران به شکل تاریخی وابسته به درآمدهای نفتی بوده و سبد انرژی کشور به طور قاطع در تسلط سوخت های فسیلی است [۸]. این وابستگی نه تنها موجب ناپایداری اقتصادی شده، بلکه با تشدید معضل آلودگی هوا و افزایش فشارهای بین المللی برای کاهش کربن، ضرورت حرکت به سمت انرژی های پاک را به یک امر حتمی تبدیل کرده است. از طرف دیگر، علیرغم تأکید قوانین و اسناد بالادستی بر توسعه انرژی های تجدیدپذیر، این حوزه در ایران با رشد کندی مواجه است. یکی از دلایل اصلی، عدم وجود مدل های کسب و کار و مطالعات امکان سنجی جامع است که بتواند پیچیدگی های خاص بازار انرژی ایران (از جمله یارانه های گسترده به حامل های انرژی، قیمت گذاری و ریسک سرمایه گذاری) را در یک چارچوب سیستماتیک لحاظ کند. مطالعات پیشین در ایران عمدتاً بر جنبه های فنی متمرکز بوده [۶، ۷] یا به مدلسازی ایستا پرداخته اند [۹] و کمتر پژوهشی به طراحی یک زنجیره تأمین بهینه با در نظرگیری همزمان پویایی های کلان بازار و محدودیت های عملیاتی پرداخته است. بنابراین، این پژوهش با تمرکز بر پسماند فاضلاب شهری به عنوان یک منبع در دسترس و با هدف طراحی زنجیره تأمین بهینه، درصدد است تا با به کارگیری یک رویکرد ترکیبی نوین، این شکاف را پر نماید. مدل پیشنهادی نه تنها پتانسیل واقعی این منبع را



کمی‌سازی می‌کند، بلکه با شبیه‌سازی تأثیر متغیرهای کلان سیاستی، ابزاری برای تصمیم‌گیری در شرایط واقعی اقتصاد ایران فراهم می‌آورد. در مواجهه با این مسئله پیچیده که هم دارای ابعاد پویای سیستمی (بلندمدت) و هم نیازمند تصمیم‌گیری بهینه (کوتاه‌مدت) است، پژوهش حاضر از یک رویکرد ترکیبی دومارحله‌ای نوآورانه بهره می‌گیرد. نوآوری اصلی این تحقیق در تلفیق دو روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها (SD) و برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح (MILP) برای طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی از فاضلاب شهری در ایران است. در این رویکرد، مدل SD به شبیه‌سازی تعاملات پیچیده و پیش‌بینی متغیرهای کلان بازار می‌پردازد و در مرحله بعد، خروجی‌های آن به عنوان پارامترهای ورودی مبتنی بر سناریو، به مدل MILP تزریق می‌شوند تا طراحی بهینه و استوار شبکه زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت انجام پذیرد. تاکنون مطالعاتی که به صورت یکپارچه این دو روش را برای حل این مسئله در بستر ایران به کار گیرد، انجام نشده است.

۲- تعاریف و مبانی نظری پژوهش

۲-۱- تعاریف مرتبط با موضوع

- مدیریت زنجیره تأمین: هدف زنجیره تأمین، مدیریت همه فرآیندهای ساخت و تأمین از مواد اولیه تا مشتری نهایی است که کل زنجیره ارزش از استخراج مواد تا پایان عمر مفید محصول را در برمی‌گیرد (وانپوک^۱ و همکاران، [۱۰]). زنجیره‌های تأمین یا عرضه، شامل تمامی عناصری است که بطور مستقیم شامل عرضه‌کنندگان، سازندگان، حمل‌کنندگان، انبارها، فروشندگان عمده و یا توزیع‌کنندگان، فروشندگان خرد و مشتریان می‌باشند (هو^۲ و همکاران، [۱۱]). به طور کلی مدیریت زنجیره تأمین دارای سه فرآیند عمده و اصلی است که عبارتند از: مدیریت روابط، مدیریت لجستیک، و مدیریت اطلاعات (ولف^۳، [۱۲]). در مطالعات اخیر، استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌های کمی در طراحی زنجیره‌های

^۱ Vanpoucke

^۲ Huo

^۳ Wolf



تأمین پایدار به عنوان ابزاری کارآمد برای بهبود کیفیت تصمیم‌گیری و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی مورد تأکید قرار گرفته است [۱۳]

– **زیست توده:** ماده اصلی تشکیل دهنده انرژی زیستی، زیست‌توده^۱ است که ماده‌ی بیولوژیکی حاصل از گیاهان و باقیمانده‌ی بافت‌های گیاهی می‌باشد. زیست‌توده تمام منابع آلی مورد استفاده در طبیعت است که به نحوی منشا تولید آنها خورشید است. همچنین باقیمانده‌ی درختان و جنگل‌های خشکیده و حتی زباله‌های جامد شهری و پسماند به عنوان بزرگترین منبع انرژی زیست‌توده هستند. با پالایش زیست توده در پالایشگاه‌های زیستی، سوخت‌های زیستی (سوخت سبز) تولید می‌شود که می‌تواند به حالت مایع مانند الکل‌های زیستی یا بیواتانول و یا به حالت گاز، مانند گاز حاصل از دفن زباله مورد استفاده قرار گیرد [۱۴].

– **سوخت‌های زیستی:** سوخت‌های زیستی به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی معرفی شده اند. سوخت‌هایی که از زیست‌توده بدست می‌آیند سوخت زیستی نام دارند. همه آنها در ویژگی تجدیدپذیر بودن مشترک هستند [۱۵].

– **دیزل زیستی:** عبارت است از استرهای منوالکیل اسیدهای چرب با زنجیره‌ی طویل که از منابع تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شود [۱۵].

– **تصفیه زیستی:** روش‌های بسیاری برای تصفیه فاضلاب و پسماند شهری از انواع مواد تشکیل دهنده آن وجود دارد که شامل مراحل تصفیه فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. گاز متان به عنوان گاز زیستی به وسیله فرآیند هضم بی‌هوازی و اتانول بوسیله فرآیند هضم هوازی تولید می‌شود. تصفیه زیستی به عنوان بهترین انتخاب تصفیه برای مواد آلی در مواد زائد جامد شهری پذیرفته شده است [۱۵].

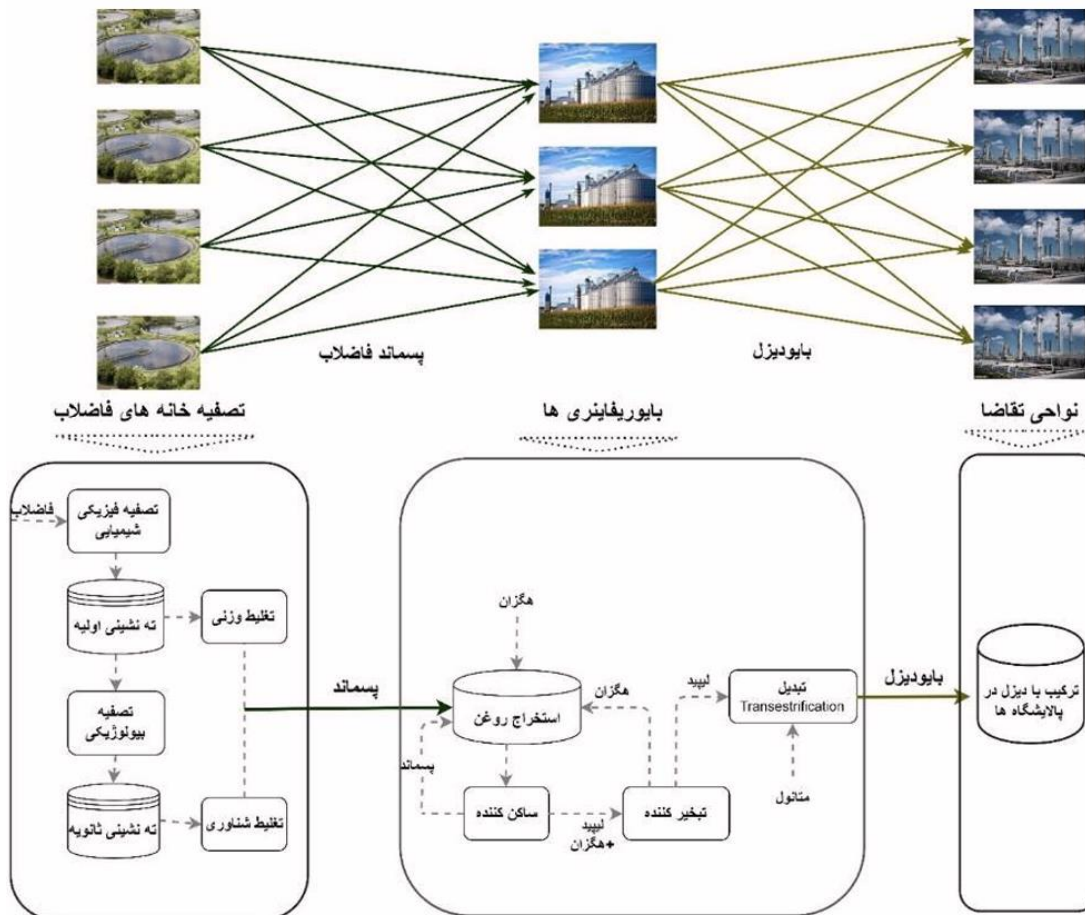
۲-۲- فرآیند تولید سوخت از فاضلاب

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

^۱ Biomass



تشکیل می‌دهد. لذا پسماندها به وسیله روش‌های تغلیظ مقداری از آب خود را از دست می‌دهند. در ادامه، پسماندهای آب گرفته تجمیع شده و به عنوان ماده اولیه وارد مرحله استخراج روغن می‌شود. برای استخراج روغن روش‌های مختلفی توسعه داده شده‌است. در این تحقیق روش استخراج از پسماندهای آب گرفته به وسیله هگزان به کار گرفته شده‌است. خروجی این مرحله، لیپید روغن به همراه هگزان است که به وسیله تبخیر، لیپید از هگزان جدا شده و وارد مرحله تبدیل می‌شود. در مرحله تبدیل با استفاده از واکنش ترنس استریفیکاسیون، لیپید به بیودیزل تبدیل می‌شود. فرایندهای ذکر شده در بالا به همراه مدل زنجیره تأمین پیشنهادی برای تولید سوخت از پسماند فاضلاب‌های شهری در شکل (۱) نشان داده شده‌است. جهت آشنایی با روش‌های نوین تبدیل پسماند به انرژی به پژوهش [۱۶] مراجعه نمایید.



شکل (۱). ساختار زنجیره تامین تولید سوخت از فاضلاب شهری و مراحل آن [۱۵]

۳- پیشینه تحقیق

در این بخش به تعدادی از مطالعات که به طراحی و مدلسازی زنجیره تامین سوخت های سبز می پردازد اشاره می شود.



۳-۱- پیشینه داخلی

مطالعات داخلی متعددی در حوزه سوخت‌های زیستی و زنجیره تامین انجام شده است. به عنوان نمونه، محمدی [۱۷] در رساله دکتری خود، یک سیستم مدیریت پسماند جامد شهری را با هدف توسعه تولید انرژی، به کمک یک رویکرد ترکیبی پویایی‌شناسی سیستم‌ها و برنامه‌ریزی ریاضی برنامه‌ریزی نمود. چارچوب روش‌شناختی این تحقیق، به وضوح قابلیت و اثربخشی تلفیق مدل پویا (برای تحلیل بلندمدت و سناریوپردازی) با مدل بهینه‌سازی (برای تصمیم‌گیری استراتژیک شبکه) را در مسائل پیچیده مدیریت منابع نشان می‌دهد. این مطالعه پایه‌ای روشن برای بسط و تطبیق چنین رویکرد ترکیبی بر روی جریان خاص پسماند فاضلاب شهری---که دارای پویایی‌های متفاوت اما مرتبط است---فراهم می‌آورد. ظرافتی و همکاران [۱۸] به بررسی و ارائه یک مدل ریاضی جهت بهینه‌سازی در شبکه زنجیره تامین سوخت‌های زیستی مبتنی بر ریز جلبک، مطالعه موردی ایران پرداختند. همچنین، پژوهشی به بررسی نقش سیاست‌های اقتصادی بر بکارگیری انرژی‌های نو در نیروگاه‌های ایران پرداخته است.

محسنی و پیشوایی [۶] به مطالعه و طراحی زنجیره تامین تولید سوخت‌های سبز با استفاده از فاضلاب شهری پرداخته‌اند. به همین منظور آنها یک مدل ابتکاری ترکیبی بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌یابی ارائه کرده‌اند. بررسی نتایج سناریوهای مدل ترکیبی نشان می‌داد که سوخت حاصل از فاضلاب 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.

امین صالحی و همکاران [۷] به بررسی انواع فناوری‌های تبدیل پسماند شهری به سوخت زیستی در ایران پرداخته‌اند. آنها از پسماند جامد شهری به عنوان یک منبع قابل توجه زیست توده نام برده‌اند. آنها یک تحلیل سلسله مراتبی انجام داده‌اند و با گسترش مدل ریاضی و مقایسه زوج مرتب‌های متغیرهای تاثیرگذار در مدل، بهترین راه تولید سوخت زیستی با استفاده از پسماند شهری را معرفی کرده‌اند.

بابایی میبدی و دلشاد [۱۹] به مطالعه عوامل موثر بر میزان سبز بودن مدیریت زنجیره تامین انرژی در ایران پرداخته‌اند. آنها در یک مدل دینامیکی عوامل تاثیرگذار بر زنجیره تامین



انرژی های تجدیدپذیر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که خرید، طراحی و تولید سوخت سبز و نیز بازفرآوری آلایندگی های زیست محیطی به طور موثری بر بهینه بودن زنجیره تامین انرژی های تجدیدپذیر نقش دارند و تمرکز بر آن موجب دستیابی به توسعه پایدار می شود.

۳-۲- پیشینه خارجی

کاروالیو^۱ و همکاران [۲۰] در پژوهشی اثر ابزارهای سیاستی مختلف بر توسعه بازار سوخت های زیستی در اتحادیه اروپا را بررسی کردند. آنها با به کارگیری مدل سازی پویایی شناسی سیستم ها، نشان دادند که ترکیب های خاصی از سیاست های مالیاتی، یارانه ای و دستوری می تواند به طور معناداری تقاضا و سهم بازار این سوخت ها را افزایش دهد. مطالعه آن ها بر اهمیت شبیه سازی تعاملات پیچیده بین متغیرهای اقتصادی، فناوری و سیاستی در ارزیابی اثربخشی سیاست های کلان تأکید می کند. کار آن ها یک نمونه موفق از کاربرد پویایی شناسی سیستم ها برای تحلیل سیاست در سطح کلان و منطبق با اهداف پایداری است.

ساراوان و همکاران^۲ [۲۱] به پیشرفت های اخیر در مسیر توسعه پایدار و تولید سوخت های زیستی از زیست توده های گیاهی پرداختند. آنها دریافتند که زیست توده های گیاهی و لیگنوسلولزی ظرفیت بالقوه ی بالایی برای تولید سوخت سبز دارند، همچنین این پژوهش از یک مدل برنامه ریزی ریاضی سلسله مراتبی استفاده کرده که به بررسی آخرین شیوه های تولید سوخت سبز و گاز زیستی پرداخته است.

سرکار و همکاران^۳ [۲۲] به بررسی یک سیستم تولید سوخت زیستی و انرژی زیستی انعطاف پذیر با اختلال در حمل و نقل تحت شبکه زنجیره تامین پایدار پرداختند. این مقاله به ارائه یک مدل بهینه سازی برای برنامه ریزی یک شبکه زنجیره تامین پایدار زیست توده می پردازد. نتایج نشان می دهد که هزینه تولید بیوانرژی ۵۴/۱۲ درصد، بخش عمده ای از کل هزینه در پالایشگاه های زیستی و نیروگاه های بیوگاز است.

^۱ Carvalho

^۲ Saravanan et al

^۳ Sarkar et al



قادری و همکاران^۱ [۲۳] به بررسی و تحلیل تعاملات بین متغیرهای زنجیره تامین بیواتانول و سوخت‌های زیستی در ایالات متحده آمریکا پرداخته‌اند. آنها برای ارزیابی بهتر، سناریوهای گوناگون یک مدل دینامیکی را طراحی کرده‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌داد که افزایش تولید و به دنبال آن افزایش مصرف سوخت‌های زیستی منجر به افزایش سهم این سوخت‌ها از بازار انرژی آمریکا خواهد شد که در نهایت منجر به توسعه پایدار در زمینه‌ی تولید و توزیع انرژی می‌شود.

ساودرا و همکاران^۲ [۲۴] به مطالعه زنجیره تامین انرژی‌های تجدیدپذیر و کاربردهای آن در برزیل پرداخته‌اند. با توجه به اهمیت موضوع و برای درک بهتر مسئله یک مدل دینامیک سیستم ارائه گردید. طبق بررسی‌های صورت گرفته بهترین روش برای مدلسازی زنجیره تامین انرژی‌های تجدیدپذیر، روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌باشد. در واقع برای بهبود درک زنجیره تامین انرژی‌های نو و نیز توسعه مدلسازی و رویکردهای شبیه‌سازی در سیستم‌های انرژی جدید، این مدل به کار رفته‌است.

آزاده و ارانی^۳ [۲۵] به مطالعه بهینه‌یابی زنجیره تامین سوخت‌های زیستی با رویکرد ترکیبی پویایی‌شناسی سیستم‌ها و برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته‌اند. آنها محدودیت‌های تولید سوخت‌های سبز و مشکلات زنجیره تامین آنها را مورد بررسی قرار دادند، و با ارائه یک رویکرد ترکیبی از پویایی‌شناسی سیستم‌ها و برنامه‌ریزی ریاضی پاسخی بهینه برای رفع محدودیت‌ها ارائه کرده‌اند. پژوهش حاضر با استفاده از رویکرد ترکیبی، به موضوع طراحی زنجیره تامین سوخت‌های زیستی از پسماندهای فاضلاب شهری پرداخته است که متفاوت از کار تحقیق فوق است.

بصورت خلاصه، جدول ۱ بررسی دقیق تحقیقات مرتبط با این پژوهش را نشان می‌دهد.

^۱ . Ghaderi et al

^۲ . Saavedra, et al

^۳ Azadeh, & Arani



جدول (۱): خلاصه ادبیات موضوع از دیدگاه شکاف تحقیقاتی

منبع	روش تحقیق	کانون مطالعه	محدودیت/شکاف مرتبط با پژوهش حاضر
[۶]	الگوریتم های فراابتکاری	زنجیره تأمین سوخت سبز از فاضلاب شهری	عدم در نظر گیری پویایی های کلان بازار و سیاست های بلندمدت
[۲۴]	پویایی شناسی سیستم ها	زنجیره تأمین انرژی های تجدید پذیر	عدم ادغام با یک مدل بهینه سازی برای تصمیم گیری استراتژیک
[۲۵]	ترکیب SD و MILP	زنجیره تأمین سوخت های زیستی (کلی)	عدم تمرکز بر منبع خاص پسماند فاضلاب شهری و بستر ایران
[۲۲]	برنامه ریزی ریاضی تحت عدم قطعیت	شبکه زنجیره تأمین پایدار زیست توده	عدم استفاده از مدل پویا برای تولید داده های ورودی واقع نما
[۹]	برنامه ریزی ریاضی	زنجیره تأمین سوخت زیستی از ریز جلبک	متفاوت بودن منبع زیست توده و عدم مدلسازی پویایی بازار

۳-۳- شکاف پژوهشی و نوآوری

با بررسی پیشینه پژوهش (جدول ۱) مشاهده می شود که مطالعات پیشین اگرچه گام های ارزشمندی برداشته اند، اما شکاف های مهمی باقی است که این تحقیق درصدد پر کردن آن هاست:

۱. شکاف روشی: اکثر پژوهش ها یا بر بهینه سازی ایستا [۹، ۲۲] یا بر شبیه سازی پویای مجزا [۲۴] متمرکز بوده اند. مطالعات معدودی مانند کار آزاده و ارانی [۲۵] به ترکیب این دو رویکرد پرداخته اند، اما تمرکز آن ها بر منابع عمومی زیست توده و نه پسماند فاضلاب شهری در ایران بوده است.

۲. شکاف موضوعی-زمینه ای: در بستر ایران، مطالعاتی مانند محسنی و پیشوایی [۶] به طراحی زنجیره تأمین پرداخته اند، اما لزوماً پیچیدگی پویایی های کلان مؤثر بر مقبولیت و قیمت سوخت زیستی را در یک مدل سیستماتیک لحاظ نکرده اند.



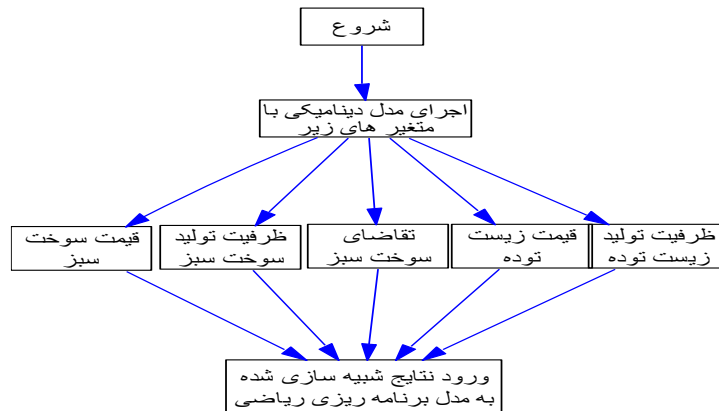
بنابراین، نوآوری این تحقیق در ارائه یک چارچوب مدلسازی ترکیبی یکپارچه و زمینه‌مند است که دو شکاف فوق را به‌طور همزمان پوشش می‌دهد. نوآوری‌های محوری به شرح زیر است:

- ترکیب روشی نوین در یک زمینه جدید: تلفیق عملیاتی مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها (برای شبیه‌سازی بلندمدت و تولید سناریو) با مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح (برای بهینه‌سازی استراتژیک شبکه) به‌منظور طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی از پسماند فاضلاب شهری.
- مدلسازی یکپارچه عدم قطعیت‌های کلان: در این چارچوب، عدم قطعیت‌های ناشی از متغیرهای کلان اقتصادی و سیاستی (مانند یارانه و قیمت حامل‌های انرژی) که در مطالعات ایستا [۹، ۶، ۲۲] ثابت فرض می‌شوند، در مدل SD شبیه‌سازی و کمی‌سازی شده و سپس خروجی آن به‌عنوان ورودی سناریومحور به مدل بهینه‌سازی [۴] منتقل می‌شود. این امر تصمیم‌گیری را در برابر نوسانات بازار مستحکم‌تر می‌سازد.
- تمرکز بر یک منبع ویژه در بستر ایران: تمرکز انحصاری بر پسماند فاضلاب شهری به‌عنوان یک منبع در دسترس و چالش‌برانگیز در کلان‌شهرهای ایران، مدل را به مسائل واقعی کشور نزدیک‌تر می‌کند.

۴- روش پژوهش و مدلسازی

۴-۱- طرح کلی رویکرد ترکیبی

این پژوهش از یک چارچوب دو مرحله‌ای بهره می‌برد (شکل ۲). در مرحله اول، از پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای درک رفتار پویای سیستم و تولید داده‌های ورودی آینده‌نگر تحت سناریوهای مختلف استفاده می‌شود. در مرحله دوم، این داده‌ها به یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح (MILP) تزریق می‌شوند تا طراحی بهینه زنجیره تأمین انجام گیرد.

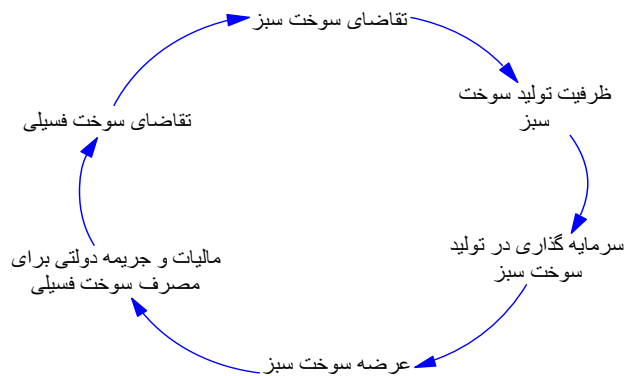


شکل (۲) . روش ترکیبی پویایی شناسی سیستم ها و برنامه ریزی ریاضی

۴-۲- مدل پویایی شناسی سیستم ها (SD)

هدف و مرزهای سیستم : هدف مدل SD ، شبیه سازی تأثیر متغیرهای کلان اقتصادی، سیاستی و فنی بر عرضه، تقاضا و قیمت سوخت زیستی در ایران در یک افق زمانی بلندمدت است.

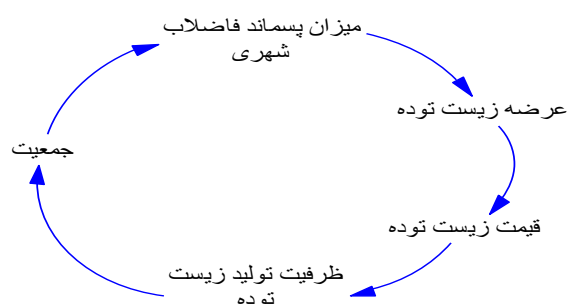
ساختار علی مدل : ساختار علی-معلولی مدل مبتنی بر روابط کلیدی شناسایی شده از ادبیات و کارشناسی است که در نمودارهای علی معلولی (Causal Loop Diagram) ۳ و ۴ ارائه شده است.



شکل (۳) . مدل علی معلولی سوخت سبز



همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش مالیات برای مصرف سوخت فسیلی که با کاهش تقاضای سوخت فسیلی همراه است، تقاضای سوخت سبز به عنوان کالای جانشین افزایش می‌یابد که موجب ایجاد انگیزه برای تولید بیشتر سوخت سبز و به دنبال آن افزایش سرمایه‌گذاری در تولید سوخت سبز خواهد شد. در نتیجه عرضه سوخت سبز افزایش یافته و منجر به کاهش قیمت سوخت سبز می‌گردد.



شکل (۴). مدل علی معلولی زنجیره تأمین زیست توده حاصل از پسماند فاضلاب شهری

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش جمعیت، میزان پسماند فاضلاب شهری افزایش یافته که باعث افزایش عرضه زیست توده و به دنبال آن کاهش قیمت زیست توده می‌گردد.

معادلات کلیدی: معادلات انباشت و جریان کلیدی مدل در جدول ۲ ارائه شده‌اند. این معادلات بر پایه روابط استاندارد در مدل‌سازی سیستم‌های انرژی [۲۵] و با تطبیق بر داده‌های ایران تنظیم شده‌اند.

جدول (۲): معادلات کلیدی مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها

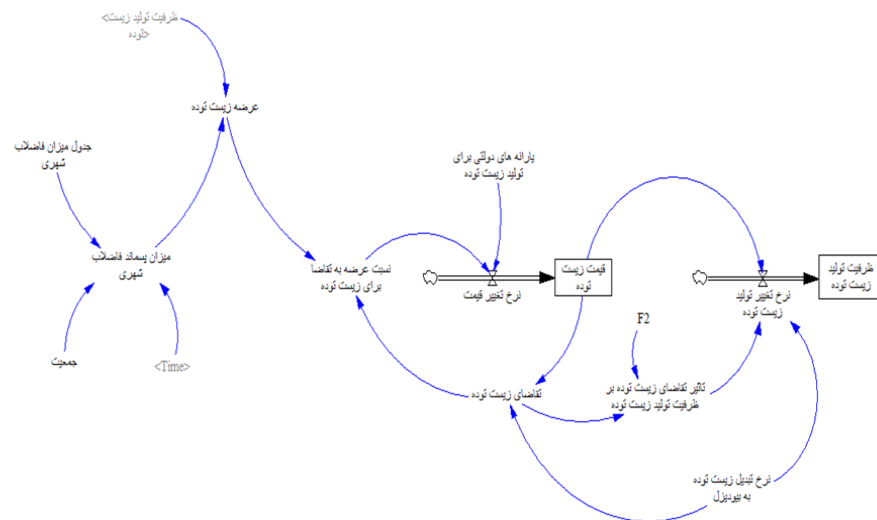
نام متغیر	واحد	معادله
قیمت زیست توده	تومان	انتگرال نرخ تغییر قیمت زیست توده
قیمت سوخت زیستی	تومان	انتگرال نرخ تغییر قیمت سوخت زیستی
ظرفیت تولید زیست توده	میلیون تن	انتگرال نرخ تغییر تولید زیست توده
ظرفیت تولید سوخت زیستی	میلیون تن	انتگرال نرخ تغییر تولید سوخت زیستی
میزان پسماند فاضلاب شهری	متر مکعب در روز	کشش برآورد شده * جمعیت + کشش برآورد شده * جدول (Time)
نسبت عرضه به تقاضا	بدون واحد	عرضه بر تقاضا



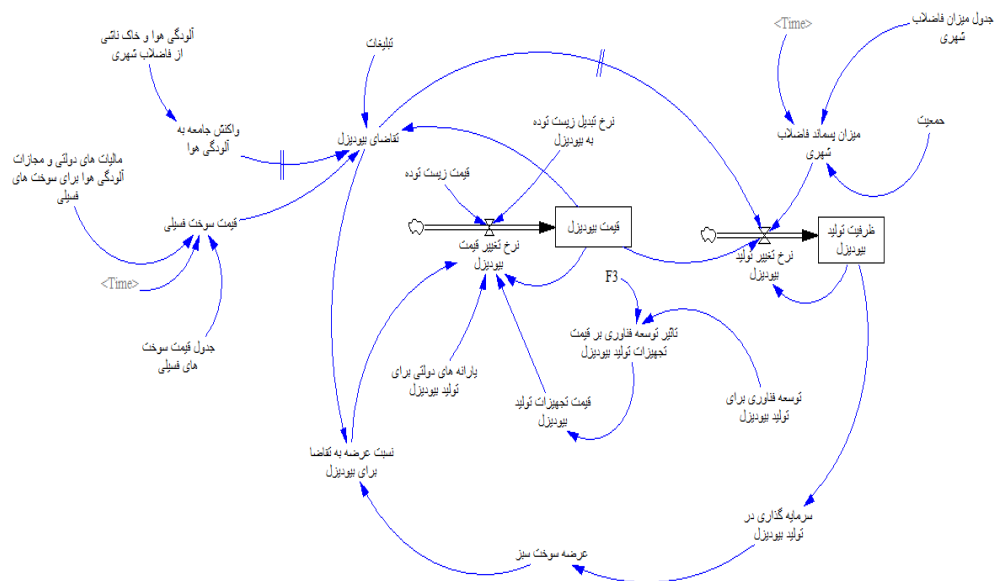
نام متغیر	واحد	معادله
نرخ تغییر تولید زیست توده	میلیون تن بر سال	کشش برآوردی*تأثیر تقاضای زیست توده بر ظرفیت تولید زیست توده+ کشش برآوردی*قیمت زیست توده+ کشش برآوردی*ظرفیت تولید زیست توده- کشش برآوردی* نرخ تبدیل زیست توده به سوخت زیستی
قیمت سوخت فسیلی	تومان	جدول قیمت سوخت های فسیلی (Time)+ کشش برآوردی* مالیات های دولتی و مجازات آلودگی هوا
تقاضای سوخت زیستی	میلیون تن	کشش برآوردی* تبلیغات+ کشش برآوردی* قیمت سوخت فسیلی- کشش برآوردی* قیمت سوخت زیستی+ کشش برآوردی* تاخیر(واکنش جامعه به آلودگی هوا)

سناریوها، داده ها و اعتبارسنجی : داده های تاریخی متغیرهای کلان از سال های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ از منابعی چون بانک مرکزی و مرکز آمار ایران گردآوری شد. پنج متغیر سیاستی- برونزا (جدول ۳) و دو حالت برای هر کدام در نظر گرفته شد که منجر به تشکیل ۳۲ سناریوی ترکیبی (2^5) برای اجرای مدل SD گردید. صحت سنجی مدل از طریق آزمون رفتار مرجع (مقایسه با داده های تاریخی) و آزمون تحلیل حساسیت انجام شد.

خروجی های مدل SD برای ورود به MILP : خروجی های کمی کلیدی مدل SD که به عنوان ورودی پارامتریک به مدل MILP وارد شدند، عبارتند از : (۱) قیمت سوخت زیستی در هر سناریو. (۲) تقاضای سوخت زیستی در هر منطقه بازار و (۳) حداکثر پتانسیل عرضه زیست توده در هر میدان . این مقادیر برای هر ۳۲ سناریو محاسبه و در یک ماتریس داده ذخیره شدند.



شکل (۵): مدل‌سازی زنجیره تامین زیست‌توده حاصل از فاضلاب شهری



شکل (۶): مدل‌سازی زنجیره تامین سوخت‌های سبز



۴-۳- مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح

پس از اجرای مدل پویایی شناسی سیستم روابط و فرمول های منطقی خروجی مدل، به عنوان ورودی به مدل برنامه ریزی ریاضی استفاده می شود. ابتدا پنج متغیر مالیات و جریمه های دولتی برای مصرف سوخت فسیلی، قیمت سوخت فسیلی، جمعیت، میزان پسماند فاضلاب شهری و تبلیغات از مدل پویایی شناسی سیستم به عنوان متغیرهای کنترل در نظر گرفته می شود و برای هر کدام از این پنج متغیر دو حالت در نظر گرفته می شود و در نتیجه ۳۲ سناریوی مختلف برای ترکیب حالات این متغیرها ایجاد می گردد.

جدول (۳): متغیرهای خروجی مدل پویایی شناسی سیستم و ورودی به مدل برنامه ریزی ریاضی (بر

اساس یافته ها و فروض پژوهش)

نوع متغیر	حالت اول	حالت دوم
مالیات و جریمه های دولتی	۵٪	۱۰٪
قیمت سوخت فسیلی (تومان)	۱۵۰۰	۵۰۰۰
جمعیت (میلیون نفر)	۸۵	۱۰۰
میزان پسماند فاضلاب شهری (متر مکعب در روز)	۵۶۹۳۴۷۰	۱۱۲۸۶۹۴۰
تبلیغات (میلیارد تومان)	۵۰	۱۰۰

با فرض مقادیر بالا برای متغیرهای مذکور مدل پویایی شناسی سیستم ۳۲ مرتبه اجرا می گردد و در هر سناریو خروجی های مدل پویایی شناسی سیستم مشخص و به عنوان ورودی به مدل ریاضی عدد صحیح در نظر گرفته می شود. پس از مشخص شدن کامل سناریوها، متغیرهای خروجی مدل پویا و ورودی مدل ریاضی، انتخاب شده و به عنوان متغیر تصمیم برای مدل برنامه ریزی ریاضی در نظر گرفته می شود. این متغیرها عبارتند از: قیمت سوخت سبز، ظرفیت تولید سوخت سبز، تقاضای سوخت سبز و عرضه سوخت سبز. سپس مدلسازی ریاضی با هدف بیشینه کردن سود پالایشگاه های زیستی انجام صورت می گیرد و بهترین تصمیمات در طراحی زنجیره تامین براساس متغیرهایی که بیشترین تکرار را در مجموع سناریوهای مختلف دارند اتفاق می افتد. در ادامه به تشریح مدل ریاضی عدد صحیح در جهت طراحی زنجیره تامین پرداخته می شود.



جدول (۴): مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی

مجموعه‌ها	
I	مجموعه‌ای از میدان‌های زیست توده، نمایه شده با i
F	مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای پالایشگاه‌ها، نمایه شده با f
M	مجموعه‌ای از بازارهای مصرف، نمایه شده با m
S	مجموعه‌ای از سناریوها، نمایه شده با s
پارامترها	
P_r	هزینه تولید برداشت زیست توده
C_r	هزینه تولید بیودیزل
v	سرعت متوسط سفر کامیون
f_f^F	هزینه سرمایه راه اندازی ثابت سالانه پالایشگاه در محل f
f_f^v	هزینه سرمایه واحد سالانه به ازای هر اندازه پالایشگاه در مکان f
d_i^f	فاصله بین گره i و f
T_b^d	هزینه حمل و نقل جامدات وابسته به فاصله
T_b^i	هزینه حمل و نقل جامدات وابسته به زمان سفر
T_{lq}^d	هزینه حمل و نقل مایعات وابسته به فاصله
T_{lq}^i	هزینه حمل و نقل مایعات وابسته به زمان سفر
Lu_b	هزینه بارگیری و تخلیه مواد جامد فله با کامیون
Lu_{lq}	هزینه بارگیری و تخلیه مایعات با کامیون
α_m	هزینه نگهداری موجودی بیودیزل در شهر m
Cap_b	ظرفیت مواد جامد فله کامیون
Cap_{lq}	ظرفیت مایعات کامیون
η	نرخ تبدیل پالایشگاه
$Capr_f$	حداکثر ظرفیت مجاز پالایشگاه در محل f (گالن) برای بیودیزل
$Capi_m$	ظرفیت ذخیره سازی بیودیزل در شهر m
S_i^s	حداکثر زیست توده موجود در میدان i در سناریوی s
MC	میزان رطوبت زیست توده



تقاضا در شهر m برای بیودیزل در سناریو s	D_m^s
متغیر دودویی که برابر با ۱ است اگر پیوند بین میدان زیست توده i به پالایشگاه در مکان f در سناریوی s قابل استفاده باشد، ۰	x_{if}^s
متغیر باینری که برابر با ۱ است اگر پیوند بین پالایشگاه در مکان f به شهر m در سناریو s قابل استفاده باشد، ۰ در سناریو s	t_{fm}^s
احتمال وقوع سناریو s	π_s
قیمت بیودیزل در شهر در سناریو s	P_{ms}
متغیرهای تصمیم	
اگر پالایشگاه f در سناریوی s باز شود برابر با ۱ است، در غیر این صورت ۰	Z_f^s
مقدار (تن خشک) زیست توده تهیه شده در میدان i در سناریوی s	Y_i^s
مقدار (تن خشک) زیست توده منتقل شده از میدان i به پالایشگاه f در سناریوی s	X_{if}^s
مقدار (گالن) بیودیزل حمل شده از پالایشگاه f به شهر m در سناریو s	y_{fm}^s
ظرفیت طراحی شده پالایشگاه (گالن) پالایشگاه f برای بیودیزل در سناریوی s	Cap_f^s
موجودی بیودیزل (گالن) در شهر m در سناریو s	I_m^s
تولید بیودیزل (گالن) در پالایشگاه f در سناریوی s	$prod_f^s$

مدل برنامه ریزی ریاضی بصورت زیر قابل تعریف است :

$$\begin{aligned}
 (1) \quad \text{Max } profit = & \sum_{m \in M} \sum_{f \in F} P_{ms} y_{fm}^s - \sum_{f \in F} (f_f^F Z_f^s + f_f^V Cap_f^s) - \sum_{i \in I} P Y_i^s - \sum_{f \in F} C_f prod_f^s \\
 & - \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \left((T_b^d + \frac{T_b^t}{v}) * \frac{d_i^f}{Cap_b} + Lu_b \right) * \frac{x_{if}^s}{(1-MC)} \\
 & - \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \left((T_{lq}^d + \frac{T_{lq}^t}{v}) * \frac{d_f^m}{Cap_{Lq}} + Lu_{Lq} \right) * y_{fm}^s - \sum_{m \in M} \alpha_m I_m^s
 \end{aligned}$$



S.t:

$$\sum_{i \in I} X_{ij}^s \eta = prod_f^s \quad \forall f \in F, s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M} y_{fm}^s = prod_f^s \quad \forall f \in F, s \in S \quad (3)$$

$$Cap_f^s \leq Cap_f Z_f^s \quad \forall f \in F, s \in S \quad (4)$$

$$prod_f^s \leq Cap_f^s \quad \forall f \in F, s \in S \quad (5)$$

$$y_{fm}^s \leq t_{fm}^s M \quad \forall f \in F, s \in S, m \in M \quad (6)$$

$$X_{ij}^s \leq x_{ij}^s M \quad \forall f \in F, i \in I, m \in M \quad (7)$$

$$Y_i^s = \sum_{f \in F} X_{if}^s \quad \forall s \in S, i \in I \quad (8)$$

$$Y_i^s \leq S_i^s \quad \forall s \in S, i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{f \in F} y_{fm}^s + I_m^s = D_m^s \quad \forall s \in S, m \in M \quad (10)$$

$$I_m^s \leq Capi_m \quad \forall s \in S, m \in M \quad (11)$$

$$Y_i^s, X_{ij}^s, y_{fm}^s, Cap_f^s, I_m^s, prod_f^s \geq 0 \quad \forall f \in F, i \in I, m \in M, s \in S \quad (12)$$

$$Z_f^s \in \{0,1\}$$

تابع هدف (۱) که سود مورد انتظار پالایشگاه‌های زیستی را نشان می‌دهد. اولین بخش، درآمد تولیدکننده از فروش سوخت سبز به بازار است. برای محاسبه سود پالایشگاه‌ها، چند شرط هزینه‌ای شامل هزینه‌های ثابت و متغیر پالایشگاه زیستی، هزینه‌های تولید زیست توده، هزینه‌های تولید سوخت، هزینه‌های حمل و نقل برای بارهای جامد و مایع و هزینه‌های نگهداری موجودی در نظر گرفته شده است. محدودیت (۲)، نشان می‌دهد که سوخت سبز تولید شده برابر است با مقدار زیست توده حمل شده به پالایشگاه ضربدر نرخ تبدیل آن. محدودیت (۳)، بیان می‌کند که سوخت سبز حمل شده به شهرها بایستی به اندازه تولید پالایشگاه باشد. محدودیت (۴)، تضمین می‌کند که مقدار تولید سوخت سبز نمی‌تواند از ظرفیت پالایشگاه تجاوز کند. محدودیت (۵) و (۶)، نشان می‌دهد که در صورت قابل استفاده بودن پیوندها، زیست توده و سوخت سبز به ترتیب از طریق پیوند به پالایشگاه‌های زیستی و ورودی‌های شهر منتقل می‌شوند. محدودیت (۷)، بیان می‌کند که تمام زیست توده‌های تهیه شده باید به پالایشگاه‌های زیستی منتقل شود. محدودیت (۸)، ظرفیت برای تولید زیست توده برای هر میدان زیست توده است. محدودیت (۹)، یک محدودیت موجودی در هر بازار مصرف



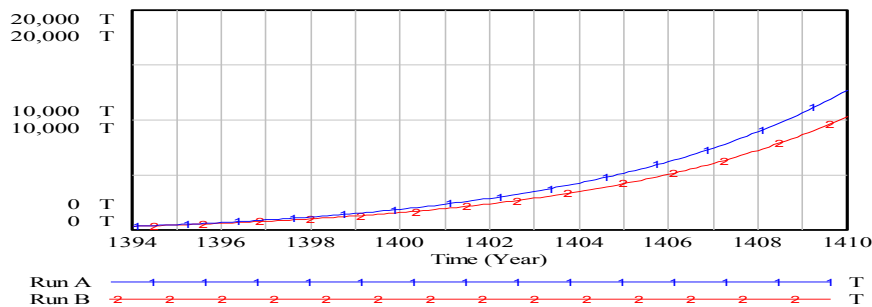
است. محدودیت (۱۰)، بالانس موجودی در هر بازار مصرف را نشان می دهد. محدودیت (۱۱) ظرفیت موجودی در هر بازار و سرانجام، یکپارچگی حدود متغیرهای تصمیم در محدودیت (۱۲) ارائه شده است.

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- تحلیل حساسیت پژوهش

در این بخش، رفتار مدل شبیه سازی شده پویایی شناسی سیستم ها و حساسیت آن نسبت به تغییرات کلیدی در پارامترهای سیاستی مورد تحلیل قرار می گیرد. شبیه سازی در بازه تاریخی ۱۳۸۸-۱۳۹۷ انجام و تا سال ۱۴۱۰ گسترش یافت. ارزیابی صحت مدل از طریق مقایسه با داده های تاریخی (آزمون رفتار مرجع) و بررسی عکس العمل منطقی مدل به تغییرات (آزمون تحلیل حساسیت) صورت گرفت که مبنای تحلیل های کمی زیر است. این پژوهش دارای سه تحلیل حساسیت اصلی است، با شبیه سازی انجام شده، رفتار مدل آنالیز می شود.

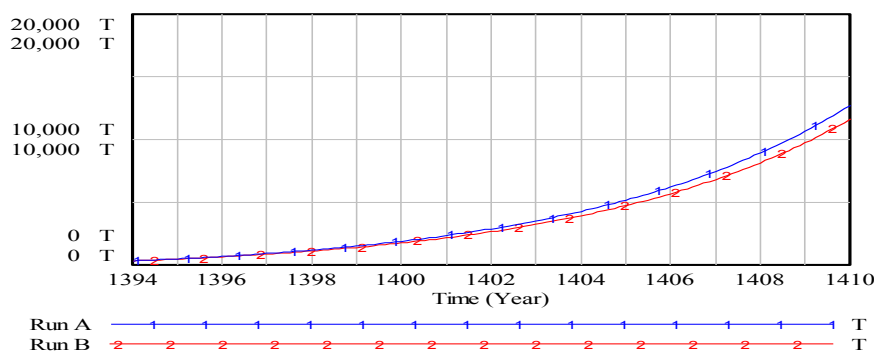
الف- تحلیل حساسیت اول: با افزایش پرداخت یارانه به سوخت های سبز، قیمت سوخت سبز کاهش می یابد. در شکل (۷) محور افقی زمان است و محور عمودی قیمت سوخت سبز با واحد تومان است. افزایش یارانه موجب کاهش قیمت سوخت زیستی در مقایسه با حالت پایه می گردد. این رفتار با منطق اقتصادی همخوانی دارد که یارانه به عنوان یک کاهش دهنده هزینه مؤثر بر قیمت نهایی مصرف کننده عمل می کند.



شکل (۷): نتایج حاصل از شبیه سازی اول



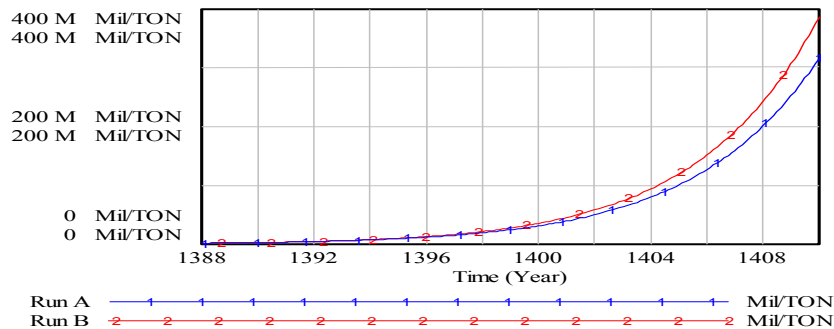
ب- تحلیل حساسیت دوم: با افزایش نرخ تبدیل پسماند فاضلاب به سوخت، قیمت سوخت سبز کاهش می‌یابد. در شکل (۸) محور افقی زمان است و محور عمودی قیمت سوخت سبز با واحد تومان است. یکی از پارامترهای فنی کلیدی در مدل، نرخ تبدیل پسماند فاضلاب به سوخت زیستی است. سناریوی بهبود این نرخ (به عنوان نمادی از پیشرفت فناوری) در مدل اجرا شد. مطابق انتظار و همان‌گونه که در شکل (۸) نمایش داده شده است، بهبود کارایی فرآیند تبدیل، تأثیر کاهشی بر قیمت تمام‌شده سوخت زیستی دارد.



شکل (۸): نتایج حاصل از شبیه‌سازی دوم

پ- تحلیل حساسیت سوم: با افزایش قیمت زیست توده ظرفیت تولید زیست توده افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش قیمت زیست‌توده ظرفیت تولید زیست‌توده افزایش می‌یابد. دلیل این امر به این موضوع برمی‌گردد که با افزایش قیمت زیست توده، سرمایه‌گذاری در این بخش بیشتر می‌شود و ظرفیت تولید بیشتری به تولید آن اختصاص می‌یابد.



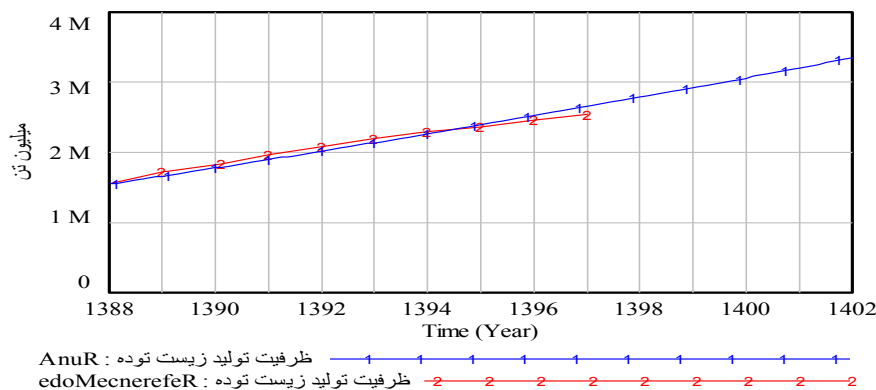
شکل (۹): نتایج حاصل از شبیه سازی سوم

۲-۵- ارزیابی و اعتبارسنجی مدل پویایی شناسی سیستمها

اعتبار مدل های شبیه سازی برای اطمینان از قابلیت اتکای نتایج آنها ضروری است. در این پژوهش، دو آزمون استاندارد اعتبارسنجی به کار گرفته شد. [۱،۲۴]

الف- آزمون رفتار مرجع : در این آزمون، خروجی مدل شبیه سازی شده با داده های واقعی تاریخی سیستم مقایسه می شود. شکل ۱۰، مقایسه بین داده های واقعی ظرفیت تولید زیست توده و مقادیر شبیه سازی شده توسط مدل را در بازه تاریخی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، مدل توانسته است روند کلی و دینامیک سیستم را با دقت قابل قبولی بازتولید کند. انطباق مناسب این دو منحنی، نشان دهنده صحت روابط علی و پارامترهای کالیبره شده در مدل است.

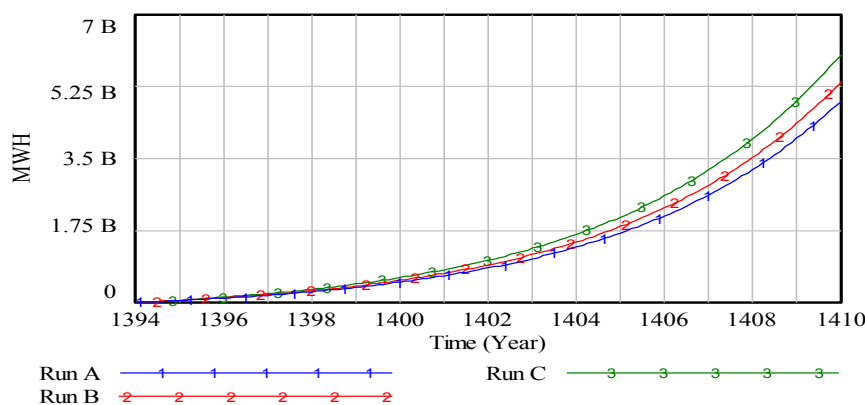
ظرفیت تولید زیست توده





شکل (۱۰): نتایج حاصل از واقعیت سنجی برای ظرفیت تولید زیست توده

ب- آزمون تحلیل حساسیت: این آزمون میزان حساسیت و پایداری رفتار مدل را در برابر تغییرات پارامترها می‌سنجد. تغییرات بزرگ در یک پارامتر کلیدی (مانند قیمت) باید منجر به تغییر در خروجی‌ها شود، اما نباید الگوی رفتاری پایه سیستم را دگرگون کند. براساس شکل ۱۱، با اعمال تغییرات شدید در قیمت سوخت سبز، مدل عکس‌العمل منطقی (تغییر در سطح ظرفیت) نشان داد، در حالی که الگوی پویای کلی سیستم دست‌نخورده باقی ماند. این نتیجه، اعتبار ساختاری مدل را تأیید می‌کند. [۲۴]



شکل (۱۱): نتایج آزمون تحلیل حساسیت برای ظرفیت تولید سوخت سبز

۳-۵- نتایج مدل برنامه ریزی ریاضی

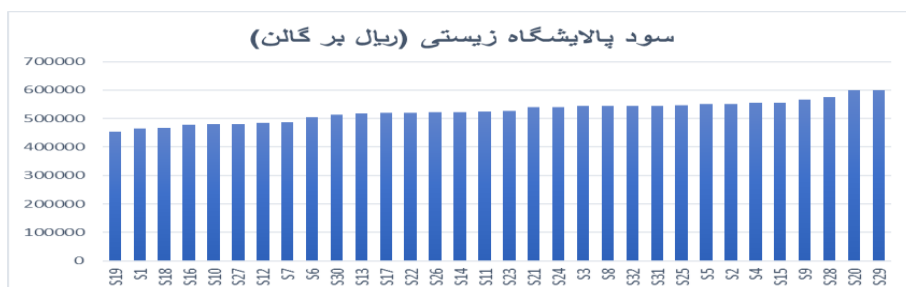
مدل MILP با استفاده از خروجی‌های ۳۲ سناریوی حاصل از مرحله پویایی‌شناسی سیستم‌ها (شامل قیمت، تقاضا و پتانسیل عرضه) اجرا گردید. هدف، یافتن طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین تحت این شرایط عدم قطعیت بود. کلیه مقادیر ظرفیت و تناژ ذکرشده در این بخش، بروندهای بهینه مدل MILP تحت سناریوهای ورودی هستند. نحوه مقاردهی به پارامترهای اصلی مدل برنامه ریزی ریاضی با الهام گرفتن از پژوهش آزاده و وفا آرائی [۲۵] و با توجه به آنکه جمع آوری اطلاعات دقیق بسیار دشوار بود، با نظر چندین خبره در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): مقادیر مربوط به پارامترهای مدل ریاضی

مجموعه ها



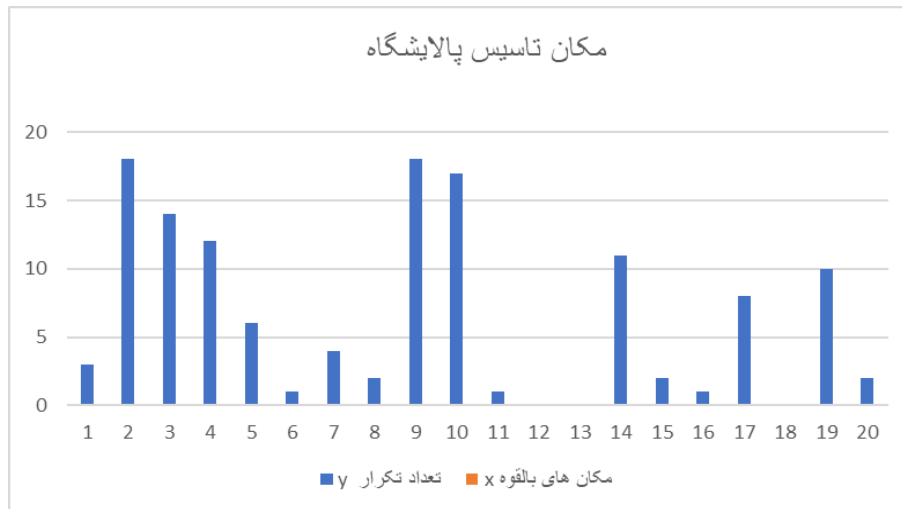
۵ میدان	I
۲۰ مکان بالقوه	F
۱۴ بازار مصرف	M
۳۲ سناریو	S
پارامترها	
۰.۲۶ دلار به ازای هر گالن	P_r
توزیع یکنواخت [۰,۳,۰,۳۵] دلار به ازای هر گالن	C_r
۴۰ کیلومتر بر ساعت	v
توزیع یکنواخت [۶,۲,۷,۲] میلیون دلار	f_f^F
توزیع یکنواخت [۰,۲,۰,۳] میلیون دلار	f_f^v
براساس داده های واقعی مکان های مورد تحلیل براساس کیلومتر	d_i^f
۱.۲ دلار به ازای هر کیلومتر	T_b^d
۲۹ دلار در ساعت	T_b^t
۱.۳ دلار به ازای هر کیلومتر	T_{lq}^d
۲۹ دلار در ساعت	T_{lq}^t
۵ دلار به ازای هر تن	Lu_b
۰.۲ دلار به ازای هر گالن	Lu_{lq}
توزیع یکنواخت [۰,۰۰۴,۰,۰۰۶] دلار به ازای هر گالن	α_m
۲۵ تن	Cap_b
۸۰۰۰ گالن	Cap_{lq}
۷۵٪	η
توزیع یکنواخت [۱۶۸,۳۲۹]	$Capr_f$
توزیع یکنواخت [۷۰,۱۰۰]	$Capi_m$
توزیع یکنواخت [۸۰,۱۲۰]	S_i^s
۱۰٪	MC
براساس ضریب ۲۰٪ از مصرف سوخت فسیلی و جمعیت هر شهر	D_m^s
توزیع یکنواخت [۰,۸,۱] دلار به ازای هر گالن	P_{ms}



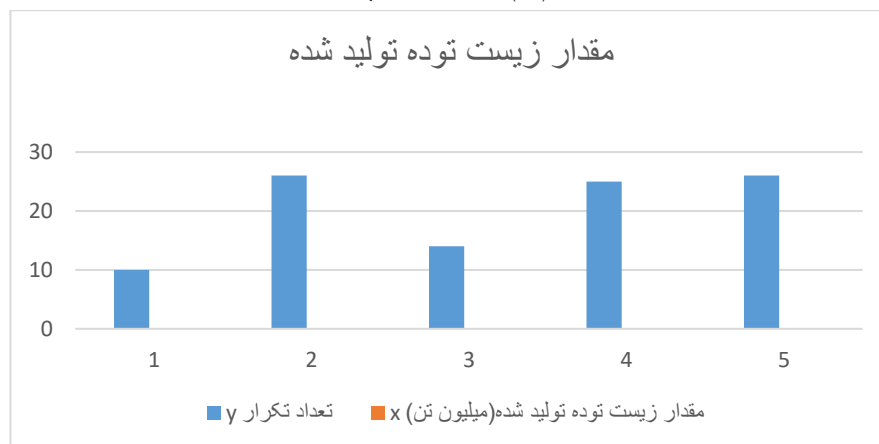
شکل (۱۲): مقدار سود پالایشگاه‌های زیستی

همان‌طور که اشاره شده است مقدار تابع هدف که همان بیشینه سازی سود پالایشگاه زیستی می‌باشد، به ازای هر سناریو بر حسب ریال بر گالن در شکل (۱۲) به نمایش درآمده است. کمترین مقدار تابع هدف (حداقل سود ممکن) مربوط به سناریو شماره ۱۹ یعنی ۴۵۳۱۱۱ ریال بر گالن و بیشترین مقدار تابع هدف (حداکثر سود ممکن) مربوط به سناریو شماره ۲۹ یعنی ۶۰۰۶۵۰ ریال بر گالن می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود ۲۰ نقطه توسط مدل برنامه‌ریزی ریاضی از سناریوهای طراحی شده شناسایی شده‌است که بیانگر مکان‌های بالقوه برای تاسیس پالایشگاه زیستی می‌باشد. هر کدام از این ۲۰ نقطه که تعداد تکرار بیشتری در بین ۳۲ سناریوی طراحی شده داشته باشد، مکان مناسب‌تری از لحاظ متغیرهای مهم اقتصادی جهت تاسیس پالایشگاه می‌باشد. مکان‌های شماره ۲ و ۹ با ۱۸ مرتبه تکرار از ۳۲ مرتبه ممکن دارای بیشترین قابلیت برای تاسیس پالایشگاه می‌باشد. و مکان‌های شماره ۱۲، ۱۳ و ۱۸ بدون مرتبه‌ای تکرار دارای کمترین قابلیت برای تاسیس پالایشگاه می‌باشد.



شکل (۱۳): مکان تاسیس پالایشگاه

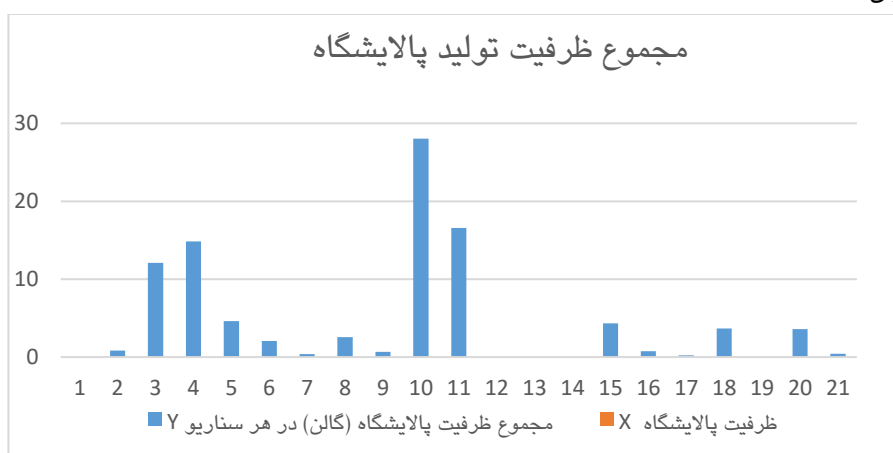


شکل (۱۴): مقدار زیست توده تولید شده (میلیون تن)

همان‌طور که مشاهده می‌شود ۵ نقطه توسط مدل برنامه‌ریزی از سناریوهای طراحی شده شناسایی شده که بیانگر مکان‌های تولید زیست توده بر حسب میلیون تن می‌باشد که هر کدام از این ۵ نقطه که تعداد تکرار بیشتری در بین ۳۲ سناریوی طراحی شده داشته باشد، مکان مناسب‌تری از جهت تامین ماده اولیه زیست توده برای تولید سوخت سبز می‌باشد. مکان‌های شماره ۲ و ۵ با ۲۶ مرتبه تکرار از ۳۲ مرتبه ممکن دارای بیشترین قابلیت برای تامین ماده

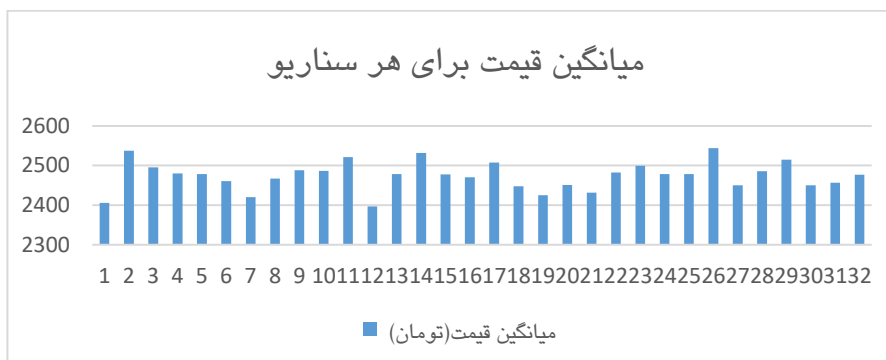


اولیه زیست توده می‌باشد. و مکان شماره ۱ با ۱۰ مرتبه تکرار از ۳۲ مرتبه ممکن دارای کمترین قابلیت برای تامین ماده اولیه زیست توده می‌باشد. همچنین جمع کل تناژ زیست‌توده تهیه شده در هر ۵ نقطه به ازای ۳۲ سناریو برابر با ۱۲۰.۷۲۶ میلیون تن برآورد شده‌است که در این بین نقطه شماره ۲، ۴ و ۵ به ترتیب با ۴۸ میلیون تن، ۳۰ میلیون تن و ۲۷ میلیون تن بیان شده‌است.



شکل (۱۵): ظرفیت تولید پالایشگاه

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ۲۰ نقطه توسط مدل برنامه‌ریزی ریاضی از سناریوهای طراحی شده شناسایی شده‌است که بیانگر مکان‌های بالقوه برای تاسیس پالایشگاه زیستی می‌باشد. هر کدام از این ۲۰ نقطه که پالایشگاه در آن تاسیس می‌شود دارای ظرفیت‌های تولید مختلفی است که در شکل بالا بر حسب گالن به ازای هر سناریو به نمایش درآمده است. بیشترین ظرفیت ممکن مربوط به پالایشگاه شماره ۱۰ و ۱۱ و کمترین ظرفیت مربوط به پالایشگاه شماره ۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۱۹ می‌باشد. همچنین ظرفیت کل تولید پالایشگاه به ازای هر ۳۲ سناریو مقدار ۹۵.۶۱۴ گالن برآورد شده است.



شکل (۱۶): میانگین قیمت برای هر سناریو

در مدل برنامه ریزی ریاضی ۱۴ منطقه به عنوان بازار نهایی مصرف سوخت سبز، به ازای ۳۲ سناریو طراحی شده است که میانگین قیمت عرضه سوخت سبز برحسب تومان برای این ۱۴ منطقه در ۳۲ سناریو ممکن در شکل (۱۶) به نمایش درآمده است. کمترین میانگین قیمت مربوط به سناریو ۱۲ با ۲۳۹۰ تومان و بیشترین میانگین قیمت مربوط به سناریو ۲۶ با ۲۵۴۵ تومان می باشد.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب تحلیلی و تصمیم محور برای طراحی و بهینه سازی زنجیره تأمین سوخت های زیستی نسل سوم مبتنی بر پسماند فاضلاب شهری با استفاده از رویکرد ترکیبی پویایی شناسی سیستم و برنامه ریزی ریاضی بوده است. تمایز اصلی این تحقیق با مطالعات پیشین، تلفیق تحلیل پویای سیاست های کلان با طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین در سطح عملیاتی و مکانی است که امکان ارزیابی هم زمان رفتار بلندمدت سیستم و تصمیم های سرمایه گذاری را فراهم می سازد.

نتایج حاصل از مدل پویایی شناسی سیستم نشان داد که متغیرهای سیاستی و فنی نقش تعیین کننده ای در رفتار اقتصادی سیستم دارند. به طور مشخص، افزایش سطح یارانه سوخت های سبز و بهبود نرخ تبدیل پسماند فاضلاب به سوخت زیستی، موجب کاهش قیمت سوخت زیستی و افزایش جذابیت اقتصادی آن می شود. یافته های شبیه سازی بیانگر آن است که افزایش قیمت سوخت سبز، منجر به رشد ظرفیت تولید آن می شود، به طوری که در سناریوی



افزایش دوبرابری قیمت، ظرفیت تولید سوخت زیستی حدود ۹/۲ درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان‌دهنده حساسیت مستقیم تولید به سازوکارهای قیمتی و سیاست‌های حمایتی است. در ادامه، خروجی‌های کمی مدل پویایی‌شناسی سیستم به‌عنوان ورودی مدل برنامه‌ریزی ریاضی مورد استفاده قرار گرفت و طراحی شبکه زنجیره تأمین با هدف بیشینه‌سازی سود پالایشگاه‌های زیستی انجام شد. نتایج مدل بهینه‌سازی نشان داد که سودآوری شبکه به‌شدت وابسته به مکان‌یابی صحیح پالایشگاه‌ها، ظرفیت تولید هر واحد و میزان زیست‌توده در دسترس در هر میدان است. سناریوهای مختلف نشان دادند که انتخاب مکان‌هایی که در چندین سناریوی بهینه تکرار شده‌اند، منجر به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش سود کل شبکه می‌شود. همچنین تغییر در پارامترهای کلیدی نظیر قیمت زیست‌توده و هزینه‌های تبدیل، تأثیر معناداری بر ساختار بهینه شبکه و میزان سود پالایشگاه‌ها دارد. در راستای نتایج مطالعه، پیشنهاد می‌شود:

۶-۱- پیشنهادهای سیاستی

نتایج مطالعات مدیریتی نشان می‌دهد اتخاذ رویکردهای تصمیم‌گیری راهبردی در زنجیره‌های تأمین سبز می‌تواند اثربخشی سیاست‌های حمایتی دولت و میزان مشارکت بخش خصوصی را به‌طور معناداری افزایش دهد [۲۲]. با توجه به نتایج حاصل از مدل پویایی‌شناسی سیستم و تأیید فرضیات پژوهش، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران حوزه انرژی و محیط‌زیست، حمایت هدفمند از تولید سوخت‌های زیستی را در اولویت برنامه‌های کلان قرار دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد افزایش یارانه پرداختی به سوخت‌های سبز، منجر به کاهش قیمت این سوخت‌ها و افزایش جذابیت اقتصادی آن‌ها در بازار انرژی می‌شود. بنابراین، طراحی سیاست‌های یارانه‌ای پایدار و بلندمدت برای سوخت‌های زیستی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا نماید.

همچنین با توجه به نقش تعیین‌کننده نرخ تبدیل پسماند فاضلاب به سوخت در کاهش قیمت سوخت زیستی، پیشنهاد می‌شود دولت با سرمایه‌گذاری در توسعه و بومی‌سازی فناوری‌های پیشرفته تصفیه و تبدیل پسماند، زمینه افزایش بهره‌وری این فرآیند را فراهم آورد. حمایت از پالایشگاه‌های زیستی از طریق تسهیلات مالی، معافیت‌های مالیاتی و تضمین خرید محصولات تولیدی نیز می‌تواند به تسریع توسعه این صنعت کمک نماید.



۶-۲- پیشنهادهای اجرایی و مدیریتی

بر اساس نتایج مدل برنامه‌ریزی ریاضی، مکان‌یابی بهینه پالایشگاه‌های زیستی و شناسایی نقاط مستعد تأمین زیست‌توده، تأثیر قابل‌توجهی بر سودآوری زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی دارد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در برنامه‌ریزی‌های اجرایی، احداث پالایشگاه‌های زیستی در مکان‌هایی انجام گیرد که بیشترین تکرار را در سناریوهای بهینه مدل داشته‌اند، زیرا این مناطق از نظر اقتصادی و لجستیکی دارای مزیت نسبی بالاتری هستند.

علاوه بر این، مدیریت یکپارچه پسماند فاضلاب شهری و هماهنگی میان شهرداری‌ها، شرکت‌های آب و فاضلاب و بخش خصوصی فعال در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های جمع‌آوری، حمل‌ونقل و تبدیل زیست‌توده گردد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که افزایش قیمت زیست‌توده، ظرفیت تولید آن را افزایش می‌دهد؛ از این رو، اتخاذ سیاست‌های تضمین خرید و قیمت‌گذاری مناسب برای زیست‌توده می‌تواند انگیزه سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در این حوزه را تقویت نماید.

۶-۳- پیشنهادهای پژوهشی (تحقیقات آینده)

با توجه به محدودیت‌های موجود، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، علاوه بر سطوح میانی و پایینی زنجیره تأمین سوخت زیستی، سطوح بالادستی زنجیره شامل فرآیندهای جمع‌آوری، تفکیک و پیش‌پردازش پسماندهای شهری نیز به‌صورت تفصیلی در مدل‌سازی لحاظ شود. همچنین بررسی هم‌زمان چندین فناوری تولید سوخت زیستی و مقایسه اثر ضرایب فنی مختلف، از جمله نرخ تبدیل زیست‌توده به سوخت، می‌تواند به بهبود دقت مدل و افزایش کارایی تصمیم‌گیری کمک نماید. توسعه مدل پیشنهادی در قالب یک چارچوب چندهدفه با در نظر گرفتن شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی، و نیز تحلیل عدم قطعیت‌ها با استفاده از رویکردهای استوار و فازی، از دیگر مسیرهای پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده در این حوزه است.



۷- منابع

- [۱] Esmaili, A., et al. (۲۰۲۴). Towards a circular economy: A comprehensive review of wastewater-based biofuel production and integrated supply chain modeling. *Journal of Cleaner Production*, ۴۳۴, ۱۴۰۱۱۲.
- [۲] Mohammadi, A., & Rezaei, J. (۲۰۱۹). Sustainable supply chain management and its impact on organizational performance. *Journal of Management Researches in Iran*, ۲۳(۴), ۱۰۱-۱۲۰. [in Persian]
- [۳] Khoshtandar, S. (۲۰۱۶). Design and management of sustainable biomass-bioenergy supply chains. PhD Dissertation, Shahid Beheshti University. [in Persian]
- [۴] Hosseini, S. M., & Karimi, B. (۲۰۲۰). Application of mathematical optimization in supply chain network design under uncertainty. *Journal of Modern Research in Decision Making*, ۵(۱), ۸۹-۱۰۸. [in Persian]
- [۵] Rinna, F., Buono, S., Cabanelas, I. T. D., Nascimento, I. A., Sansone, G., & Barone, C. M. A. (۲۰۱۷). Wastewater treatment by microalgae can generate high quality biodiesel feedstock. *Journal of Water Process Engineering*, ۱۸, ۱۴۴-۱۴۹.
- [۶] Mohseni, S., & Pishvaei, M. (۲۰۱۸). Design and optimization of green fuel supply chain from municipal sewage waste using a hybrid metaheuristic approach. *Energy Policy and Planning Research*, ۴(۱۲), ۱۱۳-۱۴۵. [in Persian]
- [۷] Amin-Salehi, F., Norouz, A., & Rezaei-Pour, K. (۲۰۱۸). Prioritizing municipal waste-to-biofuel conversion technologies in Iran. *Energy Policy and Planning Research*, ۴(۱۳), ۱۲۳-۱۵۹. [in Persian]
- [۸] Soleimani, M., & Armanmehr, M. (۲۰۱۹). Economic policy impacts on renewable energy deployment in Iranian power plants. *Journal of Fiscal and Economic Policies*, ۷(۲۸), ۳۵-۵۹. [in Persian]
- [۹] Zarafati, M., & Golmohammadi, A. (۲۰۲۱). Mathematical optimization of microalgae-based biofuel supply chain: A case study of Iran. *Proceedings of the National Conference on Optimization*. [in Persian]
- [۱۰] Fredendall, L. D., & Hill, E. (۲۰۱۶). *Basics of supply chain management*. CRC Press.
- [۱۱] Huo, B., Zhang, C., & Zhao, X. (۲۰۱۵). The effect of IT and relationship commitment on supply chain coordination. *Information & Management*, ۵۲(۶), ۷۲۸-۷۴۰.



- [۱۲] Wolf, J. (۲۰۱۴). The relationship between sustainable supply chain management, stakeholder pressure and corporate sustainability performance. *Journal of Business Ethics*, ۱۱۹(۳), ۳۱۷-۳۲۸.
- [۱۳] Azizi, A., & Rahmani, M. (۲۰۲۱). A multi-criteria decision-making approach for sustainable supply chain design. *Journal of Modern Research in Decision Making*, ۶(۲), ۴۵-۶۲. [in Persian]
- [۱۴] Kumar, R., et al. (۲۰۲۳). Life cycle assessment and techno-economic analysis of biodiesel production from municipal sewage sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۸۳, ۱۱۳۴۵۶.
- [۱۵] Mohseni et al. (۲۰۱۸). *Biofuels: Definitions, applications, and technologies*. Tehran University Press. [in Persian]
- [۱۶] Wang, Y., et al. (۲۰۲۴). Advanced catalytic conversion of wastewater lipids to renewable biodiesel: Mechanisms, kinetics, and sustainability assessment. *Chemical Engineering Journal*, ۴۸۸, ۱۵۰۸۷۶.
- [۱۷] Mohammadi, H. (۲۰۲۱). *Planning a Municipal Solid Waste Management System for Developing Waste-to-Energy Systems Using a Combined System Dynamics-Mathematical Programming Approach* (Doctoral dissertation). Amirkabir University of Technology, Tehran. Retrieved from Iranian Theses Database (www.ganj.irandoc.ac.ir). [in Persian]
- [۱۸] Zarafati, M. E., & Golmohammadi, A. M. (۲۰۲۱). Providing a Mathematical Model for Optimization in the Microalgae-Based Biofuel Supply Chain Network: A Case Study of Iran. *The First National Conference on Optimization and Modern Problem-Solving Methods*, Nahavand. Retrieved from <https://civilica.com/doc/۱۲۵۸۱۹۶> [In Persian]
- [۱۹] Babaei-Meybodi, H., & Delshad, Z. (۲۰۱۷). A system dynamics model for evaluating green supply chain management. *Value Chain Management Journal*, ۲(۶), ۱-۱۸. [in Persian]
- [۲۰] Carvalho, F., et al. (۲۰۲۴). The role of policy instruments in fostering the biofuels market: A system dynamics analysis for the European Union. *Energy Policy*, ۱۸۵, ۱۱۳۹۴۵.
- [۲۱] Saravanan, A., & Senthil, P. (۲۰۲۲). Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۲۴۴, ۲۲۳-۲۶۸.
- [۲۲] Sarkar, B., Mridha, B., Pareek, S., Sarkar, M., & Thangavelu, L. (۲۰۲۱). A flexible biofuel and bioenergy production system with transportation disruption under a sustainable supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, ۳۱۷, ۱۲۸۰۷۹.



- [۲۳] Ghaderi, H., et al. (۲۰۲۰). A system dynamics approach to analyzing bioethanol and biodiesel supply chains. *International Journal of Energy Technology and Policy*, ۱۶(۱), ۱-۲۵.
- [۲۴] Saavedra, M. R., et al. (۲۰۱۷). Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۸۲, ۲۴۷-۲۵۹.
- [۲۵] Azadeh, A., & Arani, H. V. (۲۰۱۶). Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics--mathematical programming approach. *Renewable Energy*, ۹۳, ۲۸۳-۴۰۳.