

## زنجیره تأمین لجن فاضلاب با رابطه متقابل آب و انرژی تحت شرایط اختلال: یک مدل استوار

### سناریو محور

هانی گیلانی<sup>۱\*</sup>، هادی صاحبی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶)

### چکیده

در عصر حاضر کمبود انرژی و نیز کاهش ذخایر آب و خطر خشک‌سالی، به دو چالش جدی در سراسر جهان تبدیل شده است. هدف از این پژوهش مطالعه تأثیر رابطه متقابل آب و انرژی در سیاست‌گذاری‌های کشوری و برنامه‌ریزی‌های هدفمند دولتی است. به همین منظور در این مطالعه یک مدل استوار چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین قابل اطمینان تولید انرژی زیستی از طریق فرآیند هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب تحت اختلال جزئی به دنبال وقوع خشک‌سالی ارائه شده است. تابع هدف اقتصادی به بیشینه‌سازی سود و تابع هدف زیست محیطی به بیشینه‌سازی بازدهی زیست محیطی فرآیند، می‌پردازد. به منظور بررسی همه‌جانبه کارایی مدل پیشنهاد شده، چند استان از مناطق خشک، نیمه‌خشک و مرطوب کشور به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به‌کارگیری مدل پیشنهادی نشان می‌دهد احداث نیروگاه در دو استان اصفهان و گلستان امکان‌پذیر است. از طرف دیگر نشان داده شده است که رویکرد پیشنهادی نسبت به رویکردهای کلاسیک برنامه‌ریزی غیرقطعی تاب‌آوری بیشتری نسبت به تغییرات مؤلفه‌های غیرقطعی دارد. نتایج حاصل به مدیران کلان کشوری در استفاده بهتر از تمام منابع اولیه در مدیریت بهتر مشکلات ناشی از خشک‌سالی و اثرات ناگوار زیست محیطی صنایع پیشرفته کمک شایانی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: رابطه متقابل آب و انرژی، طراحی زنجیره تأمین انرژی زیستی، توسعه پایدار، زیست توده، بهینه‌سازی استوار

### ۱- مقدمه

زیست محیطی می‌شوند [۳]. امروزه معضل آب و انرژی به‌عنوان دو منبع طبیعی مهم و حیاتی برای بیشتر نقاط دنیا مطرح است. علی‌رغم پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، منابع متعدد انرژی‌های تجدیدناپذیر وجود دارد که استفاده از آنها روزبه‌روز در حال گسترش است. برخلاف انرژی، پیدا کردن منابع جدید یا جایگزین برای آب بسیار دشوار است. وابستگی بین این دو منبع حیاتی، آب و انرژی، علاوه‌بر جوامع دانشگاهی در صنعت نیز روزبه‌روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. پس از آنکه خبرگان آب و انرژی هرکدام جداگانه سعی در حل معضلات مربوط به آب و انرژی داشتند، کم‌کم همه آنها به این نکته پی بردند که این دو منبع حیاتی مستقل از یکدیگر نیستند. پیوند بین آب و انرژی را اصطلاحاً رابطه آب و انرژی می‌گویند [۴]. فهم جامع و عمیق رابطه آب و انرژی، به منظور دستیابی به مدیریت پایدار منابع امری ضروری است. اگرچه هم آب و هم انرژی محدودیت‌هایی برای یکدیگر ایجاد می‌کنند اما با استفاده از یک رویکرد مدیریت یکپارچه منابع، می‌توانند به‌منزله فرصت‌هایی با سود دوطرفه

محدودیت و فناپذیری منابع فسیلی و نیز انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی و به‌دنبال آن افزایش دی‌اکسید کربن در اتمسفر و پیامدهای سوء ناشی از آن، موجب گردیده است تا سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان بخش انرژی با انجام مطالعات ساختاری، جایگزینی حامل‌های انرژی و حرکت به سوی منابع تجدیدپذیر انرژی و سوخت‌های پاک را در رؤس برنامه‌های خود قرار دهند در میان انواع انرژی‌های نو، سوخت‌های سبز بر پایه زیست‌توده اهمیت فراوانی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند [۱]. دلیل این موضوع این است که سوخت‌های زیست‌توده بدون تغییر در ناوگان حمل و نقل می‌توانند جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند [۲]، به‌علاوه به‌علت جذب کربن دی‌اکسید هنگام رشد، منجر به کاهش نرخ خالص کربن دی‌اکسید ورودی به اتمسفر و به‌تبع آن کاهش مخاطرات

\* رایانامه نویسنده مسئول: hani\_gilani@ind.iust.ac.ir

اهمیت است که نفت در هر حال، نایاب خواهد بود و قیمت آن افزایش خواهد یافت. هر کشوری که وارد عرصه سوخت‌های زیستی شود و بتواند بخشی از نفت خود را جایگزین کند، قطعاً نفت بیشتری برای فروش خواهد داشت. بخشی از محصولات نفتی با کاربری‌های خاص، هنوز جایگزین ندارند. لذا هر قدر فرآورده‌های نفتی که امکان جایگزینی دارند کمتر مصرف شوند، امکان تولید محصولات نفتی دیگر بیشتر وجود خواهد داشت. مسائل مربوط به آلودگی نیز کماکان پابرجا هستند و با مصرف سوخت‌های زیستی آلودگی نیز کاهش خواهد یافت. از این رو برپایی یک رویکرد زنجیره تأمین تولید انرژی از لجن فاضلاب شهری و محصولات جانبی آن برای کشورهایی از جمله ایران که دارای منابع فسیلی فراوانی می‌باشند می‌تواند مصداق بارزی از مطالب پیش گفته باشد.

مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدف و چند دوره‌ای برای طراحی زنجیره تأمین هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب است که از لجن فاضلاب به‌عنوان ماده اصلی و از گلیسرین خام و پساب کارخانه تولید روغن زیتون به‌عنوان ماده فرعی استفاده کرده است. بیوگاز تولید شده در این فرآیند در نیروگاه‌های بیوگاز سوز به برق تبدیل شده و صرف تأمین نیاز داخل می‌شود. همچنین در قالب تابع هدف دوم به بررسی بعد زیست محیطی مدل مذکور پرداخته شده است.

در ادامه ابتدا در بخش دوم مروری بر ادبیات موجود در حوزه زنجیره تأمین زیست‌توده انجام شده، سپس در بخش سوم تعریف مسئله و مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب آورده شده است. در بخش پنجم مدل روی یک مورد دنیای واقعی اجرا و حل شده است و در نهایت در بخش ششم نتایج و پیشنهادهای آتی آورده شده است.

## ۲- مرور ادبیات

در سال‌های اخیر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی برای سیستم‌های انرژی سنتی و راه‌حلی برای سوخت‌های فسیلی محدود و چالش‌های زیست‌محیطی ایجاد شده توسط این منابع در نظر گرفته شده است. زیست‌توده نیز یکی از این انرژی‌های جایگزین است که منابع آن بسیار متنوع بوده و به دلیل مزایای فراوان توجه زیادی را به خود جلب کرده است. به موازات تنوع منابع، فرآیندهای مختلفی نیز همچون هضم بی‌هوازی، پیرولیز، گازی‌سازی و... برای تبدیل منابع زیست‌توده به برق، گرما یا انواع سوخت‌های مایع و گاز وجود دارد. هر کدام از

برای یکدیگر تلقی شوند [۵]. هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب یک روش رایج و اثربخش برای تولید انرژی است که به‌کارگیری آب شیرین را حداقل کرده و نیز روشی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست برای تولید انرژی است [۶]. به‌طور کلی با رشد سریع جمعیت و نیز پدیده گرمایش جهانی، مسئله بحران آب و خطر خشک‌سالی به چالشی جدی در سراسر جهان تبدیل شده است. ایران کشوری است که بر روی کمربند خشک کره زمین قرار گرفته است. تقریباً ۷۰٪ از سطح کشور را مناطق خشک و نیمه‌خشک دربر گرفته است. در حال حاضر ایران به‌طور جدی با بحران آب دست و پنجه نرم می‌کند. متوسط بارش در کشور ۲۵۰ میلی‌متر در سال است که کمتر از یک‌سوم متوسط بارش جهانی (۸۳۱ میلی‌متر در سال) و حدوداً یک‌سوم متوسط بارش در آسیا (۷۳۲ میلی‌متر در سال) است [۷]. در سال ۲۰۰۹، ناسا گزارشی پیرامون گرمایش جهانی و خشک‌سالی در ۳۰ سال آینده منتشر کرده است که نشان می‌دهد ۴۵ کشور جهان در معرض خشک‌سالی شدید هستند و در صورت عدم ذخیره منابع آبی دچار بحران کشاورزی و دامداری می‌شوند. براساس این گزارش، در فهرست ۴۵ کشور در معرض خطر، ایران در رتبه چهارم قرار گرفته است. گزارش ناسا تأکید می‌کند که بعید نیست بین ۳۰ تا ۴۰ سال آینده بخش‌های وسیعی از ایران به بیابان مطلق تبدیل شوند. از این رو رشد و وقوع خشک‌سالی می‌تواند باعث ایجاد اثرات مخربی از جمله توانایی کشت محصولات کشاورزی و کاهش میزان محصولات جانبی این فعالیت در زنجیره تأمین تولید انرژی‌های زیستی نیز گردد.

از منظر سیاسی و راهبردی، یکی از مهم‌ترین توانمندی‌ها و نقاط قوت کشورهای دارای سوخت فسیلی، قدرت آنها در بازار انرژی‌های فسیلی جهان است که کشورهای پیشرفته در حال حاضر به آن وابسته‌اند. از سوی دیگر محدود بودن این منابع همواره تهدیدی برای بقاء آن بوده است و از سویی مسئله گرم شدن جهانی که به حد بحرانی رسیده و دیگر مسائل زیست محیطی سبب شده است استفاده از انرژی‌های فسیلی در معرض انتقادهای بنیادین قرار داشته باشد، از این رو رویکرد محدود کردن استفاده از سوخت‌های فسیلی امری اجتناب‌ناپذیر است. با این وجود توجه به مسائل زیست‌محیطی مرتبط با تولید انرژی از لجن فاضلاب و فعالیت‌های هم‌راستای آن در برهه مواجهه بشر با مسئله آلودگی و گرمایش کره زمین امری ضروری به نظر می‌رسد [۸].

درباره تولید سوخت‌های زیستی و همچنین تولید انرژی از لجن فاضلاب شهری توسط کشورهای نفت‌خیز این نکته حائز

عرضه/ تقاضا و نیز وقوع اختلال در تسهیلات چه از نوع کلی که منجر به از رده خارج شدن تسهیل باشد و چه اختلال جزئی که منجر به کاهش ظرفیت تسهیل شود بهبودپذیر باشد طراحی کردند.

در این پژوهش وقوع اختلال جزئی در تأمین مواد اولیه به دنبال پیدایش خشک‌سالی مورد مطالعه قرار گرفته است. بنا بر دانش ما، در حوزه زنجیره تأمین زیست‌توده تا به حال هیچ پژوهشی به موضوع بررسی وقوع اختلال نپرداخته است. همچنین در این پژوهش اختلال متوجه تأمین مواد و نه فعالیت تسهیلات است. در عصر حاضر با رشد سریع جمعیت، آلودگی‌های ایجاد شده به واسطه پیشرفت تکنولوژی و فعالیت‌های انسانی و نیز تغییرات اقلیمی و پدیده گرمایش جهانی، بحران آب در سراسر جهان در حال شدت یافتن است. فلذا در برهه فعلی در نظرگیری اختلال به دنبال وقوع خشک‌سالی برای طراحی زنجیره تأمین کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

با توجه به مطالب گفته شده، یکی از ابعاد مهم بررسی عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین، کاهش میزان مصرف آب و یا آلودگی‌زدایی از آن به جهت استفاده مجدد از آب است. هر چند که بیشتر مدل‌های زنجیره تأمین زیست‌توده، مباحث زیست‌محیطی را در قالب میزان انتشار کربن دی‌اکسید در نظر گرفته‌اند. به طور مثال، عثمانی و همکاران [۱۶] یک مدل چند هدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین اتانول زیستی از انواع مختلف زیست‌توده‌های سلولزی ۲ ارائه دادند و بحث زیست‌محیطی را در قالب میزان گاز کربن دی‌اکسید وارد شده در محیط زیست در نظر گرفتند. در این میان مقالات معدودی، به اختصار در مدل خود به مصرف آب توجه کرده‌اند. برای مثال، گونلا و همکاران [۱۷] یک مدل طراحی زنجیره تأمین اتانول زیستی از هر دو نسل اول و دوم طراحی کردند و در قسمت محدودیت‌های مدل برای کل میزان آب مصرفی در زنجیره یک حد بالا قائل شدند. در فرآیند هضم بی‌هوازی، آب نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند و خوراک هاضم باید به صورت محلول بوده و بین ۷ تا ۹ درصد غلظت داشته باشد،

در مطالعات بعدی نیز استفاده از سایر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است استفاده شده است. به عنوان مثال، دهقانی و همکاران [۱۸] در مطالعه خود به زنجیره تأمین سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی برای تأمین انرژی پرداخته‌اند، آنها با ارائه یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها به مکان‌یابی بالقوه نیروگاه‌های خورشیدی پرداخته و در نهایت مدل زنجیره تأمین خود را بر پایه برنامه‌ریزی استوار سناریو محور پیاده‌سازی کردند. محسنی و

این فرآیندها شرایط خاص خود را دارند و با بعضی از انواع زیست‌توده سازگاری بیشتری دارند [۹]. تا به حال پژوهش‌هایی در زمینه تولید انرژی با هر یک از فرآیندهای ذکر شده انجام شده است. برای مثال، معروف الزمان و همکاران [۱۰] یک زنجیره تأمین تبدیل پسماندهای جنگل به سینگاز از طریق فرآیند گازی سازی ارائه دادند. در زمینه فرآیند هضم بی‌هوازی نیز مطالعات اندکی انجام شده است. برای مثال، ییلماز و همکاران [۱۱] مدلی قطعی برای طراحی زنجیره تأمین تولید الکتروسیته از فضولات حیوانی و دانه‌های انرژی با استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی را ارائه دادند. در ادامه به منظور تکمیل کار قبلی خود، ییلماز و همکاران [۱۲] با استفاده از همان ترکیب زیست‌توده، یک هدف دیگر به مدل خود اضافه کردند و مدل را از حالت تک هدفی، بیشینه کردن سود کلی زنجیره تأمین، به یک مدل دو هدفی تبدیل کردند. هدف دوم بیشینه‌سازی عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین زیست‌توده و به صورت کمینه کردن میزان زیست‌توده جمع‌آوری نشده است. آنها سپس مدل قبلی خود را توسعه داده و به مدل زنجیره تأمین زیست‌توده خود سیستم‌های گرمایش ناحیه‌ای نیز اضافه کردند [۱۳] اما در اینجا هم منابع خود را تغییر نداده و از همان فضولات حیوانی و دانه‌های انرژی استفاده کردند.

در حال حاضر هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب موجود در تصفیه خانه‌ها متداول‌ترین شکل استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی است، چرا که یک روش دوستدار محیط‌زیست است و نیز می‌تواند هزینه‌های بازیافت را کاهش دهد. همچنین موجب تولید انرژی و ایجاد ارزش افزوده از پسماند و نیز تهیه کود به مراتب غنی‌تر نسبت به لجن اولیه خواهد شد. بنا بر مطالعات ما تاکنون مدلی برای طراحی زنجیره تأمین هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب ارائه نشده است.

در ادبیات موجود مدل‌های طراحی زنجیره تأمین، غالباً فرض شده که تسهیلات همیشه در دسترس و قابل اطمینان هستند یا شرایط برای فعالیت طبیعی زنجیره همیشه مساعد است، حال آنکه در عمل، همیشه احتمال وقوع ریسک و اختلال وجود دارد. دسته‌بندی‌های متفاوتی برای عدم قطعیت تعریف شده است. از یک منظر عدم قطعیت به دودسته (۱) عدم قطعیت معمول کسب و کار (فعالیت) و (۲) بحران تقسیم می‌شود. تا به حال مطالعات متعددی در زمینه عدم قطعیت در زنجیره تأمین انجام شده است. برای مثال ترابی و همکاران [۱۴] یک مدل طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته با در نظر گرفتن وقوع اختلال در ظرفیت تسهیلات از هر دو نوع جزئی و کلی در نظر گرفتند. جبارزاده و همکاران [۱۵] یک مدل زنجیره تأمین که در برابر تعلیق در

۳- بررسی بعد زیست محیطی زنجیره تأمین مذکور از حیث بیشینه‌سازی آلودگی‌زدایی از آب که یک رویکرد جدید در حوزه ابعاد زیست‌محیطی زنجیره تأمین است.

۴- بررسی کارایی مدل با انجام یک مطالعه موردی در مناطق مختلف کشور ایران با اقلیم‌های متفاوت خشک/ نیمه خشک/ مرطوب.

### ۳- تعریف مسئله

#### ۳-۱- فرآیند هضم بی‌هوازی

یکی از انواع فرآیندهای موجود برای تبدیل زیست‌توده به انرژی هضم بی‌هوازی است که در واقع تجزیه میکروبی مواد آلی در غیاب اکسیژن است. حاصل نهایی این فرایند گازی است قابل اشتعال، که بیوگاز نام دارد [۲۴]. بیوگاز می‌تواند برای تولید برق یا حرارت مورد استفاده قرار گیرد. برای تبدیل بیوگاز به برق می‌توان از واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت استفاده کرد [۱]. برای انجام این فرآیند نیاز است که مواد به‌صورت یک محلول همگن به هاضم خوراک‌دهی شود و بدین ترتیب هضم مشترک بی‌هوازی به معنای هضم بی‌هوازی محلول همگنی است که شامل دو یا تعداد بیشتری از مواد است.

هضم بی‌هوازی یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای تثبیت لجن فاضلاب در تصفیه‌خانه‌هایی با ظرفیت ورودی بیش از ۲۰۰۰۰ مترمکعب در روز است. این فرآیند مزایای محیط زیستی بسیار همچون تولید انرژی تجدیدپذیر، امکان بازیافت مواد مغذی و کاهش حجم پسماند می‌شود. البته هضم مشترک لجن فاضلاب راهکار بهتری است چرا که منجر به افزایش مقدار بیوگاز تولیدی بدون افزودن تسهیلات جدید خواهد شد [۶].

#### ۳-۲- آلودگی‌زدایی از آب

اکسیژن خواهی شیمیایی، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش آلودگی فاضلاب است. اکسیژن خواهی شیمیایی یک فاضلاب، پساب و یا آب آلوده عبارت است از میزان اکسیژن مورد نیاز برای اکسیداسیون مواد قابل اکسیداسیون موجود در آن. هرچه مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی یک فاضلاب بیشتر باشد مقدار مواد خارجی موجود در آن، که باعث آلودگی آن می‌شود نیز بیشتر خواهد بود. از نکات مثبت فرآیند هضم بی‌هوازی کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی فاضلاب در طی فرآیند است، بر همین اساس در آزمایش‌های هضم مشترک بی‌هوازی، نسبت بهینه ترکیب مواد بر اساس دو معیار میزان تولید گاز و درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی فاضلاب تعیین می‌شود.

همکاران [۱۹] نیز مطالعه‌ای بر مبنای ریز جلبک‌ها در تأمین انرژی زیستی پی‌ریزی کردند که با استفاده از برنامه‌ریزی سناریو محور استوار با عدم قطعیت موجود در مسئله برخورد کردند.

در مطالعاتی دیگر از نیشکر به‌منظور خوراک برای تولید بیواتانول استفاده شد که از برجسته‌ترین این مطالعات می‌توان به مطالعه گیلانی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۰ میلادی اشاره کرد که با ارائه یک مدل سه هدفه یک شبکه زنجیره تأمین پایدار را طراحی کردند و در برخورد با مؤلفه‌های غیرقطعی از برنامه‌ریزی امکانی استوار بهره بردند. مطالعه دوم مطالعه شوازی پور و همکاران [۲۱] است که در کشور آفریقای شمالی پیاده‌سازی شده است و هر سه بعد پایداری را مورد توجه قرار داده است. ربانی و همکاران [۲۲] نیز مدلی برای بهره‌برداری از لجن فاضلاب در تولید انرژی ارائه دادند و در هر سه بعد پایداری مطالعه خود را پیاده‌سازی کردند اما مطالعه آنها نیز از ارتباط آب و انرژی غفلت داشت.

در مدل‌های پیشین ارائه شده برای زنجیره تأمین این فرآیند، از آب شیرین استفاده شده است اما در مدل پیش‌رو غالب مواد اولیه مورد نیاز پسماند و پساب است که منجر به کمینه کردن میزان آب شیرین مصرفی خواهد شد. همچنین تابع هدف دوم، تابع هدف بیشینه‌سازی بازده زیست‌محیطی فرآیند است که بر مبنای بیشینه‌سازی آلودگی‌زدایی از آب تعریف شده است و از این جهت رویکرد جدیدی در حوزه مسائل زیست‌محیطی است.

در مدل‌های زنجیره تأمین زیست‌توده، داشتن مطالعه موردی برای بررسی صحت مدل بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش نیز چندین استان کشور به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در ایران سه نوع اقلیم خشک، نیمه‌خشک و مرطوب وجود دارد که در این پژوهش با انتخاب استان‌هایی از هر اقلیم، شدت تأثیر خشک‌سالی بر تأمین مواد در هر یک از مناطق بررسی شده است.

با توجه به‌مرور انجام شده در ادبیات موجود در حوزه زنجیره تأمین زیست‌توده و یافتن شکاف‌های تحقیقاتی موجود، می‌توان گفت نوآوری‌های انجام شده در این پژوهش عبارت‌اند از:

۱- طراحی زنجیره تأمین هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب که روشی اقتصادی، دوستدار محیط‌زیست و بر مبنای حداقل استفاده از آب شیرین است.

۲- در نظر گرفتن اختلال جزئی به‌دنبال وقوع خشک‌سالی که در زمان حاضر یکی از محتمل‌ترین بلاها در سطح جهان و خصوصاً ایران است.

جدول (۱): مرور ادبیات

مرجع	افق زمانی		مطالعه موردی	نوع خوراک	محصول نهایی	تابع هدف			رویکرد برنامه ریزی غیرقطعی	رسیدگی به هم بست آب و انرژی
	تک دوره‌ای	چند دوره‌ای				اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی		
[۹]			هند	زباله زیستی	سوخت زیستی				-	
[۱۰]	✓		آمریکا	زیست توده	سوخت زیستی	✓			-	
[۱۱]	✓		ترکیه	زباله زیستی	گاز زیستی	✓			-	
[۱۲]		✓	ترکیه	زیست توده و زباله زیستی	گاز زیستی و الکتروسیسته	✓			آنالیز حساسیت	
[۱۳]		✓	ترکیه	دانه‌های زیستی-زباله زیستی		✓		✓	فازی	
[۱۶]		✓	آمریکا	زیست توده	بیواتانول	✓	✓		استوک استیک	
[۱۷]		✓	آمریکا	زیست توده	بیواتانول	✓	✓		استوک استیک	
[۲۰]		✓	ایران	نیشکر	بیواتانول	✓	✓	✓	استوار امکانی	
[۱۸]		✓	ایران	خورشید	الکتروسیسته	✓			استوار سناریو محور	
[۱۹]		✓	ایران	ریز جلبک	بیودیزل	✓			استوار سناریو محور	
[۲۱]	✓		آفریقای شمالی	نیشکر	بیواتانول	✓	✓	✓	استوک استیک	
[۲۲]		✓	ایران	لجن فاضلاب	بیواتانول	✓	✓	✓	-	
[۲۳]		✓	ایران	لجن فاضلاب	بیودیزل	✓			استوار داده محور	
پژوهش حاضر		✓	ایران	پسماند زیستی- پسماند روغن	گرما و الکتروسیسته	✓	✓		برنامه ریزی استوار سناریو محور	✓

## ۳-۳- مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین

## ۳-۳-۱- مواد اولیه مورد نیاز

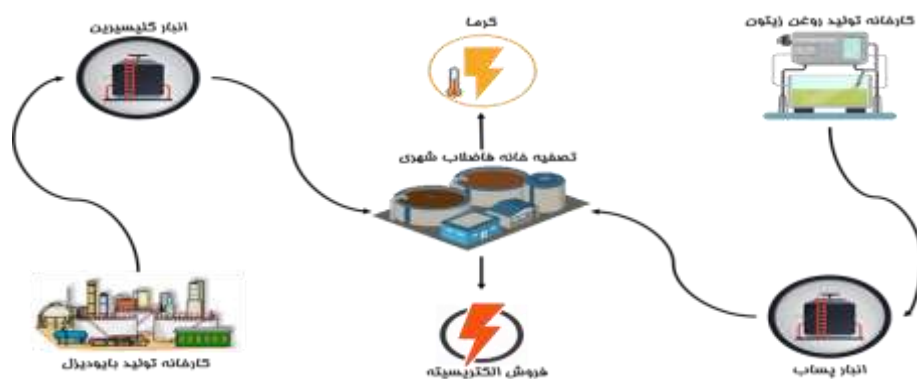
• ماده اصلی: ماده اصلی این فرآیند لجن فاضلاب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری است. مشخصات لازم برای این ماده همچون درصد جامدات کل و ... در مقاله پایه آورده شده است. همچنین بنا بر آزمایش طراحی شده ۹۵٪ از خوراک هاضم حاوی لجن فاضلاب و ۵٪ حاوی ماده فرعی است.

• ماده فرعی: در مقاله کواکی و همکاران سه نوع ماده پساب کارخانه روغن زیتون، پساب تولید پنیر و گلیسیرین خام - که محصول جانبی تولید بایودیزل است - به‌عنوان ماده فرعی انتخاب شده و هر بار یکی از این مواد به لجن اضافه و فرآیند انجام می‌شود. سپس خروجی فرآیند و بازده آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش بر اساس شرایط مطالعه موردی، تنها از دو ماده گلیسیرین خام و پساب کارخانه روغن زیتون استفاده شده است.

در ادامه نیز برای هر یک از کارخانه‌های روغن زیتون و بایودیزل پارامتری با عنوان درصد همکاری تعریف شده است که بیانگر کسری از میزان همکاری هر کارخانه برای توسعه زنجیره تأمین پیشنهادی است. این پارامتر که تحت شرایط مختلف می‌تواند تغییر کند به واقع‌گرایی مدل ریاضی در صنعت کمک شایانی خواهد کرد.

زنجیره تأمین پیشنهادی از سه سطح تشکیل شده است. سطح اول که مرتبط با تأمین خوراک برای هاضم است از دو منشأ قابل حصول است؛ خوراک اول، گلیسیرین تولیدی از کارخانه‌های بایودیزل و دومی پساب کارخانه‌های روغن زیتون است. سطح دوم زنجیره تأمین حاضر مرتبط با جمع‌آوری خوراک‌ها از مراکز تأمین در انبارها است. این انبارها که در طی حل مدل پیشنهادی تصمیم بر ساخت آنها گرفته خواهد شد، مسئول جمع‌آوری خوراک برای هاضم هستند. لایه سوم انتقال خوراک‌های جمع‌آوری شده به سمت تصفیه‌خانه فاضلاب شهری را شامل می‌شود که مکان این تسهیلات نیز در مدل تعیین خواهد شد. در نهایت بعد از ورود خوراک به هاضم، دو شکل از انرژی شامل گرمایی و الکتریسیته قابل استحصال است که فرآیند فروش الکتریسیته برای زنجیره درآمدزایی خواهد داشت. در این راستا دو هدف بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش الکتریسیته و بیشینه‌سازی اثرات مثبت زیست‌محیطی، برای زنجیره تأمین پیشنهادی تعیین شده است.

از آنجا که فرآیند هضم بی‌هوازی به‌عنوان یک فرآیند زیست‌شناختی تابع عوامل متعددی است و فاکتورهای مختلفی همچون نوع و ترکیبات مواد اولیه، غلظت مواد در داخل هاضم و ... بر بازده فرآیند و علی‌الخصوص میزان گاز تولیدی مؤثر است، برای اطمینان از اجرایی بودن فرآیند زنجیره تأمین تحت بررسی، از مقاله ماراکاکی و همکاران [۶] استفاده شده و شبکه زنجیره تأمین بر مبنای آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش طراحی شده است. بر این اساس می‌توان مدل شبکه زنجیره تأمین به صورت نشان داده شده در شکل (۱) در نظر گرفت. این زنجیره که کل فعالیت‌های مورد نیاز برای تولید انرژی از تأمین مواد اولیه تا عرضه محصول به بازار نهایی را در برمی‌گیرد از لایه‌های زیر تشکیل شده است:



شکل (۱): شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی

### ۳-۳-۲- انبارها

#### مجموعه‌ها

I	مجموعه کارخانه تولید روغن‌زیتون ( $i \in I$ )
J	مجموعه کارخانه تولید بایودیزل ( $j \in J$ )
K	مجموعه مکانهای کاندید برای انبار ( $k \in K$ )
R	مجموعه مکانهای کاندید نیروگاه ( $r \in R$ )
C	مجموعه سطوح ظرفیت نیروگاه ( $c \in C$ )
V	مجموعه سطوح ظرفیت انبار ( $v \in V$ )
G	مجموعه انواع ترکیبات ( $g \in G$ )
S	مجموعه سناریوهای اختلال ( $s \in S$ )
T	مجموعه بازه‌های زمانی ( $t \in T$ )

به‌منظور ذخیره‌سازی مواد فرعی، مجموعه‌ای از مکانهای بالقوه برای ساخت انبار پساب کارخانه روغن‌زیتون و گلیسیرین خام در نظر گرفته شده است. با توجه به ماهیت پساب گونه‌ی این مواد انبارها از نظر تجهیزات با یکدیگر تفاوتی نداشته و در مسئله با یک اندیس ظاهر می‌شوند.

### ۳-۳-۳- نیروگاه‌های بیوگاز سوز با ظرفیت‌های مختلف

در صورت احداث نیروگاه بیوگازسوز در هر یک از مناطق کاندید، لجن به همراه ماده فرعی منتخب در هر بازه زمانی به مقدار مناسب از انبار به‌سوی هاضم ارسال می‌شود. در اینجا سه سطح ظرفیت برای هاضم و نیروگاه برق و حرارت در نظر گرفته شده است.

#### مؤلفه‌های فنی

$capr_{rc}^s$	ظرفیت بارگیری هاضم در مکان $r$ با سطح ظرفیت $c$ تحت سناریو $s$
$capp_{rc}^s$	ظرفیت تولید برق برای نیروگاه در مکان $r$ با سطح ظرفیت $c$ تحت سناریو $s$
$h$	ساعت کار یک نیروگاه در هر دوره
$co_g$	نرخ تبدیل ترکیب $G$ به انرژی
$ut_{rt}^s$	میزان لجن فاضلاب موجود در مکان $r$ و در زمان $t$ و تحت سناریو $s$
$oi_{it}^s$	میزان پساب موجود کارخانه روغن‌زیتون در مکان $i$ و در زمان $t$ و تحت سناریو $s$
$\gamma_i$	درصد همکاری کارخانه روغن‌زیتون در مکان $i$
$ge_{it}^s$	میزان گلیسیرین خام موجود در کارخانه بایودیزل $j$ در زمان $t$ و تحت سناریو $s$
$\alpha_{is}^1$	درصد کاهش پساب موجود در کارخانه روغن‌زیتون $i$ در صورت وقوع سناریو $s$
$\alpha_{js}^2$	درصد کاهش گلیسیرین خام موجود در کارخانه بایودیزل $j$ در صورت وقوع سناریو $s$
$\beta_{rs}$	درصد کاهش لجن فاضلاب موجود در مکان $r$ در صورت وقوع سناریو $s$
$capso_{kv}^s$	ظرفیت ذخیره‌سازی پساب کارخانه روغن‌زیتون در مکان $k$ و با سطح ظرفیت $v$ و تحت سناریو $s$
$capsg_{kv}^s$	ظرفیت ذخیره‌سازی گلیسیرین خام در مکان $k$ و با سطح ظرفیت $v$ و تحت سناریو $s$
$pi_s$	احتمال سناریو $s$
$ef_g$	درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی در ترکیب $g$
$d_{ik}$	فاصله بین کارخانه روغن‌زیتون در مکان $i$ و انبار در مکان $k$
$d'_{jk}$	فاصله بین کارخانه تولید بایودیزل در مکان $j$ و انبار در مکان $k$
$d''_{kr}$	فاصله بین انبار در مکان $k$ و نیروگاه در مکان $r$

### ۳-۳-۴- نواحی عرضه محصولات

در لایه آخر زنجیره تأمین، نواحی عرضه محصولات قرار دارد. برق تولیدی در هر نیروگاه صرف تأمین بخشی از نیاز استان خواهد شد. همچنین محصول جانبی این فرآیند یک کود مغذی است که می‌تواند در بخش کشاورزی استفاده شود. از آنجا که هدف پژوهش کاواکی و همکاران بررسی امکان‌پذیری آزمایش مدنظرشان بوده است، میزان کود حاصله در انتهای فرآیند اهمیتی نداشته و لذا از مقدار آن صحبتی به میان نیامده است. بنابراین در این پژوهش نیز میزان کود تولیدی و سود حاصل از آن در مدل لحاظ نشده است. اما فروش کود قطعاً یک منبع درآمد بوده و میزان سود نهایی این پروژه در دنیای واقعی بیشتر از مقدار محاسبه در این مدل خواهد بود.

### ۳-۳-۵- حمل و نقل

برای برقراری ارتباط میان لایه‌های زنجیره تأمین ذکر شده، کلیه حمل و نقل‌ها به‌صورت جاده‌ای در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۴-۴- مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین

#### ۳-۴-۱- نمادهای مدل

در ابتدا، پیش از ارائه مدل ریاضی مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها به کار گرفته شده در مدل طراحی شبکه در زیر لیست می‌شوند:

## مؤلفه‌های اقتصادی

$pelc$	قیمت فروش انرژی الکتریکی
$costg$	هزینه خرید گلیسیرین خام
$ctr_g$	هزینه حمل گلیسیرین خام
$ctro$	هزینه حمل پساب کارخانه تولید روغن زیتون
$inop$	درصد تخصیص یافته برای سهم هزینه عملیاتی سالیانه از هزینه‌های سرمایه‌گذاری
$cfS_{kv}$	هزینه ساخت انبار در مکان $k$ و با سطح ظرفیت $v$
$pur_c$	هزینه خرید تجهیزات برای نیروگاه با سطح ظرفیت $C$

## متغیرهای تصمیم

$XO_{ikt}^S$	مقدار پساب کارخانه زیتون که از کارخانه روغن زیتون در نقطه $i$ به انبار در نقطه $k$ در بازه زمانی $t$ تحت سناریو $S$ انتقال می‌یابد.
$YO_{krt}^S$	مقدار پساب کارخانه زیتون که از انبار در نقطه $k$ به نیروگاه در نقطه $r$ در بازه زمانی $t$ تحت سناریو $S$ انتقال می‌یابد.
$XG_{jkt}^S$	مقدار گلیسیرین خام که از کارخانه بایودیزل در نقطه $j$ به انبار در نقطه $k$ در بازه زمانی $t$ تحت سناریو $S$ انتقال می‌یابد.
$YG_{krt}^S$	مقدار گلیسیرین خام که از انبار در نقطه $k$ به نیروگاه در نقطه $r$ در بازه زمانی $t$ تحت سناریو $S$ انتقال می‌یابد.
$Wt_{rt}^S$	مقدار فاضلابی که در بازه زمانی $t$ به نیروگاه در نقطه $r$ تحت سناریو $S$ به هاضم خورنده می‌شود.
$LO_{kt}^S$	مقدار پساب کارخانه زیتون که در انبار در نقطه $k$ در بازه زمانی $t$ تحت سناریو $S$ موجود است.
$QG_{kt}^S$	مقدار گلیسیرین خام که در انبار در نقطه $k$ در بازه زمانی $t$ تحت سناریو $S$ موجود است.
$PE_{grt}^S$	مقدار انرژی الکتریکی که در نیروگاه در مکان $r$ که با ترکیب $g$ در دوره زمانی $t$ تحت سناریو $S$ تولید می‌شود.

**متغیرهای صفر و یک**

$U_r$	اگر نیروگاه در مکان $r$ از ترکیب لجن و گلیسیرین خام استفاده کند=۱، در غیر این صورت صفر.
$Z_{rc}$	اگر نیروگاه در مکان $r$ با سطح ظرفیت $C$ احداث شود=۱، در غیر این صورت صفر.
$L_{kv}$	اگر انبار گلیسیرین خام در مکان $k$ با سطح ظرفیت $v$ احداث شود=۱، در غیر این صورت صفر.
$Q_{kv}$	اگر انبار پساب کارخانه روغن زیتون در مکان $k$ با سطح ظرفیت $v$ احداث شود=۱، در غیر این صورت صفر.

(۲)

$$\text{کاهش COD ناشی از پساب روغن زیتون} = \sum_S efg_{g=1} \cdot pi_s \cdot YO_{krt}^S$$

$$\text{کاهش COD ناشی از پساب گلیسیرین} = \sum_S efg_{g=2} \cdot pi_s \cdot YG_{krt}^S$$

با توجه به پارامترها و متغیرهای توصیف شده در بالا، تابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی با بهره‌گیری از یک مدل ریاضی پایه [۱۱] در زیر ارائه می‌شوند.

## ۳-۴-۲- توابع هدف

## ▪ تابع هدف اول: بیشینه کردن سود کل

تابع هدف اول که حداکثر سازی سود است شامل دو بخش است، درآمد کل و هزینه کل.

(۱) درآمد ناشی از فروش

$$\begin{aligned} \text{الکتریسیته} &= \sum_{r,g,t,s} pelc \cdot pi_s \cdot PE_{grt}^S \\ \text{هزینه خرید تجهیزات} &= \sum_{r,c} pur_c \cdot Z_{rc} \\ \text{هزینه ساخت انبارها} &= \sum_{k,v} (L_{kv} + Q_{kv}) \cdot cfS_{kv} \\ \text{هزینه سرمایه‌گذاری} &= inop \cdot (\text{Total investment}) \end{aligned}$$

هزینه تجهیزات = Total investment

(هزینه ساخت انبار +

$$\begin{aligned} &= (\sum_{i,k,t,s} pi_s \cdot ctro \cdot d_{ik} \cdot XO_{ikt}^S) + (\sum_{j,k,t,s} pi_s \cdot ctr_g \cdot d'_{jk} \cdot XG_{jkt}^S) + (\sum_{k,r,t,s} pi_s \cdot ctro \cdot d''_{kr} \cdot YO_{krt}^S) + (\sum_{k,r,t,s} pi_s \cdot ctr_g \cdot d''_{kr} \cdot YG_{krt}^S) \\ &= \sum_{j,k,t,s} pi_s \cdot costg \cdot XG_{jkt}^S \end{aligned}$$

هزینه خرید - درآمد ناشی از فروش الکتریسیته =  $\max(obj_1)$  + هزینه سرمایه‌گذاری عملیاتی + هزینه ساخت انبارها + تجهیزات (هزینه حمل و نقل)

- درآمد کل: در اینجا تنها درآمد، درآمد فروش برق است.
- هزینه کل: هزینه کل شامل هزینه خرید و راه‌اندازی تجهیزات نیروگاه، هزینه ساخت انبار، هزینه عملیاتی، هزینه حمل و نقل مواد از مناطق تأمین به انبار و از انبار به نیروگاه و هزینه خرید گلیسیرین است. هزینه عملیاتی به صورت درصدی از هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه و انبار در نظر گرفته شده است.

## ▪ تابع هدف دوم: بیشینه سازی آلودگی زدایی

از آب

در اینجا هدف بیشینه‌سازی کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی یا به عبارتی بیشینه‌سازی آلودگی زدایی از آب است.



- محدودیت‌های تولید: محدودیت (۱۰) در مورد میزان تولید الکتریسیته است. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که کل برق تولیدی در نیروگاه در مکان  $p$  و در هر بازه زمانی نباید بیش از حدود ظرفیت تولید الکتریسیته در آن بازه زمانی در نیروگاه باشد.

$$co_{g=2} \cdot (U_r \cdot Wt_{rt}^s + (\sum_k YG_{krt}^s)) + co_{g=1} \cdot ((1 - U_r) \cdot Wt_{rt}^s + (\sum_k YO_{krt}^s)) = \sum_g PE_{grt}^s \quad \forall r, t, s \quad (10)$$

$$\sum_g PE_{grt}^s \leq h \cdot (\sum_c capp_{rc}^s) \quad \forall r, t, s \quad (11)$$

- محدودیت‌های تعداد انبار و نیروگاه: محدودیت (۱۲) بیان می‌کند که در هر مکان  $p$  حداکثر یک نیروگاه باید احداث شود. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند در هر مکان  $s$  حداکثر یک انبار قابل احداث است.

$$\sum_c Z_{rc} \leq 1 \quad \forall r \quad (12)$$

$$\sum_v L_{kv} + \sum_v Q_{kv} \leq 1 \quad \forall k \quad (13)$$

- محدودیت‌های جریان: محدودیت (۱۴) برای انبار پساب کارخانه روغن زیتون و محدودیت (۱۵) برای انبار گلیسیرین خام است. همان‌طور که نشان داده شده است برای انبارها امکان ذخیره‌سازی و انتقال به دوره بعد وجود دارد.

$$\sum_t XO_{ikt}^s + LO_{k(t-1)}^s = \sum_r YO_{krt}^s + LO_{kt}^s \quad \forall k, t, s \quad (14)$$

$$\sum_j XG_{jkt}^s + QG_{k(t-1)}^s = \sum_r Y_{krt}^s + QG_{kt}^s \quad \forall k, t, s \quad (15)$$

### ۳-۵- رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور

در این تحقیق، از رویکرد برنامه‌ریزی سناریو محور [۲۵] به جهت مواجهه با عدم قطعیت ذاتی مسئله برای حداکثرسازی تابع هدف سود اقتصادی در مدل کردن مسئله بهینه‌سازی تولید انرژی از پساب روغن زیتون و کارخانه بیودیزل تحت رابطه آب و انرژی استفاده شده است.

+ کاهش اکسیژن خواهی ناشی از پساب روغن زیتون =  $\max(\text{Obj}_2)$   
کاهش اکسیژن خواهی ناشی از پساب گلیسیرین

### ۳-۴-۳- محدودیت‌ها

- محدودیت‌های ظرفیت: محدودیت‌های (۳) و (۴) میزان ظرفیت ذخیره‌سازی را محاسبه می‌کنند.

$$\sum_j XO_{jkt}^s + SG_{k(t-1)}^s \leq \sum_v caps_{kv}^s \cdot L_{kv} \quad \forall k, t, s \quad (3)$$

$$\sum_t XO_{ikt}^s + SO_{k(t-1)}^s \leq \sum_v capso_{kv}^s \cdot Q_{kv} \quad \forall k, t, s \quad (4)$$

- محدودیت مواد ورودی به هاضم: محدودیت‌های (۵) نسبت ترکیب مواد در هاضم را بیان می‌کند.

$$Wt_{rt}^s = (\sum_k YG_{krt}^s) + (\sum_k YO_{krt}^s) \quad \forall r, t, s \quad (5)$$

- محدودیت (۶) بیان می‌کند کل پسماندهایی که در هر بازه زمانی به سمت نیروگاه‌های در مکان  $p$  خوراند می‌شود از میزان بیشینه ظرفیت آن مکان برای بارگیری کمتر است.

$$Wt_{rt}^s + (\sum_k YG_{krt}^s) + (\sum_k YO_{krt}^s) \leq \sum_c capr_{rc}^s \cdot Z_{rc} \quad \forall r, t, s \quad (6)$$

- محدودیت‌های تأمین زیست‌توده: محدودیت‌های (۹) و (۷) تضمین می‌کنند که در هر بازه زمانی میزان مواد اولیه جمع‌آوری شده از هر منطقه تأمین بیشتر از کل مقدار موجود در آن منطقه نیست.

$$\sum_k XO_{ikt}^s \leq oi_{it}^s \cdot (1 - U_r) \cdot \gamma_i \cdot (1 - a_{is}^1) \quad \forall i, r, t, s \quad (7)$$

$$\sum_k XG_{jkt}^s \leq ge_{it}^s \cdot U_r \cdot (1 - a_{js}^2) \quad \forall j, r, t, s \quad (8)$$

$$Wt_{rt}^s \leq ut_{rt}^s \cdot (1 - \beta_{rs}) \quad \forall r, t, s \quad (9)$$

$$A_s \cdot x_s + K_s y \leq b_s + \xi_s \quad \forall s \quad (23)$$

$$obj_s - \sum_s p_{i_s} \cdot obj_s + u_s \geq 0 \quad \forall s \quad (24)$$

$$Ry = q \quad (25)$$

$$y \in Y, x_s, u_s \geq 0 \quad \forall s \quad (26)$$

که در مدل نهایی،  $u_s$  متغیر پیوسته مثبت است که به منظور خطی سازی به مسئله اضافه شده است.

#### ۴- پیاده سازی و مطالعه موردی

##### ۴-۱- استفاده از روش اپسیلون - محدودیت برای حل

##### مدل دو هدفه

روش محدودیت اپسیلون یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت حل این نوع مسائل می پردازد [۲۷]. مرز پارتو می تواند با روش قید  $\varepsilon$  ایجاد شود [۲۸]. فرمولاسیون روش محدودیت اپسیلون به صورت زیر است که هدف اول به عنوان هدف اصلی معرفی شده است. مسئله اصلی به صورت فرمول (۲۷) در نظر گرفته می شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(X) \\ & x \in X \\ & f_2(X) \leq \varepsilon_2 \\ & \dots \\ & f_n(X) \leq \varepsilon_n \end{aligned} \quad (27)$$

در مسئله پیشنهادی این پژوهش هدف اول به عنوان هدف اصلی و هدف دیگر به عنوان اهداف فرعی مورد بررسی قرار می گیرند. بنا بر روش محدودیت اپسیلون فرمولاسیون اهداف و مسئله به صورت فرمول (۲۸) است.

$$\begin{aligned} & \text{Max } Obj_1 \\ & Obj_2 \leq \varepsilon_2 \\ & \text{دیگر قیود مسئله} \end{aligned} \quad (28)$$

$Obj_1$  بیانگر تابع هدف اصلی مسئله و محدودیت ها به مجموعه محدودیت های مسئله افزوده می شود.

گام های روش محدودیت اپسیلون به صورت زیر است:

- یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید.
- هر بار با توجه به یکی از توابع هدف منتخب، مسئله را

در یک مسئله بهینه سازی سناریو محور، فرض می شود  $obj_s$  مقدار تابع هدف تحت سناریو  $s$ ،  $x_s$  متغیرهای وابسته به سناریو و  $y$  متغیرهای مستقل از سناریو،  $(c_s, d_s, K_s, A_s, b_s)$  مقدار مؤلفه های مسئله تحت سناریو  $s$  و  $R, q$  مؤلفه های مستقل از سناریو هستند. برای وقوع رخداد هر سناریو نیز احتمال  $p_{i_s}$  در نظر گرفته شده است. براساس این رویکرد یک مسئله بهینه سازی سناریو محور با هدف بیشینه سازی سود اقتصادی به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} & \text{max } E(obj) - \text{var}(obj) - \text{feasibility.p} \\ & = \sum_s p_{i_s} \cdot obj_s \\ & - \lambda \sum_s p_{i_s} \cdot \left( obj_s \right. \\ & \left. - \sum_s p_{i_s} \cdot obj_s \right)^2 - \omega \sum_s p_{i_s} \cdot \xi_s^2 \end{aligned} \quad (16)$$

$$obj_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T \cdot y \quad \forall s \quad (17)$$

$$A_s \cdot x_s + K_s y \leq b_s + \xi_s \quad \forall s \quad (18)$$

$$Ry = q \quad (19)$$

$$y \in Y, x_s \geq 0 \quad (20)$$

به طوری که،  $\xi_s$  متغیر کمبود و یا مازاد در سناریو  $s$ ،  $\omega$  ضریب استواری در مدل مالوی و  $\lambda$  ضریب اهمیت برای واریانس جوابها در سناریوهای مختلف خواهد بود. در این رویکرد متوسط عملکرد سیستم به عنوان یک جواب برای استواری بهینه خواهد بود که انحراف از اهداف در سناریوهای مختلف نیز در آن کنترل می شود (معادله (۱۶)). مهمترین تفاوت این رویکرد با مدل کلاسیک برنامه ریزی سناریو محور در توانایی مدل برای انعطاف پذیری و نقض کنترل شده به واسطه معادله (۱۸) است تا هم متوسط عملکرد بهبود یابد و هم انحرافات در جوابها کاهش یابد.

در راستای این هدف یک بخش جدیدی به صورت تابع هدف اضافه گردیده است تا از نقض بیش از حد قیود ممانعت کند که تحت عنوان استواری شدنی بودن تعبیه شده است. در رابطه بالا اگر به جای توان دوم از قدر مطلق استفاده شود قابلیت خطی سازی مدل فراهم شده و امکان حل تسهیل می گردد (لای و همکاران [۲۶]). مدل خطی شده به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{max } E(obj) - \text{var}(obj) - \text{feasibility.p} \\ & = \sum_s p_{i_s} \cdot obj_s \\ & - \lambda \sum_s p_{i_s} \cdot \left( obj_s - \sum_s p_{i_s} \cdot obj_s \right. \\ & \left. + 2u_s \right) - \omega \sum_s p_{i_s} \cdot \xi_s \end{aligned} \quad (21)$$

$$obj_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T \cdot y \quad \forall s \quad (22)$$

ارائه می‌شود.

#### ۴-۲- منطقه مورد مطالعه

در این بخش عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه موردی به منظور طراحی یک شبکه زنجیره تأمین هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب تحت اختلال جزئی در کشور ارزیابی و آنالیز می‌شود. بدین منظور شش استان کشور در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی سه اقلیم آب و هوایی خشک/ نیمه‌خشک و مرطوب در ایران وجود دارد. با توجه به اینکه تمام استان‌ها دارای ماده اصلی مورد استفاده (لجن فاضلاب) هستند معیار انتخاب استان‌ها آن است که از هر نوع اقلیم دو استان که حداقل یکی از مواد فرعی مورد نیاز را داشته باشد انتخاب شود. نقشه منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده و استان‌های منتخب با مکان‌نما مشخص شده‌اند.

▪ حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را به‌دست آورید.

▪ بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را، به تعداد از قبل مشخص شده تقسیم‌بندی کنید و یک جدول مقادیر برای  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$  به‌دست آورید.

▪ هر بار مسئله را با تابع هدف اصلی هر یک از مقادیر  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$  حل کنید.

▪ جواب‌های پارتویی یافته شده را گزارش کنید.

در روش محدودیت افسیلون پیشنهادی همان‌طور که مطرح شد تابع هدف اول به‌عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف دوم به‌عنوان توابع هدف فرعی تعیین می‌شود. در نهایت جواب‌های پارتویی یافته شده برای توابع هدف



شکل (۲): نقشه منطقه مورد مطالعه

#### ۴-۳- داده‌های مطالعه موردی

در این مطالعه موردی، مفروضات و داده‌های زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

(۱) استان اصفهان منبع تأمین گلیسیرین خام مورد نظر است. گلیسیرین خام محصول جانبی فرآیند تولید بایودیزل است که در حیطه تولید بایودیزل تنها یک کارخانه در سطح کشور در استان اصفهان فعالیت می‌کند. باقی پنج استان انتخاب شده نیز دارای

کارخانه‌های روغن زیتون و بنابراین منبع تأمین پساب روغن‌زیتون هستند.

(۲) افق زمانی در نظر گرفته شده در مسئله یک سال و بازه‌های زمانی بیست و چهار روزه در نظر گرفته شده‌اند.

(۳) بنا بر اطلاعات مقاله پایه [۱۰]، درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی برای ترکیب لجن و گلیسیرین و ترکیب لجن و پساب به ترتیب ۵۰٪ و ۳۴٪ است.

جدول (۲): احتمال وقوع سناریوها

خشک‌سالی خفیف	خشک‌سالی متوسط	خشک‌سالی شدید
۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۱۵

#### ۴-۴- نتایج مدل

مدل دوهدفه پیش‌گفته با استفاده از روش اپسیلون محدودیت حل شده است و سپس در این بخش به مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از به‌کارگیری مدل پیشنهادی در مطالعه موردی پرداخته شده است. لازم به ذکر است مدل توسط حل‌کننده سیپلکس<sup>۲</sup> نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز<sup>۳</sup> حل شده است. در مدل‌های ریاضی با بیش از یک هدف که دارای اهداف متناقض می‌باشند ارائه جواب بهینه به‌طور هم‌زمان در تمامی اهداف امری غیرممکن است از این‌رو در چنین مسائلی با بهتر شدن جواب یک هدف از میزان مطلوبیت جواب هدف دیگر کاسته خواهد شد به بهترین جواب‌ها در هر سطح از یک هدف تعیین شده مرز پارتو گفته می‌شود، در شکل (۳) به ارائه مرز پارتو از حل مدل به روش اپسیلون محدودیت پرداخته شده است انتخاب هر یک از جواب‌های ارائه شده در مرز پارتو می‌تواند با توجه به نیاز و نظر تصمیم‌گیرنده متفاوت باشد در این مسئله نقطه مشخص شده در شکل به‌عنوان جواب انتخابی نویسنده برای ارائه نتایج جزئی‌تر برگزیده شده است که با مشورت خبرگان سازمان مربوطه انتخاب شده است که در تابع هدف اول (بعد اقتصادی مقدار ۱۴۸۶۱۶۷۵/۶ معادل صد و چهل و هشت میلیارد ریال و تابع هدف دوم ۵۲۰۹/۵۴ پوینت مشخص شده است.

همان‌طور که در مدل ریاضی عنوان شد در بین متغیرهای تصمیم‌مدل پیشنهادی، متغیر  $Z_{rc}$  و  $L_{kv}$  و  $Q_{kv}$  هر یک متغیرهای باینری تعیین‌کننده احداث نیروگاه و انبارها می‌باشند از این‌رو پس از حل مدل این متغیرها را فرا خوانده تا مکان ساخت نیروگاه‌ها و انبارها مشخص شود. شکل (۴) نتایج به‌دست آمده در مورد احداث نیروگاه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید در اصفهان و گلستان احداث نیروگاه امکان‌پذیر بوده و انبارهای مورد نیاز نیروگاه‌ها هم در همان استان احداث می‌شوند. نکته حائز اهمیت آنکه براساس نتایج، نیروگاه اصفهان از ترکیب لجن و گلیسیرین و نیروگاه گلستان از ترکیب لجن و پساب کارخانه روغن زیتون استفاده می‌کند.

(۴) نرخ تبدیل ترکیب لجن و گلیسیرین و ترکیب لجن و پساب به الکتریسیته به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۴۵ کیلووات ساعت به ازای هر لیتر ترکیب است [۱۰]. با توجه به تجهیزات مشترک برای استحصال الکتریسیته نرخ تبدیل با مطالعه پایه برابر در نظر گرفته شده است.

(۱) به‌دلیل سیاست‌های دولت جمهوری اسلامی مبنی بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، محدودیتی در مورد میزان تولید برق وجود ندارد. نرخ خرید تضمینی برق تجدیدپذیر در سال ۹۵، ۳۵۰ تومان برای هر کیلووات ساعت برق است. هزینه عملیاتی سالانه برای نیروگاه بیوگاز سوز و انبارها به‌صورت ۵ درصد از هزینه سرمایه‌گذاری محاسبه شده است.

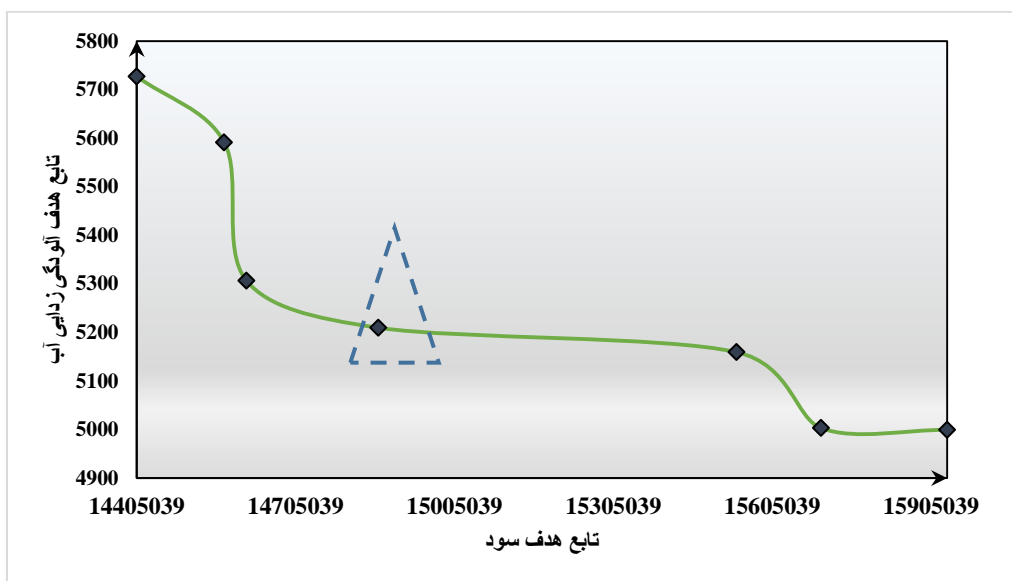
(۲) اطلاعات مرتبط با هزینه حمل و نقل مبتنی بر فواصل میان شهرها است که از طریق وزارت راه و شهرسازی جمهوری اسلامی ایران جمع‌آوری شده است. همچنین اطلاعات مرتبط با میزان پساب گلیسیرین کارخانه بیودیزل و روغن زیتون به‌ترتیب از سازمان انرژی‌های نو (سانا) و وزارت جهاد کشاورزی جمهوری اسلامی ایران تهیه شده است.

#### ۴-۳-۱- اختلال در تأمین

در اینجا سه حالت خشک‌سالی خفیف/متوسط/شدید برای مناطق کشور در نظر گرفته شده است. به‌همین صورت سه سناریو اختلال خفیف/متوسط/شدید برای تأمین هر یک از مواد مورد نیاز در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تأمین هر دو ماده تحت تأثیر اختلال قرار می‌گیرد. چرا که گلیسیرین محصول جانبی تولید بیودیزل بوده و عموماً از کشت دانه‌های روغنی، بیودیزل تهیه می‌شود فلذا با وقوع خشک‌سالی فرآیند کشت این مواد دچار مشکل می‌شود. همچنین به‌دنبال خشک‌سالی میزان کشت زیتون کاهش یافته و بدین ترتیب سطح فعالیت کارخانه‌ها و میزان روغن تولید نیز تنزل می‌یابد. بدیهی است که احتمال وقوع هر سناریو بسته به نوع اقلیم استان متفاوت است و لذا احتمال وقوع هر سناریو به شکل  $pi_s$  تعریف شده است. اختلال در تأمین مواد با سه پارامتر  $\beta_{rs}, \alpha_{rs}^2, \alpha_{rs}^1$  تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده است که در واقع نشان‌دهنده درصد کاهش مواد به‌دنبال وقوع هر یک از سناریوها است. در جدول (۲) احتمال وقوع هر یک از سناریوها آورده شده است.

<sup>۲</sup> CPLEX

<sup>۳</sup> GAMS 24.1.2



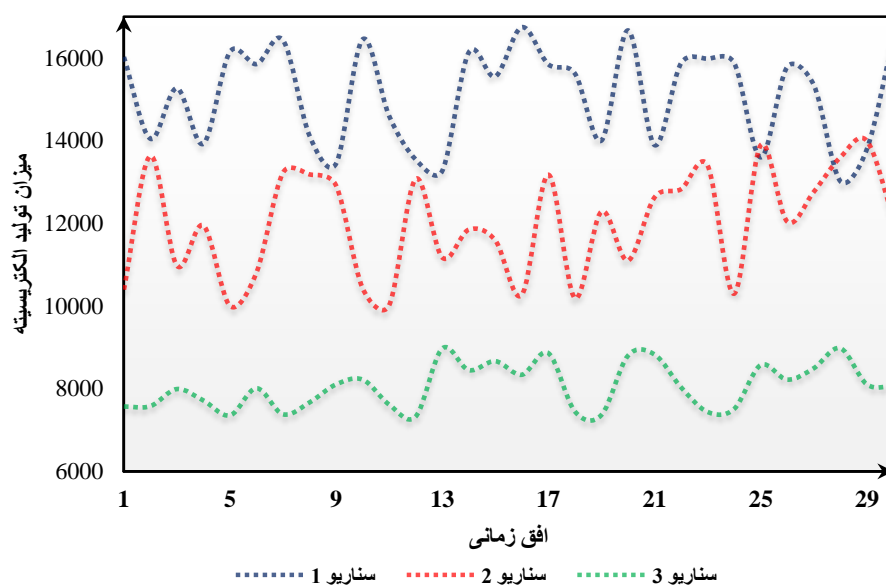
شکل (۳): مجموعه جواب مرز پارتویی



شکل (۴): نیروگاه‌های احداث شده

در افق زمانی برنامه‌ریزی شده تحت سناریوهای اختلال پیش‌گفته که شامل خفیف، متوسط و شدید است می‌باشد. با توجه به شدت خشک‌سالی در هر سناریو و میزان مؤلفه‌های در نظر گرفته‌شده بدیهی است میزان خوراک ارسالی به نیروگاه با افزایش سطح خشک‌سالی کاهش یابد، از این‌رو کاهش خوراک ارسالی به نیروگاه‌ها به کاهش تولید انرژی، که در مطالعه ما الکتریسیته است می‌انجامد.

دیگر متغیر تصمیم مدل ریاضی پیشنهادی میزان الکتریسیته تولیدی از هر یک از هاضم‌های نیروگاه‌ها است که با نماد PE نشان داده شده است، نکته حائز اهمیت آن است که این متغیر برخلاف متغیرهای احداث وابسته به سناریوهای اختلال تعریف شده در مسئله است از این‌رو برای نمایش مقادیر آن لازم است از نحوه نمایش در هر حالت وقوع اختلال استفاده شود. آنچه در شکل (۵) نشان داده شده است میزان تولید الکتریسیته



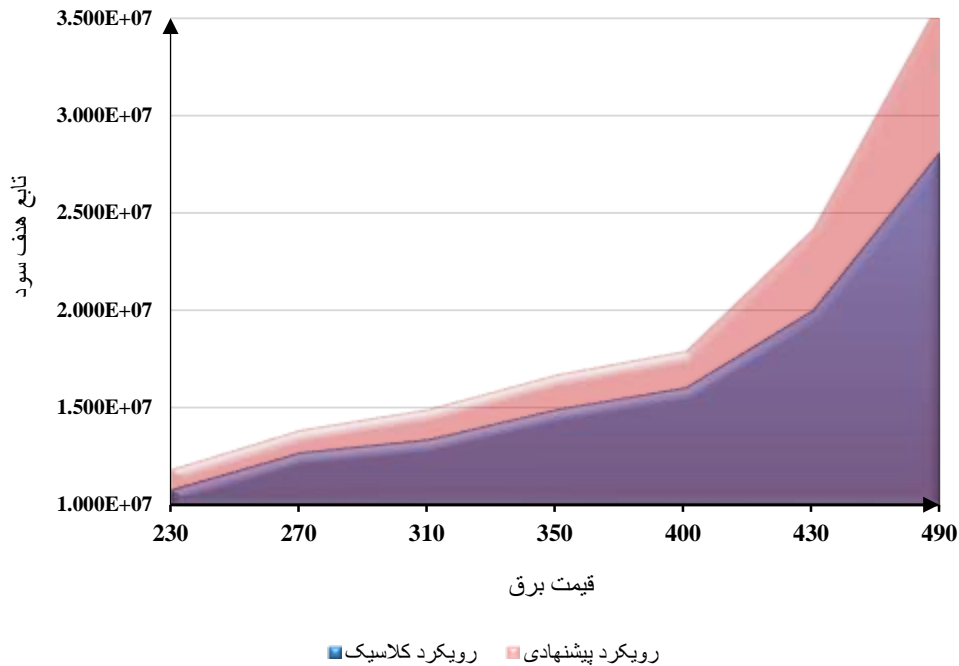
شکل (۵): میزان تولید الکتریسیته تحت سناریوهای مختلف در طول افق زمانی

در قسمت بعدی ارائه نتایج عددی، مقادیر مرتبط با هر یک از توابع هدف به ازای مقادیر متفاوت جریمه شدنی بودن قیود ارائه شده است. آنچه حائز اهمیت است آن است که مقدار جریمه در رویکرد پیشنهادی می‌تواند ابزاری برای کنترل سختگیری مدل در بحث استواری شدنی بودن باشد. تعیین میزان جریمه بالا مدل را به سمت عدم تخطی از قیود سوق می‌دهد و مقادیر ناچیز این جریمه مدل را به سمت تخطی بیشتر از محدودیت‌ها و بهتر شدن جواب نهایی مدل هدایت می‌کند. در جدول (۳) به ازای مقادیر متفاوت جریمه شدنی بودن مقدار توابع هدف ارائه شده است همچنین خطای نسبی و خطای مطلق در جواب به‌دست آمده در هر قسمت نشان داده شده است.

جدول (۳): توابع هدف به ازای مقادیر مختلف جریمه شدنی بودن

مقدار $\omega$	تابع هدف سود	تابع هدف COD	خطای نسبی	خطای مطلق
۱۳	۱۷۸۴۸۹۲۰/۳	۴۹۲۳	۰/۰۲۹۹	۰/۲۳۲
۱۵	۱۶۹۰۸۳۵۵	۵۰۶۶	۰/۰۲۱۷	۰/۲۲۷
۱۷	۱۶۰۲۳۳۱۹/۱	۵۱۸۷/۴۱	۰/۰۴۴۵	۰/۲۱۱
۱۹	۱۴۸۶۱۶۷۴/۶	۵۲۰۹/۵۴	۰/۰۳۱	۰/۲۴۱
۲۱	۱۳۸۲۴۶۰۶/۷	۵۳۴۹	۰/۰۲۲۵	۰/۲۳۲
۲۳	۱۲۱۷۳۳۲۰	۵۴۰۱	۰/۰۴۱۵	۰/۲۴۷
۲۵	۱۰۹۸۸۳۰۱/۶	۵۵۹۰	۰/۰۲۵۱	۰/۲۶۲

تغییرات قیمت در بحث خرید و فروش اشکال مختلف انرژی جزء جدا نشدنی آنها است از این رو ارائه یک دید کلی با توجه به تغییرات این پارامترها در هر مدل ریاضی آن را برای خوانندگان و استفاده‌کنندگان مطالعه بیش از پیش قابل اتکا می‌کند. در مطالعه حاضر نیز با توجه به بخش انتهایی زنجیره تأمین که با تولید الکتریسیته و فروش آن همراه است و قسمت درآمدهای زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهد بر آن شدیم تا با تغییرات قیمت خریداری شده الکتریسیته توسط شرکت برق جمهوری اسلامی ایران در افق زمانی مشخص میزان سود یا به عبارتی تابع هدف اول را در دو حالت مدل سناریو محور کلاسیک و رویکرد پیشنهادی مورد ارزیابی قرار دهیم تا مزیت‌های مدل خود را بهتر نمایان‌سازیم از این رو در شکل (۶) به آنالیز حساسیت پارامتر قیمت خرید الکتریسیته پرداخته شده است. آنچه مشخص است با افزایش قیمت خرید الکتریسیته درآمدهای حاصل از فروش الکتریسیته بیشتر و مدل با استحصال الکتریسیته از لجن‌ها مقدار درآمد بیشتری کسب می‌کند و از این رو میزان سود (تابع هدف اول) با رشد همراه خواهد بود اما از آنجایی که مدل ریاضی پیش‌گفته یک مدل دو هدفه می‌باشد مشاهده می‌شود که این افزایش یا کاهش خطی نیست. مطلب دیگر قابل مشاهده از این اطلاعات عملکرد بهتر رویکرد پیشنهادی نسبت به مدل کلاسیک سناریو محور است، از آنجایی که مدل ویژگی ایجاد تخطی کنترل شده از محدودیت‌ها را در سناریوهای اختلال خیلی شدید که عموماً احتمال پایینی برای رخداد دارند ایجاد می‌کند واضح است که تابع هدف مطلوب‌تری را به‌دست می‌دهد و این مزیت مطالعه انجام شده در این موضوع است.



شکل (۶): آنالیز حساسیت قیمت فروش

## ۵- نتیجه گیری

شده است.

سازمان‌دهی پسماندهای شهری و لجن باقی‌مانده از آنها در عین رسیدگی به کاهش مصرف آب‌های شیرین امروزه برای کشور امری ضروری به نظر می‌رسد، اگر این سازمان‌دهی همراه با استحصال انرژی از این مواد باشد می‌تواند ایجاد ارزش افزوده کرده و همچنین باعث کاهش سطح آلودگی آن شود. مدل حاضر این امکان را فراهم کرده تا با بررسی کلیه سطوح درگیر در این زنجیره تأمین از جمله کارخانه‌های بیودیزل و روغن زیتون و محصولات جانبی آنها از جمله گلیسرین یک نگاه یکپارچه برای عملیاتی کردن این ایده در سطح کشور ارائه دهد حال آنکه با توجه به رشد بی‌وقفه جمعیت و افزایش مصرف‌گرایی و به‌دنبال آن تولید روزافزون پسماندهای شهری، می‌توان از پسماندهای شهری به‌عنوان منبعی قابل اتکا برای انجام این فرآیند استفاده کرد. همچنین می‌توان از سایر ابعاد زیست‌محیطی، فنی و... به بررسی مدل پرداخت. در ارتباط با بخش تئوری نیز می‌توان برای مسئله با مقیاس‌های بزرگ‌تر از روش‌های نوین حل مسائل بهینه‌سازی بهره برد.

در عصر حاضر بحران آب و انرژی به دو معضل مهم در اکثر نقاط جهان تبدیل شده است. رشد سریع جمعیت و پیشرفت فناوری، از یکسو منجر به مصرف روزافزون سوخت‌های فسیلی و کاهش منابع انرژی شده و از سوی دیگر تغییرات اقلیمی و پدیده گرمایش جهانی، کاهش و نیز آلودگی منابع آب را به‌دنبال داشته است. فلذا در برهه فعلی طراحی یک زنجیره تأمین برای تولید انرژی تجدیدپذیر ضمن در نظر گرفتن مسئله بحران آب و خطر خشک‌سالی بسیار سودمند خواهد بود.

در حال حاضر هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب یک روش متداول و اثربخش برای تولید انرژی تجدیدپذیر است که به‌کارگیری آب شیرین را حداقل کرده و نیز روشی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست برای تولید انرژی است. در این مقاله برای نخستین بار، یک مدل دو هدفه برای تولید انرژی زیستی از هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب ارائه شده است. تابع هدف دوم یک تابع زیست‌محیطی است که با نگاه جدیدی به بررسی بازده زیست‌محیطی فرآیند پرداخته است. همچنین در این مدل احتمال وقوع اختلال جزئی در تأمین هر یک از مواد در اثر وقوع خشک‌سالی نیز در نظر گرفته شده است. در نهایت عملکرد مدل ارائه شده بر روی اقلیم‌های مختلف آب و هوایی کشور بررسی

major disruptions and supply/demand interruptions," vol. 94, pp. 121-149, 2016.

- [16] A. Osmaniand and J. Zhang, "Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment," *Applied energy*, vol. 114, pp. 572-587, 2014.
- [17] V. Gonela, J. Zhang, A. Osmani, and R. Onyeaghala, "Stochastic optimization of sustainable hybrid generation bioethanol supply chains," *Transportation research part e: Logistics and transportation review*, vol. 77, pp. 1-28, 2015.
- [18] E. Dehghani, M. S. Jabalameli, and A. Jabbarzadeh, "Robust design and optimization of solar photovoltaic supply chain in an uncertain environment," *Energy*, vol. 142, pp. 139-156, 2018.
- [19] S. Mohseni, M. S. Pishvae, and H. Sahebi, "Robust design and planning of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain: A case study in Iran," *Energy*, vol. 111, pp. 736-755, 2016.
- [20] H. Gilani, H. Sahebi, and F. Oliveira, "Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model," *Applied Energy*, vol. 278, p. 115653, 2020.
- [21] B. Shavazipour, J. Stray, and T. J. Stewart, "Sustainable planning in sugar-bioethanol supply chain under deep uncertainty: A case study of South African sugarcane industry," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 143, p. 107091, 2020.
- [22] M. Rabbani, S. Momen, N. Akbarian, H. Farrokhi Asl, and Z. Ghelichi, "Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering the bioethanol production strategies: A case study," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 134, p. 106720, 2020.
- [23] S. Mohseni and M. S. Pishvae, "Data-driven robust optimization for wastewater sludge-to-biodiesel supply chain design," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 139, p. 105944, 2020.
- [24] A. Weiss et al., "Investigation of factors influencing biogas production in a large-scale thermophilic municipal biogas plant," *Applied microbiology and biotechnology*, vol. 84, no. 5, pp. 987-1001, 2009.
- [25] J. M. Mulvey, R. J. Vanderbei, and S. A. Zenios, "Robust optimization of large-scale systems," *Operations research*, vol. 43, no. 2, pp. 264-281, 1995.
- [26] K. K. Lai, M. Wang, and L. Liang, "A stochastic approach to professional services firms' revenue optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. 182, no. 3, pp. 971-982, 2007.
- [27] M. Ehrgott and X. Gandibleux, "Multiobjective combinatorial optimization—theory, methodology, and applications," in *Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys*: Springer, 2003, pp. 369-444.
- [28] J. Bérubé, M. Gendreau, and J. Potvin, "An exact  $\epsilon$ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits," *European journal of operational research*, vol. 194, no. 1, pp. 39-50, 2009.

## ۶- مراجع

- [1] F. Amin Salehi and M. A. Abdoli, "The Necessity of Developing the Combined Heat and Power (CHP) Plants with Biogas Fuel in the Country," vol. 12, no. 2, pp. 13-24, 2009.
- [2] D. Yue, F. You, and S. W. Snyder, "Biomass-to bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 66, pp. 36-56, 2014.
- [3] R. Davis, A. Aden, and P. T. Pienkos, "Techno economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production," vol. 88, pp. 3524-3531, 2011.
- [4] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: a review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217-232, 2010.
- [5] R. Wang and J. Zimmerman, "Water-energy nexus: A critical review paper," ed: New Haven, CT: Yale School of Forestry and Environmental Studies, 2013.
- [6] A. Maragkaki, M. Fountoulakis, A. Gypakis, A. Kyriakou, K. Lasaridi, and T. Manios, "Pilot-scale anaerobic co-digestion of sewage sludge with agro industrial by-products for increased biogas production of existing digesters at wastewater treatment plants," *Waste management*, vol. 59, pp. 362-370, 2017.
- [7] S. Gorjian and B. Ghobadian, "Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran," vol. 48, pp. 571-584, 2015.
- [8] s. babaemorad, m. mohebbi, and h. bagheri, "A model for a green supply chain network design and considering lost sales," *Iranian Journal Of Supply Chain Management*, vol. 22, no. 66, pp. 63-74, 2020.
- [9] S. K. Ghosh, "Biomass and bio-waste supply chain sustainability for bio-energy and bio-fuel production," vol. 31, pp. 31-39, 2016.
- [10] M. Marufuzzaman, X. Li, F. Yu, and F. Zhou, "Supply chain design and management for syngas production," *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 890-900, 2016.
- [11] Ş. Y. Balaman and H. Selim, "A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 289-304, 2014.
- [12] Ş. Y. Balaman and H. Selim, "A fuzzy multiobjective linear programming model for design and management of anaerobic digestion based bioenergy supply chains," *Energy*, vol. 74, pp. 928-940, 2014.
- [13] Ş. Y. Balaman and H. Selim, "Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating systems: A fuzzy optimization approach," *Journal of cleaner production*, vol. 133, pp. 863-885, 2016.
- [14] S. Torabi, J. Namdar, S. Hatefi, and F. Jolai, "An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design," *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 5, pp. 1358-1387, 2016.
- [15] A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, J.B. Sheu, and H. S. Moghadam, "Designing a supply chain resilient to



---

**The Water-Energy Nexus of the Sewage Sludge Supply Chain Under Disruption : A Scenario-Based Robust Model**

**H. Gilani\*, H. Sahebi**

\*School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

(Received: 08/10/2021; Accepted: 16/01/2022)

**Abstract**

*Today, energy shortages and the decline in water supplies leading to the risk of drought, have become two major challenges worldwide. The purpose of this research is to study the impact of water-energy interactions on national policy making and objective-oriented government planning. For this purpose, a robust multi-objective model for reliable supply chain design of bioenergy production through joint anaerobic digestion of waste-water sludge under minor disturbances following drought has been presented. While the economic objective function examines the profit maximization, the environmental objective function examines the maximization of the environmental efficiency of the process. In order to fully evaluate the efficiency of the proposed model, several provinces of arid, semi-arid and humid regions of the country have been considered as case studies. The results show that it is possible to construct a power plant in the two provinces of Isfahan and Golestan. On the other, with regard to the changes in non-deterministic parameters, the proposed approach has a better resilience than the classical stochastic model. The results will help macroeconomic managers make better use of all primary resources to better manage the problems of drought and adverse environmental impacts of advanced industries.*

**Keywords :** Water-Energy NEXUS, Design of Bioenergy Supply Chain, Sustainability, Biomass, Robust Optimization