

بررسی رابطه متقابل انرژی و آب^۱ در شبکه تولید انرژی زیستی از لجن فاضلاب شهری در شرایط اختلال: مطالعه موردی کشور ایران

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 تاثیر رابطه متقابل آب و انرژی در سیاست گذاری های کشوری و برنامه ریزی های هدفمند دولتی می باشد. در این راستا، یک مدل چندهدفه بمنظور طراحی زنجیره تأمین تولید انرژی زیستی از طریق هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب تحت اختلال جزئی به دنبال وقوع خشکسالی ارایه شده است. تابع هدف اقتصادی به بررسی بیشینه‌سازی سود و تابع هدف زیست‌محیطی به بررسی بیشینه‌سازی بازدهی زیست‌محیطی فرآیند می‌پردازد. به‌منظور بررسی همه جانبه کارایی مدل پیشنهادشده، چند استان از مناطق خشک، نیمه خشک و مرطوب کشور بعنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به‌کارگیری مدل پیشنهادی نشان می‌دهد احداث نیروگاه در دو استان اصفهان و گیلان امکان‌پذیر است. نتایج حاصل به مدیران کلان کشوری در استفاده بهتر از تمام منابع اولیه در مدیریت بهتر مشکلات ناشی از خشک سالی و اثرات ناگوار زیست محیطی صنایع پیشرفته کمک شایانی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی

رابطه متقابل آب و انرژی^۱، طراحی زنجیره تأمین انرژی زیستی، توسعه پایدار، هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب، زیست‌توده، بیوگاز

۱-مقدمه

محدودیت و فناپذیری منابع فسیلی و نیز انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن افزایش دی اکسید 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 به‌سوی منابع تجدید پذیر 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(1). دلیل این موضوع این است که سوخت‌های زیستی بدون تغییر در ناوگان حمل‌ونقل می‌توانند جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند(2). به‌علاوه به علت جذب کربن دی‌اکسید هنگام رشد، منجر به کاهش نرخ خالص

^۱ Water-Energy nexus

کربن دی اکسید ورودی به اتمسفر و به تبع آن کاهش مخاطرات زیست محیطی می شوند (3). عموماً انواع زیست توده را در سه نسل مختلف طبقه بندی کرده اند: نسل اول زیست توده عمدتاً شامل مواد خوراکی همچون دانه ذرت، نیشکر، دانه سویا و دانه های روغنی می شود (4). اگرچه تولید سوخت از این مواد در بسیاری از نقاط دنیا به صورت اقتصادی انجام می گرفته است، اما در سال های اخیر به علت این که این سوخت ها از مواد غذایی خوراکی برای تولید استفاده می کنند و اثرات نامطلوبی بر بازار کشاورزی دارند با انتقادهای شدیدی روبه رو بوده است و به تدریج استفاده از زیست توده های نسل دوم مورد توجه قرار گرفت (3). زیست توده های نسل دو موادی همچون محصولات مختص انرژی بدون کاربرد خوراکی مانند علف^۱، در چجه آمریکایی^۲، جاتروفا^۳، پسماندهای کشاورزی، پسماندهای جنگل، پسماند غذایی و نیز فضولات حیوانی و انسانی را شامل می شود (2). نیاز به آب مناسب و کود کشاورزی از جمله اشکالات وارده به این نسل زیست توده است. همچنین عموماً فرآیند تولید انرژی از زیست توده نیازمند مقادیر توجهی آب است.

بطور 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 نیمه خشک دربر گرفته است. در حال حاضر ایران بطور جدی با بحران آب دست و پنجه نرم می کند. متوسط بارش در کشور ۲۵۰ میلی متر در سال است که کمتر از یک سوم متوسط بارش جهانی (۸۳۱ میلی متر در سال) و حدوداً یک سوم متوسط بارش در آسیا (۷۳۲ میلی متر در سال) است (7). در سال ۲۰۰۹، ناسا گزارشی پیرامون گرمایش جهانی و خشکسالی در ۳۰ سال آینده منتشر کرده است که نشان می دهد ۴۵ کشور جهان در معرض خشکسالی شدید هستند و در صورت عدم ذخیره منابع آبی دچار بحران کشاورزی و دامداری می شوند. بر اساس این گزارش، در فهرست ۴۵ کشور در معرض خطر، ایران در رتبه چهارم قرار گرفته است. گزارش ناسا تأکید می کند که بعید نیست بین ۳۰ تا ۴۰ سال آینده بخش های وسیعی از ایران به بیابان مطلق تبدیل شوند.

امروزه معضل آب و انرژی بعنوان دو منبع طبیعی مهم و حیاتی برای بیشتر نقاط دنیا مطرح است. علی رغم پایان پذیری سوخت های فسیلی، منابع متعدد انرژی های تجدیدناپذیر وجود دارد که استفاده از آنها روز به روز در حال گسترش است. بر خلاف انرژی، پیدا کردن منابع جدید یا جایگزین برای آب بسیار دشوار است. وابستگی بین این دو منبع حیاتی، آب و انرژی، علاوه بر جوامع دانشگاهی در صنعت نیز روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می گیرد. پس از آنکه خبرگان آب و انرژی هر کدام جداگانه سعی در حل معضلات مربوط به آب و انرژی داشتند، کم کم همه آنها به این نکته پی بردند که این دو منبع حیاتی مستقل از یکدیگر نیستند. پیوند بین آب و انرژی را اصطلاحاً "رابطه متقابل آب و انرژی"^۴ می گویند. 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

¹ Switch grass

² Miscanthus

³ Jatropha

⁴ Water-energy nexus

برای یکدیگر ایجاد می‌کنند اما با استفاده از یک رویکرد مدیریت یکپارچه منابع، می‌توانند به منزله فرصت‌هایی با سود دو طرفه برای یکدیگر تلقی شوند (5). برای مثال هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب یک روش رایج و اثربخش برای تولید انرژی است که بکارگیری آب شیرین را حداقل کرده و نیز روشی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست برای تولید انرژی می‌باشد (6). مدل ارائه‌شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند 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 زیست‌محیطی مدل مذکور پرداخته شده است.

در نتیجه نوآوری‌های انجام شده در این پژوهش به‌صورت موردی عبارت‌اند از: طراحی زنجیره تأمین هضم مشترک بی‌هوازی لجن فاضلاب که روشی اقتصادی، دوستدار محیط زیست و بر مبنای حداقل استفاده از آب شیرین است، در نظر گرفتن اختلال جزئی به دنبال وقوع خشکسالی که در زمان حاضر یکی از محتمل‌ترین بلایا در سطح جهان و خصوصاً ایران است، بررسی بعد زیست‌محیطی فرآیند مذکور از نظر میزان کاهش آلودگی آب- که یک نگاه جدید در حوزه مسائل زیست‌محیطی است.- همچنین در پژوهش جاری مطالعه موردی بر روی چندین استان کشور با شرایط اقلیمی گوناگون انجام 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 بعنوان جایگزینی برای سیستم‌های انرژی سنتی و راه حلی برای سوخت-های فسیلی محدود و چالش‌های زیست محیطی 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 منبع، فرآیندهای مختلفی نیز -همچون هضم بی‌هوازی، پیرولیز، گازی سازی و....- برای تبدیل منابع زیست-توده به برق، گرما یا انواع سوخت‌های مایع و گاز وجود دارد. هرکدام از این فرآیندها شرایط خاص خود را دارند و با بعضی از انواع زیست‌توده سازگاری بیشتری دارند (8). تابحال پژوهش‌هایی در زمینه تولید انرژی با هر یک از فرآیندهای ذکر شده انجام شده است. برای مثال معروف‌الزمان و همکاران (9) 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 ییلماز¹ و

¹ Yilmaz

همکاران (10) مدلی قطعی برای طراحی زنجیره‌ی تأمین تولید الکتریسیته از فضولات حیوانی و دانه‌های انرژی با استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی را ارائه دادند. در ادامه به‌منظور تکمیل کار قبلی خود، بیلماز و همکاران (11) 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 زنجیره‌ی تأمین، به یک مدل دو هدفی تبدیل کردند. هدف دوم بیشینه‌سازی عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین زیست‌توده و به‌صورت کمینه کردن میزان زیست‌توده جمع‌آوری نشده می‌باشد. آن‌ها سپس مدل قبلی خود را توسعه داده و به مدل زنجیره تأمین زیست‌توده خود سیستم‌های گرمایش ناحیه‌ای نیز اضافه کردند (12)، 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 تصفیه‌خانه‌ها 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. بنابراین 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 دو دسته (۱) عدم قطعیت معمول کسب‌وکار (فعالیت) و (۲) بحران تقسیم می‌شود. تابحال مطالعات متعددی در زمینه عدم قطعیت در زنجیره تأمین انجام شده است. برای مثال ترابی و همکاران (13) 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 (14) یک مدل زنجیره تأمین که در برابر تعلیق در 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. بنابر دانش ما، در حوزه زنجیره تأمین زیست‌توده تابحال 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 بنظر می‌رسد.

با توجه به مطالب گفته شده، یکی از ابعاد مهم بررسی عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین، کاهش میزان مصرف آب و یا آلودگی زدایی از آن به جهت استفاده مجدد از آب است. هرچند که بیشتر مدل‌های زنجیره تأمین زیست‌توده، مباحث زیست-محیطی را در قالب میزان انتشار کربن دی اکسید در نظر گرفته اند. به‌طور مثال عثمانی^۱ و همکاران (15) یک مدل چندهدفه طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین اتانول زیستی از انواع مختلف زیست‌توده‌های سلولزی^۲ ارائه دادند و بحث زیست‌محیطی را

¹Osmani

در قالب میزان گاز کربن دی اکسید وارد شده در محیط زیست در نظر گرفتند. در این میان مقالات معدودی، به اختصار در مدل خود به مصرف آب توجه کرده اند. برای مثال گونلا و همکاران (16) یک مدل طراحی زنجیره تامین اتانول زیستی از هر دو نسل اول و دوم طراحی کردند و در قسمت محدودیت های مدل برای کل میزان آب مصرفی در زنجیره یک حد بالا قائل شدند. در فرآیند هضم بی هوازی، آب نقش بسیار مهمی را ایفا می کند و خوراک هاضم باید بصورت محلول بوده و بین ۷ تا ۹ درصد غلظت داشته باشد، در مدل های پیشین ارائه شده برای زنجیره تامین این فرآیند، از آب شیرین استفاده شده است اما در مدل پیش رو 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 بیشینه سازی بازده زیست محیطی فرآیند است که بر مبنای بیشینه سازی آلودگی زدایی از آب تعریف شده است و از این جهت رویکرد جدیدی در حوزه مسائل زیست محیطی است.

در مدل های زنجیره تامین زیست توده، داشتن مطالعه موردی برای بررسی صحت مدل بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش نیز چندین استان کشور به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در ایران سه نوع اقلیم خشک، نیمه خشک و مرطوب وجود دارد که در این پژوهش با انتخاب استان هایی از هر اقلیم، شدت تاثیر خشکسالی بر تامین مواد در هر یک از مناطق بررسی شده است.

با توجه به مرور انجام شده در ادبیات موجود در حوزه زنجیره تامین زیست توده و یافتن شکاف های تحقیقاتی موجود، می توان گفت نوآوری های انجام شده در این پژوهش عبارتند از: (۱) طراحی یک زنجیره تامین برای تولید انرژی زیستی از هضم مشترک بی هوازی لجن فاضلاب تصفیه خانه شهری (۲) در نظر گرفتن وقوع اختلال جزئی در تامین مواد اولیه به دنبال پیدایش خشکسالی (۳) بررسی بعد زیست محیطی زنجیره تامین مذکور از حیث بیشینه سازی آلودگی زدایی از آب - که یک رویکرد جدید در حوزه ابعاد زیست محیطی زنجیره تامین است. - (۴) بررسی کارایی مدل با انجام یک مطالعه موردی در مناطق مختلف کشور با اقلیم های متفاوت خشک/ نیمه خشک/ مرطوب.

۳- تعریف مسئله

به منظور تشریح بهتر مسئله، در ابتدا به تبیین فرایندها و اجزای اصلی درگیر در این شبکه تامین پرداخته خواهد شد.

۳-۱- فرآیند هضم بی هوازی

یکی از انواع فرآیندهای موجود برای تبدیل زیست توده به انرژی هضم بی هوازی است که در واقع تجزیه میکروبی مواد آلی در غیاب اکسیژن است. حاصل نهایی این فرایند گازی است قابل اشتعال، که بیوگاز نام دارد. برخی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در تولید بیوگاز عبارتند از: نوع، غلظت و ترکیبات مواد اولیه، PH، عدم وجود اکسیژن در محیط فعل و انفعالات، زمان توقف مایع در داخل مخزن و (17). بیوگاز می تواند برای تولید برق یا حرارت مورد استفاده قرار گیرد. برای تبدیل بیوگاز به برق می توان از واحدهای تولید هم زمان برق و حرارت یا CHP استفاده کرد. (1) برای انجام این فرآیند نیاز است که مواد بصورت یک محلول همگن به هاضم خوراک دهی شود و بدین ترتیب هضم مشترک بی هوازی به معنای هضم بی- هوازی محلول همگنی است که شامل دو یا تعداد بیشتری از مواد است.

۳-۱-۱- هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب

هضم بی‌هوازی یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای تثبیت لجن فاضلاب در تصفیه‌خانه‌هایی با ظرفیت ورودی بیش از ۲۰۰۰۰ متر مکعب در روز است. این فرآیند مزایای محیط‌زیستی 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. (6)

۳-۲- مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین

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 موثر است، برای اطمینان از اجرایی بودن فرآیند زنجیره تأمین تحت بررسی، از مقاله ماراکاکی و همکاران (6) استفاده شده و شبکه زنجیره تأمین بر مبنای آزمایشات انجام شده در این پژوهش طراحی شده است. بر این اساس می‌توان مدل شبکه زنجیره تأمین به‌صورت نشان داده‌شده در شکل (۱) در نظر گرفت. این زنجیره که کل فعالیت‌های موردنیاز برای تولید انرژی از تأمین مواد اولیه تا عرضه محصول به بازار نهایی را در برمی‌گیرد از لایه‌های زیر تشکیل شده است:

۳-۲-۱- مواد اولیه موردنیاز

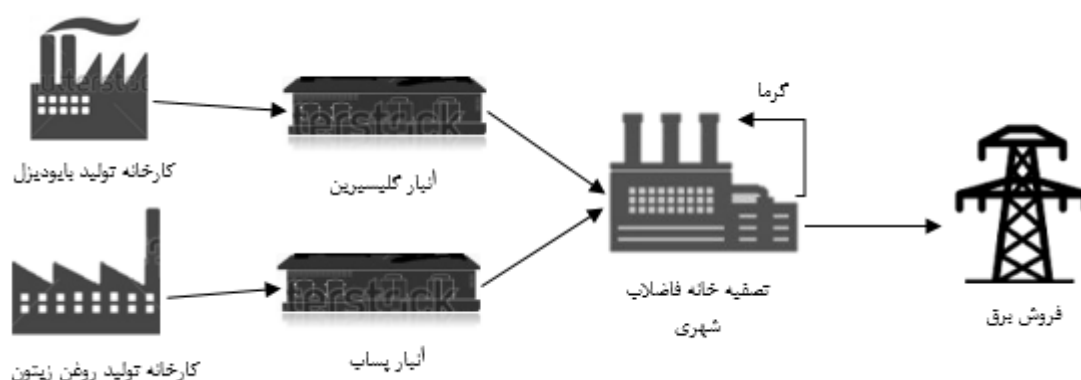
- ماده اصلی: ماده اصلی این فرآیند لجن فاضلاب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری است. مشخصات لازم برای این ماده همچون درصد جامدات کل و در مقاله پایه آورده شده است. همچنین بنابر آزمایش طراحی شده ۹۵٪ از خوراک هاضم حاوی لجن فاضلاب و ۵٪ حاوی ماده فرعی است.
- ماده فرعی: در مقاله کاواکی و همکاران سه نوع ماده پساب کارخانه روغن زیتون، پساب تولید پنیر و گلیسرین خام - که محصول جانبی تولید بایودیزل است - به عنوان 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 گلیسرین خام و پساب کارخانه روغن زیتون استفاده شده است.

۳-۲-۲- انبارها

به‌منظور ذخیره‌سازی مواد فرعی، مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای ساخت دو نوع انبار پساب کارخانه روغن زیتون و گلیسرین خام در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۳- نیروگاه‌های بیوگاز سوز با ظرفیت‌های مختلف

در صورت احداث نیروگاه بیوگاز سوز 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 CHP در نظر گرفته شده است.



شکل (۱) شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی

۳-۲-۴- 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 قطعا یک منبع درآمد بوده و میزان سود نهایی این پروژه در دنیای واقعی بیشتر از مقدار محاسبه در این مدل خواهد بود.

۳-۲-۵- حمل و نقل

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

۳-۳- مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین

۳-۳-۱- 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.

مجموعه‌ها	
O	مجموعه کارخانه تولید روغن زیتون ($o \in O$)
B	مجموعه کارخانه تولید بایودیزل ($b \in B$)
S	مجموعه مکان‌های کاندید برای انبار ($s \in S$)
P	مجموعه مکان‌های کاندید نیروگاه ($p \in P$)
C	مجموعه سطوح ظرفیت نیروگاه ($c \in C$)
E	مجموعه سطوح ظرفیت انبار ($e \in E$)
W	مجموعه انواع ترکیبات ($w \in W$)
SC	مجموعه سناریوهای اختلال ($sc \in SC$)
T	مجموعه بازه‌های زمانی ($t \in T$)
پارامترهای فنی	
v_{pc}^{sc}	ظرفیت بارگیری هاضم در هر دوره در مکان p با سطح ظرفیت c تحت سناریو SC
ec_{pc}^{sc}	ظرفیت تولید برق برای نیروگاه در مکان p با سطح ظرفیت c تحت سناریو SC
h	ساعت کار یک نیروگاه در هر دوره
e_w	نرخ تبدیل ترکیب w به انرژی
ss_{pt}^{sc}	میزان لجن فاضلاب موجود در مکان p و در زمان t و تحت سناریو SC
ow_{ot}^{sc}	میزان پساب موجود کارخانه روغن زیتون در مکان o و در زمان t و تحت سناریو SC
γ_o	درصد همکاری کارخانه روغن زیتون در مکان o
cb_{bt}^{sc}	میزان گلیسرین خام موجود در کارخانه بایودیزل b در زمان t و تحت سناریو SC
$\widetilde{\varphi}_{osc}$	درصد کاهش پساب موجود در کارخانه روغن زیتون o در صورت وقوع سناریو SC
$\widetilde{\varepsilon}_{psc}$	درصد کاهش گلیسرین خام موجود در کارخانه بایودیزل b در صورت وقوع سناریو SC
$\widetilde{\theta}_{bsc}$	درصد کاهش لجن فاضلاب موجود در مکان p در صورت وقوع سناریو SC
CO_{se}^{sc}	ظرفیت ذخیره‌سازی پساب کارخانه روغن زیتون در مکان s و با سطح ظرفیت e و تحت سناریو SC
CG_{se}^{sc}	ظرفیت ذخیره‌سازی گلیسرین خام در مکان s و با سطح ظرفیت e و تحت سناریو SC
π_p^{sc}	احتمال سناریو SC در مکان p

re_w	درصد کاهش COD در ترکیب w
d_{os}	فاصله بین کارخانه روغن زیتون در مکان o و انبار در مکان s
d_{bs}	فاصله بین کارخانه تولید بایودیزل در مکان b و انبار در مکان s
d_{sp}	فاصله بین انبار در مکان s و نیروگاه در مکان p
پارامترهای اقتصادی	
ep	قیمت فروش انرژی الکتریکی
cp	هزینه خرید گلیسرین خام
tcc	هزینه حمل گلیسرین خام
tco	هزینه حمل پساب کارخانه تولید روغن زیتون
po	درصد تخصیص یافته برای سهم هزینه عملیاتی سالیانه از هزینه های سرمایه گذاری
cc_{se}	هزینه ساخت انبار در مکان s و با سطح ظرفیت e
ic_c	هزینه خرید تجهیزات برای نیروگاه با سطح ظرفیت c
متغیرهای تصمیم	
X_{ost}^{sc}	مقدار پساب کارخانه زیتون که از کارخانه روغن زیتون در نقطه o به انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو SC انتقال می یابد.
X_{spt}^{isc}	مقدار پساب کارخانه زیتون که از انبار در نقطه s به نیروگاه در نقطه p در بازه زمانی t تحت سناریو SC انتقال می یابد.
Y_{bst}^{sc}	مقدار گلیسرین خام که از کارخانه بایودیزل در نقطه b به انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو SC انتقال می یابد.
Y_{spt}^{isc}	مقدار گلیسرین خام که از انبار در نقطه s به نیروگاه در نقطه p در بازه زمانی t تحت سناریو SC انتقال می یابد.
Z_{pt}^{sc}	مقدار فاضلابی که در بازه زمانی t به نیروگاه در نقطه p تحت سناریو SC به هاضم خورنده می شود.
RO_{st}^{sc}	مقدار پساب کارخانه زیتون که در انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو SC موجود است.
RC_{st}^{sc}	مقدار گلیسرین خام که در انبار در نقطه s در بازه زمانی t تحت سناریو SC موجود است.
OE_{pt}^{sc}	مقدار انرژی الکتریکی که در نیروگاه در مکان p که با ترکیب w در دوره زمانی t تحت سناریو SC تولید می شود.
متغیرهای صفر و یک	
β_p	اگر نیروگاه در مکان p از ترکیب لجن و گلیسرین خام استفاده کند=۱، در غیر اینصورت صفر.
α_{pc}	اگر نیروگاه در مکان p با سطح ظرفیت c احداث شود=۱، در غیر اینصورت صفر.
δ_{se}	اگر انبار گلیسرین خام در مکان s با سطح ظرفیت e احداث شود=۱، در غیر اینصورت صفر.
δ'_{se}	اگر انبار پساب کارخانه روغن زیتون در مکان s با سطح ظرفیت e احداث شود=۱، در غیر اینصورت صفر.

با توجه به پارامترها و متغیرهای توصیف شده در بالا، تابع هدف و محدودیت های مدل ریاضی در زیر ارائه می شوند.

▪ تابع هدف اول: بیشینه کردن سود کل

تابع هدف اول شامل دو بخش است، درآمد کل و هزینه کل.

- درآمد کل: در اینجا تنها درآمد، درآمد فروش برق است.

$$\text{درآمد کل} = \left(\sum_{p.w.t.sc} ep \cdot \pi_p^{sc} \cdot OE_{wpt}^{sc} \right) \quad (1)$$

- هزینه کل: هزینه کل شامل هزینه خرید و راه اندازی تجهیزات نیروگاه، هزینه ساخت انبار، هزینه عملیاتی، هزینه

حمل و نقل مواد از مناطق تامین به انبار و از انبار به نیروگاه و هزینه خرید گسیرین است. هزینه عملیاتی بصورت

درصدی از هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه و انبار در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \text{هزینه کل} = & \left(\sum_{p.c} ic_c \cdot \alpha_{pc} \right) + \left(\sum_{s.e} (\delta_{se} + \delta'_{se}) \cdot cc_{se} \right) + (po \cdot \text{هزینه سرمایه گذاری}) \\ & + \left(\sum_{o.s.t.sc} \pi_p^{sc} \cdot tco \cdot d_{os} \cdot X_{ost}^{sc} \right) + \left(\sum_{b.s.t.sc} \pi_p^{sc} \cdot tcc \cdot d_{bs} \cdot Y_{bst}^{sc} \right) \\ & + \left(\sum_{s.p.t.sc} \pi_p^{sc} \cdot tco \cdot d_{sp} \cdot X_{spt}^{sc} \right) + \left(\sum_{s.p.t.sc} \pi_p^{sc} \cdot tcc \cdot d_{sp} \cdot Y_{spt}^{sc} \right) \\ & + \left(\sum_{b.s.t.sc} \pi_p^{sc} \cdot cp \cdot Y_{bst}^{sc} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

▪ تابع هدف دوم: بیشینه‌سازی آلودگی زدایی از آب

COD^۱ یا اکسیژن خواهی شیمیایی، یکی از مهمترین شاخصهای سنجش آلودگی فاضلاب است. COD یک فاضلاب، پساب و

یا آب آلوده عبارت است از میزان اکسیژن مورد نیاز برای اکسیداسیون مواد قابل اکسیداسیون موجود در آن. هرچه

مقدار COD یک فاضلاب بیشتر باشد مقدار مواد خارجی موجود در آن که باعث آلودگی آن می شود نیز بیشتر خواهد بود.

از نکات مثبت فرآیند هضم بی‌هوازی کاهش COD فاضلاب در طی فرآیند است، بر همین اساس در آزمایشات هضم مشترک

بی‌هوازی، نسبت بهینه ترکیب مواد بر اساس دو معیار میزان تولید گاز و درصد کاهش COD فاضلاب تعیین می‌شود. در

اینجا هدف بیشینه سازی کاهش COD یا به عبارتی بیشینه‌سازی آلودگی زدایی از آب است.

$$\max((re_{w=1} \cdot \pi_p^{sc} \cdot X_{spt}^{sc}) + (re_{w=2} \cdot \pi_p^{sc} \cdot Y_{spt}^{sc})) \quad (3)$$

¹ Chemical Oxygen Demand

۳-۳-۳- محدودیت‌ها

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

$$\sum_s X_{ost}^{sc} \leq ow_{ot}^{sc} \cdot (1 - \beta_p) \cdot \gamma_o \cdot (1 - \widetilde{\varphi}_{osc}) \quad \forall o.p.t.sc \quad (۴)$$

$$\sum_s Y_{bst}^{sc} \leq cb_{bt}^{sc} \cdot \beta_p \cdot (1 - \widetilde{\theta}_{bsc}) \quad \forall b.p.t.sc \quad (۵)$$

$$Z_{pt}^{sc} \leq ss_{pt}^{sc} \cdot (1 - \widetilde{\varepsilon}_{psc}) \quad \forall p.t,sc \quad (۶)$$

- محدودیت‌های جریان: محدودیت (۷) برای انبار پساب کارخانه روغن زیتون و محدودیت (۸) برای انبار گلیسیرین خام است. همانطور که نشان‌داده شده است برای انبارها امکان ذخیره‌سازی و انتقال به دوره بعد وجود دارد.

$$\sum_o X_{ost}^{sc} + RO_{s(t-1)}^{sc} = \sum_p X'_{spt} + RO_{st}^{sc} \quad \forall s.t.sc \quad (۷)$$

$$\sum_b Y_{bst}^{sc} + RC_{s(t-1)}^{sc} = \sum_p Y'_{spt} + RC_{st}^{sc} \quad \forall s.t.sc \quad (۸)$$

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

$$\sum_b Y_{bst}^{sc} + RC_{s(t-1)}^{sc} \leq \sum_e CG_{se}^{sc} \cdot \delta_{se} \quad \forall s.t.sc \quad (۹)$$

$$\sum_o X_{ost}^{sc} + RO_{s(t-1)}^{sc} \leq \sum_e CO_{se}^{sc} \cdot \delta'_{se} \quad \forall s.t.sc \quad (۱۰)$$

- محدودیت مواد ورودی به هاضم: محدودیت‌های (۱۱) نسبت ترکیب مواد در هاضم را بیان می‌کنند.

$$Z_{pt}^{sc} = 19(\sum_s Y'_{spt}) + 19(\sum_s X'_{spt}) \quad \forall p.t.sc \quad (۱۱)$$

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

$$Z_{pt}^{sc} + (\sum_s Y'_{spt}) + (\sum_s X'_{spt}) \leq \sum_c v_{pc}^{sc} \cdot \alpha_{pc} \quad \forall p.t.sc \quad (۱۲)$$

- محدودیت‌های تولید: محدودیت (۱۳) در مورد میزان تولید الکتریسیته است. محدودیت (۱۴) 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.

$$e_{w=2} \cdot ((\sum_s \beta_p \cdot Z_{pt}^{sc}) + (\sum_s Y_{spt}^{sc})) + e_{w=1} \cdot ((\sum_{p,t} (1 - \beta_p) \cdot Z_{pt}^{sc}) + (\sum_s X_{spt}^{sc})) = OE_{pt}^{sc} \quad \forall p, t, sc \quad (13)$$

$$OE_{pt}^{sc} \leq h \cdot (\sum_c ec_{pc}^{sc}) \quad \forall p, t, sc \quad (14)$$

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

$$\sum_c \alpha_{pc} \leq 1 \quad \forall p \quad (15)$$

$$\sum_e \delta_{se} + \sum_e \delta'_{se} \leq 1 \quad \forall s \quad (16)$$

۴- پیاده‌سازی و مطالعه موردی

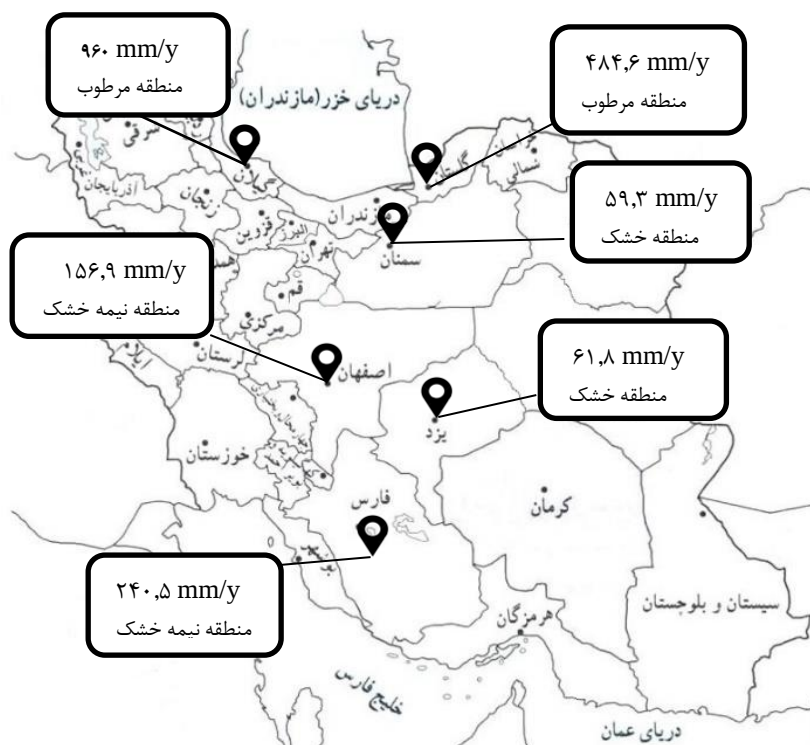
۴-۱- منطقه مورد مطالعه

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. به طور کلی سه اقلیم آب و هوایی خشک/ نیمه خشک 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.

۴-۲- داده‌های مطالعه موردی

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

(۱) استان اصفهان منبع تامین گلیسرین خام مورد نظر است. گلیسرین 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 کارخانجات روغن زیتون و بنابراین منبع تامین پساب روغن زیتون هستند.



شکل (۲) نقشه منطقه مورد مطالعه

- (۲) افق زمانی در نظر گرفته شده در مسئله یک سال و بازه‌های زمانی بیست و چهار روزه در نظر گرفته شده‌اند.
- (۳) بنابر اطلاعات مقاله پایه، درصد کاهش COD برای ترکیب لجن و گلیسرین و ترکیب لجن و پساب به ترتیب ۵۰٪ و ۳۴٪ است.
- (۴) نرخ تبدیل ترکیب لجن و گلیسرین و ترکیب لجن و پساب به الکتریسیته به ترتیب ۰.۲۳ و ۰.۴۵ کیلووات ساعت به ازای هر لیتر ترکیب است.
- (۵) به دلیل سیاست‌های دولت جمهوری اسلامی مبنی بر توسعه انرژی‌های تجدید پذیر، 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 به صورت ۵ درصد از هزینه سرمایه‌گذاری محاسبه شده است.

۴-۲-۱- اختلال در تامین

در اینجا سه حالت خشکسالی خفیف / متوسط / شدید برای مناطق کشور در نظر گرفته شده است. به همین صورت سه سناریو اختلال خفیف / متوسط / شدید برای تامین هر یک از مواد مورد نیاز در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تامین هر سه ماده تحت تاثیر اختلال قرار می‌گیرد. چرا که گلیسرین محصول جانبی تولید بایودیزل بوده و عموماً از کشت دانه‌های روغنی، بایودیزل تهیه می‌شود فلذا با وقوع خشکسالی فرآیند کشت این مواد دچار مشکل می‌شود. همچنین به دنبال 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 π_p^{sc} تعریف شده است. اختلال در تامین مواد با سه پارامتر فازی $\overline{\varphi}_{osc}$ ، $\overline{\varepsilon}_{psc}$ ، $\overline{\theta}_{psc}$ نشان داده شده است که در واقع نشان‌دهنده درصد کاهش مواد به دنبال وقوع هر یک از سناریوها است. همچنین درصد اطمینان هر سه محدودیت فازی تامین ۸۰٪ در نظر گرفته شده است.

۴-۳- نتایج مدل

در این بخش مهم‌ترین نتایج به دست آمده از به کارگیری مدل پیشنهادی در مطالعه موردی بررسی می‌شود. لازم به ذکر است مدل توسط حل‌کننده CPLEX نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS 24.1.2 حل شده است. شکل (۳) نتایج به دست آمده در مورد احداث نیروگاه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌کنید در اصفهان و گیلان احداث نیروگاه امکانپذیر بوده و انبارهای مورد نیاز نیروگاه‌ها هم در همان استان احداث می‌شود. نکته حائز اهمیت آنکه بر اساس نتایج، نیروگاه اصفهان از ترکیب لجن و گلیسرین و نیروگاه گیلان از ترکیب لجن و پساب کارخانه روغن زیتون استفاده می‌کند.

این قسمت به دنبال تحلیل دقیق روش حل و ترسیم نمودارهای پارتوی حاصل از حل مساله نمی‌باشد. از آنجا که اکثر مخاطبین حاضر، به دنبال پیشنهادات و نتایج مدیریتی حاصل از مقاله مطرح شده می‌باشد، در اینجا به چندین نتیجه حاصله اشاره خواهد شد.

- در نظر گرفتن رابطه متقابل آب و انرژی در طراحی سیستم های کلان آب و انرژی کشوری باعث کاهش هزینه های نهایی تامین منابع در این دوحوزه می گردد.
- استفاده انرژی های زیستی در برنامه ریزی های کشوری، بر کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از سوخت های فسیلی موثر خواهد بود.
- هاضم های بی هوازی مشترک لجن فاضلاب و پساب زیتون و یا گلیسرین دارای بازدهی بیشتری در تولید انرژی زیست توده می باشد و در ضمن بر کیفیت آب تصفیه شده نیز اثری چشمگیر دارد.
- لجن های فاضلاب پس از اتمام فرایند هضم بی هوازی دارای ارزش افزوده چندین برابری هستند که در صنعت کشاورزی به عنوان کود قابل بهره برداری است.
- نتایج حاصل از حل این مدل، نشان دهنده ی پتانسیل اقتصادی بودن راه اندازی و طراحی شبکه تولید انرژی زیستی از هضم بی هوازی همزمان لجن های فاضلاب و پساب کارخانه های زیتون و گلیسرین می باشد.



شکل (۳) نیروگاه های احداث شده

۵- نتیجه گیری

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

در حال حاضر هضم بی هوازی لجن فاضلاب یک روش متداول و اثربخش برای تولید انرژی تجدیدپذیر است که بکارگیری آب شیرین را حداقل کرده و نیز روشی اقتصادی و دوستدار محیط زیست برای تولید انرژی می باشد. در این مقاله برای نخستین بار یک مدل دو هدفه برای تولید انرژی زیستی از هضم مشترک بی هوازی لجن فاضلاب ارائه شده است. تابع هدف دوم یک تابع زیست محیطی است که با نگاه جدیدی به بررسی بازده زیست محیطی فرآیند پرداخته است. همچنین در این مدل احتمال وقوع اختلال جزئی در تامین هر یک از مواد در اثر وقوع خشکسالی نیز در نظر گرفته شده است. در نهایت عملکرد مدل ارائه شده بر روی اقلیم های مختلف آب و هوایی کشور بررسی شده است.

با توجه به رشد بی وقفه جمعیت و افزایش مصرف گرایي و به دنبال آن تولید روز افزون پسماندهای شهری، می توان از پسماندهای شهری بعنوان منبع برای انجام این فرآیند استفاده کرد. همچنین می توان از سایر ابعاد زیست محیطی، فنی و... به بررسی مدل پرداخت.

۱. صالحی ف، عبدلی م. ضرورت توسعه نیروگاه های تولید همزمان برق و حرارت بیوگاز سوز در کشور. نشریه انرژی ایران. ۱۳۸۸؛ ۱۳: ۲۴-۳۰.
2. Yue D, You F, Snyder SW. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Comput Chem Eng* [Internet]. 2014;66:36–56. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>
3. Davis R, Aden A, Pienkos PT. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Appl Energy* [Internet]. 2011;88(10):3524–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.018>
4. Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2010;14(1):217–32.
5. R.Wang; J.Zimmerman. Water-Energy Nexus: A Critical Review Paper. 2011.
6. A.E.Maragkaki; M.Fountoulakis; A.Kyriakou; A.Gypakis; K.Lasaridi; 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. 2016; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.043>
7. Gorjian S, Ghobadian B. Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. *Renew Sustain Energy Rev*. 2015;48:571–84.
8. Ghosh SD. Biomass & Bio-waste Supply Chain Sustainability for Bio-energy and Bio-fuel Production. *Procedia Environ Sci* [Internet]. 2016;31:31–9. Available from: doi: 10.1016/j.proenv.2016.02.005
9. Marufuzzaman M, Li X, Yu F, Zhou F. Supply Chain Design and Management for Syngas Production. *ACS Sustain Chem Eng* [Internet]. 2016;4(3):890–900. Available from: <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00944>
10. Balaman ŞY, Selim H, Bebnem S, Balaman Y, Selim H, Balaman ŞY, et al. A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems. *Appl Energy* [Internet]. 2014;130:289–304. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191400538>
11. Yılmaz Balaman Ş, Selim H, Balaman Y, Selim H. A fuzzy multiobjective linear programming model for design and management of anaerobic digestion based bioenergy supply chains. *Energy* [Internet]. 2014;74:928–40. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214008950>
12. Yılmaz Balaman Ş, Selim H, Selim H. Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating systems: A fuzzy optimization approach Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating 1 systems: a fuzzy optimization approach 2 3. *J Clean Prod*. 2016;
13. Torabi SA, Namdar J, Hatefi SM, Jolai F. An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design [Internet]. *International Journal of Production Research*. 2015. p. 1–30. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1070215>
14. Jabbarzadeh A, Fahimnia B, Sheu JB, Moghadam HS. Designing a supply chain resilient to major

disruptions and supply/demand interruptions. Transp Res Part B Methodol [Internet]. 2016;94:121–49. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.004>

15. Osmani A, Zhang J. Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment. Appl Energy [Internet]. 2014;114:572–87. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.024>

16. Gonela V, Zhang J, Osmani A, Onyeaghala R. Stochastic optimization of sustainable hybrid generation bioethanol supply chains. Transp Res PART E [Internet]. 2015;77:1–28. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.02.008>

۱۷. قاسم زاده ر. بررسی عوامل تأثیر گذار بر فرآیند هضم بی هوازی و تولید بیوگاز. سومین همایش بین المللی مهندسی منابع آب و محیط زیستی. تهران؛ ۹۴.

Water-Energy nexus for design of a wastewater-to-biogas Supply Chain Network for: A Case Study

Abstract

Nowadays, the lack of energy, as well as the reduction of water reserves and the dangers of drought, have become two serious challenges around the world. The purpose of this study is to study the effect of water-energy nexus on national policies and government outlooks documents. In this regard, a multi-objective model is proposed for designing a biogas supply chain through the digestion of sewage sludge under disruption because of drought. The economical objective function maximize the profit and the environmental objective function study the maximization of the environmental efficiency of the network process. In order to evaluate the efficiency of the proposed model, several provinces are considered as a case study in arid, semi-arid and humid regions of Iran. The results of the proposed model suggest that the construction of a power plant in Isfahan and Guilan is recommended. The results will help national managers to better use all primary sources of good management of drought-related problems and adverse environmental impacts of the advanced industries.

Keywords: Design of global supply chain, sustainable development, anaerobic digestion, biomass,