مجله علمی مطالعات پژوهشی در مهندسی مکانیک آینده، ۱۴۰۳، دوره ۱، شماره ۱، ص ص ۸-۲۰

مجله علمی مطالعات پژوهشی

در مهندسی مکانیک آینده

journalhi.com/mec/

بهینه سازی زنجیره تامین سوخت زیستی پایدار- استوار در شرایط عدم قطعیت

محسن شیردل [۱]

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲

ارائه در سایت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۲

کلید واژگان:

سوخت زیستی

پایدار

عدم قطعیت

بهینه سازی

چکیده

افزایش آگاهی نسبت به محیط زیست و کاهش ذخایر منابع فسیلی، صنعت را به سمت گسترش تولید سوختهای دیگر قابل دوام از منابع تجدید شدنی سوق می‌دهد که از نظر محیط زیستی قابل قبولترند. سوخت زیستی نوعی از سوخت است که از منابع زیست توده بدست می‌آید. منبع سوختهای فسیلی هم که امروزه مورد بهره برداری قرار میگیرند، زیست توده بوده ولی در سالهای بسیار دور شکل گرفته‌اند. امروزه کاهش منابع سوخت های فسیلی و از سویی تأثیر مخرب استفاده از این نوع سوخت ها بر محیط زیست، محققان را بر آن داشته به فکر جایگزین کردن این منابع باشند. از این رو در این پژوهش یک مدل ریاضی چند هدفه در راستای زنجیره تامین پایدار سوخت های زیستی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضاها ارائه و در نهایت با توجه به عدم قطعیت در نظر گرفته شده، با استفاده از رویکرد استوارسازی بریستماس و سیم به توسعه مدل ریاضی پرداخته شده است. با توجه به مدل ارائه شده، اهداف پایداری از جمله مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی بحث و بررسی شده اند و در نهایت مدل ارائه شده با استفاده از رویکرد اپسیلون محدودیت صحه‌گذاری شده و سپس با استفاده از الگوریتم ادغامی اپسیلون محدودیت و بندرز اعتبار سنجی گردیده است.

Optimizing sustainable biofuel supply chain under uncertainty

Mohsen Shirdel [1]

1- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz.

Article Information

Original Research Paper
Received 18 March 2023
Accepted 02 October 2023
Available Online 04 October 2023

Keywords:
Biofuel
Stable
uncertainty
Optimization

Abstract

Increasing awareness of the environment and decreasing fossil resource reserves lead the industry to expand the production of other viable fuels from renewable sources that are more environmentally acceptable. Biofuel is a type of fuel that is obtained from biomass sources. The source of fossil fuels that are exploited today is biomass, but they were formed in very distant years. Today, the reduction of fossil fuel sources and on the other hand the destructive effect of using these types of fuels on the environment have led researchers to think about replacing these sources. Therefore, in this research, a multi-objective mathematical model is presented in line with the sustainable supply chain of biofuels, taking into account the uncertainty in the demands, and finally, taking into account the uncertainty, using the bristem and wire stabilization approach to The development of the mathematical model is discussed. According to the presented model, the goals of sustainability, including economic, social and environmental issues, have been discussed and investigated, and finally the presented model has been validated using the epsilon limit approach and then validated using the epsilon limit and Bandarz integration algorithm. has been.

۱- مقدمه

وابستگی شدید به منابع نفتی و محدود بودن این منابع از مهم ترین مسائلی است که تأمین انرژی مورد نیاز کشورهای در حال توسعه در آینده را تهدید می کند. از میان انواع انرژی های نو، تولید سوخت‌های سبز اهمیت فراوانی را در سال‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا به خود جلب کرده‌اند(کومار و همکاران، ۲۰۱۹). در سال‌های گذشته منابع مختلفی برای تولید سوخت های سبز به کار گرفته شده است که آن‌ها را در چند نسل طبقه‌بندی می‌کنند (مایتی و همکاران، ۲۰۱۴). نسل اول منابع شامل موادی با ماهیت غذایی است که ازجمله آن ها می توان به ذرت، سویا، نشاسته و... اشاره نمود. اگرچه سوخت تولیدی از این مواد اقتصادی است اما رفته رفته استفاده از آن‌ها به دلیل افزایش قیمت مواد غذایی کاهش یافته است (بابازاده و همکاران، ۲۰۱۵). نسل دوم از موادی بدون ماهیت غذایی همانند پسماندهای محصولات کشاورزی مانند غلاف ذرت، محصولات مختص تولید انرژی همچن جاتروفا و پسماندهای صنعتی می‌شوند. تولید سوخت از ریز جلبک ها به دلیل ماهیت متفاوت تولید به عنوان نسل سوم نام گذاری شده است (محسنی و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از موضوعات اساسی پیش رو برای توسعه سوخت های سبز در مقیاس کلان، هماهنگی و مدیریت یکپارچه مراحل مختلف تولید است(اسکالدوفری و پاسا، ۲۰۱۹). از این رو لازم است تا مدل های طراحی زنجیره تامین‌توسعه یابد که کلیه مراحل از تأمین مواد اولیه تا تولید و عرضه سخت را به صورت یکپارچه کنترل نماید (یوی و همکاران، ۲۰۱۴). یک زنجیره تامین شامل همه تسهیلات (امکانات)، وظایف، کارها و فعالیت‌هایی می‌شود که در تولید و تحویل یک کالا یا خدمت، از تامین کنندگان (و تامین کنندگان آن‌ها) تا مشتریان (و مشتریان آنها) درگیر هستند و شامل برنامه‌ریزی و مدیریت عرضه و تقاضا، تهیه مواد، تولید و برنامه زمان بندی محصول یا خدمت، انبارش،کنترل موجودی و توزیع، تحویل و خدمت به مشتری می‌شود. زنجیره‌های تامین در سازمانهای تولیدی و خدماتی وجود دارند، هر چند که پیچیدگی زنجیره تامین ممکن است از صنعتی به صنعت دیگر و از شرکتی به شرکت دیگر شدیداً تغییر کند(احمدی و همکاران، ۲۰۱۸). زنجیره تامین یک فرآیند یکپارچه سازی است در میان تامین کنندگان، تولید کنندگان و توزیع کنندگان هر سازمان. در این فرآیند بهم وابسته، به دنبال ارضاء کردن هر یک از سیاست‌های سازمان و همچنین حداقل سازی موجودی در جریان در زنجیره و همچنین تامین تقاضای هر یک از مشتریان در انتهای زنجیره تامین می‌باشد(کریستینتو،۲۰۱۹). جهت بالانس فرآیند تولید هر یک از سطح ها در فرآیند زنجیره تامین می بایست جهت مدیریت این مهم، برای هر یک از مقادیر ورودی و خروجی انبارها با تعریف متغییر های بهم وابسته، به کنترل و تخمین مقادیر ورودی و خروجی از هر یک از سطوح عملیاتی پرداخته شود. به طور کلی؛ زنجیره تامین فرآیندی است که همه فعالیتهای مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد، از مرحله تهیه ماده اولیه تا مرحله تحویل کالای نهایی به مصرف‌کننده را شامل می‌شود. مدیریت زنجیره تامین بر یکپارچه‌سازی فعالیتهای زنجیره تامین و نیز جریانهای اطلاعاتی مرتبط با آنها از طریق بهبود در روابط زنجیره در جهت دستیابی به مزیت رقابتی قابل اتکا و مستدام، مشتمل می‌شود(البشابشه و استام، ۲۰۱۹). به عنوان یکی از منابع تولید سوخت‌های سبز نسل دوم، پسماندهای شهری توجهات ویژه‌ای را در سال های اخیر به خود جلب کرده است(یی و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو مدل طراحی زنجیره تامین می تواند در جهت برنامه‌ریزی در مقیاس کلان برای تولید سوخت از پسماندهای شهری به کار گرفته شود. یکی از مهم ترین موضوعات و دغدغه ها در طراحی و بهینه سازی زنجیره تأمین رویکرد حل مسأله می‌باشد. این موضوع از آنجا ناشی می شود که مدل‌های طراحی شبکه اغلب در مسائل پیچیده دسته بندی می شوند. این موضوع باعث می شود تنها نمونه هایی با ابعاد کوچک مدل‌های زنجیره تأمین حوزه سوخت های سبز با استفاده از روش های دقیق قابل حل باشند. این در حالی است که در مسائل دنیای واقعی به دلیل پیچیدگی، عدم قطعیت در پارامترهای اساسی مدل ریاضی وجود دارد که در اکثر پژوهش های این دست نادید گرفته شده اند(چیبلس مارتینز و همکاران، ۲۰۱۶). از این رو برای حل این مشکل در این پژوهش با استفاده از رویکرد استوارسازی مساله انتخاب شده است که نوآوری ویژه ای در این زمینه ایجاد شده است. از طرفی دیگر، در شرایط محیط واقعی، مدیریت زنجیره تامین یک تصمیم گیری چند هدفه بوده است که تحت نظارت خبرگان رخ می دهد و از این رو توسعه یک مدل ریاضی چند هدفه امری ضروری در مفهوم زنجیره تامین سوخت سبز می باشد. بنابراین، در این پژوهش یک مدل ریاضی چند هدفه در راستای زنجیره تامین پایدار سوخت های زیستی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضاها ارائه خواهد شد و در نهایت با توجه به عدم قطعیت در نظر گرفته شده، با استفاده از رویکرد استوارسازی بریستماس و سیم به توسعه مدل ریاضی پرداخته و در نهایت با استفاده از رویکرد مدلسازی اپسیلون محدودیت، مدل چند هدفه و بندرز را در نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX ارزیابی خواهیم نمود.

۲- پیشینه تحقیق

استخراج بیش از حد منابع ذغال‌سنگ، گاز طبیعی و نفت سبب نابودی سریع تر این منابع، نوسان قیمت سوخت و ناپایداری در تامین انرژی شده است. بعلاوه، رشد جمعیت، تغییرات سبک زندگی و رشد استانداردهای زندگی انسان منجر به افزایش مصرف انرژی در جهان به خصوص در کشورهای صنعتی گردیده است(مکس و جانسون، ۲۰۱۹). از این رو کمیسیون اروپا تا سال ۲۰۲۰ برای کشورهای عضو اتحادیه اروپا استفاده ۲۰ درصدی تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر را تعیین کرده است. علاوه بر این، سطح گازهای گلخانه ای باید ۲۰ درصد تا سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۱۹۹۰ کاهش یابد. هر یک از اعضا هدف خود را تعریف کرده، اما به دلیل همگن بودن و توزیع گسترده زیست توده در سراسر جهان، این منبع یک نقش کلیدی در الگوی انرژی های تجدید پذیر جدید بازی می کند (با و همکاران، ۲۰۱۶ ؛ فرومبو و همکاران، ۲۰۰۹ ؛ کانزیان و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از این منبع انرژی منافعی را در جنبه هایی همانند آلودگی محیط زیست، تنوع و امنیت انرژی و اقتصاد به وجود می آورد (لانگ و همکاران، ۲۰۱۳ ؛ مبینی و همکاران، ۲۰۱۱). سوخت سبز به عنوان یک اصطلاح گسترده شامل منابع درختان، محصولات زراعی، جلبک های آلی صنعتی، ضایعات انسانی و حیوانی، و غیره تعریف می شود (مفاخری و نصیری، ۲۰۱۴ ؛ فرومبو و همکاران، ۲۰۰۹). به طور خاص زیست توده جنگل را می توان در طیف گسترده ای از کاربردهای تولید حرارت، برق، سوخت و مواد شیمیایی استفاده کرد (رنتیزلاس و همکاران، ۲۰۰۹ ؛ کمبرو و صولتی، ۲۰۱۴) همچنین، این منبع انرژی می تواند ذخیره شود و مورد استفاده قرار گیرد و برای تولید انرژی بر روی تقاضا که مزیت نسبی به دیگر منابع تجدیدپذیر را تشکیل می دهد مورد استفاده قرار گیرد (شعبانی و همکاران، ۲۰۱۳ ؛ رنتیزلاس و همکاران، ۲۰۰۹). علاوه بر قابلیت های ذکر شده، سوخت سبز به چندین مشکل در زنجیره تامین خود مواجه است. از جمله می توان به هزینه های بالا به علت پراکندگی جغرافیایی منابع، تغییرپذیری در کیفیت و مقادیر موجود، چگالی انرژی پایین تر نسبت به سوخت های فسیلی و ناهمگونی در

ساختار چند شرکتی اشاره کرد (کمبرو و صولتی، ۲۰۱۴ ؛ شعبانی و همکاران، ۲۰۱۳، کانزیان و همکاران، ۲۰۱۳، رنتیزلاس و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به مشکلات ذکر شده، هزینه های لجستیک که نشان دهنده بخش پیوسته در استفاده روزافزون از زیست توده جنگل برای تولید انرژی است مهم خواهد بود که زنجیره تامین را به گونه ای بهینه سازی کنید تا بتوان آن را کارآمد و رقابتی تر کرد (کمبرو و صولتی، ۲۰۱۴ ؛ دی می یر و همکاران، ۲۰۱۴ ؛ فلیسبرگ و همکاران، ۲۰۱۲). مدیریت زنجیره تامین زیست توده معمولا به سه سطح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی تقسیم می شود. (با و همکاران، ۲۰۱۶ ؛ لین و همکاران، ۲۰۱۴). تصمیمات استراتژیک با توجه به تصمیم‌گیری های بلندمدت انجام میشود و همچنین به ارزیابی از منابع زیست توده و صنایع مربوط به مشتری، محل، اندازه و طراحی آن میپردازد (لین و همکاران، ۲۰۱۴). از سوی دیگر، برنامه‌ریزی تاکتیکی به تصمیمات میان مدت و کوتاه مدت مانند تولید، تحویل و برنامه های فرآیند زیست توده می پردازد. در نهایت در سطح عملیاتی، تصمیمات کوتاه مدت درباره عملیات درون میدانی از جمع آوری زیست توده و تبدیل آن به انرژی بحث خواهد شد (فرومبو و همکاران، ۲۰۰۹؛ لین و همکاران، ۲۰۱۴). بابازاده (۲۰۱۵) در پژوهشی چنین بیان میکند که گسترش سریع تولید نسل اول تولید بیودیزل از روغنهای خوراکی گیاهی و چربی های حیوانی موجب نگرانی در میان سیاست گذاران و متخصصان توسعه در مورد تخصیص زمین های کشاورزی، عرضه مواد غذایی و تعادل بازار مواد غذایی شده است. در این راستا، استفاده از نسل دوم سوخت زیستی از مواد اولیه غیر قابل خوردن، در سال های اخیر، منافع بسیاری را به خود جلب کرده است. برای سرعت بخشیدن به انتقال سوخت های زیستی حیاتی در مقیاس بزرگ و اقتصادی، طراحی سیستماتیک و بهینه سازی کل زنجیره های تامین سوخت زیستی بسیار مهم است. میرهاشمی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل دو مرحله ای بهینه سازی برای طراحی یک سوخت زیستی بیولوژیکی زیست توده‌ای ارائه کرده‌اند و در مرحله اول، یک مدل تجزیه و تحلیل فراوانی داده‌های وزنی (CWDEA) برای رتبه بندی مکان‌های ایجاد مزرعه تولید در نظر گرفته و در مرحله دوم یک مدل برنامه ریزی خطی تلفیقی جهت تعیین سطح بهینه تولید در زنجیره تامین استراتژیک و تاکتیکی ارائه کردند. سوارز (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه ریزی خطی مختلط را برای پشتیبانی از تصمیم گیری در محدوده زمانی اولیه ارائه دادند که منجر به بسط زنجیره تامین سوخت شده است. در برخی مطالعات دیگر نیز مدل سازی و بهینه سازی توسعه یافته در زنجیره تامین بررسی شده است (مفاخری و نصیری، ۲۰۱۴ ؛ دی می یر و همکاران، ۲۰۱۴ ؛ شعبانی و همکاران، ۲۰۱۳). حبیب و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی یک رویکرد استوار امکانی برای زنجیره ی تامین بیودیزل از حیوانات با چربی زیاد با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مسئله ارائه نمودند. آن ها، مدل را با استفاده از یک رویکرد برنامه ریزی عدد صحیح مختلط فرموله کردند. تابع هدف مسئله از نوع کمینه سازی کل هزینه های احداث، هزینه های خرید، هزینه های عملیاتی، هزینه های حمل و نقل و همچنین هزینه های مربوط به مالیات خروج آلاینده ها از واحد تولیدی بود. لازم به ذکر است که در این تحقیق برای در نظر گرفتن شاخص های زیست محیطی، مالیاتی برای میزان خروج دی اکسید کربن و سایر آلاینده ها در نظر گرفته شد که این مالیات ها به همراه سایر هزینه ها به عنوان تابع هدف مسئله در نظر گرفته شد. همچنین برخی پارامترهای مدل با استفاده از رویکرد فازی در نظر گرفته شدند تا بتوان مواجهه ی مناسبی با عدم قطعیت در پارامترها داشت. سپس با استفاده از رویکرد استوار امکانی نسبت به حل مدل اقدام شد. سپس یک نمونه ی موردی مربوط به کشور پاکستان ارائه شد و نتایج به دست آمده حکایت از کارآیی مناسب رویکرد حل در ابعاد دنیای واقعی داشت. یادالا و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی به بهینه سازی زنجیره ی تامین بیومس جلبک به بیودیزل پرداختند. تبدیل بیومس جلبک به بیودیزل یکی از رایج ترین رویکردهای موجود در تهیه ی بیودیزل می باشد. محققین این زنجیره را با استفاده از یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط تک هدفه فرموله کردند. تابع هدف از نوع کمینه سازی هزینه های شبکه مشتمل بر هزینه های تولید، عملیات و حمل و نقل در یک افق زمانی ده ساله در نظر گرفته شد. کانگ و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی یک طراحی سه مرحله ای برای زنجیره ی تامین سوخت گیاهی مبتنی بر جلبک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی ارائه کردند. آن ها بدین منظور، یک مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط تک هدفه ارائه نمودند. تابع هدف این مدل کمینه سازی هزینه های زنجیره ی تامین بود. این هزینه ها شامل هزینه های حمل و نقل، هزینه های تولید و هزینه های خروج گازهای گلخانه ای ناشی از فعالیت های موجود در زنجیره ی تامین می باشد. ژنگ و همکاران (۲۰۲۰) نقش سیاست های دولت بر روی کارآیی هر چه بیشتر سیستم تبدیل روغن های پخت و پز غیرقابل مصرف به بیودیزل را مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، سیاست ها و استراتژی های مختلفی که می توان برای کارآمد و پایداری هر چه بیشتر این زنجیره به کار برد تشریح شدند. سپس، یک بازی از نوع همکارانه به منظور بررسی این استراتژی ها ارائه شد. محسنی و پیشوایی (۲۰۲۰) در تحقیقی به ارائه ی مدل بهینه سازی استوار برای زنجیره ی تامین تبدیل فاضلاب ها به بیودیزل پرداختند. به منظور مواجهه با عدم قطعیت در پارامترهای مدل، رویکرد بهینه سازی استوار داده محور مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، سیستم پشتیبان فازی همسایگی نمونه داده ها به منظور کاهش میزان وابستگی به داده های تاریخی مورد استفاده قرار گرفت. تابع هدف مسئله کمینه سازی هزینه های زنجیره ی تامین شامل هزینه های استقرار واحدها، هزینه های خطوط لوله، هزینه های عملیاتی، هزینه های تولید، هزینه های حمل و نقل می باشد. از بررسی این مقالات این نتیجه حاصل می شود که اکثر مقالات در سطح استراتژیک کار شده اند و در آن سطح هم حوزه طراحی زنجیره تأمین از توجه بیشتری برخوردار است. که در این سطح، جای بحث های منبع یابی و قراردادهای تأمین و بحث های زیست محیطی خالی هست. در این میان اکثر مقالات حالت قطعی را در نظر گرفته اند و در بحث های احتمالی و ترکیبی شکاف ادبیاتی زیادی وجود دارد، این در حالی است که یکی از مباحث بسیار مهم در بحث زنجیره ی تأمین سوخت زیستی به خصوص آن هایی که منبع کشاورزی و جنگلی دارند در نظر گرفتن عدم قطعیت در بحث های آب و هوایی و تولید محصولات کشاورزی هست؛ و اکثر آن ها توابع هدفی مانند سود و هزینه و ... را در نظر گرفته اند این در حالی است که جای در نظر گرفتن توابع هدفی که بحث های پایداری و زیست محیطی را در نظر بگیرد مانند حداقل کردن گازهای گلخانه ای و بیشینه کردن تعداد مشاغل ایجاد شده و در ادبیات خالی هست (سارکر، ۲۰۱۹). با توجه به بررسی انجام شده بر روی مقالات منتشر شده حوزه زنجیره تامین سوخت زیستی، طبقه بندی مقالات به شرح جدول ۱ می باشد:

جدول ۱ ارزیابی مطالعات انجام شده در حیطه زنجیره تامین سوخت زیستی.

نویسنده/سال	اهداف	چند دوره ای	چند هدفه	پایداری	عدم قطعیت	پارامتر عدم قطعیت
مول و همکاران (۱۹۹۷)	۸					
ناگل (۲۰۰۰)	۱					
تمبو و همکاران (۲۰۰۳)	۳	*				
فرپاز و همکاران (۲۰۰۴)	۱					
گونارسون و همکاران (۲۰۰۴)	۱	*				
ماپمبا و همکاران (۲۰۰۷)	۳	*				
دانت و همکاران (۲۰۰۷)	۱	*				
ماپمبا و همکاران (۲۰۰۸)	۳	*				
ولاچس و همکاران (۲۰۰۸)	۱					
فرومبو و همکاران (۲۰۰۹b)	۱					
زامبونی و همکاران (۲۰۰۹)	۱		*			
اکس یو گلو و همکاران (۲۰۰۹)	۱	*				
هوانگ و همکاران (۲۰۱۰)	۱	*				
آکگول و همکاران (۲۰۱۰)	۱					
کیم و همکاران (۲۰۱۰)	۲					
دال-ماس و همکاران (۲۰۱۱)	۳	*			*	هزینه سوخت زیستی
ژو و همکاران (۲۰۱۱)	۲	*				
الکس ماروین و همکاران (۲۰۱۲)	۳					
ان و همکاران (۲۰۱۱)	۲	*				

یو و همکاران (۲۰۱۲)	۷	*	*	*		
یو و وانگ (۲۰۱۱)	۷	*	*			
لم و همکاران (۲۰۱۱)	۲					
ژو و یاو (۲۰۱۱)	۲					
کیم و همکاران (۲۰۱۱)	۲				*	مقادیر عرضه، تقاضای بازار، قیمتهای بازار
چن و فن (۲۰۱۲)	۱				*	عرضه مواد اولیه، تقاضای سوخت زیستی
بالامن و سلیم (۲۰۱۴)	۲					
گیارولا و همکاران (۲۰۱۳)	۳	*	*		*	مواد خام، نوسانات هزینه معاملات کربن
پاولوسی و همکاران (۲۰۱۶)	۳	*	*			
رونی و همکاران (۲۰۱۶)	۷		*	*		
آزاده و ارانی (۲۰۱۶)	۲	*			*	سوخت زیستی در دسترس، تقاضا
دوارته و همکاران (۲۰۱۶)	۲	*				
دی می‌یر و همکاران (۲۰۱۶)	۱۱	*				
میرت و همکاران (۲۰۱۶)	۱۰	*	*	*		
ان جی و ماراولیاس (۲۰۱۶)	۱	*				
کامبرو و همکاران (۲۰۱۶)	۳	*	*			
کامبرو و صولتی (۲۰۱۶)	۳	*	*	*		
میرهاشمی (۲۰۱۸)	۲	*		*		
سارکر (۲۰۱۹)	۳	*	*	*		
فو (۲۰۱۹)	۳	*	*			

با توجه به بررسی های انجام شده خلأ تحقیقاتی مشاهده شده در پژوهش ها، عدم در نظر گرفتن پایداری در زنجیره تامین سوخت سبز بوده است و اکثراً به مباحث کمینه‌سازی هزینه ها و بیشینه‌سازی سود تمرکز کرده‌اند و خلأ تحقیقاتی دیگر مشاهده شده عدم بکارگیری استوارسازی مدل‌های زنجیره تامین می باشد. البته برخی پژوهش ها به سناریو سازی رفع عدم قطعیت پرداختند که به دلیل عدم کاربردی بودن این رویکرد ناکارا است. از این رو در این پژوهش یک زنجیره تامین تولید سوخت سبز طراحی شده و بر اساس رویکرد کمینه سازی هزینه ها، آلایندگی، اجتماعی و ریسک توسعه خواهد یافت.

۳- متدولوژی پژوهش

مسأله حاضر در این پژوهش عبارت است از برنامه¬¬ریزی زنجیره تأمین مربوط به سوختهای زیستی با درنظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مدل. زنجیره تأمین موجود دارای سه سطح حوزه¬های تأمین زیست توده، پالایشگاه¬ها و مراکز عرضه می¬باشد. مواد اولیه برای تولید سوخت زیستی توسط پالایشگاهها با توجه به نوع تکنولوژی موجود در پالایشگاه از حوزه¬های مختلف تأمین زیست توده خریداری شده و با در نظر گرفتن سهولت دسترسی به تسهیل حمل و نقل به محل پالایشگاه حمل گردیده و طی فرآیندی تبدیل به محصول نهایی یعنی سوخت زیستی می‌شوند. انتخاب تسهیل حمل و نقل نیز براساس مسافت مابین مراکز تأمین زیست توده، پالایشگاهها و مراکز عرضه سوخت و همچنین میزان گازهای خطرناک تولید شده از هر یک از گزینه¬های حمل و نقل، به منظور به حداقل رساندن هزینه¬ها و همچنین کاهش میزان آلاینده¬ها و افزایش رفاه اجتماعی صورت می¬گیرد.

فرضیات مسأله به شرح زیر می¬باشند:

- سیستم زنجیره تأمین مربوطه متشکل از چندین تأمین کننده زیست توده، چندین پالایشگاه زیستی و چندین مرکز تقاضا می¬باشد.
- قابلیت دسترسی پالایشگاهها به انواع تسهیلات حمل و نقل به منظور تأمین زیست توده و عرضه محصول نهایی وجود دارد.
- در پالایشگاهها قابلیت تولید سوخت با توجه به نوع تکنولوژی موجود میسر می¬باشد.
- هزینه نگهداری موجودی و فروش از دست رفته جزء مخارج تولید کننده محسوب می¬شوند.
- تقاضای محصولات نهایی تابعی از قیمت می¬باشد.
- افق برنامه¬ریزی چندین دوره در نظر گرفته شده است.
- موجودی اولیه برای مواد خام و محصول نهایی در پالایشگاهها داده شده است.
- ترکیب سوخت در پالایشگاه¬ها و فروش در مکان¬های تقاضا صورت می¬گیرد.
- تسهیلات حمل و نقل در دسترس در تمامی لایه¬های زنجیره تأمین یکسان فرض شده است.
- هر یک از گزینه¬های حمل و نقل دارای نرخ پیش فرض تولید گازهای خطرناک هستند.
- مولفه ریسک تامین در فضای قطعی مدل ارزیابی می گردد.

با توجه به مساله مورد مطالعه، بیس اصلی این پژوهش بر اساس مقاله میرهاشمی و همکاران (۲۰۱۸) و نار(۲۰۲۱) تدوین شده است که اهداف تولید و پایداری به مساله مورد نظر اضافه شده است.

جهت مدل¬سازی مسأله داریم:

مجموعه اندیس‌ها

I	مجموعه انواع زیست توده که با i نشان داده شده است.
J_i	مجموعه انواع زیست توده که با i نشان داده شده است.
F	مجموعه حوزه¬های زیست توده نوع I
	مجموعه مکان¬های بالقوه برای پالایشگاه¬ها
E	مجموعه انواع سوخت زیستی
M	مجموعه بازارهای مصرفی
T	مجموعه time stage ها می¬باشد که با t اندیس گذاری شده است.
R_f	مجموعه انواع تکنولوژی استفاده شده در پالایشگاه f که با r اندیس گذاری شده است.
S	مجموعه سناریوها
K	مجموعه انواع تسهیلات حمل و نقل
	مجموعه پارامترها
pr_i	هزینه خرید زیست توده زباله شهری نوع i ام
C_{er}	هزینه تولید سوخت زیستی زباله شهری نوع e ام با تکنولوژی نوع r ام
V_k	متوسط سرعت حرکت تسهیل نوع kام
f^F_{fr}	هزینه سرمایه‌ای ثابت راه‌اندازی سالیانه پالایشگاه در مکان f با تکنولوژی نوع r ام
f^V_{efr}	هزینه سرمایه‌ای سالیانه هر واحد پالایشگاه که در مکان f با تکنولوژی نوع rام برای تولید سوخت نوع e قرار می‌گیرد.
d_{XY}	فاصله بین گره x و y
t^d_{bk}	هزینه حمل وابسته به مسافت حجم‌های جامد مثل: هزینه سفر هر مایل تسهیل دارای بار که شامل هزینه‌های سوخت، بیمه، تعمیرات و نگهداری می-شود.
t^t_{bk}	هزینه حمل وابسته به زمان سفر حجم‌های جامد مثل: هزینه سفر۱ساعت هر تسهیل دارای بار که شامل هزینه‌های کارگر و هزینه‌های سرمایه‌ای می-شود.
t^d_{lqk}	هزینه حمل وابسته به فاصله حجم‌های جامد حمل شده توسط تسهیل kام
t^t_{lqk}	هزینه حمل وابسته به زمان سفر حجم‌های جامد حمل شده توسط تسهیل kام
lu_{bk}	هزینه بارگیری و تخلیه بار تسهیل نوع kام برای حجم‌های جامد
lu_{lqk}	هزینه بارگیری و تخلیه بار تسهیل نوع kام برای حجم‌های مایع
α_{em}	هزینه نگهداری موجودی برای سوخت زیستی

نوع eام در شهرmام.

β_{em} هزینه کمبود سوخت زیستی نوع eام در شهر m ام.

Cap_{bk} ظرفیت حجم جامد تسهیل نوع kام

Cap_{lqk} ظرفیت حجم مایع تسهیل نوع kام

Mc_i رطوبت موجود در زیست توده نوع iام

ضریب هزینه حمل زیست توده توسط تسهیل نوع kام از حوزه‌های زیست توده به پالایشگاه‌ها

CC^1_{ijifk} (۱)

$$CC^1_{ijifk} = \left(\left(t^d_{bk} + \frac{t^t_{bk}}{V_k}\right) * \frac{d_{jif}}{Cap_{bk}} + lu_{bk}\right) 1/(1 - MC_i)$$

ضریب هزینه حمل سوخت زیستی از پالایشگاه‌ها به مراکز تقاضا

CC^2_{efmk} (۲)

$$CC^2_{efmk} = \left(\left(t^d_{lqk} + \frac{t^t_{lqk}}{V_k}\right) * \frac{d_{fm}}{Cap_{lqk}} + lu_{lqk}\right)$$

η_{ier} نرخ تبدیل پالایشگاه، اندازه‌گیری اینکه چه مقدار سوخت زیستی نوع e توسط یک تن زیست توده خشک نوع i با تکنولوژی نوع r می‌تواند تولید شود.

$Capr_{efr}$ ماکزیمم ظرفیت مجاز پالایشگاه در مکان f با تکنولوژی نوع rام برای سوخت زیستی نوع eام

$Capi_{em}$ ظرفیت سوخت زیستی نوع e ذخیره شده در شهر mام

S^t_{jis} ماکزیمم زیست توده موجود نوع i در حوزه j_i در فاز زمانی t در سناریوی s

D^t_{ems} تقاضا در شهر m در فاز t برای سوخت زیستی نوع eام در سناریوی s

x^t_{jifs} پارامتر باینری زمانی ۱ می‌شود که ارتباط بین حوزه j_i زیست توده در پالایشگاه در مکان f در سناریوی s قابل استفاده باشد

t^t_{fms} پارامتر باینری است زمانی ۱ می‌شود که رابط بین پالایشگاه در مکان f به شهر m در سناریوی s قابل استفاده باشد.

Υ^t_{kji} پارامتر باینری است زمانی ۱ می‌شود که حوزه j_i زیست توده در فاز زمانی t به تسهیل kام دسترسی داشته باشد.

λ^t_{kf} پارامتر باینری است زمانی ۱ می‌شود که پالایشگاه fام در فاز زمانی tام به تسهیل kام دسترسی داشته باشد.

$Prob_s$ احتمال وقوع سناریوی s

G^k_N نرخ انتشار دی اکسید نیتروژن در واحد مسافت برای وسیله حمل و نقل kام

G^k_c نرخ انتشار مونوکسید کربن در واحد مسافت برای وسیله حمل و نقل kام

A^t_{fr} تعداد شغل ایجاد شده در دوره زمانی t در مرکز پالایشگاهی f با تکنولوژی نوع r

B^t_{fr} تعداد حوادث ایجاد شده در دوره زمانی t در مرکز پالایشگاهی f با تکنولوژی نوع r

RY^t_{ji} ریسک تامین زیست توده نوع i ام از تامین کننده j ام در دوره t

مجوعه متغیرهای تصمیم

$Y^t_{ji_s}$ مقدار زیست توده نوع iام خریداری شده از حوزه j_i در فاز زمانی t در سناریوی s

$X^t_{ji_{fsK}}$ مقدار زیست توده نوع iام حمل شده از حوزه j_i به پالایشگاه f در فاز زمانی t در سناریوی s توسط تسهیل Kام

$y^t_{ef_{msK}}$ مقدار سوخت زیستی نوع e حمل شده از پالایشگاه f به شهر m در فاز زمانی t در سناریوی s توسط تسهیل Kام

Cap^t_{efrs} ظرفیت پالایشگاه طراحی شده f با تکنولوژی نوع r در فاز زمانی t برای سوخت نوع e در سناریوی s

$I^t_{e_{ms}}$ مقدار موجودی سوخت زیستی نوع e در شهر m در فاز زمانی t در سناریوی s

$q^t_{e_{ms}}$ مقدار کمبود سوخت زیستی نوع e در شهر m در فاز زمانی t در سناریوی s

$Prod^t_{efs}$ مقدار سوخت زیستی نوع e تولید شده در پالایشگاه f در فاز زمانی t در سناریوی s

$Z^t_{fr_s}$ برابر ۱ است اگر پالایشگاه f با تکنولوژی نوع r در فاز زمانی t در سناریوی s باز باشد.

مدل‌سازی ریاضی

در این بخش با در نظر گرفتن مجموعه‌ی پارامترها و متغیرهای مسأله مدل ریاضی مرتبط با مسأله بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} Min \quad cost \quad = \\ \sum_{s\in S}\sum_{t\in T} prob_s \{ & \sum_{f\in F}\sum_{r\in Rf}(fFfr\ Ztfrs + \\ & \sum_{e\in E}(fVefr\ captefrs)) + \\ & \sum_{i\in I}\sum_{ji\in JI} pri\ Ytjis + \\ & \sum_{e\in E}\sum_{r\in Rf}\sum_{f\in F} Cer\ prodtefs + \\ & \sum_{i\in I}\sum_{ji\in JI}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} CC1ijifk\ Xtjifsk + \\ & \sum_{e\in E}\sum_{f\in F}\sum_{m\in M}\sum_{K\in k} CC2efmk\ ytefmsk + \\ & \sum_{e\in E}\sum_{m\in M}(\alpha em\ Items + \beta em\ qtems)\} \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} & Min\ pollutants \\ & = \sum_{s\in S}\sum_{t\in T} prob_s \{ \sum_{ji\in JI}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} Xtjifsk G^k_I \\ & + \sum_{e\in E}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} ytefmsk G^k_N\ d_{fm} \\ & + \sum_{ji\in JI}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} Xtjifsk G^k_C d_{jif} \\ & + \sum_{e\in E}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} ytefmsk G^k_C\ d_{fm}\} \end{aligned} \quad (۴)$$

$$Min\ Risk \quad (۵)$$

$$= \sum_{s\in S}\sum\nolimits_{t\in T} prob_s \left\{ \sum_{ji\in JI}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} \mathrm{Y_{tjis}} * \mathrm{RY_{tji}} \right\}$$

$$Maxwelfare = prob_s \left\{ \sum_{t\in T}\sum_{s\in S}\sum_{f\in F}\sum_{r\in R_f} \left(A^t_{frs} - B^t_{frs}\right) Z^t_{frs} \right\}$$

$$\sum_{e\in E} Captefrs \le \sum_{e\in E} caprefr\ Ztfrs \qquad \forall f\in F, s\in S, t\in T, r\in Rf$$

$$prodtefs \le captefrs \qquad \forall e\in E, f\in F, s\in S, t\in T \qquad (۶)$$

$$Items \le capiem \qquad \forall e\in E, m\in M, s\in S, t\in T \qquad (۷)$$

$$\sum_{ji\in JI}\sum_{i\in I}\sum_{k\in K} Xtjifsk\ \eta ier = prodtefs \quad \forall e\in E, f\in F, s\in S, t\in T, r\in Rf \qquad (۸)$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{k\in K} ytefmsk = prodtefs \qquad \forall e\in E, f\in F, s\in S, t\in T \qquad (۹)$$

$$\mathrm{Ytjis} = \sum_{f\in F}\sum_{k\in K} Xtjifsk \qquad \forall ji\in JI, s\in S, t\in T \qquad (۱۰)$$

$$Ytjis \le Stjis \qquad \forall ji\in JI, s\in S, t\in T \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} ytefmsk + qtems + It_{1ems} - Items = Dtems(ptems) \qquad \forall e\in E, m\in M, s\in S, t\in T \qquad (۱۲)$$

$$Dtems(ptems) = Mtems\ exp(-\frac{ptems}{ke})$$

$$\sum_{r\in Rf} Ztfrs \le 1 \qquad \forall f\in F, s\in S, t\in T \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{k\in K} ytefmsk \le ttfmsM \qquad \forall e\in E, f\in F, m\in M, s\in S, t\in T \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{k\in K} Xtjifsk \le xtjifs\ M \qquad \forall ji\in JI, f\in F, s\in S, t\in T \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{s\in S} Xtjifsk \le Ykji\ t\ M \qquad \forall ji\in JI, k\in K, t\in T \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{m\in M}\sum_{s\in S} ytefmsk \le \lambda kft\ M \qquad \forall f\in F, k\in K, t\in T \qquad (۱۷)$$

توضیحات مدل

با توجه به مدل ارائه شده داریم:

رابطه شماره (۳) بیانگر تابع هدف اقتصادی می‌باشد که حداقل نمودن هزینه‌های کل زنجیره را مدنظر قرار می‌دهد. رابطه‌ی شماره (۴) مربوط به تابع هدف دوم زیست محیطی می‌باشد که به دنبال کاهش گازهای خطرناک تولید شده شامل NO_2 و CO و تابع هدف سوم بیشینه سازی عملکرد اجتماعی زنجیره تأمین پایدار بوده که شامل ایجاد اشتغال و تعداد حوادث ایجاد شده در مراکز فعال پالایشگاهی در هر دوره و سناریو می باشد. رابطه شماره (۵) مربوط به کمینه سازی ریسک تامین زیست توده می باشد. رابطه-های شماره (۶)، (۷) و (۸) مربوط به محدودیت‌های ظرفیت بوده که بیانگر این می‌باشند که اولا، هیچ ظرفیت تولید سوختی وجود ندارد مگر اینکه یک پالایشگاه باز در مکان بالقوه f وجود داشته باشد که ظرفیت پالایشگاه طراحی شده نباید از ماکزیمم ظرفیت مجاز پالایشگاه در هر دوره و سناریو بیشتر شود. دوم اینکه، مقدار تولید سوخت نباید از ظرفیت پالایشگاه بیشتر باشد و همچنین ظرفیت موجودی در هر شهر برای هر نوع سوخت در هر سناریو و دوره موجود باشد. رابطه‌های شماره (۹)، (۱۰) و (۱۱) در ارتباط با محدودیت‌های تعادلی می‌باشند. محدودیت شماره (۱۲) نشان می‌دهد که مقدار خرید هر زیست توده محدود به حد بالای آنها می‌شوند. رابطه شماره (۱۳) مربوط به محدودیت بیان کننده معادله تعادل موجودی در مراکز تقاضا می‌باشد که تقاضای محصولات نهایی تابعی از قیمت و قیمت محصولات نهایی از حرکت هندسی براونی تبعیت می‌کند. تابع تقاضا نمایی فرض شده که در آن M_{em} تقاضایی با قیمت برابر صفر بوده و $ke \ge 0$ تابع مقیاس قیمت است. محدودیت شماره (۱۴) بیان می‌کند که حداکثر یک نوع تکنولوژی برای هر پالایشگاه می‌تواند انتخاب شود. محدودیت‌های شماره (۱۵) و (۱۶) در ارتباط با رابط بین پالایشگاهها و مراکز تقاضا و همچنین رابط بین مراکز تأمین زیست توده و پالایشگاهها می‌باشند. رابطه‌های شماره (۱۷) و (۱۸) بیانگر دسترسی مراکز عرضه زیست توده و پالایشگاهها به انواع تسهیلات حمل و نقل می‌باشند.

۴- رویکرد استوار سازی مدل ریاضی

همانطور که گفته شد، مدل ارائه شده در بخش قبل یک مدل خطی است و در این بخش بنا به دلایلی که ذکر شد، مدل پیشنهادی به یک مدل خطی تبدیل خواهد شد. همچنین در این بخش عدم قطعیت در تقاضا به کمک برنامه‌ریزی استوار و رویکرد برتسیماس و سیم به مدل اضافه خواهد شد. برای خطی سازی مدل پیشنهادی با اضافه نمودن اندیس s به متغیرهای مدل بعنوان سناریودر نظر گرفته می شود. با این تغییر، محدودیت شماره (۱۰) بصورت مدل برتسیماس اصلاح خواهد شد. لذا مدل پیشنهادی یک مدل خطی خواهد بود. بررسی‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که پارامتر

تقاضا از جمله پارامترهای مهم بوده که مقادیر آن ممکن است از مقادیر اسمی فراتر رود. از این رو در نظر گرفتن این پارامتر در شرایط غیر قطعی می‌تواند مدل پیشنهادی را به واقعیت مسئله نزدیک‌تر کند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا، همان‌طور که گفته شد از برنامه‌ریزی استوار و رویکرد برتسیماس و سیم استفاده خواهد شد. روش بهینه‌سازی استوار به دنبال جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه‌ای است که با احتمال بالایی موجه باشند. رویکرد برتسیماس و سیم یکی از چهار رویکرد اصلی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در برنامه‌ریزی استوار است. در این قسمت اشاره مختصری به این رویکرد خواهیم نمود. برای این منظور مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر می‌گیریم:

(۱۹)

$$Min \sum_j c_j x_j$$
$$s.t$$
$$\mathrm{Ax} \le b$$

در این مدل فرض می‌کنیم که فقط ضرایب سمت راست در محدودیت‌ها یعنی ماتریس A دارای مقادیر غیرقطعی است و درایه‌های این ماتریس یعنی a_{ij} ها در بازه $[\tilde{a}_{ij} - \hat{a}_{ij}, \tilde{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ نوسان می‌کنند که $\tilde{a}_{ij}$ و $\hat{a}_{ij}$ به ترتیب مقادیر اسمی و حداکثر انحراف پارامتر a_{ij} می‌باشند. مدل استوار پیشنهادی برتسیماس و سیم به شکل زیر است.

(۲۰)

$$Min \sum_j c_j x_j$$
$$s.t. \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} \mu_{ij} \le b_i \quad \forall i$$
$$z_i + \mu_{ij} \ge \hat{a}_{ij} x_{ij} \quad \forall \mathrm{i,j}$$
$$z_i, \mu_{ij} \ge 0 \quad \forall \mathrm{i,j}$$

در این روابط z_i و μ_{ij} متغیرهای کمکی دوگان هستند و پارامتر Γ_i که بودجه عدم‌قطعیت نامیده می‌شود، سطح محافظه‌کاری را نشان می‌دهد که با توجه به میزان اهمیت محدودیت و نیز ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شود.

از این رو جهت استوار سازی مدل ریاضی داریم:

پارامترها

$\widehat{D}_{tems}$: تلرانس تقاضا در شهر m در فاز t برای سوخت زیستی نوع e‌ام در سناریوی s

Γ_{tem} : بودجه عدم قطعیت

متغیرهای استوار سازی

$\mathrm{p_{tem}}$ و $\mathrm{q_{tems}}$: متغیرهای مدل استوار

(۲۱)

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in K} ytefmsk + qtems + It_{1ems} - Items + \Gamma_{tems} p_{tem} + q_{tems} = Dtems(ptems) \quad \forall e \in E, m \in M, s \in S, t \in T$$

(۲۲)

$$p_{tem} + q_{tems} \ge \widehat{D_{ems}^{t}}(ptems) \quad \forall j \in J, v \in V, t \in T$$

۵. روش حل مدل ریاضی

یکی از روشهای دقیق بدست آوردن حل های پارتوی بهینه استفاده از روش محدودیت اپسیلون است که اولین بار توسط آلجدان ارائه شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روشها بهینه سازی چند هدفه کاربرد آن برای فضاهای حل غیر محدب است زیرا روشهایی از قبیل ترکیب وزنی اهداف در فضای نامحدب کارایی خود را از دست میدهند. زمان محاسباتی یک الگوریتم از ویژگیهای مهم هر الگوریتم جهت ارزیابی آن است از آنجایی که یکی از ضعفهای اساسی الگوریتمهای مبتنی بر جستجوی دقیق از جمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آنهاست، بدیهی است که بکارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد .

فرم کلی یک مسئله MODM به‌صورت زیر است:

$$\begin{cases} Min\ (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ x \in X \end{cases} \quad (۲۶)$$

فرض کنید هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و سایر اهداف به کران بالای اپسیلون محدود می‌شوند و در قیود مسئله اعمال می‌شوند. در این صورت، روش اپسیلون-محدودیت (EC) بکار گرفته می‌شود و مدل تک هدفه ۲۷ حاصل می‌گردد:

$$\begin{cases} Min\ f_1(x) \\ f_i(x) \le e_i\ i = 2,3, \dots, n \\ x \in X \end{cases} \quad (۲۷)$$

که در آن هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و اهداف دوم تا n-ام به مقدار حداکثر e_i محدود می‌شوند. در مدل ۲۷، با تغییر مقادیر e_i جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که ممکن است کارا[1] نباشند (کارای ضعیف[2] هستند). با اصلاح/تکمیل جزئی مدل ۲۸، می‌توان مشکل مذکور را رفع کرد که به روش اپسیلون-محدودیت تکمیل‌شده (AEC) معروف است (موروتاس[3]، ۲۰۰۹). برای اجرای بهتر روش AEC، می‌توان بازه مناسب اپسیلون‌ها (e_iها) را ابتدا Lex به دست آورد (آقایی[4] و همکاران، ۲۰۱۱). در روش AEC ابتدا باید بازه مناسب تغییرات e_iها مشخص شود و سپس به ازای مقادیر مختلف e_iها جبهه پارتو را به دست آورد.

۱. بازه مناسب برای e_iها با روش Lex

به‌منظور یافتن بازه مناسب برای e_i مربوط به هدف i-ام ($i = 2, \dots, n$)، ابتدا برای هر یک از اهداف nو ... و2و $j = 1$ مسائل بهینه‌سازی زیر حل می‌شود:

$$PayOff_{jj} = \underset{x \in X}{Min}\ f_j(x) \quad (۲۸)$$

که $x^{j,*}$ به‌عنوان جواب بهینه و $PayOff_{jj} = f_j(x^{j,*})$ به‌عنوان مقدار بهینه هدف j-ام ذخیره می‌شود. حال مقدار بهینه هدف i-ام را، درحالی‌که هر مرتبه یکی از اهداف $n; j \ne i$و ... و2و $j = 1$ در حالت بهینه قرار دارد، به‌صورت معادله ۲۹ نتیجه می‌شود:

$$PayOff_{ij} = \underset{\substack{x \in X \\ j \ne i}}{Min}\ f_i(x) \quad f_j(x) = PayOff_{jj} \quad (۲۹)$$

که جواب بهینه $x^{i,j,*}$ با مقدار بهینه $PayOff_{jj} = f_i(x^{i,j,*})$ برای هدف i-ام محاسبه می‌شود. به‌این‌ترتیب، با استفاده از روش Lex، ماتریس پی‌آمد[5] زیر حاصل می‌شود:

$$PayOff = [payOff_{ij}] \quad (۳۰)$$

بعد از تعیین ماتریس $PayOff$، بر هدف nو ... و1 $= i$ موارد زیر تعریف می‌شود:

- $Min(f_i) = Min_j\{payOff_{ij}\} = payOff_{ii}$

[1] Efficient
[2] Weakly Efficient
[3] Mavrotas
[4] Aghaei
[5] Payoff

- $Max(f_i) = Max_j\{payOff_{ij}\}$
- $R(f_i) = Max(f_i) - Min(f_i)$

با تعریف فوق‌الذکر، بازه مناسب به روش Lex برای e_i به‌صورت $e_i \in [Min(f_i), Max(f_i)]$ تعیین می‌شود و از مقدار $R(f_i)$ نیز برای نرمال‌سازی اهداف در تابع هدف AEC استفاده می‌شود.

۲. تکمیل روش EC با روش AEC

مدل روش AEC به‌صورت معادله ۳۱ است که در آن s_iها متغیرهای نامنفی برای کمبود و ϕ_i یک پارامتر برای نرمال‌سازی مقدار تابع هدف اول نسبت به هدف i است ($\phi_i = \frac{R(f_1)}{R(f_i)}$).

$$\begin{cases} Min\ f_1(x) - \sum_{i=2}^{n} \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = e_i\ i = 2,3,\dots,n \\ x \in X \\ s_i \geq 0 \end{cases} \quad (۳۱)$$

در روش AEC پیشنهادی این پژوهش، ابتدا بازه $e_i \in [Min(f_i)$ و$Max(f_i)]$، براساس روش Lex برای اهداف قیدشده تعیین می‌شود و پس از مقداردهی به e_iها، مدل تک‌هدفه ۳۱ حل می‌شود که جواب آن یک جواب کارا است و مقدار اهداف به ازای این جواب در جبهه پارتو قرار می‌گیرد. توجه کنید که با تغییر در e_iها، در بازه مربوط به آن‌ها، جواب کارایی دیگر و نقطه‌ای دیگر روی جبهه پارتو حاصل می‌شود. در ادامه نحوه به‌کارگیری روش AEC برای حل مدل دوهدفه پیشنهادی توضیح داده می‌شود.

۵- صحه گذاری مدل ریاضی با محدودیت اپسیلون

در این بخش با توجه به ارائه مدل ریاضی، با استفاده از اعداد تصادفی در ابعاد کوچک مدل ریاضی ارائه شده مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت و بر اساس اندیس ها و پارامترهای مساله مورد مطالعه به تحلیل جوابهای بهینه پرداخته خواهد شد.

الف) معرفی ابعاد مساله مورد مطالعه:

در ادامه به منظور اعتبار سنجی و صحت مدل ارائه شده در قسمت قبل، از داده های تصادفی استفاده شده است که در جدول ذیل هر یک از بخش های مد نظر تشریح شده است. از این رو جهت ارزیابی و صحه گذاری مدل ریاضی ارائه شده، کد نویسی مدل در نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX و از طریق روش اپسیلون محدودیت حل شده است. در بخش اول ورودی های مفروض شده به مدل ریاضی بحث و بررسی می گردد که به شرح زیر است:

ورودی‌های مسأله

در این بخش، یک مسأله آزمایشی با استفاده از داده‌های تصادفی بر اساس مقالات معرفی شده در فصل قبل برای مدل پیشنهادی ارائه شد. لازم به توضیح است که مقادیر مربوطه برای محاسبه هزینه‌های حمل و نقل و سایر پارامترهای ورودی مدل با در نظر گرفتن سه نوع زیست توده از دو حوزه‌ی مختلف، دو نوع تسهیل حمل و نقل با ظرفیت‌های مختلف و یک پالایشگاه مفروض شده و همچنین دو مرکز تقاضا، دو نوع محصول نهایی تحت دو سناریو بررسی تحت عدم قطعیت برتسیماس و سیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مفروضات مساله، هزینه ثابت راه اندازی پالایشگاه ۱۰ میلیارد دلار در نظر گرفته شده و همچنین هزینه های نگهداری و کمبود سوخت نیز تابعی از هزینه فروش به ترتیب ۰.۵٪ و ۱٪ سود فروش در نظر گرفته شده است. ماکزیمم ظرفیت پالایشگاه ۱۰۰.۰۰۰ میلیون لیتر مکعب و احتمال رخداد سناریو ها به ترتیب برابر ۰.۸۵ و ۰.۱۵ می باشد. سایر پارامتر های مدل ریاضی به شرح جداول زیر است. شایان ذکر است با توجه به NP-HARD بودن مدل ریاضی، تحلیل مدل در دو سناریوی تولید زیست توده بررسی شده است چرا که افزایش سناریوهای تولید دیگر مدل با حل دقیق قابلیت ارزیابی نداشته است.

جدول ۱-۱. هزینه خرید زیست توده

		i	
		۳	۲	۱
pr		۲۰	۳۰	۱۲

جدول ۱-۲. دسترسی پالایشگاه به تسهیل مورد نظر

		t	
		۲	۱
$\lambda_{k,f}$		۰	۱
		۱	۰

جدول ۱-۳. ظرفیت سوخت ذخیره شده

		m	
		۲	۱
$capi_e$		۱۰.۰۰۰	۷.۰۰۰
		۹.۰۰۰	۸.۰۰۰

جدول ۱-۴. هزینه تولید سوخت

		E,r	
		۱.۲	۱.۱
C		۳۲	۴۰

جدول ۱-۵. ارتباط بین حوزه های زیست توده و پالایشگاه

X(I,j,f)	(t,s)			
	2.2	2.1	1.2	1.1
1.1.1	1	۱	۰	۱
1.2.1	1	۱	۰	۱
2.1.1	۱	۰	۱	۱
2.2.1	۰	۱	۱	۱
3.1.1	۱	۰	۱	۱
3.2.1	۱	۱	۰	۱

جدول ۱-۶. مقادیر تقاضا برای سوخت زیستی

D(e.m)	(t,s)			
	2.2	2.1	1.2	1.1
1.1	۱۱	۱۲	۱۲	۱۰
1.2	۲۳	۱۷	۱۷	۱۷
2.1	۲۰	۱۲	۱۲	۲۱
2.2	۲۲	۱۰	۱۹	۲۷

جدول ۱-۷. قیمت سوخت در مرکز

p(e,m)	(t,s)			
	2,2	2,1	1,2	1,1
1,1	۸۰	۷۰	۷۷	۸۰

۵۰	۷۷	۷۰	۵۷	1,2
۵۷	۵۰	۷۷	۷۰	2,1
۵۰	۵۷	۷۷	۷۰	2,2

جدول ۱-۸. هزینه حمل زیست توده از حوزه های زیست توده تا پالایشگاه

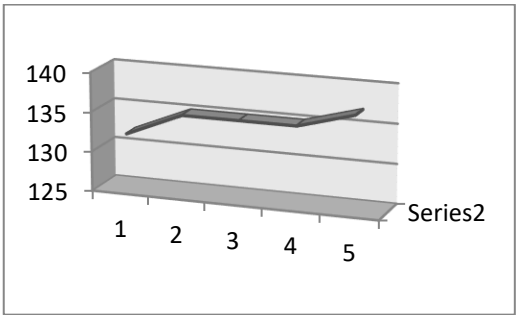
CCl(I,j)	(f,k)	
	1,1	1,2
1,1	2	7
1,2	2	7
2,1	2	7
2,2	3	7
3,1	3	7
3,2	3	7

با توجه به ورودی های مدل ریاضی، صحه گذاری آن در نرم افزار GAMS با استفاده از رویکرد روش اپسیلون محدودیت تقویت شده به شرح ذیل می باشد:

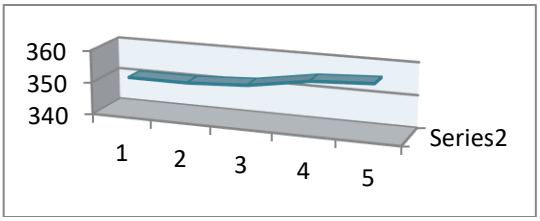
در نهایت مدل اپسیلون تقویت شده را با استفاده از نرم افزار گمز برای هر یک از اپسیلون ها بدست آمده حل کردیم. مجموعه جواب های بهینه پارتو بدست آمده مطابق جدول زیر است:

جدول ۱-۹. مقادیر بهینه تابع اهداف

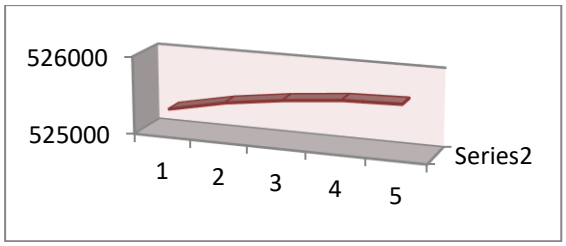
ε	میزان تابع هدف اول	میزان تابع هدف دوم	میزان تابع هدف سوم
1	۵۲۵۳۰۰	۳۵۱	۱۳۲
2	۵۲۵۴۵۰	۳۵۱	۱۳۵
3	۵۲۵۵۵۰	۳۵۲	۱۳۵
4	۵۲۵۶۲۱	۳۵۵	۱۳۵
5	۵۲۵۶۴۳	۳۵۶	۱۳۷



شکل ۱-۲. جبهه پارتوی تابع هدف اول



شکل ۱-۳. جبهه پارتوی تابع هدف دوم



شکل ۱-۴. جبهه پارتوی تابع هدف سوم

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات پژوهشی

فعالیت های عمده در یک زنجیره تامین سوخت زیستی شامل برداشت، ذخیره‌سازی، حمل و نقل زیست توده، تبدیل سوخت زیستی، حمل و نقل سوخت زیستی و مصرف سوخت زیستی می باشد. به عنوان مثال برای امکانات پیش پردازش و فرآورده‌های سوخت زیستی باید مورد زیر در نظر گرفته شود؛ قراردادن انبار نزدیک به نقاط تقاضای سوخت زیستی، هزینه حمل و نقل سوخت زیستی را کاهش می دهد اما اگر دور از مکان های کشت زباله باشد ممکن است هزینه حمل و نقل زیست توده ای را افزایش دهد. با توجه به مزایای پیچیده موجود در این گونه زنجیره های تامین و تصمیمات زنجیره تامین رقبای مختلف؛ تصمیمات تدارکاتی که زنجیره تامین را تحت تاثیر قرار می‌دهند، نمی تواند به طور مستقل گرفته شوند. از لحاظ دسته بندی مواد اولیه زیست توده، سوخت های زیستی و فرآیندهای تولید مربوطه می توانند به سه نسل تقسیم شوند. برای تولید سوخت زیستی نسل اول، استفاده از قندها و روغن های گیاهی است که می توانند از طریق فناوری های متعارف به سوخت های زیستی تبدیل شوند. بیشتر مواد اولیه مورد استفاده در این فرایند می تواند به عنوان یک غذا نیز استفاده شود. بنابراین در آنها، روند استفاده از مواد غذایی به غیرخوراکی تغییر کرده است. از سوی دیگر، استفاده از آن با چالش های بسیاری از جمله تولید زیست توده تا فن آوری تولید سوخت های زیستی همراه است. نسل دوم سوخت های زیست محیطی از مواد غیر خوراکی مانند زیست توده لیگنوسلولوزی، محصولات زراعی و باقیمانده های کشاورزی یا زباله هایی که باعث فرایند تولید سوخت می شود، تولید می‌شود. نسل سوم سوخت های زیستی که به تازگی به دسته بندی اصلی پیوسته است، تولید سوخت زیستی از جلبک است. مانع اصلی تجاری سازی سوخت های نسل دوم و سوم، فرایندهای تولید سخت و پیچیده آنهاست. تولید زیستی سوخت نیاز به جریان مواد زیست توده از سایت های عرضه به مراکز تقاضا دارد. در طول این مسیر، زیست توده از طریق برخی از امکانات عبور می کند و تحت فرآیندهای مختلف به نام زنجیره تامین زیست توده می باشد. هر بخش زنجیره تامین نیاز به دانش، فناوری و فعالیت های خاصی دارد از جمله رشد، برداشت، انتقال، ادغام، ذخیره سازی، تبدیل، توزیع و مصرف می باشد. از این رو در این پژوهش مدل زنجیره تامین چند سطحی در حوزه تامین تا توزیع محصولات سوخت زیستی معرفی و بررسی شده است. با توجه به مدل ارائه شده اهداف پایداری از جمله مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ریسک تامین بحث و بررسی شدند و در نهایت مدل ارائه شده با استفاده از رویکرد اپسیلون محدودیت صحه گذاری شده و سپس با استفاده از الگوریتم ادغامی اپسیلون محدودیت و آزادسازی بندرز اعتبار سنجی گردید.

با توجه به مدل ریاضی اراده شده، پیشنهادات آتی ذیل ارائه میگردد:

۱. با توجه به توسعه نسل سوم سوخت های زیستی که از جلبک ها حاصل می شود پیشنهاد میگردد در زنجیره تامین مورد مطالعه پنجره زمانی سخت و نرم بکار برده شود.
۲. با توجه به مساله زنجیره تامین مورد مطالعه مساله مسیریابی و مکانیابی در مدل ریاضی توسعه یابد.
۳. پیشنهاد میگردد منطق فازی در ارزیابی هزینه های مدل ریاضی تخمین و ارزیابی شود.
۴. پیشنهاد میگردد با توجه به اینکه الگوریتم های فرا ابتکاری دارای خطای ارزیابی می باشد لذا جهت ارزیابی زمان حل مدل ریاضی در ابعاد بزرگ بکارگیری شده و نتایج حل مدل ریاضی با الگوریتم بندرز ارزیابی شود.

مراجع

Aghaei, J., Amjady, N., Shayanfar, H.A. (2011). Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method, Applied Soft Computing, Volume 11, Issue 4, pp 3846-3858.

Ahmadi, A., Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Pishvaee, M. S. (2018). OR Applications in Pharmaceutical Supply Chain Management. In Operations Research Applications in Health Care Management, Springer, Cham. pp. 461-491.

Albashabsheh, N. T., & Stamm, J. L. H. (2019). Optimization of lignocellulose biomass-to-biofuel supply chains with mobile pelleting. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 122, 545-562.

Ba, B. H., Prins, C., & Prodhon, C. (2016). Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective. Renewable Energy, 87, 977-989.

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

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

Cambero, C., & Sowlati, T. (2014). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives–A review of literature. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 36, 62-73.

Chen, C. W., & Fan, Y. (2012). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(1), 150-164.

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

Dal-Mas, M., Giarola, S., Zamboni, A., & Bezzo, F. (2011). Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. Biomass and bioenergy, 35(5), 2059-2071.

De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J., & Van Orshoven, J. (2014). Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. Renewable and sustainable energy reviews, 31, 657-670.

Flisberg, P., Frisk, M., & Rönnqvist, M. (2012). FuelOpt: a decision support system for forest fuel logistics. Journal of the Operational Research Society, 63(11), 1600-1612.

Foo, D. C. (2019). A Simple Mathematical Model for Palm Biomass Supply Chain. In Green Technologies for the Oil Palm Industry (pp. 115-130). Springer, Singapore.

Frombo, F., Minciardi, R., Robba, M., & Sacile, R. (2009). A decision support system for planning biomass-based energy production. Energy, 34(3), 362-369.

Frombo, F., Minciardi, R., Robba, M., Rosso, F., & Sacile, R. (2009). Planning woody biomass logistics for energy production: A strategic decision model. Biomass and Bioenergy, 33(3), 372-383.

Kanzian, C., Kühmaier, M., Zazgornik, J., & Stampfer, K. (2013). Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. Biomass and Bioenergy, 58, 294-302.

Kim, J., Realff, M. J., & Lee, J. H. (2011). Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. Computers & Chemical Engineering, 35(9), 1738-1751.

Kristianto, Y., & Zhu, L. (2019). Platforms planning and process optimization for biofuels supply chain. Renewable Energy.

Kumar, P., Varkolu, M., Mailaram, S., Kunamalla, A., & Maity, S. K. (2019). Biorefinery Polyutilization Systems: Production of Green Transportation Fuels From Biomass. In Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs (pp. 373-407). Academic Press.

Kang, S., Heo, S., Realff, M. J., & Lee, J. H. (2020). Three-stage design of high-resolution microalgae-based biofuel supply chain using geographic information system. *Applied Energy*, *265*, 114773.

Habib, M. S., Asghar, O., Hussain, A., Imran, M., Mughal, M. P., & Sarkar, B. (2021). A robust possibilistic programming approach toward animal fat-based biodiesel supply chain network design under uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 122403.

Lin, T., Rodríguez, L. F., Shastri, Y. N., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2014). Integrated strategic and tactical biomass–biofuel supply chain optimization. Bioresource technology, 156, 256-266.

Long, H., Li, X., Wang, H., & Jia, J. (2013). Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 344-352.

Nur, F., Aboytes-Ojeda, M., Castillo-Villar, K. K., & Marufuzzaman, M. (2021). A two-stage stochastic programming model for biofuel supply chain network design with biomass quality implications. IISE Transactions, 53(8), 845-868.

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

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

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. Applied Mathematics and Computation 213(2):455-465

Max, M. D., & Johnson, A. H. (2019). Energy Resource Risk Factors. In Exploration and Production of Oceanic Natural Gas Hydrate (pp. 347-417). Springer, Cham.

Mirhashemi, M. S., Mohseni, S., Hasanzadeh, M., & Pishvaee, M. S. (2018). Moringa oleifera biomass-to-biodiesel supply chain design: An opportunity to combat desertification in Iran. Journal of cleaner production, 203, 313-327.

Mobini, M., Sowlati, T., and Sokhansanj, S. (2011). Forest biomass supply logistics for a powerplant using the discrete event simulation approach . Applied Energy, 88, 1241–1250.

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

Mohseni, S., & Pishvaee, M. S. (2020). Data-driven robust optimization for wastewater sludge-to-biodiesel supply chain design. *Computers & Industrial Engineering*, *139*, 105944.

Rentizelas, A., Tatsiopoulos, I., Tolis, A,. (2009). An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply. Biomass and bioenergy 33 (2), 223-233

Sarker, B. R., Wu, B., & Paudel, K. P. (2019). Modeling and optimization of a supply chain of renewable biomass and biogas: Processing plant location. Applied Energy, 239, 343-355.

Scaldaferri, C. A., & Pasa, V. M. D. (2019). Production of jet fuel and green diesel range biohydrocarbons by hydroprocessing of soybean oil over niobium phosphate catalyst. Fuel, 245, 458-466.

Shabani, N., Akhtari, S., & Sowlati, T. (2013). Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 299-311.

Shabani, N., Sowlati, T., Ouhimmou, M., & Rönnqvist, M. (2014). Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty. Energy, 78, 346-355.

Soares, R., Marques, A., Amorim, P., & Rasinmäki, J. (2019). Multiple vehicle synchronisation in a full truck-load pickup and delivery problem: A case-study in the biomass supply chain. European Journal of Operational Research.

Ye, F., Li, Y., & Yang, Q. (2018). Designing coordination contract for biofuel supply chain in China. Resources, Conservation and Recycling, 128, 306-314.

You, F., & Wang, B. (2011). Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed–centralized processing networks. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(17), 10102-10127.

You, F., Tao, L., Graziano, D. J., & Snyder, S. W. (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. AIChE Journal, 58(4), 1157-1180.

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

Yadala, S., Smith, J. D., Young, D., Crunkleton, D. W., & Cremaschi, S. (2020). Optimization of the algal biomass to biodiesel supply chain: case studies of the state of Oklahoma and the United States. *Processes*, *8*(4), 476.

Zamboni, A., Bezzo, F., & Shah, N. (2009). Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. Multi-

objective environmental optimization. Energy & Fuels, 23(10), 5134-5143.

Zheng, T., Wang, B., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., Zheng, J., Liang, Y., & Zhang, H. (2020). How government policies can make waste cooking oil-to-biodiesel supply chains more efficient and sustainable. *Journal of Cleaner Production*, *263*, 121494.