فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیست‌ویکم / شماره ۸۴/ بهار ۱۴۰۴/ صفحات ۱۰۶-۷۹

راهبرد تولید انرژی از زیست‌توده

محمدرحیم سلطانی
دانشجوی دکتری رشته مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.soltani@iau.ir

محمدعلی افشارکاظمی [۱]
دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، moh.afsharkazemi@iauctb.ac.ir

رضا رادفر
استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، r.radfar@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

چکیده

با توجه به ناشناخته ماندن صنعت تولید انرژی از زیست‌توده، این صنعت نیازمند راهبردهایی برای جلب نظر سرمایه‌گذاران است. از این‌رو طراحی مدلی مبتنی بر واقعیت، یکی از این راهبردها می‌باشد. این مقاله، به دنبال بهینه‌سازی تولید انرژی با رویکرد اقتصادی و زیست‌محیطی جهت تحقق راهبردهای تولید انرژی می‌باشد. شکاف پژوهشی برطرف شده در این مطالعه که مدل را به بهینه واقعی می‌رساند افزودن تاب‌آوری به مدل است که اختلال در عرضه مواد اولیه با رویکرد سناریوپردازی را بررسی می‌نماید. مدلی با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای حل مسأله مکانیابی- تخصیص، گسترش داده شده است. مدل با روش TH فازی، تک هدفه گردید و با روش حل دقیق، حل شده است اعتبارسنجی مدل، در یک مورد مطالعه‌ی واقعی در استان‌تهران بررسی گردیده که ساخت چهار نیروگاه با ظرفیت‌های متفاوت را توجیه‌پذیر نموده است. تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای روش TH و بر روی تغییر مقادیر عرضه زیست‌توده، انتظارات را تامین نموده است. در نتیجه مدل پیشنهادی، از کارآمدی لازم برخوردار بوده و توانسته با ترکیب رویکرد اقتصادی و زیست‌محیطی، از نظر هزینه، بهینه باشد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش دهد. بنابراین مدل، تاب‌آوری لازم را نیز دارد. نتایج این مدل به واقعیت نزدیک‌تر هستند.

طبقه‌بندی JEL: L94, Q16, Q42, Q51.

کلیدواژه‌ها: گازهای گلخانه‌ای، زیست‌توده، تولید انرژی، هزینه‌های اقتصادی، مدل عدد صحیح مختلط، عدم قطعیت.

---

۱. نویسنده مسئول

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

۱- مقدمه

جمعیت جهان تا اواسط سال ۲۰۲۴ به ۸/۲ میلیارد نفر رسید و انتظار می‌رود طی ۶۰ سال آینده دو میلیارد دیگر افزایش یابد و در اواسط دهه ۲۰۸۰ به حدود ۱۰/۳ میلیارد نفر برسد (سازمان ملل، ۲۰۲۴). افزایش جمعیت کره زمین، حجم زیست‌توده‌ها را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش کربن بیشتری می‌شود و محیط زیست را دچار آسیب‌های فراوان می‌کند. این زیست‌توده‌ها شامل زباله‌های کشاورزی، ضایعات حیوانی، زباله‌های مواد غذایی، زباله‌های خشک و تر می‌شود. یکی از مسائل مهم این است که چگونه می‌توان تمام زیست‌توده‌های تولید شده را به طور پایدار مدیریت نمود. مدیریت صحیح این زیست‌توده‌ها، در حال تبدیل شدن به یکی از مهم‌ترین عوامل برای دستیابی به آینده‌ای پایدار برای جامعه انسانی است (وانگ و تستر[1]، ۲۰۲۳). زیست‌توده‌ها اگر چه به‌شدت به شرایط اقلیمی منطقه‌ای وابسته هستند، با این وجود در حال حاضر تنها منبع تجدیدپذیر عملی برای تأمین مستقیم سوخت‌های پایدار برای همه‌ی کشورهای دنیا بوده و عاملی کلیدی و مهم برای کنترل پیشرفت گرمایش جهانی به‌شمار می‌روند (جینگ و همکاران[2]، ۲۰۱۹ ؛ سینگ و همکاران[3]،۲۰۱۶).

مدیریت پسماند شهری یکی از مهم‌ترین وظایف مدیریت شهری است که هزینه و مشکلات اجرایی فراوانی دارد (بیژن‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). مدیریت نادرست این زیست‌توده‌ها، باعث ایجاد خطرهای زیست‌محیطی مختلفی مانند افزایش آلودگی در خاک، آب و هوا می‌شود. تخلیه این زیست‌توده‌ها، باعث ایجاد بوی بد در هنگام تجزیه می‌شوند، کک‌ها و آفات را جذب می‌کند، شیرابه‌هایی را تشکیل می‌دهند که جاری شده و خاک و منابع آبی را آلوده می‌کنند و باعث ایجاد مشکلات جدی برای سلامتی انسان و محیط زیست می‌شوند. این مشکل‌ها به دلیل ناآگاهی در مورد اثرات خطرناک زیست‌توده‌ها بر محیط زیست، زمانی که به روشی برنامه‌ریزی نشده و فرآوری نشده دفع می‌شوند، بیشتر می‌شود. این مواد زائد دارای برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی هستند که استفاده از آنها را ارزان و امکان‌پذیر کرده است. مانند سوخت و ساز، تولید انرژی، کود، حرارت و... (پاندی و کوماری[4]، ۲۰۲۲).

1. Wang and Tester
2. Jing et al
3. Singh et al
4. Pandey & Kumari

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

همچنین گرمایش روزافزون جهانی، تقاضای جهانی برق را افزایش داده است(قسال[1]، ۲۰۲۲). طی نیم قرن گذشته، مصرف برق جهان به طور مداوم افزایش یافته است و تا سال ۲۰۲۳ به حدود ۲۷ هزار تراوات ساعت رسیده است. بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳، مصرف برق بیش از سه برابر شده است. رشد صنعتی شدن و دسترسی به برق در سراسر جهان تقاضای برق را بیشتر افزایش داده است(استاتیستا۲، ۲۰۲۴). پیش‌بینی می‌شود تولید برق در سراسر جهان طی سه دهه آینده سه برابر شود و به ۸۳ هزار تراوات ساعت در سال ۲۰۵۰ برسد (استاتیستا، ۲۰۲۴).

بخش انرژی زیربنای اساسی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی هر کشور است. با توجه به محدودیت منابع انرژی فسیلی از یک‌سو و افزایش میزان مصرف انرژی از سوی دیگر، نمی‌توان تنها به منابع موجود انرژی اتکا نمود (اسکندری و همکاران، ۱۴۰۳). رشد و گسترش یک اقتصاد زیستی پایدار که متکی بر منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی، غذا و خدمات تعریف می‌شود، به عنوان یک استراتژی مهم پیشنهاد می‌گردد که می‌تواند به جهان برای مقابله با بسیاری از این چالش‌ها کمک نموده و در انجام این کار، به بسیاری از اهداف ۱۷ گانه توسعه پایدار سازمان ملل متحد مانند امنیت انرژی با کربن کم، کمک می‌کند (بارت و همکاران[3]، ۲۰۲۱ ؛ کودلینووا و همکاران[4]، ۲۰۱۷ ؛ سولارته-تورو و کاردونا آلزاته[5]،۲۰۲۱).

امروزه با توجه به اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای انرژی‌های فسیلی، کشورهای زیادی با تصویب قوانین و مقررات و اتخاذ سیاست‌های تشویقی و حمایتی، در پی جایگزین سازی منابع انرژی خود هستند (سلیمی و پیری، ۱۴۰۲). در حمایت از این استراتژی، در حال حاضر بیش از ۵۰ کشور در سراسر جهان، استراتژی‌های اقتصاد زیستی را دنبال می‌کنند (گزارش کنفرانس جهانی اقتصاد زیستی[6]، ۲۰۱۸). تولید سوخت‌های تجدیدپذیر نیازمند برنامه‌ریزی‌های بلندمدتی مانند تعیین مکان‌های تولید، فن‌آوری‌ها، مسیرهای فرآیند و ظرفیت‌ها می‌باشد، که نیازمند طراحی شبکه زنجیره تامین انعطاف‌پذیر است. شبکه زنجیره تامین سوخت زیستی

1. Ghosal
2. Statista
3. Barrett et al
4. Cudlinova et al
5. Solarte-Toro & Cardona Alzate
6. Global Bioeconomy Summit Conference Report

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

بهینه باید با اختلاف زمانی عرضه و تقاضای سوخت مقابله کنند. تنوع فصلی از جهت در دسترس بودن میزان زیست‌توده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و در نظر نگرفتن فصول، چالش برانگیز خواهد بود. بنابراین، مدل‌سازی شبکه زنجیره تامین سوخت زیستی باید هم برنامه‌ریزی‌های بلندمدت را مورد نظر قرار دهد و هم باید تصمیمات در زمینه‌های مختلف مانند فصل‌ها را نیز در مدل‌سازی در نظر بگیرد (وولف و همکاران[1]، ۲۰۲۳).

یکی از دلایل مهم گرایش جهان به سمت سوخت‌های زیستی، برطرف نمودن آلودگی‌های زیست‌محیطی است. بر همین اساس، در نظر گرفتن پایداری زیست‌محیطی در طراحی شبکه‌های زنجیره تامین سوخت زیستی، ضرورت دارد. پایداری زیست‌محیطی گهگاه با عنوان کمینه نمودن انتشار گازهای گلخانه‌ای در مدل گنجانده می‌شود (قادری و همکاران ۲۰۱۶). چون زنجیره‌های تامین سوخت زیستی، ماهیتی پویا و بسیار پیچیده دارند، با عدم قطعیت همراه هستند. بیشترین عدم قطعیت‌ها در عرضه، قیمت و هزینه‌های زیست‌توده‌ها، هستند. این عدم قطعیت‌ها بر کارایی زنجیره‌های تأمین در سطح استراتژیک تأثیر بیشتری دارند تا نسبت به طراحی در سطح تاکتیکی (عملیاتی) (ییلماز بالامان و سلیم[2] ۲۰۱۵). برای رویارویی با عدم قطعیت‌ها، می‌توان سناریوپردازی کرد تا مدل در برابر عدم قطعیت‌ها، تاب‌آور شود (بایرام‌زاده و همکاران ۲۰۱۸). این چالش‌ها و مشکلات، طراحی زنجیره تامین سوخت زیستی با رویکرد زیست‌محیطی و اقتصادی را برای کمینه نمودن هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی توجیه پذیر نموده است.

از بررسی بیش از دویست مقاله در زمینه زنجیره تأمین زیست‌توده برای شناسایی شکاف نظری پژوهش(که با توجه به محدودیت صفحات مقاله در جدول ۱ به برخی از آن‌ها اشاره شده است)، مشخص گردید که تنها ۵۵ درصد از این مقالات، بیش از یک نوع زیست‌توده را بررسی نموده‌اند. کمتر از بیست و ۷ درصد، پایداری و تاب‌آوری را با هم بررسی کرده‌اند. حدود ۱۳ درصد از مقاله‌ها، بهینه‌سازی اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی را هم‌زمان با هم در نظر گرفته‌اند، در کمتر از ۱۰ درصد از پژوهش‌ها، وسایل حمل و نقل را ناهمگن در نظر گرفته‌اند و در کمتر از یک درصد از پژوهش‌های انجام شده، بیش از یک نوع زیست‌توده به‌همراه ناهمگنی وسایل حمل و نقل، با اعمال

1. Wolff et al
2. Yilmaz Balaman and Selim

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

تاب‌آوری و پایداری را در مدل در نظر گرفته‌اند و بیش از یک تابع هدف، در مدل، وجود داشته است. پژوهش حاضر نیز، جزو این یک درصد است. تفاوت این پژوهش در این است که در اینجا، تاب‌آوری بر روی عرضه مواد اولیه بررسی شده است، اما در دیگر پژوهش‌ها، تاب‌آوری در بخش‌های دیگری از فرآیند زنجیره تامین زیست‌توده بررسی شده است، مانند تاب‌آوری در میزان تقاضا، میزان تولید، قیمت مواد اولیه یا قیمت برق که این نوع، بررسی، در حقیقت شکاف نظری پژوهش را برطرف می‌نماید.

جدول۱. بخشی از مقالات بررسی شده در زمینه زنجیره تأمین زیست‌توده

عنوان مقاله	سال	نویسندگان	نکات مهم
یک روش یادگیری ماشینی یکپارچه و بهینه سازی کمی برای طراحی شبکه‌های زنجیره تامین بیواتانول پایدار	۲۰۲۳	مومنی‌تبار و همکاران	ضرورت طراحی شبکه‌های زنجیره تامین سوخت زیستی پایدار به دلایل: افزایش امنیت انرژی، کاهش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای و مزایای اقتصادی
طراحی شبکه پایدار تولید انرژی‌های زیستی بر اساس مدیریت پسماند جامد شهری در شرایط عدم قطعیت	۲۰۲۳	علیدوستی و همکاران	طراحی یک شبکه مدیریت پسماند پایدار برای استخراج بهینه انرژی‌های زیستی مختلف با در نظر گرفتن هر سه بعد پایداری اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در شرایط نامشخص
بهینه سازی زنجیره تامین زیست توده پسماند: خصوصیات فرآیند و تجزیه و تحلیل هزینه	۲۰۲۳	نونز و سیلوا[1]	اهمیت حیاتی بهینه‌سازی هزینه لجستیک در زنجیره تامین زیست‌توده، با هدف افزایش پایداری و استفاده کارآمد از این منبع
مروری بر تحقیقات زنجیره تامین زیست توده به انرژی زیستی با استفاده از تجزیه و تحلیل کتاب‌سنجی و تجسم	۲۰۲۳	هلال و همکاران	وجود شکاف‌ها و فرصت‌های پژوهشی بالقوه در شش حوزه حیاتی: ۱.جهانی‌سازی تحقیقات زنجیره تامین، ۲. ادغام عدم قطعیت، تصادفی و ریسک در مدل‌های زنجیره تامین، ۳. بررسی سیستم‌های عرضه چند خوراکی، ۴. تقویت انعطاف پذیری زنجیره تامین، ۵. استفاده از روش‌های کنترل موجودی و ۶. استفاده گسترده‌تر از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در این بخش
ابزارهایی برای بهینه سازی فرآیندهای تبدیل زیست‌توده به انرژی	۲۰۲۳	باتیستا و همکاران[2]	استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، برنامه‌ریزی خطی و شبکه‌های عصبی برای بهینه‌سازی زنجیره تامین زیست توده
طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار برای مدیریت زباله جامد شهری	۲۰۲۲	اقبالی و همکاران	در نظر گرفتن جداسازی منبع از مبدا و اعمال مکانیزم پاداش-جریمه

1. Nunes and Silva
2. Batista et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

عنوان مقاله	سال	نویسندگان	نکات مهم
مشارکت زنجیره‌های تامین زیست توده برای انرژی زیستی در اهداف توسعه پایدار	۲۰۲۱	بلیر و همکاران[1]	تأثیر زیاد زنجیره‌های تامین مناسب بر اهداف «انرژی مقرون به صرفه و پاک»، «کار شایسته و رشد اقتصادی»، «صنعت، نوآوری، و زیرساخت» و «تولید و مصرف مسئولانه» به طور مستقیم و اهداف «گرسنگی صفر»، «آب پاک و بهداشت»، «زندگی در خشکی»، «بدون فقر»، «آموزش با کیفیت»، «نابرابری جنسیتی» و «کاهش نابرابری‌ها» به طور غیر مستقیم
ارزیابی جمع‌آوری زباله‌های جامد شهری در بولیوی	۲۰۲۱	فروناتو و همکاران[2]	اهمیت فراوان چگونگی جمع‌آوری پسماندها، مکان‌یابی تاسیسات، حمل و نقل و پردازش پسماندها در زنجیره تامین زیست‌توده
مشکل مکان‌یابی چند سفری فازی پایدار برای مدیریت زباله‌های پزشکی در طول شیوع کووید-۱۹	۲۰۲۱	بابایی تیرکولایی و همکاران	ارائه سیستم مدیریت پسماند کارآمد در همه‌گیری کووید-۱۹
برنامه ریزی زنجیره تامین پایدار برای تولید برق مبتنی بر زیست توده با ملاحظات ریسک زیست محیطی و عدم قطعیت تامین	۲۰۲۰	فتاحی و همکاران	بررسی تأثیر اجتماعی زنجیره تامین با رویکرد ارزیابی چرخه زندگی اجتماعی و خطرات زیست محیطی زنجیره تامین بر اساس آلاینده‌های هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای
ارزیابی درجه سبز کشتی با استفاده از یک رویکرد ترکیبی جدید، ترکیب آنتروپی فازی گروهی و تکنیک ابری برای ترتیب اولویت بر اساس شباهت به نظریه راه حل ایده‌آل	۲۰۲۰	لیو و همکاران[3]	تأثیر مکان‌یابی غیربهینه تاسیسات در تشدید تخریب محیط‌زیست، گسترش انتشار کربن، کاهش عرضه زیست‌توده، کاهش پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان و افزایش هزینه‌های شبکه زنجیره تامین
بهینه‌سازی زنجیره تامین در تولید اتانول از زیست توده کشاورزی با استفاده از برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط	۲۰۲۰	لئون-الیوارس و همکاران[4]	تعیین تعداد و مکان بهینه مراکز ذخیره سازی، تصفیه‌خانه‌های زیستی و کارخانه‌های اختلاط و همچنین جریان زیست توده و بیواتانول بین تاسیسات
تأثیر عدم قطعیت‌ها بر طراحی و هزینه CCS از یک نیروگاه زباله به انرژی	۲۰۲۰	روسانالی و همکاران[5]	تأثیر عدم قطعیت‌ها بر طراحی و هزینه زنجیره‌های جذب و ذخیره کربن و همچنین انتخاب فن‌آوری جذب

1. Blair et al.
2. Ferronato et al.
3. Liu et al.
4. León-Olivares et al.
5. Roussanaly et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

عنوان مقاله	سال	نویسندگان	نکات مهم
بهینه سازی چند هدفه طراحی شبکه زنجیره تامین زیست‌توده پایدار	۲۰۲۰	دورماز و بیلگن[1]	استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین مکان نامزد تاسیسات بیوگاز
مدیریت زنجیره تامین زباله به انرژی با شرایط امکان سنجی انرژی	۲۰۲۰	اقبال و کانگ[2]	حداکثر نمودن سود کل زنجیره تامین در قالب یک مدل ریاضی تعریف شده با جستجوی راه‌حل بهینه برای زمان چرخه و هزینه اکتساب/انگیزه
طراحی و بهینه سازی زنجیره تامین برق زیست‌توده با عدم قطعیت در کیفیت مواد، در دسترس بودن و تقاضای بازار	۲۰۲۰	سقایی و همکاران	زنجیره‌های تامین برق زیست‌توده مستعد طیفی از عدم قطعیت‌ها هستند که از داخل یا خارج ناشی می‌شوند
یک رویکرد راه حل فازی برای انتخاب تامین کننده و تخصیص سفارش در زنجیره تامین سبز با در نظر گرفتن مشکل مکان‌یابی	۲۰۱۹	ابراهیمی قزوینی و همکاران	تأثیر مکان‌یابی بهینه تاسیسات و بهینه‌سازی برای استفاده از انواع وسایل نقلیه بر کاهش هزینه‌ها و اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی
طراحی بهینه شبکه‌های زنجیره تامین کم‌هزینه بر مزایای فرمولاسیون محصولات جدید	۲۰۱۹	لیو و همکاران	بهینه‌سازی تعیین مکان‌ها و مراکز توزیع، و همچنین تصمیم‌گیری‌های برنامه‌ریزی تولید و توزیع، با به حداقل رساندن هزینه کل واحد که شامل هزینه‌های مواد خام، بسته‌بندی، مبادلات، موجودی، حمل و نقل و استهلاک می‌باشد
بهینه سازی زنجیره تامین بیوگاز در مکزیک با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی	۲۰۱۹	دیاز و ریورا[3]	در نظر گرفتن مکان بهینه برای فن‌آوری‌های پردازش و خالص‌سازی مورد استفاده در تولید بیوگاز و کود زیستی و همچنین تعیین اینکه آیا یک فن‌آوری باید نصب شود یا خیر؟
یک مشکل طراحی شبکه زنجیره تامین بیودیزل نسل دوم پایدار در معرض ریسک	۲۰۱۷	بابازاده و همکاران	لزوم سرمایه‌گذاری قابل ملاحظه جهت بهبود اثرات زیستی و ریسک زنجیره تأمین سوخت زیستی
ارائه مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تامین تاب‌آور و پایدار زیست‌توده تحت عدم قطعیت و اختلال	۱۴۰۱	صالحی و همکاران	مهم‌ترین بخش از تصمیمات سطح استراتژیک مدیریت زنجیره تأمین: تعیین مکان تسهیلات، تعداد و ظرفیت آن‌ها، تخصیص آن‌ها به منابع و بازارهای مختلف و جریان ادغامی بین تسهیلات

بررسی‌های محقق

1. Durmaz and Bilgen
2. Ighbal and Kang
3. Diaz-Trujillo and Napoles-Rivera

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

ارتقای شاخص توسعه انسانی بهترین ساز و کار برای توانمندسازی افراد در ابعاد اقتصادی و اجتماعی است که بر اساس متغیرهای سلامت، سطح تحصیلات و سطح زندگی افراد ارزیابی می‌شود. در این میان مولفه‌های مختلفی بر اساس ساختار یک اقتصاد بر این شاخص اثرگذار هستند. در کشورهای انرژی محور همچون ایران که رشد اقتصادی تابع مستقیمی از انرژی است، عواملی مانند تقاضای انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر می‌توانند بر این شاخص تأثیر بسزایی داشته باشند (غلامی و همکاران، ۱۴۰۲). در ایران، روزانه بیش از هفتاد هزار تن زباله زیست‌توده تولید می‌شود که این زباله‌ها، گاز متان و دی اکسید کربن فراوانی را تولید می‌کنند که سرتاسر محیط ایران را آلوده کرده و اقلیم کشور را تغییر داده‌اند(دهقان و همکاران، ۲۰۲۳). در سطح دنیا، میزان نیاز به انرژی برق، مدام در حال افزایش است و طی سال‌های آینده میزان برق تولیدی امروز، جواب‌گوی مصرف نیست. در ایران نیز همپای دنیا، برای سال‌های آینده تولید انرژی برق بیشتری مورد نیاز می‌باشد. در حال حاضر (یعنی سال ۱۴۰۳) نیز با توجه به روبرو بودن دولت با کسری تولید برق به میزان ده هزار مگاوات، که دولت، مجبور به قطع برق (یک روز در هفته) شهرک‌های صنعتی و یا (روزی دو ساعت) برق خانه‌ها در سراسر ایران گردیده است. مطلب دیگر این‌که در کشور سرمایه‌گذاران بسیار فراوانی وجود دارند که در صورت شفافیت بیشتر مسیر سرمایه‌گذاری تبدیل زیست‌توده‌ها به برق، از آمادگی سرمایه‌گذاری در این صنعت برای تولید برق برخوردارند، اما در حال حاضر به دلیل ناشناخته بودن این صنعت، تمایلی به سرمایه‌گذاری در این حوزه ندارند. بنابراین با توجه به وجود زیست‌توده‌های فراوان برای تولید انرژی در کشور فراهم بودن و امکان سرمایه‌گذاری از نظر مالی و تکنولوژی و همچنین وجود تقاضا برای برق می‌توان با تبدیل زیست‌توده‌ها به انرژی، از انتشار گاز متان و دی اکسید کربن پیشگیری و کمبود برق را نیز جبران نمود؛ زیرا قطع برق هم به خانواده‌ها و هم به شهرک‌های صنعتی، ضررهای مالی شدیدی وارد می‌سازد. در نتیجه لزوم طراحی یک شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده با رویکرد اقتصادی و زیست‌محیطی برای تولید انرژی الزامی است.

در اینجا، شبکه زنجیره تأمین، دو نوع زیست‌توده تر و خشک را مورد بررسی قرار داده‌ایم. هر دو نوع زیست‌توده‌ها با حمل و نقل جاده‌ای جابجا می‌شوند. این شبکه

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

زنجیره تامین، در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته است. سطح اول، عرضه‌کنندگان زیست‌توده هستند؛ سطح دوم، تولید محصول است که در نیروگاه انجام می‌شود. در این نوع نیروگاه‌ها، با پردازش زیست‌توده‌ها، برق تولید می‌شود(مارونس[1]، ۲۰۱۴). و سطح سوم، سطح مشتریان (متقاضیان) برق می‌باشد.

این شبکه با یک نوع اختلال، روبه رو می‌باشد؛ اختلال در ظرفیت تأمین‌کنندگان است که به دلیل میزان متغیر خشک‌سالی، پدیدار می‌شود. که بعنوان اختلال در مبدأ شناخته می‌شود، یعنی اختلالی است که در منابع زیست‌توده به دلیل احتمال خشک‌سالی بوجود می‌آید. از این‌رو طراحی مدلی تاب‌آور برای رویارویی با این اختلال الزامی است. از آنجا که در این پژوهش، علاوه بر رویکرد اقتصادی، رویکرد زیست‌محیطی نیز مد نظر می‌باشد، بنابراین مدل، با در نظر گرفتن پایداری، طراحی شده است. زیرا شرط پایداری، داشتن اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است که در اینجا دو هدف از سه هدف، یعنی شرط اقتصادی و زیست‌محیطی، تامین می‌گردد. با توجه به اینکه پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی زنجیره تأمین زیست‌توده انجام می‌شود سوال اصلی پژوهش است که راهبرد تولید انرژی از زیست‌توده چیست؟

۲- ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

در سال ۱۹۹۲ هنگامی که چهارده انجمن تجاری، گروهی را با نام جنبش پاسخگویی مؤثر به مشتری به وجود آوردند، یکپارچه سازی زنجیره تأمین شکل گرفت (هوگوس[2]،۲۰۲۱). کریستوفر و پک[3] (۲۰۰۴) جزو اولین پژوهش‌گرانی بودند که انعطاف‌پذیری یا همان تاب‌آوری زنجیره تأمین را قابلیتی برای زنجیره تأمین دانستند که می‌تواند زنجیره تأمین مختل شده را به حالت اولیه برگرداند یا به یک حالت جدید که بهتر است، رهنمون سازد. بیژن‌پور و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه، یک شبکه بهینه زنجیره تامین جمع‌آوری و بازیافت پسماندهای شهری با لحاظ تفکیک از مبدا ارائه نمودند که شامل یک تابع اقتصادی برای حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و یک تابع هدف

1. Maronese
2. Hugos
3. Christopher and Peck

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

اجتماعی برای حداکثرسازی مقدار بازیافت می‌باشد. ایشان برای حل دقیق مساله از روش آزاد سازی لاگرانژ استفاده کرده و برای صحت‌سنجی و تایید کارایی، مدل را روی یک مطالعه موردی در شهر کرج پیاده کردند. گومته و میترا[1] (۲۰۲۳) در راستای حرکت سازگار با محیط زیست دولت هند، برای ترکیب بنزین و گازوئیل، یک شبکه زنجیره تأمین چند محصولی در سراسر کشور طراحی نمودند. مدل ایشان، فنی-اقتصادی و سازگار با محیط زیست است که با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط چند دوره‌ای فرموله شده است. سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به دلیل مسائل زیست‌محیطی و کاهش سوخت‌های فسیلی به ریزشبکه‌ها[2] نیز وارد شده‌اند. دشتکی و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله خود یک روش مدیریت جدید برای یافتن عملیات بهینه یک ریزشبکه متصل به شبکه ارائه می‌کند که به عنوان یک رویکرد بهینه‌سازی، مدل‌سازی شده و هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل است. عدم قطعیت‌ها در واحدهای تولید عبارتند از: توربین بادی و فتوولتائیک[3]. تعادل بین کل تولید برق و تقاضای مورد نیاز در سیستم براساس تبادل توان بین ریزشبکه‌ها و سیستم توزیع تعیین می‌شود. اهداف عبارتند از: به حداقل رساندن کل هزینه عملیاتی و برنامه‌ریزی سیستم ریزشبکه‌ها، بهبود مشخصات ولتاژ و کاهش تلفات کل توان سیستم توزیع نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند تمام برق مورد نیاز را تأمین و هزینه کل عملیاتی شبکه توزیع را کاهش دهد. در همین حال، کاهش تلفات کل توان (یعنی بیش از ۳۰ درصد) و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه مورد مطالعه منجر به یک حالت متصل به شبکه می‌شود. چن و لیو[4] (۲۰۲۳) در مقاله‌ای مشکل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین تولید برق با سوخت زیست‌توده چند خوراکی چند دوره‌ای با عدم قطعیت در پارامتر را برای متعادل کردن سه هدف متضاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به طور هم‌زمان بررسی نموده است. اثربخشی مدل پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی در شبکه زنجیره تأمین در استان هوبی چین نشان داده شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که با تنظیم چندین پارامتر، اهداف محیطی و اجتماعی به طور مداوم می‌توانند برآورده شوند، در حالی که هدف اقتصادی آسیب‌پذیر است. مطالعات

1. Gumte and Mitra
2. Microgrids
3. Photovoltaic
4. Chen and Liu

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

تطبیقی نشان می‌دهد که سود اقتصادی برآورده شده توسط مدل پیشنهادی تقریباً ۴۲/۵ درصد بیشتر از مدل برنامه‌ریزی هدف استوار است.

۳- نوآوری پژوهش

روش تحقیق حاضر شامل دو نوآوری می‌باشد. نوآوری اول در رویکرد موضوع است که پایداری و تاب‌آوری را هم‌زمان با هم، دربر دارد. نوآوری دوم در روش پژوهش است که هم‌زمان شرط احتمالی و فازی در پارامترها و متغیرها را وارد مدل نموده است.

۴- روش پژوهش

با توجه به کاهش تقاضای روزافزون جهان برای سوخت‌های فسیلی و از یک طرف رشد مثبت سالیانه مصرف انرژی در داخل کشور، ضرورت دارد که هر چه سریع‌تر با سر و سامان دادن به زنجیره تولید انرژی زیستی در کشور، بستر لازم برای سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش تولید انرژی از زیست‌توده فراهم شود. با در نظر گرفتن این‌که امروزه تمامی شهرهای ایران بویژه کلان شهرها، دارای درجه بالایی از آلودگی هستند، بنابراین اگر از سوخت پاک استفاده نکنیم آلودگی شدیدتر می‌شود. از این‌رو ضرورت دارد که با شتاب بیشتری، زیست‌توده را جایگزین سوخت‌های فسیلی نماییم. طراحی یک زنجیره تأمین زیست‌توده که از نظر هزینه‌ای، مقرون به صرفه و کارآمد باشد و بتواند با کمترین آلایندگی در محیط زیست برای ایران، ارزش‌آفرینی کند، واجب و ضروری است. پرداختن به طرح‌هایی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر با رویکرد کاهش هزینه تمام شده در زنجیره تامین زیست‌توده و مقرون به صرفه شدن سرمایه‌گذاری و استفاده از این انرژی‌ها، موجب جذب سرمایه‌گذاران بیشتر در پروژه‌های ساخت و توسعه بیوپالایشگاه‌ها می‌شود و تکنولوژی تولید گسترش می‌یابد و تولید این نوع انرژی‌ها افزایش خواهد یافت. لذا برای کاربردی بودن این پژوهش، پس از مطالعه بر روی مقالات داخلی و خارجی و نظرخواهی از خبرگان، روش پژوهش تعیین گردید. این روش مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه است. یکی از این اهداف کاهش هزینه‌های اقتصادی است و هدف دیگر، کاهش پخش کربن است. مدل دو هدفه شده پژوهش، به روش TH فازی تبدیل به تک هدفه غیرفازی(قطعی) شده و با روش حل دقیق، و به کمک نرم افزار گمز، حل شده است. در این مدل، به منظور دستیابی به

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

اهداف تعیین شده، تصمیم‌های استراتژیک و تاکتیکی گرفته می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری استراتژیک شامل مکان‌یابی و تخصیص می‌باشد. برای مکان‌یابی منظورانتخاب مکانی از بین مکان‌های پیشنهادی برای ساخت نیروگاه‌ها است تا هزینه کرایه حمل و نقل و در نتیجه هزینه تولید برق در حداقل ممکن قرار گیرد و موجب کاهش انتشار کربن نیز گردد. در این پژوهش دربحث مکان‌یابی، تعداد نیروگاه‌ها از بین مکان‌های پیشنهادی برآورد می‌گردند. در بحث تخصیص، ظرفیت‌های بهینه برای هر کدام از نیروگاه‌ها، از بین ظرفیت‌های پیشنهادی مشخص می‌شوند. متغیرهای تصمیم‌گیری تاکتیکی شامل تعیین مقدار زیست‌توده‌های انتقالی از هر تامین کننده به هر نیروگاه و همچنین میزان برق تولیدی و انتقالی از هر نیروگاه به هر متقاضی است. زنجیره‌های تأمین سوخت زیستی، به دلیل ماهیت پویا و پیچیده‌ای که دارند، همراه با عدم قطعیت هستند. در اینجا بنا به نظر خبرگان، عدم قطعیت‌های از نوع فازی مدل پژوهش؛ هزینه‌های سفارش‌دهی به تامین کننده، هزینه‌های خرید مواد اولیه (زیست توده) و هزینه‌های راه‌اندازی نیروگاه می‌باشند. همچنین بنا به نظر خبرگان، هزینه تعمیر و نگهداری، دارای عدم قطعیت از نوع احتمالی می‌باشد.

۴-۱- مفروضات مدل

۱- ظرفیت تأمین‌کنندگان، محدود و غیرقطعی می‌باشد.
۲- وسایل حمل و نقل، ناهمگن هستند یعنی دارای ظرفیت‌های متفاوتی برای حمل می‌باشند.
۳- تعداد و مکان تأمین‌کنندگان زیست‌توده‌ها، معین و مشخص است.
۴- تعداد و مکان جغرافیایی متقاضیان برق، ثابت و از پیش مشخص و معین می‌باشد.

۴-۲- مدل ریاضی

از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی احتمالی ترکیبی فازی، جهت رسیدگی به اختلالات عرضه زیست‌توده همراه با عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مدل برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده استفاده شده است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

الف) نمادها

جدول۲. جدول اندیس‌ها

عنوان	نماد	عنوان	نماد
مکان‌های کاندید برای ساخت نیروگاه	n	مناطق متقاضی برق	k
سناریوی خشک‌سالی	s	نوع وسیله حمل	v
انواع زیست‌توده	b	سطح ظرفیت نیروگاه	c
عرضه کننده زیست‌توده	m		

جدول۳. جدول متغیرها

عنوان	نماد
میزان انواع زیست‌توده حمل‌شده از محل m به نیروگاه تحت s	QB_{bmns}
مقدار برق انتقالی به منطقه تقاضای k	QE_{nks}
تعداد وسیله حمل موردنیاز برای انتقال b از m به n تحت s	QV_{vmns}
نیروگاه در منطقه n با ظرفیت c راه‌اندازی شود یک وگرنه صفر	BN_{cn}
اگرتامین کننده m تحت s وجود داشته باشد یک وگرنه صفر	BM_{bms}

جدول۴. جدول پارامترها

عنوان	نماد	نوع پارامتر
حداکثر ظرفیت تامین کننده تحت سناریو s	UM_{bms}	ظرفیت
حداقل سطح ظرفیت c نیروگاه n برای تولید برق	LN_c	
حداکثر سطح ظرفیت c نیروگاه n برای تولید برق	UN_c	
هزینه ساخت و راه اندازی نیروگاه با سطوح ظرفیت c درمکان n	CN_{cn}	هزینه‌ای
هزینه خرید هر واحد انواع b از انواع عرضه کنندگان	CB_{bms}	
هزینه بهره‌برداری هر واحد برق از انواع b	CE_b	
هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق	CJ	
هزینه سفارش b به تامین کننده	CM_m	
میزان تقاضای برق مشتریان k از نیروگاه تحت سناریو s	DE_{ks}	فرآیندی نیروگاه
قیمت فروش هر واحد برق	EP	
ضریب تبدیل زیست‌توده به برق	φ_b	
ظرفیت وسایل حمل و نقل	TV_V	حمل و نقل
فاصله بین m و n	DI_{mn}	
هزینه حمل و نقل زیست‌توده بین m و n براساس مسافت طی شده به vها	CH_V	
هزینه‌های انتشار کربن از حمل و نقل زیست‌توده	CT_v	کربن
میزان کربن ایجادشده به ازای تولید هر واحد برق	PM	
حجم هر واحد زیست‌توده b	GM_b	حجم زیست‌توده
احتمال وقوع هرکدام از سناریوهای s	PU_S	سناریو

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

ب) توابع هدف و محدودیت‌های مدل

تابع هدف اول:

تابع هدف اول در پایین، دارای هفت متغیر می‌باشد که به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: هزینه سفارش به تامین‌کنندگان (این متغیر، فازی در نظر گرفته شده است) + هزینه ساخت و راه‌اندازی نیروگاه (این متغیر به صورت فازی می‌باشد) + هزینه خرید هر واحد از انواع زیست‌توده (فازی می‌باشد) + هزینه بهره‌برداری هر واحد برق (احتمالی در نظر گرفته شده است) + هزینه حمل و نقل زیست‌توده (احتمالی در نظر گرفته شده است) + هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق(احتمالی در نظر گرفته شده است) + مقدار برق انتقالی به منطقه متقاضی (احتمالی در نظر گرفته شده است). این تابع هدف، یک تابع از نوع کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی است. در این تابع، هزینه‌های کل، کمینه می‌شوند.

$$\min Z_1 = \sum_{bms} PU_s \times CM_m \times BM_{bms} + \sum_{nc} CN_{cn} \times BN_{cn} + \sum_{bmns} PU_s \times CB_{bms} \times QB_{bmns} + \sum_{bmns} PU_s \times CE_b \times QB_{bmns} + \sum_{vmns} PU_s \times CH_V \times DI_{mn} \times QV_{Vmns} + \sum_{nc} BN_{cn} \times CJ + \sum_{nks} PU_s \times QE_{nks} \times EP \quad (۱)$$

تابع هدف دوم:

تابع هدف دوم انتشار دی اکسیدکربن در شبکه زنجیره تامین پسماند را کمینه می‌کند. این تابع عبارت است از میزان احتمال پخش کربن در فاصله بین تامین‌کنندگان تا نیروگاه و هنگام تولید برق هر واحد نیروگاه.

$$\min Z_2 = \sum_{vmns} PU_s \times CT_v \times DI_{mn} \times QV_{vmns} + \sum_{nks} PU_s \times PM \times QE_{nks} \quad (۲)$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

ج) محدودیت‌های مدل

محدودیت ظرفیت نیروگاه:

نشان دهنده میزان زیست‌توده انتقال داده شده از تامین‌کننده به نیروگاه تحت سناریو

$$\sum_{m} QB_{\mathrm{bmns}} \leq UM_{\mathrm{bms}} \qquad \forall \ \mathrm{bms} \tag{۳}$$

محدودیت ظرفیت تامین کننده:

نشان دهنده میزان زیست‌توده انتقال داده شده از تامین‌کننده به نیروگاه تحت سناریو

$$\sum_{m} QB_{\mathrm{bmns}} + M \times (1 - BN_{cn}) \geq +\mathrm{LNc} \quad \forall \ \mathrm{bmncs} \tag{۴}$$

محدودیت راه‌اندازی:

اگر نیروگاه راه‌اندازی شود یک و گرنه صفر

$$\sum_{C} BN_{cn} \ \leq 1 \qquad \forall \ \mathrm{n} \tag{۵}$$

محدودیت حداقلی برق انتقالی:

حداقل میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه به متقاضیان تحت سناریو

$$\sum_{k} QE_{nks} + M \times (1 - BN_{cn}) \geq \mathrm{LNc} \quad \forall \mathrm{ncs} \tag{۶}$$

محدودیت حداکثری برق انتقالی:

حداکثر میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه به مشتریان تحت سناریو

$$\sum_{k} QE_{nks} \leq M \times (1 - BN_{cn}) + UN_{c} \quad \forall \mathrm{ncs} \tag{۷}$$

محدودیت بالانس موجودی در نیروگاه:

این محدودیت، میزان برق تولیدی به ازای مصرف هر واحد زیست‌توده انتقال داده شده از مراکز تامین‌کننده به نیروگاه تحت سناریو

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

$$\sum_{\text{bn}} QB_{mns} \times \varphi_b = \sum_{i} QE_{nks} \qquad \forall \text{ Pta} \tag{۸}$$

محدودیت برآورد تقاضا:

میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه تحت سناریو برابر است با میزان تقاضای برق مشتریان تحت سناریو

$$\sum_{n} QE_{nks} \leq DE_{ks} \qquad \forall \text{ ks} \tag{۹}$$

محدودیت تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز بین m و n:

برای انتقال زیست‌توده از مراکز تامین‌کنندگان تحت سناریو به نیروگاه

$$\frac{\sum_b QB_{bmns} \times GM_b}{TV_v} \leq QV_{vmns} \tag{۱۰}$$
$$\leq \frac{\sum_b QB_{bmns} \times GM_b}{TV_v} + 1 \qquad \forall vms$$

محدودیت شرط انتخاب تامین‌کننده:

بدین معنا که اگر تامین‌کننده‌ای انتخاب نشود آن تامین‌کننده نباید زیست‌توده‌ای به نیروگاه ارسال نماید.

$$\sum_{m} QB_{bmns} \leq M \times BM_{bms} \qquad \forall bwta \tag{۱۱}$$

محدودیت شرط مکان‌یابی برای نیروگاه‌ها:

اگر نیروگاهی راه اندازی نشد، نباید زیست‌توده‌ای به آن ارسال کرد.

$$\sum_{bm} QB_{bmns} \leq M \times \sum_{c} BN_{cn} \qquad \forall ns \tag{۱۲}$$

محدودیت ارسال برق:

اگر نیروگاهی راه اندازی نشد، نباید برقی به مشتریان ارسال کرد.

$$\sum_{k} QE_{nks} \leq M \times \sum_{c} BN_{cn} \qquad \forall pta \tag{۱۳}$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

۴-۳- الگوریتم حل(روش حل دقیق)

تک هدفه کردن مدل: استفاده از روش‌های تک هدفه بجای چندهدفه‌ای، راهکار رایجی است که بسیاری از مقاله‌ها آن را مورد توجه قرار داده‌اند (پاکزاد مقدم و همکاران، ۲۰۱۹ و خلیفه زاده و همکاران، ۲۰۱۹). در این مقاله از روش TH فازی، برای تبدیل مسائل چندهدفه فازی به مسئله تک هدفه غیر فازی (قطعی) استفاده شده است. این روش توسط ترابی و حسینی (۲۰۰۸) ارائه شده است. در این روش، بهترین مقدار هر تابع هدف با در نظر گرفتن حداقل میزان رضایت‌مندی توابع هدف و ترکیب آن با رویکرد چندهدفه فازی وزن‌دار، به دست می‌آید. هدف روش TH فازی، کم نمودن فاصله بین توابع هدف از مقدار ایده‌آل شان است (ترابی و حسینی، ۲۰۰۸).

گام‌های این روش عبارتند از:

۱. تخمین حد بالا و پایین تابع هدف جهت به دست آوردن بهترین و بدترین مقدار هر تابع هدف که روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها این است که مدل به ازای هر تابع هدف به طور جداگانه بهینه شود و مقدار شدنی برای سایر توابع هدف ذخیره گردد. کم‌ترین عدد ذخیره شده برای هر تابع هدف به عنوان حد پایین و بیشترین عدد ثبت شده به عنوان حد بالا در نظر گرفته شوند.

۲. پس از تعیین حد بالا و حد پایین توابع هدف، تابع عضویت (درجه رضایت) توابع هدف محاسبه می‌شوند.

در رابطه ۱۴ و ۱۵ در زیر، این رابطه‌ها ارائه شده‌اند.

$$\mu_1(V) = \begin{cases} 1 & if \quad Z_1 > Z_1^{NIS} \\ \dfrac{Z_1^{NIS} - Z_{g1}}{Z_1^{NIS} - Z_1^{PIS}} & if \quad Z_1^{PIS} \le Z_1 \le Z_1^{NIS} \\ 0 & if \quad Z_1 < Z_1^{PIS} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

$$\mu_2(V) = \begin{cases} 1 & if \quad Z_2 > Z_2^{NIS} \\ \dfrac{Z_2^{NIS} - Z_{g2}}{Z_2^{NIS} - Z_2^{PIS}} & if \quad Z_2^{PIS} \le Z_2 \le Z_2^{NIS} \\ 0 & if \quad Z_2 < Z_2^{PIS} \end{cases} \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

یکپارچه کردن توابع هدف به منظور تبدیا مدل چند هدفه به یک مدل تک هدفه (ترابی و حسینی):

$$\max \delta \times \lambda_0 + (1-\delta) \cdot \sum_g w_g \cdot u_g \quad (۱۶)$$

$$\text{s.t.} \quad \lambda_0 \le u_g$$

$$\sum_g w_g = 1$$

جدول۵. معرفی پارامترهای TH

نماد	عنوان
δ	اهمیت نسبی حداقل میزان رضایت از توابع هدف
λ_0	حداقل میزان رضایت از توابع هدف
w_g	وزن اهمیت نسبی درجه رضایت تابع هدف Zg_1 و Zg_2
u_g	درجه رضایت تابع هدف Zg1 و Zg2

۴-۴- مطالعه موردی زنجیره تامین زیست توده در استان تهران

استان تهران با داشتن ۲۰ درصد جمعیت کل کشور و تولید پسماندهایی بیش از ۲۰ درصد کل تولید پسماندهای کشور، استانی بسیار مهم و با اولویت یک برای بررسی مسائل پسماند می‌باشد. در این پژوهش، شهرهای پرجمعیت این استان که با بیشترین تولید پسماند، به عنوان مراکز تامین کننده زیست‌توده مورد مطالعه قرار گرفته است تا تخمین نسبتاً دقیقی از میزان پسماندهای این استان در مدل‌سازی اعمال گردد. همچنین تعدادی مراکز پیشنهادی برای ساخت نیروگاه پیشنهاد می‌گردد تا مدل بتواند از بین آنها برای ساخت نیروگاه، مکان‌یابی بهینه را انجام دهد. اندیس‌های مدل، توسط خبرگان، مشخص شده‌اند. در زیر، اندیس‌های مطالعه موردی، ارائه گردیده است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

جدول۶. معرفی اندیس‌های مطالعه موردی

متقاضیان برق K	مکان‌های پیشنهادی نیروگاه n	تأمین‌کنندگان m
شرق تهران	قرچک	تهران
غرب تهران	پرند	پرند
جنوب تهران	پیشوا	شهریار
جنوب‌غربی تهران	پاکدشت	پاکدشت
اسلامشهر	ورامین	اسلامشهر
رباط‌کریم	ملارد	ورامین
پردیس	رباط‌کریم	ملارد
فاز یک پرند		رباط‌کریم
فاز دو پرند		پیشوا
فاز سه پرند		قرچک

۵- یافته‌های پژوهش

در اینجا، داده‌های واقعی برای تعیین مقادیر توابع اول و دوم، وارد نرم افزار گمز گردید تا حل دقیق برای مسئله مورد نظر به دست آید. پس از ورود داده‌ها، مشخص شد توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی با یکدیگر در تضاد می‌باشند، افزایش یکی، کاهش دیگری را به دنبال دارد و برعکس به این معنا که رسیدن یکی به سمت مطلوبیت بیشتر، دیگری را از مطلوبیت به دور می‌کند. جمع دو تابع با یکدیگر، هزینه کل را بوجود می‌آورد و هدف اصلی پژوهش، رسیدن به کمینه در هزینه کل می‌باشد و کاهش هزینه‌های کل، جایی است که هزینه‌های اقتصادی و هزینه‌های پخش کربن هم‌زمان با هم بتوانند کمترین مقدار ممکن را اختیار کنند. حل مساله با روش TH با ضریب رضایت‌مندی ۰/۵ به ازای W1=۰/۷ و W2=۰/۳ نشان دهنده کم‌ترین میزان هزینه کل می‌باشد.

یافته‌های حاصل از خروجی‌های نرم‌افزار، بهترین وضعیت یا به عبارتی حالت بهینه را ساخت چهار نیروگاه در سه ظرفیت متفاوت از بین هفت نقطه پیشنهاد می‌دهد. نیروگاهی با ظرفیت چهل مگاوات ساعت روزانه در شهر پاکدشت، با سالانه ۱۴۶۰۰ مگاوات ساعت برق تولیدی، نیروگاهی با توان بیست مگاوات ساعت روزانه در شهر ملارد، برابر با ۷۳۰۰ مگاوات ساعت سالانه برق تولیدی و نیروگاهی با ظرفیت چهل

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

مگاوات ساعت روزانه در شهر قرچک، با سالانه ۱۴۶۰۰ مگاوات ساعت برق تولیدی و یک نیروگاه با توان ده مگاوات ساعت روزانه در شهر پرند، با سالانه برابر با ۳۶۵۰ مگاوات ساعت برق تولیدی، برق تمامی چهار شهرک مسکونی مورد نظر در تهران را تولید و تامین می‌نماید. برق سه شهرک مسکونی شهر پرند، تامین گردیده و برق یک شهرک مسکونی در رباط کریم نیز تولید و نیاز آن مرتفع خواهد شد. برق یک شهرک مسکونی در اسلامشهر و یک شهرک مسکونی در پردیس، که متقاضی بودند، تامین نگردیده و هر دو نوع زیست‌توده به نسبت‌های مختلف در چهار نیروگاه، مصرف می‌شوند. از تمامی ده تامین‌کننده‌ای که در ده شهر مختلف می‌باشند، خرید زیست‌توده انجام می‌شود. میزان بهینه زیست‌توده تحت هر سناریو بین مراکز تامین کننده زیست‌توده و نیروگاه‌ها، تعیین گردیده است. مقدار تابع هدف اول، ۷۹۱۳۵۴۴۲۳۲۰۰ تومان سالیانه می‌باشد و مقدار تابع هدف دوم، برابر با ۱۴۲۰۴۶۹ گرم دی اکسید کربن سالیانه می‌باشد، یعنی تقریبا ۱۴۲۰ کیلوگرم سالیانه، دی‌اکسیدکربن در فضا منتشر می‌شود. یافته‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

۵-۱- تحلیل حساسیت

دو دسته تحلیل حساسیت انجام می‌گردد، یک دسته تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای روش حل مدل به‌منظور تعیین تغییرات مقادیر تابع هدف انجام می‌شود. دسته دیگر، تحلیل حساسیت عملیاتی است یعنی بر روی تغییر در مقادیر تقاضا صورت می‌پذیرد تا مشخص گردد که رفتار تابع هدف چگونه تغییر می‌کند. برای بررسی اعتبارسنجی و دقت مدل، بر روی پارامترهای θ و Ω ، که ضرایب تابع هدف اول و دوم هستند تحلیل حساسیت انجام گرفته است. در نتیجه مقادیر توابع هدف به ازای ضرایب مختلف به دست آمده است. جدول زیر، روند تغییرات برای توابع هدف اول و دوم را با در نظر گرفتن سه سناریوی مختلف ارائه می‌نماید. جدول ۷ نشان می‌دهد که افزایش ضریب در تابع هدف اول، مقدار این تابع هدف را کاهش می‌دهد و میزان تابع هدف دوم را افزایش می‌دهد و با کاهش ضریب تابع هدف اول، مقدار تابع هدف اول، افزایش می‌یابد و میزان تابع هدف دوم کاهش می‌یابد.

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

جدول ۷. تحلیل حساسیت بر روی ضرایب تابع هدف

شماره سناریو	θ	Ω	تابع هدف اول(تومان)	تابع هدف دوم(گرم)
۱	۰/۴	۰/۶	۸۷۵۱۰۶۲۵۲۳۶۵	۹۹۹۸۷۲
۲	۰/۵	۰/۵	۷۹۱۳۵۴۴۲۳۲۰۰	۱۴۲۰۴۶۹
۳	۰/۶	۰/۴	۷۰۸۹۴۰۹۴۰۴۵۰	۱۹۴۲۴۸۵

محاسبات محقق

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل ارائه شده، دو تابع هدف یکی برای کاهش هزینه‌های کل و یکی برای کاهش انتشار کربن دارد که هر دو این توابع، به دنبال دستیابی به توسعه پایدار در شبکه زنجیره تامین پسماند می‌باشند. لو و همکاران[1](۲۰۲۳)، توبا و همکاران[2](۲۰۲۳)، وانگ و وانگ[3](۲۰۲۳)، دتوال و همکاران[4](۲۰۲۳) و موسوی آهرنجانی و همکاران(۲۰۲۰) کاهش هزینه‌های اقتصادی و کاهش انتشار کربن را، عامل توسعه پایدار برشمرده‌اند. هر مدلی که قادر باشد عدم قطعیت‌ها را کنترل و تبدیل به قطعیت نماید، یعنی این‌که بتواند عدم قطعیت‌ها را پیش‌بینی کند تا شبکه زنجیره تامین، دچار اختلال و بی نظمی نگردد، مدلی تاب‌آور است. به شیوه‌های گوناگونی می‌توان یک مدل را تاب‌آور نمود. مدل حاضر، با سناریوسازی، عدم قطعیت‌ها را به قطعیت، تبدیل نموده است، از این‌رو مدل حاضر، مدلی تاب‌آور نیز هست. مشابهت این نتایج با برخی از پژوهش‌ها عبارتند از: پیکویرو و همکاران[5](۲۰۲۳)، سان و همکاران[6](۲۰۲۳)، و هلال و همکاران[7](۲۰۲۳)، پیشنهاد می‌شود برای کاهش هر چه بیشتر هزینه‌های اقتصادی و کاهش کربن، از فن‌آوری‌های دیجیتالی تبدیل پسماند به انرژی که به Biomass-to-X معروفند استفاده شود تا کارایی شبکه نیز افزایش یابد. یکی از بزرگترین چالش‌ها در زنجیره تامین زیست‌توده مدیریت لجستیک است زیرا زیست‌توده با رطوبت بالا و چگالی کم به حمل و نقل گران‌تری نیاز دارند. از این‌رو برای توسعه مدل، پیشنهاد می‌شود مدیریت لجستیک در شبکه زنجیره تامین پسماند، همگام با فن‌آوری‌های روز، به منظور کاهش هزینه‌های اقتصادی و کاهش انتشار کربن مورد بررسی قرار گیرد.

1. Lu et al
2. Toba et al
3. Wang & Wang
4. Detwal et al
5. Piqueiro et al
6. Sun et al
7. Helal et al

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

منابع

- اسکندری، هانیه؛ احمدی، محمدامین و رحیمی، غلامعلی. ۱۴۰۳. بررسی و آزمون وجود رابطه علی بین متغیرهای مصرف سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های پاک و رشد اقتصادی در منتخبی از کشورها، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال بیستم، شماره ۸۲، پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۲۶۰-۲۳۷.
- بیژن‌پور، محسن؛ احتشام راثی، رضا و قراخانی، داود. ۱۴۰۲. مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه‌سازی مدیریت پسماندهای شهری (مورد مطالعه: شهر کرج). مدیریت سبز، ۳(۴)، ۲۵-۱.
- بیژن‌پور، محسن؛ احتشام راثی، رضا و قراخانی، داود. ۱۴۰۲. مدیریت پسماندها در شهرهای هوشمند با استفاده از شبکه اینترنت اشیا. مدیریت سبز، ۳(۱)، ۲۴-۱.
- سلیمی، وحید و پیری، مهدی. ۱۴۰۲. الزامات قانونی گذار از انرژی فسیلی به تجدیدپذیر با مقایسه نظام حقوقی اتحادیه اروپا، چین و ایران، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال نوزدهم، شماره ۷۷، تابستان1402، صفحات ۷۷-۳۳.
- صالحی، سمیه؛ زارع مهرجردی، یحیی؛ صادقیه، احمد و حسینی‌نسب، حسن. ۱۴۰۱. ارائه مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تامین تاب‌آور و پایدار زیست‌توده تحت عدم قطعیت و اختلال. نشریه علمی مدیریت زنجیره تامین. شماره ۷۶. صفحات ۲۱-۱.
- غلامی، آرین؛ نیک‌پور، ساغر و میرکی، فائزه. ۱۴۰۲. بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر شاخص توسعه انسانی در ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال نوزدهم، شماره ۷۸، پاییز ۱۴۰۲، صفحات ۱۰۱-۶۹.
- Alidoosti, Z., Sadegheih, A., Govindan, K., & Pishvaee; M.S. 2023. Sustainable Network Design of Bioenergies Generation Based on Municipal Solid Waste (MSW) Management under Uncertainty. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 15 (1), 013103. https://doi.org/10.1063/5.0128073
- Babaee Tirkolaee, E., Abbasian, P., & Weber, G. W. 2021. Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for medical waste management during the COVID-19 outbreak. Journal of Science of the Total Environment, 756(20), 143607. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143607

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

- Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvaee, M.S., & Rabbani, M. 2017. A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. Journal of Omega, 66(B), 258-277.
https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.010
- Bairamzadeh, S., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvaee, M.S. (2018). Modelling different types of uncertainty in biofuel supply network design and planning: A robust optimization approach. Renewable Energy, 116, 500-517.
https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.020
- Barrett, P., Dupont-Inglis, J., Kulišić, B., Maes, D., & Vehviläinen, A. (2021). Deploying the Bioeconomy in the EU: A framework approach for bioeconomy strategy development.
https://doi.org/10.2777/443131
- Batista, R.M., Converti, A., Pappalardo, J., Benachour, M., & Sarubbo, L.A. 2023. Tools for Optimization of Biomass-to-Energy Conversion Processes. Journal of Processes, 11, 854.
https://doi.org/10.3390/pr11030854
- Blair, M.J., Gagnon, B., Klain, A., & Kuliši´c, B. 2021. Contribution of Biomass Supply Chains for Bioenergy to Sustainable Development Goals. Journal of Land, 10, 181.
https://doi.org/10.3390/land10020181
- Chen, A., & Liu, Y. (2023). Designing globalized robust supply chain network for sustainable biomass-based power generation problem, Journal of Cleaner Production, 413, 137403.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137403
- Christopher, M. & Peck, H. (2004). Building the Resilient Supply Chain. The International Journal of Logistics Management, 15, 1-14.
https://doi.org/10.1108/09574090410700275
- Cudlinova, E., Lapka, M., & Vávra, J. (2017). Bio-economy as a New Perspective for Solving Climate Change? The Role of Integrity in the Governance of the Commons: Governance, Ecology, Law, Ethics, 155-166.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-54392-5_10
- Dashtaki, A.A., Hakimi, S.M., Hasankhani, A., Derakhshani, G., & Abdi, B. (2023). Optimal management algorithm of microgrid connected to the

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

distribution network considering renewable energy system uncertainties, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 145, 108633.
https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108633

- Dehghan, D., Fathi Hafshejani, K., Haghighat Monfared, J. (2023). Designing a Model of the Biomass Supply Chain for the Construction of a Power Plant Despite the Disruption, Industrial Management Studies, 21(70), 261-296.
https://doi.org/10.22054/jims.2023.71570.2834
- Detwal, P. K., Agrawal, R., Samadhiya, A., Kumar, A., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Research developments in sustainable supply chain management considering optimization and industry 4.0 techniques: a systematic review. Benchmarking: An International Journal.۲۱-۱ .
https://doi.org/10.1108/BIJ-01-2023-0055
- Diaz-Trujillo, L.A., & Napoles-Rivera, F. 2019. Optimization of biogas supply chain in Mexico considering economic and environmental aspects. Journal of Renewable Energy, 139, 1227-1240.
https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.027
- Durmaz, Y.G., & Bilgen, B. 2020. Multi-Objective Optimization of Sustainable Biomass Supply Chain Network Design. Journal of Applied Energy, 272, 115259.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115259
- Ebrahimi Qazvini, Z., Haji, A., & Mina, H. 2019. A fuzzy solution approach for supplier selection and order allocation in green supply chain considering location-routing problem. Journal of Scientia Iranica, 28(1), 446-464.
https://doi.org/10.24200/sci.2019.50829.1885
- Eghbali, H., Arkat, J., & Tavakkoli-Moghaddam, R. 2022. Sustainable Supply Chain Network Design for Municipal Solid Waste Management: A Case Study. Journal of Cleaner Production, 381, 135211.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135211
- Fattahi, M., Govindan, K., & Farhadkhani, M. 2020. Sustainable Supply Chain Planning for Biomass-Based Power Generation with Environmental Risk and Supply Uncertainty Considerations: A Real-Life Case Study. International Journal of Production Research, 3084-3108.
https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1746427

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

- Ferronato, N., Alarcon, G. P. P., Lizarazu, E. G. G., & Torretta, V. 2021. Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia: Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options. Journal of Resources, Conservation and Recycling, 167, 105234. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105234
- Ghaderi, H., Pishvaee, M.S., & Moini, A. (2016). Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. Industrial Crops and Products, 94, 972-1000. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027
- Ghosal, A. (2022). South Asia's intense heat wave a “sign of things to come”. Associated Press News.
- Global Bioeconomy Summit Conference Report. (2018). Innovation in the Global Bioeconomy for Sustainable and Inclusive Transformation and Wellbeing. https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/10/GBS_2018_Report_web.pdf
- Gumte, K., & Mitra, K. (2023). Is Bio-Supply Chain a Feasibility in India? An Uncertainty-Based Study. In: Gunasekaran, A., Sharma, J.K., Kar, S. (Eds) Applications of Operational Research in Business and Industries. Lecture Notes in Operations Research. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8012-1_17
- Helal, M. A., Anderson, N., Wei, Y., & Thompson, M. (2023). A Review of biomass-to-bioenergy supply chain research using bibliometric analysis and visualization. Journal of Energies, 16(3), 1187. https://doi.org/10.3390/en16031187
- Hugos, M. H. (2024). Essentials of supply chain management. John Wiley & Sons.
- Iqbal, M.W., & Kang, Y. 2020. Waste-to-Energy Supply Chain Management with Energy Feasibility Condition. Journal of Cleaner Production, 291(2), 125231. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125231
- Jing, Y., Guo, Y., Xia, Q., Liu, X., & Wang, Y. (2019). Catalytic production of value-added chemicals and liquid fuels from lignocellulosic biomass. Chem, 5(10), 2520-2546. https://doi.org/10.1016/j.chempr.2019.05.022
- Khalifehzadeh, S., Fakhrzad, M.B. Zare Mehrjerdi, Y., & Hosseini Nasab, H. (2019). Two effective metaheuristic algorithms for solving a stochastic optimization model of a multi-echelon supply chain. Applied Soft Computing, 76, 545-563. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.018

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

- León-Olivares, E., Minor-Popocatl, H., Aguilar-Mejía, O., & Sánchez-Partida, D. 2020. Optimization of the Supply Chain in the Production of Ethanol from Agricultural Biomass Using Mixed-Integer Linear Programming (MILP): A Case Study. Journal of Mathematical Problems in Engineering, 2020(4), 1-25. https://doi.org/10.1155/2020/6029507
- Liu, S., Papageorgiou, L.G., & Shah, N. 2019. Optimal Design of Low-Cost Supply Chain Networks on the Benefits of New Product Formulations. Journal of Computers & Industrial Engineering, 139,106189. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106189
- Liu, X., Tian, G., Fathollahi-Fard, A.M., & Mojtahedi M. 2020. Evaluation of Ship's Green Degree Using a Novel Hybrid Approach Combining Group Fuzzy Entropy and Cloud Technique for the Order of Preference by Similarity to the Ideal Solution Theory. Journal of Clean Technologies and Environmental Policy, 22(8), 493-512. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01798-7
- Lu, Y., Ge, Y., Zhang, G., Abdulwahab, A., Salameh, A. A., Ali, H. E., & Le, B. N. (2023). Evaluation of waste management and energy saving for sustainable green building through analytic hierarchy process and artificial neural network model. Journal of Chemosphere, 318, 137708. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137708
- Maronese, S. (2014). Optimum biorefinery pathways selection using MILP with integer-cuts constraint method. https://hdl.handle.net/20.500.12608/17897
- Momenitabar, M., Dehdari Ebrahimi, Z., Abdollahi, A., Helmi, W., Bengtson, K. & Ghasemi, P. 2023. An integrated machine learning and quantitative optimization method for designing sustainable bioethanol supply chain networks. Decision Analytics Journal, 7, 100236. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100236
- Mousavi Ahranjani, P., Ghaderi, S.F., Azadeh, A., & Babazadeh, R. (2019). Robust design of a sustainable and resilient bioethanol supply chain under operational and disruption risks. Journal of Clean Technologies and Environmental Policy, 22(23), 1-33. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01773-2
- Nunes, L.J.R.; & Silva, S. 2023. Optimization of the Residual Biomass Supply Chain: Process Characterization and Cost Analysis. Journal of Logistics, 7(3), 48. https://doi.org/10.3390/logistics7030048

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

- Pakzad-Moghaddam, S.H., Mina, H., & Mostafazadeh, P. (2019). A novel optimization booster algorithm. Journal of Computers & Industrial Engineering. 136, 591-613.
https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.046
- Pandey, S., & Kumari, N. (2022). Sustainable Utilization and Management of Agricultural and Kitchen Waste. Agricultural and Kitchen Waste, 127-163.
https://doi.org/10.1201/9781003245773-7
- Piqueiro, H., Gomes, R., Santos, R., & de Sousa, J. P. (2023). Managing disruptions in a biomass supply chain: A decision support system based on simulation/optimization. Journal of Sustainability, 15(9), 7650.
https://doi.org/10.3390/su15097650
- Roussanaly, S., Ouassou, J.A., Anantharaman, R., & Haaf, M. 2020. Impact of Uncertainties on the Design and Cost of CCS from a Waste-to-Energy Plant. Journal of Frontiers in Energy Research, 8(17.(
https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00017
- Saghaei, M., Ghaderi, H., & Soleymani, H. 2020. Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. Journal of Energy, 197, 117165.
https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117165
- Singh, R., Krishna, B.B., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2016). Opportunities for utilization of non-conventional energy sources for biomass pretreatment, Journal of Bioresource Technology, 199, 398-407.
https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.117
- Statista. (2024). Net electricity consumption worldwide in select years from 1980 to 2022.
https://www.statista.com/statistics/280704/world-power-consumption/
- Statista. (2024). Electricity generation worldwide in 2015 and 2020, with a forecast until 2050.
https://www.statista.com/statistics/1262346/electricity-generation-worldwide-forecast.
- Sun, J., Wang, H., & Cui, Z. (2023). Alleviating the bauxite maritime supply chain risks through resilient strategies: QFD-MCDM with intuitionistic fuzzy decision approach. Journal of Sustainability, 15(10), 8244.
https://doi.org/10.3390/su15108244

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]

- Solarte-Toro, J.C., & Cardona Alzate, A.C. (2021). Biorefineries as the base for accomplishing the sustainable development goals (SDGs) and the transition to bioeconomy: Technical aspects, challenges and perspectives. Bioresource Technology, 340, 125626.
https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125626
- Toba, A. L., Paudel, R., Lin, Y., Mendadhala, R. V., & Hartley, D. S. (2023). Integrated land suitability assessment for depots siting in a sustainable biomass supply chain. Journal of Sensors, 23(5), 2421.
https://doi.org/10.3390/s23052421
- Torabi, S.A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. Journal of Fuzzy Sets and Systems, 159(2), 193-214.
https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.08.010
- United Nations. (2024). Growing or shrinking? What the latest trends tell us about the world's population.
https://news.un.org/en/story/2024/07/1151971
- Wang, K., & Tester, J.W. (2023). Sustainable management of unavoidable biomass wastes. Journal of Green Energy and Resources, 1(1), 100005.
https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100005
- Wang, Z., & Wang, Z. (2023). Sustainable supply chain design for waste to biohydrogen. Waste to Renewable Biohydrogen, 211-227. Academic Press.
https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821675-0.00002-5
- Wolff, M., Becker, T., & Walther, G. (2023). Long-term design and analysis of renewable fuel supply chains – An integrated approach considering seasonal resource availability. European Journal of Operational Research, 304(2), 745-762.
https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.04.001
- Yılmaz Balaman Ş, & Selim H. (2015). A decision model for cost effective design of biomass based green energy supply chains. Bioresour Technol, 191, 97-109 .
https://doi: 10.1016/j.biortech.2015.04.078

[Downloaded from iiesj.ir on 2025-03-20]