



A Mathematical Model for Designing a Resilient and Sustainable Biomass Supply Chain Under Uncertainty and Disruption

S. Salehi, Y. Zare Mehrjerdi* , A. Sadegheih , H. Hosseini Nasab 

* Professor, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Safaeieh, Iran

(Received: 11/05/2022, Revised: 05/07/2022, Accepted: 03/10/2022, Published: 21/01/2023)

DOR: 20.1001.1.20089198.1401.24.76.1.2


ABSTRACT

Biomass supply chain network design decisions are the most important part of the strategic level of supply chain management decisions, which include determining the location of facilities, their number and capacity, their allocation to different resources and markets, and the integration flow among facilities. An appropriate design has a significant influence on flexibility, efficiency and consequently the performance of the biomass supply chain. In this paper, a mathematical model with a robust optimization approach is presented to design a resilient and sustainable biomass supply chain under uncertainty in bioenergy demand and disruption in bioenergy refinery. By determining resilience factors and sustainability indicators, the relationship between resilience factors was determined and then the resilience factors were prioritized using fuzzy TOPSIS. Resilience factors with high priority are considered in the mathematical model. The first objective function considers profit maximization by considering all sustainability costs and the penalty of shortage or surplus of bioenergy demand and minimizing resilience factors. In addition, Robust method is proposed to overcome the uncertainty in bioenergy demand and the results of model solving with GAMS software are presented to show the model capability and sensitivity analysis of basic parameters. One of the innovations of this paper is to provide a way to measure resiliency based on the residual capacity after the disruption compared to before the disruption, which is presented in the first constraint. Finally, the parameters in the mathematical model are tested using a case study in the Organization of Renewable Energy and Energy Efficiency through numerical, feasibility and applicability of the proposed research approach. The obtained results show the valuable efficiency of the proposed model in increasing the biomass supply chain performance.

Keywords: Robust Optimization, Biomass Supply Chain Network Design, Resilience, Sustainability, Uncertainty, Disruption

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: yzare@yazd.ac.ir

ارائه مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین تاب آور و پایدار زیست توده تحت عدم قطعیت و اختلال

سمیه صالحی^۱، یحیی زارع مهرجردی^{۲*}، احمد صادقیه^۳، حسن حسینی نسب^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲، ۳ و ۴- استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1401.24.76.1.2

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

چکیده

تصمیمات طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست توده مهم ترین بخش از تصمیمات سطح استراتژیک مدیریت زنجیره تأمین را تشکیل می دهند. که شامل تعیین مکان تسهیلات، تعداد و ظرفیت آن ها، تخصیص آن ها به منابع و بازارهای مختلف و جریان ادغامی بین تسهیلات می باشند. طراحی مناسب روی انعطاف پذیری، کارایی و در نتیجه عملکرد زنجیره تأمین زیست توده تأثیر به سزایی دارد. در این مقاله ارائه مدل ریاضی با رویکرد بهینه سازی استوار جهت طراحی زنجیره تأمین تاب آور و پایدار زیست توده تحت عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی و اختلال در پالایشگاه انرژی زیستی ارائه شده است. با تعیین عوامل تاب آوری و شاخص های پایداری، رابطه عوامل تاب آوری تعیین شد و سپس با استفاده از تاپسیس فازی عوامل تاب آوری اولویت بندی شد. عوامل تاب آوری با اولویت بالا در مدل ریاضی در نظر گرفته شده است. در تابع هدف اول حداکثرسازی سود با در نظر گرفتن کلیه هزینه های پایداری و جریمه کمبود یا مازاد تقاضای انرژی زیستی و حداقل سازی عوامل تاب آوری z_1 ارائه شده است. علاوه بر این از روش روبات برای غلبه بر عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی پیشنهاد و نتایج حل مدل با نرم افزار GAMS برای نشان دادن قابلیت مدل و تحلیل حساسیت پارامترهای اساسی ارائه شده است. یکی از نوآوری های این مقاله ارائه نحوه سنجش تاب آوری بر اساس ظرفیت باقی مانده بعد از اختلال نسبت به قبل از بروز اختلال بوده که در محدودیت اول ارائه شده است. در پایان پارامترها در مدل ریاضی، با استفاده از یک مطالعه موردی در سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی، آزمایش عددی، شدنی و کاربردپذیر بودن رویکرد پیشنهادی تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان دهنده کارایی ارزشمند مدل پیشنهادی در افزایش عملکرد زنجیره تأمین زیست توده است.

واژه های کلیدی: بهینه سازی استوار، طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست توده، تاب آوری، پایداری، عدم قطعیت، اختلال

۱- مقدمه

با چالش های زیادی مواجه است [۲ و ۳]. در سال های اخیر، محققان مطالعات مختلفی را در زمینه طراحی، پایداری و تاب آوری BMSCN انجام داده اند. فتاحی و همکاران [۴] یک سیستم زنجیره تأمین برق مبتنی بر زیست توده در دنیای واقعی را در منطقه جغرافیایی ایران مورد مطالعه قرار دادند. آن ها از یک مدل برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای برای ارائه یک استراتژی طراحی مؤثر از نظر تأمین زیست توده تصادفی و فصلی استفاده کردند. با توجه به تحلیل حساسیت روی پارامترهای کلیدی مسئله بهینه سازی، این سیستم پیشنهادی عملکرد خوبی از نظر پایداری درون نمونه و خارج از نمونه نشان داده است. توردسیلا و همکاران [۵] استفاده از رویکردهای بهینه سازی شبیه سازی برای طراحی شبکه های زنجیره تأمین انعطاف پذیر را بررسی کردند. علاوه بر این، آن ها روش های ارائه شده را از نظر متدولوژی، عدم قطعیت و عوامل ریسک طبقه بندی کردند. معیارهای مختلف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی نیز در فرآیند بهینه سازی طراحی با تمرکز بر الگوریتم های فراابتکاری در نظر گرفته شدند. خزرلو و همکاران [۶] یک مدل بهینه سازی را در طراحی یک

استفاده از سوخت های فسیلی منجر به نگرانی های زیست محیطی و بشری از جمله گرمایش جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای در جو و تجدیدناپذیری آن ها شده است. علاوه بر این، مشکلات اقتصادی از جمله روند تورمی در قیمت سوخت های فسیلی، تلاش ها را برای یافتن جایگزین های مناسب برای این سوخت ها تشدید کرده است. زیست توده، همان طور که توسط اتحادیه اروپا تعریف شده است، اجزای زیستی تجدیدپذیر محصولات کشاورزی، ضایعات طبیعی (شامل مواد گیاهی و جانوری، درختان جنگلی و صنایع مرتبط) و زباله های صنعتی شهری است که به عنوان مواد خام برای تولید انرژی زیستی استفاده می شود [۱]. جذابیت آن به دلیل در دسترس بودن بالقوه در سراسر جهان، بهره وری تبدیل منطقی، و توانایی تولید و مصرف آن بر اساس CO2 خنثی است. با این حال، تولید انرژی تجدیدپذیر از زیست توده به دلیل عدم قطعیت در تأمین مواد اولیه و قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین آن

* رایانامه نویسنده مسئول: yzare@yazd.ac.ir

روش ترکیبی را با ترکیب مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط تصادفی دومرحله‌ای (MINLP) و محدودیت شانس برای کاهش هزینه کل تولید برق از زیست توده چوبی در یک زنجیره تأمین انرژی زیستی یکپارچه چهار سطحی پیشنهاد کردند. در مرحله اول از تصمیمات راهبردی مانند مکان و ظرفیت زیرساخت استفاده شد و در مرحله دوم تصمیمات برای تأمین مواد و سیاست موجودی موردتوجه قرار گرفت. آن‌ها یک رویکرد فراابتکاری ترکیبی شامل عملگرهای الگوریتم ژنتیک (GA) و نظریه آشوب در ساختار یک الگوریتم آنتروپی متقاطع (CE) بهبودیافته ارائه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که این روش پیشنهادی بهتر از آنتروپی متقاطع معمولی ۵٫۶٪ عمل می‌کند. فتاحی و همکاران [۱۳] با استفاده از یک برنامه تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر بهینه‌سازی مخروطی درجه دوم، که مکان، تخصیص، موجودی و تصمیمات اندازه سفارش را بهینه می‌کند، یک متریک تاب‌آوری جدید را برای ارزیابی انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین ارائه کردند. علاوه بر این، این برنامه تصادفی به مدیران اجازه می‌دهد تا تأثیر یک اختلال را بر عملکرد عملیاتی زنجیره تأمین ارزیابی کنند. گولان و همکاران [۱۴] چندین مطالعه تحقیقاتی تاب‌آوری زنجیره تأمین را با تمرکز بر مدل‌سازی کمی‌سازی تاب‌آوری بررسی کردند. آن‌ها به این نکته اشاره کردند که سناریوهای اختلال خاصی برای توسعه و آزمایش مدل‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین عمل می‌شود. همچنین، آن‌ها اشاره کردند که هدف اصلی مدل‌سازی زنجیره تأمین، بهینه‌سازی کارایی و کاهش هزینه‌ها است. دورماز و همکاران [۱۵] یک روش راه‌حل چندمرحله‌ای را برای طراحی یک SCN زیست‌توده پایدار پیشنهاد کردند. هدف مدل آن‌ها تعیین تعداد، مکان و اندازه بهینه تأسیسات بیوگاز، و همچنین جریان شبکه و برق تولید شده بود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هم پارامتر فاصله حداکثر و هم قیمت‌های خرید تأثیر قابل‌توجهی بر تصمیم‌گیری‌ها و بازده مالی دارند. امنیک و همکاران [۱۶] ابعاد گسترده‌تر اختلالات احتمالی در زنجیره تأمین ناشی از عدم قطعیت‌هایی را که در طول همه‌گیری جهانی COVID-۱۹ تجربه شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نکته اشاره کردند که تاب‌آوری زنجیره تأمین گاز طبیعی نقش مهمی در ترکیب انرژی ایفا می‌کند که به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط زیست کمک می‌کند. آن‌ها اشاره کردند که بهینه‌سازی ابزار مفیدی برای دستیابی مداوم به تاب‌آوری در فعالیت‌های تولید، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل زنجیره تأمین است. موسوی اهرنجانی و همکاران [۱۷] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را با هدف طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه زنجیره تأمین لیگنوسولوزی بیواتانول چند خوراکی پیشنهاد کردند. آن‌ها از یک رویکرد برنامه‌ریزی احتمال تصادفی قوی ترکیبی برای ارائه تاب‌آوری از نظر عدم قطعیت‌ها و خطرات اختلال در زنجیره تأمین استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی از نظر

شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده به سوخت زیستی تاب‌آور و قابل‌اعتماد برای شناسایی رابطه بین پایانه‌های چندوجهی، پالایشگاه‌های زیستی و اختلال پیشنهاد کردند. آن‌ها ترکیب ریسک و سیستم صف M/M/1 را برای مقابله با پیامدهای تقاضای نامشخص و در دسترس بودن مواد خام در نظر گرفتند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که با افزایش ۲۰ درصدی نرخ تبدیل زیست‌توده به سوخت زیستی، تولید ۲۰٫۸۸ درصد افزایش یافت و هزینه SC به دلیل توزیع ظرفیت بهتر پالایشگاه‌های زیستی ۹٫۳۲ درصد کاهش یافت. جایراتنا و همکاران [۷] یک رویکرد مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی را برای به حداکثر رساندن کارایی زیست‌محیطی و اقتصادی نیروگاه‌های انرژی در مقیاس بزرگ با استفاده از انواع مختلف زیست‌توده پیشنهاد کردند. همچنین، آن‌ها در دسترس بودن زیست‌توده فضایی و شبکه‌های جاده‌ای موجود را با تحلیل‌های فضایی چندمعیاره در نظر گرفتند تا بتوانند مکان‌های بهینه نیروگاه انرژی زیست‌توده را برای ترکیب‌های مختلف انواع زیست‌توده شناسایی کنند. علاوه بر این، آن‌ها تأثیر ظرفیت نیروگاه و حداکثر فاصله حمل‌ونقل را بر پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی مورد مطالعه قرار دادند. محب‌علیزاده و همکاران [۸] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط چندهدفه تصادفی یکپارچه را برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار با توجه به نتایج پایداری و کارایی استفاده از منابع ارائه کردند. آن‌ها از یک مدل تحلیل پوششی داده‌های خروجی دوهدفه برای ارزیابی کارایی استفاده کردند. مطالعه موردی انجام‌شده نحوه تعادل بین پایداری و کارایی شرکت‌ها را در مسئله طراحی SCN نشان داد. آلدریگتی و همکاران [۹] مدل‌های کمی طراحی SCN را با توجه به ریسک‌های اختلال در مدیریت زنجیره تأمین صنعتی و لجستیک بررسی کردند. آن‌ها همچنین سرمایه‌گذاری‌های پیشگیرانه را در استحکام و انطباق پارامتری ساختاری در مرحله بازیابی در نظر گرفتند. علاوه بر این، تأثیر اجتماعی، تأثیر زیست‌محیطی، پاسخگویی و ریسک‌گریزی به عنوان ادغام ابعاد مختلف مدیریت زنجیره تأمین در نظر گرفته شدند. خویشتن دار و همکاران [۱۰] یک مدل برنامه‌ریزی محدود احتمال فازی را برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسئله SC بیوگاز پیشنهاد کردند. در این روش، از الگوریتم‌های تکاملی برای تخصیص مکان‌های بیوگاز در یک زمان محاسباتی معین استفاده شد. تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شده اثرات عدم قطعیت در زیست‌توده موجود، تقاضای زیست‌توده و نیروی کار موجود را بر هزینه کلی زنجیره تأمین بیوگاز نشان داد. کومارت و همکاران [۱۱] موضوع تولید سوخت‌های زیستی پایدار از مواد آلی زباله مانند زیست‌توده لیگنوسولوزی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها پیش‌تصفیه زیست‌توده لیگنوسولوزی را به دلیل مقاومت ذاتی آن در نظر گرفتند و چندین رویکرد را برای تبدیل مؤثر زیست‌توده به سوخت‌های زیستی مقایسه کردند. سقایی و همکاران [۱۲] یک

نادیده گرفتن پارامتر اختلال در مدل ریاضی، عوامل تاب‌آوری را بدون گنجانیدن آن‌ها در مدل ریاضی معرفی کرده‌اند. با توجه به وابستگی هزینه‌های حمل‌ونقل به محل فرآوری، توجه ویژه‌ای به شناسایی مکان بهینه تجهیزات می‌شود. با این حال، تمرکز بسیار کمی بر تصمیمات استراتژیک مربوط به سایر امکانات (برداشت، جمع‌آوری، پیش‌پردازش، پردازش میانی و سایت‌های توزیع) صورت می‌گیرد. اتخاذ چنین تصمیماتی می‌تواند انعطاف‌پذیری مدل را افزایش داده و منجر به طراحی مدل‌های کم‌هزینه شود. تنها در ۵۵/۲۴ درصد از مقالات انتخاب‌شده، مدل‌های توسعه‌یافته دارای منابع زیست‌توده متعدد، نزدیک به ۴۰ درصد از مدل‌های توسعه‌یافته چندمحصولی، تنها ۲۶/۶ درصد از مدل‌ها چندمنظوره هستند و سهم ۲۱/۰۹ درصد از مدل‌های غیرقطعی نشان‌دهنده عدم تمایل به استفاده از این مدل‌ها به دلیل سختی در محاسبات است. اخیراً، چند مقاله طرح SRSCN را ارائه کرده‌اند که ارزیابی کمی از تاب‌آوری را علی‌رغم استراتژی‌هایی برای افزایش تاب‌آوری پس از اختلال در زنجیره تأمین زیست‌توده، ارائه نمی‌دهند. علاوه بر این، مدل‌های پایدار تنها ۵ درصد از مقالات انتخاب‌شده را تشکیل می‌دهند. تنها ۱۳ درصد با بهینه‌سازی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور هم‌زمان سروکار داشته‌اند، البته بدون توجه به نگرانی‌های اجتماعی زنجیره تأمین، و تنها ۱ درصد بهینه‌سازی هر دو جنبه اقتصادی و اجتماعی را هم‌زمان در نظر گرفته‌اند. با مطالعه دریافتیم که استفاده از روش‌های ترکیبی و الگوریتم‌های تخمین، استفاده از روش‌های حل خاص برای مسائل خاص، بهبود حل‌کننده‌های تجاری، الگوریتم‌های راه‌حل دقیق و الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری از جمله راه‌حل‌هایی هستند که می‌توانند در آینده مفید باشند. در نتیجه شکاف قابل توجهی در رویه‌های حل مسئله کاربردی مشاهده شده است که باید در کارهای آتی برطرف شود. بر اساس نتایج ارزیابی، تنها ۴۳/۱۵ درصد از مقالات دارای تصمیم منبع هستند. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت و انتخاب تأمین‌کنندگان در مدل‌های طراحی شبکه انرژی زیستی معنی‌دار نبود. پر کردن بسیاری از شکاف‌ها در ادبیات نیاز به تحقیقات زیادی دارد. این مطالعه به برخی از این شکاف‌ها می‌پردازد.

با توجه به ویژگی‌های مختلف مدل پیشنهادی و ملاحظات ارائه شده، این مقاله سعی دارد برخی از

هزینه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برتر است. نگان و همکاران [۱۸] یک سیستم خبره تصمیم‌گیری چندمعیاره جدید مبتنی بر نظریه مجموعه‌های فازی را پیشنهاد کردند که روش فرآیند شبکه تحلیلی فازی مبتنی بر تصمیم و ارزیابی (DEFANP) نامیده می‌شود. هدف اصلی این روش اولویت‌بندی استراتژی‌های کاهش ریسک در یک رابطه شبکه‌ای از اهداف پروژه، اجزای کلیدی صنعت زیست‌توده و سهامداران صنعتی است. علاوه بر این، در یک مطالعه موردی از یک سیستم تولید پلی تولید بیومس نخل در مالزی، ریسک‌های نظارتی، ریسک‌های تأمین مالی، ریسک‌های فناوری، ریسک‌های زنجیره تأمین و مواد اولیه، ریسک‌های تجاری، ریسک‌های اجتماعی و زیست‌محیطی به‌عنوان ریسک‌های اجرایی کلیدی در نظر گرفته شدند. عباس زاده و همکارانش [۱۹] طراحی و بهینه‌سازی یک مدل مدیریت پسماند در زنجیره تأمین پایدار در معدن را ارائه کردند. مدل سه هدف می‌باشد: ۱- کمینه کردن هزینه نصب و حمل‌ونقل به‌عنوان هدف اقتصادی ۲- کمینه کردن تولید گاز CO₂ از طریق حمل‌ونقل و فرآیند تولید محصول به‌عنوان هدف زیست‌محیطی ۳- کاهش انحراف کیفیت محصول به‌عنوان هدف تکنولوژیکی در نظر گرفته شده است. درختی زاده و جبار زاده [۲۰] توسعه مدل علی عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری زنجیره تأمین را ارائه کردند. در این پژوهش با بررسی ادبیات پژوهشی مرتبط، مؤلفه‌های مرتبط با تاب‌آوری زنجیره تأمین و کارت امتیازی متوازن جهت ترسیم نمودار علت و معلولی تاب‌آوری زنجیره تأمین با رویکرد فرا ترکیب شناسایی شده است که این مؤلفه‌ها به تأیید خبرگان رسیده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده شامل ۸۳ کد است که در سه مقوله و ده بُعد طبقه‌بندی شده‌اند. درنهایت به کمک این نتایج و روابط بین آن‌ها، مدل علی عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری زنجیره تأمین، توسعه داده شده است. ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است. بخش ۲ به تجزیه و تحلیل شکاف اختصاص دارد؛ درحالی‌که بخش ۳ ساختار مدل و روش‌شناسی راه‌حل را مورد بحث قرار می‌دهد. مطالعه موردی موضوع بخش ۴ است. بخش ۵ آزمایش‌های محاسباتی را ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که تجزیه و تحلیل حساسیت در بخش ۶ مورد بحث قرار می‌گیرد و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۷ ارائه می‌شود.

۲- شکاف تحقیقاتی

با مرور ۱۶۱ مقاله تحقیقاتی (منتشر شده از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲) در مورد طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور و پایدار با زیست‌توده از طریق رویکرد شبیه‌سازی بهینه‌سازی، متوجه شدیم که بسیاری از محققان تمایل دارند از مدل‌های ساده با یک ماده خام، یک محصول و یک دوره به‌صورت تک‌منظوره استفاده کنند. برخی از محققان با در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری محدود و

- ۲- تأمین تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین زیست‌توده با عوامل، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای منحصر به فرد.
- ۳- در نظر گرفتن سیاست‌های مناسب برای افزایش تاب‌آوری (ظرفیت اضافی و دوره زمانی اختلال)
- ۴- اختلال، به‌عنوان پارامتری ارائه می‌گردد و تأثیر آن بر توابع هدف، ظرفیت تولید و تاب‌آوری نشان داده شده است.
- ۵- معرفی تابعی برای سنجش تاب‌آوری.
- ۶- اندازه‌گیری میزان تاب‌آوری در پالایشگاه انرژی زیستی تحت تأثیر اختلال.

۳- ساختار و حل مدل

۳-۱- اولویت‌بندی عوامل حیاتی تاب‌آوری بر اساس روش تاپسیس

روش TOPSIS یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های MCDM است. روش آن شامل سه مرحله است: اول مقایسه یک سری از آلترناتیوها از طریق تعیین وزن هر شاخص (روش آنتروپی شانون)، دوم نرمال‌سازی امتیازات آن‌ها، و در نهایت محاسبه فاصله هندسی بین هر آلترناتیو و آلترناتیو ایده‌آل، که در هر شاخص، امتیاز بهینه را در میان بقیه دارد [۲۱].

مراحل تاپسیس:

۱- نرمال‌سازی ماتریس‌های تصمیم با استفاده از جمع نرم:

$$r_j^i = x_{ij} \div \sum x_{ij}$$

۲- محاسبه شاخص فوکوس با استفاده از فرمول زیر:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}$$

۳- محاسبه نرخ پراکندگی با استفاده از فرمول زیر:

$$d_j = 1 - E_j$$

۴- محاسبه وزن اندیکاتورها با استفاده از فرمول زیر:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum d_j}$$

۵- نرمال‌سازی ماتریس‌های تصمیم با استفاده از فرم‌های برداری:

$$r_j^i = x_{ij} \div \sqrt{\sum x_{ij}^2}$$

شکاف‌های تحقیقاتی را به شرح زیر پوشش دهد:

۱- شناسایی عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری در زنجیره تأمین زیست‌توده، تعیین رابطه بین عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری، اولویت‌بندی عوامل تاب‌آوری BMSCN با استفاده از روش TOPSIS فازی در بین تکنیک‌های MCDM و در نظر گرفتن عوامل تاب‌آوری با اولویت بالاتر در مدل پیشنهادی ۲- ارزیابی تاب‌آوری BMSCN با استفاده از شاخص‌های کارایی زنجیره تأمین ۳- ارائه یک مدل تک‌هدفه با در نظر گرفتن عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری بر اساس عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی و اختلال در پالایشگاه زیستی ۴- استفاده از یک مدل بهینه‌سازی برای به حداکثر رساندن سود زنجیره تأمین زیست‌توده، به حداکثر رساندن میزان تاب‌آوری، به حداقل رساندن هزینه‌های مربوط به جریمه مازاد یا کمبود و هزینه‌های زنجیره تأمین زیست‌توده (هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای راه‌اندازی زنجیره تأمین، هزینه حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی زیست‌توده، انرژی زیستی، تبدیل زیست‌توده به انرژی زیستی و هزینه‌های ظرفیت اضافی)، به حداکثر رساندن فرصت‌های شغلی، ایمنی کارگران، دستمزد کارگران و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی و عوامل عدم تاب‌آوری ۵- استفاده از استراتژی‌های تاب‌آوری BMSCN، از جمله ظرفیت اضافی و زمان‌بندی بازیابی پس از وقوع اختلال در پالایشگاه زیستی، که زنجیره تأمین به سطوح عادی بازمی‌گردد ۶- به حداقل رساندن عدم تاب‌آوری از جمله کاهش تاب‌آوری در گره‌های بحرانی (مراکز کاشت و برداشت، سایت‌های جمع‌آوری و سایت‌های پالایشگاه انرژی زیستی)، کاهش آشفتنگی و پیچیدگی، کاهش تاب‌آوری به‌دلیل استفاده از فناوری‌های قدیمی که منجر به احتمال بروز اختلال می‌شود ۷- انتخاب انواع مختلف زیست‌توده و تولید انرژی زیستی (چند منبع، چند محصول)، فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی زیست‌توده و فناوری تبدیل زیست‌توده به انرژی زیستی در پالایشگاه انرژی زیستی، انتخاب چندین محصول تجدیدپذیر به‌منظور تولید انرژی زیستی.

تفاوت‌ها با سایر مقالات:

۱- پس از اولویت‌بندی توسط تاپسیس، در نظر گرفتن عوامل تاب‌آوری با اولویت بالا در مدل (تابع هدف Z_1).

جدول (۱). اولویت بندی عوامل تاب آوری در BMSCN

ردیف	عوامل تاب آوری	Ri	ردیف	عوامل تاب آوری	Ri
۱	مدیریت ریسک (آشنفتگی و پیچیدگی در حمل و نقل و سایتها)	۰.۲۱۵۱۴۳	۷	کاهش زمان تأخیر	۰.۶۰۳۰۲۶۵
۲	قراردادها	۰.۴۵۵۰۷۰۱	۸	تسهیلات بیشتر و فعال سازی جریان	۰.۶۱۷۵۹۰۸
۳	قابلیت مشاهده در برنامه تولید (سطح ظرفیت تولید انرژی زیستی)	۰.۴۷۱۱۳۶۴	۹	حمل و نقل انعطاف پذیر	۰.۸۳۱۰۵۵۹
۴	منابع متعدد	۰.۴۹۴۸۰۵	۱۰	سایت های بحرانی	۰.۹۰۰۷۳۶۴
۵	نگهداری موجودی	۰.۵۰۴۹۸۰۷	۱۱	قابل مشاهده بودن کل زنجیره	۱.۵۱۸۲۰۷۴
۶	مدیریت تقاضا	۰.۵۵۱۷۶۳۴			

۲-۳- بیان مسئله

در این مقاله، طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب آور و پایدار زیست توده با استفاده از رویکردی مبتنی بر عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی و اختلال در پالایشگاه زیستی ارائه شده است. زنجیره تأمین زیست توده به صورت یک شبکه چهار سطحی (شامل مرکز کاشت و برداشت، مرکز جمع آوری، پالایشگاه زیستی و مشتری نهایی) ارائه شده است. ابتدا انواع زیست توده از مراکز کاشت برداشت و جمع آوری شده و به مراکز جمع آوری (انبار) ارسال می شوند؛ بنابراین، می توان انواع مختلف زیست توده را با تکنولوژی برتر و متفاوت در مراکز جمع آوری ذخیره کرد و در هر دوره مقدار معینی به پالایشگاه ارسال کرد. در پالایشگاه امکان ذخیره زیست توده با فناوری منحصربه فرد آن وجود دارد و در عین حال در هر دوره مقدار مشخصی برای مشتری نهایی ارسال می شود. به منظور طراحی یک BMSCN تاب آور و پایدار، ابتدا

۶- ساخت ماتریس وزن دار (وزن مرحله قبل به روش آنتروپی محاسبه شد):

۷- شناسایی گزینه های ایده آل مثبت و منفی:

۸- محاسبه فاصله گزینه ها تا ایده آل مثبت:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

۹- محاسبه فاصله بین گزینه ها و ایده آل منفی

$$d_i^- = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

۱۰- محاسبه شاخص مجاورت:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

۱۱- انتخاب بهترین گزینه ها (حداکثر شاخص مجاورت):

در این تحقیق روش تاپسیس را برای دستیابی به اهداف زیر انتخاب کرده ایم:

مرحله ۱: تعیین عوامل تاب آوری در BMSCN.

مرحله ۲: تعیین شاخص های پایداری در BMSCN.

مرحله ۳: تعیین رابطه بین عوامل تاب آوری و شاخص های

پایداری و اولویت بندی عوامل تاب آوری BMSCN.

در مراحل ۱ و ۲، بر اساس مطالعات کتابخانه ای و بررسی ادبیات، ما عوامل تاب آوری و شاخص های پایداری را در BMSCN تعیین می کنیم؛ بنابراین عوامل تاب آوری «مدیریت ریسک آشنفتگی و پیچیدگی در حمل و نقل و سایتها»، قراردادهای، قابلیت مشاهده در برنامه تولید (سطح ظرفیت تولید انرژی زیستی)، چند منبعی، نگهداری موجودی، مدیریت تقاضا، کاهش زمان تأخیر، تسهیلات بیشتر و فعال سازی جریان، حمل و نقل انعطاف پذیر، سایت های بحرانی و قابل مشاهده بودن کل زنجیره» و شاخص های پایداری (هزینه کل زنجیره تأمین، فروش خالص، هزینه های سرمایه گذاری پروژه، ایجاد فرصت های شغلی، دستمزد کارگران، سلامت و ایمنی کارگران، تخریب منابع طبیعی، تأثیر بر اکوسیستم، تأثیر بر سلامت و هشدار گرمایش) تعیین شد.

برای تعیین وزن عوامل تاب آوری، پرسشنامه های پژوهشی بین پنج خبره توزیع شد. پس از تجزیه و تحلیل پرسشنامه ها، وزن گزینه ها (عوامل تاب آوری) بر اساس ده معیار (شاخص های پایداری) محاسبه شد. پس از تعیین وزن های تصمیم گیری در انتخاب مهم ترین عوامل تاب آوری و تجزیه و تحلیل پرسشنامه ها، رتبه بندی عوامل تاب آوری در جدول (۱) ارائه شده است.

تصمیم خاص ممکن است از دوره‌ای به دوره دیگر متفاوت باشد).
 ۱۳. جریان معکوس در زنجیره تأمین انرژی زیستی وجود ندارد.
 ۱۴. احتمال وقوع حادثه در تولید با فناوری‌های قدیمی وجود دارد، بنابراین در تابع هدف به حداقل رساندن عدم تاب‌آوری، استفاده از فناوری‌های قدیمی به حداقل می‌رسد و سیستم تولید با سطوح مختلف فناوری تخصیص می‌یابد.

۴-۳-۴- ارائه مدل ریاضی و حل مدل پیشنهادی

برای مسئله موردنظر، مدل نهایی با توجه به شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری پیشنهاد شده است. به منظور حل مدل، ابتدا مدل پیشنهادی را خلاصه کردیم تا از پیچیدگی فرآیند جلوگیری کنیم. پس از فشرده‌سازی مدل، با توجه به غیرخطی بودن مدل اول، با تعریف متغیرهای کمکی و افزودن چندین قید اضافی (سعیدی مهرآباد، [۲۲])، مدل اولیه به مدل خطی تبدیل شد. سپس از روبات برای مقابله با عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی برای کنترل نوسانات بر اساس تحقیقات پیشوایی و همکارانش [۲۳] و موسی زاده و همکاران [۲۴] بکار برده شد. برای این منظور در ابتدا باید امکان برنامه‌ریزی محدودیت شانس اجرا شود و سپس با افزودن جریمه نقض محدودیت‌ها در تابع هدف به یک مدل امکان برنامه‌ریزی جامع دست یابیم. با در نظر گرفتن توضیحات فوق و با توجه به شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری، مدل خطی برنامه‌ریزی امکانی استوار ارائه می‌گردد:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & E(Z) + \gamma(Z_{\max} - Z_{\min}) + \sum_i \sum_m \sum_t \beta \left[d_{i,m,t(2)} - (1 - \frac{\alpha_2}{2}) d_{i,m,t(1)} - \frac{\alpha_2}{2} d_{i,m,t(2)} \right] \\ & + \sum_i \sum_m \sum_t \beta \left[\frac{\alpha_1}{2} d_{i,m,t(3)} + (1 - \frac{\alpha_1}{2}) d_{i,m,t(4)} - d_{i,m,t(3)} \right] \\ & + \sum_i \sum_m \sum_t \delta \left[d_{i,m,t(2)} - (1 - \frac{\alpha_2}{2}) d_{i,m,t(1)} - \frac{\alpha_2}{2} d_{i,m,t(2)} \right] \end{aligned} \right] \\ E(Z) = & \sum_h \sum_b \sum_t P_{hb} \times Ambh_{h,b,t} + \sum_i \sum_m \sum_t P_{i,b,t} \times Ambish_{i,m,b,t} - EcoF - Enof \\ & + SoF - Z_1 - \sum_i \sum_m \sum_t \sum_b \left\{ \left(\frac{d_{i,m,t(1)} + d_{i,m,t(2)} + d_{i,m,t(3)} + d_{i,m,t(4)} - Ambish_{i,m,b,t}}{4} \right) \times \beta'_{b,m} \right\} \\ & + \left(Ambish_{i,m,b,t} - \frac{d_{i,m,t(1)} + d_{i,m,t(2)} + d_{i,m,t(3)} + d_{i,m,t(4)}}{4} \right) \times \beta'_{b,m} \quad (1) \\ Z_{\max} = & \sum_h \sum_b \sum_t P_{hb} \times Ambh_{h,b,t} + \sum_i \sum_m \sum_t P_{i,b,t} \times Ambish_{i,m,b,t} - EcoF - Enof \\ & + SoF - Z_1 - \sum_i \sum_m \sum_t \sum_b \left\{ \left(\frac{d_{i,m,t(4)} - Ambish_{i,m,b,t}}{4} \right) \times \beta_{b,m} \right\} \\ & + \left(Ambish_{i,m,b,t} - d_{i,m,t(4)} \right) \times \beta'_{b,m} \\ Z_{\min} = & \sum_h \sum_b \sum_t P_{hb} \times Ambh_{h,b,t} + \sum_i \sum_m \sum_t P_{i,b,t} \times Ambish_{i,m,b,t} - EcoF - Enof \\ & + SoF - Z_1 - \sum_i \sum_m \sum_t \sum_b \left\{ \left(\frac{d_{i,m,t(1)} - Ambish_{i,m,b,t}}{4} \right) \times \beta_{b,m} \right\} \\ & + \left(Ambish_{i,m,b,t} - d_{i,m,t(1)} \right) \times \beta'_{b,m} \end{aligned}$$

عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری در BMSCN شناسایی شدند. سپس رابطه آن‌ها برآورد شده و در نهایت عوامل تاب‌آوری اولویت بندی شد. در نهایت، عوامل تاب‌آوری که اولویت بیشتری دارند در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شد. در طراحی مدل، تقاضای انرژی زیستی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر با عدم قطعیت و احتمال بروز اختلال در پالایشگاه انرژی زیستی در نظر گرفته شده است.

۳-۳-۳- مفروضات

برای ساده سازی مدل سازی ریاضی، مفروضات زیر در نظر گرفته شد:

۱. BMSCN مورد مطالعه یک زنجیره تأمین چندسطحی، چنددوره‌ای و چندمحصولی است. ۲. زیست توده در فصول قبل و دوره‌های آبی در مراکز جمع‌آوری ذخیره می‌شود. ۳. در هنگام بروز اختلالات، جریان مواد اولیه (زیست توده) در مراکز جمع‌آوری و خروجی از آن بر اساس میزان تولید پالایشگاه تعیین می‌شود. ۴. برای هر منطقه، پتانسیل مراکز کاشت و برداشت، مراکز جمع‌آوری و پالایشگاه زیستی وجود دارد. سایت‌های بالقوه کشت زیست توده و تأسیسات مختلف در زنجیره شناسایی می‌شوند، اما بهترین مکان برای ساخت آن‌ها بر اساس نتایج مدل پیشنهادی تعیین می‌شود. ۵. با توجه به ماهیت پویایی تصمیم، افق زمانی T یک دوره محدود در طراحی در نظر گرفته می‌شود. ۶. برآورد مشاغل مستقیم ایجاد شده به اندازه سایت، نوع فعالیت، سطح اتوماسیون و میزان تولید بستگی دارد.

۷. فرض بر این است که تقاضا برای انرژی زیستی در طول زمان از ۸۰ درصد ظرفیت تولید بیوانرژی تجاوز نمی‌کند. ۸. حداکثر تلفات زیست توده ناشی از اختلال کمتر از ۲۰ درصد کل زیست توده موجود است. این مورد تضمین می‌کند که پالایشگاه‌های انرژی زیستی همیشه تقاضای مشتری نهایی را برآورده می‌کنند و مدل همیشه امکان پذیر است. ۹. تلفات زیست توده در طول زنجیره تأمین (تخریب در حمل و نقل) نادیده گرفته می‌شود. ۱۰. قرارداد در ابتدای سال منعقد می‌شود، بنابراین امکان تهیه زیست توده در هر زمان در طول دوره، بدون اتلاف وقت وجود دارد (چند تأمین کننده با ظرفیت محدود می‌توانند زیست توده مورد نیاز را تأمین کنند). ۱۱. احتمال خرابی تجهیزات در طول زمان در تابع هدف به حداقل رساندن عدم تاب‌آوری پیش‌بینی و شناسایی می‌شود. حداقل خرابی تجهیزات به شکل آشفستگی و پیچیدگی در سایت‌ها رخ می‌دهد. ۱۲. برنامه‌ریزی منابع از سیاست بازنگری دوره‌ای پیروی می‌کند (تصمیمات تاکتیکی پویا در نظر گرفته می‌شوند به طوری که یک

معادله ۱ تابع هدف را نشان می دهد که شامل به حداکثر رساندن سود مورد انتظار و به حداقل رساندن هزینه های کل، به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی، ایجاد فرصت های شغلی، به حداکثر رساندن سلامت و ایمنی کارگران و به حداکثر رساندن تاب آوری و کاهش هزینه جریمه برای تقاضای انرژی زیستی کمبود یا مازاد است. توجه داشته باشید که هزینه های سرمایه گذاری، هزینه های کاشت و برداشت، هزینه های حمل و نقل، هزینه های ذخیره سازی زیست توده و انرژی زیستی، هزینه های تبدیل و تولید انرژی زیستی، عوامل تاب آوری، هزینه های مازاد ظرفیت و غیره، کل هزینه ها را تشکیل می دهند.

$$TEch_{h,b} = ECrd + ECesa + EChh + ECgw \quad (5)$$

معادله ۵ (TEch) کل هزینه های زیست محیطی برای کاشت و برداشت زیست توده (تخریب منابع طبیعی، تأثیر بر اکوسیستم، تأثیر بر سلامت انسان و هشدارهای گرمایش جهانی) را نشان می دهد.

$$SoF = \sum_b \sum_h \sum_t \left((NIU_{b,h} \times AEChb_{b,h} + NIndJ_{b,h} \times AEChb_{b,h}) \times X_{b,t} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t \left((NIU_{b,h} \times AECshb_{b,h} + NIndJ_{b,h} \times AECshb_{b,h}) \times V_{b,t} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t \left((NIU_{b,h} \times AECshb_{b,h} + NIndJ_{b,h} \times AECshb_{b,h}) \times V_{j,t} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t \left((DJ_{b,j} \times AECsb_{b,j} + NIU_{b,j} \times AECsb_{b,j} + NIndJ_{b,j} \times AECsb_{b,j}) \times Y_{j,t} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t \left((DJ_{b,j} \times AECsc_{b,j} + NIU_{b,j} \times AECsc_{b,j} + NIndJ_{b,j} \times AECsc_{b,j}) \times Y_{i,t} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t \left((DJ_{b,j} \times AECsc_{b,j} + NIU_{b,j} \times AECsc_{b,j} + NIndJ_{b,j} \times AECsc_{b,j}) \times Z_{i,t} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t \left((NIU_{b,i} \times AECshbi_{b,i} + NIndJ_{b,i} \times AECshbi_{b,i}) \times V_{i,m,t} \right) - \lambda_3^* \sum_i \sum_m \sum_t di_{i,m,t} \left[\begin{aligned} & \sum_b \sum_h \sum_t GPu_b \times WSHDC \times X_{b,t} + \sum_j \sum_t GPu_j \times WSHDC \times Y_{j,t} \\ & + \sum_i \sum_t GPu_i \times WSHDC \times Y_{i,t} + \sum_i \sum_t GPu_i \times WSHDC \times Z_{i,t} \\ & + \sum_b \sum_h \sum_t GPushb_{b,h} \times WSHDC \times V_{b,t} \\ & + \sum_b \sum_h \sum_t GPushb_{b,h} \times WSHDC \times V_{j,t} + \sum_{h,i,m} \sum_t GPushbi_{h,i,m} \times WSHDC \times V_{i,m,t} \end{aligned} \right] \quad (6)$$

$$\left[\begin{aligned} & \sum_b \sum_h \sum_t GPu_b \times WSHNIC \times X_{b,t} + \sum_j \sum_t GPu_j \times WSHNIC \times Y_{j,t} \\ & + \sum_i \sum_t GPu_i \times WSHNIC \times Y_{i,t} + \sum_i \sum_t GPu_i \times WSHNIC \times Z_{i,t} \\ & + \sum_b \sum_h \sum_t GPushb_{b,h} \times WSHNIC \times V_{b,t} \\ & + \sum_b \sum_h \sum_t GPushb_{b,h} \times WSHNIC \times V_{j,t} + \sum_{h,i,m} \sum_t GPushbi_{h,i,m} \times WSHNIC \times V_{i,m,t} \end{aligned} \right]$$

معادله ۶ (SoF) یک تابع هدف اجتماعی را نشان می دهد که شامل هزینه های حقوق کارکنان در مشاغل مستقیم و غیرمستقیم و القاء شده در سراسر زنجیره تأمین است. از جمله هزینه های کاشت و برداشت زیست توده، انتقال زیست توده و ذخیره انرژی زیستی، تبدیل زیست توده به انرژی زیستی، ظرفیت مازاد و تأثیر اختلال در حوزه اجتماعی است. عامل دیگری که در این تابع هدف ارائه می شود، سلامت و ایمنی کارگر به عنوان یک مؤلفه اجتماعی است که سعی می کنیم ضمن کاهش هزینه های سلامت و ایمنی کارگران، آن را بهبود بخشیم.

معادله ۲، EcoF، تابع هدف اقتصادی (AOC) را نشان می دهد که شامل هزینه های عملیاتی سالانه، هزینه های سرمایه گذاری برای راه اندازی تأسیسات پالایشگاهی، سرمایه گذاری برای راه اندازی مراکز جمع آوری و سرمایه گذاری برای ایجاد ظرفیت اضافی می شود.

$$EcoF = AOC + \frac{Disr(1+Disr)^{PJT}}{(1+Disr)^{PJT} - 1} \left(\sum_k \sum_i \sum_t IS_{k,j,t} \times Y_{i,t} + \sum_{k'} \sum_j \sum_t IS_{k',j,t} \times Y_{j,t} \right) + \sum_k \sum_i \sum_t ISRE_{k,i,t} \times Z_{i,t} \quad (2)$$

معادله ۳، AOC، تابع هدف اقتصادی (AOC) را نشان می دهد که شامل هزینه های عملیاتی سالانه، هزینه های سرمایه گذاری برای راه اندازی تأسیسات پالایشگاهی، سرمایه گذاری برای راه اندازی مراکز جمع آوری و سرمایه گذاری برای ایجاد ظرفیت اضافی می شود.

$$AOC = \sum_b \sum_h \sum_t UCCh_{b,h} \times Ambh_{b,h} + \sum_b \sum_t \left(\sum_h UCtrb_{h,b} \times Ambsh_{h,b} + \sum_j UCtrb_{j,b} \times Ambsh_{j,b} \right) + \sum_{h,i,m} \sum_t UCtrbi_{h,i,m} \times Ambshi_{h,i,m} + \sum_b \sum_t \left(\sum_j UCsb_{j,b} \times Ambsb_{j,b} + \sum_i UCsb_{i,b} \times Ambsb_{i,b} \right) + \sum_b \sum_h \sum_t UCcb_{b,h} \times Ambpr_{b,h} + \sum_i \sum_{h'} \sum_t UCRE_{i,h',t} \times VPRE_{i,h',t} + \lambda_4^* \sum_i \sum_m \sum_t di_{i,m,t} \quad (3)$$

معادله ۳ (AOC) هزینه های عملیاتی سالانه شامل هزینه های مرکز کاشت و برداشت، هزینه های انتقال زیست توده از مراکز کاشت و برداشت به مراکز جمع آوری، هزینه های نگهداری زیست توده در مراکز جمع آوری و پالایشگاه ها را نشان می دهد. هزینه انتقال زیست توده از مرکز جمع آوری به پالایشگاه، هزینه تبدیل زیست توده به انرژی زیستی، هزینه انتقال انرژی از پالایشگاه به مشتری نهایی و هزینه های مرتبط با ظرفیت اضافی و تأثیر اختلال است.

$$EnoF = \sum_b \sum_h \sum_t TEch_{b,h} \times Ambh_{b,h} + \sum_b \sum_t \left(\sum_h TEshb_{h,b} \times Ambsh_{h,b} + \sum_j TEshb_{j,b} \times Ambsh_{j,b} \right) + \sum_{h,i,m} \sum_t TEshbi_{h,i,m} \times Ambshi_{h,i,m} + \sum_b \sum_t \left(\sum_j TEsb_{j,b} \times Y_{j,t} + \sum_i TEsb_{i,b} \times Y_{i,t} \right) + \sum_i \sum_{h'} \sum_t TEco_{i,h',t} \times Y_{i,t} + \sum_i \sum_{h'} \sum_t TERE_{i,h',t} \times Z_{i,t} + \lambda_2^* \sum_i \sum_m \sum_t di_{i,m,t} \quad (4)$$

شده در طراحی، کمتر شده است؛ بنابراین با بروز اختلال ظرفیت کمتری از دست می‌رود.

$$\sum_j Ambsh_{h,j,b,t} = Ambh_{h,b,t} \quad (11)$$

$\forall h \in H, \forall b \in B, \forall t \in T$

در معادله (۱۱)، مقدار زیست‌توده منتقل شده از منطقه برداشت به مراکز جمع‌آوری j محدود به مقدار زیست‌توده برداشت شده است.

$$Amb_{j,b,t} = Amb_{j,b,t-1} + \sum_h Ambsh_{h,j,b,t} - \sum_i Ambsh_{j,i,b,t} \quad (12)$$

$\forall j \in J, \forall b \in B, \forall t \in T$

معادله (۱۲) تعادل موجودی ذخیره زیست‌توده b در مرکز جمع‌آوری j را در دوره زمانی t نشان می‌دهد.

$$Amb_{i,b,t} = Amb_{i,b,t-1} + \sum_j Ambsh_{j,i,b,t} - \sum_k Ambpr_{i,b,k,t} \quad (13)$$

$\forall i \in I, \forall b \in B, \forall t \in T$

معادله (۱۳) تعادل موجودی ذخیره‌سازی زیست‌توده b در پالایشگاه زیستی i را در دوره زمانی t نشان می‌دهد.

$$\sum_{bi} Ambipr_{i,bi,t} = \sum_k \sum_b \beta_{i,b,k} Ambpr_{i,b,k,t} \quad (14)$$

$\forall i \in I, \forall t \in T$

در معادله (۱۴)، مقدار زیست‌توده تبدیل شده در یک پالایشگاه زیستی با فناوری k به انرژی زیستی نشان داده شده است که در آن $\beta_{i,b,k}$ برابر با نرخ تبدیل زیست‌توده b در یک پالایشگاه زیستی با فناوری k است.

$$\sum_{bi} Ambish_{i,m,bi,t} \geq \frac{\alpha_1}{2} d_{i,m,t(2)} + (1 - \frac{\alpha_1}{2}) d_{i,m,t(1)} \quad (15)$$

$\forall i \in I, \forall m \in M, \forall t \in T$

$$\sum_{bi} Ambish_{i,m,bi,t} \leq \frac{\alpha_1}{2} d_{i,m,t(3)} + (1 - \frac{\alpha_1}{2}) d_{i,m,t(4)}$$

$\forall i \in I, \forall m \in M, \forall t \in T$

معادله (۱۵) نشان می‌دهد که تقاضا برای هر کاربر نهایی در هر دوره زمانی برآورده می‌شود.

$$\sum_k Ambpr_{i,b,k,t} \leq \sum_j Ambsh_{j,i,b,t} \quad (16)$$

$\forall i \in I, \forall b \in B, \forall t \in T$

مقدار زیست‌توده تبدیل شده در یک پالایشگاه i با تکنولوژی k در طول دوره t کمتر از مقدار زیست‌توده b انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری j است.

$$Z_i = \sum_h \sum_t \epsilon X_{h,t} + \sum_j \sum_t \epsilon' y_{j,t} + \sum_t \sum_i \epsilon'' y_{i,t} + \sum_h \sum_j \sum_t \beta V_{h,j,t} + \sum_j \sum_i \sum_t \beta V_{j,i,t} + \sum_m \sum_i \sum_t \beta V_{i,m,t} + \sum_h \gamma X_{h,t} + \sum_j \sum_t \gamma' y_{j,t} + \sum_i \sum_t \gamma'' y_{i,t} + \sum_i \sum_b \sum_k \sum_t \tau Ambpr_{i,b,k,t} \quad (7)$$

معادله ۷ به حداقل رساندن عواملی که منجر به عدم تاب‌آوری می‌شود را نشان می‌دهد. تاب‌آوری در گره‌های اصلی (مراکز کاشت و برداشت، مراکز جمع‌آوری و پالایشگاه‌های انرژی زیستی) به حداکثر می‌رسد و کاهش آشفته‌گی و پیچیدگی در جریان‌ها و مکان‌ها منجر به افزایش تاب‌آوری می‌شود. امکان بروز حادثه در تولید با فناوری‌های قدیمی وجود دارد، بنابراین در تابع هدف به حداقل رساندن عدم تاب‌آوری، استفاده از فناوری‌های قدیمی به حداقل می‌رسد و سیستم تولید با سطوح مختلف فناوری تخصیص می‌یابد.

$$DJ = \alpha VA - \beta EBI \quad (8)$$

معادله ۸ نحوه محاسبه تعداد مشاغل مستقیم را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای ناشناخته α و β در یک مدل رگرسیون خطی چندگانه تخمین زده می‌شوند. VA : ارزش افزوده ($VA = EBI - \text{مصرف خارجی}$) قبل از بهره ($VA = EBI$) هزینه‌ها - صورت‌حساب دستمزد)

$$NIndJ_i = LF_i \times PLFhc_i \times \frac{(DJ_i + NIJ_i) \times NPIR_i}{POP_i} \quad (9)$$

معادله ۹ ($NIndJ_i$) تعداد مشاغل ایجادشده را محاسبه می‌کند. به عنوان مثال، تعداد مشاغل ایجادشده در پالایشگاه برابر است با تعداد کارگران شاغل در پالایشگاه ضربدر درصد نیروی کار برای هر خانوار ایرانی شاغل در پالایشگاه ضربدر تعداد کل نیروی کار مستقیم و غیرمستقیم متوسط ایرانیان است؛ و نیروی کار غیرمستقیم، میانگین خانوار ایرانی با حداقل یک نفر نیروی کار تقسیم بر تعداد کل افراد در پالایشگاه i است.

محدودیت‌ها:

$$resilience(i) = \frac{\sum_{bi,t} VPC_{i,bi,t}(t_0 \leq t \leq t_n)}{T \times \sum_{i,bi,t} Z_{i,bi,t}(t(t_0, t_n) \langle t)} \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، متغیر $resilience(i)$ تاب‌آوری زنجیره تأمین زیست‌توده را اندازه‌گیری می‌کند. در این راستا نسبت ظرفیت پالایشگاه در دوره اختلال به ظرفیت پالایشگاه قبل از اختلال به دست آمده است. این عدد بین صفر تا یک است. هر چه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد، تاب‌آوری زنجیره تأمین بالاتر است. به عبارت دیگر، تأثیر اختلال با سیاست‌های در نظر گرفته

ظرفیت اضافی پالایشگاه زیستی i را نشان می‌دهد.

$$\sum_i y_{i,t} = q \quad (25)$$

$\forall t \in T$

q مجموع تمام پالایشگاه‌ها را نشان می‌دهد.

$$\sum_j y_{j,t} = q' \quad (26)$$

$\forall t \in T$

q' مجموع تمام مراکز جمع‌آوری را نشان می‌دهد.

$$VPC_{i,bi,t_0} = VPRC_{i,bi,t_0} + \sum_{t'} VPRE_{i,bi,t',t_0} \quad (27)$$

$\forall i \in I, \forall bi \in BI$

در معادله (۲۷)، $VPRC_{i,bi,t_0}$ نشان‌دهنده مقدار ظرفیت باقی‌مانده پس از وقوع اختلالات در پالایشگاه i در دوره t_0 است. در این معادله، مقدار ظرفیت در ابتدای دوره اختلال برابر است با مجموع ظرفیت باقیمانده پس از اختلال و ظرفیت اضافی.

$$VPRC_{i,bi,t} = 0 \quad (28)$$

$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T, t_0 < t \leq t_n$

$$VPC_{i,bi,t} = VPC_{i,bi,t-1} + VPReC_{i,bi,t} \quad (29)$$

$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T, t_0 < t \leq t_n$

معادله (۲۹)، مقدار ظرفیت در طول دوره اختلال را نشان می‌دهد که با ظرفیت کل پالایشگاه در طول دوره اختلال در زمان $t-1$ و ظرفیت بازیابی شده در طول دوره اختلال محدود می‌شود. $VPReC_{i,bi,t}$ ظرفیت بازیابی شده در طول دوره اختلال را نشان می‌دهد. لحظه شروع اختلال با t_0 و پایان اختلال با t_n نمایش داده می‌شود.

$$VPReC_{i,bi,t_n} \leq VPReCMax_{i,bi,t_n} \quad (30)$$

$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T, t = t_n$

با توجه به معادله (۳۰)، مقدار کل ظرفیت تولید بازیابی شده در t_n باید کمتر از حداکثر مقدار کل باشد.

$$\sum_{bi} VPReC_{i,bi,t} = 0 \quad (31)$$

$\forall i \in I, \forall t \in T, t_0 \leq t \leq t_d$

از آنجا که یک‌فاصله زمانی بین شروع اختلالات و شروع بازیابی وجود دارد، حداکثر مقدار بازیابی ظرفیت تولید همیشه بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود، همان‌طور که در رابطه (۳۱) نشان داده شده است. در مدل پیشنهادی، اختلال از ابتدای دوره t_0 تا پایان دوره t_n رخ می‌دهد و پس‌از آن عملکرد زنجیره تأمین به سطح نرمال خود بازمی‌گردد. باین حال، زنجیره تأمین تنها شروع به بازیابی از اختلالات در دوره زمانی t_d می‌کند. این به این معنی

$$\sum_m Ambish_{i,m,bi,t} \leq Ambipr_{i,bi,t} \quad (17)$$

$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T$

معادله (۱۷) نشان می‌دهد که مقدار انرژی زیستی منتقل شده از پالایشگاه i به مصرف‌کننده نهایی m کمتر از کل انرژی زیستی تولید شده bi در پالایشگاه i است.

$$\sum_h Ambsh_{h,j,bi,t} \leq VPsMax_{j,b} \times y_{j,t} \quad (18)$$

$\forall j \in J, \forall b \in B, \forall t \in T$

در معادله (۱۸) مقدار زیست‌توده منتقل شده از مرکز کاشت و برداشت h باید کمتر از حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی j در طول دوره زمانی t باشد.

$$Ams_{j,b,t} \leq VPsMax_{j,b} \times y_{j,t} \quad (19)$$

$\forall j \in J, \forall b \in B, \forall t \in T$

مقدار زیست‌توده ذخیره‌شده در مرکز جمع‌آوری j در طول زمان t نباید متجاوز از حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی موجود در مرکز جمع‌آوری j باشد.

$$Ams_{i,b,t} \leq VPsMax_{i,b} \times y_{i,t} \quad (20)$$

$\forall i \in I, \forall b \in B, \forall t \in T$

مقدار زیست‌توده ذخیره‌شده در پالایشگاه زیستی i در طول زمان t نباید متجاوز از حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی موجود در پالایشگاه زیستی i باشد.

$$Ambipr_{i,bi,t} \leq VPoMax_{i,bi} \times y_{i,t} \quad (21)$$

$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T$

میزان انرژی زیستی تولید شده در پالایشگاه زیستی i کمتر از حداکثر ظرفیت تولید پالایشگاه زیستی i است.

$$y_{i,t} \leq 1 \quad (22)$$

$\forall i \in I, \forall t \in T$

پالایشگاه بیوانرژی در موقعیت i در دوره t راه‌اندازی و سرویس می‌دهد.

$$y_{j,t} \leq 1 \quad (23)$$

$\forall j \in J, \forall t \in T$

مرکز جمع‌آوری در موقعیت j در دوره t راه‌اندازی و سرویس می‌دهد.

$$Z_{i,t} \leq 1 \quad (24)$$

$\forall i \in I, \forall t \in T$

$$Amb s_{j,b,0} = 0, Amb s_{i,b,0} = 0 \quad (38)$$

$$\forall j \in J, \forall i \in I, \forall b \in B$$

$$Amb h_{b,j} \geq 0, Amb sh_{b,j} \geq 0, Amb sh_{i,b,j} \geq 0, Amb sh_{m,b,j} \geq 0, Amb s_{j,b} \geq 0, Amb s_{i,b} \geq 0, \quad (39)$$

$$Amb s_{j,b-1} \geq 0, Amb s_{i,b-1} \geq 0, Amb pr_{i,b,t} \geq 0, VPC_{i,b,t_0} \geq 0, VPC_{i,b,t} \geq 0,$$

$$VPC_{i,b,t-1} \geq 0, VPC_{i,b,t} \geq 0, VPRE_{i,b,t} \geq 0, VPR ReC_{i,b,t} \geq 0$$

$$0.5(\alpha_1, \alpha_2) \quad (40)$$

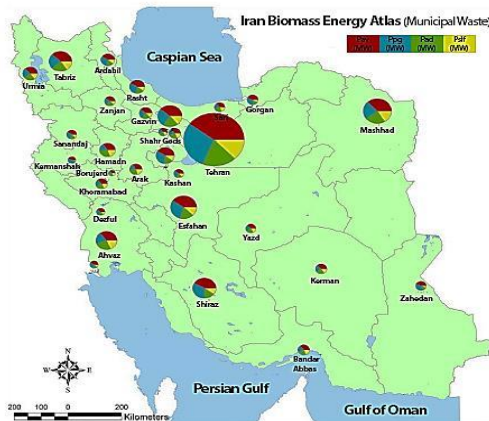
۴- مطالعه موردی: مقدمه‌ای بر سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران (ساتبا)

سازمان بهره‌وری انرژی‌های تجدیدپذیر و برق (ساتبا) با هدف ارتقای بهره‌وری انرژی و استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر و پاک با فراهم آوردن زیرساخت‌های لازم در کشور تأسیس شده است. همچنین افزایش بهره‌وری تأمین انرژی، کاهش اتلاف انرژی در انتقال، توزیع و مصرف در کشور و استفاده از روش‌های تولید برق تجدیدپذیر و پاک را هدف قرار داده است.

این سازمان با فراخوانی بخش خصوصی و حمایت از مشارکت آن، سیاست‌های تشویقی را برای حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان تدوین کرده و بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح صنعتی و اجرای وظایف دولت برای تحقق اهداف خود تمرکز کرده است.

توسعه تولید انرژی زیستی از منابع زیست‌توده یک نیاز حیاتی برای شناخت راه‌های دسترسی به منابع مختلف در مناطق انباشت منابع ایران و همچنین شناسایی فناوری‌های مختلف و الزامات فنی و اجرایی است.

اطلس سنجش پتانسیل و ارزیابی منابع برای هر استان بالقوه از نظر تنوع منابع و فناوری در زمینه زیست‌توده در پسماندهای شهری در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل (۱). اطلس انرژی زیست‌توده ایران (پسماندهای شهری)

است که زمانی که اختلالات رخ می‌دهند یک تأخیر زمانی بین t_0 تا t_1 وجود دارد.

$$VPC_{i,bi,t} \leq Ambipr_{i,bi,t} \quad (32)$$

$$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T, t_0 \leq t \leq t_n$$

مجموع ظرفیت کاری برای تمام پالایشگاه‌ها در طول دوره اختلال کمتر از ظرفیت تولید است که در معادله (۳۲) نشان داده شده است.

$$VPRC_{i,bi,t_0} = Max \{0, Ambipr_{i,bi,t} - di_{i,bi,t_0}\} \quad (33)$$

$$\forall i \in I, \forall bi \in BI, t \in T$$

پیش‌بینی و ارزیابی تأثیر اختلالات روی پالایشگاه i قبل از وقوع اختلال در عمل چالش برانگیز است؛ بنابراین، از ظرفیت تولید باقیمانده $VPRC_{i,bi,t_0}$ پس از اختلالات در پالایشگاه i برای ارزیابی تأثیر اختلالات بر پالایشگاه استفاده شده است. با افزایش di_{i,bi,t_0} ، $VPRC_{i,bi,t_0}$ کاهش می‌یابد، به این معنی که اختلالات شدید منجر به ظرفیت تولید باقی‌مانده کمتر می‌شود.

$$\sum_{i,bi} VPRC_{i,bi,t} \geq 0 \quad (34)$$

$$\forall t \in T$$

$$VPRC_{i,bi,t} \leq Ambipr_{i,bi,t} \quad (35)$$

$$\forall i \in I, \forall bi \in BI, \forall t \in T$$

مقدار ظرفیت باقی‌مانده پس از وقوع اختلالات در حد بالایی کمتر از ظرفیت تولید است که در رابطه (۳۵) نشان داده شده است. ارزیابی $VPRC_{i,bi,t}$ مهم است و برای بهبود محاسبه اختلال جهت حمایت از تصمیم‌گیری در تقاضای مشتری استفاده می‌شود. کل ظرفیت تولید باقی‌مانده پس از بروز اختلالات نسبت به کل تقاضای مشتری در زیر نشان داده شده است.

$$\sum_{bi} VPRC_{i,bi,t_0} \geq \eta \sum_m \left(\frac{\alpha_2}{2} d_{i,m,t_0(2)} + (1 - \frac{\alpha_2}{2}) d_{i,m,t_0(1)} \right) \quad (36)$$

$$\forall i \in I, \forall t = t_0$$

این رابطه نشان می‌دهد که در صورت اختلال، بخشی از عملکرد زنجیره تأمین تضمین شده است؛ یعنی تقاضا تحت هر شرایطی برآورده می‌شود. η یک پارامتر غیر منفی از پیش تعیین‌شده را نشان می‌دهد که می‌تواند تخمین‌های تصمیم‌گیرنده را در زمان اختلال نمایش دهد.

$$Z_{i,bi,t} = Ambipr_{i,bi,t} \times y_{i,t}$$

$$Z_{i,bi,t} \geq Ambipr_{i,bi,t} - M(1 - y_{i,t})$$

$$Z_{i,bi,t} \leq Ambipr_{i,bi,t} + M(1 - y_{i,t}) \quad (37)$$

$$Z_{i,bi,t} \leq My_{i,t}$$

۴-۱- منبع پسماندهای جامد شهری

زیستی تولید شده (برق) در پالایشگاه و برق انتقال یافته به مشتری نهایی در سه پالایشگاه با ظرفیت های فوق در پنج دوره را نشان می دهد.

جداول ۳-۶ میزان ظرفیت مزاد، ظرفیت باقیمانده و ظرفیت بازیابی شده پالایشگاه پس از ایجاد اختلال و تأثیر اختلال بر روی پالایشگاه زیستی زباله سوز با ظرفیت ۶۰۰، ۸۰۰ و گازی سازی ۴۵۰ تن در روز را نشان می دهد. در مدل پیشنهادی، اختلالات در ابتدای دوره t_0 شروع و در پایان دوره t_1 رخ می دهند و پس از آن عملکرد زنجیره تأمین به سطح نرمال خود بازمی گردد. با این حال، زنجیره تأمین تنها زمانی شروع به بازیابی از اختلالات می کند که در دوره زمانی t_1 باشد. این به این معنی است که تأخیر زمانی بین t_0 تا t_1 که شروع بازیابی است وجود دارد.

جدول (۲). مجموع هزینه های سرمایه گذاری اولیه و میزان تولید انرژی زیست توده در کارخانه زباله سوز

Description		Production (KWh)	Initial investment costs (USD)
Waste incinerator	۶۰۰ t/d	۲۱۹ kt/y	۳۵,۲۳۵,۰۳۷
	۸۰۰ t/d	۲۹۲ kt/y	۴۳,۷۹۹,۴۵۱
Gas maker	۴۵۰ t/d	۱۶۴ kt/y	۲۸,۹۷۰,۶۰۰

جدول (۳). مقدار زیست توده تبدیل شده به بیوانرژی و بیوانرژی تولید شده و بیوانرژی منتقل شده به مشتری نهایی در پنج دوره زمانی

Description	Period					
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	
	1	2	3	4	5	
$Ambpr_{i,b,k,t}(t/y)$	$Ambpr_{1,1,t}$	۵۶,۹۴۰	۲۱۹,۰۰۰	۲۱۹,۰۰۰	۲۱۹,۰۰۰	۲۱۹,۰۰۰
	$Ambpr_{2,1,t}$	۷۵,۶۶۰	۲۹۱,۰۰۰	۲۹۱,۰۰۰	۲۹۱,۰۰۰	۲۹۱,۰۰۰
	$Ambpr_{3,1,t}$	۵۵,۶۶۸	۱۶۵,۰۰۰	۱۶۵,۰۰۰	۱۶۵,۰۰۰	۱۶۵,۰۰۰
$Ambpr_{i,b,t}(kwh)$	$Ambpr_{1,1,t}$	۱۵۶,۰۰۰,۰۰۰	۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰
	$Ambpr_{2,1,t}$	۲۱۲,۱۶۰,۰۰۰	۸۱,۶۰۰,۰۰۰	۸۱,۶۰۰,۰۰۰	۸۱,۶۰۰,۰۰۰	۸۱,۶۰۰,۰۰۰
	$Ambpr_{3,1,t}$	۲۲۶,۷۲۰,۰۰۰	۶۷,۲۰۰,۰۰۰	۶۷,۲۰۰,۰۰۰	۶۷,۲۰۰,۰۰۰	۶۷,۲۰۰,۰۰۰
$Ambish_{i,m,b,t}(kwh)$	$Ambish_{1,1,t}$					
	$Ambish_{2,1,t}$	۵,۲۰۰,۰۰۰	۵,۲۰۰,۰۰۰	۵,۲۰۰,۰۰۰	۵,۲۰۰,۰۰۰	۵,۲۰۰,۰۰۰
	$Ambish_{3,1,t}$					
	$Ambish_{2,2,t}$					
	$Ambish_{2,2,t}$	۷,۰۷۲,۰۰۰	۷,۰۷۲,۰۰۰	۷,۰۷۲,۰۰۰	۷,۰۷۲,۰۰۰	۷,۰۷۲,۰۰۰
	$Ambish_{2,3,t}$					
	$Ambish_{3,1,t}$					
	$Ambish_{3,2,t}$	۷,۵۵۷,۳۳۳	۷,۵۵۷,۳۳۳	۷,۵۵۷,۳۳۳	۷,۵۵۷,۳۳۳	۷,۵۵۷,۳۳۳
$Ambish_{3,3,t}$						

پروژه پتانسیومتری و امکان سنجی بهره برداری انرژی از پسماندهای جامد شهری و احداث نیروگاه ۱۰ مگاواتی با سوخت پسماند شهری در پایان سال ۱۳۸۵ برای انجام مطالعه جامع و کامل بر اساس آخرین فناوری ها و توسعه توسط وزارت نیرو یا مدیریت سازمان انرژی های تجدیدپذیر ایران آغاز شد. علاوه بر انجام تحقیقات میدانی و جمع آوری اطلاعات در مورد نحوه دفع زباله در محل های دفن زباله و تجزیه و تحلیل اطلاعات، پتانسیل انرژی در برابر بهره برداری نظری و عملی تحت فناوری های مختلف سنجیده شده است. بر این اساس، فناوری های مناسب برای بهره برداری از انرژی از پسماندها شناسایی شده است تا با توجه به شرایط موجود در ایران، روشی مناسب و قابل اعتماد ارائه شود. پتانسیل تولید اولیه در ۲۹ شهر با در نظر گرفتن فناوری های مختلف اندازه گیری شده است. در نهایت جدول اولویت ها برای انجام فرآیند طراحی کامل و ارائه اطلس پتانسیومتری توسط مشاوران تهیه شده است. سیاست های دفن زباله و مکان های جغرافیایی انتخاب شده برای احداث نیروگاه های سوزاندن و دفن زباله و نیروگاه های بیوگاز (هاضم بی هوازی) با ارائه گزارش ارزیابی زیست محیطی ویژه بر اساس ضوابط و مقررات سازمان حفاظت محیط زیست، مجوزهای لازم برای مکان یابی سایت ها را دریافت کرده اند. تجربیات موفق در انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی در نیروگاه های زیست توده در ایران عبارتند از: ۱- سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری مشهد ۲- گروه صنعتی آریا سابقین پاور ۳- تیم بازیافت کیان - سازمان مدیریت پسماند تهران ۴- شرکت آب و فاضلاب تهران ۵- شرکت طرح توسعه سلامت

در این تحقیق یک مطالعه موردی در سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی (ساتبا) ایران انجام شده است. منبع پسماند جامد شهری، زیست توده در نظر گرفته شده و تولید برق به عنوان انرژی زیستی در نظر گرفته شده است. نتایج زیر بر اساس مدل پیشنهادی و ورودی های مدل ارائه شده است.

۵- آزمایش های محاسباتی

یک آزمایش عددی برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل ریاضی در "GAMS" 24.1.0 کدگذاری و پیاده سازی شده است. یک نیروگاه زباله سوز با ظرفیت ۸۰۰ تن در روز، یک نیروگاه گازی سازی با ظرفیت ۶۰۰ تن در روز و یک کارخانه هاضم بی هوازی با ظرفیت ۴۵۰ تن در روز برای ساده سازی سه استان ساحلی شمالی در نظر گرفته شده است. جداول ۲-۷ داده های مربوطه را ارائه می دهند. عملکرد مدل پیشنهادی برای پنج دوره ارائه شده است. جدول ۴ میزان زیست توده تبدیل شده به بیوانرژی با فناوری k ، میزان انرژی

جدول (۷) کل هزینه‌ها (هزینه‌های اقتصادی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های زیست‌محیطی، هزینه‌های اجتماعی و هزینه‌های عدم تاب‌آوری) و سود تولید برق را در پنج دوره زمانی نشان می‌دهد. جدول زیر میزان تاب‌آوری در سه پالایشگاهی را که تحت تأثیر این اختلال قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری آن، نسبت ظرفیت بعد از اختلال به ظرفیت قبل از اختلال به دست می‌آید.

درجه تاب‌آوری بین صفر و یک است، هر چه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد، سیستم تاب‌آورتر خواهد بود. مشاهده می‌شود که اتخاذ سیاست‌های مناسب از جمله در نظر گرفتن ظرفیت اضافی، زمان اختلال و به حداقل رساندن عوامل عدم تاب‌آوری و ... باعث افزایش تاب‌آوری در مدل پیشنهادی شده است. بالاترین تاب‌آوری در پالایشگاه ۱ است. در نهایت، تقاضای انرژی زیستی سه مشتری نهایی نشان داده شده است.

۶- تحلیل حساسیت

تجزیه و تحلیل حساسیت با توجه به تغییرات مختلف در محدوده پارامترهای مدل پیشنهادی برای بررسی تأثیر چند پارامتر بر مدل ریاضی پیشنهادی نشان داده شده است؛ بنابراین عاملی مانند اثر اختلال و ظرفیت باقیمانده پس از وقوع اختلال ارائه شده است.

۶-۱- تغییر مقادیر $di_{i,bi,t}$

جدول ۸ و شکل‌های (الف، ب، ج) نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت را برحسب مقادیر مختلف $VPRC_{i,bi,t}$ نشان می‌دهد. علاوه بر این، حساسیت $VPRC_{i,bi,t}$ با متغیر $di_{i,bi,t}$ در پالایشگاه‌های ۱، ۲ و ۳ مقایسه شده است. با توجه به این تحلیل، می‌توان دریافت که با افزایش تأثیر اختلال $di_{i,bi,t}$ ، مقدار ظرفیت باقی‌مانده ($VPRC_{i,bi,t}$) کاهش می‌یابد؛ بنابراین، نتایج به دست آمده رویکرد مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند. با کاهش اختلال، ظرفیت باقی‌مانده افزایش می‌یابد، که در شکل‌های ۲.a، ۲.b و ۲.c نشان داده شده است. با توجه به طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور زیست‌توده با سیاست‌گذاری‌های مناسب، تأثیر اختلال به حداقل می‌رسد.

جدول (۴). میزان ظرفیت مازاد و باقیمانده بازیافت شده و ظرفیت پالایشگاه پس از وقوع اختلال و تأثیر اختلال در پالایشگاه زیستی زباله‌سوز با ظرفیت ۶۰۰ تن در روز

Waste incinerator by Capacity 600 t/d (219 kt/y)			
Description	Period		
	t_0	t_a	t_n
	2	3	4
$VPRE_{1,1,t} (kwh)$	۲۰۰۰,۰۰۰	-	-
$VPRC_{1,t} (kwh)$	۴۸,۰۰۰,۰۰۰	-	-
$VPC_{1,t} (kwh)$	۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰
$VPRC_{1,t} (kwh)$	-	-	۱۰,۰۰۰,۰۰۰
$di_{1,t} (kwh)$	۱۲,۰۰۰,۰۰۰	-	-

جدول (۵). میزان ظرفیت مازاد و باقیمانده بازیافت شده و ظرفیت پالایشگاه پس از وقوع اختلال و تأثیر اختلال در پالایشگاه زیستی زباله‌سوز با ظرفیت ۸۰۰ تن در روز

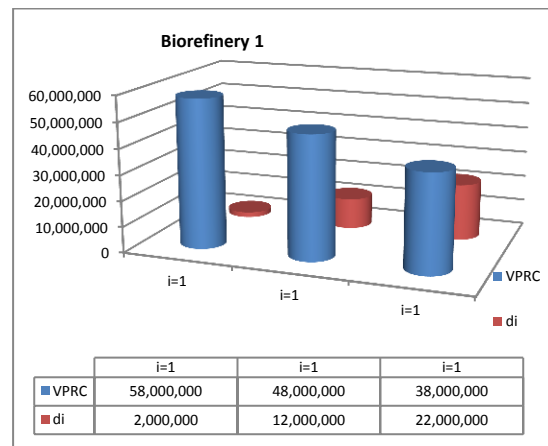
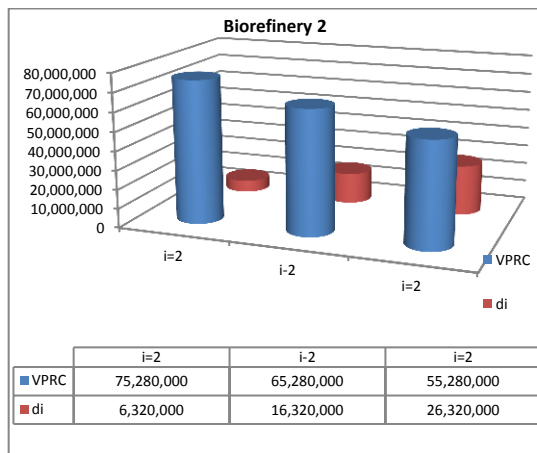
Waste incinerator by Capacity 800 t/d (292 kt/y)			
Description	Period		
	t_0	t_a	t_n
	2	3	4
$VPRE_{2,1,t} (kwh)$	۱۰۰۰,۰۰۰	-	-
$VPRC_{2,t} (kwh)$	۶۵,۲۸۰,۰۰۰	-	-
$VPC_{2,t} (kwh)$	۶۶,۲۸۰,۰۰۰	۶۶,۲۸۰,۰۰۰	۸۱,۶۰۰,۰۰۰
$VPRC_{2,t} (kwh)$	-	-	۱۵,۳۲۰,۰۰۰
$di_{2,t} (kwh)$	۱۶,۳۲۰,۰۰۰	-	-

جدول (۶). میزان ظرفیت مازاد و باقیمانده بازیافت شده و ظرفیت پالایشگاه پس از وقوع اختلال و تأثیر اختلال در پالایشگاه زیستی زباله‌سوز با ظرفیت ۴۵۰ تن در روز

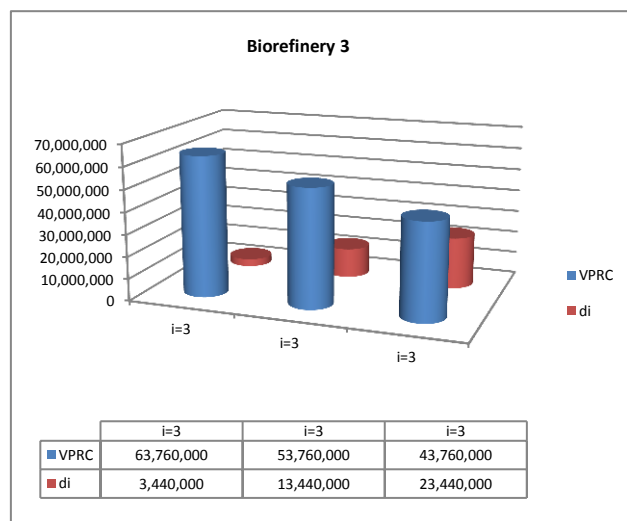
Gas maker by Capacity 450 t/d (164 kt/y)			
Description	Period		
	t_0	t_0	t_0
	2	3	4
$VPRE_{3,1,t} (kwh)$	۱۰۰۰,۰۰۰	-	-
$VPRC_{3,t} (kwh)$	۵۳,۷۶۰,۰۰۰	-	-
$VPC_{3,t} (kwh)$	۵۴,۷۶۰,۰۰۰	۵,۴۷۶۰,۰۰۰	۶۷,۲۰۰,۰۰۰
$VPRC_{3,t} (kwh)$	-	-	۱۲,۴۴۰,۰۰۰
$di_{3,t} (kwh)$	۱۳,۴۴۰,۰۰۰	-	-

جدول (۸). نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت برحسب مقادیر مختلف $di_{i,bi,t}$

Description	$VPRC_{i,bi,t}$ (kwh)	$di_{i,bi,t}$ (kwh)
$i=1$	۵۸,۰۰۰,۰۰۰	۲,۰۰۰,۰۰۰
$i=2$	۷۵,۲۸۰,۰۰۰	۶,۳۲۰,۰۰۰
$i=3$	۶۳,۷۶۰,۰۰۰	۳,۴۴۰,۰۰۰
$i=1$	۴۸,۰۰۰,۰۰۰	۱۲,۰۰۰,۰۰۰
$i=2$	۶۵,۲۸۰,۰۰۰	۱۶,۳۲۰,۰۰۰
$i=3$	۵۳,۷۶۰,۰۰۰	۱۳,۴۴۰,۰۰۰
$i=1$	۳۸,۰۰۰,۰۰۰	۲۲,۰۰۰,۰۰۰
$i=2$	۵۵,۲۸۰,۰۰۰	۲۶,۳۲۰,۰۰۰
$i=3$	۴۳,۷۶۰,۰۰۰	۲۳,۴۴۰,۰۰۰



شکل ۲. الف: حساسیت $VPRC_{i,bi,t}$ با متغیر $di_{i,bi,t}$ در پالایشگاه زیستی ۱ | شکل ۲. ب: حساسیت $VPRC_{i,bi,t}$ با متغیر $di_{i,bi,t}$ در پالایشگاه زیستی ۲



شکل ۲. ج: حساسیت $VPRC_{i,bi,t}$ با متغیر $di_{i,bi,t}$ در پالایشگاه زیستی ۳، ۲، ۱

جدول (۷). هزینه‌های تولید برق، سود تولید برق و تقاضای زیست انرژی در زنجیره تأمین زیست‌توده در پنج دوره زمانی

Description			
Electricity production costs	<i>AOCC</i> (Economic cost)	Dollars (USD)	۷,۵۱۷,۵۲۱,۱۰۶
	<i>ecoff</i> (Economic costs and Investment costs)		۷,۵۷۲,۳۳۴,۹۸۷
	<i>enoff</i> (Environmental costs)		۱,۷۵۳,۴۶۰,۱۲۸
	<i>soff</i> (Social costs)		۱۲۳,۰۹۳,۰۰۰
	Z_1 (inresilience costs)		۲,۹۳۳,۲۶۸
Electricity production profit	z		۱۸,۴۰۶,۸۰۰,۰۰۰
Resilience	$resilience_i$	$resilience_1$	۰.۸۸۹
		$resilience_2$	۰.۸۷۵
		$resilience_3$	۰.۸۷۷
Bioenergy demand	$\tilde{d}_{i,m,t}$	$d_{1,m,t}$ (kwh)	(5200000, 4000000, 5800000, 5000000)
		$d_{2,m,t}$ (kwh)	(7072000, 5440000, 7888000, 6800000)
		$d_{3,m,t}$ (kwh)	(7557333.34, 5813333.34, 8429333.34, 7266666.68)

تاب‌آوری در زنجیره تأمین زیست‌توده، تأثیر اختلال در پالایشگاه دوم بیشتر است، هرچند تاب‌آوری آن نسبت به پالایشگاه‌های دیگر بسیار کم است. تاب‌آوری همیشه عددی بین صفر و یک است که با توجه به نکات ذکر شده برای تاب‌آوری در هر سه پالایشگاه (۰/۸۸۹، ۰/۸۷۵ و ۰/۸۷۷) مطلوب است.

۲-۶- تغییر $resilience_i$ به $di_{i,bi,t}$

تغییرات تاب‌آوری در برابر تأثیر اختلال در سه پالایشگاه در جدول (۹) و شکل (۳) نشان داده شده است.

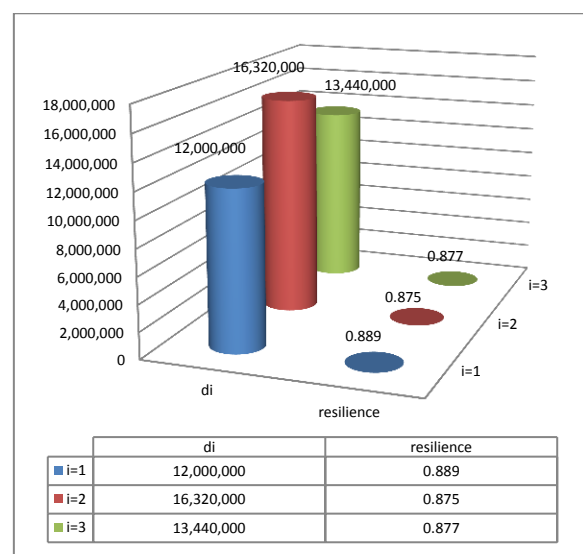
با توجه به اتخاذ سیاست‌های مناسب از جمله محدودیت زمانی اختلال و ظرفیت اضافی برای افزایش

جدول (۹). نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت $resilience_i$ با متغیر $di_{i,bi,t}$ در پالایشگاه ۲،۲،۱

Description		biorefinery	Production (KWh)	$di_{i,bi,t}$ (kwh)	$resilience_i$	
Waste incinerator	۶۰۰ t/d	۲۱۹ kt/y	$i=1$	۶۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۲,۰۰۰,۰۰۰	۰/۸۸۹
	۸۰۰ t/d	۲۹۲ kt/y	$i=2$	۸۱,۶۰۰,۰۰۰	۱۶,۳۲۰,۰۰۰	۰/۸۷۵
Gas maker	۴۵۰ t/d	۱۶۴ kt/y	$i=3$	۶۷,۲۰۰,۰۰۰	۱۳,۴۴۰,۰۰۰	۰/۸۷۷

۷- نتیجه‌گیری

تحقیقات نشان می‌دهد که توجه هم‌زمان به مسائل تاب‌آوری و پایداری در ارتقای پایداری و رقابت‌پذیری زنجیره تأمین حائز اهمیت است؛ بنابراین، در این مقاله، یک شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده تاب‌آور و پایدار با روش بهینه‌سازی مبتنی بر عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی و اختلال در پالایشگاه انرژی زیستی طراحی شده است. ارزیابی زنجیره‌های بزرگ و پیچیده نیازمند یک رویکرد یکپارچه است؛ بنابراین در این مقاله مکان‌های کاشت و برداشت، مراکز جمع‌آوری، پالایشگاه‌های انرژی زیستی و مشتریان نهایی در نظر گرفته شد. سپس با تعیین عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری در زنجیره تأمین زیست‌توده، رابطه بین عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری تعیین شد. در مرحله بعد، عوامل تاب‌آوری در زنجیره تأمین

شکل (۳). حساسیت $resilience_i$ با متغیر $di_{i,bi,t}$ در پالایشگاه ۲،۲،۱

به مشتریان نهایی را مختل می‌کنند. حوادثی مانند تأخیر در تحویل، موجودی مازاد، پیش‌بینی ضعیف، افزایش قیمت، تجهیزات و ماشین‌آلات قدیمی خط تولید، مشکلات تجاری، کمبود مواد اولیه، خطای انسانی، مشکلات سیستم اطلاعاتی، زلزله، طوفان، جنگ، حملات تروریستی، شیوع بیماری و غیره می‌تواند بر هزینه‌ها و درآمدهای زنجیره تأمین تأثیر بگذارد. زنجیره تأمین باید به گونه‌ای طراحی شود که با چنین اختلالاتی مقابله کند و به‌طور مؤثر به آن‌ها پاسخ دهد. علاوه بر این، چنین زنجیره تأمین باید بتواند از اختلال به شرایط عادی بازگردد. این دلیل اهمیت تاب‌آوری در زنجیره تأمین است. پارامترهای فوق‌را می‌توان در مطالعات آتی در نظر گرفت. در این مقاله نشان داده شده است که اختلالات می‌تواند تأثیر مستقیمی بر ظرفیت تولید داشته باشد (محدودیت (۳۳)). با افزایش اختلالات، ظرفیت تولید باقیمانده کاهش می‌یابد و بالعکس. برای رسیدگی به اختلالات در این مقاله، سیاست‌های مناسبی مانند ظرفیت اضافی در پالایشگاه انرژی زیستی و دوره اختلال ارائه شد. (در مدل پیشنهادی، اختلالات در دوره t_0 تا t_n رخ می‌دهد. سپس عملکرد زنجیره تأمین به حالت عادی خود بازمی‌گردد. با این وجود، زنجیره تأمین تنها زمانی شروع به بازیابی از اختلالات می‌کند که در دوره t_0 باشد. این بدان معنی است که یک تأخیر زمانی بین t_0 و t_d در زمان اختلال وجود دارد). علاوه بر این، عوامل دیگری مانند گره‌های بحرانی، آشفتگی و پیچیدگی در جریان‌ها و مکان‌ها و تولید انرژی زیستی نیز وجود دارد. عواملی که تاب‌آوری را کاهش می‌دهند در تابع هدف Z_1 به حداقل می‌رسند.

در این مقاله، نسل دوم زیست‌توده (محصولات غیرخوراکی) برای تولید انرژی زیستی در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی یک مدل زنجیره تأمین زیست‌توده جامع است. در این مطالعه موردی، پسماندهای شهری برای تولید برق استفاده شده است. بر اساس مطالعات فنی و اقتصادی ساخت نیروگاه‌های پسماند در سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق ایران (ساتبا)، مدل پیشنهادی در تولید انرژی زیستی از ضایعات زیست‌توده جنگی، محصولات زراعی، دام و ... نیز کاربرد دارد.

در مرحله بعدی، نتایج حل مدل‌های GAMS برای ارائه کاربرد مدل پیشنهادی ارائه شد. در نهایت، تجزیه و تحلیل حساسیت برای بررسی تغییرات ظرفیت باقی‌مانده و تاب‌آوری با تغییر برخی پارامترها انجام شد. مدل پیشنهادی مقادیر بهینه توابع هدف ۱ را در آزمایش‌های محاسباتی تعیین می‌کند. نتایج نشان‌دهنده کارایی ارزشمند مدل پیشنهادی در افزایش عملکرد زنجیره تأمین زیست‌توده است.

زیست‌توده با روش تحلیل تصمیم چندمعیاره (روش تاپسیس فازی) اولویت‌بندی شدند. در نهایت عوامل تاب‌آوری که از اولویت بیشتری برخوردار بودند در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شدند. در این تحقیق در تابع هدف، سود به حداکثر و هزینه‌ها به حداقل رسیدند. اولین محدودیت برای اندازه‌گیری تاب‌آوری ارائه شد که با در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌ها و سیاست‌های مناسب، ظرفیت تولید قبل و بعد از وقوع اختلالات را به‌عنوان معیاری برای سنجش تاب‌آوری معرفی شد. هرچه زنجیره تأمین تاب‌آورتر باشد، این عدد به عدد یک نزدیک‌تر است و تأثیر اختلالات ناچیزتر است.

با تعیین عوامل و خط‌مشی تاب‌آوری در زنجیره تأمین، با وجود اختلال در پالایشگاه انرژی زیستی، تاب‌آوری زنجیره تأمین افزایش می‌یابد. نتایج در جدول ۹ و شکل ۳ نشان داده شده است. شاخص‌های پایداری (اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) منجر به افزایش سود، کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین، افزایش فرصت‌های شغلی، تقویت توسعه منطقه‌ای و تأمین ایمنی کارگران و ... می‌شود.

علاوه بر این، وجود منابع مختلف عدم قطعیت بر مسائل هدف‌گذاری در برنامه‌ریزی و طراحی زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد که همواره یکی از چالش‌های مهم در طراحی و برنامه‌ریزی بلندمدت زنجیره‌های تأمین انرژی زیستی است. برخی از پارامترهای مدل‌های زنجیره تأمین انرژی زیستی عدم قطعیت را نشان می‌دهند، از جمله عرضه زیست‌توده، تقاضای بیوانرژی، تولید، حمل‌ونقل، عملیات، قیمت‌های انرژی زیستی، هزینه‌های مواد خام و هزینه‌های زیست‌توده، شرایط آب و هوایی غیرقابل پیش‌بینی و وضعیت اقتصادهای ناپایدار منجر به تغییر در سیاست‌ها و مقررات مربوط به سوخت‌های زیستی، فناوری‌های تبدیل زیست‌توده به انرژی زیستی و فناوری‌های ذخیره‌سازی زیست‌توده و انرژی زیستی می‌شوند. این پارامترها نقش کلیدی در طراحی شبکه زنجیره تأمین انرژی زیستی دارند و در نظر گرفتن هم‌زمان آن‌ها محاسبه آن‌ها را دشوار می‌کند. پارامترهای فوق‌را می‌توان در مطالعات آتی در نظر گرفت. در این تحقیق ضمن طراحی مدل شبکه زنجیره تأمین انرژی زیستی، تقاضا برای انرژی زیستی به دلیل شرایط نامشخص در واقعیت، مهم‌ترین پارامتر نامشخص در نظر گرفته شد. از رویکرد روبااست برای کنترل عدم قطعیت تقاضای انرژی زیستی استفاده شد.

از طرف دیگر، برای هر فعالیتی که توسط یک زنجیره تأمین انجام می‌شود یک ریسک ذاتی وجود دارد که ممکن است باعث اختلال شود. ریسک‌ها در هر حادثه‌ای بر زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارند و جریان برنامه‌ریزی شده مواد از تأمین‌کنندگان اولیه

- [11] R. Kumar and et al., Emerging approaches in lignocellulosic biomass pretreatment and an aerobic bioprocesses for sustainable biofuels production, *J. Clean. Prod.*, Vol. 333, 130180, 2021.
- [12] M. Saghaei, H. Ghaderi and H. Soleimani, Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand, *ENERGY*, Vol. 197, 117165, 2020.
- [13] M. Fattahi, K. Govindan and R. Maihami, Stochastic optimization of disruption-driven supply chain network design with a new resilience metric, *INT J PROD ECON*, Vol. 230, 107755, 2020.
- [14] M. S. Golan, L. H. Jernegan and I. Linkov, Trends and applications of resilience analytics in supply chain modeling: systematic literature review in the context of the COVID-19 pandemic, *Environment Systems and Decisions*, Vol. 40, 222-243, 2020.
- [15] Y. G. Durmaz and B. Bilgen, Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design, *APPL ENERG*, Vol. 272, 115259, 2020.
- [16] S. N. Emenike and G. Falcone, A review on energy supply chain resilience through optimization, *RENEW SUST ENERG REV*, Vol. 134, 110088, 2020.
- [17] P. Mousavi Ahranjani, S. F. Ghaderi, A. Azadeh and R. Babazadeh, Robust design of a sustainable and resilient bioethanol supply chain under operational and disruption risks, *CLEAN TECHNOL ENVIR*, Vol. 22, pp. 119-151, 2020.
- [18] S. L. Ngan, et al., A hybrid approach to prioritize risk mitigation strategies for biomass polygeneration systems, *RENEW SUST ENERG REV*, Vol. 121, 109679, 2020.
- [19] V. Abbaszade Narmighi and et al., "Design and optimization of a waste management model in the sustainable supply chain in mining," *Scientific Journal of Supply Chain Management*, Imam Hossein University, Vol. 22, 67-82, 2020, (In Persian.)
- [20] F. Derakhshi Khajeh, and Y. Jabarzadeh, "Developing a causal model of factors influencing supply chain resilience," *Scientific Journal of Supply Chain Management*, Imam Hossein University, Vol. 22, 56-73, 2020 (In Persian.)
- [21] C. Ma, Y. Duan, X. Ju and F. WS-S. Xu, "Evaluation Based on User Preferences and Ranking Mechanism," *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, doi:10.1109/cyber, 58, 2013.
- [22] M. M. Paydar and M. Saidi-Mehrabad, Revised multi-choice goal programming for integrated supply chain design and dynamic virtual cell formation with fuzzy parameters, *INT J COMP INTEG M*, Vol. 28, pp. 251-265, 2015.
- [23] M. S. Pishvae, J. Razmi and S. A. Torabi, Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach, *FUZZY SET SYST*, Vol. 206, pp. 1-20, 2012.
- [24] M. Mousazadeh, S. A. Torabi and B. Zahiri, A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design, *COMPUT CHEM ENG*, Vol. 82, pp. 115-128, 2015.

در نهایت، به عنوان پیشنهادی برای مطالعات آتی، تحقیق در مورد تغییرات در میزان تاب آوری را که ممکن است با افزودن عوامل تاب آوری بیشتر به زنجیره تأمین رخ دهد، توصیه می‌گردد. همچنین بررسی تأثیر اختلال بر شاخص‌های پایداری به عنوان شکاف جهت مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد. همچنین علاوه بر خط‌مشی مناسب مانند ظرفیت مازاد و محدودده زمان اختلال که در این مقاله ارائه شد، چه پارامترهای دیگری را می‌توان جهت افزایش تاب آوری در نظر گرفت که این موضوع نیز به عنوان شکاف تحقیقاتی معرفی می‌گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود بررسی شود که آیا معیارهای دیگری جزو مواردی که در این مقاله اشاره شد برای سنجش تاب آوری وجود دارند.

۸- مراجع

- [1] H. Ghaderi, MS. Pishvae and A. Moini, "Biomass supply chain network design: an optimization-oriented review and analysis," *Ind Crop Prod*, Vol. 94, pp. 972-1000, 2016.
- [2] M. Ebadian, "Design and Scheduling of Agricultural Biomass Supply Chain for a Cellulosic Ethanol Plant," Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2013.
- [3] D. Yue, F. You and S. W. Snyder, "Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges," *Comput Chem Eng*, Vol. 66, pp. 36-56, 2014.
- [4] M. Fattahi, K. Govindan and M. Farhadkhani, Sustainable supply chain planning for biomass-based power generation with environmental risk and supply uncertainty considerations: a real-life case study, *Int J Prod Res*, Vol. 59, Issue 10, pp. 3084-3108, 2021.
- [5] R. D. Tordecilla, A. A. Juan, J. R. Montoya-Torres, C. L. Quintero-Araujo and J. Panadero, Simulation-optimization methods for designing and assessing resilient supply chain networks under uncertainty scenarios: A review, *SIMULAT PRACT THEORY*, Vol. 106, 102166, 2021.
- [6] H. Khezerlou, B. Vahdani and M. Yazdani, Designing a resilient and reliable biomass-to-biofuel supply chain under risk pooling and congestion effects and fleet management, *J. Clean. Prod*, Vol. 281, 125101, 2021.
- [7] L. Jayarathna, G. Kent and I. O'Hara, Spatial optimization of multiple biomass utilization for large-scale bioelectricity generation, *J. Clean. Prod*, Vol. 319, 128625, 2021.
- [8] H. Moheb-Alizadeh, R. Handfield and D. Warsing, Efficient and sustainable closed-loop supply chain network design: A two-stage stochastic formulation with a hybrid solution methodology, *J. Clean. Prod*, Vol. 308, 127323, 2021.
- [9] R. Aldrighetti, D. Battini, D. Ivanov and I. Zennaro, Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: a review and future research directions, *INT J PROD ECON*, Vol. 235, 108103, 2021.
- [10] S. Khishtandar, Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design, *APPL ENERG*, Vol. 236, pp. 183-195, 2019.

پیوست

۱- تعریف نمادهای مدل پیشنهادی

نمادها، شامل اختصارات، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری در بخش‌های زیر ارائه می‌شوند:

۱-۱- اختصارات

<i>Nec</i>	ضروری است	EcoF	تابع هدف اقتصادی
EBI	سود قبل از بهره	EnoF	تابع هدف محیطی
VA	ارزش افزوده	SoF	تابع هدف اجتماعی ایجاد شغل و سلامت و ایمنی کارگران
AOC	هزینه‌های عملیاتی سالانه	Z_1	هدف به حداقل رساندن تاب‌آوری (با اعمال جریمه بر عوامل کاهش تاب‌آوری)

۱-۲- مجموعه شاخص

<i>F</i>	تعداد ظرفیت ذخیره‌سازی در مرکز جمع‌آوری $(r = 1, \dots, F)$	<i>L</i>	تعداد اندازه ظرفیت پالایشگاه $(l = 1, \dots, L)$
<i>B</i>	نوع زیست‌توده $(b = 1, \dots, B)$	<i>L'</i>	ظرفیت اضافی پالایشگاه $(l' = 1, \dots, L')$
<i>BI</i>	نوع بیوانرژی $(bi = 1, \dots, BI)$	<i>M</i>	تعداد کاربران نهایی $(m = 1, \dots, M)$
<i>H</i>	تعداد مراکز کاشت و برداشت $(h = 1, \dots, H)$	<i>T</i>	تعداد دوره‌ها $(t = 1, \dots, T)$
<i>I</i>	تعداد پالایشگاه‌ها $(i = 1, \dots, I)$	t_0	زمان شروع اختلالات
<i>J</i>	تعداد مراکز جمع‌آوری $(j = 1, \dots, J)$	t_d	پایان دوره اختلالات
<i>K</i>	تعداد فناوری تبدیل در پالایشگاه $(k = 1, \dots, K)$	t_n	زمان شروع بهبودی از اختلالات
<i>K'</i>	تعداد فن‌آوری ذخیره‌سازی در مرکز جمع‌آوری $(k' = 1, \dots, K')$		

۱-۳- پارامترها

$TA_{bv}_{h,b}$	مقدار کل زیست‌توده موجود b در مرکز کاشت و برداشت زیست‌توده h
$IS_{k,i,l}$	سرمایه‌گذاری برای راه‌اندازی یک پالایشگاه با اندازه l در موقعیت i با فناوری تبدیل k
$IS_{k',j,f}$	سرمایه‌گذاری برای راه‌اندازی یک مرکز جمع‌آوری با اندازه f در موقعیت j با فناوری k'
$ISRE_{k,i,l}$	سرمایه‌گذاری برای راه‌اندازی ظرفیت اضافی پالایشگاه با اندازه l' در موقعیت i با فناوری تبدیل k
$UCch_{h,b}$	هزینه واحد برای زیست‌توده b در مرکز کاشت و برداشت h
$UCTrb_{j,i,b}$	هزینه واحد برای انتقال زیست‌توده b از مرکز جمع‌آوری j به پالایشگاه i
$UCTrb_{h,j,b}$	هزینه واحد انتقال زیست‌توده b از مرکز برداشت h به مرکز جمع‌آوری j
$UCTrbi_{i,m,bi}$	هزینه واحد برای انتقال انرژی زیستی bi از پالایشگاه i به مشتری نهایی m
$UCRE_{i,bi,l'}$	هزینه واحد برای انرژی زیستی اضافی bi با اندازه l' در پالایشگاه i با فناوری k
$UCsb_{i,b}$	هزینه واحد ذخیره‌سازی زیست‌توده b در پالایشگاه i
$UCsb_{j,b}$	هزینه واحد برای ذخیره‌سازی زیست‌توده b در مرکز جمع‌آوری j
$UCcb_{i,b}$	هزینه واحد برای تبدیل زیست‌توده b در پالایشگاه i با فناوری k

حداکثر ظرفیت ممکن برای ذخیره‌سازی زیست‌توده با اندازه f در مرکز جمع‌آوری با فناوری k'	$VPsMax_{j,b}$
حداکثر ظرفیت ممکن برای ذخیره‌سازی زیست‌توده اندازه l در فناوری k در پالایشگاه i	$VPsMax_{i,b}$
حداکثر ظرفیت ممکن برای تولید زیست‌توده در اندازه l در پالایشگاه i با فناوری k	$VPoMax_{i,bi}$
حداکثر ظرفیت تولید بازیابی شده پس از اختلال در پالایشگاه i	$VPReCMAX_{i,bi,t}$
هزینه زیست‌محیطی تخریب منابع طبیعی در کاشت و برداشت	$ECrd$
تأثیر هزینه‌های زیست‌محیطی بر اکوسیستم در کاشت و برداشت	$ECesa$
تأثیر هزینه‌های زیست‌محیطی بر سلامت انسان در کاشت و برداشت	$EChh$
هزینه زیست‌محیطی هشدارهای گرمایش جهانی در کاشت و برداشت	$ECgw$
کل هزینه‌های زیست‌محیطی برای زیست‌توده b در مرکز کاشت و برداشت h	$TEch_{h,b}$
کل هزینه‌های زیست‌محیطی برای انتقال زیست‌توده b از مرکز جمع‌آوری j به پالایشگاه i	$TEshb_{j,i,b}$
کل هزینه‌های زیست‌محیطی برای انتقال زیست‌توده b از مرکز کاشت و برداشت h به مرکز جمع‌آوری j	$TEshb_{h,j,b}$
کل هزینه‌های زیست‌محیطی برای ذخیره‌سازی زیست‌توده b در مرکز جمع‌آوری j با اندازه f و فناوری k'	$TEsb_{j,f,b}$
کل هزینه‌های زیست‌محیطی برای ذخیره‌سازی زیست‌توده b در پالایشگاه i با اندازه l و فناوری k	$TEsb_{i,l,b}$
مجموع هزینه‌های زیست‌محیطی برای ساخت و بهره‌برداری از پالایشگاه در موقعیت i با اندازه l و فناوری k برای زیست‌توده b	$TEco_{i,l,b}$
مجموع هزینه‌های زیست‌محیطی برای انتقال انرژی زیستی bi از پالایشگاه i به مشتری نهایی m	$TEshbi_{i,m,bi}$
مجموع هزینه‌های زیست‌محیطی برای ذخیره انرژی زیستی ظرفیت مزاد bi در یک پالایشگاه در موقعیت i با اندازه l' و فناوری k	$TERE_{i,l',bi}$
هزینه اقتصادی سالانه برای برداشت زیست‌توده b در مرکز کاشت و برداشت h	$AECChb_{b,h}$
هزینه اقتصادی سالانه برای انتقال زیست‌توده b از مرکز کاشت و برداشت h به مرکز جمع‌آوری j	$AECshb_{h,b,j}$
هزینه اقتصادی سالانه برای انتقال زیست‌توده b از مرکز جمع‌آوری j به پالایشگاه i	$AECshb_{b,j,i}$
هزینه اقتصادی سالانه برای انتقال انرژی زیستی bi از پالایشگاه i به مشتری نهایی m	$AECshbi_{bi,i,m}$
هزینه اقتصادی سالانه ذخیره‌سازی زیست‌توده b در مرکز جمع‌آوری j با اندازه f و فناوری k'	$AECsb_{b,j,f}$
هزینه اقتصادی سالانه ذخیره‌سازی زیست‌توده b در مرکز جمع‌آوری j با اندازه f و تکنولوژی k	$AECsc_{b,j,i}$
هزینه اقتصادی سالانه ذخیره‌سازی و تبدیل زیست‌توده b و ذخیره انرژی زیستی bi در پالایشگاه i با اندازه l' و فناوری k ظرفیت اضافی	$AECsc_{b,i,f}$
قیمت زیست‌توده b برداشت‌شده از مراکز کاشت و برداشت h	$P_{h,b}$
قیمت فروش انرژی زیستی bi در پالایشگاه i	$P_{i,bi}$
(تعداد مشاغل): تعداد مشاغل غیرمستقیم در منطقه i	$NIJ_{b,i}$
(تعداد مشاغل): تعداد مشاغل القایی در منطقه i	$NlndJ_{b,i}$
(تعداد شغل): تعداد مشاغل مستقیم در منطقه i	$DJ_{b,i}$
تقاضای انرژی زیستی توسط مشتری نهایی m	$\tilde{d}_{i,m,t}$
نرخ تخفیف	$Disr$
(تعداد شغل): نیروی کار در منطقه i	LF_i
درصد نیروی کار مرتبط با مصرف خانوار در منطقه i	$PLFhc_i$
(تعداد افراد): میانگین تعداد خانوارهای ایرانی با حداقل یک نفر نیروی کار	$NPIR_i$
(تعداد مردم): جمعیت جهانی در منطقه i	POP_i
تعداد افراد در مراکز کاشت و برداشت h	GPu_h
تعداد افراد در مراکز جمع‌آوری j	GPu_j

تعداد افراد در پالایشگاه i	GPu_i
تعداد افراد برای حمل و نقل b از مراکز کاشت و برداشت h به مرکز جمع آوری j	$GPushb_{b,h,j}$
تعداد افراد برای حمل و نقل b از مرکز جمع آوری به پالایشگاه i	$GPushb_{b,j,i}$
تعداد افراد برای حمل و نقل bi از پالایشگاه i به مشتری نهایی m	$GPushbi_{bi,i,m}$
مجموع هزینه‌های مستقیم سلامت و ایمنی کارگران	$WSHDC$
مجموع هزینه‌های غیرمستقیم سلامت و ایمنی کارگران	$WSHNIC$
تعداد کل پالایشگاه‌های زیستی	q
تعداد کل مراکز جمع آوری	q'
نرخ تخریب زیست توده b	α_b
نرخ تبدیل زیست توده b با فناوری k	$\beta_{b,k}$
هزینه جریمه کمبود انرژی زیستی bi برای مشتری نهایی m	$\beta_{bi,m}$
هزینه جریمه برای انرژی زیستی bi انتقال یافته از تقاضای مشتری نهایی m بیشتر است (مازاد)	$\beta'_{bi,m}$
پارامتر از پیش تعیین شده برای نمایش برآوردهای تصمیم گیرنده در زمان اختلال	η
ضریب جریمه محل بحرانی کاشت و برداشت (بحران نود)	ε
ضریب جریمه برای سایت مجموعه بحرانی (بحران نود)	ε'
ضریب جریمه سایت حیاتی پالایشگاه انرژی زیستی (بحران نود)	ε''
ضریب تنبیه تلاطم و پیچیدگی در جریان بین محل کاشت و برداشت h و محل جمع آوری j	β
ضریب جریمه تلاطم و پیچیدگی در جریان بین محل جمع آوری j و پالایشگاه انرژی زیستی i	β'
ضریب جریمه تلاطم و پیچیدگی در جریان بین پالایشگاه انرژی زیستی i و مشتری نهایی m	β''
ضریب مجازات برای سردرگمی و پیچیدگی در محل کاشت و برداشت h	γ
ضریب مجازات برای سردرگمی و پیچیدگی در سایت جمع آوری j	γ'
ضریب جریمه برای آشفتگی و پیچیدگی در یک پالایشگاه انرژی زیستی i	γ''
ضریب مجازات برای میزان ناراضی در عرضه و تقاضا	θ
ضریب جریمه تولید انرژی زیستی با تکنولوژی قدیمی	τ
ضریب جریمه نقض محدودیت عدم قطعیت	∂

۴-۱- متغیرهای تصمیم

مقدار زیست توده b برداشت شده در زمان کاشت و برداشت h در طول دوره t	$Ambh_{h,b,t}$
مقدار زیست توده b منتقل شده از مرکز جمع آوری j به پالایشگاه i در طول دوره t	$Ambsh_{j,i,b,t}$
مقدار زیست توده b منتقل شده از مرکز کاشت و برداشت h به مرکز جمع آوری در طول دوره t	$Ambsh_{h,j,b,t}$
میزان انرژی زیستی bi منتقل شده از پالایشگاه i به مشتری نهایی m در طول دوره t	$Ambish_{i,m,bi,t}$
مقدار زیست توده b ذخیره شده در پالایشگاه i در طول دوره t	$Ambi_{i,b,t}$
مقدار زیست توده b ذخیره شده در مرکز جمع آوری j در طول دوره t	$Ambj_{j,b,t}$
میزان انرژی زیستی bi تولید شده در پالایشگاه i در طول دوره t	$Ambipr_{i,bi,t}$
مقدار زیست توده b تبدیل شده در پالایشگاه i با فناوری k در طول دوره t	$Ambpr_{i,b,k,t}$
میزان ظرفیت اضافی در پالایشگاه i با فناوری k تبدیل با اندازه l در طول دوره t	$VPRE_{i,bi,l,t}$
میزان ظرفیت باقی مانده پس از بروز اختلالات در پالایشگاه i با فناوری k در طول دوره t	$VPRC_{i,bi,t}$
ظرفیت در آغاز اختلالات در پالایشگاه i با فناوری k آن زمان t_0	VPC_{i,bi,t_0}
ظرفیت در طول دوره اختلالات در پالایشگاه i با تکنولوژی k در طول دوره t	$VPC_{i,bi,t}$
ظرفیت باز یافت پس از اختلال در پالایشگاه i با فناوری k در دوره t	$VPReC_{i,bi,t}$

جدول ۱. مقالات بررسی شده (از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱)

محققان	مدل سازی				تجهیزات			زیست توده				عامل عدم قطعیت				پایداری		محصول نهایی					
	MIP	LP	MILP	MINLP	موقعیت	ظرفیت	فن آوری	منبع پایی	تخصیص	مواد اولیه چندگانه	نوع زیست توده در مطالعات موردی	تأمین زیست توده	قیمت ها	تقاضای انرژی زیستی	هزینه ها	تکنولوژی محصول	اقتصادی		زیست محیطی	اجتماعی	تاب آوری	عوامل تاب آوری	چند محصولی
[۱۸]						CP					زیست توده نخل	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			رژن نخل	
[۶]						CP	✓		✓	✓	ذرت، بقایای جنگل، و زیاله های جامد شهری	✓				✓				✓		سوخت زیستی	
[۷]				✓	LP	CP		✓	✓		نیشکر، بقایای جنگل	✓				✓		✓				بیوالکتریک	
[۸]				✓	LF	CF, CP							✓			✓		✓	✓			برق	
[۱۳]				✓	LI	CI		✓			زیست توده جنگلی، زیست توده چوبی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			برق	
[۱۷]					LF	CF		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			گاز طبیعی	
[۵]					LF	CF		✓			کشاورزی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		پودر	
در این مقاله				✓	LF, LP, LR	CF, CBF, CR, CI		✓	✓	✓	ضایعات	✓		✓			✓	✓	✓	✓		برق	

LF: موقعیت تجهیزات LI: موقعیت زیرساخت LBF: موقعیت تجهیزات زیست توده LR: موقعیت منبع LP: موقعیت نیروگاه تولید برق LS: موقعیت تجهیزات ذخیره سازی CP: ظرفیت نیروگاه تولید برق CF: ظرفیت تجهیزات CBF: ظرفیت تجهیزات زیست توده CR: ظرفیت منبع CI: ظرفیت زیرساخت