






Designing a Model of the Biomass Supply Chain for the Construction of a Power Plant Despite the Disruption

Davod Dehghan  Ph.D. student, Department of Industrial Management, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran

Kiamars Fathi Hafshejani * Assistant Professor, Department of Industrial Management, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Jalal Haghghat Monfared  Assistant Professor, Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

The importance of mass biology has increased due to pollution caused by biomass burial, the profitability of biomass energy, and the demand for energy in the supply chain network. The goal of this research is to design a model for the biomass supply chain network with an economic and ecological approach to reduce costs and carbon emissions. Research gaps have been addressed, which include determining desired and undesired process outputs, along with simultaneously examining material supply disruptions and final product demand. The mathematical model used is a mixed-integer linear programming model. The primary objective is to minimize costs, and the secondary objective is to minimize carbon emissions. To address this in a single-target function under uncertainty, the fuzzy TH mathematical model has been employed. Uncertainty and disruptions have been studied through scenario building. The model's validation includes a case study in Fars province, where the findings justify the construction of four power plants. The proposed model improved the accuracy of electricity production predictions by 2.1 percent. An analysis and sensitivity study was performed on the TH method's parameters and changes in customer demand values according to predictions. The results show that the proposed model performs well, achieving cost-effectiveness through the integration of economic and ecological approaches. It also successfully reduces greenhouse gas emissions, enhances energy security and stability, and demonstrates a positive impact.

* Corresponding Author: fathikiamars@yahoo.com

How to Cite: Dehghan, D., Fathi Hafshejani, K., Haghghat 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.

Introduction

More than 70 thousand tons of biomass waste are produced in Iran daily. These waste products result in the generation of methane gas and carbon dioxide, leading to severe air pollution and climate changes in the country. Given that 14% of Iran's electricity production comes from hydropower, and the nation is grappling with drought, electricity generation has decreased, leading to government-imposed power cuts, particularly in industrial areas. To address the need for biomass resource investment in energy production, the main challenge is the absence of an optimization model for the biomass supply chain that encompasses all relevant factors. Hence, this research aims to design a flexible optimization model for the biomass supply chain, offering insights to investors on how to produce energy with reduced costs and lower carbon emissions. Key research gaps identified are as follows: 1- Simultaneously addressing uncertainty arising from disruptions in the first two levels of the supply chain, encompassing biomass supply from raw materials, and examining the fourth level - the customer level - by defining scenarios. 2- Innovatively considering capacity levels in the context of the biomass supply chain, a subject not widely explored before. 3- Focusing on the production of bioenergy in conjunction with by-products. 4- Deliberating on the definition of desired outputs at separation centers. 5- Highlighting the importance of considering undesired outputs at separation centers. 6- Proposing a stochastic-probabilistic-fuzzy planning approach to enhance flexibility, particularly in managing risks and operational disruptions.

Research Method

This network encounters two types of uncertainty, both of which cause disruptions. Consequently, four scenarios have been devised to address these disruptions: 1- The scenario involving reduced raw material supply due to drought's impact. 2- The scenario in which electricity demand decreases in response to specific conditions. 3- The scenario where both of the aforementioned scenarios occur simultaneously. 4- A scenario without any disturbances. As a result, a resilient model has been developed to manage disturbances while ensuring environmental sustainability. The proposed model is a mixed-integer linear programming mathematical model with two objective functions: cost minimization and carbon emission minimization. The model is solved using the exact solution method in conjunction with GOMES software. To address function targeting under uncertainty, the fuzzy TH mathematical model has been employed. The model's validation has been examined through a case study in Fars province.

Findings

Several findings have emerged from the study: The construction of four power

plants is recommended, each to be located at one of the ten proposed sites, with each having a different capacity. The proposal includes the establishment of four biomass separation centers. Different types of biomass are utilized in the power plants in varying proportions. Biomass transportation involves three types of transporters with capacities of ten tons, fifteen tons, and twenty tons. The quantity of these transporters varies across different separation centers and power plants. Electricity is supplied to six different applicants. The quantity of fertilizer produced varies according to different scenarios and time periods. The sensitivity analysis reveals that increasing the coefficient of the first objective function results in a decrease in the values of the first objective function. Conversely, decreasing the coefficient of the second objective function simultaneously leads to an increase in the value of the second objective function.


Conclusion

The model designed for this purpose is a sustainable development model that encompasses two of the three sustainability aspects, namely, the reduction of greenhouse gas emissions and the minimization of economic costs. Therefore, it is a resilient model that employs a scenario-based approach to address various forms of uncertainty. In the case of this study, raw materials were procured from nine out of ten biomass supply centers, indicating resilience in terms of biomass supply. The model optimally allocates resources among the supply chain members to minimize greenhouse gas emissions while also considering cost-effectiveness. The inclusion of favorable and unfavorable outputs in the model impacts the annual electricity production of each power plant. Without these variables, the model would overestimate electricity production. Sensitivity analysis reveals the trade-off between objective functions, confirming the model's correct and logical performance. Therefore, the model's validity is established. It is recommended that, in further development of this model, specific travel times for trucks between locations be included in the model.


Keywords: Biomass Supply Chain Network, Probabilistic Programming, Fuzzy Programming, Mathematical Programming.

طراحی مدل ریاضی زنجیره تأمین زیست توده برای ساخت نیروگاه با وجود اختلال


دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران

داود دهقان 

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

کیامرث فتحی هفشجانی  *

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

جلال حقیقت منفرد 

چکیده

آلاینده‌های ناشی از دفن زیست توده، سود انرژی‌های زیست توده و تقاضا برای انرژی، شبکه زنجیره تأمین زیست توده را مهم تر نموده است. هدف این پژوهش، طراحی مدل شبکه زنجیره تأمین زیست توده با رویکرد اقتصادی و زیست محیطی، برای کاهش هزینه و کربن است. شکاف‌های پژوهشی برطرف شده؛ تعیین خروجی‌های مطلوب، نامطلوب و فرآیندی و بررسی هم‌زمان اختلال در عرضه مواد اولیه و تقاضای محصول نهایی است. مدل ریاضی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌باشد. تابع اول، کمینه‌سازی هزینه‌ها و تابع دوم، کمینه‌سازی میزان انتشار کربن است. برای تک هدفه کردن تابع، تحت عدم قطعیت، از مدل ریاضی TH فازی استفاده گردیده است. عدم قطعیت و اختلال با سناریوسازی بررسی شده است. اعتبارسنجی مدل، در یک مورد مطالعه در استان فارس است. بنا به یافته‌ها، ساخت چهار نیروگاه، توجیه‌پذیر است. مدل پیشنهادی توانست به میزان ۲/۱ درصد پیش‌بینی دقیق‌تری از میزان برق تولیدی ارائه نماید. تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای روش TH و بر روی تغییر مقادیر تقاضای مشتریان، مطابق پیش‌بینی‌ها است. نتیجه اینکه مدل پیشنهادی، عملکرد خوبی دارد؛ و توانسته است با ادغام رویکرد اقتصادی و زیست محیطی، از نظر هزینه، مقرون به صرفه باشد و در کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای جذاب باشد و در ایجاد امنیت و پایداری انرژی، موفق عمل نموده است.

کلیدواژه‌ها: شبکه زنجیره تأمین زیست توده، برنامه‌ریزی احتمالی، تنوری فازی، برنامه‌ریزی ریاضی.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم است

* نویسنده مسئول: fathikiamars@yahoo.com

مقدمه

در میان تمامی منابع تجدیدپذیر، زیست توده به دلیل فراوانی در جامعه انسانی، دسترس پذیری بالا و قابلیت کاربرد بالقوه آن، به عنوان منبعی پایدار در تولید انرژی، دارای اهمیت زیادی می باشد (Pérez et al., 2017). اتحادیه اروپا زیست توده را به عنوان منبعی تجدیدپذیر می داند و انواع زیست توده را، زباله های شهری، صنعتی، پسماندهای کشاورزی، جنگلی و حیوانی می داند که به عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت، گرما و نیرو استفاده می شوند (Ghaderi et al., 2016). فرآیندهای تولیدی مرتبط با انواع زیست توده ها، به چهار نسل طبقه بندی می شوند. نسل اول از برخی منابع خوراکی مانند قندها، چربی های حیوانی، نشاسته و روغن های گیاهی به دست می آیند. این فرآیند تولید به خوبی گسترش یافته است و تجاری سازی شده است. این نسل، با زنجیره تأمین مواد غذایی در تضاد است. نسل دوم از مواد اولیه غیرخوراکی مانند لیگنوسلولزی، زباله های شهری و صنعتی، بقایای کشاورزی و جنگلداری تشکیل شده اند. نسل سوم، جلبک ها می باشند این نسل به تازگی گسترش یافته است. نقطه ضعف سوخت های زیستی نسل دوم و سوم فرآیندهای تولید دشوار و پیچیده آن هاست (Ghaderi et al., 2016). سوخت زیستی نسل چهارم، از طریق اصلاح ژنتیکی یا سنتز میکروارگانیسم ها تولید می شوند این نسل، هنوز رشد و گسترش کافی پیدا ننموده است ((Zand Atashbaret al., 2018) در بین این چهار نسل، نسل دوم با وجود پیچیده بودن فرآیند تولید، ترجیح داده می شوند زیرا از مواد خام در دسترس و ارزان قیمت و بدون رقابت کردن با مواد غذایی استفاده می کنند و پخش گازهای گلخانه ای (GHG) را نیز کاهش می دهند (Awudu & Zhang., 2012). کاهش گازهای گلخانه ای به حدی اهمیت دارد که یکی از دلایل اصلی گرایش داشتن به سمت سوخت های زیستی، محسوب می شود. از این رو برای برطرف نمودن نگرانی های زیست محیطی، گنجاندن پایداری زیست محیطی در طراحی شبکه های زنجیره تأمین سوخت زیستی، (BSCNs¹) یک ضرورت است. بر همین اساس، پایداری زیست محیطی، بیشتر برای کمینه نمودن انتشار گازهای گلخانه ای در نظر گرفته

می شود (Ghaderi et al., 2016)

در ایران روزانه بیش از هفتاد هزار تن زباله زیست توده تولید می شود این زباله ها منجر به تولید گاز متان و دی اکسید کربن بسیار فراوانی می شوند هوا را به شدت در ایران آلوده کرده اند و باعث تغییر اقلیمی کشور شده اند از سویی دیگر با توجه به اینکه ۱۴ درصد برق تولیدی کشور عزیزمان ایران از آب های پشت سدها می باشد (khabaronline.ir/news/604293) و کشورمان نیز رو به خشک سالی بیشتری گذاشته است که با کم شدن سطح آب های پشت سدها، میزان برق تولیدی نیز با کاهش مواجه شده است و دولت برای برطرف نمودن کمبود برق خانه های مردم، از سال ۱۳۹۹ تا کنون، اقدام به قطع گاه و بیگاه برق شهرک های صنعتی می نماید بنابراین با توجه به اینکه زباله های زیست توده، منبعی بسیار بزرگی از مواد اولیه برای تولید انرژی هستند می توان با تبدیل زیست توده ها به انرژی، از انتشار گاز متان و دی اکسید کربن پیشگیری نمود و برق شهرک های صنعتی را نیز تأمین نمود برای سرمایه گذاری در تولید انرژی از منابع زیست توده، مشکلی که وجود دارد، نبود مدل بهینه یابی برای زنجیره تأمین زیست توده می باشد که در آن، تمامی عوامل مؤثر در نظر گرفته شود. در مجموع، بنا به هفت دلیل، انجام این پژوهش دارای اهمیت و ضرورت می باشد.

۱. وجود روزانه ده ها هزاران تن زیست توده که انباشت و دفن آن ها، موجب تولید بیشتر گازهای خطرناک متان و دی اکسید کربن می گردد و اقلیم کشور را بیشتر آسیب پذیر می نماید.
۲. کاهش روزافزون آب های پشت سدها که میزان تولید برق آبی را بیشتر کاهش می دهد و اختلالات برقی را بیشتر می کند.
۳. قطع مداوم برق در شهرک های صنعتی، ضررهای مالی شدیدتری را به صنایع وارد می نماید و میزان سرمایه گذاری ها را کاهش می دهد.
۴. کاهش هزینه مالی و کاهش انتشار کربن در شبکه زنجیره تأمین است.
۵. خطرات اختلال به دودسته وابسته به مکان و مستقل از مکان، طبقه بندی می شوند. بلایای طبیعی عمدتاً وابسته به مکان هستند و بلایای انسانی عمدتاً مستقل از مکان هستند. خطرات اختلال می تواند بر عملکرد شبکه زنجیره تأمین زیست توده (BSCN) تأثیر منفی بگذارد؛ و می تواند بر عرضه و تقاضای زیست توده و غیره تأثیر بگذارند؛ بنابراین، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین

زیست توده که در برابر خطرات عملیاتی و مخاطرات اختلال، انعطاف پذیر باشد، مهم به نظر می رسد (Mousavi Ahranjani et al., 2020). ۷. اگر این پژوهش انجام نشود، سرمایه گذاران کمتری به حوزه تولید انرژی از منابع تجدید پذیر، وارد می شوند. حال با توجه به اینکه می توان زیست توده ها را به برق تبدیل نمود و از شکل گیری و انتشار گاز متان جلوگیری کرد و تقاضای برق را برآورده نمود، لزوم طراحی یک شبکه زنجیره تأمین زیست توده الزامی می باشد؛ بنابراین در این پژوهش، یک مدل بهینه انعطاف پذیر از زنجیره تأمین زیست توده طراحی می گردد که به سرمایه گذاران نشان دهد چگونه به سمت تولید با هزینه کمتر و تولید پاک تر با انتشار کمتر گازهای گلخانه ای حرکت نمایند.

پژوهش حاضر، شبکه زنجیره تأمین زیست توده را در چهار سطح در نظر گرفته است سطح اول، سطح عرضه کنندگان زیست توده است سطح دوم، تفکیک سازی زیست توده است در این سطح، زیست توده ها به سه دسته مستقل از هم تقسیم می شوند دسته اول، دسته خروجی های نامطلوب است این خروجی ها برای زیست توده هایی است که تبدیل آن ها به سوخت، هیچ گونه توجیه اقتصادی و یا زیست محیطی ندارند این نوع خروجی ها، بیشتر در پسماندهای خشک و تر شهری ممکن است وجود داشته باشد. دسته دوم، خروجی های مطلوب هستند و برای زیست توده هایی است که قابلیت بازیافت شدن دارند یعنی هنوز قابل استفاده هستند و مراکز تفکیک سازی می توانند این نوع زیست توده ها را به منظور بازیافت شدن، بفروشند این نوع خروجی ها، بیشتر در پسماندهای خشک شهری وجود دارند. دسته سوم، خروجی های فرآیندی هستند این خروجی ها، به نیروگاه برای تبدیل شدن به سوخت، منتقل می شوند. سطح سوم، تولید محصول است که در نیروگاه انجام می شود و سطح چهارم، سطح مشتری می باشد (ghazavi et al., 2021). در این شبکه زنجیره تأمین، چهار منبع زیست توده مورد بررسی می باشد ۱- زیست توده های گیاهی ۲- فضولات دام ها که از دامداری ها جمع آوری و ارسال می گردند ۳- پسماندهای خشک شهری است که از مراکز نگهداری پسماندها در شهرها ارسال می گردند و ۴- پسماندهای تر شهری است که از مراکز نگهداری پسماندها در شهرها ارسال می گردند. شبکه زنجیره تأمین زیست توده مورد مطالعه،

در چهار فصل از سال مورد بررسی قرار می‌گردد این شبکه با دو نوع عدم قطعیت مهم روبه‌رو می‌باشد که هر دوی این عدم قطعیت‌ها، اختلال‌هایی را در شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده به وجود می‌آورند. ۱- ظرفیت تأمین‌کنندگان، به دلیل احتمال خشک‌سالی. ۲- میزان تقاضای مشتریان به دلیل تغییرات در میزان فعالیت کارخانه‌ها در شهرک‌های صنعتی، دارای عدم قطعیت است بر این اساس، شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده، دارای دو اختلال است یکی از اختلال‌ها، اختلال در مبدأ می‌باشد یعنی اختلال در منابع زیست‌توده به دلیل احتمال خشک‌سالی است اختلال دیگر در مقصد می‌باشد یعنی به دلایل شرایط اقتصادی مانند رکود و تحریم که میزان فعالیت کارخانه‌ها در شهرک‌های صنعتی دچار نوسان می‌شود که بر اثر این نوسان، تقاضای برق نیز دارای نوسان می‌شود بنابراین چهار سناریو طراحی می‌گردد (۱) سناریو کاهش مواد اولیه بر اثر خشک‌سالی (۲) سناریو کاهش تقاضای برق بنا به شرایط (۳) سناریو رخ دادن دو سناریو پیشین با هم (۴) سناریو بدون اختلال. از این رو مدلی تاب آور برای رویارویی با اختلال‌ها طراحی می‌گردد تمامی زیست‌توده‌ها از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای به نیروگاه، حمل می‌گردند. در نیروگاه، با کمک فن آوری بیوگاز، از زیست‌توده‌ها، برق تولید می‌شود و کود نیز به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌گردد. برق تولیدی به شهرک‌های صنعتی فروخته می‌شود و تمامی کودهای تولیدی، به مشتریان خصوصی فروخته می‌شوند.

در این پژوهش، مدل پیشنهادی، دو هدف را دنبال می‌کند؛ در یکی از اهداف، هزینه کل شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده (BSC) را کمینه می‌نماید و در هدف دیگر، کاهش انتشار کربن را به‌عنوان تابع هدف زیست‌محیطی، در BSC، دنبال می‌کند بنابراین، هدف این پژوهش، طراحی مدل شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده است تا هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را کمینه نماید، از این رو سؤال اصلی پژوهش این است که مدل شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده، برای کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی با وجود عدم قطعیت‌های موجود، برای ساخت نیروگاه، چیست؟

سایر بخش‌های مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم ادبیات مرتبط مرور می‌شود. در

بخش سوم، مدل ریاضی ارائه می‌گردد در بخش چهارم، مدل در یک مورد مطالعه واقعی، اجرا می‌گردد بخش پنجم، یافته‌ها و در بخش ششم، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های احتمالی آینده، مطرح می‌نماید.

۲- ادبیات و پیشینه پژوهش

اولیور و وبر در سال ۱۹۸۲، برای نخستین بار، اصطلاح مدیریت زنجیره تأمین را مطرح نمودند هولیهان این مفهوم را در یک رشته مقالات برای تشریح مدیریت گردش مواد خام، خارج از مرزهای سازمانی به کار برد. این واژه از دهه ۱۹۹۰ به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Cyplik & Zwolak., 2022). از زمان پیدایش آتش، انسان‌ها برای دریافت انرژی، زیست توده‌ها را آتش می‌زدند در سال ۱۸۸۴، شخصی به نام گاین در آلمان، طرحی را به اجرا درآورد که به وسیله بیوگاز حاصل از انرژی زیست توده، انرژی به دست می‌آمد (Condori et al., 2010). بنا به بررسی‌های مرووری (Aranguren et al., 2021) تمامی مقاله‌هایی که در زمینه BSCN از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱ انجام پذیرفته است تنها ۲۱/۵ درصد از مقاله‌ها عدم قطعیت را مورد پژوهش قرار داده‌اند. در این پژوهش‌ها اغلب، عدم قطعیت‌ها به این دلیل در طراحی BSCN انجام شده است که مدل‌ها به واقعیت نزدیک‌تر شوند تا قابل اعتمادتر شوند. در این پژوهش‌ها، پارامترهایی مانند عرضه و تقاضای زیست توده، تقاضای سوخت زیستی، قیمت‌ها و هزینه‌های مختلف از جمله اثرات زیست محیطی به‌عنوان پارامترهای عدم قطعیت بررسی می‌گردند سپس پژوهش‌های با رویکر طراحی BSCN که در آن خطرات اختلال مطالعه شده است بررسی می‌شود. در رابطه با رویکرد اختلال، تاکنون پژوهش‌های اندکی انجام شده است.

(Umakanth., 2022) در پژوهشی بیان داشت، برای انتخاب مکان کارخانه سوخت زیستی پیشرفته، یکی از معیارهای کلیدی در دسترس بودن پایدار مواد اولیه با یک سیستم مدیریت زنجیره تأمین زیست توده کارآمد و قوی است. (Guo et al., 2022) عدم قطعیت‌های مکانی-زمانی در جمع‌آوری بقایای محصول چالش‌های بزرگی را برای توسعه یک شبکه زنجیره تأمین زیست توده به سوخت زیستی درازمدت و اقتصادی (BSCN) ایجاد

می‌کند. یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند دوره‌ای (SP^1) با در نظر گرفتن حذف نامشخص ذرت قابل جمع‌آوری و نرخ مشارکت کشاورز توسعه داده شده است. اگرچه هزینه حمل‌ونقل زیست‌توده ناپایدارترین جزء هزینه است. (Lee Yuen Lo et al., 2021) یک مدل ارزیابی فنی-اقتصادی تصادفی برای زنجیره تأمین زیست‌توده ارائه نمودند در این مدل، ادغام کیفیت‌های مختلف زیست‌توده به‌طور مستقیم در مدل ارزیابی ریاضی بر روی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده توسعه یافته است. (Lee Yuen Lo et al., 2021) با تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی زنجیره تأمین زیست‌توده، شش عدم قطعیت قابل‌اندازه‌گیری را شناسایی نمودند که شامل: (۱) در دسترس بودن زیست‌توده، (۲) کیفیت زیست‌توده، (۳) هزینه حمل‌ونقل، (۴) تقاضای بازار، (۵) نوسانات قیمت‌گذاری و (۶) دستمزد کارگران است.

(Syahira mohd et al., 2021) بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین زیست‌توده برای نیروگاه‌های موجود را بر اساس اهداف کاهش کربن بررسی نمود و عدم قطعیت‌هایی مانند تغییرات در عرضه زیست‌توده که ناشی از وابستگی فصلی زیست‌توده است مورد توجه قرار داد. (Akgül & Seçkiner., 2019) یک مدل MILP چهار مرحله‌ای (جمع‌آوری مواد اولیه به مرکز، انتقال مواد اولیه از مرکز به راکتور (ها)، انتقال از راکتور (ها) به کندانسور (ها) و در نهایت ارسال گاز متان مایع‌شده از کندانسور به نقاط تقاضا ارائه نمودند. مکان‌یابی بهینه مراکز (برای جمع‌آوری مواد اولیه) و نیروگاه‌های (راکتورها و کندانسورها) پیشنهاد شده است تا هزینه کل عملیات این سیستم زنجیره تأمین برای انرژی‌های تجدیدپذیر را به حداقل برسانند. به دلیل پیچیدگی تابع هدف نمی‌توان به راحتی از طریق بهینه‌سازی محذب به جواب رسید. یک الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه ابداع شده و توسط لینگو ارجاع گردید. (Osmani & Zhang., 2017) یک مدل MILP تصادفی دو مرحله‌ای را برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین بیواتانول چند خوراکی ارائه کردند. مدل پایدار چند هدفه آن‌ها عدم قطعیت قیمت و تقاضای اتانول زیستی را توضیح می‌دهد. (Fahimnia & Jabbarzadeh., 2016) با توسعه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه شامل روش امتیازدهی عملکردپایداری و یک رویکرد برنامه‌ریزی هدف فازی تصادفی، تاثیرات پایداری و

انعطاف پذیری بر ظرفیت زنجیره تأمین برای تحمل اختلالات درک شده را بررسی نمودند. در مطالعات پژوهشگران، به ریسک‌های اختلال توجه کافی نشده است و مطالعات اندکی صورت پذیرفته است که خطرات اختلال را در نظر گرفته باشند. در اینجا به بررسی چندین پیشینه پژوهشی مرتبط با اختلال در شبکه زنجیره تأمین پرداخته می‌شود. (Zailan et al., 2021) یک مدل بهینه‌سازی پیچیده که تولید هم‌زمان و زنجیره تأمین زیست توده را با در نظر گرفتن قابلیت اقتصادی و زیست محیطی ادغام می‌کند. با عدم قطعیت عملکرد تحت شرایط اختلال مختلف آب و هوایی و تنوع کیفیت زیست توده، از جمله رطوبت و خاکستر استفاده شد این ابتکار انرژی در صنعت "۴"، پیشرفت بیشتر مالزی را در انرژی و زیست توده خواهد داشت.

(Fattahi M, Govindan., 2018) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای را برای طراحی و برنامه‌ریزی یک BSCN با در نظر گرفتن ریسک اختلال، فصلی بودن و عدم قطعیت سهام خوراک و پایداری پیشنهاد کردند. آن‌ها جنبه‌های زیست محیطی و اجتماعی پایداری را در محدودیت‌های مدل خود گنجانده‌اند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو سناریوهایی را تولید کردند و از تکنیک‌های ساخت درخت سناریو و کاهش سناریو استفاده کردند. الگوریتم تجزیه Benders و الگوریتم افق نورد برای حل مدل MINLP پیشنهادی استفاده شد. (Azadeh A, Arani., 2016) از رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی دینامیک سیستم ترکیبی در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین بیودیزل استفاده کردند. در مرحله اول، برخی از پارامترهای مدل BSCN در مدل دینامیک سیستم با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع آب و زمین و مسائل تکنولوژیکی شبیه‌سازی شد. سپس، پارامترهای تخمین زده شده به عنوان ورودی‌های یک مدل MILP تصادفی مورداستفاده قرار گرفتند که همچنین اختلال در پیوندهای میان میدان‌های زیست توده، زیست‌فتری‌ها و بازارهای مصرف سوخت زیستی را در نظر گرفت. در نهایت، آن‌ها یک همتای قوی از مدل خود پیشنهاد کردند که فقط استحکام بهینه را در نظر می‌گرفت.

(Poudel et al., 2016) با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط

(MINLP) مکان‌های بهینه را برای تأسیسات چندوجهی و تصفیه‌خانه‌های زیستی، برنامه‌ریزی تولید و مواد اولیه تعیین کرد. آن‌ها همچنین پیشنهادهایی برای تعیین قابلیت اطمینان پیوندهایی که می‌توانند تحت شرایط خاص بهبود یابند ارائه کردند؛ و محدودیت بودجه برای جلوگیری از خسارات احتمالی ناشی از اختلال در مسیرهای حمل‌ونقل. (Marufuzzaman & Ekşioğlu., 2016) یک BSCN مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اعتماد طراحی کردند. آن‌ها یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی را برای محافظت در برابر نوسانات عرضه زیست‌توده و بلايای طبیعی در نظر گرفتند. آن‌ها یک ریم الگوریتم تجزیه Benders شتاب‌یافته و یک الگوریتم افق‌نورد ترکیبی برای حل مدل MINLP خود توسعه دادند. (Bai et al., 2015) تأثیر اختلالات مستقل و وابسته به سایت را در مکان‌های تصفیه زیستی یک زنجیره تأمین بیواتانول تجزیه و تحلیل کرد. آن‌ها مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات قابل‌اعتماد گسسته و پیوسته را برای آن اعمال کردند طراحی یک زنجیره تأمین بیواتانول قابل‌اعتماد آن‌ها مدل گسسته را با یک الگوریتم آرامش لاگرانژی سفارشی و مدل پیوسته را با روش تقریب پیوسته حل کردند. (Azadeh et al., 2014) یک مدل stochastic مبتنی بر سناریو را برای بهینه‌سازی یک BSC چند دوره‌ای، چند خوراکی و چند کالایی طراحی کرد. آن‌ها همچنین یک مدل را پیشنهاد کردند مدل قوی که فقط استحکام بهینه (و نه استحکام امکان‌سنجی) را در برابر عدم قطعیت‌های قیمت تقاضای سوخت‌های زیستی ارائه می‌دهد. آن‌ها همچنین اختلالات احتمالی منابع تأمین و لینک‌های اتصال شبکه را در مدل خود گنجانده‌اند. با بررسی این مبانی نظری و تجربی، مشخص گردید که مطالعات گسترده‌ای در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده، تاکنون انجام پذیرفته است. و نتیجه این بررسی‌ها، چندین شکاف پژوهشی را آشکار ساخته است که در زیر به آن پرداخته شد است.

شکاف پژوهشی

بررسی یک‌صد و پنجاه مقاله پژوهشی منتشر شده از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ درباره طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار زیست‌توده مشخص شد که بسیاری از پژوهشگران از مدل‌های ساده با

یک نوع ماده خام زیست توده استفاده کرده‌اند و یا مدل‌های تک محصولی، تک دوره‌ای و تک هدفه به کار برده‌اند و یا در بهینه‌سازی پایدار، شاخص‌های اختلال را نادیده گرفته‌اند. در بین این مقاله‌ها، تنها در ۵۵ درصد از آن‌ها، مدل‌ها بیش از یک منبع زیست توده را مورد بررسی قرار داده‌اند. نزدیک به ۴۰ درصد از مدل‌ها بیش از یک محصول تولیدی را بررسی نمودند. کمتر از ۲۷ درصد مدل‌ها، پایداری و انعطاف‌پذیری (چندمنظوره) را باهم مورد مطالعه قرار داده‌اند در حدود ۱۳ درصد از مقاله‌ها، بهینه‌سازی اهداف اقتصادی و زیست محیطی را به طور هم‌زمان بدون توجه به نگرانی‌های اجتماعی زنجیره تأمین در نظر گرفته‌اند در کمتر از یک درصد از مقاله‌ها، تلفات زیست توده را در نظر گرفته‌اند. همچنین، به طور عمده، از الگوریتم‌های فراابتکاری، راه‌حل‌های دقیق و روش‌های ترکیبی برای حل مدل‌ها استفاده نموده‌اند. در این پژوهش نیز مانند بسیاری از پژوهش‌ها مانند (Mohseni & Pishvaei, 2020) برای حل مسائل شبکه زنجیره تأمین زیست توده، از روش حل دقیق استفاده شده است. در هیچ کدام از مقاله‌های مطالعه شده خروجی مطلوب و نامطلوب که بخشی از فرآیند واقعی زیست توده در شبکه زنجیره تأمین زیست توده است را، مورد توجه قرار نداده‌اند که در این پژوهش، این شکاف شناسایی شده است و مورد بررسی قرار گرفته است از این رو این تفاوت، پژوهش حاضر را از پژوهش‌های پیشین، متمایز ساخته است علاوه بر این، برخی شکاف‌های پژوهشی دیگر نیز شناسایی شده‌اند که در اینجا مدلی طراحی می‌گردد تا بتواند شکاف‌ها را پوشش دهد:

۱- به طور هم‌زمان، عدم قطعیت بر اثر اختلال هم در سطح اول زنجیره تأمین یعنی در عرضه مواد اولیه (زیست توده)، هم در فرآیند و هم در سطح آخر یعنی سطح چهارم که سطح مشتریان می‌باشد را مورد بررسی قرار می‌دهد و برای آنان سناریو تعریف می‌نماید.

۲- تعیین سطح ظرفیت در مباحث دیگر مطرح شده است اما به کارگیری تعیین سطح ظرفیت در مبحث زنجیره تأمین زیست توده، یک نوآوری است

۳- در نظر گرفتن تولید انرژی زیستی، به همراه محصول جانبی

۴- در نظر گرفتن خروجی مطلوب در مراکز تفکیک‌سازی

۵- در نظر گرفتن خروجی نامطلوب در مراکز تفکیک‌سازی

۶- رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی- احتمالی- فازی پیشنهادی، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری را در برابر خطرات عملیاتی و اختلال به وجود می‌آورد

۳- مدل‌سازی

برای شناخت بهتر مسئله مورد مطالعه و آشنایی کامل با مسئله، مفروضات، توضیح داده می‌شوند

۳-۱- مفروضات مدل

۱- در نیروگاه، انبارش زیست‌توده وجود ندارد و تمامی زیست‌توده‌های ارسالی به نیروگاه، روزانه به خط تولید منتقل می‌شوند. ۲- قیمت زمین تخصیص‌یافته مناطق برای ساخت نیروگاه، در مدل وارد نشده است زیرا دولت به این صنعت، زمین رایگان واگذار می‌کند. ۳- در زنجیره تأمین، جریان معکوس وجود ندارد. ۴- تلفات زیست‌توده، به دلیل ناچیز بودن، نادیده گرفته شده است.

مدل ریاضی

برای انجام این کار، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای بهینه‌سازی یک شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده چهار دوره‌ای (چهار فصلی) چهار سطحی پایدار طراحی شده است. با یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی-احتمالی ترکیبی فازی برای رسیدگی به اختلالات عرضه زیست‌توده همراه با عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مدل

الف- نمادهای مدل

مشکل مورد بررسی، به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) فرموله شده است. در این بخش، نام‌گذاری اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل به همراه نام‌گذاری مدل، تابع هدف و محدودیت‌ها به‌طور گسترده شرح داده شده است.

جداول ۱. جداول اندیس‌ها

t	دوره‌های زمانی $t \in \{1, 2, 3, \dots, t\}$	w	تأمین کننده زیست توده $\{2, 3, \dots, j\}$ و $WE\{1\}$
c	سطح ظرفیت نیروگاه $\{1, 2, 3, \dots, g\}$ و c	s	مراکز تفکیک زیست توده $\{2, 3, \dots, m\}$ و $s \in \{1\}$
v	نوع وسیله حمل $\{1, 2, 3, \dots, v\}$	p	مکان‌های پیشنهادی نیروگاه‌ها $\{2, 3, \dots, n\}$ و $PE\{1\}$
i	مکان‌های متقاضیان $\{1, 2, 3, \dots, c\}$ و $i \in \{1, 2, 3, \dots, c\}$	a	سناریو خشک سالی $\{1, 2, 3, \dots, s\}$ و $a \in \{1, 2, 3, \dots, s\}$
f	سطح ظرفیت تفکیک سازی $\{2, 3, \dots, f\}$ و $f \in \{1\}$	b	انواع زیست توده $\{1, 2, 3, \dots, b\}$ و $b \in \{1, 2, 3, \dots, b\}$

جداول ۲. جداول پارامترها

SU_{bwt}^{PR}	هزینه خرید هر واحد انواع b از تأمین کنندگان W در دوره t	SU_{bwt}^{CP}	ظرفیت تأمین کننده در دوره t تحت سناریو a
SU_{wt}^{ST}	هزینه سفارش دهی به تأمین کننده W در دوره t	PW_c^{Up}	حداکثر سطح ظرفیت c نیروگاه P برای تولید برق
SP_{sf}^{ST}	هزینه راه اندازی مرکز تفکیک سازی s با سطح ظرفیت f	DM_{ita}	میزان تقاضای مشتریان i برای برق در دوره t تحت سناریو a
SP_{bf}^{LW}	حداقل سطح ظرفیت f مراکز تفکیک سازی زیست توده s	SP_{bf}^{Up}	حداکثر سطح ظرفیت f مراکز تفکیک سازی زیست توده s
SP_{bt}^{PR}	هزینه تفکیک سازی هر واحد b در دوره t	DS'_{sp}	فاصله بین مرکز تفکیک s و نیروگاه P
PW_c^{LW}	حداقل سطح ظرفیت c نیروگاه P برای تولید برق	PW_{pc}^{ST}	هزینه راه اندازی نیروگاه با سطوح ظرفیت c در مکان P
VH_v^{CP}	ظرفیت وسیله حمل نوع v	VL_b^{BI}	حجم هر واحد زیست توده b
MN_t	هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق در دوره t	HR_v	کرایه پرداختی به انواع v به ازاء هر واحد مسافت
RT_b^{FE}	میزان تولید محصول جانبی (کود) به ازاء هر واحد b	RT_b^{EL}	میزان برق تولیدی به ازاء هر واحد زیست توده b
PRC	قیمت فروش هر کیلو محصول جانبی	PW_b^{PR}	هزینه تولید هر واحد برق از انواع b
PP_a	احتمال وقوع هر کدام از سناریوهای a	DS_{sw}	فاصله بین W و مرکز تفکیک s

PW^{CO}	میزان کربن ایجادشده به ازاء تولید هر واحد برق	VH_V^{CO}	هزینه‌های پخش کربن به ازاء هر واحد مسافت توسط v
Ψ_b^2	نرخ زیست‌توده نامطلوب	Ψ_b^1	نرخ زیست‌توده مطلوب

جدول ۳. جدول باینری

X_{sf}^{SP}	در صورتی که s با ظرفیت f در مکان بالقوه s ساخته شود 1 در غیر این صورت صفر	X_{pc}^{PW}	در صورتی که نیروگاه با ظرفیت c در مکان بالقوه p ساخته شود 1 در غیر این صورت صفر
		X_{bwta}^{SU}	اگر برای خرید نوع b تأمین کننده w در دوره t تحت a انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

جدول ۴. جدول متغیرها

Y_{pita}^{PW}	میزان برق انتقالی از نیروگاه به مشتری در دوره t و تحت s	α_{vwsta}	تعداد وسیله حمل نوع v مورد نیاز برای انتقال b از w به s در دوره t و تحت a
β_{vspta}	تعداد وسیله حمل نوع v مورد نیاز برای انتقال b از s به p در دوره t و تحت a	Y_{bwsta}^{SU-SP}	میزان انواع b انتقال داده شده از محل w به محل s در دوره t و تحت سناریو a
Y_{bspta}^{SP-PW}	میزان انواع زیست‌توده حمل شده از محل تفکیک‌سازی به نیروگاه در دوره t و تحت a	U_{pta}	میزان محصول جانبی تولیدشده در نیروگاه در دوره t و تحت a
Y_{bsta}^2	میزان زیست‌توده نوع b نامطلوب تفکیک شده در مرکز s در دوره t تحت سناریو a	Y_{bsta}^1	میزان زیست‌توده نوع b مطلوب تفکیک شده در مرکز s در دوره t تحت سناریو a

ب - توابع هدف

در این پژوهش، به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، با دو تابع هدف استفاده می‌شود. هدف از ساخت مدل بهینه‌سازی، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری راهبردی و تاکتیکی زنجیره تأمین است.

تابع هدف اول:

تابع هدف اول، کمینه‌سازی تمامی هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده است این

هزینه‌ها عبارت‌اند از: هزینه‌های راه‌اندازی نیروگاه، هزینه راه‌اندازی مراکز تفکیک‌سازی، هزینه سفارش دهی به تأمین‌کننده، هزینه تفکیک‌سازی، هزینه خرید زیست توده، هزینه تولید برق، کرایه پرداختی به خودروهای حمل زیست توده از تأمین‌کننده به مرکز تفکیک، کرایه پرداختی به خودروهای حمل زیست توده از مرکز تفکیک به نیروگاه، هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق و قیمت فروش برق

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \sum_{PC} PW_{PC}^{ST} \times X_{PC}^{PW} + \sum_{Sf} SP_{Sf}^{ST} \times X_{Sf}^{SP} + \sum_{bwt_a} PP_a \times SU_{wt}^{ST} \times X_{bwt_a}^{SU} \\ & + \sum_{bspta} PP_a \times SP_{bt}^{PR} \times Y_{bspta}^{SP-PW} \\ & + \sum_{bwsta} PP_a \times SU_{bwt}^{PR} \times Y_{bwsta}^{SU-SP} + \sum_{pita} PP_a \times PW_b^{PR} \times Y_{pita}^{PW} \\ & + \sum_{vwsta} PP_a \times HR_V \times DS_{SW} \times \alpha_{vwsta} \\ & + \sum_{vspta} PP_a \times HR_V \times DS'_{SP} \times \beta_{vspta} \\ & - \sum_{bst_a} PP_a \times Y_{bst_a}^1 + \sum_{pct} X_{PC}^{PW} \times MN_t - \sum_{pta} PP_a \times U_{pta} \times PRC \quad (1) \end{aligned}$$

تابع هدف دوم

تابع هدف دوم، کمینه‌سازی هزینه‌های پخش کربن در شبکه زنجیره تأمین زیست توده است که عبارت‌اند از:

میزان احتمال پخش کربن در فاصله بین تأمین‌کنندگان تا مراکز تفکیک و از مراکز تفکیک تا نیروگاه

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_{vwsta} PP_a \times VH_v^{co} \times DS_{SW} \times \alpha_{vwsta} \\ & + \sum_{vspta} PP_a \times VH_v^{co} \times DS'_{SP} \times \beta_{vspta} \\ & + \sum_{pita} PP_a \times PW^{co} \times Y_{pita}^{pw} \end{aligned} \quad (2)$$

ج - محدودیت‌ها

محدودیت ظرفیت تأمین کننده: محدودیت (۳) نشان می‌دهد در هر دوره زمانی (t) و تحت هر سناریو (a) هر تأمین کننده (w) می‌تواند به اندازه ظرفیت خود، انتقال زیست توده (b) به مرکز تفکیک (s) انجام دهد. (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_s Y_{bwsta}^{su-sp} \leq SU_{bwta}^{cp} \quad \forall bwta \quad (3)$$

محدودیت (۴) محدودیت ظرفیت تأمین کننده: بیانگر انتقال انواع زیست توده (b) بر اساس حداقل ظرفیت به مرکز تفکیک‌سازی (s) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) می‌باشد. (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_w Y_{bwsta}^{su-sp} + (1 - X_{Sf}^{SP}) \times M \geq SP_{bf}^{LW} \quad \forall bsfta \quad (4)$$

محدودیت (۵) محدودیت راه‌اندازی: اگر مرکز تفکیک s با سطح ظرفیت f راه‌اندازی شود یک وگرنه صفر (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_f X_{Sf}^{SP} \leq 1 \quad \forall s \quad (5)$$

محدودیت (۶) حداکثر میزان زیست توده (b) انتقال داده شده از تأمین کننده (w) به مرکز تفکیک (s) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) می‌باشد (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_w Y_{bwsta}^{su-sp} \leq M \times (1 - X_{Sf}^{SP}) + SP_{bf}^{Up} \quad \forall sfta \quad (6)$$

محدودیت راه‌اندازی (۷): اگر نیروگاه (p) با سطح ظرفیت C راه‌اندازی شود یک وگرنه صفر (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_C X_{PC}^{PW} \leq 1 \quad \forall P \quad (7)$$

محدودیت برق انتقالی (۸): حداقل میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه (p) به مشتریان (i) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_i Y_{Pita}^{PW} + M \times (1 - X_{PC}^{PW}) \geq Pw_c^{IW} \quad \forall Pcta \quad (8)$$

محدودیت برق انتقالی (۹): حداکثر میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه (p) به مشتریان (i) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a). (Zarrat Dakhely Parast et al., 2021)

$$\sum_i Y_{Pita}^{PW} \leq M \times (1 - X_{PC}^{PW}) + Pw_c^{Up} \quad \forall Pcta \quad (9)$$

محدودیت (۱۰) بالانس موجودی در مراکز تفکیک: میزان (b) انتقالی از تأمین کننده (w) به مرکز تفکیک (s) و از مراکز (s) به نیروگاه (p) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a)

$$\sum_W Y_{bwsta}^{su-sP} = \sum_p Y_{bspta}^{SP-PW} + Y_{bsta}^1 + Y_{bsta}^2 \quad \forall bsa \quad (10)$$

محدودیت (۱۱) بالانس موجودی در نیروگاه: این محدودیت، میزان برق تولیدی به ازای مصرف هر واحد زیست توده (b) انتقال داده شده از مراکز تفکیک (s) به نیروگاه (p) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) می باشد

$$\sum_{bs} Y_{bsPta}^{sp-Pw} \times RT_b^{EL} = \sum_i Y_{pita}^{PW} \quad \forall Pta \quad (11)$$

محدودیت (۱۲) برآورد تقاضا: محدودیتی است که بیان می‌دارد میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه (p) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) برابر است با میزان تقاضای برق مشتریان در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a)

$$\sum_P Y_{pita}^{PW} = DM_{ita} \quad \forall ita \quad (12)$$

محدودیت (۱۳) محدودیت فروش کود: این محدودیت، بیانگر این است که میزان کود تولیدی در نیروگاه (p) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) به فروش می‌رسد.

$$U_{Pta} = \sum_{bs} Y_{bsPta}^{SP-Pw} \times RT_b^{FE} \quad \forall Pta \quad (13)$$

محدودیت (۱۴) تعداد وسایل نقلیه موردنیاز بین S و w: برای انتقال زیست‌توده (b) از مراکز تأمین‌کنندگان (W) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) به مراکز تفکیک (s) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a). (Govindan et al., 2022)

$$\frac{\sum_b Y_{bwsta}^{SU-SP} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} \leq \alpha_{vwsta} \leq \frac{\sum_b Y_{bwsta}^{SU-SP} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} + 1 \quad \forall vwsta$$

محدودیت (۱۵) تعداد وسایل نقلیه موردنیاز بین P و S: برای انتقال زیست‌توده (b) از مراکز تفکیک (s) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) به نیروگاه (p) در دوره زمانی (t) تحت سناریو (a) به نیروگاه (P). (Govindan et al., 2022)

$$\frac{\sum_b Y_{bspta}^{SP-PW} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} \leq \beta_{vspta} < \frac{\sum_b Y_{bspta}^{SP-PW} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} + 1 \quad \forall vspta$$

محدودیت (۱۶) شرط انتخاب تأمین‌کننده: بدین معنا که اگر تأمین‌کننده‌ای (w) انتخاب نشود آن تأمین‌کننده نباید زیست‌توده‌ای (b) به (s) ارسال نماید. (Tavana et al., 2021)

$$\sum_W Y_{bwsta}^{su-sp} \leq M \times X_{bWta}^{su} \quad \forall bwta \quad (16)$$

محدودیت (۱۷) شرط مکان‌یابی برای مراکز تفکیک: اگر مرکز تفکیک راه‌اندازی نشود، زیست‌توده‌ای نباید از w به سمت مرکز تفکیک، خروج کند (Tavana et al., 2021)

$$\sum_{bW} Y_{bwsta}^{su-sp} \leq M \times \sum_f x_{sf}^{sp} \quad \forall sta \quad (17)$$

محدودیت (۱۸) شرط مکان‌یابی برای مراکز تفکیک: اگر مرکز تفکیک راه‌اندازی نشود، زیست‌توده‌ای نباید از s به سمت نیروگاه، خروج کند (Tavana et al., 2021)

$$\sum_{bP} Y_{bspta}^{sp-PW} \leq M \times \sum_f x_{sf}^{sp} \quad \forall sta \quad (18)$$

محدودیت (۱۹) شرط مکان‌یابی برای نیروگاه‌ها: اگر نیروگاهی راه‌اندازی نشد، نباید زیست توده‌ای به آن ارسال کرد (Tavana et al., 2021)

$$\sum_{bs} Y_{bspta}^{sp-PW} \leq M \times \sum_c x_{pc}^{PW} \quad \forall pta \quad (19)$$

محدودیت (۲۰) ارسال برق: اگر نیروگاهی راه‌اندازی نشد، نباید برقی به مشتریان ارسال کرد (Tavana et al., 2021)

$$\sum_i Y_{pita}^{PW} \leq M \times \sum_c x_{pc}^{PW} \quad \forall pta \quad (20)$$

محدودیت (۲۱) میزان زیست توده‌ای که در مراکز تفکیک؛ به‌عنوان خروجی مطلوب شناخته شده است و به نیروگاه‌ها ارسال نمی‌شود

$$Y_{bsta}^1 = \Psi_b^1 \times \sum_W Y_{bwsta}^{su-sp} \quad \forall bsta \quad (21)$$

محدودیت (۲۲) میزان زیست توده‌ای که در مراکز تفکیک؛ به‌عنوان خروجی نامطلوب شناخته شده است و به نیروگاه‌ها ارسال نمی‌شود

$$Y_{bsta}^2 = \Psi_b^2 \times \sum_W Y_{bwsta}^{su-sp} \quad \forall bsta \quad (22)$$

به‌واقع، در این مدل، مانند پژوهش (Nasiri., 2023) تصمیم‌های مهم استراتژیک و تاکتیکی گرفته می‌شود که به‌صورت زیر می‌باشند.

الف- متغیرهای تصمیم‌گیری استراتژیک:

تصمیم‌های استراتژیک، هدف اصلی را مورد توجه قرار می‌دهد. تصمیم‌های استراتژیک در شبکه زنجیره، شامل مکان‌یابی، ظرفیت و تخصیص می‌شود (Salehi et al., 2022).

۱- مکان‌یابی نیروگاه‌ها: برای ساخت نیروگاه‌ها، مکان‌هایی که امکان ساخت نیروگاه‌ها بنا به مجوزهای قانونی در آنها وجود دارد، پیشنهاد می‌گردد تا مکانی بهینه از بین آنان برگزیده شود تا هزینه کرایه حمل و نقل و هزینه انتقال برق را به حداقل ممکن برساند.

۲- ظرفیت پردازش نیروگاه‌ها: بنا به نظر خبرگان، چندین ظرفیت برای نیروگاه‌ها، بر اساس حجم زیست توده‌ها و فاصله بین مکان‌های عرضه زیست توده از یکدیگر، پیشنهاد می‌گردد که با توجه به محدودیت‌های مدل، الگوریتم، بهترین انتخاب را برای ظرفیت نیروگاه‌ها از بین ظرفیت‌های پیشنهادی انجام می‌دهد ۳- تعداد نیروگاه‌ها: با توجه به محدودیت‌های مدل، الگوریتم، بهترین انتخاب را انجام می‌دهد. ۴- مکان‌یابی مراکز تفکیک‌سازی: انتخاب مکانی است از بین مناطق پیشنهادی تا هزینه حمل‌ونقل، کمینه گردد. در مدل ریاضی ۱- به دلیل وابستگی هزینه‌های حمل‌ونقل به محل فرآوری، توجه ویژه‌ای به مکان‌یابی بهینه نیروگاه و مراکز تفکیک می‌شود. به دلیل وابستگی هزینه‌های انتقال برق به مراکز تقاضای برق، مکان‌یابی بهینه نیروگاه، دارای اهمیت می‌باشد.

۳- مبحث هزینه‌های حمل‌ونقل، از مباحث مهم در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین زیست توده می‌باشد از این رو در این پژوهش، بر نوع وسیله حمل‌ونقل، مطالعه و بررسی انجام پذیرفته است.

۴- همان‌طور که بیان گردید، با توجه به اهمیت مبحث هزینه‌ها برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین زیست توده، سایر هزینه‌ها مانند هزینه‌های تفکیک‌سازی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، نیز در نظر گرفته شده است. به کارگیری چنین تصمیم‌هایی می‌تواند انعطاف‌پذیری مدل را افزایش داده و منجر به طراحی مدلی برای کمینه کردن هزینه‌ها گردد.

ب- متغیرهای تصمیم‌گیری تاکتیکی:

تصمیم‌های تاکتیکی، راه رسیدن به اهداف را مشخص می‌نمایند بنابراین، برنامه‌ریزی تولید و توزیع، به‌عنوان تصمیم تاکتیکی می‌باشند (Badri et al., 2013).

۱- مقدار انواع زیست توده انتقالی از هر منطقه عرضه به مراکز تفکیک.

۲- مقدار انواع زیست توده تفکیک‌شده در هر مرکز تفکیک.

۳- مقدار انواع زیست توده به‌عنوان خروجی مطلوب از هر مرکز تفکیک.

۴- مقدار انواع زیست توده به‌عنوان خروجی نامطلوب از هر مرکز تفکیک.

۵- مقدار انواع زیست توده به‌عنوان خروجی ارزشمند برای ارسال به هر نیروگاه.

۶- مقدار محصول جانبی تولیدشده توسط هر نیروگاه

۷- مقدار برق انتقالی از هر نیروگاه به شهرک‌های صنعتی

۸- تعداد وسایل نقلیه برای حمل زیست توده

روش حل

روشی برای تبدیل مسائل چندهدفه فازی به مسئله تک هدفه غیر فازی (قطعی) توسط (Torabi & Hassini., 2008) ارائه گردید که به روش TH معروف 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 وزن دار، به دست می‌آید. هدف این روش کم کردن فاصله بین توابع هدف از مقدار ایده آیشان است. گام‌های این روش عبارت‌اند 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 به‌طور جداگانه بهینه شود و مقدار شدنی برای سایر توابع هدف ذخیره گردد. کمترین عدد ذخیره شده برای هر تابع هدف به‌عنوان حد پایین و بیشترین عدد ثبت شده به‌عنوان حد بالا در نظر گرفته شوند. روش‌های دیگری مانند لکسیکوگرافی نیز از جمله روش‌های پرکاربرد در این زمینه است.

۲- بعد از تعیین حدود بالا و پایین توابع هدف، تابع عضویت (درجه رضایت) توابع هدف محاسبه می‌شوند

$$\mu_1(V) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_1 > Z_1^{NIS} \\ \frac{Z_1^{NIS} - Z_{g1}}{Z_1^{NIS} - Z_1^{PIS}} & \text{if } Z_1^{PIS} \leq Z_1 \leq Z_1^{NIS} \\ 0 & \text{if } Z_1 < Z_1^{PIS} \end{cases}$$

$$\mu_2(V) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_2 > Z_2^{NIS} \\ \frac{Z_2^{NIS} - Z_{g2}}{Z_2^{NIS} - Z_2^{PIS}} & \text{if } Z_2^{PIS} \leq Z_2 \leq Z_2^{NIS} \\ 0 & \text{if } Z_2 < Z_2^{PIS} \end{cases}$$

$$0 \text{ if } Z_2 < Z_2^{PIS}$$

۳- یکپارچه کردن توابع هدف به منظور تبدیل مدل چندهدفه به یک مدل تک هدفه

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 Z_{g1} و Z_{g2}

u_g درجه رضایت تابع هدف Z_{g1} و Z_{g2}

مدل ریاضی:

$$\text{Max } \delta \times \lambda_0 + (1 - \delta) \cdot \sum_g w_g u_g$$

s.t.

$$\lambda_0 \leq u_g$$

$$\sum_g w_g = 1$$

مدل طراحی شده، در نرم افزار گمز، کدنویسی گردیده است تا باروش حل دقیق، حل گردد.

مورد مطالعه؛ زنجیره تأمین زیست توده در استان فارس

همانطور که پژوهشگرانی مانند (Mousavi Ahranjani et al., 2020)، (Saghaei et al., 2020) و (Salehi et al., 2022) و صدها پژوهشگر دیگر، یک مورد مطالعه‌ی را برای اعتبارسنجی مدل به کار برده‌اند، در اینجا نیز یک مورد مطالعه‌ی به کار می‌رود. این مورد مطالعه در استان فارس انجام پذیرفته است. در این مطالعه، زباله‌های تر و خشک شهری و پسماندهای گیاهی و حیوانی، مواد اولیه زیست توده به شمار می‌روند ده شهر استان فارس که بیشترین تولید زیست توده را دارند به‌عنوان مناطق تأمین‌کننده زیست توده انگاشته می‌شوند (کازرون، لار، نورآباد، مرودشت، شرق شیراز (کوار)، غرب شیراز (صدر)، جهرم، فیروزآباد، داراب، فسا)؛ و بنا به نظر خبرگان، شش مکان از همین ده شهر در این استان، به‌عنوان مکان‌های بالقوه برای ساخت نیروگاه بیوگاز انتخاب شده‌اند (کازرون، مرودشت،

شرق شیراز (کوار)، غرب شیراز (صدرا)، جهرم، فسا). برق تولیدی نیروگاه، به عنوان محصول اصلی به شهرک های صنعتی که در نزدیکی همین ده شهر (یعنی ده شهرک صنعتی متقاضی برق)، وجود دارند فروخته می شود و کود کشاورزی، به عنوان محصول جانبی به سایر مشتریان عرضه می گردد. در این پژوهش تا مرحله تولید محصول (برق و کود) مورد بررسی قرار گرفته است و مرحله پس از فروش محصولها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، فناوری بیوگاز از زیرمجموعه فناوریهای بیوشیمیایی برای نیروگاهها جهت تبدیل زیست توده به برق و محصول جانبی مورد مطالعه قرار گرفته است. زیست توده ها با کامیون های بیست، پانزده و ده تن از طریق جاده منتقل می شوند. بنا به نظر خبرگان، چهار سطح ظرفیت برای مراکز تفکیک، ششصد، چهارصد و بیست، سیصد و دویست تن مناسب دانسته شده است. چهار سطح ظرفیت ده، هفت، پنج و سه مگاوات برای نیروگاهها در نظر گرفته شده است. افق برنامه ریزی یک ساله است که به چهار دوره برنامه ریزی سه ماهه تقسیم می شود چهار سناریوی برای اختلالها با احتمال وقوع به ترتیب ۴۵٪، خشک سالی در مبدأ، ۲۵٪، نوسان در تقاضای برق در مقصد، ۲٪، همزمان خشک سالی در مبدأ و نوسان تقاضا در مقصد و ۱٪ بدون اختلال، تعریف شده است. بازده انواع زیست توده ها در هر دوره برنامه ریزی و تحت هر سناریو یکسان و بدون تغییر می باشد. هزینه های مختلف بنا به نظر خبرگان تعیین گردیده است. قیمت های فروش برق، از سایت وزارت (<https://news.moe.gov.ir/>) نیرو استخراج شده است. سایر مقادیر پارامترهای فازی نیز با توجه به نظر خبرگان می باشد.

یافته ها

در این قسمت، داده های واقعی از مورد مطالعه در استان فارس، به منظور تعیین مقادیر تابع اول و دوم و رسیدن به اهداف مورد نظر، وارد نرم افزار گمز شده است تا حل دقیقی برای مسئله به دست آید. برای حل، از روش TH، مقدار گاما (درجه رضایتمندی) ۲٪، در نظر گرفته شده است زیرا در این مقدار از گاما، تعداد جواب های غیر یکسان بیشتری به دست آمده است. W_1 وزن تابع هزینه است و W_2 وزن تابع کربن است از آنجا که معمولاً ضریب هزینه را بیشتر

از کرین در نظر می‌گیرند در اینجا نیز، $W_1 = .6$ در نظر گرفته شده است و W_2 برابر با $.4$ در نظر گرفته شده است. مدل، برای هر چهار دوره زمانی، چهار حالت اختلال، تمامی حالت‌های ظرفیت، هر چهار نوع زیست‌توده و سایر حالت‌ها، بهترین پاسخ ممکن را نشان می‌دهد. برخی از یافته‌ها عبارت‌اند از این‌که؛ چهار نیروگاه در چهار نقطه از بین ده نقطه پیشنهادی و در چهار ظرفیت مختلف ساخته شود. در غرب شیراز، سالانه از ۲۲۴ هزار تن زیست‌توده موجود، سه هزار تن خروجی مطلوب و دو هزار تن خروجی نامطلوب می‌باشند و از ۲۱۹ هزار تن باقیمانده که خروجی فرآیندی می‌باشند، ده مگاوات برق روزانه برابر با ۳۶۵۰ مگاوات برق سالانه تولید می‌شود. در شرق شیراز سالانه ۱۹۰۰ تن خروجی مطلوب و هزار تن خروجی نامطلوب وجود دارد و از ۱۵۳۳۰۰ تن زیست‌توده به‌عنوان خروجی فرآیندی، هفت مگاوات برق روزانه برابر با ۲۵۵۵ مگاوات برق سالیانه تولید می‌گردد. پنج مگاوات روزانه معادل ۱۸۲۵ مگاوات سالیانه در جهرم، از ۱۰۹۵۰۰ تن خروجی فرآیندی، برق تولید شود این زنجیره، دارای ۱۸۰۰ تن خروجی مطلوب و ۱۳۵۰ تن خروجی نامطلوب است؛ و در کازرون، با نهمصد تن خروجی مطلوب و پانصد تن خروجی نامطلوب، نیروگاه با دریافت ۷۳۰۰ تن خروجی فرآیندی، سه مگاوات برق به‌صورت روزانه برابر با ۱۰۹۵ مگاوات برق سالیانه، تولید می‌کند. پیشنهاد ساخت چهار مرکز تفکیک‌سازی زیست‌توده داده می‌شود با ظرفیت ششصد تن روزانه، معادل ۲۱۹۰۰۰ تن سالانه در غرب شیراز، چهارصد و بیست تن روزانه معادل ۱۵۳۳۰۰۰ تن سالانه در شرق شیراز؛ سیصد تن روزانه برابر با ۱۰۹۵۰۰ تن سالانه در جهرم و دویست تن روزانه برابر با ۷۳۰۰۰ تن سالانه در کازرون. از هر چهار نوع زیست‌توده به نسبت‌های مختلف در نیروگاه‌ها مصرف می‌گردد. هر نیروگاه از مرکز تفکیک‌سازی در همان شهر، زیست‌توده نوع فرآیندی را دریافت می‌کند. مرکز تفکیک‌سازی، زیست‌توده‌های نوع مطلوب را به فروش می‌رساند و نوع نامطلوب را در مکانی خارج از نیروگاه، می‌سوزانند. مرکز تفکیک‌سازی شرق شیراز از فیروزآباد تأمین زیست‌توده می‌گردد مرکز تفکیک‌سازی غرب شیراز از مرودشت، مرکز تفکیک‌سازی جهرم از فسا و داراب و مرکز تفکیک‌سازی کازرون از نورآباد، تأمین مواد

اولیه می گردد.

سه نوع وسیله حمل زیست توده با ظرفیت های ده تن، پانزده تن و بیست تن به کار گرفته می شود که تعداد آن برای مراکز مختلف تفکیک سازی و نیروگاه های مختلف، متفاوت است. برق شش متقاضی، تأمین می گردد. (غرب شیراز (صدرا)، شرق شیراز (کوار)، کازرون، جهرم، فسا، مرودشت). مقدار تابع هدف اول، ۲۸۱۸۰۷۷۰۹۳۵۱ تومن سالیانه می باشد و مقدار تابع هدف دوم، برابر با ۴۹۷۴۳۳۰ گرم دی اکسید کربن سالیانه می باشد یعنی تقریباً ۴۹۷۰ کیلوگرم سالیانه در مسیر انتقال زیست توده ها، دی اکسید کربن در فضا منتشر می گردد. میزان کود تولیدی نیز بنا به سناریوهای مختلف و در دوره های مختلف، متفاوت می باشد به عنوان مثال، کود تولیدی در حالت سناریو بدون اختلال، در نیروگاه شرق شیراز، سالیانه برابر با چهارصد و شصت تن می باشد (دوره اول، ۱۳۵ تن؛ دوره دوم ۱۲۵ تن دوره سوم ۱۱۰ تن و دوره چهارم ۹۰ تن) نیروگاه غرب شیراز سالانه ششصد و شصت تن، نیروگاه جهرم دویست و چهل تن و نیروگاه کازرون صد و پنجاه تن کود تولید می کند. نتایج برخی از متغیرها در جدول ۵ در زیر نشان داده شده است.

جدول ۵. برخی از متغیرهای استراتژیک و تاکتیکی

متغیرهای تاکتیکی							متغیرهای استراتژیک			w	
U _{pta}	Y ^{PW} _{pita}		∑ _{bspta} Y ^{SP-PW} _{bspta}		Y ² _{bsta}	Y ¹ _{bsta}	∑ _{bwsta} Y ^{SU-SP} _{bwsta}	i	p		s
	سالیانه	روزانه	سالیانه	روزانه							
۶۶۰	۳۶۵۰	۱۰	۲۱۹۰۰۰	۶۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۲۲۴۰۰۰	غرب شیراز مرودشت	غرب شیراز	غرب شیراز	غرب شیراز و مرودشت
۴۶۰	۲۵۵۵	۷	۱۵۳۳۰۰	۴۲۰	۱۰۰۰	۱۹۰۰	۱۵۶۲۰۰	شرق شیراز	شرق شیراز	شرق شیراز	شرق شیراز و فیروزآباد
۴۴	۱۸۲۵	۵	۱۰۹۵۰۰	۳۰۰	۱۳۵۰	۱۸۰۰	۱۱۳۱۰۰	جهرم	جهرم	جهرم	جهرم

متغیرهای تاکتیکی								متغیرهای استراتژیک			w
U _{pta}	Y ^{PW} _{pta}		∑ _{bspta} Y ^{SP-PW} _{bspta}		Y ² _{bspta}	Y ¹ _{bspta}	∑ _{bwsta} Y ^{SU-SP} _{bwsta}	i	p	s	
	سالانه	روزانه	سالانه	روزانه							
								فسا			فسا و داراب
۴۲	۱۰۹۵	۳	۷۳۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۹۰۰	۷۴۴۰۰	کازرون	کازرون	کازرون	کازرون و نورآباد
۲۸۱۸۰۷۷۰۹۳۵۱ تومن						تابع هدف اول					
۴۹۷۴۳۳۰ گرم دی اکسید کربن						تابع هدف دوم					

بنا به جدول ۵ در بالا، مقدار زیست توده انتقالی از چند تأمین کننده و میزان تقاضای برق از چند متقاضی، به صورت جمع کل، ارائه گردیده است

تحلیل حساسیت

برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی و بررسی دقت نتایج به دست آمده، در این بخش، تحلیل حساسیت، روی ضرایب تابع هدف پیاده سازی می شود. برای این منظور، ضریب یک تابع هدف را افزایش داده و به طور هم زمان ضریب یک تابع هدف دیگر را کاهش داده، به دلیل اینکه ضریب هر دو تابع هدف، از نوع کمینه سازی هستند، انتظار می رود وقتی ضریب یک تابع هدف افزایش می یابد، نتایج تابع هدف بدتر نشود و ضریب تابع هدف دیگر که کاهش می یابد، انتظار می رود که نتایج تابع هدف، بهتر نشود. روند تغییرات برای تابع هدف اول و دوم با در نظر گرفتن چهار سناریو مختلف برای ضرایب تابع هدف در جدول ۶ ارائه گردیده است.

جدول ۶. تحلیل حساسیت بر روی ضرایب تابع هدف

شماره سناریو	W ₁	W ₂	تابع هدف اول	تابع هدف دوم
۱	.۳	.۷	۳۷۰۱۰۰۰۲۳۶۵۶	۴۰۴۹۹۲۰
۲	.۴	.۶	۳۳۹۲۸۹۷۵۲۶۶۲	۴۳۰۲۱۱۰

شماره سناریو	W ₁	W ₂	تابع هدف اول	تابع هدف دوم
۳	.۵	.۵	۳۰۷۴۰۲۱۴۹۴۵۵	۴۶۴۳۸۵۰
۴	.۷	.۳	۲۵۶۸۷۷۴۶۸۲۹۲	۵۴۰۲۷۳۰

جدول ۶ در بالا نشان می‌دهد که افزایش ضریب تابع هدف اول، منجر می‌گردد تا مقادیر تابع هدف اول کاهش یابد و کاهش ضریب تابع هدف دوم، به‌طور هم‌زمان باعث می‌گردد تا مقدار تابع هدف دوم، افزایش پیدا کند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت، همسویی کامل با انتظارات، از مدل پیشنهادی است بنابراین، کارایی، اعتبار و دقت مدل، تأیید می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی برای یک شبکه زنجیره تأمین زیست توده، به‌منظور توسعه پایدار و ایجاد تاب‌آوری طراحی شده است. مدل طراحی شده، یک مدل توسعه‌یافته است این مدل توسعه‌یافته، یک مدل MILP دو هدفه است که شامل یک هدف اقتصادی برای کاهش هزینه‌های کل و همچنین، شامل یک هدف زیست‌محیطی برای کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. برای بهینه‌سازی مدل، از رویکرد سناریو محور، برای کنترل عدم قطعیت برخی از پارامترها، استفاده شده است. مدل طراحی شده به این دلیل، مدل توسعه پایدار است که دو جنبه از سه جنبه پایداری را دارا می‌باشد یعنی جنبه کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و جنبه کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی را دارا می‌باشد. موسوی آهنجانی و همکاران، (۲۰۱۹)، (Toba et al., 2023) و (Ghaderi et al., 2016) نیز، کاهش هزینه‌های اقتصادی و کاهش انتشار کربن را به‌عنوان، پایداری مدل، برشمرده‌اند.

تاب‌آوری، توانایی زنجیره تأمین برای چیره شدن بر رخدادهای پیش‌بینی نشده است در نتیجه به روش‌های گوناگونی می‌توان یک زنجیره تأمین را تاب آور نمود و این، بستگی دارد به اینکه چه بخش‌هایی از زنجیره تأمین، در برابر چه پیشامدهایی آسیب‌پذیر باشند و مورد اختلال قرار گیرند. همان‌گونه که (Ponomarov et al., 2009) بیان داشتند؛ در هنگام رخ دادن اختلال، باید از الگوی زنجیره تأمین تاب آور، استفاده نمود زیرا چنین الگویی،

آمادگی روبه‌رویی با هر نوع پیشامدی را خواهد داشت و علاوه بر ارائه پاسخی اثربخش و کارا، توانایی بازگرداندن زنجیره تأمین به وضعیت اولیه یا بهتر را، پس از اختلال، دارا است. در اینجا نیز، الگوی زنجیره تأمین تاب آور، برای رویارویی با هر نوع پیشامدی که از نوع عدم قطعیت نیز می‌باشند، از رویکرد سناریو محور احتمالی استفاده نموده است. تاب‌آوری در سطوح بدین گونه است که (۱) در سطح تأمین‌کننده تعریف شده است بدین صورت که با در نظر گرفتن تأمین‌کننده‌های زیاد این امکان را به زنجیره تأمین می‌دهد که در مبدأ، نیز، با وجود اختلال‌هایی که وجود دارد که منجر به نوسان در عرضه زیست‌توده می‌شود، زیست‌توده موردنیاز، تأمین گردد و شبکه، دچار اختلال و بی‌نظمی نگردد یعنی پیشگیری از اختلال را انجام می‌دهد. (۲) در سطح ظرفیت مراکز تفکیک‌سازی مطرح گردیده است بدین صورت که مدل، متناسب با میزان زیست‌توده در دسترس و متناسب با ظرفیت تولیدی نیروگاه، سطح ظرفیت بهینه تفکیک‌سازی را انتخاب می‌کند. (۳) در سطح ظرفیت نیروگاه تعیین شده است بدین صورت که مدل، متناسب با عرضه مواد اولیه، تقاضای برق و فرآیند تفکیک‌سازی، سطح ظرفیت تولیدی را مشخص می‌نماید. پژوهش (Veland et al., 2013) نیز به روش‌هایی متفاوت، پیشگیری از اختلال را، تاب‌آوری می‌دانند. از این رو مدل برای تأمین زیست‌توده، هیچ‌گاه دچار بحران نمی‌شود حتی در بدترین حالت، مدل می‌تواند با تأمین زیست‌توده مورد نیاز، برق تولید نماید و تقاضای برق مشتریان را برآورده سازد.

مدل، اقدام به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و تاکتیکی به‌طور هم‌زمان می‌نماید. تصمیم‌گیری‌های استراتژیک شامل مکان‌یابی برای نیروگاه و مراکز تفکیک‌سازی، تعیین ظرفیت برای نیروگاه‌ها و مراکز تفکیک‌سازی، تعیین تعداد مراکز تفکیک‌سازی و تعیین تعداد نیروگاه‌ها است. انتخاب نوع فناوری با مطالعه در پیشینه‌ها انتخاب گردیده است. تصمیم‌های تاکتیکی شامل مواردی مانند برآورد مقدار زیست‌توده مطلوب، نامطلوب و ارسالی، میزان محصول تولیدی اصلی و فرعی، میزان برق انتقالی به مشتریان و مشخص نمودن میزان هزینه‌های زنجیره تأمین زیست‌توده و میزان انتشار کربن می‌باشد. عدم قطعیت در پارامترها، مانند تغییر در مقدار زیست‌توده‌ها است این نوع عدم قطعیت تحت تأثیر اختلال‌های

خشک سالی و نوسان تقاضای برق است. برای تبدیل این عدم قطعیت به قطعیت، از سناریو استفاده می گردد. عدم قطعیت در متغیرها، شامل تقاضای ناپایدار برق می باشند. این نوع عدم قطعیت با روش حل TH فازی به قطعی تبدیل می گردد همچنین روش حل TH، مدل دو هدفه را به تک هدفه تبدیل می کند.

در مورد مطالعه، از بین ده مرکز تأمین کننده زیست توده، از نه تأمین کننده خریداری مواد اولیه انجام گرفته است بدین وسیله، مدل تاب آوری از نظر تأمین زیست توده را دارا می باشد. مدل بهترین نوع تخصیص را بین اعضا زنجیره تأمین انجام داده است تا میزان انتشار گازهای گلخانه ای را کمینه نماید. همچنین اقتصادی ترین حالت ممکن را در نظر گرفته است. بخشی از زیست توده، وارد فرآیند تولید انرژی نمی شوند زیرا یا صرفه اقتصادی ندارند و یا دارای ارزشی بیشتر از این هستند که تبدیل به انرژی گردند و می توانند به چرخه مصرف برگردند. تأثیر خروجی های مطلوب و نامطلوب بر مدل بدین صورت است که اگر این دو متغیر در نظر گرفته نمی شدند میزان برق تولیدی سالیانه غرب شیراز، ۸۳ مگاوات بیشتر نشان داده می شد که از واقعیت به دور بود برق تولیدی سالیانه شرق شیراز ۴۸ مگاوات بیشتر بیان می شد. تولید برق سالانه نیروگاه جهرم ۵۲ مگاوات بیشتر نشان داده می شد و میزان تولید برق سالیانه نیروگاه کازرون، ۲۱ مگاوات بیشتر از واقعیت نشان داده می شد. در مجموع، افزایش تولید کاذب سالانه، برابر با ۲۰۴ مگاوات برق، می باشد که این میزان برق تولیدی کاذب، برابر با ۲/۱ درصد از برق تولیدی کل در استان فارس می باشد؛ که در این پژوهش، بامدل کردن خروجی های مطلوب و نامطلوب، میزان واقعی تولید برق به دست می آید. با انجام تحلیل حساسیت، نتایج به دست آمده، تضاد بین توابع هدف را نشان می دهد که عملکرد درست و منطقی مدل را بیان می دارد از این رو اعتبار مدل تأیید می گردد؛ و پیشنهاد می گردد در توسعه این مدل، مدت زمان رسیدن کامیون ها بین مکان ها، مشخص گردد و به مدل اضافه شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی وجود ندارد.

ORCID

Davod Dehghan



<https://orcid.org/0009-0000-2868-1360>

Kiamars Fathi Hafshejani



<https://orcid.org/0000-0001-5904-0152>

Jalal Haghghat
Monfared



<https://orcid.org/0000-0002-5741-0532>

منابع

1. Aranguren Maria, K.Castillo-Villar Krystel, Aboytes-Ojeda Mario (2021). A two-stage stochastic model for co-firing biomass supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*.
2. Awudu I, Zhang J (2012) Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 16:1359–1368
3. Azadeh A, Arani HV (2016) Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics-mathematical programming approach. *Renew Energy* 93:383–403
4. Azadeh A, Arani HV, Dashti H (2014) A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain. *Energy* 76:513–525
5. Akgül, A., & Seçkiner, S. U. (2019). Optimization of biomass to bioenergy supply chain with tri-generation and district heating and cooling network systems. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106017.
6. Badri, H., Bashiri, M., Hejazi, T.H. (2013). Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method, *Computers & Operations Research*, 40, 1143–1154
7. Bai Y, Li X, Peng F, Wang X, Ouyang Y (2015) Effects of disruption risks on biorefinery location design. *Energies* 8:1468–1486
8. Cyplik Piotr, Zwolak Mateusz (2022). Industry 4.0 and 3d Print: A New Heuristic Approach for Decoupling Point in Future Supply Chain Management.
9. Condori, Bruno. Hijmans, Robert J. Quiroz, Roberto. Ledent, Jean-François (2010). *Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling*. Field Crops Research. 135-144
10. Fahimnia B, Jabbarzadeh A (2016) Marrying supply chain sustainability and resilience: a match made in heaven. *Transp Res E Logist Transp Rev* 91:306–324
11. Fattahi M, Govindan K (2018) A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: a real-life case study. *Transp Res E Logist Transp Rev* 118:534–567
12. Ghaderi H, Pishvae MS, Moini A (2016) Biomass supply chain network design: an optimization-oriented review and analysis. *Ind Crops Prod* 94:972–1000
13. Govindan, K., Nosrati-Abarghoee, S., Nasiri, M. M., & Jolai, F. (2022).

Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach. *Journal of Environmental Management*, 322, 115888.

14. Guo, Changqiang, Hu, Hao, Wang, Shaowen, Rodriguez, Luis F, Ting, K.C, Lina, Tao (2022). Multiperiod stochastic programming for biomass supply chain design under spatiotemporal variability of feedstock supply.
15. Ghazavi, S., Habib, F., & Nahibi, S. (2021). Environmental Design of Civic Wastes Location, with Emphasis on Ecological Landscape Design (Case study: Kahrizak landfill of Tehran). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(2), 101-116. doi: 10.22034/jest.2019.47021.4809
16. Lee Yuen Lo Shirleen, Shen How Bing, Yong Teng Sin, Loong Lam Hon, Hsion Lim Chun, Rhamdhani Muhammad Akbar, Sunarso Jaka (2021). Stochastic techno-economic evaluation model for biomass supply chain: A biomass gasification case study with supply chain uncertainties.
17. Mousavi Ahranjani, Parisa, Ghaderi, Seyed Farid, Azadeh, Ali, Babazadeh, Reza. (2020). Robust design of a sustainable and resilient bioethanol supply chain under operational and disruption risks *Clean Technologies and Environmental Policy* <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01773-2>
18. Marufuzzaman M, Ekşioğlu SD (2016) Designing a reliable and dynamic multimodal transportation network for biofuel supply chains. *Transp Sci* 51:494–517
19. Mohseni, S., & Pishvaei, M. S. (2020). Data-driven robust optimization for wastewater sludge-to-biodiesel supply chain design. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105944.
20. Nasiri, Mohammad Mahdi, Mousavi, Hossein, Nosrati-Abarghoee, Saeede (2023). A green location-inventory-routing optimization model with simultaneous pickup and delivery under disruption risks. *Decision Analytics Journal*. doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100161
21. Osmani A, Zhang J (2017) Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain—a logistic case study in Midwestern United States. *Land Use Policy* 61:420–450
22. Pérez ATE, Camargo M, Rincón PCN, Marchant MA (2017) Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: a bibliographic analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 69:350–359

23. Poudel SR, Marufuzzaman M, Bian L (2016) Designing a reliable biofuel supply chain network considering link failure probabilities. *Comput Ind Eng* 91:85–99
24. Ponomarov, Serhiy Y., and Mary C. Holcomb, (2009). "Understanding the concept of supply chain resilience . *The International Journal of Logistics Management* 20(1), 124 -143.
25. Salehi. Somaie, Zare Mehrjerdi. Yahia, Sadegheih. Ahmad, Hosseini-Nasab. Hasan. (2022). Designing a resilient and sustainable biomass supply chain network through the optimization approach under uncertainty and the disruption. *Journal of Cleaner Production*.
26. Syahira Mohd Yahya Nur, Yin Ng Lik, Andiappan Viknesh. (2021). Optimisation and planning of biomass supply chain for new and existing power plants based on carbon reduction targets. *Energy*.
27. Saghaei. Mahsa, Ghaderi. Hadi, Soleimani. Hamed. (2020). Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Energy*
28. Torabi, S.A., Hassini, E., (2008). "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning", *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2): 193-214.
29. Toba, Ange-Lionel, Rajiv Paudel, Yingqian Lin, Rohit V. Mendadhala, and Damon S. Hartley. 2023. "Integrated Land Suitability Assessment for Depots Siting in a Sustainable Biomass Supply Chain" *Sensors* 23, no. 5: 2421. <https://doi.org/10.3390/s23052421>
30. Tavana, M., Tohidi, H., Alimohammadi, M., & Lesansalmasi, R. (2021). A location-inventory-routing model for green supply chains with low-carbon emissions under uncertainty. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 50636-50648
31. Umakanth, A. V., Datta, A., Reddy, B. S., & Bardhan, S. (2022). Biomass feedstocks for advanced biofuels: Sustainability and supply chain management. *Advanced Biofuel Technologies*, 39-72.
32. Veland, S., Howitt, R., Dominey-Howes, D., Thomalla, F., & Houston, D. (2013). Procedural vulnerability: Understanding environmental change in a remote indigenous community. *Global Environmental Change*, 23(1), 314-326.
33. Zailan Roziah, Shiun Lim Jeng, Abdul Manan Zainuddin, Rafidah Wan Alwi Sharifah, Mohammadi-ivatloo Behnam, Jamaluddin Khairulnadzmi (2021). Renewable and Sustainable Energy Reviews
34. Zand Atashbar, N., Labadie, N., Prins, C., 2018. Modelling and optimisation of biomass supply chains: a review. *Int. J. Prod. Res.* 56, 3482–3506

35. Zarrat Dakhely Parast, Z., Haleh, H., Avakh Darestani, S., & Amin-Tahmasbi, H. (2021). Green reverse supply chain network design considering location-routing-inventory decisions with simultaneous pickup and delivery. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-22.

استناد به این مقاله: دهقان، داود، فتحی هفشجانی، کیامرث، حقیقت منفرد، جلال. (۱۴۰۲). طراحی مدل ریاضی زنجیره تأمین زیست توده برای ساخت نیروگاه با وجود اختلال، مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۱(۷۰)، ۲۶۱-۲۹۶.
DOI: 10.22054/jims.2023.71570.2834



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.