فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال هجدهم/ شماره ۶۵ / پاییز ۱۴۰۲

بهینه سازی شبکه زنجیره تامین زیست توده در چهار سطح

داود دهقان
گروه مدیریت صنعتی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران
کیامرث فتحی هفشجانی(نویسنده مسؤول)
استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: fathikiamars@yahoo.com
جلال حقیقت منفرد
استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۵/۰۶

چکیده
آلایندگی بر اثر دفن زیست توده ها، امکان تولید انرژی پاک از زیست تودهها و تقاضای زیاد برای دریافت انرژی، بهینه سازی شبکه زنجیره تامین زیست توده را مهم و ضروری ساخته است. هدف این مقاله، بهینه سازی شبکه زنجیره تامین زیست توده در چهار سطح به منظور کاهش هزینه های اقتصادی و زیست محیطی است. مهم ترین شکاف پژوهش برطرف شده در این مقاله، تعیین خروجیهای مطلوب و نامطلوب زیست توده ها در مراکز تفکیک سازی و در نظرگرفتن حالت چند دوره ای، چندمحصولی با وسایل حمل و نقل ناهمگن است. مدل پژوهش، دو هدفه برنامهریزی خطی عدد صحیح مختلط با عدم قطعیت و اختلال است. بدین منظور چهار سناریو، طراحی گردید. مدل با روش الگوریتم ژنتیک و MOPSO و با نرم افزار پایتون حل گردید. اعتبارسنجی مدل، در یک مورد مطالعه ای واقعی در استان فارس بررسی شده است. مدل پیشنهادی توانسته است به طور همزمان پایداری و تاب آوری را پیاده سازی نماید که موجب کاهش هزینه ها، کاهش انتشار کربن و افزایش تجاری شدن تولید انرژی از زیست توده ها شده است. از اینرو سبب افزایش تمایل سرمایه گذاران به سرمایه گذاری در این شبکه از زنجیره تامین میشود. مدل پیشنهادی میزان تولید انرژی را ۲/۱ درصد نسبت به زمانی که خروجیهای مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته نشوند، کمتر نشان می دهد یا به عبارتی، به واقعیت بسیار نزدیکتر می کند. با انجام تحلیل حساسیت بر روی داده های واقعی، کارایی مدل اثبات گردید.

کلمات کلیدی: تأمین مالی، زنجیره تأمین، صنعت مونتاژ لوازم خانگی، تحلیل مضمون.

۱-مقدمه

با پیدایش انقلاب صنعتی سوم، تولید محصولات صنعتی و کشاورزی افزایش یافت و این محصولات، تولید زباله ها یا همان زیست توده ها را در جوامع انسانها افزایش دادند (Ferronato, Alarcón, Lizarazu & Torretta, 2020). اتحادیه اروپا زیست توده ها را شامل، زباله های صنعتی، شهری، پسماندهای کشاورزی، جنگلی و حیوانی برمی شمارد این زیست توده ها به عنوان ماده اولیه ای برای تولید سوخت، انرژی و گرما استفاده می شوند(Ghaderi, Pishvaee & Moini, 2016). حال افزایش روزافزون زیست توده ها، جوامع انسانی را دچار آلودگی های زیست محیطی نموده است (Ghaderi et al., 2016). تا جایی که امروزه، این آلودگی ها، یکی از عوامل مهم مرگ و میر در سطح جهان است بنا به آمارها، مرگ و میر ناشی از آلودگی ها در سال ۲۰۲۰ به چهار و نیم میلیون تن افزایش یافته است و شامل از دست دادن ۲۲۵ میلیارد دلار درآمد نیروی کار و از دست دادن ۵/۱۱ تریلیون دلار درآمدرفاهی مردم جهان شده است (Rasekh, Hamidzadeh. Sahebi & Pishvaee, 2020) و باید در نظر داشت دستیابی به هدف کربن صفر بنا به پیمان پاریس که در سال ۲۰۱۵ امضا شده است ضروری است (Prado, Chiquier, Fajardy & Mac Dowell 2023).

در همین راستا از چند دهه گذشته، یکی از راههای مناسب برای کاهش این آلودگی ها، تبدیل نمودن زیست توده ها به انرژی می باشد. از اینرو چگونگی گردآوری، حمل و نقل و پردازش زیست توده ها، دارای اهمیت فراوانی شده است (Ferronato et al., 2020). بخش حمل و نقل، خود بیست و دو درصد از انتشار جهانی کربن را تشکیل می دهد (Zarei. Shams. Niaz et al., 2022). از اینرو مکانیابی بهینه تاسیسات و بهینه سازی برای استفاده از انواع وسایل نقلیه، علاوه بر اینکه هزینه‌ها را کاهش می‌دهند، اثرات زیانبار زیست‌محیطی را نیز، به دلیل کاهش در مصرف سوخت، کاهش می‌دهد (Qazvini, Haji & Mina, 2019). مکان غیربهینه تاسیسات، موجب افزایش هزینه ها و فزونی تخریب محیط زیست میشود که موجب کاهش عرضه زیست توده و افزایش قیمت زیست توده میگردد و کاهش پاسخگویی به تقاضای مشتریان و افزایش هزینه های شبکه زنجیره تامین را درپی دارد و بدین سان، موجب اختلال در شبکه زنجیره تامین زیست توده میگردد (Liu, Tian, Fathollahi-Fard & Mojtahedi, 2020)

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 شده اند هوا را به شدت در ایران آلوده کرده اند و باعث تغیر اقلیمی در کشور گشته اند از سویی دیگر با توجه به اینکه چهارده درصد برق تولیدی کشور ایران از آبهای پشت سدها میباشد (Khabaronline.ir/news/604293). روند خشکسالی کشورمان نیز شدت گرفته است که با کم شدن سطح آب های پشت سدها، میزان برق تولیدی نیز با کاهش مواجه شده است و تولید برق با سوختهای فسیلی نیز، علاوه بر آثار مخرب زیست محیطی که این سوختهای فسیلی به بار می آورند، رو به اتمام نیز گذاشته اند و وزارت نیرو برای مقابله با کمبود برق، مجبور به قطع برق برخی مناطق بویژه شهرکهای صنعتی شده است بنابراین با توجه به اینکه زیست توده ها، منابع بسیار بزرگی برای تولید انرژی هستند میتوان با تبدیل زیست توده ها به انرژی، انتشار گازهای آلاینده را کاهش داد و برق شهرکهای صنعتی را نیز تامین نمود اما مشکل در اینجا است که، شبکه زنجیره تامین زیست توده، دارای راندمان پایین، پیچیدگی زیاد فرآیند و هزینه های بالا برای تولید انرژی است و در مجموع، بنا به پنج دلیل، انجام این پژوهش دارای اهمیت و ضرورت میباشد

- وجود روزانه ده ها هزاران تن زیست توده که انباشت و دفن آنها، موجب تولید بیشتر گازهای خطرناک متان و دی اکسید کربن میگردد اقلیم کشور را بیشتر آسیب پذیر مینماید و سلامت جامعه را تهدید میکند؛
- کاهش روزافزون آبهای پشت سدها که میزان تولید برق آبی را بیشتر کاهش میدهد و اختلالات در شبکه برق را بیشتر میکند؛
- قطع مداوم برق در شهرکهای صنعتی، ضررهای مالی شدیدتری را به صنایع وارد مینماید و میزان سرمایه گذاریها را کاهش میدهد؛

- ابهام هایی که در میزان و نوع هزینه های اقتصادی شبکه زنجیره تامین زیست توده وجود دارد که مانع از بهینه سازی واقعی با هدف اقتصادی شده است؛
- به دلیل پیچیدگی و سختی در محاسبات انتشار کربن در حوزه مطالعاتی زیست توده، بیشتر پژوهش های گذشته، بهینه سازی درستی ارائه نداده اند.

در مجموع، این پژوهش با این هدف که سرمایه گذاری در منابع تجدیدپذیر زیست توده برای تولید انرژی، با رویکرد کمینه سازی هزینه های اقتصادی و کمینه نمودن انتشار کربن، گسترش یابد، انجام شده است از اینرو سوال اصلی پژوهش این است که طراحی مدل شبکه زنجیره تامین زیست توده، در چهار سطح چگونه است؟

۲- روش شناسی پژوهش

الف) پیشینه نظری

در پژوهش مروری که آرانگورن و همکاران[1] (۲۰۲۱) انجام دادند بیان نمودند تمامی مقاله هایی که در زمینه شبکه زنجیره تأمین زیست توده[2] از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱ ارائه شده اند ۲۱/۵ درصد از مقاله ها عدم قطعیت را مورد پژوهش قرار داده اند. پارامترهایی مانند عرضه و تقاضای زیست توده، تقاضای سوخت زیستی، کیفیت زیست توده، قیمت ها و هزینه های مختلف و اثرات زیست محیطی، به عنوان پارامترهای عدم قطعیت بررسی شده اند. اما پژوهشهایی اندکی در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست توده با رویکرد اختلال، تاکنون انجام شده است. زنجیره تأمین، عملیاتی سازمانی است که از خرید مواد اولیه تا تحویل کالا و یا خدمات به مشتری نهایی را دربر میگیرد (Akdogan & Demirtas, 2014). شبکه زنجیره تأمین، زیر ساخت کسب و کار است که برای تولید و توزیع در شرکتهایی که کالا و یا خدمات می فروشند (Douglas, 2008) در زنجیره تامین، مواردی همچون پایداری (Nilsson & Göransson, 2021) و تاب آوری (Al-Hakimi & Borade, 2020) زنجیره تأمین در نظر گرفته می شوند.

مدیریت زنجیره تأمین پایدار، توانایی در برآورده نمودن انتظارات اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در درازمدت و به طور همزمان است (Fritz, Ruel, Kallmuenzer & Harms, 2021) و (Christopher & Peck, 2004) جزو اولین کسانی بودند که تاب آوری زنجیره تامین (SCR) را به عنوان قابلیت زنجیره تامین برای بازگشت زنجیره تامین به حالت اولیه یا وارد شدن به حالت جدید و مطلوبتر پس از پشت سر گذاشتن یک اختلال تعریف کردند (Kamalahmadi & Parast, 2016). تاب آوری زنجیره تامین را به عنوان انعطافپذیری و سازگاری یک زنجیره تامین برای کاهش احتمال مواجهه با رویدادهای پیش بینی نشده، پیشگیری از رخداد اختلالات از طریق حفظ کنترل بر ساختار و عملکرد، و واکنش سریع و موثر به اختلالات و بازیابی از اختلالات تعریف کردند و برنامه های از پیش تعیین شده برای غلبه بر اختلال و برگرداندن زنجیره تامین به حالت استوار ارائه نمود.

ب) پیشینه تجربی

روا و چروکوا[3] (۲۰۲۱) مطالعه ای بر روی شبکه زنجیره تامین زیست توده ذرت، جهت دستیابی بهینه به انرژی با روش الگوریتم فراابتکاری انجام دادند هر چهار نوع الگوریتم فراابتکاری، نتایج تقریبا یکسانی را ارائه نمودند اما الگوریتم فاخته نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کرم شب تاب، نتایج بهتری ارائه نمود (Toba et al., 2023) یک زنجیره تامین زیست توده پایدار نیازمند یک سیستم حمل و نقل موثر است و به ویژگی های خوب خاک نیز نیاز دارد پس باید عوامل اکولوژیکی در نظر گرفته شوند. یعنی عوامل اکولوژیکی و همچنین عوامل اقتصادی باید برای توسعه زنجیره تامین پایدار ادغام شوند. با استفاده از داده‌های مکانهای پیشنهادی، یک چارچوب یکپارچه ارائه می‌شود که مناسب بودن تولید زیست توده را مدل‌سازی می‌کند و جنبه اقتصادی را از طریق تجزیه و تحلیل شبکه حمل‌ونقل و جنبه زیست‌محیطی را از طریق شاخص‌های اکولوژیکی به تصویر می‌کشد کاربرد

[1] Aranguren, Castillo-Villar, Aboytes-Ojeda and Mario
[2] BSCN
[3] Roeva & Chorukova

این مفهوم نوآورانه در یک مطالعه موردی در اقیانوس اطلس جنوبی ایالات متحده، در منطقه پیدیمونت[۴]، تعیین مسافت طی شده و مکان های انبار، با مفاهیمی در طراحی زنجیره تامین انجام شده است. طراحی زنجیره تامین مبتنی بر انبار غیرمتمرکزتر با سه انبار، از دو انبار، مقرون به صرفه‌تر و سازگارتر با محیطزیست می باشد. در اولی، فاصله مزارع تا انبارها در مجموع ۸۰۱،۰۳۱،۴۷۶ مایل است، در حالی که در دومی، به ۱،۰۳۷،۶۰۶،۰۷۲ مایل می رسد، که حدود ۳۰٪ مسافت بیشتری را برای حمل و نقل مواد اولیه طی می کند.

نتایج تحقیق نصیری و همکاران (۲۰۲۳) در طراحی شبکه های زنجیره تامین با در نظر گرفتن تصمیمات استراتژیک و عملیاتی، افزایش کارایی شبکه و کاهش هزینه ها را نشان داد. بهینه سازی تصمیمهای استراتژیک مانند مکان یابی تاسیسات و تصمیمها عملیاتی مانند مسیریابی وسایل نقلیه، تا حد زیادی بر سبز بودن شبکه تاثیر می گذارد و مدلی را تحت ریسک‌های اختلال پیشنهاد می‌کند. هدف مدل پیشنهادی به حداقل رساندن تقاضاهای از دست رفته است و هزینه های کل شبکه به عنوان محدودیت های بودجه در نظر گرفته می شود. یک رویکرد مبتنی بر سناریو برای غلبه بر عدم قطعیت تقاضا و خطرات ناشی از اختلال در ظرفیت مراکز اعمال می شود. هفت مسئله با اندازه‌های مختلف با استفاده از یک الگوریتم شبیه‌سازی تولید می‌شوند و این مسائل اثربخشی مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته را بررسی می‌کنند. در نهایت، تحلیل حساسیت بودجه صحت عملکرد مدل ارائه شده را تایید میکند.

منسی و همکاران[۵] (۲۰۲۳) مدلی بهینه برای تولید برق از زیست توده، در مناطق دور افتاده عربستان، طراحی نمودند و برای حل، از الگوریتمهای فراابتکاری ازدحام ذرات، بهینه سازی گرگ خاکستری استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که الگوریتم ازدحام جمعیت، هزینه های اقتصادی را برق رسانی، بهینه تر میکند.

گوو و همکاران[۶] (۲۰۲۲) عدم قطعیت‌های مکانی–زمانی در گردآوری بقایای محصول چالش‌های بزرگی را برای گسترش یک شبکه زنجیره تأمین زیست توده به سوخت زیستی درازمدت و اقتصادی (BSCN) ایجاد می‌کند. یک مدل برنامه ریزی تصادفی چند دوره ای (SP[۷]) با در نظر گرفتن حذف نامشخص ذرت قابل جمع آوری و نرخ مشارکت کشاورز توسعه داده شده است. اگرچه هزینه حمل و نقل زیست توده ناپایدارترین جزء هزینه است.

لی یون و همکاران[۸] (۲۰۲۲) در یک مقاله مروری با تجزیه و تحلیل فنی–اقتصادی زنجیره تامین زیست توده، شش عدم قطعیت قابل اندازه‌گیری را شناسایی نمودند که شامل: (۱) در دسترس بودن زیست توده، (۲) کیفیت زیست توده، (۳) هزینه حمل و نقل، (۴) تقاضای بازار، (۵) نوسانات قیمت گذاری و (۶) دستمزد کارگران است.

آرانگورن و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل تصادفی دو مرحله ای برای شبکه زنجیره تامین زیست توده طراحی نمودند مدل شبکه هاب و اسپوک تصادفی و یک راه حل کارآمد برای به حداقل رساندن هزینه های لجستیکی با یافتن یک شبکه تولید و توزیع بهینه و همچنین حمل و نقل بهینه و در عین حال کاهش بار محاسباتی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری، مانند آنیل شبیه سازی شده، پیشنهاد شده است. حل نمونه های بزرگ NP-hard. روش راه حل پیشنهادی با معیار اخیر مقایسه شد. سیاهیرا و همکاران[۹] (۲۰۲۱) بهینه سازی و برنامه ریزی زنجیره تامین زیست توده برای نیروگاه های موجود را بر اساس اهداف کاهش کربن بررسی نمود و عدم قطعیت‌هایی مانند تغییرات درعرضه زیست توده که ناشی از وابستگی فصلی زیست توده است را مورد توجه قرار داد.

جدول شماره (۱): برخی از پیشینه های مربوط به شبکه زنجیره تامین زیست توده

پژوهشگر	مسئله مورد بررسی	رویکرد	تابع هدف	الگوریتم حل	ناوگان باربری

[4] Piedmont
[5] Menesy et al.
[6] Guo et al.
[7] stochastic programming
[8] Lee Yuen et al.
[9] Syahira et al.

Zeinodin Zadeh, Amiri, Olfat & Pishvaee (2023)	مسیریابی – مکانیابی	بهینه سازی استوار	اقتصادی، اجتماعی و زیستمحیطی	ژنتیک و PBMOSA	یکسان
Khezerlo et al., 2022	مکانیابی، ظرفیت و تخصیص	برنامه ریزی تصادفی	هزینه کل و تاب آور	ازدحام ذرات و پرتو بهبودیافته	یکسان
(Saghaei, Ghaderi & Soleimani, 2020)	مکانیابی، ظرفیت و تخصیص	بهینه سازی استوار	هزینه کل	ژنتیک	یکسان
(Mohammed, Harris, Soroka & Nujoom, 2019)	مکانیابی، ظرفیت	فازی	هزینه کل، سبز وتاب آور	ژنتیک	یکسان
Abdi & Hajiaghaei-Keshteli, 2019	مسیریابی	احتمالی	کاهش هزینه، افزایش آثار اجتماعی و کاهش آثار زیستمحیطی	ژنتیک، تبرید و نهنگ	یکسان

ج) شکاف پژوهش

با بررسی مبانی نظری و تجربی در جدول یک در بالا، مشخص گردید که مطالعات گسترده ای در زمینه طراحی شبکه زنجیرۀ تأمین زیست توده، تاکنون انجام پذیرفته است. و نتیجه این بررسیها، چندین شکاف پژوهشی را آشکار ساخته است. بررسی و مطالعه یکصد و پنجاه مقاله پژوهشی چاپ شده از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ درباره طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده، آشکار نمود که تعداد بسیار زیادی از پژوهشگران، از مدل‌هایی ساده با یک نوع زیست توده، برای طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده، استفاده کرده اند و یا مدلهایی تک دوره ای، تک محصولی و تک هدفه به کار برده اند و یا اینکه در بهینه سازی پایدار، شاخصهای اختلال را در نظر نگرفته اند. دربین تمامی این مقاله ها، تنها در ۵۵ درصداز آنها، مدل ها بیش از یک نوع زیست توده را بررسی نموده اند. تقریبا چهل درصد از مدل های مقاله ها، بیش از یک محصول تولیدی را بررسی نمودند و کمتر از بیست و هفت درصد از مدل‌ها، انعطافپذیری (چند منظوره) و پایداری را همزمان با هم مورد مطالعه و بررسی قرار داده اند در کمتر از یک درصد از مقاله ها، تلفات زیست توده ها در نظر گرفته شده است. و با توجه به اینکه در هیچ کدام از مقاله های مطالعه شده، خروجی مطلوب و نامطلوب که بخشی از فرآیند واقعی زیست توده در شبکه زنجیره تامین زیست توده است، مورد توجه قرار نگرفته است این مبحث در این پژوهش، به عنوان شکاف پژوهشی شناسایی و بررسی شده است. دیگر شکافهای پژوهشی شناسایی شده عبارتند از:

- به طور همزمان، عدم قطعیت بر اثر اختلال هم در سطح اول زنجیره تامین یعنی در عرضه مواد اولیه (زیست توده) و هم در سطح آخر یعنی سطح چهارم که سطح مشتریان میباشد را مورد بررسی قرار میدهد و برای آنان سناریو تعریف مینماید.
- ضایعات زیست توده در شبکه زنجیره تامین دیده شده است.
- در نظر گرفتن تولید انرژی زیستی بهمراه محصول جانبی
- در نظر گرفتن خروجی مطلوب در مراکز تفکیک سازی
- در نظر گرفتن خروجی نامطلوب در مراکز تفکیک سازی

۲- روش شناسی پژوهش

در این مقاله یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای کاهش دو معیار هزینه های اقتصادی و کـاهش پخش کربن، گسترش داده میشود. همچنین دراین مدل، چندین تصمیم مهم استراتژیک و تاکتیکی گرفته میشود.

الف) متغیرهای تصمیم گیری استراتژیک

مکانیابی: انتخاب مکانی است از بین مکانهای پیشنهادی برای ساخت نیروگاهها تا هزینه کرایه حمل و نقل و هزینه انتقال برق به حداقل ممکن برسد و موجب کاهش انتشار گازهای آلاینده شوند و انتخاب مکانی است برای مراکز تفکیک سازی، که الگوریتم، مکان بهینه را شناسایی مینماید.

فناوری تولید: با بررسی پیشینه ها مشخص گردید که بهترین نوع فناوری برای ایران، فناوری بیوگاز میباشد.

تعین ظرفیت: چندین ظرفیت هم برای نیروگاه ها و هم برای مراکز تفکیک سازی، پیشنهاد میگردد که با توجه به محدودیتهای مدل، الگوریتم، بهترین انتخاب را برای ظرفیت نیروگاه ها و مراکز تفکیک سازی، از بین سطوح پیشنهادی انجام میدهد.

تعداد نیروگاهها و مراکز تفکیک سازی: با توجه به محدودیتهای مدل، الگوریتم، بهترین انتخاب را انجام میدهد.

با توجه به اهمیت مبحث هزینه ها برای بهینه سازی شبکه زنجیره تامین زیست توده، سایرهزینه ها مانندهزینه های تفکیک سازی و هزینه های تعمیرونگهداری نیروگاه ها نیز، در نظر گرفته شده است.به کارگیری چنین تصمیمهایی می تواند انعطافپذیری مدل را افزایش داده و منجر به طراحی مدلی برای کمینه سازی هزینه ها گردد.

ب) متغیرهای تصمیم گیری تاکتیکی

- مقدار انواع زیست توده انتقالی از هر منطقه عرضه به مراکز تفکیک.
- مقدار انواع زیست توده تفکیک شده در هر مرکز تفکیک.
- مقدار انواع زیست توده به عنوان خروجی مطلوب از هر مرکز تفکیک.
- مقدار انواع زیست توده به عنوان خروجی نامطلوب از هر مرکز تفکیک.
- مقدار انواع زیست توده به عنوان خروجی فرآیندی برای ارسال به هر نیروگاه.
- مقدار محصول جانبی تولید شده توسط هر نیروگاه
- مقدار برق انتقالی از هر نیروگاه به شهرکهای صنعتی

از پردازش زیست توده ها، برق تولید می شود و بجز برق، کود نیز تولید میگردد (Ehmann, Thumm & Lewandowski, 2018) زنجیره های تامین سوخت زیستی (BSCs) در چرخه تولید، به دلیل ماهیت بسیارپیچیده و پویایی که دارند، باعدم قطعیت همراه هستند. گسترده ترین عدم قطعیت ها عبارتند از؛ میزان عرضه زیست توده ها، تنوع قیمتهای خرید زیست توده ها، میزان هزینه ها و محصولات تولیدی است. این شبکه با دو نوع عدم قطعیت مهم روبه رو میباشد که هر دوی این عدم قطعیتها، اختلالهایی را در شبکه زنجیره تامین زیست توده بوجود می آورند.

- ظرفیت تامین کنندگان، به دلیل میزان متغییر خشکسالی و یا نبود خشکسالی، دارای عدم قطعیت میشود.
- ظرفیت تقاضای مشتریان به دلیل تغییرات در میزان فعالیت کارخانه ها در شهرکتهای صنعتی، دارای عدم قطعیت است.

بر این اساس، شبکه زنجیره تامین زیست توده، دارای دو اختلال است یکی از اختلالها، اختلال در مبدا میباشد یعنی اختلال در منابع زیست توده به دلیل احتمال خشکسالی است اختلال دیگر در مقصد میباشد یعنی به دلایل شرایط اقتصادی مانند رکود و تحریم، میزان فعالیت کارخانه ها در شهرکتهای صنعتی دچار نوسان میشود که بر اثر این نوسان، تقاضای برق نیز دارای نوسان میشود از اینرو مدلی تاب آور برای رویارویی با اختلالها طراحی میگردد

ج) مفروضات مدل

- ظرفیت تامین کنندگان زیست توده، محدود و غیرقطعی است
- وسایل حمل و نقل، ناهمگن هستند یعنی دارای ظرفیت های مختلفی برای حمل می باشند
- تعداد و مکان تامین کنندگان زیست توده ها، معین و مشخص است
- مکان جغرافیایی تامین کنندگان زیست توده، ثابت است و از پیش، مشخص و معین می باشد
- مکان جغرافیایی متقاضیان برق که همان شهرکهای صنعتی، هستند، ثابت و از پیش، مشخص و معین می باشد

د) مدل ریاضی

برای انجام این کار، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای بهینه‌سازی یک شبکه زنجیره تامین زیست توده چهار دوره‌ای (چهار فصلی) چهار سطحی پایدارتاب آور، طراحی شده است. با یک رویکرد برنامه ریزی تصادفی احتمالی ترکیبی فازی برای رسیدگی به اختلالات عرضه زیست توده همراه با عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مدل

ه) 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 بهمراه نام‌گذاری مدل، تابع هدف و محدودیت‌ها به طور گسترده شرح داده شده است.

جداول شماره (۲): جداول اندیسها

تامیین کننده زیست توده {W∈{۱و۲و۳,…,j}	w	دوره‌های زمانی {t∈{۱و۲و۳,…,t}	t
مراکزتفکیک زیست توده {s∈{۱و۲و۳,…,m}	s	سطح ظرفیت نیروگاه { c∈{۱و۲و۳و..g	c
مکانهای پیشنهادی نیروگاهها {P∈{۱و۲و۳,…,n}	p	نوع وسیله حمل {v∈{۱و۲و۳,…,v}	v
سناریو خشکسالی {a∈{۱و۲و۳,…,s}	a	مکانهای مشتریان {i∈{۱و۲و۳,…,c}	i
انواع زیست توده {b∈{۱و۲و۳,…,b}	b	سطح ظرفیت تفکیک سازی {f∈{۱و۲و۳,…,f}	f

جداول شماره (۳): جداول پارامترها

ظرفیت تامین کننده در دوره t تحت سناریو a	SU_{bwta}^{cp}	هزینه خریدهر واحد انواع b ازتامین کنندگان W در دوره t	SU_{bwt}^{PR}
حجم هر واحدزیست توده b	VL_b^{BI}	هزینه سفارشدهی به تامین کننده W در دوره t	SU_{wt}^{ST}
فاصله بین تامین کننده W و مرکز تفکیک s	DS_{SW}	هزینه راه‌اندازی مرکزتفکیک سازی s با سطح ظرفیت f درمکان P	SP_{pf}^{ST}
حداکثر سطح ظرفیت f مراکز تفکیک سازی زیست توده s	SP_{bf}^{Up}	حداقل سطح ظرفیت f مراکز تفکیک سازی زیست توده s	SP_{bf}^{LW}
فاصله بین مرکز تفکیک s و نیروگاه P	DS'_{SP}	هزینه تفکیک سازی هر واحد b در دوره t	SP_{bt}^{PR}
هزینه راه‌اندازی نیروگاه با سطوح ظرفیت c در مکان P	PW_{PC}^{ST}	حداقل سطح ظرفیت c نیروگاه P برای تولید برق	Pw_c^{lW}
حداکثر سطح ظرفیت نیروگاه برای تولید برق	Pw_c^{Up}	ظرفیت وسیله حمل نوع v	VH_v^{CP}
کرایه پرداختی به انواع v به ازاء هرواحد مسافت	HR_V	هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق در دوره t	MN_t
میزان برق تولیدی به ازاء هر واحد زیست توده	RT_b^{EL}	میزان تولید محصول جانبی (کود) به ازاء هر واحد b	RT_b^{FE}
هزینه تولید هر واحد برق از انواع b	PW_b^{PR}	قیمت فروش هر کیلو محصول جانبی (کود)	PRC
میزان تقاضای مشتریان i برای برق در دوره t تحت سناریو a	DM_{ita}	احتمال وقوع هرکدام از سناریوهای a	PP_a
هزینه های پخش کربن به ازاء هر واحد مسافت توسط v	VH_v^{co}	میزان کربن ایجادشده به ازاء تولید هر واحد برق	PW^{co}
نرخ زیست توده مطلوب	Ψ_b^1	نرخ زیست توده نامطلوب	Ψ_b^2

جدول شماره (۴): جدول باینری

اگرتامین کننده W برای فروش b در دوره t تحت a وجود داشته باشد یک و گرنه صفر	X_{bwta}^{SU}	درصورتیکه مراکز تفکیک سازی با ظرفیت f ساخته شود ۱ وگرنه صفر	X_{Sf}^{SP}
درصورتیکه نیروگاه باظرفیت c ساخته شود ۱ و گرنه صفر در محل p	X_{PC}^{PW}		

جدول شماره (۵): جدول متغییرها

تعداد وسیله حمل نوع v مورد نیاز برای انتقال b از W به s در دوره t و تحت a	α_{vwsta}	میزان برق انتقالی از نیروگاه به مشتری در دوره t و تحت s	Y_{pita}^{PW}
میزان انواع زیست توده انتقال داده شده از محل تامین کننده به محل تفکیک سازی در دوره t و تحت سناریو a	Y_{bwsta}^{SU-SP}	تعداد وسیله حمل نوع v مورد نیاز برای انتقال b از s به P در دوره t و تحت a	β_{vspta}
میزان محصول جانبی تولیدشده در نیروگاه در دوره t و تحت a	U_{pta}	میزان انواع زیست توده حمل‌شده از محل تفکیک سازی به نیروگاه در دوره t و تحت a	Y_{bspta}^{SP-PW}
میزان زیست توده نوع b مطلوب تفکیک شده درمرکز s در دوره t تحت سناریو a	Y_{bsta}^{1}	میزان زیست توده نوع b نامطلوب تفکیک شده درمرکز s در دوره t تحت سناریو a	Y_{bsta}^{2}

و) توابع هدف

دراین پژوهش، به منظور طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، با دو تابع هدف استفاده میشود. هدف از ساخت مدل بهینه سازی، تعیین متغیرهای تصمیم گیری راهبردی و تاکتیکی زنجیره تامین است.

تابع هدف اول: تابع هدف اول، کمینه سازی تمامی هزینه های شبکه زنجیره تامین زیست توده است این هزینه ها عبارتند از: هزینه های راه‌اندازی نیروگاه، هزینه راه‌اندازی مراکزتفکیک سازی، هزینه سفارشدهی به تامین کننده، هزینه تفکیک سازی، هزینه خرید زیست توده، هزینه تولید برق، کرایه پرداختی به خودروهای حمل زیست توده، هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق و قیمت فروش برق می باشد.

$$\min Z_1 = \sum_{PC} PW_{PC}^{ST} \times X_{PC}^{PW} + \sum_{Sf} SP_{Sf}^{ST} \times X_{Sf}^{SP} + \sum_{bwta} PP_a \times SU_{wt}^{ST} \times X_{bwta}^{SU} + \sum_{bspta} PP_a \times SP_{bt}^{PR} \times Y_{bspta}^{SP-PW}$$
$$+ \sum_{bwsta} PP_a \times SU_{bwt}^{PR} \times Y_{bwsta}^{SU-SP} + \sum_{pita} PP_a \times PW_b^{PR} \times Y_{pita}^{PW} + \sum_{vwsta} PP_a \times HR_V \times DS_{SW} \times \alpha_{vwsta}$$
$$+ \sum_{vspta} PP_a \times HR_V \times DS_{SP}' \times \beta_{vspta}$$
$$- \sum_{bsta} PP_a \times Y_{bsta}^{1} + \sum_{pct} X_{PC}^{PW} \times MN_t - \sum_{pta} PP_a \times U_{pta} \times PRC \qquad (۱)$$

St.

محدودیتها:

$$\sum_{s} Y_{bwsta}^{susP} \leq SU_{bwta}^{cp} \qquad \forall \text{ bwta} \qquad (۲)$$

$$\sum_{W} Y_{bwsta}^{su-sP} + \left(1_X_{Sf}^{SP}\right) \times M \geq SP_{bf}^{LW} \qquad \forall \text{ bsfta} \qquad (۳)$$

$$\sum_{\text{f}} \text{X}_{\text{Sf}}^{\text{SP}} \leq 1 \qquad \forall \text{ s} \qquad (۴)$$

$$\sum_{W} Y_{bwsta}^{su-sP} \leq M \times (1_X_{Sf}^{SP}) + SP_{bf}^{Up} \qquad \forall\, bsfta \qquad (۵)$$

$$\sum_{C} X_{PC}^{PW} \leq 1 \qquad \forall P \qquad (۶)$$

$$\sum_{i} Y_{Pita}^{PW} + M \times (1 - X_{PC}^{PW}) \geq Pw_c^{lW} \qquad \forall Pcta \qquad (۷)$$

$$\sum_{i} Y_{Pita}^{PW} \leq M \times (1 - X_{PC}^{PW}) + Pw_c^{Up} \qquad \forall Pcta \qquad (۸)$$

$$\sum_{W} Y_{bwsta}^{su-sP} = \sum_{p} Y_{bspta}^{SP-PW} + Y_{bsta}^{1} + Y_{bsta}^{2} \qquad \forall\ bsta \qquad (۹)$$

$$\sum_{bs} Y_{bsPta}^{sp-Pw} \times RT_b^{EL} = \sum_{i} Y_{pita}^{PW} \qquad \forall\, Pta \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{P} Y_{pita}^{PW} = DM_{ita} \qquad \forall\, ita \qquad (۱۱)$$

$$U_{Pta} = \sum_{bs} Y_{bsPta}^{sp-Pw} \times RT_b^{FE} \qquad \forall\, Pta \qquad (۱۲)$$

$$\frac{\sum_b Y_{bwsta}^{SU-SP} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} \le \alpha_{vwsta} \le \frac{\sum_b Y_{bwsta}^{SU-SP} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} + 1 \qquad \forall vwsta \qquad (۱۳)$$

$$\frac{\sum_b Y_{bspta}^{SP-PW} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} \le \beta_{vspta} < \frac{\sum_b Y_{bspta}^{SP-PW} \times VL_b^{BI}}{VH_v^{CP}} + 1 \qquad \forall vspta \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{W} Y_{bwsta}^{su-sP} \le M \times X_{bWta}^{su} \qquad \forall bwta \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{bW} Y_{bwsta}^{su-SP} \le M \times \sum_{f} x_{sf}^{sP} \qquad \forall sta \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{bP} Y_{bspta}^{sp-Pw} \le M \times \sum_{f} x_{sf}^{sP} \qquad \forall sta \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{bs} Y_{bspta}^{sp-Pw} \le M \times \sum_{c} x_{pc}^{PW} \qquad \forall pta \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{i} Y_{pita}^{Pw} \le M \times \sum_{c} x_{pc}^{PW} \qquad \forall pta \qquad (۱۹)$$

$$Y_{bsta}^{1} = \Psi_b^1 \times \sum_W Y_{bwsta}^{su-sP} \qquad \forall bsta \qquad (۲۰)$$

$$Y_{bsta}^{2} = \Psi_b^2 \times \sum_W Y_{bwsta}^{su-sP} \qquad \forall bsta \qquad (۲۱)$$

محدودیت (۲) محدودیت ظرفیت تامین کننده برای ارسال زیست توده به مرکز تفکیک را بیان می کند. محدودیت (۳) میزان زیست توده انتقالی از تامین کننده بیشتر از حداقل ظرفیت مرکز تفکیک است. محدودیت (۴) مربوط به محدودیت راه اندازی مرکزتفکیک است. محدودیت (۵) مربوط به ظرفیت مرکز تفکیک است. محدودیت (۶) در مورد راه اندازی نیروگاه می باشد.
محدودیت (۷) ظرفیت نیروگاه را بیان می کند. محدودیت (۸) میزان برق انتقالی از نیروگاه به مشتریان را مطرح می کند. محدودیت (۹) تعادل جریان ورودی زیست توده از تامین کننده به مراکز تفکیک و خروج زیست توده از مراکز تفکیک به نیروگاه ها را تضمین می کند. محدودیت (۱۰) بالانس موجودی در نیروگاه می باشد. محدودیت (۱۱) میزان برق تولیدی و ارسالی است. محدودیت (۱۲) محدودیت فروش کود می باشد. محدودیت (۱۳) مربوط به تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز بین مراکز تامین کنندگان و مراکز تفکیک سازی می باشد. محدودیت (۱۴) تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز بین مراکز تفکیک سازی و نیروگاه را مشخص می کند. محدودیت (۱۵) شرط انتخاب تامین کننده است. محدودیت (۱۶) شرط مکانیابی برای مراکز تفکیک است یعنی اگر مرکز تفکیک راه اندازی نشود، زیست توده ای نباید از تاممین کنند به سمت مرکز تفکیک، خروج کند. محدودیت (۱۷) شرط مکانیابی برای مراکز تفکیک است یعنی اگر مرکز تفکیک راه اندازی نشد، زیست توده ای نباید از مرکز تفکیک به سمت نیروگاه، خروج کند. محدودیت (۱۸) شرط مکانیابی برای نیروگاهها: اگر نیروگاهی راه اندازی نشد، نباید زیست توده ای به آن ارسال کرد. محدودیت (۱۹) ارسال برق: اگر نیروگاهی راه اندازی نشد، نباید برقی به مشتریان ارسال کرد. محدودیت(۲۰) میزان زیست توده ای که در مراکز تفکیک؛ به عنوان خروجی مطلوب شناخته شده است و به نیروگاهها ارسال نمی شود. محدودیت(۲۱) میزان زیست توده ای که در مراکز تفکیک؛ به عنوان خروجی نامطلوب شناخته شده است به نیروگاهها ارسال نمی شود
تابع هدف دوم: تابع هدف دوم،کمینه سازی هزینه های پخش کربن درشبکه زنجیره تامین زیست توده است که عبارتند از:
میزان احتمال پخش کربن در فاصله بین تامین کنندگان تا مراکز تفکیک و از مراکز تفکیک تا نیروگاه

$$\min Z_2 = \sum_{vwsta} PP_a \times VH_v^{co} \times DS_{SW} \times \alpha_{vwsta} + \sum_{vsPta} PP_a \times VH_v^{co} \times DS'_{SP} \times \beta_{vspta} + \sum_{pita} PP_a \times \mathrm{PW}^{\mathrm{co}} \times Y_{pita}^{pw} \qquad (۲۲)$$

ز) روش حل با الگویتم های فراابتکاری

از آنجا که مسئله در ابعاد بزرگ، طراحی گردیده است ضرورت دارد که بجای روش حل دقیق، از حل با الگوریتم های فراابتکاری استفاده گردد. بدین منظور یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر MOPSO و ژنتیک، گسترش داده خواهد شد و برای تک هدفه کردن مدل، از روش ال پی متریک کمک گرفته شده است. استفاده از روشهای تک هدفه در الگوریتمهای فراابتکاری بجای

الگوریتم های چندهدفه ای مانند الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه، راهکار رایجی است که بسیاری از مقاله ها آن را مورد توجه قرار داده اند(Pakzad-Moghaddam, Mina & Mostafazadeh, 2019; Khalifehzadeh et al., 2019).

ح) الگوریتم فراابتکاری چند هدفه مرتب سازی نامغلوب (NSGA II)

دب بهمراه همکارانش در سال ۲۰۰۰ الگوریتمی با عنوان NSGA جهت حل مسائل بهینه یابی چندهدفه ارائه نمودند. در این الگوریتم، پاسخها براساس اینکه چند پاسخ بهتر از آنها وجود داشته باشد رتبه بندی و مرتب میشوند و پاسخی که هیچ پاسخ دیگری به طور قطع و کامل بهتر از آن نباشد دارای امتیاز بیشتری می شود. و اینکه میزان برازندگی و شایستگی تخصیص داده شده به هر پاسخ براساس رتبه ی آن پاسخ و غلبه نکردن سایر پاسخ ها بر آن صورت می پذیرد. و برای آن که پراکندگی پاسخ ها به صورت مطلوبتری تنظیم گردد که آنها بتوانند به طور یکنواخت در فضای جستجو توزیع شوند از ویژگی های فاصله ای تراکمی استفاده گردیده است.

ط) الگوریتم فراابتکاری چند هدفه تجمع ذرات (MOPSO)

در حل مسئله چندهدفه، جهت مقایسه پاسخ های بدست آمده و همچنین ارزیابی کارا بودن الگوریتم بهینه سازی نامغلوب، این الگوریتم با یک الگوریتم فراابتکاری دیگر به نام تجمع ذرات چند هدفه مقایسه می گردد این الگوریتم (MOPSO) در سال ۲۰۰۲ توسط سوئلو برای حل مسائل چند هدفه ارائه گردید. در این الگوریتم، هر پاسخ، به مانند یک پرنده در فضای جستجو است که این پاسخ، ذره نامیده میشود. هر ذره یا پاسخ، دارای یک بردار سرعت است که جهت پرواز ذره را مشخص میکند. سرعت ذره در این الگوریتم در رابطه ۲۳ و ۲۴ در زیر ارائه شده است

$$V_{i,t} = W * V_{i,t-1} + C_1 * Rand(P_i - X_{i,t-1}) + C2 * Rand\,(P_g - X_{i,t-1}) \qquad (۲۳)$$

$$X_{i,t} = X_{i,t-1} + V_{i,t} \qquad (۲۴)$$

V_{it} سرعت i ام در تکرار t، به معنی فاصله و جهتی است که توسط ذره طی میشود و اینکه موقعیت ذرهi ام در تکرارt ام است. P_iبهترین پاسخی است که ذره در مسیر خود، به آن می رسد که P best گفته می شود و P_g بهترین پاسخ جهانی (g best) در بین ذرات است. C_1 و C_2 مقادیر ثابتی هستند که شتاب ذره به سمت P_g و P_i را تعیین میکنند. و اینکه همه ذرات نیز، مقادیر برازندگی را دارا می باشند. در کل، ذرات در فضای جستجو به دنبال بهترین نقطه پرواز میکنند. مهمترین بخش در بهینه یابی گروه ذرات چند هدفه MOPSO، تعیین بهترین ذره جهانی برای ذره i از بین بردن جمعیت است. در MOPSO مجموعه ای از پاسخ های بهینه پارتو وجود دارند که هرذره باید یکی از آنها را به عنوان gbest خود انتخاب کند که این فرآیند به تعیین بهترین راهنمای محلی موسوم است. این الگوریتم، یکی از بهترین، کارآمدترین و موفق ترین روشی است که تا به امروز برای حل مسائل سخت و پیچیده ی بهینه سازی، بوجود آمده است حتی بسیاری از پژوهشگران، این روش را بهترین روش حل برای مسائل بهینه سازی می دانند. از بهترین ویژگی های این الگوریتم، تعداد اندک پارامترها، پیاده سازی بسیار آسان و همگرایی سریع به همسایگی جواب بهینه ی سراسری است.

ی) تنظیم پارامتر الگوریتم

تعیین و تنظیم مقدار مناسب پارامترهای یک الگوریتم، در اثربخشی الگوریتم تاثیر مثبتی دارد. روش الگوریتم ابتکاری (MOCRS) روشی جدید است که برای مسائل چند هدفه استفاده می شود و نسبت به تمامی روشهای قدیمی از جمله روش تاگوچی، برتری دارد. این روش، هم در زمان صرفه جویی می کند و هم دقت جواب بالایی را ارائه می دهد. روش الگوریتم ابتکاری، یک روش کارامد و سیستماتیک برای تعیین و تنظیم مقادیر پارامترهای الگوریتم است. در این روش از چهار شاخص عملکردی استفاده میشود ۱- شاخص فاصله ی معکوس نسلی(IGD): این شاخص، به محاسبه ی کیفیت پاسخهای پیدا شده که به پارتو فرانت نزدیک است، می پردازد. ۲- شاخص نرخ کلی بردار نامغلوب تولید شده (ONVGR): این شاخص، تعداد

نقاط نامغلوبی که پیدا شده است را محاسبه می کند. ۳- شاخص توزیع کلی پارتو (OS) که توزیع پاسخهای پیدا شده را محاسبه می کند. و ۴- شاخص نرخ هایپرولیوم (HR) پاسخهای نامغلوب پیدا شده را بر پارتو فرانت مسئله تقسیم می کند.

ک) مورد مطالعه ای

در مطالعه موردی، ده شهر از شهرهای استان فارس که دارای بیشترین تولید زیست توده هستند به عنوان مکانهای تأمین کننده زیست توده بررسی شده اند. در این مکانها، چهار نوع زیست توده گردآوری و عرضه می شند که عباتند از: زباله های خشک و تر پسماندهای حیوانی و گیاهی. ده مکان در استان فارس، به عنوان مکان های بالقوه ای برای ساخت مراکز تفکیک سای زیست توده و ساخت نیروگاه، مورد بررسی و محاسبه قرار گفته اند. زیست توده ها با کامیونهای بیست، پانزده و ده تن از طریق جاده به مراکز تفکیک سازی و از مراکز تفکیک سازی به نیروگاهها منتقل میشوند. جهت به دست آوردن جوابهای دقیقتر، فرآیندها به صورت فصلی مورد بررسی قرار گرفته است برای رویارویی هوشمندانه با عدم قطعیتها که در شبکه زنجیره تامین اختلال ایجاد می کنند، چهار سناریو مبتنی بر رویکرد تصادفی، تعریف گردیده است

سناریو بدون خشکسالی، خشکسالی اندک در مبدا، نوسان در تقاضای برق در مقصد و همزمان خشکسالی در مبدا و نوسان تقاضا در مقصد با احتمال وقوع به ترتیب ۱/ . ، ۴۵/ . ، ۲۵/ . و ۲۰/ . بازده انواع زیست توده ها در هر دوره برنامه ریزی و تحت هر سناریو یکسان و بدون تغییر میباشد. هزینه‌های مختلف و قیمت‌های فروش بر اساس داده‌های تاریخی و ادبیات مرتبط تعریف شده‌اند. سایر مقادیر پارامترهای فازی با توجه به نظرکارشناسان می باشد. برق تولید شده نیروگاهها، دارای ده متقاضی از بین شهرکهای صنعتی استان می باشند کود به عنوان محصول جانبی نیروگاه به سایر مشتریان ارائه میگردد. در این پژوهش، تا سطح چهارم که سطح تولید محصول (برق و کود) می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است و مرحله پس از فروش محصولها، بررسی نگردیده است.

ل) تحلیل حساسیت

با تغییر دادن مقدار پارامترهای مدل، حساسیت پارامترها، نسبت به تغییر مقادیرشان، بررسی و مشاهده گردیده است. در اینجا، پارامتر میزان تقاضای برق، جهت تحلیل حساسیت بررسی شده است. با افزایش میزان تقاضا، مقدار تابع هدف اقتصادی، کاهش می یابد و مقدا تابع هدف زیست محیطی افزایش می یابد.

۳- نتایج و بحث

در این مقاله، نخست مدلی دوهدفه برای شبکه زنجیره تامین زیست توده چهار سطحی، به منظور ایجاد توسعه پایدار و ایجاد تاب آوری، طراحی گردیده است. که مدلی توسعه یافته محسوب می گردد. مدل به صورتMILP فرموله شده است. این مدل، یک هدف اقتصادی و یک هدف زیست محیطی را به طور همزمان بررسی می کند. برای بهینه سازی مدل، طراحی سناریو صورت پذیرفته است تا عدم قطعیتی که در بعضی از پارامترها، وجود دارند، به قطعیت تبدیل شوند. برای حل مدل، از الگوریتم ژنتیک و MOPSO استفاده گردید بدین منظور ابتدا پارامترهای مدل به روش الگوریتم ابتکاری MOCRS تنظیم شدند و یافته ها بررسی و تجزیه و تحلیل گردیدند. مقایسه دو الگوریتم ژنتیک و pso معلوم ساخته است که هر دو الگوریتم به نتایج تقریبا مشابه و نزدیک به یکدیگر رسیده اند اما pso از نظر انعطافپذیری، آسانی پیاده سازی و استفاده و آسانی کدنویسی و سرعت همگرایی، از الگوریتم ژنتیک بسیار توانمندتر است و توانسته است جواب بهتری را ارائه نماید. با این حال، در اولین تکرارها، سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک بیشتر از الگوریتم MOPSO است اما در تکرارهای بیشتر، الگوریتم MOPSO، سریعتر از الگوریتم ژنتیک به همگرایی می رسد و کلا همگرایی MOPSO روندی یکنواخت تر نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

این پژوهش، از این جهت، توسعه پایدار است که هم به کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای و هم به کمینه سازی هزینه های اقتصادی که هر دو جزو شاخصهای توسعه پایدار هستند پرداخته است (Mousavi Ahranjani et al., 2020). پانودل، توبا، لین، هارتلی و روهیت و نیز، کمینه نمودن هزینه های اقتصادی و کاهش انتشار کربن را به عنوان، پایداری مدل، برشمرده اند (Ghaderi et al., 2016). در این پژوهش، از رویکرد سناریومحور احتمالی برای تاب آوری زنجیره تامین جهت رویارویی با هر نوع پیشامدی که از جنس عدم قطعیت باشد، استفاده شده است. تاب آوری در سه سطح بررسی شده است: ۱) در سطح تامین

کننده، که با در نظر گرفتن تامین کننده های زیاد این امکان را به زنجیره تامین میدهد که در مبدا، با وجود اختلالها که منجر به نوسان در میزان عرضه زیست توده می گردد، باز هم میزان زیست توده مورد نیاز، برآورده گردد و شبکه دچار بی نظمی و اختلال نگردد یعنی پیشگیری از اختلال را انجام میدهد. ۲) تاب آوری در سطح ظرفیت مراکز تفکیک سازی مطرح شده است بدین صورت که مدل، متناسب با میزان زیست توده در دسترس و متناسب با ظرفیت تولیدی نیروگاه، سطح ظرفیت بهینه تفکیک سازی را انتخاب میکند. ۳) در سطح ظرفیت نیروگاه تعیین شده است بدین صورت که مدل، متناسب با عرضه مواد اولیه، تقاضای برق و فرآیند تفکیک سازی، سطح ظرفیت تولیدی را مشخص مینماید. پژوهش ولند و همکاران (۲۰۱۳) نیز به روشهایی متفاوت، پیشگیری از اختلال را، تاب آوری میدانند. از اینرو مدل برای تامین زیست توده، هیچ گاه دچار بحران نمیشود حتی در بدترین حالت، مدل میتواند با تامین زیست توده مورد نیاز، برق تولید نماید و تقاضای برق مشتریان را برآورده سازد (Veland et al., 2013).

مدل پیشنهادی، تصمیم گیریهای تاکتیکی و استراتژیک را به طور همزمان انجام می دهد. تصمیم گیریهای استراتژیک مواردی مانند مکانیابی مراکز تفکیک سازی و نیروگاهها است. ظرفیت نیروگاهها و مراکز تفکیک سازی، تعین میگردند. تعداد مراکز تفکیک سازی و نیروگاهها مشخص می گردد. در مورد مطالعه، پیشنهاد ساخت چهار مرکز تفکیک سازی زیست توده 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 داده میشود. چهار نیروگاه در چهار مکان مختلف از بین ده مکان پیشنهادی و در چهار ظرفیت مختلف ساخته شود. در غرب شیراز، سالانه از ۲۲۴ هزار تن زیست توده در مراکز تفکیک، سه هزار تن زیست توده به عنوان خروجی مطلوب و دو هزار تن زیست توده به عنوان خروجی نامطلوب و ۲۱۹ هزار تن به عنوان خروجی فرآیندی می باشند که با این شرایط ۳۶۵۰ مگاوات سالانه از نیروگاه غرب شیراز برق تولید می شود اما اگر خروجیهای مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته نمی شدند میزان برق تولیدی سالیانه غرب شیراز، ۸۳ مگاوات بیشتر نشان داده می شد که از واقعیت به دور بود. شرق شیراز سالانه دارای ۱۹۰۰ تن خروجی مطلوب، هزار تن خروجی نامطلوب و ۱۵۳۳۰۰ تن زیست توده به عنوان خروجی فرآیندی است. نیروگاه شرق شیراز سالانه ۲۵۵۵ مگاوات برق تولید می کند در صورتیکه مدل پیشنهادی، خروجی مطلوب و نامطلوب را در نظر نمی گرفت، در این نیروگاه، سالانه ۴۸ مگاوات تولید برق بیشتری تخمین زده می شد. از ۱۱۳۱۰۰ تن مجموع زیست توده سالانه ۱۰۹۵۰۰ تن به عنوان خروجی فر آیندی در نیروگاه جهرم ۱۸۲۵ مگاوات برق تولید می کند و سالیانه ۱۸۰۰ تن خروجی مطلوب و ۱۳۵۰ تن خروجی نامطلوب نیز وجود دارد که اگر این خروجیهای مطلوب و نامطلوب در مدل گنجانده نمی شدند؛ میزان برق تولیدی نیروگاه جهرم سالانه ۵۲ مگاوات بیشتر نشان داده می شد. در نیروگاه کازرون، سالانه با ۹۰۰ تن خروجی مطلوب، ۵۰۰ تن خروجی نامطلوب و ۷۳۰۰۰ تن خروجی فرآیندی ۱۰۹۵ مگاوات برق سالیانه تولید می کند و در صورتیکه مدل پیشنهادی خروجیهای مطلوب و نامطلوب را نادیده گرفته بود، سالیانه نیروگاه کازرون، ۲۱ مگاوات تولید برق را بیشتر از واقعیت ارائه می نمود.

از هر چهار نوع زیست توده به نسبتهای مختلف در نیروگاهها مصرف می گردد. مرکز تفکیک سازی، زیست تودههای نوع مطلوب را به فروش می رسانند و نوع نامطلوب را در مکانی خارج از نیروگاه، می سوزانند. مرکز تفکیک سازی شرق شیراز از فیروزآباد و شرق شیراز تامین زیست توده میگردد مرکز تفکیک سازی غرب شیراز از غرب شیراز و مرودشت، مرکز تفکیک سازی جهرم، از جهرم، فسا و داراب و مرکز تفکیک سازی کازرون از نورآباد و خود کازرون، تامین مواد اولیه می گردد.

سه نوع وسیله حمل زیست توده با ظرفیتهای ده تن، پانزده تن و بیست تن به کار گرفته میشود که تعداد آنها برای مراکز مختلف تفکیک سازی و نیروگاههای مختلف، متفاوت است. برق شش متقاضی، تامین میگردد. (غرب شیراز (صدرا)، شرق شیراز(کوار)، کازرون، جهرم، فسا، مرودشت). مقدار تابع هدف اول، ۲۸۱۸۰۷۷۰۹۳۵۱ تومن سالیانه میباشد و مقدار تابع هدف دوم، برابر با ۴۹۷۴۳۳۰ گرم دی اکسید کربن سالیانه میباشد یعنی تقریبا ۴۹۷۰ کیلوگرم سالیانه در مسیر انتقال زیست تودهها، دی اکسید کربن در فضا منتشرمیگردد. میزان کود تولیدی نیز بنا به سناریوهای مختلف و در دوره های مختلف، متفاوت میباشند به عنوان مثال، کود تولیدی درحالت سناریو بدون اختلال، در نیروگاه شرق شیراز، سالیانه برابر با چهارصد و شصت تن میباشد(دوره اول،

۱۳۵ تن؛ دوره دوم ۱۲۵ تن دوره سوم۱۱۰ تن و دوره چهارم۹۰ تن) نیروگاه غرب شیراز سالانه ششصد و شصت تن، نیروگاه جهرم دویست و چهل تن و نیروگاه کازرون صد و پنجاه تن کودتولید میکند. نتایج برخی از متغیرها در جدول ۶ در زیر نشان داده شده است.

جدول شماره (۶): برخی از متغیرهای استراتژیک و تاکتیکی

w	متغییرهای استراتژیک			متغییرهای تاکتیکی						
	s	p	I	$\sum_{bwsta} Y_{bwsta}^{SU-SP}$	Y_{bsta}^{1}	Y_{bsta}^{2}	$\sum_{bspta} Y_{bspta}^{SP-PW}$		Y_{pita}^{PW}		U_{pta}
							روزانه	سالیانه	روزانه	سالیانه	
غرب شیراز و مرودشت	غرب شیراز	غرب شیراز	غرب شیراز مرودشت	۲۲۴۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۶۰۰	۲۱۹۰۰۰	۱۰	۳۶۵۰	۶۶۰
شرق شیراز و فیروزآباد	شرق شیراز	شرق شیراز	شرق شیراز	۱۵۶۲۰۰	۱۹۰۰	۱۰۰۰	۴۲۰	۱۵۳۳۰۰	۷	۲۵۵۵	۴۶۰
جهرم، فسا و داراب	جهرم	جهرم	جهرم فسا	۱۱۳۱۰۰	۱۸۰۰	۱۳۵۰	۳۰۰	۱۰۹۵۰۰	۵	۱۸۲۵	۴۴
کازرون و نورآباد	کازرون	کازرون	کازرون	۷۴۴۰۰	۹۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۷۳۰۰۰	۳	۱۰۹۵	۴۲
			تابع هدف اول	۲۸۱۸۰۷۷۰۹۳۵۱ تومان							
			تابع هدف دوم	۴۹۷۴۳۳۰ گرم دی اکسید کربن							

از بین ده مرکزی که تامین کننده زیست توده، می باشند از نه تامین کننده مواد اولیه خریداری می شود در نتیجه، تاب آوری در زمینه تامین زیست توده به وجود آمده است. تخصیص بین اعضا زنجیره تامین به بهترین شکل ممکن انجام شده است که به موجب آن، میزان انتشار گازهای گلخانه ای در بهترین حالت کمینه شده است. و اینکه اقتصادی ترین حالت ممکن برای کاهش هزینه ها را درنظر گرفته است. تحلیل حساسیت بر روی ابعاد مدل، تضاد بین توابع هدف را نشان میدهد، که دلیلی است بر رفتار درست و منطقی مدل. بنابراین اعتبار مدل تأیید شده است. و پیشنهاد میگردد در توسعه و گسترش این مدل، مدت زمان رسیدن کامیونها بین مکانها، مشخص گردد و به مدل اضافه گردد

منابع مالی: این پژوهش توسط هیچ سازمان و موسسه‌ای تامین مالی نگردیده است.

بیانیه تعارض منافع: نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

سپاسگزاریها: پژوهشگر از استاد راهنما و استاد مشاور و مراکز بازیافت استان فارس که در انجام این پژوهش همکاری داشته اند سپاسگزاری مینماید

مشارکت نویسندگان: همه نویسندگان در بررسی، تجزیه و تحلیل اطلاعات و نگارش این مقاله، مشارکت فعال داشتند.

٤-منابع

1. Abdi, A., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2019). Multi-Objective Closed-loop Supply Chain Considering Vehicles and Solving by New Approaches in Metaheuristics. *Journal of Modeling in Engineering*, *17*(59), 67-85.

2. Akdogan, A. A., & Demirtas, O. (2014). Managerial role in strategic supply chain management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *150*, 1020-1029.

3. Al-Hakimi, M. A., & Borade, D. B. (2020). The impact of entrepreneurial orientation on the supply chain resilience. *Cogent Business & Management*, *7*(1), 1847990.

4. Aranguren, M., Castillo-Villar, K. K., & Aboytes-Ojeda, M. (2021). A two-stage stochastic model for co-firing biomass supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, *319*, 128582.
5. Christopher, M. and Peck, H. (2004), "Building the Resilient Supply Chain", *The International Journal of Logistics Management*,*15* (2), 1-14. https://doi.org/10.1108/09574090410700275
6. Ebrahim Qazvini, Z., Haji, A., & Mina, H. (2021). A fuzzy solution approach to supplier selection and order allocation in green supply chain considering the location-routing problem. *Scientia Iranica*, *28*(1), 446-464.
7. Ehmann, A., Thumm, U., & Lewandowski, I. (2018). Fertilizing potential of separated biogas digestates in annual and perennial biomass production systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *2*, 12.
8. Ferronato, N., Alarcón, G. P. P., Lizarazu, E. G. G., & Torretta, V. (2021). Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia: Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options. *Resources, Conservation and Recycling*, *167*, 105234.
9. Fritz, M., Ruel, S., Kallmuenzer, A. & Harms, R. (2021). Sustainability Management in Supply Chain: The Role of Familiness. *Technological Forecasting & Social Change*, *173*(2021)121078 https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121078
10. Ghaderi, H., Pishvaee, M. S., & Moini, A. (2016). Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. *Industrial crops and products*, *94*, 972-1000.
11. Gholami, A., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., & Khodashenas, S. R. (2020). Reliability and sensitivity analysis of robust learning machine in prediction of bank profile morphology of threshold sand rivers. *Measurement*, *153*, 107411.
12. Guo, C., Hu, H., Wang, S., Rodriguez, L. F., Ting, K. C., & Lin, T. (2022). Multiperiod stochastic programming for biomass supply chain design under spatiotemporal variability of feedstock supply. *Renewable Energy*, *186*, 378-393.
13. Kamalahmadi, M., & Parast, M. M. (2016). A review of the literature on the principles of enterprise and supply chain resilience: Major findings and directions for future research. *International journal of production economics*, *171*, 116-133.
14. Khalifehzadeh, S., Fakhrzad, M. B., Mehrjerdi, Y. Z., & Hosseini_Nasab, H. (2019). Two effective metaheuristic algorithms for solving a stochastic optimization model of a multi-echelon supply chain. *Applied Soft Computing*, *76*, 545-563.
15. Lambert, Douglas M. (2008). A Global View of Supply Chain Management. University of Auckland Business Review, *10*(2), 30-35.
16. Liu, X., Tian, G., Fathollahi-Fard, A. M., & Mojtahedi, M. (2020). Evaluation of ship's green degree using a novel hybrid approach combining group fuzzy entropy and cloud technique for the order of preference by similarity to the ideal solution theory. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *22*, 493-512.
17. Lo, S. L. Y., How, B. S., Leong, W. D., Teng, S. Y., Rhamdhani, M. A., & Sunarso, J. (2021). Techno-economic analysis for biomass supply chain: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110164.
18. Menesy, A. S., Sultan, H. M., Habiballah, I. O., Masrur, H., Khan, K. R., & Khalid, M. (2023). Optimal Configuration of a Hybrid Photovoltaic/Wind Turbine/Biomass/Hydro-Pumped Storage-Based Energy System Using a Heap-Based Optimization Algorithm. *Energies*, *16*(9), 3648.

19. Mohammed, A., Harris, I., Soroka, A., & Nujoom, R. (2019). A hybrid MCDM-fuzzy multi-objective programming approach for a G-resilient supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, *127*, 297-312.
20. Mousavi Ahranjani, P., Ghaderi, S. F., Azadeh, A., & Babazadeh, R. (2020). Robust design of a sustainable and resilient bioethanol supply chain under operational and disruption risks. *Clean technologies and environmental policy*, *22*, 119-151.
21. Nasiri, M. M., Mousavi, H., & Nosrati-Abarghooee, S. (2023). A green location-inventory-routing optimization model with simultaneous pickup and delivery under disruption risks. *Decision Analytics Journal*, *6*, 100161.
22. Nilsson, F., & Göransson, M. (2021). Critical factors for the realization of sustainable supply chain innovations-model development based on a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *296*, 126471.
23. Pakzad-Moghaddam, S. H., Mina, H., & Mostafazadeh, P. (2019). A novel optimization booster algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, *136*, 591-613.
24. Prado, A., Chiquier, S., Fajardy, M., & Mac Dowell, N. (2023). Assessing the impact of carbon dioxide removal on the power system. *Iscience*, *26*(4).
25. Rasekh, A., Hamidzadeh, F., Sahebi, H., & Pishvaee, M. S. (2023). A sustainable network design of a hybrid biomass supply chain by considering the water–energy–carbon nexus. *Energy Science & Engineering*, *11*(3), 1107-1132.
26. Roeva, O., & Chorukova, E. (2022). Metaheuristic Algorithms to Optimal Parameters Estimation of a Model of Two-Stage Anaerobic Digestion of Corn Steep Liquor. *Applied Sciences*, *13*(1), 199.
27. Saghaei, M., Ghaderi, H., & Soleimani, H. (2020). Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Energy*, *197*, 117165.
28. Toba, A. L., Paudel, R., Lin, Y., Mendadhala, R. V., & Hartley, D. S. (2023). Integrated Land Suitability Assessment for Depots Siting in a Sustainable Biomass Supply Chain. *Sensors*, *23*(5), 2421.
29. 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.
30. Yahya, N. S. M., Ng, L. Y., & Andiappan, V. (2021). Optimisation and planning of biomass supply chain for new and existing power plants based on carbon reduction targets. *Energy*, *237*, 121488.
31. Zarei, M., Shams, M. H., Niaz, H., Won, W., Lee, C. J., & Liu, J. J. (2022). Risk-based multistage stochastic mixed-integer optimization for biofuel supply chain management under multiple uncertainties. *Renewable Energy*, *200*, 694-705.
32. Zeinodin Zadeh, S., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvaee, M. S. (2023). Modelling a routing-location-inventory problem in the sustainable poultry and livestock medicine supply chain under uncertainty, considering discount. *Production and Operations Management*, *14*(1), 39-64.

Optimization of Biomass Supply Chain Network in Four Levels

Davod Dehghan
Department of Industrial Management, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran
Kiamars Fathi Hafeshjani (Corresponding Author)
Assistant Professor, Department of Industrial Management, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: fathikiamars@yahoo.com
Jalal Haghighat Monfared
Assistant Professor, Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract
The pollution resulting from biomass burial, the potential for clean energy production from biomass, and the high demand for energy have underscored the importance and necessity of optimizing the biomass supply chain network. This paper aims to optimize the biomass supply chain network at four levels to reduce economic and environmental costs. The most significant research gap addressed in this article is the determination of desirable and undesirable outputs of the masses in the centers, while also considering the multi-period, multi-product mode with heterogeneous transport means. The research model is a two-objective linear programming model that accounts for uncertainty and disturbances. Four scenarios were designed for this purpose, and the model was solved using genetic algorithm and the MOPSO method with Python software. The model's validation was investigated in a real case study in Fars province. The proposed model successfully implements sustainability and resilience, leading to reduced costs, lower carbon emissions, and increased commercialization of energy production from biomass, thereby enhancing investor willingness to invest in this network. The proposed model lowers the amount of energy production by 2.1% compared to scenarios where favorable and unfavorable outputs are not considered, bringing it much closer to reality. Sensitivity analysis performed on real data confirmed the model's efficiency.

Keywords: Biomass Supply Chain Network, Desirable & Undesirable Output, Genetic Algorithm, MOPSO Algorithm.