

Multi-Objective Random Model to Determine the Type, Capacity and Installation Location of Distributed Products in the New Supply Chain of the Electricity Industry

Ahmad Ghorbankhani^{*}, Ali Morvati Sharifabadi^{}, Seyed Habibollah Mir Ghafouri^{***}, Seyed Heydar Mirfakhrodini^{****}**

Abstract

In recent years, with the high cost of building large and centralized power plants and the problems of long power transmission lines, the electricity industry has shifted to the use of small and distributed generation near the location of customers. On the other hand, due to environmental problems, some of these distributed products are based on renewable energy, which has a random behavior. Determining the location and capacity of these products at the distribution network level has a great impact on managing financial resources and improving supply chain parameters. In this research, a comprehensive multi-objective and probabilistic model is proposed to determine the installation location, type, and optimal capacity of distributed products at the level of the new electricity supply chain. The ultimate goal of this model is to minimize energy losses, investment and operation costs, unsupplied energy, and environmental pollutants. The proposed model is applied on a 33-region network by MATLAB software and solved in a multi-objective way by a genetic meta-heuristic algorithm with faulty sorting. The final results show the effectiveness of the proposed method in various economic, environmental, and social dimensions of the electricity supply chain.

Keywords: Distributed Supply Chain; Distributed Products; Renewable, Uncertainty; Genetic Algorithm.

Received: May. 26, 2020; Accepted: Feb. 26, 2021.

* Ph.D student, Yazd University.

** Associate Professor, Yazd University.

Email: alimorovati@yazd.ac.ir

*** Associate Professor, Yazd University.

**** Associate Professor, Yazd University.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال یازدهم، شماره ۴۲، تابستان ۱۴۰۰، صص ۹-۳۸ (نوع مقاله: پژوهشی)

DOI: [10.52547/JIMP.11.2.9](https://doi.org/10.52547/JIMP.11.2.9)

مدل تصادفی چندهدفه به‌منظور تعیین نوع، ظرفیت و محل نصب تولیدات پراکنده در زنجیره تأمین جدید صنعت برق

احمد قربانخانی*، علی مروتی شریف‌آبادی**، سید حبیب‌الله میرغفوری***،

سید حیدر میرفخرالدینی****

چکیده

در سال‌های اخیر به‌دلیل هزینه بالای ساخت نیروگاه‌های بزرگ و متمرکز و مشکلات خطوط بلند انتقال انرژی، صنعت برق به سمت استفاده از تولیدات کوچک و توزیع‌شده در نزدیکی محل مشترکین سوق یافته است. از سوی دیگر با توجه به مشکلات زیست‌محیطی، بخشی از این تولیدات توزیع‌شده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که رفتار تصادفی دارند. تعیین محل قرارگیری و ظرفیت این تولیدات در سطح شبکه توزیع تأثیر بسزایی در مدیریت منابع مالی و بهبود پارامترهای زنجیره تأمین دارد. در این پژوهش یک مدل جامع چندهدفه و احتمالاتی به‌منظور تعیین محل نصب، نوع و ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین جدید برق پیشنهاد شده است. هدف‌گذاری نهایی این مدل کمینه‌سازی تلفات انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، انرژی تأمین‌نشده و آلاینده‌های زیست‌محیطی است. مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه ۳۳ ناحیه‌ای توسط نرم‌افزار متلب اعمال و به‌صورت چندهدفه توسط الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب حل شده است. نتایج نهایی، اثربخشی روش پیشنهادی را در ابعاد مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در زنجیره تأمین برق نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین توزیع‌شده؛ تولیدات پراکنده؛ تجدیدپذیر؛ عدم قطعیت؛
الگوریتم ژنتیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸.

* دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد.

** دانشیار، دانشگاه یزد (نویسنده مسئول).

E-mail: alimorovati@yazd.ac.ir

*** دانشیار، دانشگاه یزد.

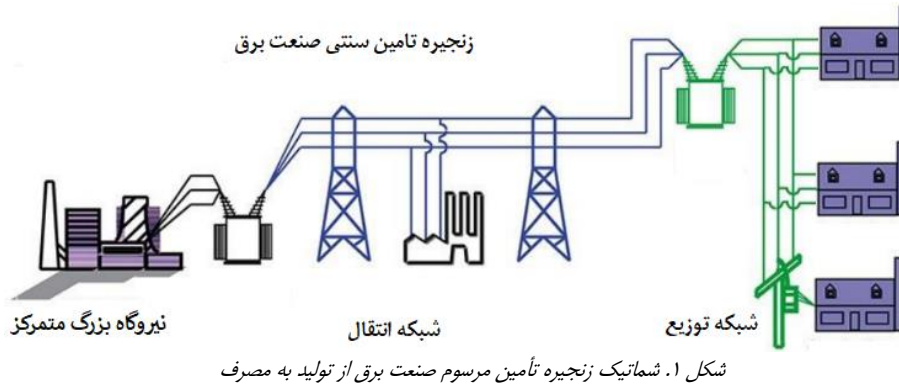
**** دانشیار، دانشگاه یزد.

۱. مقدمه

امروزه دنیا با انقلاب صنعتی چهارم و رشد بی‌سابقه در صنعتی‌سازی جوامع مواجه است و این موضوع باعث افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی برق شده است [۵]. این افزایش تقاضای مصرف انرژی باعث بروز نگرانی‌هایی در رابطه با بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع، گرمایش جهانی، آلودگی محیط‌زیست و تغییرات آب‌وهوایی ناشی تولید انرژی شده است که هنوز هم در بسیاری از کشورها بخش عمده‌ای از آن توسط سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود [۲، ۷]. در برخی موارد نیز تأثیرات محیطی منفی ناشی از تولید انرژی برق به حدی زیاد است که روند توسعه پایدار جوامع را دچار مشکل کرده و باعث بروز مشکلاتی در بُعد اجتماعی شده است که از جمله آن می‌توان به عدالت اجتماعی، برابری و توسعه اقتصادی پایدار اشاره کرد [۳۴]. این مشکلات و دغدغه‌ها باعث مطرح‌شدن مفهوم زنجیره تأمین پایدار شده است که در تمامی بخش‌های زنجیره تأمین از مرحله تخصیص منابع و مواد خام گرفته تا تعیین محل تأسیسات، ظرفیت تولید و حمل‌ونقل و زیرساخت‌ها، به‌جای تمرکز بر جنبه اقتصادی و به حداکثر رسانی سود، به جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیز توجه می‌کند [۲، ۲۵].

افزایش آگاهی از مفهوم پایداری در سراسر جهان باعث شده است که بسیاری از صنایع از سوی مردم، نهادهای دولتی و غیردولتی، رسانه‌ها و ذی‌نفعان مختلف تحت فشار قرار گیرند و تلاش کنند تا به اهداف پایداری دست یابند و صنعت برق نیز از این قضیه مستثنا نیست [۸، ۱۱]. نگاهی به ساختار زنجیره تأمین سنتی در بخش تولید انرژی برق به‌خوبی نشان می‌دهد که شیوه‌های به‌کارگرفته‌شده در این بخش به هیچ‌وجه پایدار نیستند و به همین دلیل شرکت‌ها و نهادهای درگیر در زنجیره تأمین برق به تغییر رویه‌ها و فرایندهای کنونی خود نیاز دارند تا بتوانند به اهداف پایداری و رعایت الزامات قانونی مرتبط با آن دست یابند [۲۶].

از سال ۱۹۵۰ به بعد، مطابق شکل ۱، زنجیره تأمین انرژی الکتریکی مرسوم از یک ساختار سلسله‌مراتبی در سه سطح مختلف پیروی می‌کرد که شامل تولید، انتقال و توزیع انرژی بود. بخش تولید مشخصاً دارای نیروگاه‌های بزرگ و متمرکزی بود که غالباً بر سه فناوری واحدهای آبی، واحدهای حرارتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (نظیر زغال‌سنگ، نفت و یا گاز طبیعی) و واحدهای انرژی هسته‌ای استوار بودند. این تولیدکننده‌های مرکزی با ظرفیت بالا، انرژی الکتریکی را از طریق خطوط انتقال طولانی (دکل‌های بلند) به محل شهرها می‌رساندند. سرانجام توان انتقال‌یافته به ورودی شهرها به شبکه توزیع تحویل داده می‌شد و در سطح شهر توسط تیرهای برق و دکل‌های کوتاه توزیع شده و به مصرف‌کننده نهایی می‌رسید؛ در نتیجه انرژی الکتریکی در زنجیره تأمین مرسوم یک‌طرفه بود و همواره از تولیدکنندگان بزرگ به سمت شبکه توزیع و مصرف‌کننده‌ها جریان داشت؛ بنابراین در صورت اختلال در بخش انتقال یا بخش توزیع این زنجیره قطع و جریان انرژی متوقف می‌شد [۱۶، ۲۲].



از آنجاکه این نیروگاه‌های متمرکز، بسیار بزرگ و در ظرفیت‌های ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات هستند، چنین نیروگاه‌های عظیمی نیازمند مقدار زیادی از سرمایه‌گذاری در بخش‌های اقتصادی، کارکنان، فضا و نیز خطوط انتقال و دکل‌های بلند با مسافت‌های طولانی و ادوات انتقال انرژی هستند که باعث افزایش هزینه و زمان طراحی، نصب، بهره‌برداری و نگهداری می‌شود. این مسائل در کنار مشکلات زیست‌محیطی باعث افزایش هزینه و زمان طراحی، نصب، بهره‌برداری و نگهداری می‌شود. از سوی دیگر با تجدید ساختار و خصوصی‌شدن صنعت برق، این مشکلات دوچندان شده است. این مسائل باعث تحول بنیادی در زنجیره تأمین صنعت برق در چند سال اخیر شده است.

طراحان، گزینه‌های چندان متنوعی برای حل و یا حداقل کاهش این ایرادات ندارند؛ چراکه باید علاوه بر بهبود و حل مشکلات فنی، مباحث اقتصادی و زیست محیطی را نیز در نظر داشته باشند. از سوی دیگر شکل سنتی زنجیره تأمین انرژی الکتریکی توسعه یافته است و هر طرح جدیدی باید توانایی اتصال پایدار با آن را داشته باشد؛ از این رو غالب طراحان شبکه، استفاده از منابع تولید پراکنده^۱ (DG) را به منظور برطرف کردن غالب مشکلات صنعت برق پیشنهاد می‌کنند. تولیدات پراکنده واحدهای تولید انرژی کوچکی هستند که در سطح شبکه توزیع و در کنار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند و زنجیره تأمین برق را از حالت یک‌طرفه خارج می‌کنند. این واحدهای تولیدی توزیع‌شده مزایای زیادی از جمله کیفیت تأمین انرژی بالاتر، کاهش تلفات انرژی، آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال و توزیع، کاهش هزینه نصب، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و امکان استفاده محلی تمام مشترکین از واحدهای متنوع و کوچک تولیدی (نظیر مولدهای تولید هم‌زمان برق و گرما، توربین‌های بادی، پنل‌های فتولتائیکی و غیره) را دارند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد در سال ۲۰۲۰ تولید پراکنده در برخی از کشورهای توسعه‌یافته تا ۴۰

1. Distributed Generation

درصد نیاز کلی انرژی الکتریکی در زنجیره تأمین برق را فراهم می‌کند و این رقم هر سال در حال افزایش است [۳۳].

هرچند وجود این منابع با مزایای فراوانی همراه است، با این حال تعداد بالا و پراکندگی زیاد واحدهای تولیدکننده باعث بروز مشکلات کنترل آن‌ها و نحوه بهره‌برداری بهینه و نگهداری از آن‌ها می‌شود. از سوی دیگر با توجه اینکه، تولید انرژی برخی از منابع پراکنده تجدیدپذیر به شرایط آب‌وهوایی مانند سرعت باد، دما و میزان انرژی خورشید وابسته است، زنجیره تأمین جدید دارای مشکلاتی همچون پیچیدگی بیشتر و قابلیت پیش‌بینی پایین‌تری است؛ از این رو ناپایداری و گسست بین عرضه و تقاضای انرژی در زنجیره تأمین جدید بسیار محتمل‌تر است.

زنجیره تأمین مرسوم بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده طراحی شده است. حال سؤال این است که با توجه به نفوذ ناگزیر این تولیدات در سطح زنجیره تأمین برق، بهترین محل نصب در کدام ناحیه‌ها است؟ ظرفیت بهینه این تولیدات پراکنده چقدر باید باشد؟ زنجیره تأمین جدید صنعت برق با تولیدات توزیع‌شده و پراکنده نسبت به زنجیره تأمین مرسوم و یک‌طرفه از نظر اقتصادی، زیست‌محیطی و عرضه بدون وقف توان، چه برتری‌هایی دارد؟ آیا زنجیره تأمین جدید، در صورت طراحی بهینه می‌تواند تلفات انرژی را نیز کاهش دهد؟ با توجه به تنوع فناوری‌های تولید انرژی الکتریکی در تولیدات پراکنده (میکروتوربین، پیل سوختی، توربین بادی، پنل خورشیدی و غیره) بهترین ترکیب بین واحدهای تولیدی برای تأمین بی‌وقفه انرژی و کاهش هزینه‌ها در کنار کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی کدام است؟

سرمایه‌گذاری بر روی بُعد اجتماعی در زنجیره تأمین پایدار باعث ارزش‌آفرینی بیشتر برای جامعه می‌شود؛ چراکه تلاش می‌کند تا جنبه‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی را با هم ادغام کند [۱۱]. با این حال دستیابی به اهداف پایداری در زنجیره تأمین امر ساده‌ای نیست و با چالش‌های عملی زیادی در زمینه برقراری تعادل بین اهداف متناقض، یعنی بهبود عملکرد اقتصادی، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و به حداقل رساندن آشفته‌گی‌ها و شکاف‌های اجتماعی مواجه است [۷].

با وجود افزایش آگاهی از مفهوم پایداری در زمینه پایدار در بخش تولید انرژی برق و تأثیرات مشهود آن بر محیط‌زیست و جوامع محلی، پژوهش‌های بسیار اندکی بر روی طراحی زنجیره تأمین پایدار در حوزه صنعت برق انجام شده است. در واقع نتایج جدیدترین بررسی‌های مروری در رابطه با پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه طراحی زنجیره تأمین پایدار حاکی از آن است که فقط ۹ درصد از پژوهش‌ها در حوزه انرژی و تولید برق صورت گرفته است [۲۶]. این در حالی است که بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده نیز بیشتر معطوف به حوزه‌های مختلفی چون استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی، بیوسوخت‌ها و تولید برق از سوخت جامد بوده است [۳، ۶، ۲۱، ۲۰]. به علاوه، نگاهی به پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه طراحی زنجیره تأمین در صنعت برق نشان می‌دهد که

تمرکز بیشتر پژوهش‌ها بر جنبه اقتصادی (بحث هزینه و سود) [۴، ۱۵، ۲۸] و یا مسائل زیست محیطی (انتظار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای) و یا در اصطلاح زنجیره تأمین سبز [۳۱، ۱] بوده است و پژوهش‌های بسیار معدودی به ابعاد اجتماعی زنجیره تأمین پایدار پرداخته‌اند [۱۱، ۱۲]. این در حالی است که علاوه بر جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، شناسایی و ارزیابی ابعاد اجتماعی مانند توسعه پایدار، شیوه‌های کسب‌وکار سالم، کاهش فساد و مسئولیت اجتماعی شرکت^۱ (CSR) برای بهبود پایداری در شبکه برق بسیار ضروری است [۲]. در بررسی سیستم انرژی و تجزیه و تحلیل هزینه‌های شبکه، عوامل اجتماعی همچون رشد اقتصادی و نرخ بیکاری باید در نظر گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که شبکه زنجیره تأمین برق پایدار است و به جنبه اجتماعی، درست به اندازه جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی توجه می‌شود [۱۱].

طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار در صنعت برق^۲ (ESCND) علاوه بر موارد بالا با مشکل عدم قطعیت در تقاضا نیز مواجه است؛ چراکه تقاضای مصرف‌کنندگان ماهیت تصادفی دارد و همین امر پیش‌بینی دقیق تقاضا را بسیار مشکل می‌سازد. به همین دلیل طراحی زنجیره تأمین شبکه‌های برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت باعث می‌شود نتایج به واقعیت نزدیک‌تر باشند و با اجرایشدن این طراحی‌ها از تأثیرات مضر قطعی سیستم و نقص آن جلوگیری می‌شود [۳۳].

با توجه به مطالب گفته‌شده، هدف اصلی این پژوهش طراحی یک زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن اهداف سه‌گانه پایداری و با توجه به وجود عدم قطعیت است. به بیان دقیق‌تر این پژوهش در پی یافتن پاسخ این سؤالات است که در نظر گرفتن بُعد اجتماعی و زیست‌محیطی در طراحی زنجیره تأمین برق پایدار چه مزایایی دارد؟ و عدم قطعیت در زنجیره تأمین برق پایدار چه نقشی ایفا می‌کند؟

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برای درک مفهوم زنجیره تأمین پایدار باید به دو عبارت کلیدی «زنجیره تأمین» و «پایداری» توجه کرد. زنجیره تأمین به شبکه‌ای از تأسیسات شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و غیره گفته می‌شود که مجموعه عملیاتی شامل تأمین مواد خام، انتقال به سازنده، تولید محصول نهایی و در نهایت توزیع آن را دربرمی‌گیرد [۳۰، ۱۴]. طراحی زنجیره تأمین یکی از پیچیده‌ترین مسائل در تصمیم‌گیری راهبردی در رابطه با زنجیره تأمین است؛ چراکه باید به بسیاری از موارد همچون تعداد، مکان، ظرفیت، نوع و دیگر پارامترهای مربوط به پیکربندی شبکه تأسیسات در شبکه تأمین توجه شود و سپس برنامه‌ریزی بهینه برای عملیات مؤثر و بلندمدت کل زنجیره تأمین صورت گیرد [۳۵].

1. Corporate Social Responsibility

2. Electricity Supply Chain Network Design

به‌طور کلی سه نوع طراحی زنجیره تأمین وجود دارد که عبارت‌اند از: ۱. زنجیره تأمین روبه جلو^۱ که تمرکز آن بر تصمیم‌گیری از تأمین‌کننده تا مشتری است؛ ۲. زنجیره تأمین معکوس که شامل بهینه‌سازی تصمیم‌ها از مشتریان به سازندگان و مراکز بازیافت است و ۳. زنجیره تأمین حلقه‌بسته که به لجستیک روبه جلو و معکوس به صورت یک سیستم یکپارچه می‌پردازد [۲۵، ۲۸]. در صنعت برق یک شبکه زنجیره تأمین برق متشکل از سه لایه است که عبارت‌اند از: نیروگاه‌ها، پست‌های انتقال برق و پست‌های برق فشار ضعیف یا پست‌های توزیعی [۱۱]. از سوی دیگر پایداری متشکل از سه مؤلفه زیست‌محیطی، توسعه اجتماعی و عملکرد اقتصادی است و فصل مشترک بین این سه بُعد به فعالیت‌هایی در شرکت‌ها منجر می‌شود که نه تنها تأثیر مثبتی بر محیط‌زیست طبیعی و جامعه دارد، بلکه در بلندمدت منفعت اقتصادی به همراه خواهد داشت [۲، ۱۸].

بُعد اقتصادی زنجیره تأمین پایدار به طراحی یک زنجیره تأمین عملیاتی اشاره دارد که هزینه‌ها در آن به حداقل می‌رسد و درعین حال حداکثر سود ممکن از آن به‌دست آید [۲]. بُعد زیست‌محیطی زنجیره تأمین پایدار به بهبود عملکرد زیست‌محیطی شرکت‌ها اشاره دارد و شامل فعالیت‌های مختلف خارجی و داخلی می‌شود. فعالیت‌های داخلی به پیشگیری از آلودگی قبل از تولید و بازیافت زباله، تولید محصول و استخراج منابع و مواد خام اشاره دارد و فعالیت‌های خارجی بیشتر مرتبط با شیوه دفع زباله و جلوگیری از انتشار آلاینده‌های مضر است [۳۱]. درنهایت بُعد اجتماعی زنجیره تأمین پایدار به جنبه‌هایی چون حقوق بشر (نبود تبعیض، ساعات کار عادلانه و غیره)، شیوه‌های کسب‌وکار سالم (مانند مبارزه با فساد، معامله عادلانه) و افزایش مسئولیت اجتماعی و توجه به مفهوم توسعه پایدار اشاره دارد [۱۳].

جدول ۱، نتایج مرور مبانی نظری پژوهش در رابطه با طراحی زنجیره تأمین در شبکه برق را نشان می‌دهد. حسینی و همکاران (۲۰۲۰)، در یکی از جدیدترین بررسی‌های انجام‌شده، یک استراتژی نوآورانه برای یک زنجیره تأمین پایدار - انعطاف‌پذیر پیشنهاد دادند. اهداف مدنظر در طراحی مدل استوار این پژوهش به‌ترتیب اهداف اقتصادی (هزینه کل)، انعطاف‌پذیری و مسئولیت اجتماعی شرکتی بود و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در نظر گرفتن مسئولیت اجتماعی و انعطاف‌پذیری می‌تواند هزینه را تا ۵۰ درصد افزایش دهد [۱۱]. دورماز و بیلگن^۲ (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه بهینه برای زنجیره تأمین پایدار برای سوخت زیستی معرفی کردند که از مزرعه تا تأسیسات تولید بیوگاز در آن لحاظ شده بود. هدف اصلی آن‌ها در طراحی این زنجیره تأمین پایدار، حداکثر کردن سود و به حداقل رساندن فاصله بین مزرعه تا تأسیسات بود. نتایج این پژوهش نشان داد که دو عامل هزینه و قیمت خرید تأثیر مهمی بر

1. Forward Supply Chain
2. Durmaz and Bilgen

تصمیم‌های اتخاذ شده در طراحی زنجیره تأمین پایدار دارند [۸]. شه‌بازبیگیان و همکاران (۲۰۲۰) یک شبکه زنجیره تأمین نیروگاه‌های برق قدرت سلول‌های فوتوولتائیک فیلم نازک را بر اساس لجستیک روبه‌جلو/ معکوس با توجه به عدم قطعیت طراحی کردند. دو هدف اصلی پژوهش آن‌ها به حداقل رساندن هزینه طراحی زنجیره تأمین و بهینه‌سازی تصمیم‌ها و هدف دوم آن‌ها حداکثر کردن کارایی تحلیل‌ها برای یافتن محل مناسب تأسیسات بود. صحت نتایج پژوهش با یک مطالعه موردی در دنیای واقعی سنجیده شد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل خوشبینانه برای عدم قطعیت، هزینه را تا ۲۰ درصد نسبت به حالت بدبینانه کاهش می‌دهد [۲۸]. خویشتندار (۲۰۱۹) از الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر شبیه‌سازی برای طراحی زنجیره تأمین بیوگاز با محدودیت شانس فازی^۱ استفاده کرد و در مطالعه خود عدم قطعیت‌هایی چون نیروی کار، تقاضای بیوگاز، زیست‌توده در دسترس و قیمت زیست‌توده را در نظر گرفت. وی از یک چارچوب هیبرید مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم‌های تکاملی (ژنتیک و تفاضلی) برای حل دقیق مدل استفاده کرد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های تکاملی برای حل مدل غیرخطی تخصیص مکان بیوگاز بسیار مؤثر هستند [۱۵]. سارکر^۲ و همکاران (۲۰۱۹) مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین زیست‌توده و بیوگاز تجدیدپذیر را انجام دادند. هدف اصلی در این پژوهش بهینه‌سازی هزینه زنجیره تأمین بود و فرایند زنجیره تأمین به چهار مرحله تقسیم شد. الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه به کار رفت و چندین آزمایش عددی برای بررسی صحت نتایج صورت گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی برای نمونه‌های بزرگ در مقایسه با روش‌های سنتی، عملکرد بهتری دارد [۲۷]. محمدی و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل زنجیره تأمین چندپله‌ای برای تولید پایدار برق از زباله‌ها معرفی کردند. هدف از این مدل به حداقل رساندن هزینه و سود خالص از طریق بهینه‌سازی انتخاب فناوری تبدیل زباله به برق بود. مدل پیشنهادی آن‌ها نتنها آسیب وارده به محیط زیست را کاهش داد؛ بلکه زباله‌ها را در کل زنجیره تأمین به طور یکنواخت توزیع کرد و در زمینه تأمین برق بسیار مفید بود [۲۱]. مهرانفر و همکاران (۲۰۱۹)، یک الگوریتم بهینه‌سازی هیبرید وال برای حل یک مسئله شبکه توزیع - تولید پیشنهاد کردند که هدف اصلی آن کاهش انتشار دی‌اکسید کربن بود. برای حل این مسئله از یک روش فراابتکاری بهره‌گیری شده و از انجماد تدریجی^۳ برای بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج این پژوهش حاکی از اثربخش بودن این الگوریتم در حل مسئله کاهش انتشار دی‌اکسید کربن است و در زمان معقولی اجرا می‌شود [۱۹]. دهقانی و همکاران (۲۰۱۸)، یک زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر برای برق تولیدی از سلول‌های فوتوولتائیک طراحی کردند که عدم قطعیت‌ها و خطرهای متداول در آن لحاظ شده بود. برای

1. Fuzzy Chance-Constrained
 2. Sarker
 3. Simulated Annealing

طراحی این مدل یک روش بهینه‌سازی استوار توسعه یافت و نتایج با دنیای واقعی مقایسه شد که حاکی از اثربخشی این مدل برای طراحی یک زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر بود [۶]. اسدی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل دوهدفه تصادفی برای تعیین مکان - فهرست موجود - مسیریابی برای زنجیره تأمین سوخت زیستی با استفاده از میکروآلگا پیشنهاد کردند که شامل مراکز تولید، استخراج و حمل‌ونقل بود. دو هدف کاهش هزینه و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در طراحی این مدل موردتوجه قرار گرفت. برای حل این مسئله از دو روش NSGA-II و MOPSO استفاده شد. مقایسه نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II در بیشتر معیارهای ارزیابی بهتر از MOPSO است [۱]. بیاتلو و امیری (۲۰۱۸)، از یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی برای یک زنجیره تأمین برق معرفی استفاده کردند که از ایستگاه‌های برق، خطوط انتقال، پست‌های انتقال و نقاط تشکیل شده بود. اهدافی چون هزینه، اثربخشی شبکه، مکان‌یابی تأسیسات، قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی برای ظرفیت در مدل آن‌ها موردتوجه قرار گرفت [۴]. جبارزاده و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل استوار چندهدفه برای زنجیره تأمین پایدار برق معرفی کردند که هدف اصلی آن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و به‌حداکثر رساندن انعطاف‌پذیری سیستم بود. عدم قطعیت‌های مفروض در مدل پیشنهادی آن‌ها عبارت از ظرفیت تولید برق، تقاضای مصرف و سطح قیمت بود [۱۲]. وحدت‌زاد و همکاران (۲۰۱۸)، چارچوب حفظ انرژی را در طراحی زنجیره تأمین برق سبز معرفی کردند. هدف اصلی پژوهش آن‌ها استفاده و مدیریت زباله برای تولید برق با استفاده از بازیافت انرژی از هر مرحله از زنجیره تأمین بود. در مدل پیشنهادی آن‌ها انرژی به‌عنوان یک ویژگی مستقل در زنجیره تأمین سبز با لجستیک معکوس در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که نحوه جمع‌آوری انرژی از هر مرحله و منبع آن عامل مهمی در افزایش بازدهی بازیافت انرژی برق از مراحل مختلف زنجیره تأمین است [۳۱]. بایرام‌زاده و همکاران (۲۰۱۷)، انواع مختلف عدم قطعیت در طراحی شبکه زنجیره تأمین را بررسی کردند و برای این کار از رویکرد بهینه‌سازی استوار بهره گرفتند. در این پژوهش طبقه‌بندی کاملی از انواع عدم قطعیت چون تصادفی بودن مصرف و فناوری بیان شده و منابع احتمالی آن‌ها نیز مشخص شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل پیشنهادی در مقایسه با روش‌های قطعی عملکرد بهتری دارد [۳]. جبارزاده و همکاران (۲۰۱۷)، یک رویکرد استوار و چندهدفه برای طراحی یک زنجیره تأمین سبز و انعطاف‌پذیر معرفی کردند و سه هدف اقتصادی، زیست‌محیطی و انعطاف‌پذیری را برای شبکه های برق هوشمند در نظر گرفتند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تعارض وجود دارد [۱۳]. مشایخی و همکاران (۱۳۹۹)، پژوهش با عنوان «طراحی مدل زنجیره فولاد و برآورد میزان مصرف با رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان» انجام دادند. این پژوهش با هدف ارائه مدلی عامل‌بنیان صورت گرفت که بتواند با در نظر گرفتن عوامل کلیدی صنعت فولاد، زنجیره تأمین فولاد را شبیه‌سازی و میزان تولید و مصرف آن را برآورد کند.

رویکرد این پژوهش آمیخته (کمی و کیفی) بود و با استفاده از نرم افزار AnyLogic و کدگذاری به زبان جاوا مدل برآورد میزان مصرف زنجیره فولاد با رویکرد مدل سازی عامل بنیان طراحی شد و طبق نظر خبرگان شبیه سازی عامل بنیان، فرایند تبیین مدل نیز مورد تأیید قرار گرفت. با توجه به نتایج این شبیه سازی، مدل ارائه شده می تواند برآورد مناسبی از آتیه زنجیره تأمین فولاد و میزان مصرف زنجیره را ارائه دهد [۱۷]. شهبازی و همکاران (۱۳۹۹)، مکان یابی و طراحی مدل شبکه توزیع برق نیروگاه های خورشیدی، بادی و کوچک مقیاس گازی را در پژوهش خود انجام دادند و مدل زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با هدف پیشینه کردن سود تأمین کننده و کمینه کردن انتشار آلاینده را ارائه و آن را برای استان زنجان به عنوان مطالعه موردی حل کردند. طبق نتایج، مناطقی از شهرهای خدابنده، ایجرود، ماهنشان برای احداث نیروگاه بادی و مناطقی از خدابنده و ایجرود برای احداث نیروگاه خورشیدی و خدابنده، زنجان و ماهنشان برای احداث نیروگاه کوچک مقیاس گازی مناسب بودند [۲۹]. رادفر و محمدی تبار (۱۳۹۸)، یک مسئله بهینه سازی دوهدفه برای مدیریت موجودی در یک زنجیره تأمین سبز چندسطحی را حل کردند. اهداف این پژوهش کاهش هزینه، کمینه کردن آلاینده های زیست محیطی و افزایش قابلیت اطمینان بود. برای حل مسئله از روش های فراابتکاری ژنتیک، انجماد تدریجی و الگوریتم ترکیبی از این دو استفاده شد. مقایسه عملکرد روش های بالا نشان داد که کارایی الگوریتم ترکیبی بهتر از دو الگوریتم به طور جداگانه است [۲۴].

همان طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، تمرکز بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه معطوف به جنبه های اقتصادی و زیست محیطی بوده است و تعداد اندکی از مطالعات بعد اجتماعی را نیز در طراحی زنجیره تأمین خود لحاظ کرده اند.

حال با درک قابلیت منابع تولید پراکنده در رفع مشکلات زنجیره تأمین برق، در این پژوهش راهکاری بهینه برای حرکت از زنجیره تأمین برق سنتی به سمت زنجیره تأمین برق توزیع شده با تولیدات پراکنده و چگونگی نفوذ این تولیدات در زنجیره جدید پیشنهاد شده است. از آنجاکه این ساختار به مرکزیت واحدهای تولید پراکنده طراحی می شود، بسیار متأثر از مکان، ظرفیت و نوع این واحدها است. به همین دلیل لازم است که مکان و ظرفیت بهینه این واحدها در مرحله طراحی زنجیره تأمین به طور بهینه تعیین شوند. هدف گذاری برای کمینه سازی تلفات توان، بار از دست رفته، هزینه سرمایه گذاری و افزایش عرضه انرژی و پیامدهای اجتماعی در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۱. نتایج مرور مابانی نظری پژوهش در ارتباط با طراحی زنجیره تأمین در صنعت برق

منبع	پژوهشگر	حوزه کاربردی	روش مدل‌سازی	روش حل	اهداف زنجیره تأمین	عدم قطعیت
[۱۱]	حسینی و همکاران، (۲۰۲۰)	ESCND	^۱ MILP	دقیق	اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی	فازی، تصادفی
[۸]	دورماز و بیلگن، (۲۰۲۰)	تولید برق از زیست‌توده	MILP	دقیق	اقتصادی	-
[۲۸]	شهبازی‌بیگیان و همکاران، (۲۰۲۰)	تولید برق از سلول‌های فوتوولتائیک	MILP	دقیق	اقتصادی	فازی، استوار
[۱۵]	خویش‌نندگان، (۲۰۱۹)	بیودیزل	^۲ NLP	ابتکاری	اقتصادی	فازی، تصادفی
[۲۷]	سارکر و همکاران، (۲۰۱۹)	تولید سوخت از زیست‌توده و بیوگاز	^۳ MILNP	ابتکاری	اقتصادی	-
[۲۰]	محمدی و همکاران، (۲۰۱۹)	تولید برق از زیاله	MILP	دقیق	اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی	-
[۱۹]	مهرانفر و همکاران، (۲۰۱۹)	ESCND	MILNP	فرا ابتکاری	اقتصادی، زیست‌محیطی	تصادفی
[۶]	دهقانی و همکاران، (۲۰۱۸)	تولید برق از سلول‌های فوتوولتائیک	^۴ LRO	دقیق	اقتصادی	استوار
[۱]	اسدی و همکاران، (۲۰۱۸)	تولید سوخت از زیست‌توده	MILP	فرا ابتکاری	اقتصادی و زیست‌محیطی	استوار
[۴]	بیاتلو و امیری، (۲۰۱۸)	ESCND	NLP	ابتکاری	اقتصادی	تصادفی
[۱۳]	جبارزاده و همکاران، (۲۰۱۸)	ESCND	MILP	دقیق	اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی	تصادفی

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Non Linear Programming
3. Mixed Integer Non-Linear Programming
4. Linear Robust Optimization

منبع	پژوهشگر	حوزه کاربردی	روش مدل سازی	روش حل	اهداف زنجیره تأمین	عدم قطعیت
[۳۱]	وحداتزاد و همکاران، (۲۰۱۸)	بازیافت و استفاده مجدد از انرژی	-	دقیق	اقتصادی، زیست محیطی	-
[۳]	بایرامزاده و همکاران، (۲۰۱۷)	تولید سوخت زیستی از میکروآلگا	MILP	دقیق	اقتصادی	استوار
[۱۲]	جبارزاده و همکاران، (۲۰۱۷)	ESCND	MILP	ابتکاری	اقتصادی، زیست محیطی	استوار
[۱۷]	مشایخی و همکاران، (۱۳۹۹)	صنعت فولاد	مدل سازی عامل بنیان	دقیق	اقتصادی	-
[۲۹]	شهبازی و همکاران، (۱۳۹۹)	شبکه توزیع برق نیروگاه های کوچک خورشیدی، بادی	محدودیت اپسیلون	دقیق	اقتصادی، زیست محیطی	-
[۲۴]	رادفر و محمدی تبار، (۱۳۹۸)	مدیریت موجودی	الگوریتم ژنتیک، انجماد تدریجی	فرا ابتکاری	اقتصادی، زیست محیطی	-

۳. روش شناسی پژوهش

با توجه به توضیحات بیان شده، در ادامه مسئله تعیین محل، نوع و ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده در زنجیره تأمین برق جدید بررسی شده است. مسئله مکان یابی تولیدات پراکنده از جمله مسائل بهینه سازی است که در آن سعی می شود بهترین ترکیب از متغیرهای تصمیم به نحوی انتخاب شوند که توابع هدف مسئله کمینه شده و قیود مسئله برآورده شوند. متغیرها و شاخص ها مدل ریاضی به شرح جدول ۲، مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲. شاخص‌ها و متغیرهای مدل ریاضی

i, j	شاخص ناحیه‌ها
G	شاخص واحدهای تولید پراکنده
P_g^{DG}	میزان ظرفیت واحد تولید پراکنده گام
P_i^{Load}	میزان بار مصرفی مشترکین واقع در ناحیه i ام
$P_{i,j}^{Line}$	میزان توان الکتریکی انتقالی بین دو ناحیه i و j
CC_g	هزینه کل سرمایه‌گذاری برای واحد تولید پراکنده گام
OM_g	هزینه تعمیرات و نگهداری واحد تولید پراکنده گام
ρ_g	هزینه سوخت مصرفی واحد تولید پراکنده گام
HV_g	ارزش حرارتی سوخت ورودی به واحد تولید پراکنده گام
η_g	بازدهی واحد تولید پراکنده گام
LT_g	طول عمر واحد تولید پراکنده گام
D	نرخ بهره سالانه
τ	میزان جریمه انرژی تأمین‌نشده
D_g	چگالی آلاینده‌های تولیدی واحد تولید پراکنده گام
\overline{P}_g^{DG}	حداکثر ظرفیت مجاز برای تولید پراکنده گام
\overline{P}_i^{DG} و P_i^{DG}	حداقل و حداکثر ظرفیت تولید تجدیدپذیر در ناحیه i ام
$\overline{P}_{i,j}^{Line}$	حداکثر ظرفیت مسیر موجود بین ناحیه i و j
\overline{PD}	حداکثر ضریب نفوذ تولیدات پراکنده
N_{max}	حداکثر تعداد تولیدات پراکنده

فرضیات مدل

- شبکه مورد مطالعه از لحاظ فنی و تکنیکال یک شبکه پایدار و ثابت در نظر گرفته شده است؛
- نوع شبکه مورد مطالعه شبکه جریان متناوب است؛
- نوع آلاینده‌های در نظر گرفته شده CO_2 و NOX , SO_2 است.

توابع هدف. چهار هدف اصلی در طرح تعیین محل، نوع و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده در زنجیره تأمین جدید برق در نظر گرفته شده است. این چهار هدف به شرح زیر است:

- هدف اقتصادی (ECOF). تابع هدف اقتصادی هزینه تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین را کمینه می‌کند. انرژی الکتریکی مشترکین با خرید، نصب و بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده در زنجیره تأمین شبکه توزیع فراهم می‌شود. این تابع هدف شامل دو بخش هزینه سرمایه‌گذاری^۱ و هزینه بهره‌برداری^۲ است. هزینه بهره‌برداری خود شامل دو هزینه، یعنی هزینه

1. Capital Cost
2. Operation Cost

تعمیر و نگهداری^۱ و هزینه سوخت^۲ است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای تولید پراکنده شامل خرید تجهیزات، نصب آن‌ها و هزینه موردنیاز برای دریافت مجوزهای لازم است. بیان ریاضی تابع هدف اقتصادی به صورت رابطه ۱، است.

$$ECOF = \sum_{g \in G} AC_g \cdot P_g^{DG} \cdot \beta + P_g^{DG} \cdot OM_g \cdot \beta + P_g^{DG} \cdot \rho_g \cdot r_g \quad \text{رابطه (۱)}$$

در تابع هدف اقتصادی، AC معادل هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری^۳ برای هر یک از واحدهای تولید توان الکتریکی است و با استفاده از رابطه ۲، محاسبه می‌شود.

$$AC_g = \frac{d(1+d)^{LT_g}}{(1+d)^{LT_g} - 1} \cdot CC_g \quad \text{رابطه (۲)}$$

با استفاده از رابطه ۲، هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای تولید پراکنده در طول سال‌های عمر آن‌ها تقسیم می‌شود و به ازای هر سال بهره‌برداری مقدار سالیانه هزینه سرمایه‌گذاری به تابع هدف افزوده خواهد شد. بدین صورت تأثیر طول عمر هر تجهیز در انتخاب شدن آن برای برنامه‌ریزی بهینه زنجیره تأمین لحاظ می‌شود. به منظور تبدیل هزینه‌های آینده (دوره زمانی t) به هزینه‌ی فعلی، ضریب β در تابع هدف به کار گرفته شده است. این ضریب از رابطه ۳، به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{1}{(1+d)^t} \quad \text{رابطه (۳)}$$

یادآوری این نکته لازم است که در طرح پیشنهادی از هر دو دسته کلی تولید پراکنده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر استفاده می‌شود. هزینه سوخت واحدهای تجدیدپذیر صفر است؛ اما هزینه سوخت واحدهای تجدیدناپذیر به بازدهی آن‌ها و ارزش حرارتی سوخت مورد استفاده وابسته است؛ بنابراین نرخ تبدیل انرژی اولیه در واحد تولیدی η_g به انرژی الکتریکی در واحدهای تجدیدناپذیر با استفاده از رابطه ۴، محاسبه می‌شود.

$$r = \frac{1}{HV_g \cdot \eta_g} \quad \text{رابطه (۴)}$$

-
1. O&M Cost
 2. Fuel Cost
 3. Annual Investment Cost

– هدف اجتماعی (ROF). این هدف کمینه‌سازی بار ازدست‌رفته و به حداقل رساندن انرژی تأمین‌نشده مشترکین در افق برنامه‌ریزی را دنبال می‌کند. عدم تأمین انرژی الکتریکی و قطع برق مشترکین، عواقب جبران‌ناپذیری را در پی دارد. قطعی برق در بخش صنعت، توقف تولید و کاهش GDP، در بخش مسکونی، کاهش رفاه اجتماعی، در بخش تجاری، تعطیلی کسب‌وکارها و افزایش بیکاری را در پی دارد؛ همچنین در بخش خدمات حساس مانند بیمارستان‌ها این عواقب ممکن است جبران‌ناپذیر باشد؛ بنابراین افزایش قابلیت اطمینان عرضه انرژی در زنجیره تأمین جزو ارکان اساسی است.

همان‌طور که توضیح داده شد، در گذشته با توجه به ماهیت و ساختار یک‌طرفه زنجیره تأمین، در صورت بروز مشکل در شبکه انتقال یا توزیع، انرژی الکتریکی مشترک قطع می‌شد. حضور تولیدات پراکنده در کنار مشترکین و ایجاد زنجیره تأمین توزیع‌شده خود ذاتاً قطعی برق را کاهش می‌دهد.

هزینه وقفه در برق‌رسانی به مشترکین به‌صورت جریمه در تابع هدف اعمال می‌شود. این هزینه به شاخص قابلیت اطمینان ENS (مقدار انرژی تأمین نشده^۱) وابسته است. هر چه میزان این شاخص کوچک‌تر باشد، تعداد مشترک تأمین‌نشده کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر است.

$$ROF = \tau \cdot \sum_{i \in B} (ENS_i) \quad \text{رابطه (۵)}$$

– هدف کاهش تلفات انرژی^۲ (ELOF). یکی از توابع هدف مهم در مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده در زنجیره تأمین، کمینه‌کردن مقدار تلفات انرژی الکتریکی است. بدیهی است که هر چه میزان تلفات در سیستم کمتر باشد، سود اقتصادی به علت کاهش تولید توان، افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه میزان تلفات زنجیره تأمین در سطح شبکه توزیع برق بسیار زیاد است، کاهش تلفات با به‌کارگیری واحدهای تولیدی باعث افزایش قابل توجه سود اقتصادی بهره‌بردار می‌شود. این تابع هدف با رابطه ۶، نشان داده می‌شود:

$$LEOF = \sum_{g \in G} P_g^{DG} - \sum_{i \in B} (P_i^{Load} - ENS_i) \quad \text{رابطه (۶)}$$

– هدف زیست‌محیطی (EOF). آلودگی‌های زیست‌محیطی منابع انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و مشکلات گرمایش زمین و معاهده‌های بین‌المللی، موجب محدودشدن استفاده از نیروگاه‌های بزرگ مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر شده است. همین امر موجب

1. Energy Not Supplied
2. Energy Loss

افزایش گرایش دولت‌ها به سرمایه‌گذاری در حوزه منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک شده است. یکی از مناسب‌ترین راهکارهای استفاده از منابع تجدیدپذیر در زنجیره تأمین برق، استفاده به صورت تولیدات پراکنده و کوچک توسط مشترکین است. این تابع هدف میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در افق برنامه‌ریزی را با استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر و منابع تولید با آلاینده‌گی کمتر (مثل گاز طبیعی) کمینه می‌کند.

به منظور در نظر گرفتن اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از آلاینده‌های تولید شده توسط منابع مختلف انرژی، تابع هدف زیست‌محیطی مسئله بهینه‌سازی به صورت میزان انتشار کل زنجیره تأمین در کنار سایر توابع هدف در نظر گرفته شده است تا تولید کننده‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه قرار گیرند. این تابع هدف شامل میزان انتشار آلاینده‌های تولید شده توسط واحدهای تولیدی غیرتجدیدپذیر است و با استفاده از رابطه ۷، محاسبه می‌شود.

$$EOF = \sum_{g \in G} (D_g \cdot P_g^{DG}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

قیود و محدودیت‌ها. قیود طرح پیشنهادی با توجه به محدودیت‌های زنجیره تأمین و واحدهای تولید پراکنده به شرح زیر است:

معادلات تعادل توان تولیدی و مصرفی در هر یک از گره‌های زنجیره تأمین با رابطه ۸، تعریف می‌شود.

$$P_{i,j}^{Line} + P_{g,i}^{DG} = P_i^{Load} \quad (i, j) \in B \quad g \in G \quad \text{رابطه (۸)}$$

هر مسیر حداکثر ظرفیت مشخصی دارد. محدودیت توان عبوری از هر مسیر در ادامه بیان شده‌اند.

$$|P_{i,j}^{Line}| \leq \overline{P_{i,j}^{Line}} \quad (i, j) \in B \quad \text{رابطه (۹)}$$

حداکثر ظرفیت واحدهای تولید پراکنده توسط رابطه ۱۰، بیان می‌شود.

$$0 \leq P_g^{DG} \leq \overline{P_g^{DG}} \quad g \in G \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

حداکثر ظرفیت تولید در هر ناحیه با توجه به شرایط محیطی و اقلیمی توسط رابطه ۱۱، نشان داده می‌شود. این محدوده به صورت احتمالاتی و از طریق روش تخمین نقطه مشخص می‌شود. این رویکرد در بخش بعد شرح داده شده است.

$$\underline{P_i^{DG}} \leq P_{g,i}^{DG} \leq \overline{P_i^{DG}} \quad g \in G, i \in B \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

میزان توان تولیدشده در کل زنجیره تأمین نباید از یک مقدار مشخص بیشتر باشد. معادله ۱۲، سطح نفوذ کل واحدهای تولیدی در زنجیره تأمین را کنترل می‌کند؛ چراکه سطح بالای تولید می‌تواند به بروز مشکلاتی متعددی منجر شود.

$$PD = \frac{\sum_g P_g^{DG}}{\sum_i P_i^{Load}} \quad g \in G, i \in B \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$PD \leq \overline{PD} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

حداکثر تعداد واحد تولیدی جدید مجاز برای احداث در زنجیره تأمین نیز نباید از N_{max} فراتر رود.

$$g \leq N_{max} \quad g \in G \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

مدل‌سازی عدم قطعیت تولید تجدیدپذیر. از آنجاکه سرعت باد و شدت تابش خورشید ماهیت احتمالاتی دارند، توان خروجی این واحدها متناوب است. در این پژوهش برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های تولید این واحدها از دو تابع چگالی احتمال استفاده شده است.

مدل‌سازی تولید واحد بادی. تابع چگالی احتمال رایلی برای مدل‌سازی مناسب رفتار سرعت باد در هر دوره پیش‌بینی استفاده شده است. تابع چگالی احتمال رایلی نوع خاصی از تابع چگالی احتمال ویبال است.

$$f_w(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه ۱۵، $f_w(v)$ و c به ترتیب، تابع چگالی احتمال رایلی، شاخص مقیاس و سرعت باد هستند. اگر مقدار متوسط سرعت‌های باد (v_m) برای یک ناحیه، مشخص باشد، شاخص مقیاس c می‌تواند با استفاده از روابط ۱۶، محاسبه شود.

$$v_m = \int_0^{\infty} v f_w(v) dv = \int_0^{\infty} \left(\frac{2v^2}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$c \cong 1.128 v_m$$

توان خروجی توربین بادی با استفاده از پارامترهای منحنی توان توربین بادی به صورت نشان داده شده در رابطه ۱۷، محاسبه شده است.

$$P_g^{DG}(v) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq v_{aw} \leq v_{ci} \\ P_g^{rated} \times \frac{(v_{aw} - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & , P_{rated} v_r \leq v_{aw} \leq v_{co} , v_{ci} \leq v_{aw} \leq v_r \\ 0 & , v_{co} \leq v_{aw} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه ۱۷، v_{ci} ، v_r و v_{co} به ترتیب سرعت cut-in، سرعت نامی و سرعت cut-off توربین بادی در ناحیه و $P_g^{DG}(v)$ توان خروجی واحد تولید پراکنده گام از نوع بادی به ازای سرعت باد v است.

مدل سازی تولید توان خورشیدی. توان خروجی واحد فتوولتائیک به شدت تابش بستگی دارد. توزیع ساعتی تابش در یک موقعیت خاص معمولاً یک توزیع دوقله‌ای را دنبال می‌کند که یک ترکیب خطی از دو تابع توزیع تک‌قله‌ای است. برای هر تابع تک‌قله‌ای از یک تابع چگالی احتمال بتا به صورت رابطه ۱۸، استفاده شده است.

$$f_b(s_i) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times s_i^{(\alpha-1)} \times (1-s_i)^{(\beta-1)} & , \text{for } 0 \leq s_i \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه ۱۸، s_i نشان دهنده تابش خورشید (kW/m^2) است. برای محاسبه پارامترهای تابع توزیع بتا (α, β) متوسط و انحراف معیار متغیرهای تصادفی با استفاده از روابط ۱۹ و ۲۰، محاسبه شده‌اند.

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

با در اختیار داشتن توزیع تابش و تابع تبدیل تابش به توان، توزیع توان خورشیدی به دست می‌آید. تابع تبدیل تابش به توان استفاده شده به صورت رابطه ۲۱، است.

$$P_g^{DG}(s_i) = \eta_g^{DG} \times S_i \times s_i \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در رابطه ۲۱، P_{Si}^{DG} توان خروجی واحد تولید پراکنده گام از نوع فتوولتائیک به‌ازای تابش Si و بر حسب کیلو وات، η^{pv} و S^{pv} نیز به‌ترتیب، بهره‌وری و مساحت کل محدوده مجهز به فتوولتائیک در ناحیه آم هستند.

روش تخمین نقطه. برای مدل‌سازی احتمالاتی عدم‌قطعیت تولید توان توسط واحدهای بادی و خورشیدی از روش تخمین نقطه استفاده شده است که در ادامه مراحل مختلف آن تشریح خواهد شد.

مرحله نخست: در این مرحله، تعداد متغیرهای تصادفی ورودی که با m نشان داده می‌شود، تعیین می‌گردد.

مرحله دوم: در این مرحله، مومنث اول و دوم آامین متغیر تصادفی خروجی در مقدار صفر تنظیم می‌شوند.

$$E(S_i^h) = 0, \quad h = 1, 2 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

مرحله سوم: در این مرحله، پارامتر احتمالاتی z_l انتخاب می‌شود.

مرحله چهارم: در این مرحله، ضریب چولگی پارامتر z_l محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{l,3} = \frac{E[(z_l - \mu_{z_l})^3]}{(\sigma_{z_l})^3} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

در رابطه ۲۳، $\lambda_{l,3}$ ضریب چولگی، μ_{z_l} میانگین، σ_{z_l} انحراف معیار z_l و E عملگر نشان دهنده امید ریاضی است.

مرحله پنجم: در این بخش، دو مکان استاندارد با استفاده از رابطه ۲۴، تعیین می‌شود.

$$\xi_{l,1} = \frac{\lambda_{l,3}}{2} + \sqrt{m + \left(\frac{\lambda_{l,3}}{2}\right)^2} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

مرحله ششم: در این گام، دو پارامتر مکان با استفاده از رابطه ۲۵، تخمین زده می‌شود.

$$z_{l,k} = \mu_{z_l} + \xi_{l,k} \cdot \sigma_{z_l}, \quad k = 1, 2 \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

مرحله هفتم: تابع هدف غیراحتمالاتی برای دو پارامتر موقعیت^۱ تخمین زده شده در بالا محاسبه می شود.

$$S_{i(1,k)} = F(\mu_{z1}, \mu_{z2}, \dots, \mu_{zk}, \dots, \mu_{zm}), k = 1, 2 \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

مرحله هشتم: در این مرحله دو عامل وزنی محاسبه می شود.

$$\omega_{l,k} = \frac{1}{m} (-1)^k \cdot \frac{\xi_{l,(3-k)}}{\xi_{l,1} - \xi_{l,2}}, k = 1, 2 \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

مرحله نهم: در این مرحله، مومنت های اول و دوم متغیرهای تصادفی خروجی به روزرسانی می شوند.

$$E(S_i^h) = E(S_i) + \sum_{k=1}^2 \omega_{l,k} \cdot (S_{i(1,k)})^h, h = 1, 2 \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

مرحله دهم: در این بخش، مراحل چهارم تا نهم برای تمامی متغیرهای ورودی دارای عدم قطعیت تکرار می شود.

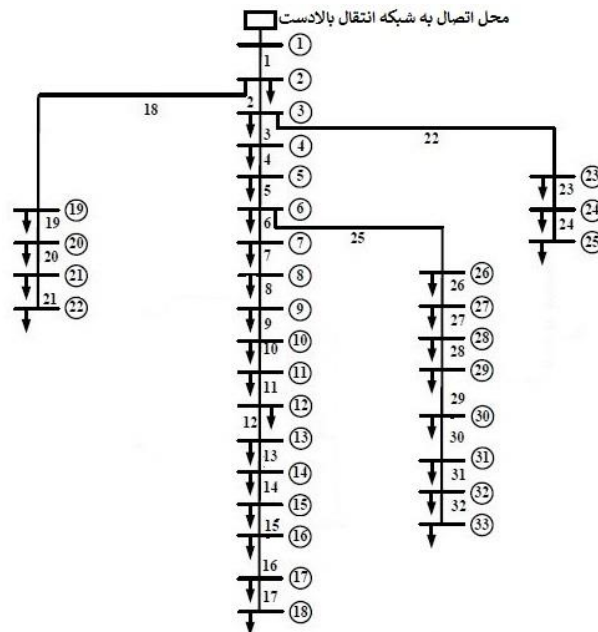
مرحله یازدهم: در این مرحله، میانگین و انحراف معیار متغیر خروجی S_i محاسبه می شود.

$$\mu_{S_i} = E(S_i), \quad \sigma_{S_i} = \sqrt{E(S_i^2) - (E(S_i))^2} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

۴. تحلیل داده ها و یافته های پژوهش

در این پژوهش برای یافتن پاسخ بهینه از الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب که یک الگوریتم بسیار قدرتمند در حل مسائل بهینه سازی چندهدفه محسوب می شود، استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک روشی برای حل مسائل بهینه سازی پیچیده است که جواب های حاصل از آن کیفیت قابل قبول و مطلوبی دارند. تفاوت عمده این الگوریتم بهبود یافته با الگوریتم ژنتیک استاندارد در سازوکار مرتب سازی پاسخ ها است. مفاهیمی از قبیل غلبه، رتبه بندی و فاصله ازدحامی از مهم ترین و اصلی ترین مفاهیم این الگوریتم است. به این ترتیب که هر میزان رتبه جواب کمتر بوده و فاصله تراکمی بیشتر باشد، جواب مطلوب تر خواهد بود.

شبکه تست مورد مطالعه. شبیه‌سازی بر روی یک شبکه استاندارد و مرجع با عنوان «شبکه توزیع ۳۳ ناحیه IEEE» انجام شده است [۲۳]. این شبکه در حالت زنجیره تأمین سنتی از شبکه انتقال بالادست که به ناحیه یک متصل است، تأمین انرژی می‌شود و هیچ واحد تولید پراکنده‌ای ندارد. تمامی محاسبات با استفاده از نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. در ادامه ابتدا شبکه ۳۳ ناحیه‌ای IEEE معرفی می‌شود و در ادامه با انجام آزمون‌های مختلف، چگونگی نفوذ تولیدات پراکنده و اثر آن‌ها بر زنجیره تأمین برق ارزیابی می‌شود. نمودار خطی شبکه مورد مطالعه در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۲. شبکه ۳۳ ناحیه‌ای IEEE

همان‌طور که گفته شد، ناحیه شماره ۱ به شبکه اصلی متصل شده است و انرژی مورد نیاز مشترکین در ساختار سنتی از طریق این ناحیه با دریافت از شبکه انتقال تأمین می‌شود. میزان مصرف کل مشترکین ۳/۷ مگاوات در نظر گرفته شده است. مشخصات بارهای موجود در این سیستم در جدول ۳، مشاهده می‌شود. اطلاعات مربوط به واحدهای تولیدی مختلف در جدول ۴، ارائه شده است. قیمت انرژی توزیع‌نشده در این شبکه $7000 \text{ \$/MWh}$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. اطلاعات بارهای مختلف شبکه ۳۳ ناحیه‌ای IEEE

شماره ناحیه	توان مصرفی مشترکین (MW)	شماره ناحیه	توان مصرفی مشترکین (MW)	شماره ناحیه	توان مصرفی مشترکین (MW)
۱	۰	۱۲	۰/۰۶	۲۳	۰/۱۰۶۵
۲	۰/۱۱	۱۳	۰/۰۶	۲۴	۰/۲۲
۳	۰/۰۹	۱۴	۰/۱	۲۵	۰/۲۲
۴	۰/۲۲	۱۵	۰/۰۶	۲۶	۰/۰۶
۵	۰/۰۶	۱۶	۰/۰۶	۲۷	۰/۰۸۸۵
۶	۰/۱۶	۱۷	۰/۰۶	۲۸	۰/۰۶
۷	۰/۲	۱۸	۰/۰۸	۲۹	۰/۱۲
۸	۰/۲	۱۹	۰/۰۸	۳۰	۰/۲
۹	۰/۰۶	۲۰	۰/۰۸	۳۱	۰/۲
۱۰	۰/۰۶	۲۱	۰/۰۸	۳۲	۰/۲۱
۱۱	۰/۰۴۵	۲۲	۰/۰۸	۳۳	۰/۱۶

جدول ۴. اطلاعات واحدهای مختلف تولید پراکنده [۹، ۱۰]

نوع تولیدات پراکنده	هزینه سرمایه‌گذاری (\$/kW)	هزینه سوخت (\$/kWh)	میزان آلاینده‌گی (kg/MWh)	هزینه تعمیرات و نگهداری (\$/kWh)	طول عمر (سال)
میکروتوربین	۱۴۸۵	۰/۰۷۵	۵۳۰	۰/۰۱۵	۱۳
پیل سوختی	۳۶۷۴	۰/۰۶۷	۵۱۰	۰/۰۱	۱۳
دیزل ژنراتور	۱۳۵۱	۰/۰۶	۹۲۰	۰/۰۱۸	۱۲
توربین بادی	۶۶۷۵	۰	۰	۰/۰۰۹	۲۰
فتوولتائیک	۳۸۶۶	۰	۰	۰/۰۰۵	۲۰

حداکثر ظرفیت هر یک از واحدهای تولید پراکنده ۴۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. در ارتباط با محل نصب واحدها تجدیدنپذیر محدودیتی اعمال نشده است. بدین معنا که این واحدها می‌توانند در هر ناحیه‌ای، به جز ناحیه شماره ۱ که محل اتصال به شبکه انتقال است، وصل شوند. ظرفیت استاندارد واحدهای تولید پراکنده به صورت ضریبی از ۱۰ کیلووات فرض شده است؛ بنابراین با توجه به بیشینه ۱۰۰ کیلووات برای هر واحد، ظرفیت واحدهای تولیدی می‌تواند مقادیر ۱۰، ۲۰ تا ۱۰۰ کیلووات داشته باشند. ضریب نفوذ تولیدات پراکنده ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است؛ بدین معنا که زنجیره تأمین به طور کامل از نظر انرژی خودکفا شود و بتواند کل انرژی موردنیاز خود را از تولیدات پراکنده محلی تأمین کند. در این صورت حتی در صورت قطع

شبکه انتقال یا تولید بالادست، زنجیره تأمین قابلیت عملکرد در حالت مستقل یا جزیره‌ای^۱ را دارد.

نتایج عددی. در این قسمت نتایج عددی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام‌شده در سناریوهای مختلف ارزیابی می‌شود. در هر سناریو، محل نصب واحدهای تولید و ظرفیت آن‌ها، میزان تلفات توان، مقدار انرژی تأمین‌نشده و همچنین مقدار آلاینده‌گی تولیدشده بیان می‌شود. سناریوهای موردبررسی به شرح زیر است:

- زنجیره تأمین به‌صورت سنتی در نظر گرفته می‌شود و تمام توان الکتریکی موردنیاز از شبکه انتقال متصل به ناحیه ۱ دریافت می‌شود؛

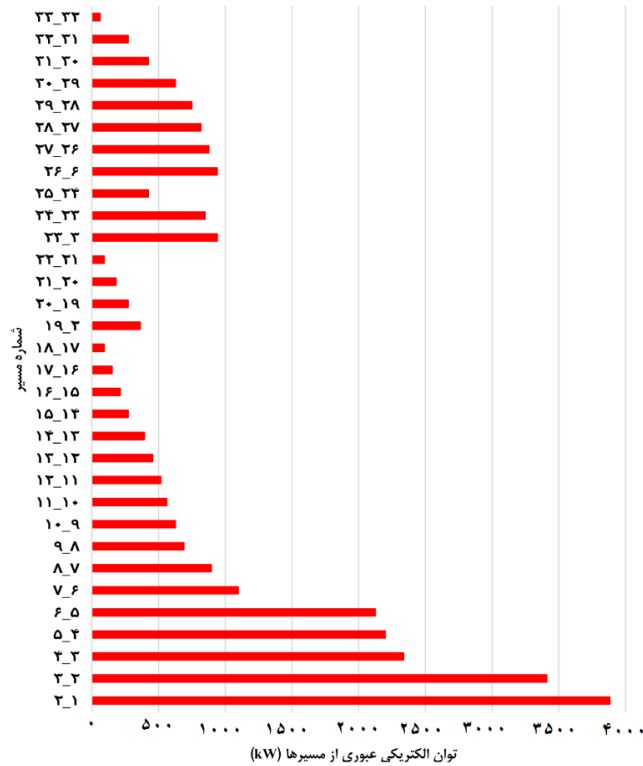
- زنجیره تأمین با نفوذ تولیدات پراکنده به‌منظور استقلال در تأمین انرژی در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف مسئله اقتصادی و اجتماعی است؛

- زنجیره تأمین با نفوذ تولیدات پراکنده به‌منظور استقلال در تأمین انرژی در نظر گرفته می‌شود و تمام توابع هدف در نظر گرفته می‌شوند.

سناریوی اول: این سناریو، حالت اولیه و سنتی زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که هیچ واحد پراکنده‌ای در آن نصب نشده است و صرفاً از طریق شبکه انتقال و به‌صورت یک‌طرفه تأمین می‌شود. تمام انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین در این حالت از شبکه انتقال متصل‌شده به ناحیه ۱ تأمین می‌شود و شبکه توزیع تنها وظیفه توزیع انرژی دریافتی از این ناحیه را برعهده دارد و از خود ماهیتی مستقل ندارد. هدف از انجام این سناریو، مطالعه و بررسی وضعیت زنجیره تأمین قبل از به‌روزرشدن و نصب واحدهای تولید پراکنده و به‌کارگیری روش پیشنهادی است. با توجه به اینکه انرژی الکتریکی در این حالت توسط نیروگاه‌های بزرگ مبتنی بر سوخت‌های مختلف تأمین می‌شود، میزان آلاینده‌گی تولیدشده برای تأمین هر مگاوات ساعت انرژی الکتریکی ۸۱۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است [۱۰]. شکل ۳، توان جاری‌شده در خطوط (مسیرهای) این زنجیره را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کل توان باید از شبکه انتقال دریافت و از طریق مسیرها بین مشترکین توزیع شود، بیشترین توان از مسیرهای ۱-۲ و ۲-۳ عبور می‌کند؛ بنابراین این دو مسیر بسیار تحت فشار هستند. از آنجاکه حداکثر میزان توان عبوری از مسیرها برابر ظرفیت آن‌ها است و با توجه به اینکه میزان توان عبوری از این دو مسیر (۱-۲ و ۲-۳) در آستانه بالای ظرفیت آن‌ها قرار دارد، بنابراین زنجیره اگر بخواهد تمام مشترکین پایین‌دست را تأمین انرژی کند، این دو خط از محدوده مجاز خارج می‌شوند؛ به همین دلیل نمی‌تواند انرژی الکتریکی تمام مشترکین پایین‌دست را تأمین کند. میزان انرژی توزیع‌نشده در این حالت برابر 0.2 MWh

1. Islanding mode

و هزینه تحمیلی این مقدار بار ازدست‌رفته برای بهره‌بردار زنجیره تأمین \$۱۴۰۰ است. اطلاعات مربوط به این سناریو در جدول ۵، مشاهده می‌شود.



شکل ۳. توان عبوری از مسیرهای مختلف

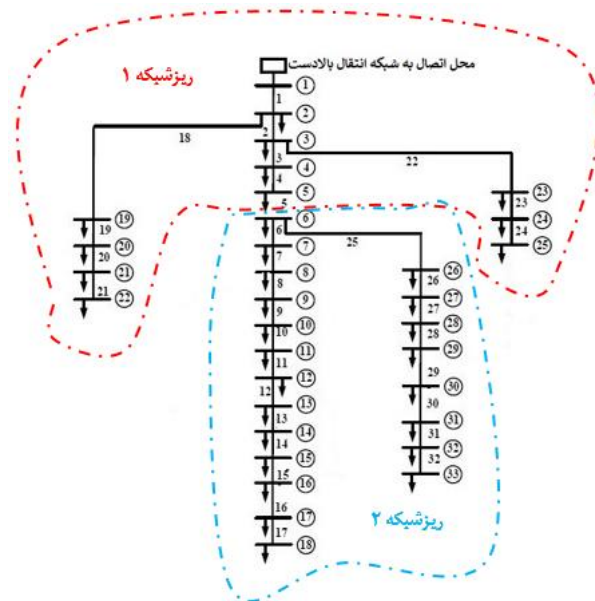
جدول ۵. نتایج سناریوی اول

میزان آلاینده‌گی (kg/kWh)	میزان انرژی تأمین نشده (kWh)	تلفات انرژی (kWh)
۳۰۹۴/۲	۲۰۰	۳۲۰

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زنجیره تأمین مرسوم، قابلیت اطمینان پایین عرضه انرژی است. با توجه به یک‌طرفه و شعاعی بودن این زنجیره، در صورت خرابی در یکی از مسیرهای شبکه، کل انرژی مشترکین پایین‌دست قطع می‌شود که خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی زیادی را به وجود می‌آورد.

در ادامه این سناریو، حالت احتمالاتی برای خرابی یا قطع در خطوط شبکه با استراتژی N-1 در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر زنجیره تأمین در شرایط بهره‌برداری بحرانی مورد ارزیابی

قرار می‌گیرد. مسیر ۵-۶ با انتخاب تصادفی و بر اثر خرابی، قطع می‌شود. در این حالت زنجیره به دو ریزشبه ۱ و ۲ ریزشبه ۲ مطابق شکل ۴، تقسیم می‌شود. مشترکین واقع در ریزشبه ۱ همچنان انرژی موردنیاز خود را از طریق شبکه انتقال متصل به ناحیه ۱ دریافت می‌کنند؛ اما کل مشترکین واقع در ریزشبه ۲، به دلیل یک طرفه بودن و غیرفعال بودن شبکه توزیع در زنجیره تأمین سنتی، بی‌برق می‌شوند که شامل بیش از نیمی از مشترکین است. به بیان دیگر ۲/۳۵۳۵ مگاوات از کل ۳/۷ مگاوات توان موردنیاز مشترکین، بی‌برق می‌شود. این آزمون به خوبی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات این زنجیره را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تبدیل زنجیره به دو ریزشبه بعد از قطع مسیر ۵-۶

سناریوی دوم. در این سناریو، حالتی از نصب تولیدات پراکنده پیشنهاد شده است که هزینه‌ها و انرژی ازدست‌رفته حداقل مقدار باشند؛ یعنی تنها اهداف اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شده است. محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در جدول ۶ نشان داده شده است. در این حالت به منظور خودکفایی کامل انرژی در زنجیره تأمین واحدهای تولید پراکنده در نقاط مختلف زنجیره قرار گرفته‌اند تا مقدار توان دریافتی از شبکه انتقال ناحیه ۱ به صفر برسد؛ به عبارت دیگر ضریب نفوذ ۱۰۰ درصد است.

جدول ۶. محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در سناریوی دوم

ظرفیت (kW)	شماره ناحیه نصب	ظرفیت (kW)	شماره ناحیه نصب
۳۲۰	۶	۴۰۰	۲۴
۲۴۰	۹	۴۰	۲۵
۲۸۰	۱۰	۴۰۰	۲۶
۴۰۰	۱۱	۴۰	۲۸
۲۴۰	۱۳	۲۸۰	۲۹
۳۶۰	۱۴	۱۲۰	۳۰
۴۰	۱۵	۲۸۰	۳۱
۱۶۰	۱۸	۴۰۰	۳۳

با توجه به اینکه در این سناریو محدودیتی برای تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی وجود ندارد، مدل از تولید پراکنده‌ای استفاده می‌کند که کمترین هزینه را داشته باشد. به همین دلیل تمام تولیدات پراکنده از نوع دیزل ژنراتور انتخاب شده است. در صورتی که این واحدها به درستی مکان‌یابی شوند، با توجه به نزدیک شدن تولیدکنندگان به محل مصرف، می‌توان انتظار داشت که تلفات انرژی هم‌علی‌رغم در نظر نگرفتن تابع هدف مربوطه، کاهش یابد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۷، ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج سناریوی دوم

شماره سناریو	میزان آلاینده‌گی (kg/kWh)	میزان انرژی تأمین نشده (kWh)	تلفات انرژی (kWh)
سناریوی اول	۳۰۹۴/۲	۲۰۰	۳۲۰
سناریوی دوم	۳۵۹۷/۲	۰	۲۱۰

با توجه به نتایج جدول ۷، با به کارگیری تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین صنعت برق، میزان بار ازدست‌رفته صفر می‌شود و هیچ مشترکی بدون برق باقی نمی‌ماند؛ همچنین با توجه به نزدیک شدن محل تولید و مصرف و کاهش عبور توان از خطوط، تلفات انرژی نیز کاهش یافته است؛ اما میزان آلاینده‌های تولیدشده به علت استفاده از تولید پراکنده ارزان قیمت دیزلی با آلاینده‌گی بالا بسیار افزایش یافته است.

سناریوی سوم. در این سناریو، تمام اهداف بیان شده در بخش قبل در نظر گرفته شده است. به عبادت‌دیگر حالتی از نصب تولیدات پراکنده پیشنهاد می‌شود که علاوه بر هزینه‌ها و انرژی از دست‌رفته، میزان تلفات انرژی و آلاینده‌گی تولیدشده در شبکه را نیز کمینه کند. محل نصب و

ظرفیت تولیدات پراکنده در جدول ۸، ارائه شده است. لازم به ذکر است، مناطق ۱۹ تا ۲۲ از نظر آب‌وهوایی مناسب نصب پنل خورشیدی و مناطق ۲۶ تا ۳۳ مستعد نصب توربین بادی هستند و توان خروجی این منابع به صورت احتمالاتی مدل شده است. در این حالت نیز به منظور خودکفایی کامل انرژی و کاهش تلفات در زنجیره تأمین، واحدهای تولید پراکنده در نقاط مختلف زنجیره قرار گرفته‌اند تا مقدار توان دریافتی از شبکه انتقال ناحیه ۱ به صفر برسد؛ به عبارت دیگر ضریب نفوذ ۱۰۰ درصد است.

جدول ۸. محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در سناریوی دوم

ظرفیت (kW)	شماره ناحیه	نوع تولید پراکنده	ظرفیت (kW)	شماره ناحیه نصب	نوع تولید پراکنده
۸۰	۳	میکروتوربین	۴۰۰	۱۷	میکروتوربین
۴۰۰	۴	میکروتوربین	۲۶۰	۲۶	خورشیدی
۱۶۰	۷	میکروتوربین	۳۲۰	۲۷	خورشیدی
۲۰۰	۸	میکروتوربین	۲۴۰	۲۹	خورشیدی
۱۲۰	۱۳	میکروتوربین	۳۵۰	۳۰	خورشیدی
۴۰۰	۱۵	میکروتوربین	۴۰۰	۳۱	خورشیدی

با توجه به اینکه در این سناریو میزان آلاینده‌ها نیز به عنوان یکی از توابع هدف مطرح شده است، از تولید پراکنده‌ای استفاده می‌کند که تا حد امکان هزینه و آلاینده‌گی کمتری داشته باشد. به همین دلیل از میان تولیدات پراکنده غیرتجدیدپذیر، میکروتوربین انتخاب شده است. در ضمن از میان واحدهای تجدیدپذیر نیز پنل خورشیدی، به دلیل هزینه‌های کمتر به توربین بادی، ترجیح داده شده است. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۹، مشاهده می‌شود.

جدول ۹. نتایج سناریوی دوم

شماره سناریو	میزان آلاینده‌گی (kg/kWh)	میزان انرژی تأمین نشده (kWh)	تلفات انرژی (kWh)
سناریوی اول	۳۰۹۴/۲	۲۰۰	۳۲۰
سناریوی دوم	۳۵۹۷/۲	۰	۲۱۰
سناریوی سوم	۱۰۷۶	۰	۹۰

با توجه به نتایج جدول ۹، با به کارگیری تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین صنعت برق، میزان بار ازدست‌رفته صفر می‌شود و هیچ مشتری بدون برق باقی نمی‌ماند؛ همچنین با در نظر

گرفتن تابع هدف تلفات در کنار سایر اهداف، تلفات انرژی نسبت به سناریوی اول حدود ۱۲۰ کیلو وات کاهش یافت. سوخت میکروتوربین گاز طبیعی است و میزان آلاینده‌گی کمتری نسبت به دیزل ژنراتور تولید می‌کند؛ همچنین با به‌کارگیری تابع هدف زیست‌محیطی، مدل به سمت استفاده از تولیدات خورشیدی علی‌رغم هزینه تولید نسبتاً بالای آن‌ها حرکت کرده است. به همین دلیل در این سناریو میزان آلاینده‌گی بسیار کاهش یافته است و تقریباً یک‌سوم شده است. در سناریوی اول در صورت وقوع پیشامد (شرایط بحرانی) و خروج ناگهانی مسیر ۵-۶، کل مشترکین این بخش بی‌برق می‌شدند. در این سناریو با نفوذ تولیدات پراکنده و توزیع آن‌ها در سطح زنجیره تأمین، این رقم صفر می‌شود و انرژی الکتریکی هیچ مشترکی قطع نمی‌شود؛ بنابراین قابلیت اطمینان زنجیره تأمین که نتایج اجتماعی و اقتصادی بسیاری دارد، افزایش قابل توجهی یافته است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش از یک سو لزوم حرکت زنجیره تأمین برق از حالت یک‌طرفه با تولیدات متمرکز و بزرگ به سمت زنجیره تأمین توزیع‌شده با تولیدات پراکنده و کوچک نشان داده شد و از سوی دیگر استراتژی مناسب برای تعیین محل، نوع و ظرفیت بهینه این تولیدات در زنجیره تأمین جدید صنعت برق پیشنهاد شد. بدین منظور یک مسئله بهینه‌سازی مقید با چهار هدف برای کمینه‌کردن هزینه‌ها، انرژی تأمین‌نشده، آلاینده‌های تولیدشده و تلفات انرژی پیشنهاد شد. به منظور یافتن پاسخ‌های بهینه مسئله چندهدفه نیز از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شد که یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل بسیاری از مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از اعمال روش پیشنهادی بر روی زنجیره تأمین استاندارد ۳۳ ناحیه‌ای IEEE، تغییر رویکرد از زنجیره تأمین سنتی با رویکرد یک‌طرفه به زنجیره تأمین جدید با نفوذ تولیدات پراکنده تأثیر زیادی بر افزایش مداومت عرضه انرژی، به‌خصوص در زمان وقوع پیشامد در شبکه دارد. میزان تلفات انرژی حدوداً به یک‌چهارم کاهش یافت؛ همچنین نشان داده شد که با به‌کارگیری تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان میزان آلاینده‌گی تولیدشده را نیز حدوداً به میزان یک‌سوم کاهش داد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی در کنار تولیدات پراکنده و همچنین در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ مورد مطالعه و پژوهش قرار گیرد.

منابع

1. Asadi, E., Habibi, F., Nickel, S., & Sahebi, H. (2018). A bi-objective stochastic location-inventory-routing model for microalgae-based biofuel supply chain. *Applied energy*, 228, 2235-2261.
2. Asgharzadeh, E., Torabi, S. A., Mohaghar, A., & Zare-Shourijeh, M. A. (2019). Sustainable Supply Chain Network Design: A Review on Quantitative Models Using Content Analysis. *Environmental Energy and Economic Research*, 3(2), 143-176.
3. Bairamzadeh, S., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvae, M. S. (2018). Modelling different types of uncertainty in biofuel supply network design and planning: A robust optimization approach. *Renewable energy*, 116, 500-517.
4. Bayatloo, F. (2018). A Two-Stage Chance-Constraint Stochastic Programming Model for Electricity Supply Chain Network Design. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 29(4), 471-482.
5. Cañas, H., Mula, J., & Campuzano-Bolarín, F. (2020). A General Outline of a Sustainable Supply Chain 4.0. *Sustainability*, 12(19), 7978.
6. Dehghani, E., Jabalameli, M. S., Jabbarzadeh, A., & Pishvae, M. S. (2018). Resilient solar photovoltaic supply chain network design under business-as-usual and hazard uncertainties. *Computers & Chemical Engineering*, 111, 288-310.
7. Ding, H., Huang, H., & Tang, O. (2018). Sustainable supply chain collaboration with outsourcing pollutant-reduction service in power industry. *Journal of Cleaner Production*, 186, 215-228.
8. Durmaz, Y. G., & Bilgen, B. (2020). Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design. *Applied Energy*, 272, 115259.
9. Firestone, R.J.L.B.N.L. (2004). DER-CAM natural gas technology data. *Lawrence Berkeley National Lab*, available at: <http://der.lbl.gov/der-cam/technology-data-archive>.
10. Gardiner, M. and Montpelier, V. (2012). *Technical Status Report of the Regulatory Assistance Project*.
11. Hosseini-Motlagh, S.M., Samani, M.R.G. and Shahbazbegian, V., 2020. Innovative strategy to design a mixed resilient-sustainable electricity supply chain network under uncertainty. *Applied Energy*, 280, p.115921.
12. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Rastegar, S. (2017). Green and resilient design of electricity supply chain networks: a multiobjective robust optimization approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 66(1), 52-72.
13. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sabouhi, F. (2018). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5945-5968.
14. Kabadurmus, O., & Erdogan, M. S. Sustainable, multimodal and reliable supply chain design. *Annals of Operations Research*, 1-24.
15. Khishtandar, S., 2019. Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design. *Applied Energy*, 236, pp.183-195.
16. Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2016). Microgrid: Architecture, policy and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 477-489.
17. Mashayekhi, M., Azar, A., Amiri, M., Safari, H. (2020). Model design of steel consumption chain by ABM methodology. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(1), 33-52 (In Persian).

18. Masoumik, S. M., Abdul-Rashid, S. H., Olugu, E. U., & Raja Ghazilla, R. A. (2014). Sustainable supply chain design: A configurational approach. *The Scientific World Journal*, 14(2), 35-54.
19. Mehranfar, N., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Fathollahi-Fard, A. M. (2019). A novel hybrid whale optimization algorithm to solve a production-distribution network problem considering carbon emissions. *International Journal of Engineering*, 32(12), 1781-1789.
20. Mohammadi, M., Jämsä-Jounela, S. L., & Harjunkski, I. (2019). A multi-echelon supply chain model for sustainable electricity generation from municipal solid waste. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 610-615.
21. Mohseni, S., & Pishvaei, M. S. (2016). A robust programming approach towards design and optimization of microalgae-based biofuel supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 100, 58-71.
22. Monica, P., & Kowsalya, M. (2016). Control strategies of parallel operated inverters in renewable energy application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 885-901.
23. Pham, H. (2006). *Handbook of reliability engineering*. Springer Science & Business Media.
24. Radfar, A., Mohammaditabar, D., 2019. Bi-Objective Optimization of Vendor Managed Inventory Problem in a Multi Echelon Green Supply Chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(35), 109-134. (In Persian)
25. Ricardo Fontes, & Freires, F. G. M. (2018). Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 247-259.
26. Sánchez-Flores, R. B., Cruz-Sotelo, S. E., Ojeda-Benitez, S., & Ramírez-Barreto, M. (2020). Sustainable Supply Chain Management—A Literature Review on Emerging Economies. *Sustainability*, 12(17), 6972.
27. Sarker, B. R., Wu, B., & Paudel, K. P. (2019). Modeling and optimization of a supply chain of renewable biomass and biogas: Processing plant location. *Applied Energy*, 239, 343-355.
28. Shahbazbegian, V., Hosseini-Motlagh, S. M., & Haeri, A. (2020). Integrated forward/reverse logistics thin-film photovoltaic power plant supply chain network design with uncertain data. *Applied Energy*, 277, 115538.
29. Shahbazi, F., Sahebi, H., Makui, A., 2020. Location Selection of Solar Power Plants, Wind and Distributed Generation and Design of Electrical Distribution Network. *Journal of Industrial Management Perspective*, 10(39), 143-170. (In Persian)
30. Teodoro, F. G., da Costa, D. M., Peres, S. M., & Lima, C. A. (2015, October). Supply chain management and metaheuristic algorithms: Analysing a new hybrid genetic crossover operator. In *2015 Latin America Congress on Computational Intelligence (LA-CCI)* (pp. 1-6). IEEE.
31. Vahdatzad, M. A., Vahdat, V., Namin, A. T., & Rezai, A. M. Energy Conservation Framework for Green Supply Chain Management. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 27-29).
32. Warren, K., Ambrosio, R., Chen, B., Fu, Y. H., Ghosh, S., Phan, D., ... & Visweswariah, C. (2016). Managing uncertainty in electricity generation and demand forecasting. *IBM Journal of Research and Development*, 60(1), 8-1.

33. Willis, H.L. (2018). *Distributed power generation: planning and evaluation*. Crc Press.
34. Yıldızbaşı, A., Öztürk, C., Efendioğlu, D., & Bulkan, S. (2020). Assessing the social sustainable supply chain indicators using an integrated fuzzy multi-criteria decision-making methods: a case study of Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 20(3), 1-36.
35. Zhu, X., & Zhao, Z. (2019). Sustainable Supply Chain Network Design: A Review of Literature for 2011-2019. *Academic Journal of Humanities & Social Sciences*, 2(6), 1-8.