

## طراحی مدل احتمالاتی زنجیره تأمین پایدار در صنعت برق با نفوذ تولیدات تجدیدپذیر

احمد قربانخانی<sup>۱\*</sup>، علی مروتی شریف‌آبادی<sup>۲</sup>، سیدحبیب‌الله میرغفوری<sup>۳</sup>،

سیدحیدر میرفخرالدینی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۴- دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱

### چکیده

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، گرمایش زمین و حمایت دولت‌ها از منابع تجدیدپذیر از یک سو و پیشرفت‌های اخیر در تولید برق و فناوری‌های مرتبط با آن از سوی دیگر باعث نفوذ تولیدات مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در زنجیره تأمین شبکه برق شده است. نفوذ این منابع با وجود قطعیت‌نداشتن در توان خروجی آنها، برنامه‌ریزی زنجیره تأمین شبکه برق را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. در این پژوهش یک روش مؤثر و کارآمد برای برنامه‌ریزی امنیتی و احتمالاتی توسعه زنجیره تأمین شبکه برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر و عدم قطعیت پیک بار مصرفی ارائه شده است. در روش پیشنهادی حد بالایی برای میزان قطع بار مجاز در نظر گرفته شده است و اثر عدم قطعیت‌های موجود و تغییرات حد بالای قطع بار بر هزینه سرمایه‌گذاری زنجیره تأمین ارزیابی شده است. روش پیشنهادی به وسیله نرم‌افزار MATLAB روی شبکه پیاده‌سازی و به وسیله الگوریتم ژنتیک



حل شده است. مدل نهایی این روش را می‌توان به‌طور مؤثر برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین شبکه برق با نفوذ تولیدات مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به‌کار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** صنعت برق، زنجیره تأمین پایدار، الگوریتم ژنتیک، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان.

## ۱- مقدمه

امروزه، برق نقش کلیدی در زندگی انسان‌ها ایفا کرده و در حوزه‌های مختلفی مانند مصرف خانگی، تولید، صنایع مختلف، حمل‌ونقل و غیره کاربرد دارد. به همین دلیل، قطع برق در شبکه می‌تواند پیامدهای جدی در پی داشته باشد [۱]. آمارها نشان می‌دهد تقاضا برای مصرف برق فقط در یک چهارم آخر قرن بیستم دو برابر شده و در حال حاضر نیز نرخ رشد سالیانه آن ۳ درصد است [۲].

در حال حاضر منبع اصلی تولید برق در سراسر جهان (با بیش از ۶۷ درصد) سوخت‌های فسیلی است [۳] که با توجه به روند افزایش مصرف برق و تقاضا برای تولید بیشتر، تأثیرات مخرب زیست‌محیطی آن به دلیل انتشار آلاینده‌هایی چون دی‌اکسیدکربن، موجب نگرانی‌های بسیاری شده است [۴]. به دلیل این تأثیرات منفی، در سطح ملی و جهانی قوانین و توافقاتی برای کاهش آلاینده‌های مختلف و به حداقل رساندن آنها وضع شده است که باعث نفوذ تولیدات تجدیدپذیر در سطح شبکه برق شده است [۵].

در طراحی شبکه زنجیره تأمین برق<sup>۱</sup> (ESCND) به دلیل مسائلی چون ماهیت تصادفی و متغیر مصرف‌کنندگان، همواره عدم قطعیت‌هایی در پیش‌بینی تقاضا وجود دارد و پیش‌بینی دقیق هرگز امکان‌پذیر نیست [۱]. از این رو، طراحی زنجیره تأمین شبکه‌های برق با قابلیت اطمینان بالا در مواجهه با عدم قطعیت می‌تواند از تأثیرات مضر قطعی سیستم و نقص آن جلوگیری کند. رشد تقاضا، گسترده‌تر شدن شبکه تولید و توزیع و عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضای مصرف برق از یک‌سو، و فشار وارد شده بر شرکت‌ها از سوی جامعه و دولت‌ها برای در نظر گرفتن ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در زنجیره تأمین پایدار از سوی

1. Electricity Supply Chain Network Design



دیگر، باعث شده است که طراحی و برنامه‌ریزی برای سیستم‌های قدرت در صنعت برق کاری دشوار و چالش‌برانگیز شود [۶]. چالش پیش روی طراحی یک زنجیره تأمین پایدار یافتن راه‌حل‌های بهینه در طراحی است، زیرا هدف طراحی یک زنجیره تأمین در وهله اول جنبه اقتصادی (کاهش هزینه‌ها) است و این در حالی است که توجه به ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی هزینه‌ها را افزایش خواهد داد [۱]. این مسئله ضرورت بهینه‌سازی زنجیره تأمین را به خوبی روشن می‌سازد. براساس مطالب بیان‌شده، هدف از انجام این پژوهش ارائه یک مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین پایدار چندهدفه در صنعت برق بوده و چهار بعد پایداری، یعنی ابعاد اقتصادی، اهداف زیست‌محیطی و ابعاد اجتماعی و امنیت تأمین انرژی در شرایط بحرانی را مورد توجه قرار می‌دهد. این پژوهش در پی یافتن پاسخ سؤال‌هایی است که مزیت در نظر گرفتن بعد اجتماعی و زیست‌محیطی در طراحی زنجیره تأمین برق پایدار چیست؟ نقش عدم قطعیت در زنجیره تأمین برق پایدار چیست؟ چگونه می‌توان زنجیره تأمین پایدار بهینه‌ای برای به‌حداکثر رساندن قابلیت اطمینان سیستم قدرت طراحی کرد؟ نفوذ تولیدات تجدیدپذیر چه تأثیری در زنجیره تأمین دارد؟ در شرایط بحرانی وقوع پیشامد، آیا زنجیره تأمین همچنان می‌تواند به فعالیت خود ادامه دهد؟

جدول ۱ نتایج مرور سیستماتیک ادبیات پژوهش را در رابطه با طراحی زنجیره تأمین پایدار در صنعت برق نشان می‌دهد. مرور ادبیات پژوهش در زمینه طراحی زنجیره تأمین پایدار نشان از این است که مطالعه‌های کمی در صنعت برق در این زمینه انجام شده است و از بین پژوهش‌های انجام‌شده هم فقط در سه پژوهش به زنجیره تأمین برق پایدار توجه شده است. همچنین، تعداد مطالعاتی که عدم قطعیت، نیازها و شرایط واقعی را در مدل خود در نظر گرفته باشند، هم بسیار کم هستند. در بین مطالعه‌های انجام‌شده، ناگورنی و ماتسپورا [۷] اولین کسانی بودند که مفهوم زنجیره تأمین را برای شبکه‌های تولید، انتقال و توزیع برق به کار بردند. در مدل آنها، بازیگران زنجیره تأمین عبارت است از تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان، شرکت‌های انتقال برق، و بازار تقاضا. شرکت‌های توزیع‌کننده در این زنجیره تأمین به‌عنوان تصمیم‌گیرندگان فعال در نظر گرفته نشده‌اند و فقط هزینه‌های منحصربه‌فرد خود را دارند و هر بخش هم به فکر به‌حداکثر رساندن سود خود است. در پژوهشی دیگر، ناگورنی و لیو [۸] یک



شبکه زنجیره تأمین برق شامل نیروگاه‌ها، خطوط برق و مصرف برق را طراحی کردند که در آن هر باریگز سود هود را به حداکثر می‌رساند. آنها مدل خود را به‌عنوان یک مسئله تعادل شبکه حمل‌ونقل معرفی کرده و توانستند رفتار تصمیم‌گیرندگان را در لایه‌های مختلف که به‌صورت غیرمتمرکز فعالیت می‌کنند، به‌خوبی پیش‌بینی کنند. ناگورنی و همکاران [۹] نیز در پژوهش خود مدل پژوهش قبل را تعمیم داده و چارچوب محاسباتی به آن افزودند تا مالیات بهینه و انتشار آلاینده‌ها در انواع مختلف نیروگاه‌ها را مشخص کنند. به‌علاوه، ناگورنی و همکاران [۱۰] نسخه دینامیکی از مدل [۷] با دوره‌های زمانی مجزا طراحی کردند که در آن تقاضای مصرف برق در طول زمان تغییر می‌کند. لیو و ناگورنی [۱۱] و لای و همکاران [۱۲] مدلهایی براساس مطالعه‌های بالا انجام دادند و نقش کنشگران و فعالان وابسته به هم مانند تأمین‌کنندگان سوخت، نیروگاه‌ها و شرایط عملیاتی را در نظر گرفتند. همچنین پژوهشگرانی چون لای و همکاران [۱۳] و وو و همکاران [۱۴] مالیات انتشار دی‌اکسیدکربن و کنترل دولت و نیز سیستم‌های کنترل و تجارت را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در زنجیره تأمین و در صنعت برق به‌کار گرفتند. آنها تأثیرات مالیات و کنترل دولت را بر تولید و قیمت بازار بررسی کردند. کیو و لو [۱۵] اولین کسانی بودند که به مسئله طراحی زنجیره تأمین برق به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و چنددوره‌ای تحت عدم قطعیت تأمین سوخت و تقاضای برق حل کرده و به‌حداکثررسانی سود و به‌حداقل‌رسانی تفاوت بین حجم تقاضا و حجم برق تحویل داده‌شده توجه کردند. وانس و همکاران [۱۶] از نظریه گراف برای ایجاد یک نمایش گرافیکی از زنجیره تأمین برق استفاده کردند که در آن از نیروگاه‌های سوخت فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق استفاده می‌شد. هدف از مدل آنها کاهش هزینه کل و دنبال کردن اهداف کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و آلودگی بود. یانگ و همکاران [۱۷] یک زنجیره تأمین متشکل از تأمین‌کنندگان، ژنراتورهای تولید برق تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر و نهادهای تأمین بار مصرفی برق را طراحی کرده و دو موضوع سیستم کنترل و تجارت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را مد نظر قرار دادند. عثمانی و ژانگ [۱۸] یک شبکه زنجیره تأمین برق طراحی کرده و مسئله زنجیره تأمین را به‌صورت یک مسئله دومرحله‌ای تصادفی ترکیبی تعریف کردند که از انرژی تجدیدپذیر باد و زیست‌توده به‌عنوان



منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شد. ماهیت تناوبی انرژی باد و افت و خیز در قیمت برق به عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شد. خسروجردی و همکاران [۱۹] یک مدل استوار زنجیره تأمین برق چندهدفه و چنددوره‌ای را با در نظر گرفتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری دوره‌ای نیروگاه‌ها طراحی کردند و قیمت برق را به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفتند. آنها در مدل خود دو هدف به حداقل رسانی هزینه و به حداکثر رسانی قابلیت اطمینان را مدنظر قرار دادند. جبارزاده و همکاران [۲] نیز یک مدل استوار چندهدفه برای زنجیره تأمین برق معرفی کردند و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و به حداکثر رسانی انعطاف‌پذیری سیستم را مورد توجه قرار دادند. عدم قطعیت‌های اعمال شده در مدل آنها عبارت بود از ظرفیت تولید برق، تقاضای مصرف و سطح قیمت. بیاتلو و امیری [۶] یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی دومرحله‌ای برای یک زنجیره تأمین برق معرفی کردند که متشکل از ایستگاه‌های برق، خطوط انتقال، پست‌های انتقال و نقاط مصرف بود. آنها در مدل خود اهدافی چون هزینه، اثربخشی شبکه، مکان‌یابی تأسیسات، قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی برای ظرفیت را مورد توجه قرار دادند. جبارزاده و همکاران [۳] یک رویکرد استوار و چندهدفه را برای طراحی یک زنجیره تأمین سبز و انعطاف‌پذیر به کار گرفتند و سه هدف اقتصادی، زیست‌محیطی و انعطاف‌پذیری را برای شبکه‌های برق هوشمند مدنظر قرار دادند و نتیجه گرفتند که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تعارض وجود دارد. در نهایت، حسینی مطلق و همکاران [۱] راهبردی نوآورانه برای یک زنجیره تأمین پایدار-انعطاف‌پذیر معرفی کردند. آنها در طراحی مدل استوار خود به ترتیب اهداف اقتصادی (هزینه کل)، انعطاف‌پذیری و مسئولیت اجتماعی شرکتی را در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن مسئولیت اجتماعی و انعطاف‌پذیری می‌تواند هزینه را تا ۵۰ درصد افزایش دهد.

#### جدول ۱. نتایج بررسی سیستماتیک ادبیات پژوهش

مرجع	نام نویسندگان	روش مدل‌سازی	روش حل	اهداف
[۷]	ناگورنی و ماتسیپورا (۲۰۰۵)	غیرخطی	قطعی	اقتصادی
[۸]	ناگورنی و لیو (۲۰۰۵)	غیرخطی	قطعی	اقتصادی
[۹]	ناگورنی و همکاران (۲۰۰۶)	غیرخطی	قطعی	اقتصادی/زیست‌محیطی



مرجع	نام نویسندگان	روش مدل‌سازی	روش حل	اهداف
[۱۰]	ناگورنی و همکاران (۲۰۰۷)	غیر خطی	قطعی	اقتصادی
[۱۱]	لیو و ناگورنی (۲۰۰۹)	خطی	قطعی	اقتصادی
[۱۲]	لای و همکاران (۲۰۰۹)	خطی	قطعی	اقتصادی
[۱۳]	لای و همکاران (۲۰۰۹)	غیر خطی	غیر دقیق	اقتصادی / زیست محیطی
[۱۵]	کیو و لو (۲۰۱۱)	غیر خطی	قطعی	اقتصادی / زیست محیطی
[۱۶]	وانس و همکاران (۲۰۱۲)	غیر خطی	قطعی	اقتصادی / زیست محیطی
[۱۷]	یانگ و همکاران (۲۰۱۲)	غیر خطی	قطعی	اقتصادی / زیست محیطی
[۱۸]	عثمانی و ژانگ (۲۰۱۴)	خطی	تصادفی	اقتصادی
[۱۹]	خسروچردی و همکاران (۲۰۱۴)	خطی	تصادفی	قابلیت اطمینان
[۲]	جبارزاده و همکاران (۲۰۱۸)	خطی	قطعی	اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی
[۶]	بیاتلو و امیری (۲۰۱۸)	خطی	غیر قطعی	اقتصادی
[۳]	جبارزاده و همکاران (۲۰۱۹)	خطی	قطعی	اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی
[۱]	حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)	خطی	قطعی	اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی

## ۲- مدل‌سازی ریاضی پیشنهادی

متغیرها و شاخص‌های مدل ریاضی به شرح زیر استفاده شده است (جدول ۲):

جدول ۲. شاخص‌ها و متغیرهای مدل ریاضی

شاخص باس‌ها	$i, j, n, m, k$
شاخص واحدهای تولیدی غیرتجدیدپذیر و تجدیدپذیر (بادی)	$wtg$ و $g$
مجموعه کل گره‌ها، گره‌های دارای بار، واحدهای تولید تجدیدناپذیر و واحدهای تولیدی تجدیدپذیر	$WG, G, \Delta, B$
مجموعه‌ای از رخداد و پیشامدهای ممکن	$\Psi$
تعداد خطوط انتقال اضافه‌شده جدید بین گره $i$ و $j$	$n_{ij}$
میزان توان عبوری از خط انتقال بین گره $i$ و $j$	$L_{ij}$
میزان بار ازدست‌رفته در گره $k$	$f_k$
میزان تولید واحد تجدیدناپذیر در هر گره	$P_g$
میزان تولید واحد تجدیدپذیر (بادی) در هر گره	$P_{wtg}$
میزان توان عبوری از خط انتقال بین گره $i$ و $j$ با فرض قطع خط بین گره‌های $n$ و $m$	$L_{ij}^{mn}$
میزان تولید در هر گره با فرض قطع خط بین گره‌های $n$ و $m$	$P_g^{mn}$



میزان بار ازدست‌رفته در گره $k$ در صورت خروج خط بین گره‌های $m$ و $n$	$f_k^{mn}$
تعداد خطوط شبکه در آغاز افق برنامه‌ریزی بین گره $i$ و $j$	$n_{ij}^0$
حداکثر تعداد خطوط جدید مجاز برای احداث بین گره $i$ و $j$	$\bar{n}_{ij}$
حداکثر میزان تولید در هر گره	$\bar{g}$
حداکثر تقاضا در هر گره	$d$
حداکثر ظرفیت خط انتقال بین گره $i$ و $j$	$\bar{L}_{ij}$
جریمه بار ازدست‌رفته	$\tau_f$
هزینه اضافه‌کردن مسیر جدید بین گره $i$ و $j$	$\pi_{ij}$
مجموع میزان آلاینده $CO_2$ ، $NOx$ و $SO_2$ (برحسب $kg$ ) تولیدشده به ازای تولید هر $1MWh$ انرژی در واحد تولیدی $g$	$\alpha_g$

## ۲-۱- توابع هدف

چهار هدف اصلی در طرح زنجیره تأمین پیشنهادی در نظر گرفته شده است. این چهار هدف به شرح زیر است.

### ۲-۱-۱- هدف اقتصادی (ECOF)

این تابع هدف به دنبال، کمینه‌سازی هزینه تأسیس و گسترش خطوط زنجیره تأمین به‌منظور پاسخگویی به تقاضای پیک بار مشترکان با حداقل سرمایه‌گذاری در افق برنامه‌ریزی است. این تابع هدف وابسته به هزینه اضافه‌کردن مسیر جدید و تعداد مسیرهای جدید احداث‌شده بین گره  $i$  و  $j$  است و به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$ECOF = \sum_{(i,j) \in B} \pi_{ij} n_{ij} \quad (1)$$

### ۲-۱-۲- هدف اجتماعی (ROF)

این هدف کمینه‌سازی بار ازدست‌رفته و به‌حداقل رساندن انرژی تأمین‌نشده مشترکان در افق برنامه‌ریزی را دنبال می‌کند. تأمین‌نشدن انرژی الکتریکی و قطع برق مشترکان، 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 این عواقب در بخش خدمات حساس مانند بیمارستان‌ها ممکن است جبران‌ناپذیر باشد. از این رو افزایش قابلیت اطمینان عرضه انرژی در زنجیره تأمین جزء ارکان اساسی است. در این تابع هدف، براساس رابطه زیر، به ازای هر مقدار بار تأمین‌نشده، مقدار جریمه‌ای در نظر گرفته شده است تا تابع هدف کلی سیستم به سمت تأمین حداکثری بار حرکت کند.

$$ROF = \tau_f \sum_{k \in \Delta} f_k \quad (2)$$

#### ۲-۱-۳- هدف امنیتی (SOF)

در تابع هدف اجتماعی، اهمیت تأمین بی‌وقفه انرژی به منظور افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین توضیح داده شد. تداوم تأمین انرژی نه تنها در شرایط کار عادی که در زمان بحرانی و بروز پیشامد در شبکه نیز باید مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که، بروز پیشامد در زنجیره تأمین بسیار محتمل است، در این بخش به منظور اطمینان از تداوم انتقال توان در صورت بروز پیشامد، تابع هدف امنیتی ارائه شده است. در این مدل از معیار N-1 استفاده شده است. براساس این معیار، مدل به گونه برنامه‌ریزی می‌شود که به هر دلیلی یکی از خطوط (مسیرها) از مدار خارج شود، سیستم به گونه‌ای طراحی شده باشد که همچنان به عملکرد خود ادامه دهد و خللی در زنجیره تأمین به وجود نیاید. این تابع هدف براساس رابطه زیر به صورت میزان انرژی تأمین‌نشده در گره k در صورت خروج مسیر بین گره m و n تعریف می‌شود.

$$SOF = \tau_f \sum_{(m,n) \in \Psi, k \in \Delta} f_k^{mn} \quad (3)$$

#### ۲-۱-۴- هدف زیست‌محیطی (EOF)

آلودگی‌های زیست‌محیطی منابع انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و مشکلات گرمایش زمین و معاهده‌های جهانی موجب محدود شدن استفاده از این منابع در سال‌های اخیر شده است. همین امر موجب افزایش گرایش دولت‌ها به سرمایه‌گذاری در حوزه منابع انرژی تجدیدپذیر و





پاک شده است. این تابع هدف میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در افق برنامه‌ریزی را با استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر و منابع تولید با آلاینده‌گی کمتر کمینه می‌کند. به‌منظور در نظر گرفتن اثرهای مخرب زیست‌محیطی ناشی از آلاینده‌های تولیدشده به‌وسیله منابع مختلف انرژی، تابع هدف زیست‌محیطی مسئله بهینه‌سازی به‌صورت میزان انتشار کل زنجیره تأمین، در کنار سایر توابع هدف در نظر گرفته شده است تا تولیدکننده‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه قرار گیرند. این تابع هدف شامل جریمه میزان انتشار آلاینده‌های تولیدشده به‌وسیله تولیدکننده‌های غیرتجدیدپذیر است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$EOF = \sum_{g \in G} P_g \cdot \alpha_g \quad (4)$$

## ۲-۱-۵- تابع هدف کلی سیستم

مدل ریاضی تابع هدف کلی زنجیره تأمین در رابطه زیر بیان شده است:

$$OF: \min[\omega_1\{ECOF\} + \omega_2\{SOF\} + \omega_3\{EOF\} + \omega_4\{ROF\}] \quad (5)$$

$$OF: \min \left\{ \begin{array}{l} \omega_1 \left( \sum_{(i,j) \in B} \pi_{ij} n_{ij} \right) + \\ \omega_2 \left( \tau_f \sum_{k \in \Delta} f_k \right) + \\ \omega_3 \left( \tau_f \sum_{(m,n) \in \Psi, k \in \Delta} f_k^{mn} \right) + \\ \omega_4 \left( \sum_{g \in G} P_g \cdot \alpha_g \right) \end{array} \right. \quad (6)$$

$\omega_1$ ،  $\omega_2$ ،  $\omega_3$  و  $\omega_4$  ضرایب وزنی هریک از توابع هدف سیستم هستند. این ضرایب از یک‌سو همسان‌سازی توابع هدف را ممکن می‌سازند و ازسوی دیگر به برنامه‌ریز این امکان را می‌دهند که میزان اثربخشی هر تابع هدف را در تابع هدف کلی سیستم تغییر دهد. هر بخش از توابع هدف که اولویت بالاتری دارد، ضریب وزنی بزرگ‌تری در آن ضرب می‌شود. برای اینکه تغییرات هر جزء تابع هدف برابر باشد (اهمیت تمام اجزای تابع هدف یکسان باشد)، باید



فاصله بین حداقل و حداکثر مقدار هر جزء تابع هدف محاسبه شود و سپس وزن‌های تابع هدف به‌گونه‌ای محاسبه شود که فاصله حداقل و حداکثر مقدار تمامی بخش‌ها برابر باشد. اگر مقدار حداقل و حداکثر هر جزء تابع هدف با اندیس  $\min$  و  $\max$  مشخص شود، به‌این ترتیب ضرایب وزنی از روابط زیر به‌دست می‌آیند.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{ECOF^{max} - ECOF^{min}}{SOF^{max} - SOF^{min}} \quad (7)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{ECOF^{max} - ECOF^{min}}{EOF^{max} - EOF^{min}} \quad (8)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_4} = \frac{ECOF^{max} - ECOF^{min}}{ROF^{max} - ROF^{min}} \quad (9)$$

## ۲-۲- مدل ریاضی احتمالاتی

داده‌های ورودی در ساختار پیشنهادی شامل دو دسته هستند: داده‌های قطعی<sup>۱</sup> و داده‌های تصادفی<sup>۲</sup> که به‌وسیله مدل‌سازی فرایندهای تصادفی<sup>۳</sup> به‌دست می‌آیند. مدل‌سازی تصادفی و احتمالاتی با هدف به‌حداقل رساندن میزان خطای پیش‌بینی و براساس شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۴</sup> [۲۰] در نظر گرفته می‌شوند.

در مدل پیشنهادی، موارد زیر به‌صورت تصادفی و دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند:

- تولید منابع تجدیدپذیر باتوجه به شرایط آب و هوایی
- میزان بار مشترکان
- در دسترس بودن هریک از خطوط (مسیرها)

باتوجه به اینکه منبع تجدیدپذیر استفاده‌شده در این پژوهش مزارع بادی است؛ به‌منظور مدل‌کردن تغییرات توان خروجی توربین‌های بادی، اطلاعات دریافتی از سوابق وزش باد و سرعت آن (۷)، به‌منظور مدل‌سازی تابع چگالی احتمال<sup>۵</sup> (PDF) تولید توربین بادی

---

1. Deterministic Data  
 2. Stochastic Data  
 3. Random Processes  
 4. Monte Carlo Simulation  
 5. Probability Density Functions



مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی سرعت باد، از تابع چگالی احتمال راپلی<sup>۱</sup> استفاده شده است. این تابع برای تغییرات سرعت باد می‌تواند از فرمول زیر محاسبه شود:

$$PDF(v) = \left(\frac{v}{sf^2}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{v^2}{2sf^2}\right)\right] \quad (10)$$

در این فرمول  $v$  و  $sf$  به ترتیب سرعت باد میانگین و پارامتر مقیاس<sup>۲</sup> هستند. رابطه بین توان تولیدی توربین بادی و سرعت باد در ادامه بیان شده است:

$$P_{wtg}(v(t)) = \begin{cases} 0 & , \quad v(t) < v_{ci} \\ \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} * P_r & , \quad v_{ci} < v(t) < v_r \\ P_r & , \quad v_r < v(t) < v_{co} \\ 0 & , \quad v(t) > v_{co} \end{cases} \quad (11)$$

که در آن  $P_r$  توان مجاز،  $v_{ci}$  سرعت برش داخلی،  $v_{co}$  سرعت برش خارجی،  $P_{wtg}$  توان خروجی توربین بادی است. علاوه بر این، عدم قطعیت میزان بار نیز به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شود که خطای پیش‌بینی<sup>۳</sup> آنها با استفاده از تابع چگالی احتمال نرمال مدل می‌شود. هریک از مسیرها براساس عمر و موقعیت جغرافیایی دارای یک نرخ خرابی مشخص هستند. برای بررسی خرابی و در دسترس نبودن خطوط نیز از تابع چگالی احتمال نرمال استفاده می‌شود. لازم به ذکر است، میزان تقاضا، سرعت باد و در دسترس بودن خطوط انتقال متغیرهای مستقل فرض می‌شوند. هریک از حالت‌های سیستم در تکنیک شبیه‌سازی مونت‌کارلو در قالب یک سناریو با هدف به حداقل رساندن رابطه (۶) و برآورده کردن قیود فنی شبکه که در بخش بعد شرح داده خواهد شد، بررسی می‌شوند. مراحل حل مسئله در فضای احتمالاتی به شرح زیر است:

- نرخ خروج اجباری برای هریک از مسیرها در نظر گرفته می‌شود.
- پارامترهای تابع چگالی احتمال میزان تقاضا در افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شود.

1. Rayleigh PDF  
2. Scale Factor  
3. Forecasting Errors



- گرفتن مقادیر میانگین ( $V_{W,Mean}$ ) و انحراف معیار ( $\sigma_w$ ) سرعت باد باتوجه‌به اطلاعات به‌دست‌آمده از تابع چگالی رایلی که بیانگر سرعت باد در محل نصب توربین بادی است.
- تولید یک عدد از تابع چگالی احتمال نرخ خروج و مقایسه آن با نرخ خروج هریک از خطوط که در گام ۱ مشخص شد. این عدد با دسترسی‌نداشتن هریک از خطوط مقایسه می‌شود. در صورتی‌که این مقدار کمتر از مقدار عدم دسترسی باشد، خط خارج می‌شود و در غیر این صورت خط در مدار باقی می‌ماند.
- تولید یک عدد از تابع چگالی احتمال میزان تقاضا که در گام ۲ مشخص شده است و محاسبه میزان تقاضا برای هریک از گره‌ها
- تولید یک عدد از تابع چگالی احتمال سرعت باد که در گام ۳ مشخص شده است و محاسبه توان خروجی واحدهای بادی باتوجه‌به رابطه (۱۱)
- پس از طی گام‌های ۳ تا ۶ به‌ترتیب پیکربندی شبکه (باتوجه‌به مسیر یا مسیرهای خارج‌شده)، میزان بار و میزان تولید واحدهای بادی به‌طور تصادفی به‌دست می‌آید.
- باتوجه‌به اطلاعات به‌دست‌آمده مسئله بهینه‌سازی مقید را حل کرده و اطلاعات خروجی ذخیره شود.

## ۳-۲- قیود و محدودیت‌ها

قیود طرح پیشنهادی به شرح زیر است:

### ۳-۲-۱- برابری تولید و مصرف

معادله‌های تعادل توان در هریک از گره‌های زنجیره تأمین به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_{i,j}^{mn} + P_{g,i}^{mn} + P_{wtg,i} + f_i^{mn} = d_i, \quad (i, j) \in B, (m, n) \in \Delta, g \in G, wtg \in WG \quad (12)$$



### ۲-۳-۲- ظرفیت خطوط (مسیرها)

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

$$|L_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{L}_{ij} \quad , \quad (i, j) \in B \quad (13)$$

### ۲-۳-۳- ظرفیت واحدهای تولیدی

حداکثر میزان تولید در هر گره به وسیله رابطه زیر بیان می‌شود.

$$0 \leq P_g \leq \bar{P}_g \quad , \quad g \in G \quad (14)$$

### ۲-۳-۴- میزان بار تأمین نشده قابل قبول

میزان حداکثر بار قابل قطع در گره به وسیله رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$0 \leq f^{mn} \leq \bar{f} \quad , \quad (m, n) \in \Delta \quad (15)$$

### ۲-۳-۵- تعداد مجاز تأسیس خط جدید بین دو گره

حداکثر تعداد خطوط جدید مجاز برای احداث بین گره  $i$  و  $j$  به وسیله رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad , \quad (i, j) \in B \quad (1)$$

## ۳- شبیه‌سازی و نتایج عددی

روش پیشنهادی در بخش قبل روی شبکه تست ۶ ناحیه‌ای

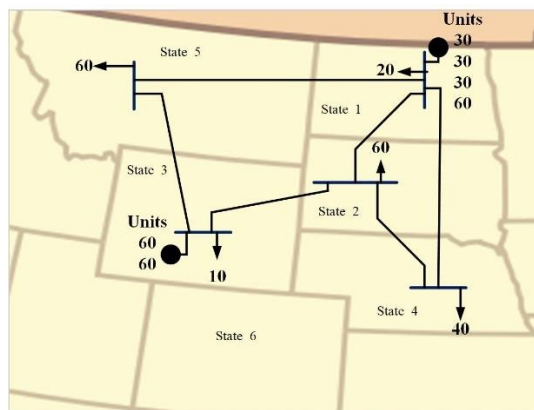
شکل [۲۱]، اعمال و به وسیله الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده است که نتایج حاصل در ادامه ارزیابی می‌شود. در آغاز توسعه



زنجیره تأمین قطعی بررسی می‌شود. سپس مسئله زنجیره تأمین احتمالاتی بیان شده است. نرخ خروج مسیرها به منظور ارزیابی حاشیه امنیت سیستم برابر ۱ درصد در نظر گرفته شده است. علاوه بر این مقدار جریمه بار ازدست‌رفته برای زنجیره تأمین قطعی  $\tau_f$  برابر  $10^6 \$/MW$  در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است حداکثر  $\bar{n}_{ij} = 4$  جدید می‌توان بین دو گره اضافه کرد.

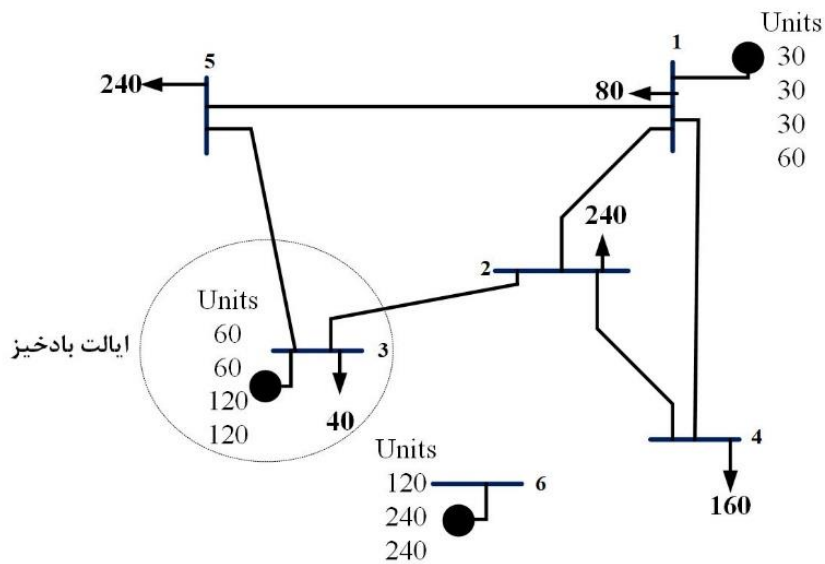
### ۳-۱- مشخصات شبکه مورد مطالعه

این شبکه دارای شش ناحیه و شماتیک اولیه آن به صورت شکل ۱ است. براساس برنامه‌ریزی توسعه به منظور تأمین افزایش بار در شبکه، قرار است یک واحد جدید براساس شکل ۲ در این شبکه احداث شود. طرح توسعه پیشنهادی، به منظور احداث خطوط جدید برای تأمین بارهای اضافه‌شده به بهینه‌ترین صورت با در نظر گرفتن فاکتورهای متفاوتی که در ادامه توضیح داده شده است، به کار گرفته می‌شود.



شکل ۱. شماتیک اولیه زنجیره تأمین

اطلاعات مربوط به ظرفیت واحدهای تولیدی و بارهای مصرفی مشترکان در هر ناحیه در جدول ۳ و ظرفیت، امپدانس و هزینه نصب خطوط در شبکه در جدول ۴ مشخص شده است.



شکل ۲. شماتیک زنجیره تأمین برق با واحدهای تولیدی و بارهای جدید

جدول ۳. اطلاعات واحدهای تولیدی و مصرف مشتریان [۲۱]

شماره ناحیه	حداکثر تولید (MW)	انتشار (kg/MWh)	میزان بار (MW)
۱	۱۵۰	۹۲۰	۸۰
۲	۰	۰	۲۴۰
۳	۳۶۰	۳۱۰	۴۰
۴	۰	۰	۱۶۰
۵	۰	۰	۲۴۰
۶	۶۰۰	۶۱۰	۰



جدول ۴. اطلاعات خطوط [۲۱]

شماره دو ناحیه ابتدا و انتهای خط	تعداد اولیه خطوط	ظرفیت خط (MW)	هزینه نصب خط (k\$)
۱-۲	۱	۱۰۰	۴۰
۱-۳	۰	۱۰۰	۳۸
۱-۴	۱	۸۰	۶۰
۱-۵	۱	۱۰۰	۲۰
۱-۶	۰	۷۰	۶۸
۲-۳	۱	۱۰۰	۲۰
۲-۴	۱	۱۰۰	۴۰
۲-۵	۰	۱۰۰	۳۱
۲-۶	۰	۱۰۰	۳۰
۳-۴	۰	۸۲	۵۹
۳-۵	۱	۱۰۰	۲۰
۳-۶	۰	۱۰۰	۴۸
۴-۵	۰	۷۵	۶۳
۴-۶	۰	۱۰۰	۳۰
۵-۶	۰	۷۸	۶۱

### ۲-۳- زنجیره تأمین قطعی

#### ۱-۲-۳- بدون در نظر گرفتن تابع هدف امنیتی

با حل تابع هدف و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، به منظور برآورده شدن قیود سیستم و کفایت مسئله، نیاز به افزودن ۳ خط جدید بین ناحیه‌های ۶ و ۴ ( $n_{46} = 3$ )، ۱ خط جدید بین ناحیه‌های ۳ و ۵ ( $n_{35} = 1$ ) و ۱ خط بین ناحیه‌های ۲ و ۳ ( $n_{23} = 1$ ) است. کل هزینه سرمایه گذاری بدون هیچ بار ازدست‌رفته‌ای در این حالت ۱۳۰۰۰۰ دلار به دست آمده است.





جدول ۵. زنجیره تأمین قطعی بدون در نظر گرفتن تابع هدف امنیتی

خطوط اضافه شده		
$n_{46} = 3$	$n_{35} = 1$	$n_{23} = 1$
هزینه سرمایه گذاری		
۱۳۰۰۰۰		
میزان بار ازدست رفته		
.		
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)		
۳۸۶۶۰۰		

۳-۲-۲- با در نظر گرفتن قیود امنیتی

با حل زنجیره تأمین با در نظر گرفتن تابع هدف امنیتی در ادامه بیان شده است، نتایج بیانگر نیاز شبکه به افزودن ۷ خط جدید براساس جدول ۶ است. همچنین کل هزینه سرمایه گذاری بدون هیچ بار ازدست رفته‌ای و با رعایت معیار امنیتی N-1 در این حالت ۱۸۰۰۰۰ دلار به دست آمده است.

جدول ۶. زنجیره تأمین قطعی با در نظر گرفتن معیار امنیتی N-1

خطوط اضافه شده			
$n_{46} = 3$	$n_{26} = 1$	$n_{35} = 2$	$n_{23} = 1$
هزینه سرمایه گذاری (دلار)			
۱۸۰۰۰۰			
میزان بار ازدست رفته			
.			
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)			
۳۷۱۱۰۰			

۳-۳- زنجیره تأمین احتمالاتی

در روش احتمالاتی پنج سری تست مختلف روی شبکه Graver اعمال شده است.



### ۳-۳-۱- زنجیره تأمین احتمالاتی بدون واحدهای مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر

در سه سری اول شبیه‌سازی‌ها در این بخش، هیچ تولید مبتنی بر انرژی تجدیدپذیری در نظر گرفته نمی‌شود. انحراف معیار PDF بارها در هر ناحیه بار به‌منظور بررسی اثر عدم قطعیت پیک بار بر زنجیره تأمین به‌ترتیب برابر (۰، ۱۰ و ۵ درصد) در نظر گرفته شده است. برای هر انحراف معیار پیک بار، سه مقدار مختلف حداکثر بار قابل قطع (۰، ۱۰ و ۵ درصد) در نظر گرفته شده است. این مقادیر به‌صورت درصدی از حداکثر بار سیستم بیان شده‌اند. نتایج هر شبیه‌سازی در جدول‌های ۷، ۸ و ۹ بیان شده است. براساس نتایج جدول ۶ طرح برنامه‌ریزی نهایی برای گسترش زنجیره تأمین، به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر عدم قطعیت پیک بار (انحراف معیار استاندارد و حداکثر بار قابل قطع ( $L_{max}$ ) است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، برای یک مقدار یکسان حداکثر قطع بار، هزینه سرمایه‌گذاری با افزایش عدم قطعیت پیک بار، افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر زمانی که مقدار بار قابل قطع افزایش پیدا می‌کند، پیکربندی انتخاب می‌شود که هزینه سرمایه‌گذاری کمتری دارد. قابل ذکر است برای عدم قطعیت پیک بار، صفر و بار قابل قطع صفر، نتیجه مشابه تست قبل در شرایط زنجیره تأمین با قیود امنیتی است.

جدول ۷. زنجیره تأمین احتمالاتی با لحاظ معیار امنیتی N-1 و عدم قطعیت پیک بار ۰ درصد

انحراف معیار PDF بارها									
۰ درصد									
حداکثر بار قابل قطع									
۱۰ درصد			۵ درصد			۰ درصد			
خطوط جدید اضافه شده									
$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$
۳	۲	۱	۱	۳	۲	۱	۳	۱	۱
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)									
۱۳۰۰۰۰			۱۵۰۰۰۰			۱۸۰۰۰۰			
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)									
۳۲۴۷۴۰			۳۴۷۹۲۰			۳۷۱۱۰۰			



جدول ۸. زنجیره تأمین احتمالاتی با لحاظ معیار امنیتی N-1 و عدم قطعیت پیک بار ۵ درصد

انحراف معیار PDF بارها										
۵ درصد										
حداکثر بار قابل قطع										
۰ درصد			۵ درصد				۱۰ درصد			
خطوط جدید اضافه شده										
$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$
۳	۲	۲	۱	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۱
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)										
۲۰۰۰۰۰			۱۸۰۰۰۰				۱۵۰۰۰۰			
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)										
۳۹۴۲۸۰			۳۷۱۱۰۰				۳۴۷۹۲۰			

جدول ۹. زنجیره تأمین احتمالاتی با لحاظ معیار امنیتی N-1 و عدم قطعیت پیک بار ۱۰ درصد

انحراف معیار PDF بارها											
۱۰ درصد											
حداکثر بار قابل قطع											
۰ درصد			۵ درصد				۱۰ درصد				
خطوط جدید اضافه شده											
$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$
۳	۲	۱	۲	۳	۲	۲	۱	۳	۲	۱	۱
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)											
۲۱۰۰۰۰			۲۰۰۰۰۰				۱۸۰۰۰۰				
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)											
۴۱۷۴۶۰			۳۹۴۲۸۰				۳۷۱۱۰۰				

۳-۲-۳- زنجیره تأمین احتمالاتی با در نظر گرفتن واحدهای مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر  
 به منظور شبیه‌سازی عدم قطعیت باد به عنوان یک واحد تولیدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر  
 و بررسی اثر آن بر مسئله زنجیره تأمین یک واحد بادی با ظرفیت نامی 120 MW در ناحیه ۳



نصب می‌شود. توان خروجی توربین بادی براساس معادله (۷) است. پارامترهای  $V_p = V_{ci} = 3.5 \text{ m/s}$ ,  $V_{co} = 25 \text{ m/s}$ ,  $11.9 \text{ m/s}$  به دست می‌آید. میانگین سرعت باد برابر  $V_{W,Mean} = 7 \text{ m/s}$  و انحراف معیار آن برابر  $\sigma_W = 2.5 \text{ m/s}$  در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن انحراف معیار ۱۰ درصد برای مدل‌سازی عدم قطعیت پیک بار و مقادیر مختلف حداکثر بار قابل قطع، نتایج حل زنجیره تأمین براساس جدول ۱۰ به دست می‌آید.

جدول ۱۰. زنجیره تأمین احتمالاتی با لحاظ تولیدات تجدیدپذیر و معیار امنیتی N-1

و عدم قطعیت پیک بار ۱۰ درصد

انحراف معیار PDF بارها													
۱۰ درصد													
حداکثر بار قابل قطع													
۰ درصد				۵ درصد				۱۰ درصد					
خطوط جدید اضافه شده													
$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{26}$	$n_{23}$	$n_{15}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{26}$	$n_{23}$	$n_{15}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{26}$	$n_{23}$
۳	۲	۳	۱	۱	۳	۲	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۱
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)													
۲۶۰۰۰۰				۲۳۰۰۰۰				۲۱۰۰۰۰					
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)													
۳۸۷۴۶۰				۳۶۴۲۸۰				۳۴۱۱۰۰					

علاوه بر این در جدول ۱۱ احتمال قطع بار ( $P_R$ ) برای پیکربندی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری در مشخصه‌های باد متفاوت ارزیابی شده است. با توجه به طرح سرمایه‌گذاری توسعه بیان شده در جدول ۱۱ با افزودن تنها یک خط جدید ( $n_{26}$ ) در مقایسه با راه‌حل به دست آمده در زنجیره تأمین قطعی (تست قبل)، می‌توان احتمال قطع و محدود شدن بارها را در سطح رضایت بخشی حفظ کرد. هرچند بخشی از ظرفیت متعارف بار به وسیله واحدی در گره ۳ تأمین شده است. عدم قطعیت تولید واحد بادی باعث افزایش خطرپذیری برنامه‌ریزی و در نتیجه افزایش هزینه سرمایه‌گذاری برای دستیابی به پیکربندی با نتایج مشابه در



استانداردهای کفایت و امنیت سیستم می‌شود. در زمانی که سرعت باد پایین است، احتمال قطع بار افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۱۱. زنجیره تأمین احتمالاتی با لحاظ تولیدات تجدیدپذیر و معیار امنیتی N-1 و عدم قطعیت پیک بار ۱۰ درصد در شرایط وزش باد در هزینه سرمایه‌گذاری ثابت

انحراف معیار PDF بارها											
۱۰ درصد											
میانگین سرعت باد برابر $V_{W,Mean}$ و انحراف معیار $\sigma_W$											
$V_{W,Mean} = 5.5 \text{ m/s}$ $\sigma_W = 2 \text{ m/s}$				$V_{W,Mean} = 7 \text{ m/s}$ $\sigma_W = 2.5 \text{ m/s}$				$V_{W,Mean} = 10 \text{ m/s}$ $\sigma_W = 3.5 \text{ m/s}$			
خطوط جدید اضافه شده											
$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$	$n_{46}$	$n_{35}$	$n_{23}$	$n_{26}$
۳	۲	۱	۲	۳	۲	۱	۲	۳	۲	۱	۲
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)											
۲۱۰۰۰۰				۲۱۰۰۰۰				۲۱۰۰۰۰			
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg)											
۳۴۲۶۰۰				۳۴۱۱۰۰				۳۳۸۱۰۰			
احتمال قطع بار با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری ثابت و تغییر پارامترهای وزش باد ( $P_R$ )											
۰/۱۱۲				۰/۰۵۹				۰/۰۳۱			

#### ۴- نتیجه‌گیری

افزایش روزافزون تولیدکننده‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت برق و عدم قطعیت توان خروجی این منابع، چالش‌های جدیدی برای برنامه‌ریزان به وجود آورده است. در این پژوهش یک روش کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه زنجیره تأمین در صنعت برق با نفوذ تولیدات تجدیدپذیر ارائه شد. این مدل در کنار فاکتورهای قیمتی، معیار امنیتی N-1، قابلیت اطمینان عرضه انرژی به‌عنوان هدف اجتماعی و بحث کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را در نظر گرفته است. عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر، عدم قطعیت پیک بار مصرفی و عدم قطعیت در دسترس بودن مسیرهای شبکه نیز در مدل احتمالاتی زنجیره تأمین در نظر گرفته



شد. روش پیشنهادی بر شبکه تست اعمال و نتایج آن بررسی شد. نتایج ارائه شده نشان داد که انواع عدم قطعیت‌ها باعث افزایش هزینه سرمایه‌گذاری زنجیره تأمین می‌شود. از سوی دیگر با افزایش میزان بار مجاز قابل قطع، این هزینه کاهش پیدا می‌کند. تأثیر پارامترهای احتمالاتی سرعت باد که منجر به تغییرات توان خروجی واحد بادی می‌شود نیز بر زنجیره تأمین ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهاد شده می‌تواند به‌عنوان مدلی کارآمد در اختیار برنامه‌ریزان زنجیره تأمین صنعت برق قرار گیرد تا در محیط‌های با عدم قطعیت به‌کار گرفته شود.

## ۵- منابع

- [1] S.-M. Hosseini-Motlagh, M. R. G. Samani, and V. Shahbazbegian (2020), "Innovative strategy to design a mixed resilient-sustainable electricity supply chain network under uncertainty", *Applied Energy*, Vol. 280, p. 115.
- [2] Jabbarzadeh A., Fahimnia B., Sabouhi F. (2018) "Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks," *International Journal of Production Research*, Vol. 56, No. 17, p. 5945.
- [3] 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*, Vol. 66, No. 1, pp. 52-72.
- [4] Jiang Y., Zhao Y., Dong M., Han S. (2017) "Sustainable supply chain network design with Carbon footprint consideration: A case study in China," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2019.
- [5] Vahdatzad M. A., Vahdat V., Namin A. T., Rezai A. M. (2018) "Energy conservation framework for green supply chain management", in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 27-29.
- [6] Bayatloo F. (2018) "A two-stage chance-constraint stochastic programming model for electricity supply chain network design", *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, Vol. 29, No. 4, p. 471.
- [7] Nagurney A., Matsypura A. (2007) "A supply chain network perspective for electric power generation, supply, transmission, and



- consumption," in *Optimisation, Econometric and Financial Analysis*: Springer, pp. 3-27.
- [8] Nagurney A., Liu Z. (2005) "Transportation network equilibrium reformulations of electric power supply chain networks with computations", *Isenberg School of Management, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts*.
- [9] Nagurney A., Liu Z., Woolley T. (2006) "Optimal endogenous carbon taxes for electric power supply chains with power plants", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 44, No. 9-10, pp. 899-916.
- [10] Nagurney A., Liu Z., Cojocar M.-G., Daniele P. (2007) "Dynamic electric power supply chains and transportation networks: An evolutionary variational inequality formulation", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 43, No. 5, pp. 624-646.
- [11] Liu Z., Nagurney A. (2009) "An integrated electric power supply chain and fuel market network framework: Theoretical modeling with empirical analysis for New England", *Naval Research Logistics(NRL)*, Vol. 56, No.7, pp. 600,200
- [12] Lai S., Yang H., Zhang X., Chen L. (2009) "Nash equilibrium analysis of electric power supply chain with fuel suppliers", in *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2009: IEEE, pp. 1-4.
- [13] Lai S., Yang H., Dai Y., Han L. (2009) *A model for CO2 emission tax and the government control in electric power supply Chain*, Transmission & Distribution Conference&Exposition:Asia and Pacific, IEEE, pp. 1-4.
- [14] Wu K., Nagurney A., Liu Z., Stranlund J. K. (2006) "Modeling generator power plant portfolios and pollution taxes in electric power supply chain networks: A transportation network equilibrium transformation" , *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 11, No. 3, p. 171.
- [15] Qu B., Lu L. (2011) "Optimization model for electric power supply chain operation based on system engineering", *Engineering design and Manufacturing informatization*, Vol. 2: IEEE, pp. 77-80.
- [16] Vance L., Cabezas H., Heckl I., Bertok B., Friedler F. (2013) "Synthesis of sustainable energy supply chain by the P-graph framework," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, No. 1, pp. 266-274.
- [17] Yang H., Chung C., Wong K. (2012) "Optimal fuel, power and load-based emissions trades for electric power supply chain equilibrium", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 3, pp. 1147-1157.

- [18] Osmani A., Zhang J. (2014) "Optimal grid design and logistic planning for wind and biomass based renewable electricity supply chains under uncertainties", *Energy*, Vol. 70, pp. 514-528.
- [19] Khosrojerdi A., Zegordi S. H., Allen J. K., Mistree F. (2016) "A method for designing power supply chain networks accounting for failure scenarios and maintenance", *Engineering Optimization*, Vol. 48, No. 1, pp. 154-172.
- [20] Li W. (2014) *Risk assessment of power systems: models, methods, and applications*. John Wiley & Sons.
- [21] Garver L. L. (1970) "Transmission network estimation using linear programming", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, No. 7, pp. 1688, 1970.