

طراحی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با هدف بهبود تاب‌آوری

نوع مطالعه: پژوهشی

رضا صابری^۱، دانشجوی دکتری، حمید فلقی^۲، دانشیار، مصطفی اسماعیلی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران- saberi@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران- falaghi@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی کامپیوتر و صنایع- دانشگاه صنعتی بیرجند - بیرجند- ایران- esmaeeli@birjandut.ac.ir

چکیده: حوادث رخ داده با احتمال وقوع پایین و تأثیر بالا، که سالانه خسارات بالایی وارد می‌کنند، سلامت شبکه‌های توزیع را به صورت جدی تهدید می‌کنند. از این رو در سراسر جهان لزوم توجه به بحث افزایش تاب‌آوری شبکه و تداوم تأمین برق بیش از پیش احساس می‌شود. در شبکه‌های توزیع مدرن با توجه به حضور روز افزون منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، یک روش جایگزین برای تأمین بار هنگام خرابی در سمت شبکه‌ی اصلی و بهبود تاب‌آوری شبکه، استفاده از منابع تولید پراکنده می‌باشد. در این مقاله ابتدا مفهوم تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و نحوه مدل‌سازی حوادث طبیعی متداول مانند سیل و طوفان ارائه می‌گردد. سپس به منظور بررسی تأثیر منابع تولید پراکنده بر تاب‌آوری شبکه توزیع، شاخصی جدید بر اساس تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده شامل سلول‌های خورشیدی و منابع گازسوز متداول، فرموله‌بندی شده و شاخص تاب‌آوری کل شبکه در حضور این منابع بدست می‌آید. در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی با هدف بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع به حل مسأله‌ی طراحی بهینه منابع تولید پراکنده که شامل تعیین نوع و مکان بهینه-ی ظرفیت موجود این منابع در شبکه است، پرداخته می‌شود و با انجام مطالعات عددی بر روی یک شبکه‌ی توزیع واقعی کارایی روش پیشنهادی نشان داده می‌شود.

واژه های کلیدی: شبکه توزیع، تاب‌آوری، منابع تولید پراکنده، الگوریتم ژنتیک، طراحی بهینه.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۶/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول : حمید فلقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : بیرجند، انتهای بلوار دانشگاه، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

تاب‌آوری به صورت توانایی سیستم برای حفظ یک سطح قابل قبول از عملکرد در برابر یک اغتشاش شدید و بازگشت در یک دوره‌ی زمانی مناسب تعریف می‌گردد [۱]. حوادث رخ داده با احتمال وقوع پایین و تأثیر بالا، که سالانه خسارات بالایی وارد می‌کنند، سلامت شبکه توزیع را به صورت جدی تهدید می‌کنند. در چند دهه اخیر افزایش قطعی‌های گسترده ناشی از حوادث غیرمترقبه از جمله سیل و طوفان باعث دوچندان شدن اهمیت مطالعات تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع برق گردیده است. برای مثال طوفان سندی در سال ۲۰۱۲ پس از برخورد با سواحل شرقی ایالت متحده، باعث قطع برق ۷/۵ میلیون مشترک در ۱۵ ایالت از جمله واشنگتن دی سی شد. در تابستان بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، در استرالیا آب‌گرفتگی و سیلاب وسیعی رخ داد که باعث آسیب‌دیدگی چندین تیر برق، ترانسفورماتور و سیم‌های هوایی شد. این آب‌گرفتگی باعث قطع برق حدود ۱۵۰۰۰۰ مشترک گردید [۲-۴]. علاوه بر این انتظار می‌رود بدلیل تغییرات اقلیمی تعداد و شدت حوادث غیرمترقبه در آینده افزایش یابد. از این رو در سراسر جهان لزوم توجه به بحث افزایش تاب‌آوری شبکه و تداوم تأمین برق با توجه به تبعات مختلف ناشی از خاموشی در سطوح اجتماعی، سیاسی و اقتصادی بیش از پیش احساس می‌شود.

در شرایط عادی هنگام وقوع خطا در شبکه‌های توزیع، معمولاً با جداسازی محل خطا به کمک کلیدهای دستی یا اتوماتیک و تغییر آرایش شبکه توزیع از طریق خطوط مانور، حداکثر بار ممکن بازیابی می‌شود. ولی هنگامی که یک حادثه غیرمترقبه رخ می‌دهد، ممکن است پست‌های توزیع و شبکه‌ی تغذیه اصلی بدون برق شده و امکان تأمین بار از طریق شبکه‌ی اصلی امکان‌پذیر نباشد و یا بدلیل خسارات وارده به تجهیزات شبکه توزیع، نواحی ایزوله شده و بدون برق در شبکه توزیع ایجاد شود. بنابراین در این موارد روش‌های بازیابی سنتی شبکه‌های توزیع نمی‌توانند تأمین انرژی مشترکین را بعد از وقوع حادثه تضمین کنند [۵].

در شبکه‌های توزیع مدرن با توجه به حضور روز افزون منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، یک روش جایگزین برای تأمین بار هنگام خرابی در سمت شبکه‌ی اصلی و بهبود تاب‌آوری شبکه، استفاده از منابع تولید پراکنده می‌باشد. به این ترتیب که هنگام وقوع خطای ناشی از حوادث غیرمترقبه در شبکه توزیع، با ایزوله کردن محل‌های خطا و با تأمین برق مشترکین با استفاد از منابع تولید پراکنده، می‌توان هزینه‌های مربوط به قطعی را به طور چشم‌گیری کاهش داد و تاب‌آوری شبکه را بهبود بخشید [۶].

یکی از مهم‌ترین موضوعات در طراحی شبکه‌های توزیع تعیین مکان و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه می‌باشد، در غیر این صورت امکان استفاده بهینه از ظرفیت این منابع ایجاد نخواهد شد. به عنوان نمونه تمرکز ظرفیت زیادی از منابع تولید پراکنده در یک مکان خاص، سبب می‌شود در صورت از دست دادن شبکه توزیع

مربوطه، امکان استفاده از حجم وسیع توان منابع تولید پراکنده وجود نداشته باشد [۷].

مسئله اساسی این است که چگونه می‌توان میزان تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع را با استفاده از شاخصی مناسب به صورت کمی مورد ارزیابی قرار داده، تا در نهایت بتوان با استفاده از منابع مالی محدود و استفاده بهینه از ظرفیت منابع تولید پراکنده، در جهت داشتن یک شبکه توزیع تاب‌آور گام برداشت و تاب‌آوری شبکه توزیع را بهبود بخشید.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه تاب‌آوری شبکه توزیع و روش‌های بهبود آن انجام شده است. در مرجع [۱] با مروری بر انواع حوادث طبیعی و مقایسه درصد وقوع آن‌ها، انواع مدل‌سازی مختلف برای این رویدادها آورده شده و تأثیر راهکارهای سخت‌کردن تجهیزات شبکه و منابع تولید پراکنده بر روی بهبود تاب‌آوری شبکه به صورت کیفی مورد بحث قرار گرفته است. در مرجع [۸] با استفاده از یک مدل آماری چند متغیره به ارزیابی استراتژی‌های ارتقاء تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته شده است. در مرجع [۹] با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان و اصلاح و بازبینی این شاخص‌ها برای مطالعات تاب‌آوری، با استفاده از شبکه‌های هوشمند و تبدیل شبکه توزیع به جزایر پایدار در جهت بهبود تاب‌آوری شبکه تلاش می‌شود.

در مرجع [۱۰] با استفاده از نظریه‌ی گراف و با در نظر گرفتن معیارهای مختلف برای تاب‌آوری با استفاده از الگوریتم تجمع شاخص‌ها و با در نظر گرفتن ضریب وزنی برای هر شاخص، یک معیار کمی جهت محاسبه تاب‌آوری شبکه معرفی می‌گردد.

در مرجع [۱۱] با مدل‌سازی طوفان و با استفاده از مدل مهاجم و مدافع در جهت بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع با سخت‌کردن اجزای آن در حضور منابع تولید پراکنده گام بر می‌دارد. شناسایی خطوط آسیب‌پذیر شبکه توزیع با هدف کمینه کردن بار از دست داده شده و انتخاب استراتژی‌های سخت کردن پایه‌ها و مدیریت پوشش گیاهی با استفاده از یک مدل سه سطحی در جهت بهبود تاب‌آوری، در [۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته است.

مسئله بهینه‌سازی استفاده از واحدهای ذخیره انرژی الکتریکی به عنوان یک منبع پشتیبان قوی، برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در مرجع [۱۳] ارائه گردیده است. در مرجع [۱۴] ابتدا به مدل‌سازی تأثیرات طوفان بر روی شبکه توزیع پرداخته و سپس به یافتن مکان بهینه کلیدها در شبکه توزیع دارای منابع تولید پراکنده در جهت بهبود تاب‌آوری شبکه پرداخته شده است.

کفایت منابع به عنوان یکی دیگر از عوامل مهم تاب‌آوری شبکه در [۱۵] مورد بحث قرار گرفته است، در این مرجع با معرفی شاخص در دسترس بودن منابع تولید پراکنده در حوادث شدید و با بهینه‌سازی اندازه و مکان این منابع در جهت بهبود این شاخص تلاش می‌گردد. و یک رویکرد قطعی بر اساس میزان کفایت منابع برای بررسی بهبود تاب‌آوری شبکه در برابر یک رویداد شدید اتخاذ می‌شود.

انتقال انرژی، قابلیت اطمینان سیستم، تلفات سیستمها، کاهش منابع فسیلی و آلودگیهای زیست محیطی ناشی از سوختهای فسیلی، منجر به مطالعات گستردهای در زمینه استفاده از تولیدات پراکنده شده است [۱۷-۱۹].

منابع تولید پراکنده به عنوان یک روش جایگزین برای تأمین بار هنگام خرابی در سمت شبکه اصلی، با تأمین مصرفکنندگان از طریق یک منبع در دسترس و ایمن، توانایی آماده کردن شبکه برای پاسخ سریع به حوادث غیرمترقبه و در نتیجه بهبود تاب آوری شبکه را دارند. بدین ترتیب که با جداسازی محل های خطا و تغذیه مشترکین با استفاد از منابع تولید پراکنده، می توان هزینه های مربوط به قطعی را به طور چشم گیری کاهش داد و تاب آوری شبکه را بهبود بخشید [۶].

ورود منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع که بین بار و شبکه توزیع قرار دارند، به طور قطع اثرات متنوعی بر روی شاخص های تاب آوری در شبکه های توزیع به دنبال دارد و چالش های عمده ای برای توسعه شبکه توزیع در آینده مطرح می شود، که در پی آن بسیاری از مطالعات مرسوم تحلیل، طراحی و برنامه ریزی در این شبکه ها کارایی خود را از دست داده و می بایست به جهت مدل نمودن تأثیرات متقابل سیستم های تولید پراکنده و شبکه، به همراه نحوه اثر گذاری آن بر روی تاب آوری شبکه اصلاح و بازبینی شوند.

در واقع تعیین نوع، مکان و اندازه بهینه تولیدات پراکنده تأثیر بسزایی بر روی تاب آوری شبکه توزیع دارد. به گونه ای که به کارگیری این منابع در مکان و اندازه نامناسب، نه تنها موجب بهبود تاب آوری شبکه توزیع نمی شود، بلکه باعث افزایش تلفات و هزینه سیستم خواهد گردید. در این مقاله با معرفی شاخص جدید، نحوه اثر گذاری نوع، مکان و اندازه بهینه تولیدات پراکنده بر روی تاب آوری شبکه توزیع به صورت کمی بررسی گردیده و مسأله طراحی بهینه منابع تولید پراکنده در جهت بهبود تاب آوری شبکه مورد مطالعه قرار می گیرد.

۳- مدل سازی حوادث طبیعی

بلاای طبیعی معمولاً رویدادهای بسیار نامطمئن هستند. بنابراین تخمین، مدل سازی و پیش بینی آنها دشوار است. بسیاری از تلاش ها برای افزایش آگاهی ما از بلاای طبیعی بر اساس داده های تاریخی و آموزش هایی که یاد گرفته ایم پایه گذاری شده است. پیش بینی یک فاجعه طبیعی اغلب بر اساس مدل های آماری یا مدل های شبیه سازی شده بررسی می شود [۱۱]. جهت ارزیابی خسارت ناشی از رویدادهای آب و هوایی بر روی شبکه توزیع، باید تأثیر این رویدادها بر روی تجهیزات شبکه توزیع تخمین زده شود. برای نشان دادن احتمال شکست تجهیزات شبکه توزیع در مقابل رویدادهای آب و هوایی، می توان از مدل های مختلف مانند مدل توزیع دوتایی منفی خطی شده [۱]، مدل در دسترس بودن تجهیز در سطوح مختلف رویداد [۱۵] و مدل توزیع لگاریتمی نرمال استفاده کرد [۹]. در این مقاله از منحنی

در این مقاله پس از ارائه مفهوم تاب آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده، در ادامه با مدل سازی حوادث طبیعی متداول مانند سیل و طوفان، به ارزیابی تأثیر این رویدادهای آب و هوایی با استفاده از احتمال شکست تجهیزات، بر روی تاب آوری شبکه های توزیع پرداخته شده است. سپس به منظور بررسی تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب آوری شبکه توزیع، تاب آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب آوری منابع تولید پراکنده (سلول های خورشیدی و منابع گازسوز متداول) به صورت مستقل از هم با ارائه شاخص جدید، محاسبه و در نهایت شاخص تاب آوری کل شبکه در حضور این منابع بدست می آید. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری برای بهینه سازی، به حل مسأله طراحی بهینه منابع تولید پراکنده یعنی تعیین نوع و مکان بهینه ظرفیت در دسترس این منابع در شبکه، با هدف بهبود تاب آوری شبکه توزیع پرداخته و عملکرد روش بیان شده با انجام مطالعات عددی بر روی یک شبکه توزیع واقعی نشان داده شده است.

۲- تاب آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده

توسعه شبکه های توزیع به روش سنتی، به کمک معیارهای قابلیت اطمینان انجام می شود. با استفاده از این معیارها، سیستم های قدرت توانایی مواجهه با تهدیدات از پیش تعریف شده و همچنین تأمین توان با کیفیت بالا برای مصرفکنندگان را دارند [۱۶]. اما با توجه به خاموشی های گسترده ای که در چند دهه اخیر روی داده است و بدلیل تغییرات اقلیمی، تعداد و شدت حوادث غیرمترقبه در حال افزایش است، می توان گفت که برای تأمین برق مشترکین باید علاوه بر معیارهای سنتی قابلیت اطمینان، معیارهای دیگری را نیز در نظر گرفت. در واقع حوادث رخ داده با احتمال وقوع پایین و تأثیر بالا، که سالانه خسارات بالایی وارد می کنند، سلامت شبکه توزیع را به صورت جدی تهدید می کنند و ضرورت توسعه شبکه توزیع با هدف بهبود تاب آوری روزبه روز بیشتر آشکار می گردد. بنابراین برای بهبود تاب آوری شبکه توزیع سعی می شود راهکارهای اساسی در این حوزه شناخته شده و با معرفی شاخص ها، در جهت توسعه شبکه توزیع به منظور بهبود تاب آوری گام برداشت.

با توجه به تجدید ساختار صنعت برق و گسترش و نفوذ منابع تولید پراکنده در سطح شبکه های توزیع، تولید انرژی در نزدیکی محل مصرف که به عنوان تولید پراکنده انرژی شناخته می شود، مزایای فراوانی برای مصرفکنندگان ایجاد می کند. در جامعه کنونی نیاز به انرژی الکتریکی کافی و امن نه تنها باید در کمترین سطح قیمت بلکه باید در پایین ترین سطح آلودگی باشد. از این جهت در سال های اخیر توجه به تکنولوژی های متنوع تولید پراکنده انرژی، به عنوان راهکاری برای تأمین نیاز روز افزون برق به صورت کارآمدتر، پاک تر و با قابلیت اطمینان بالاتر، گسترش یافته است. در سال های اخیر، مشکلاتی از قبیل تاب آوری سیستم های قدرت، افزایش هزینه ها از جمله هزینه های

- استفاده از اطلاعات آماری جهت پیش‌بینی مسیر طوفان و سیلاب، زیرا این رویدادها اغلب دنبال مسیری هستند که از آن تشکیل شده‌اند.
- تقسیم‌بندی شبکه‌ی توزیع به چند منطقه آب و هوایی بر اساس مسیر طوفان و سیلاب و با توجه به مشخص بودن سرعت باد و سیلاب در هر ناحیه
- استفاده از منحنی‌های شکنندگی برای محاسبه احتمال شکست تجهیزات در نواحی مختلف آب و هوایی فوق

۴- فرموله‌بندی ریاضی

در این مقاله از شاخص DRI (Distribution Risk Index) برای ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع استفاده گردیده است. مهم‌ترین ویژگی این شاخص در نظر گرفتن تاب‌آوری منابع تولید پراکنده در کنار شاخص تاب‌آوری بار جهت بدست آوردن تاب‌آوری کل شبکه می‌باشد. با توجه به این‌که جهت افزایش تاب‌آوری شبکه، استفاده از منابع تولید پراکنده اجتناب ناپذیر می‌باشد. بنابراین ضروری است در دسترس بودن خود این منابع در زمان وقوع حوادث، مورد توجه قرار گیرد. بدین جهت در این مقاله شاخص تاب‌آوری منابع تولید پراکنده به عنوان بخشی از شاخص تاب‌آوری کل شبکه لحاظ گردیده است. مقدار این شاخص با رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

(۲)

$$DRI = DRI_{load} - GRI_{DG}$$

در رابطه فوق DRI_{load} نشان دهنده ریسک شبکه در قبال تأمین بار می‌باشد. این شاخص بیان کننده مقدار بار از دست رفته در شبکه توزیع در هنگام وقوع حوادث غیر مترقبه می‌باشد. در واقع هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار بیشتر خواهد بود.

با توجه به حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع که به‌عنوان جایگزین منبع تغذیه اصلی در هنگام وقوع حوادث غیر مترقبه می‌باشند، بنابراین در دسترس بودن خود این منابع در هنگام وقوع حوادث از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بر روی تاب‌آوری شبکه تأثیرگذار خواهد بود [۱۵]. در بسیاری از موارد هنگام وقوع حادثه غیر مترقبه ممکن است بخشی از شبکه سالم مانده باشد و بتوان قسمتی از بار را تغذیه کرد، اما بدلیل عدم دسترس بودن منابع تولید پراکنده، امکان تغذیه بار فراهم نمی‌گردد. در نظر گرفتن تاب‌آوری منابع تولید پراکنده در کنار شاخص تاب‌آوری بار جهت بدست آوردن تاب‌آوری کل شبکه منجر به استفاده بهینه از ظرفیت این منابع و صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث آن‌ها در هنگام وقوع حوادث می‌شود. در این حالت جهت افزایش تاب‌آوری علاوه بر

توزیع لگاریتمی نرمال که یکی از مرسوم‌ترین روش‌های مدل‌سازی می‌باشد، احتمال شکست تجهیزات شبکه توزیع در مقابل رویدادهای آب و هوایی (طوفان و سیلاب) محاسبه می‌گردد. از روی این منحنی که به منحنی شکنندگی معروف است [۹]، احتمال شکست تجهیز در قبال یک سطح مشخصی از رویداد (سرعت باد یا سیلاب) بدست می‌آید. رابطه (۱) نشان دهنده شکل کلی منحنی شکنندگی می‌باشد.

(۱)

$$P(damage/x) = \int_x^{-\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \exp\left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

در رابطه فوق $P(damage/x)$ احتمال شکست تجهیز در قبال سطح مشخص رویداد x و پارامترهای μ و σ نشان دهنده میانگین لگاریتمی و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی می‌باشند، که از روی اطلاعات آماری در طول یک دوره مشخص محاسبه می‌گردند.

یک نمونه منحنی شکنندگی عمومی به صورت احتمال شکست تجهیز شبکه بسته به شدت رویداد آب و هوایی، در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): منحنی شکنندگی تجهیز [۹]

منحنی‌های شکنندگی در مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف ارزیابی تأثیر یک رویداد آب و هوایی یا یک خطر طبیعی بر روی تاب‌آوری شبکه‌های انتقال یا توزیع می‌باشد [۹].

با داشتن مشخصات آب و هوایی منطقه مورد مطالعه (به عنوان مثال سرعت باد و شدت سیلاب) و همچنین وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب و هوایی که می‌توان از روی سوابق آماری استخراج کرد، منحنی‌های شکنندگی برای اجزای شبکه بدست می‌آیند. این منحنی‌ها به ما کمک می‌کنند که اجزایی از شبکه که در معرض خطرات بالایی ناشی از رویدادهای آب و هوایی می‌باشند، شناسایی گردیده و در ارزیابی تاب‌آوری مورد توجه قرار گیرند. با پیروی از این رویکرد، می‌توان تأثیر رویداد آب و هوایی در وضعیت عملیاتی هر یک از اجزای شبکه را مدل‌سازی کرد [۹].

در این مقاله حوادث طبیعی متداول بر روی شبکه‌های توزیع، یعنی طوفان و سیلاب مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور خلاصه مراحل مدل‌سازی تأثیرات طوفان و سیلاب بر روی تجهیزات شبکه توزیع را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

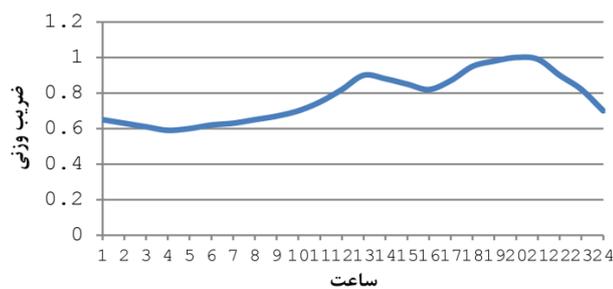
خوشبختانه، بسیاری از این وقایع به صورت تکراری برای یک سال اتفاق می افتند، بنابراین رفتار بارهای سیستم قدرت دارای یک الگوی مکرر می باشد. در این مطالعه برای ساخت یک مدل بار، اطلاعات به صورت عامل وزن ماهانه و ساعتی مدل شده اند و برای محاسبه میزان بار در زمان مورد نظر می توان از رابطه (۵) استفاده کرد [۱۹]. در این رابطه از ضرب ضرایب وزنی (ماهانه و ساعتی بار) در مقدار پیک بار برای یافتن مقدار بار در هر زمان دلخواه استفاده کرد.

$$LS_{sec} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^n Load(t)_{l,sec}}{T} \quad (4)$$

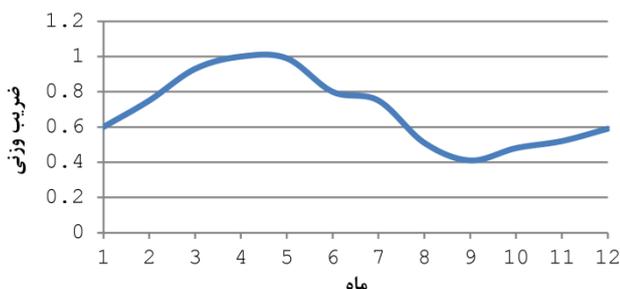
$$Load(t)_{l,sec} = w(h) \times w(m) \times Load(p)_{l,sec} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، $Load(t)_{l,sec}$ مقدار بار l ام در سکنش در زمان t ، تعداد بارهایی که در اثر از دست دادن سکنش دچار خاموشی گردیده اند و T دوره مورد مطالعه پس از وقوع حادثه می باشد. در رابطه (۵)، $w(h)$ ضریب وزنی ساعتی و $w(m)$ ضریب وزنی ماهانه و $Load(p)_{l,sec}$ بار پیک l ام در سکنش می باشد. شکل های (۲) تا (۴) به ترتیب منحنی ساعتی، منحنی ماهانه و بار پیک باس های شبکه را نشان می دهد.

از آنجایی که در این مقاله حوادث طبیعی طوفان و سیلاب مورد مطالعه می باشند، جهت محاسبه احتمال شکست سکنش در اثر وقوع این حوادث طبیعی از روابط (۶) تا (۹) استفاده می گردد [۹].



شکل (۲): منحنی ضریب ساعتی بار



شکل (۳): منحنی ضریب ماهانه بار

اینکه باید بخشی از شبکه برای تغذیه بار مربوطه سالم باشد، بلکه توان منابع تولید پراکنده نیز باید جهت تأمین بار در دسترس باشند.

شاخص GRI_{DG} (Generation Resiliency Index) که نشان دهنده مقدار تولید در دسترس منابع تولید پراکنده می باشد، به عنوان شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده در هنگام وقوع حوادث غیرمترقبه مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع هر چه مقدار این شاخص بزرگتر باشد تاب آوری شبکه بیشتر می باشد. بنابراین به منظور بررسی تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب آوری شبکه توزیع، باید تاب آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب آوری منابع تولید پراکنده به صورت مستقل از هم محاسبه و در نهایت شاخص تاب آوری کل شبکه در حضور این منابع بدست آید. با توجه به اینکه شاخص DRI_{load} متناسب با مقدار بار از دست رفته و شاخص GRI_{DG} متناسب با مقدار تولید در دسترس در هنگام وقوع حوادث می باشند. و هر چه مقدار شاخص تاب آوری تولید بیشتر و شاخص ریسک شبکه در قبال تأمین بار کمتر باشد، تاب آوری کل شبکه بهبود می یابد. بنابراین این دو شاخص در جهت عکس یکدیگر عمل نموده و برای محاسبه تاب آوری شبکه باید این دو شاخص را از یکدیگر تفریق نمود. در رابطه (۲) هر چه مقدار شاخص DRI_{load} کمتر باشد، تاب آوری شبکه بیشتر خواهد بود. در ادامه به نحوه محاسبه این شاخص ها پرداخته شده است.

۴-۱- شاخص تاب آوری شبکه در قبال تأمین بار

شاخص ریسک شبکه در قبال تأمین بار (DRI_{load}) برای هر سکنش (نقاطی از شبکه توزیع می باشند که هادی در آن محل برش خورده باشد) به عوامل: ۱- مقدار بار از دست داده شده در صورت شکست سکنش، ۲- احتمال شکست سکنش در اثر وقوع طوفان و سیلاب، ۳- اولویت بار سکنش مربوطه، وابسته می باشد. بنابراین برای محاسبه شاخص DRI_{load} می توان از رابطه (۳) استفاده کرد [۹].

$$(3)$$

$$DRI_{load} = \sum_{sec=1}^k LS_{sec} \times P_{sec}(W, F) \times S_{sec}$$

در رابطه فوق، $P_{sec}(W, F)$ احتمال شکست سکنش در اثر وقوع طوفان یا سیلاب می باشد و LS_{sec} مقدار بار از دست داده شده در صورت شکست سکنش و S_{sec} ضریب حساسیت که بر اساس ارزش یا اولویت بار به سکنش مربوطه داده می شود و K تعداد کل سکنش های شبکه توزیع مورد مطالعه می باشد.

بار از دست داده شده در اثر شکست سکنش از مجموع بارهای تأمین نشده در اثر شکست سکنش در طول دوره مطالعه پس از وقوع حادثه و تقسیم آن بر دوره مورد مطالعه پس از وقوع حادثه حاصل می گردد. که برای محاسبه آن می توان از رابطه (۴) استفاده کرد. شرایط آب و هوایی و حوادث فصلی، الگوی مصرف بار سیستم را تحت تأثیر قرار می دهند.

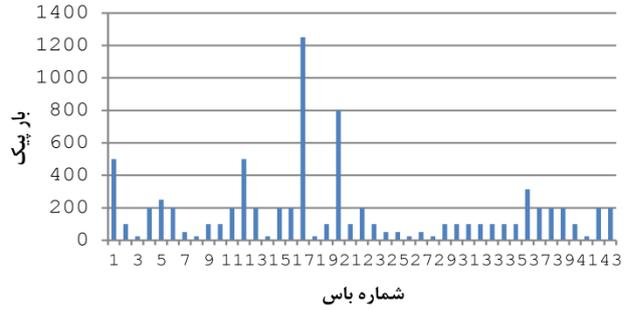
مربوط به باد و طوفان به دو عامل شکست پایه و شکست هادی در اثر این حوادث بستگی دارد.

از آنجایی که در هر سکشن از شبکه توزیع چندین پایه می‌تواند حضور داشته باشد که بصورت سری به هم وصل می‌باشند، بنابراین شکست هر پایه به تنهایی منجر به شکست سکشن مربوطه خواهد گردید. با توجه به مستقل بودن شکست پایه‌ها از یکدیگر و با فرض یکسان بودن احتمال شکست پایه‌ها در یک سکشن، از رابطه (۹) می‌توان برای محاسبه احتمال شکست سکشن ناشی از شکست پایه استفاده کرد. در این رابطه $P_{sec.T}(W)$ احتمال شکست سکشن ناشی از شکست پایه در اثر سرعت باد و $P_{T.single}(W)$ احتمال شکست هر پایه به تنهایی در اثر سرعت باد و NT تعداد پایه‌های موجود در سکشن می‌باشد.

با توجه به این که شکست پایه یا شکست هادی منجر به از دست دادن سکشن می‌گردد، بنابراین احتمال شکست یک سکشن را می‌توان با رابطه (۱۰) بیان کرد. در این رابطه $P_{sec.c}(W)$ احتمال شکست سکشن ناشی از شکست هادی به صورت تابعی از سرعت باد می‌باشد. لازم به ذکر است مقدار $P_{T.single}(W)$ از روی منحنی شکنندگی مربوط به پایه و مقدار $P_{sec.c}(W)$ از روی منحنی شکنندگی هادی شبکه توزیع بدست می‌آید.

از آنجایی که در هنگام وقوع حوادث غیر مترقبه تأمین بارهای حساس در اولویت می‌باشند [۵]. بنابراین خاموشی یک بار حساس تاب‌آوری شبکه را به شدت کاهش خواهد داد. برای این منظور از ضریب حساسیت بار در محاسبه شاخص تاب‌آوری استفاده گردیده است، تا بارهای با حساسیت بالا تأثیر بیشتری بر روی تاب‌آوری شبکه داشته باشند. هنگامی که شبکه توزیع در معرض یک رویداد شدید مانند سیل و طوفان قرار می‌گیرد، باید بارهایی که دارای حساسیت بالایی در مقابل خاموشی می‌باشند، در اولویت برقرار ماندن قرار گیرند. بر این اساس بارها با توجه به حساسیت آن‌ها نسبت به خاموشی به دسته‌های مختلف تقسیم‌بندی گردیده، که ضریب حساسیت آن‌ها S_{sec} با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

مراحل روش پیشنهادی برای ارزیابی شبکه توزیع در قبال تأمین بار را می‌توان به صورت مراحل نشان داده شده در شکل (۵) خلاصه کرد.



شکل (۴): مقدار بار پیک باس‌ها

(۶)

$$P_{sec}(W, F) = P_{sec}(W) + P_{sec}(F) - P_{sec}(W)P_{sec}(F)$$

(۷)

$$P_{sec}(F) = 1 - (1 - P_{T.single}(F))^{NTF}$$

(۸)

$$P_{sec.T}(W) = 1 - (1 - P_{T.single}(W))^{NT}$$

$$P_{sec}(W) = P_{sec.c}(W) + P_{sec.T}(W) - P_{sec.c}(W)P_{sec.T}(W)$$

در رابطه (۶)، $P_{sec}(F)$ احتمال شکست سکشن بر اثر وقوع سیلاب

و $P_{sec}(W)$ احتمال شکست سکشن ناشی از وقوع طوفان می‌باشد.

تأثیر عمده خطر سیلاب، مربوط به پایه‌های شبکه توزیع می‌باشد [۱۱]. در واقع برخورد سیلاب به پایه‌های شبکه توزیع می‌تواند منجر به شکست پایه‌ها و در نتیجه شکست سکشن مربوطه گردد. برای پایه‌هایی از شبکه توزیع که در مجاورت نواحی ساحلی یا در مسیر رودخانه‌ها قرار دارند، یکی از مهم‌ترین عوامل شکست سکشن، خطر وقوع سیلاب می‌باشد. بنابراین برای پایه‌های قرار گرفته در این نواحی برای ارزیابی تاب‌آوری باید از مدل مناسبی برای وقوع سیلاب استفاده کرد. برای این کار ابتدا با استفاده از اطلاعات آماری از سوابق گذشته منحنی شکنندگی مربوط به سیلاب، که بیانگر احتمال شکست پایه بر حسب سرعت سیلاب می‌باشد، برای منطقه مورد مطالعه استخراج گردیده و سپس برای پایه‌هایی که در معرض خطر سیلاب قرار دارند، از روی منحنی شکنندگی مربوطه احتمال شکست پایه در اثر وقوع سیلاب بدست می‌آید. و در نهایت با استفاده از رابطه (۷) می‌توان احتمال شکست سکشن بر اثر وقوع سیلاب را به صورت تابعی از سرعت سیلاب محاسبه کرد. در این رابطه $P_{T.single}(F)$ احتمال شکست هر پایه در اثر وقوع سیلاب به صورت تابعی از سرعت سیلاب و NTF تعداد پایه‌هایی از سکشن مورد نظر که در معرض خطر سیلاب قرار دارند، می‌باشد. در صورتی که شبکه مورد مطالعه در معرض وقوع سیلاب نباشد، بر اساس رابطه (۶) احتمال شکست سکشن تنها به حوادث ناشی از بادهای شدید و طوفان وابسته خواهد بود.

بر اساس [۲] حدود ۹۰ درصد خروج تجهیزات در شبکه مربوط به حوادث ناشی از بادهای شدید و طوفان می‌باشد. تأثیرات ناشی از بادهای شدید و طوفان بر روی دو قسمت عمده یعنی هادی‌ها و پایه‌های شبکه توزیع تمرکز دارد. و شکست هر سکشن در اثر وقوع حوادث

در رابطه (۱۰)، P_{pv}^k و P_{gen}^k به ترتیب مقادیر نامی توان تولیدی سلول های خورشیدی و منابع گاز سوز متداول و مقادیر $A_{pv}^k(t)$ و $A_{gen}^k(t)$ به ترتیب ضریب در دسترس بودن توان سلول های خورشیدی و منابع گاز سوز متداول نصب شده در باس k ام در زمان t مورد مطالعه می باشند، که با شرایط محیطی مختلف مقدار آن ها تغییر می کند و T دوره مورد مطالعه پس از وقوع حادثه می باشد.

مقدار R_{k-n} میزان در دسترس پذیر بودن شبکه بین باس k و n و $P_{k-n}(W, F)$ احتمال شکست شبکه بین باس k و n می باشد، که از مجموع احتمال شکست کلیه سکشن های بین این دو باس طبق رابطه (۱۲) محاسبه می گردد.

میزان تابش نور خورشید و درجه هوای محیطی که سلول های خورشیدی در آن قرار دارند، باعث متغییر بودن ظرفیت در دسترس منابع تولید توان خورشیدی می شوند [۲۱-۲۳]. جهت محاسبه ضریب در دسترس بودن توان سلول های خورشیدی می توان از رابطه (۱۳) استفاده کرد که در آن توان تولیدی سلول های خورشیدی را تحت شرایط محیطی مختلف نشان می دهد، که بر اساس آن با تغییر زاویه تابش خورشید و درجه حرارت محیط، توان تولیدی سلول های خورشیدی تغییر می کند [۲۳].

(۱۳)

$$A_{pv}^k(t) = \frac{G_{ING}(t)}{G_{STG}} \times (1 + k(T_c(t) - T_{ref}))$$

در رابطه فوق $G_{ING}(t)$ و G_{STG} به ترتیب میزان تابش خورشید در شرایط استاندارد (۱۰۰۰ وات بر متر مربع) و میزان تابش خورشید در شرایط محیطی مورد مطالعه در زمان t می باشند. k ضریب حرارتی توان تولیدی تحت شرایط نامی بوده و $T_c(t)$ و T_{ref} به ترتیب دمای اطراف سلول در شرایط محیطی مورد مطالعه در زمان t و دمای استاندارد می باشند [۲۴].

با توجه به شرایط وقوع حوادث طبیعی (طوفان و سیلاب) و با توجه به شرایط دمای محیط و تابش خورشید در زمان وقوع حادثه، می توان از رابطه (۱۳) برای تعیین ضریب در دسترس بودن توان خروجی نیروگاه خورشیدی در زمان مورد مطالعه استفاده نمود.

منابع گاز سوز متداول از دسته منابع تولیدات پراکنده با توان خروجی ثابت می باشند، که با توجه به مسائلی مانند یکسان بودن سوخت، قابلیت اطمینان بالا، سرمایه گذاری اولیه پایین و نیز امکان راه اندازی سریع، به طور گسترده ای در شبکه های توزیع برق استفاده می شوند. قدرت خروجی این منابع قابل پیش بینی است، بنابراین برای برنامه ریزی شبکه مدل توان آن ها ساده است.

میزان تولید منابع گازسوز متداول تحت تأثیر عوامل محیطی و جغرافیایی تغییر می کند. ارتفاع و دمای محیط مهمترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد منابع گازسوز متداول می باشند، به طوری که هر ۱۰۰۰ فوت افزایش ارتفاع، راندمان این منابع را ۳ درصد و توان حداکثر خروجی آن ها را ۳٫۸ درصد کاهش می دهد. همچنین هر ۱۰ درجه فزاینده در دمای محیط موجب کاهش ۱ درصد راندمان این



شکل (۵): مراحل ارزیابی تاب آوری شبکه توزیع در قبال تأمین بار

۴-۲- شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده

از آنجایی که منابع تولید پراکنده یک روش جایگزین برای تأمین مصرف کنندگان هنگام خرابی در سمت شبکه ای اصلی می باشند، بنابراین این منابع در هنگام وقوع حوادث باید در دسترس و ایمن بوده تا توانایی آماده کردن شبکه برای پاسخ سریع به حوادث غیرمترقبه و در نتیجه بهبود تاب آوری شبکه را داشته باشند. بنابراین تاب آوری منابع تولید پراکنده که بیان کننده در دسترس بودن تولید این منابع می باشد، باید در تاب آوری شبکه لحاظ گردد [۱۵].

در این مقاله برای محاسبه شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده از شاخص میزان در دسترس بودن ظرفیت منابع تولید پراکنده در هنگام وقوع حوادث شدید استفاده می گردد. در واقع این شاخص نشان دهنده میزان تولید در دسترس، در شبکه توزیع می باشد که در هنگام وقوع حوادث با احتمال وقوع کم و تأثیر زیاد، می توان جهت تغذیه بار از آن استفاده کرد. در واقع شاخص ظرفیت در دسترس منابع تولید پراکنده به ۲ عامل بستگی دارد: ۱- اندازه ظرفیت موجود منابع، ۲- دسترسی به این ظرفیت [۱۵].

با توجه به اینکه در این مقاله، سلول های خورشیدی و منابع گازسوز متداول به عنوان منابع تولید پراکنده، مورد مطالعه قرار گرفته است، برای محاسبه شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده می توان از روابط (۱۰) تا (۱۲) استفاده کرد [۱۵].

(۱۰)

$$GRI_{DG} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{k \in bus} (P_{pv}^k A_{pv}^k(t) + P_{gen}^k A_{gen}^k(t)) \sum_{n \in bus} R_{k-n}}{T} \quad (10)$$

(۱۲)

$$R_{k-n} = 1 - P_{k-n}(W, F)$$

$$P_{k-n}(W, F) = \sum_{sec \in (k-n)} P_{sec}(W, F)$$

که نشان دهنده‌ی تعداد مکان‌های کاندید برای نصب نیروگاه‌های گاز سوز می‌باشد. در این بخش هر ژن که مقدار صفر دارد یعنی هیچ نیروگاه گاز سوزی در مکان متناظر نصب نشده است و یک عدد صحیح مخالف صفر مقدار ظرفیت نیروگاه گاز سوز انتخاب شده در مکان متناظر را نشان می‌دهد.

الگوریتم با تولید یک جمعیت آغازین تصادفی کار خود را آغاز می‌کند و در هر تکرار الگوریتم ژنتیک با استفاده از سه عملگر انتخاب، تقاطع و جهش از جمعیت موجود برای ایجاد فرزندان نسل بعدی استفاده می‌کند. عملگر انتخاب افراد دارای شایستگی بیشتر از جمعیت قبلی را به عنوان والدین جمعیت جدید که برای تولید نسل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، انتخاب می‌کند. معیار انتخاب کروموزوم‌ها بر اساس مقدار برآزندگی آن‌ها می‌باشد. هر چه مقدار برآزندگی یک کروموزوم بیشتر باشد شانس انتخاب آن بیشتر می‌گردد [۱۷]. جهت محاسبه‌ی برآزندگی ابتدا بر اساس اطلاعات کروموزوم‌ها وضعیت شبکه از نظر مکان، نوع و ظرفیت منابع تولید پراکنده تعیین و سپس شاخص DRI که نشان دهنده میزان برآزندگی هر کروموزوم می‌باشد، با استفاده از مدل ارائه شده محاسبه می‌گردد.

از طریق عملگر تقاطع، ۲ کروموزومی که به صورت تصادفی از جمعیت موجود انتخاب شده است، برای ایجاد ۲ یا تعداد بیشتر کروموزوم‌های جدید با هم ترکیب می‌شوند. با این کار بهترین اطلاعات والدین به فرزندان نسل جدید منتقل می‌شود. در حل این مسأله عملگر تقاطع به روش جایگزینی انجام می‌شود، یعنی اعضای بین دو نقطه برش از والد اول در فرزند دوم و اعضای بین دو نقطه برش از والد دوم در فرزند اول کپی می‌گردد.

جهت اجتناب از، دست‌دادن بعضی ژن‌های مهم و افزایش تغییرات در جمعیت‌ها از عملگر جهش استفاده می‌شود [۱۷]. این عملگر یک تغییر تصادفی را بر روی افراد اعمال کرده و افراد جدیدی را در جمعیت تولید می‌نماید. در این عملگر برای هر ژن یک عدد تصادفی یکنواخت در فاصله‌ی (۰ و ۱) تولید می‌شود. اگر این عدد کمتر از نرخ جهش باشد مقدار متناظر ژن موجود با مقدار تصادفی دیگری در بازه‌ی مشخص تعویض می‌شود. در نهایت الگوریتم ژنتیک بعد از چند تکرار که از قبل تعیین شده بهترین راه حل برای مسأله‌ی طراحی بهینه منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری شبکه را بر می‌گرداند.

۶- مطالعات عددی

۶-۱- شبکه مورد مطالعه

جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در حل مسأله‌ی طراحی بهینه منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری، مدل پیشنهادی فوق بر روی یک شبکه توزیع واقعی اعمال شده است. این شبکه همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، یک شبکه‌ی توزیع

منابع می‌گردد [۲۵]. بنابراین با داشتن اطلاعات مربوط به دما و ارتفاع محل نصب این منابع در زمان وقوع رویدادهای آب و هوایی، به سادگی میزان توان در دسترس منابع گازسوز متداول $A_{gen}^k(t)$ در زمان مورد مطالعه بدست می‌آید.

۵- الگوریتم پیشنهادی

بهینه‌سازی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با هدف بهبود تاب‌آوری را می‌توان به صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی بیان کرد. الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد که از طبیعت الهام گرفته و فرایندهای آن بر اساس تکامل زیستی انجام می‌شود. این الگوریتم در هر جمعیتی راه‌حل‌های منفرد مسأله را تغییر می‌دهد که از این تغییرات تحت عنوان تکامل یاد می‌شود. در هر گام از این تکامل دو عضو از جمعیت را به طور تصادفی به عنوان والدین انتخاب کرده و فرزند آن‌ها را به عنوان نسل بعدی در نظر می‌گیرد، به این ترتیب جمعیت به سمت یک راه‌حل بهینه تکامل می‌یابد. با استفاده از این الگوریتم می‌توان بسیاری از مسائل بهینه‌سازی را که با الگوریتم‌های استاندارد بهینه‌سازی حل نمی‌شوند، حل نمود. از جمله این مسائل می‌توان به مسائلی که تابع هدف در آن‌ها گسسته و غیر خطی است، اشاره نمود [۲۶-۲۸]. در واقع برای تعیین نوع، مکان و اندازه بهینه منابع تولید پراکنده جهت دست‌یابی به یک شبکه توزیع تاب‌آور یک فن بهینه‌سازی مناسب، استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

برای حل مسأله‌ی طراحی بهینه منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری متغیرهای گسسته‌ی تصمیم (نوع، مکان و اندازه بهینه منابع) توسط الگوریتم ژنتیک تولید و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مراحل اصلی روش بهینه‌سازی در زیر شرح داده شده است. موضوع اولی که باید مورد بررسی قرار گیرد نوع کدبندی که قرار است برای حل مسأله استفاده شود. به طوری که هر کروموزوم شامل اطلاعاتی در مورد متغیرهای تصمیم گسسته است و یک کاندید حل مسأله را نشان می‌دهد و دارای ۲ بخش به صورت نشان داده شده در شکل (۶) می‌باشد.



شکل (۶): ساختار کروموزوم

بخش اول شامل اطلاعات تصمیم در مورد مکان و اندازه‌ی نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد و N_{pv} ژن دارد که تعداد مکان‌های کاندید برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. مقدار مربوط به هر ژن، مقدار ظرفیت نیروگاه خورشیدی که باید در آن مکان کاندید نصب شود را نشان می‌دهد و مقدار صفر در هر ژن نشان می‌دهد که در مکان کاندید مربوطه نیروگاه خورشیدی نصب نشده است. بخش دوم نشان دهنده محل و ظرفیت نیروگاه‌های گاز سوز مرسوم در مکان‌های کاندید سیستم می‌باشد. و دارای N_{gen} ژن است

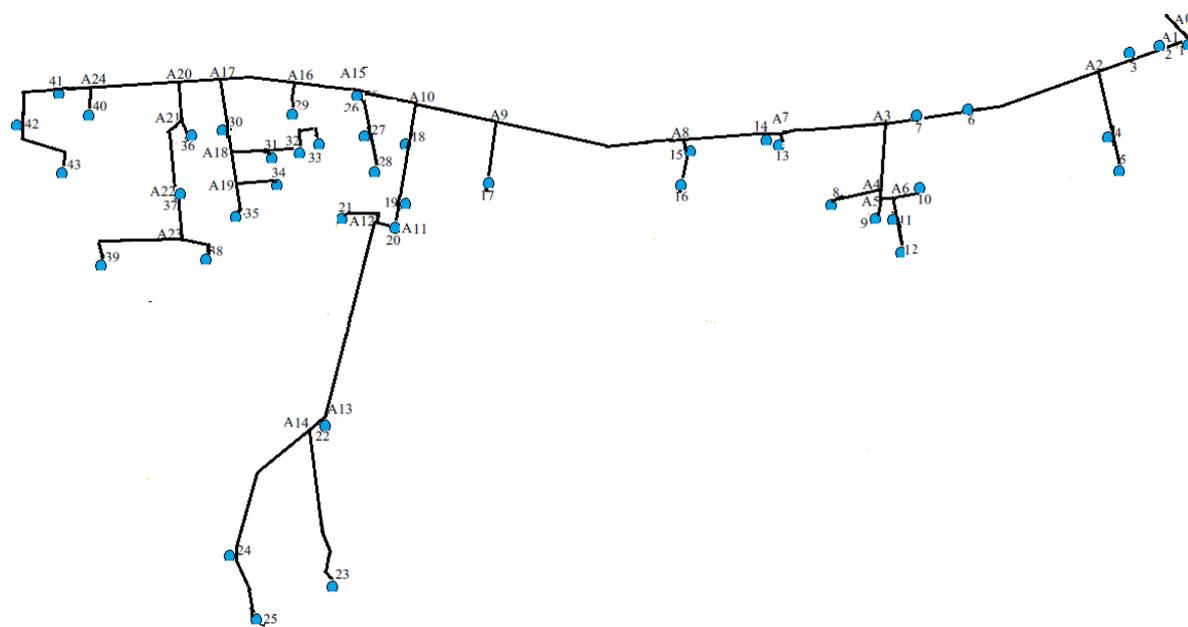
هوایی در یک ناحیه مشخص کلیه اجزای شبکه توزیع درون هر ناحیه در معرض شرایط مشابه آب و هوایی قرار دارند. و این بدین معنی است که شکنندگی اجزای شبکه توزیع از جمله پایه ها و هادی ها در هر ناحیه یکسان است.

بر اساس این تقسیم بندی ناحیه ۱ بخشی از شبکه توزیع را پوشش می دهد که در داخل شهر قرار داشته و بدلیل محصور بودن و وجود بافت شهری و ساخت و سازهای اطراف شبکه، باد و طوفان به طور کلی تأثیر کمی بر روی هادی ها و پایه های شبکه توزیع می گذارد. ناحیه ۲ مربوط به بخشی از شبکه که از یک طرف محصور بوده و تأثیر باد و طوفان نسبت به حالت قبل بیشتر می باشد. در ناحیه ۳ شبکه از هیچ سمتی محصور نبوده و کاملاً در فضای باز قرار دارد. بنابراین در این ناحیه تأثیر باد و طوفان زیاد می باشد. ناحیه ۴ مربوط به قسمتی از شبکه توزیع است که پایه های شبکه در رودخانه واقع گردیده است و برای این ناحیه تأثیر باد و طوفان ناچیز بوده اما خطر وقوع سیلاب می تواند به طور جدی بر روی پایه های شبکه تأثیر گذار باشد. در ناحیه ۵ پایه های شبکه در نواحی کوهستانی قرار گرفته بنابراین خطوط برق در این ناحیه به طور جدی از تأثیرات طوفان در طول دوره رنج خواهند برد. اطلاعات مربوط به حداکثر سرعت باد و سیلاب در نواحی مورد مطالعه در جدول (۲) آورده شده است.

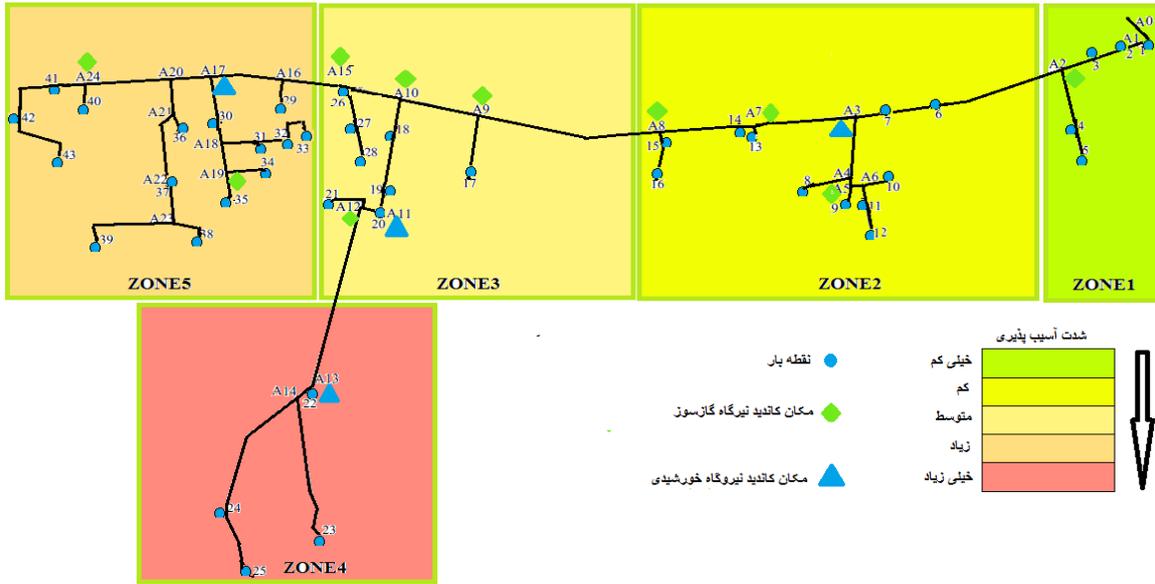
۲۰ KV و ۴۴ باسه مربوط به فیدر مرمر شبکه توزیع برق خراسان جنوبی می باشد. این فیدر از پست فوق توزیع ۱۳۲ KV شروع شده و دارای ۴۳ نقطه بار در طول مسیر و در مجموع دارای بار کلی ۷۷۹۰ KVA می باشد. نقطه A0 به عنوان باس مرجع و شروع فیدر که در محل پست فوق توزیع قرار دارد و نقاط A1 تا A24 محل های انشعاب گیری از فیدر اصلی می باشند. اطلاعات مربوط به نقاط بار و سگشن های شبکه در جدول (۱) آورده شده است.

انتخاب نقاط کاندید برای نیروگاه های خورشیدی و منابع گازسوز متداول با توجه شرایط خاص محیطی که هر کدام از این منابع به آن نیاز دارند، انجام گردیده است. در این مقاله نقاط کاندید برای نیروگاه های خورشیدی بر اساس واجد شرایط بودن محیط نصب نیروگاه (داشتن فضای کافی - عدم سایه اندازی) و برای نیروگاه های گازسوز متداول با توجه به در دسترس بودن گاز طبیعی انتخاب گردیده اند. در شکل (۸) اطلاعات مربوط به مکان های کاندید نیروگاه های خورشیدی و نیروگاه های گازسوز متداول بر روی شبکه مورد مطالعه نشان داده شده است.

برای مدل سازی اثرات طوفان و سیلاب، شبکه توزیع مورد مطالعه بر اساس مسیر طوفان که از روی پروفیل های باد در منطقه مورد مطالعه قابل استخراج و محل های با احتمال وقوع سیلاب با توجه به مکان های جغرافیایی پایه های خطوط برق، به ۵ ناحیه مطابق شکل (۸) تقسیم بندی شده است. با فرض یکسان بودن شرایط آب و



شکل (۷): شبکه توزیع ۴۴ باسه مورد مطالعه



شکل (۸): تقسیم بندی شبکه توزیع به چند ناحیه آب و هوایی

۱۰	۵۶۸	25-26	۳۹	۲۰۰	۳۹
۷	۳۷۰	A10-27	۴۰	۱۰۰	۴۰
۱	۲۰	27-A15	۴۱	۲۵	۴۱
۶	۳۱۶	A15-28	۴۲	۲۰۰	۴۲
۴	۲۳۹	28-29	۴۳	۲۰۰	۴۳
۹	۴۹۶	A15-A16	۴۴		
۳	۱۷۴	A16-30	۴۵		
۹	۵۳۷	A16-A17	۴۶		
۷	۳۷۲	A17-31	۴۷		
۳	۸۱	31-A18	۴۸		
۵	۲۵۵	A18-32	۴۹		
۵	۲۴۷	32-33	۵۰		
۸	۴۶۹	33-34	۵۱		
۴	۲۴۰	A18-A19	۵۲		
۵	۲۸۲	A19-35	۵۳		
۴	۲۲۴	A19-36	۵۴		
۶	۳۲۰	A17-A20	۵۵		
۵	۳۰۲	A20-A21	۵۶		
۱	۵۹	A21-37	۵۷		
۱۰	۵۷۴	A21-A22	۵۸		
۱	۳۱	A22-38	۵۹		
۷	۳۷۴	A22-A23	۶۰		
۴	۲۴۴	A23-39	۶۱		
۱۳	۷۴۷	A23-40	۶۲		
۸	۴۶۴	A20-A24	۶۳		
۳	۱۵۸	A24-41	۶۴		
۵	۲۶۰	A24-42	۶۵		
۸	۴۶۲	42-43	۶۷		
۹	۵۱۸	43-44	۶۷		

جدول (۲): مشخصات نواحی مورد مطالعه

شماره ناحیه	حد اکثر سرعت باد (m/sec)	سرعت سیلاب (m/sec)
۱	۲۶	-
۲	۲۸	-
۳	۳۰	-
۴	۲۸	۲۰
۵	۳۶	-

چارچوب مدل پیشنهادی بر روی تأثیرات شدید طوفان و سیلاب بر روی پایه‌ها و هادی‌های شبکه توزیع تمرکز دارد. با توجه به

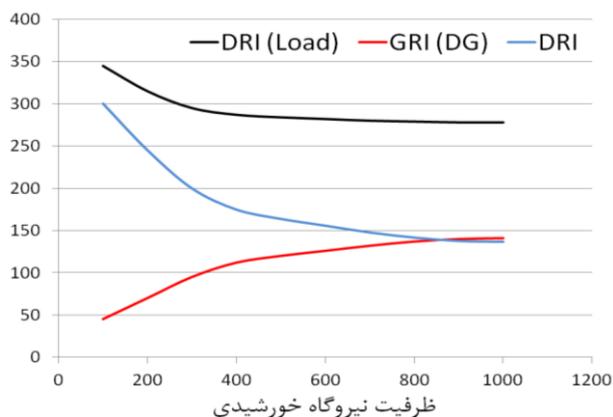
جدول ۱: اطلاعات سکشن‌ها

اطلاعات سکشن‌ها				اطلاعات نقاط بار	
تعداد تیر در هر سکشن	طول (m)	سکشن‌ها	شماره سکشن	بار (KVA)	شماره نقطه بار
۳	۱۵۵	A0-A1	۱	۵۰۰	۱
۱	۲۹	A1-2	۲	۱۰۰	۲
۱	۶۰	A1-3	۳	۲۵	۳
۱۰	۵۶۴	3-4	۴	۲۰۰	۴
۵	۲۶۸	4-A2	۵	۲۵۰	۵
۹	۵۰۲	A2-5	۶	۲۰۰	۶
۴	۲۰۲	5-6	۷	۵۰	۷
۱۶	۹۶۱	A2-7	۸	۲۵	۸
۷	۳۷۵	7-8	۹	۱۰۰	۹
۴	۲۳۶	8-A3	۱۰	۱۰۰	۱۰
۵	۵۰۴	A3-A4	۱۱	۲۰۰	۱۱
۶	۳۳۳	A4-9	۱۲	۵۰	۱۲
۱	۵۷	A4-A5	۱۳	۲۰۰	۱۳
۲	۸۶	A5-10	۱۴	۲۵	۱۴
۲	۸۷	A5-A6	۱۵	۲۰۰	۱۵
تعداد تیر در هر سکشن	طول (m)	سکشن‌ها	شماره سکشن	بار (KVA)	شماره نقطه بار
۴	۱۹۴	A6-11	۱۶	۲۰۰	۱۶
۲	۱۰۱	A6-12	۱۷	۱۲۵۰	۱۷
۵	۲۹۸	12-13	۱۸	۲۵	۱۸
۱۳	۷۵۶	A3-A7	۱۹	۱۰۰	۱۹
۲	۱۲۱	A7-14	۲۰	۸۰۰	۲۰
۲	۷۸	A7-15	۲۱	۱۰۰	۲۱
۱۲	۶۹۲	15-A8	۲۲	۲۰۰	۲۲
۲	۶۷	A8-16	۲۳	۱۰۰	۲۳
۶	۳۱۲	16-17	۲۴	۵۰	۲۴
۲۲	۱۳۷۵	A8-A9	۲۵	۵۰	۲۵
۹	۵۰۰	A9-18	۲۶	۲۵	۲۶
۱۰	۵۹۰	A9-A10	۲۷	۵۰	۲۷
۵	۲۸۰	A10-19	۲۸	۲۵	۲۸
۹	۴۹۹	19-20	۲۹	۱۰۰	۲۹
۳	۱۵۳	20-A11	۳۰	۱۰۰	۳۰
۱	۳۰	A11-21	۳۱	۱۰۰	۳۱
۳	۱۴۱	A11-A12	۳۲	۱۰۰	۳۲
۷	۳۹۰	A12-22	۳۳	۱۰۰	۳۳
۲۵	۱۴۴۶	A12-A13	۳۴	۱۰۰	۳۴
۲	۶۸	A13-23	۳۵	۱۰۰	۳۵
۳	۱۴۵	A13-A14	۳۶	۳۱۵	۳۶
۲۰	۱۱۴۰	A14-24	۳۷	۲۰۰	۳۷
۱۹	۱۱۰۶	A14-25	۳۸	۲۰۰	۳۸

شکل (۹): منحنی‌های شکنندگی
الف-پایه در مقابل باد، ب-هادی در مقابل باد،
ج-پایه در مقابل سیلاب

۲-۶- تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب آوری شبکه توزیع

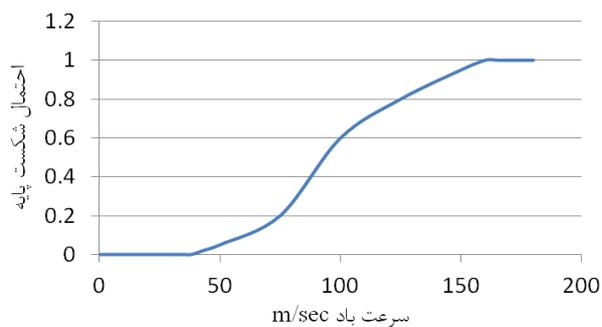
در بخش اول ارزیابی تاب آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده، با استفاده از مدل پیشنهادی برای یک دوره ۲۴ ساعته پس از وقوع حادثه مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل (۱۰) تأثیر افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی بر شاخص تاب آوری شبکه در قبال تأمین بار و شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده و تأثیر آن‌ها بر روی شاخص کلی به طور جداگانه نشان داده شده است. از نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که با افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی، شاخص ریسک شبکه در قبال تأمین بار کاهش (افزایش تاب آوری شبکه در قبال تأمین بار) و شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی، هر دو شاخص تاب آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب آوری منابع تولید پراکنده در جهت بهبود تاب آوری کلی شبکه عمل می‌نمایند.



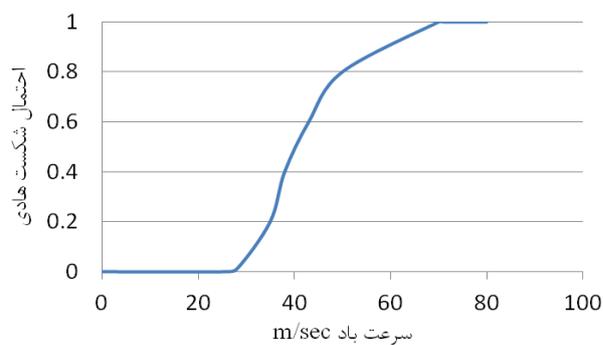
شکل (۱۰): تأثیر افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی بر روی شاخص‌های تاب آوری

شکل (۱۱) تأثیر افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده بر روی شاخص DRI در دو حالت مختلف (الف) در حضور منبع فتوولتائیک ب- در حضور منبع گازسوز متداول) و با فرض نصب منابع در یک مکان کاندید مشخص، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد مقدار شاخص و در نتیجه تاب آوری شبکه وابسته به نوع و ظرفیت منابع تولید پراکنده می‌باشد. و با تغییر ظرفیت و نوع منابع تولید پراکنده میزان تاب آوری شبکه متفاوت خواهد بود. به طوری که در صورت استفاده از منابع گاز سوز متداول که دارای توان خروجی ثابت می‌باشند، در مقایسه با منابع فتوولتائیک، میزان تاب آوری شبکه بیشتر بهبود می‌یابد. علاوه بر این با افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده تا حد معینی، مقدار شاخص DRI کاهش و در نتیجه تاب آوری شبکه افزایش می‌یابد. اما نرخ افزایش تاب آوری در ابتدا (ظرفیت‌های کم) بسیار زیاد بوده و با افزایش ظرفیت منابع، این نرخ کاهش می‌یابد. به

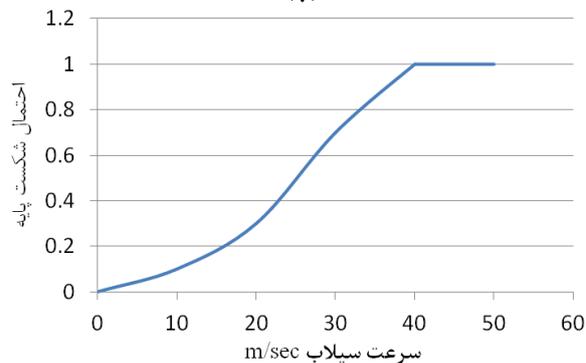
اطلاعات بدست آمده از شرایط آب و هوایی نواحی مورد مطالعه و وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب و هوایی، که می‌توان از روی سوابق و بررسی یک مطالعه آماری مربوط به احتمال شکست تجهیزات با سرعت باد و سیلاب در منطقه مورد مطالعه استخراج کرد، منحنی‌های شکنندگی را می‌توان بدست آورد. شکل (۹) منحنی‌های شکنندگی پایه در مقابل باد، هادی در مقابل باد و پایه در مقابل سیلاب را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در اینجا فرض بر این است که پایه‌های شبکه توزیع از نوع بتنی چهارگوش بوده و به ازای هر ۶۰ متر یک پایه وجود دارد، که در طول یک سکشن به صورت سری متصل می‌شوند، بنابراین فرورویختن یک پایه به تنهایی منجر به شکست کل سکشن خواهد گردید. با استفاده از منحنی‌های فوق می‌توان با در دست داشتن سرعت باد و سیلاب در نواحی مختلف مورد مطالعه، احتمال شکست هادی‌ها و پایه‌های شبکه توزیع را بدست آورد و به محاسبه احتمال شکست هر سکشن شبکه توزیع در اثر وقوع طوفان یا سیلاب پرداخت.



(الف)



(ب)



(ج)

حاصل گردیده که جواب بدست آمده بهینه خواهد بود. در این مقاله پاسخ‌های بهینه بعد از انجام ۵۰ تکرار در الگوریتم ژنتیک، با تعداد جمعیت اولیه‌ی ۲۰ و نرخ جهش ۰/۳ حاصل می‌گردند. فرض می‌شود حداکثر ظرفیت قابل نصب منبع تولید پراکنده در هر مکان کاندید ۱۰۰ کیلووات است. مسأله بهینه‌سازی طراحی منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری بر روی شبکه نمونه در دو حالت زیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۳-۶- چند مرحله‌ای

در این حالت فرض بر این است که به صورت چند مرحله‌ای یعنی در چند بازه‌ی زمانی مختلف نسبت به نصب منابع تولید پراکنده اقدام می‌گردد، در این حالت پس از بدست آمدن طرح بهینه در هر دوره، نوع و مکان نصب منبع تولید پراکنده ثابت فرض می‌گردد و بهینه‌سازی برای پیدا کردن نوع و مکان منبع برای دوره بعدی ادامه می‌یابد.

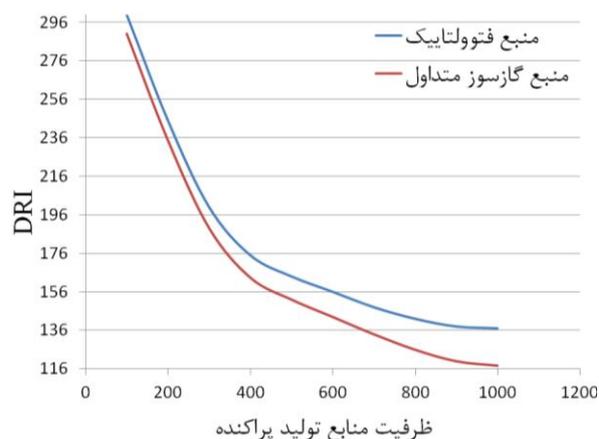
۲-۳-۶- تک مرحله‌ای

در این حالت، بهینه‌سازی نوع و مکان منابع تولید پراکنده به صورت تک مرحله‌ای انجام می‌گردد. یعنی برای هر ظرفیت موجود از منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع مسأله بهینه‌سازی به صورت مستقل حل می‌گردد.

شکل (۱۲) اثر افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع در دو حالت مورد مطالعه بر روی شاخص DRI شبکه توزیع را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) طرح‌های بهینه با اضافه شدن پله‌های ۱۰۰ کیلوواتی از منابع تولید پراکنده در ۵ دوره زمانی و حداکثر ظرفیت تا ۵۰۰ کیلووات برای کل شبکه را نشان می‌دهند. شکل (۱۴) طرح‌های بهینه بدست آمده با فرض ظرفیت‌های در دسترس منابع تولید پراکنده از ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلووات برای کل شبکه را نشان می‌دهند.

برای نشان دادن اهمیت موضوع بهینه‌سازی طراحی منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری، مسأله جایابی بهینه منبع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات (بهبود پروفیل ولتاژ) نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت این کار منبع تولید پراکنده با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات از نوع گاز سوز در مکان‌های مختلف کاندید قرار داده شده و با استفاده از نرم افزار DIGSILENT محلی که دارای کمترین تلفات و بهترین پروفیل ولتاژی می‌باشد، به‌عنوان محل بهینه جهت نصب بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که محل بهینه برای منبع تولید پراکنده با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات با هدف بهبود تاب‌آوری شبکه مکان A9 می‌باشد، در صورتی که مکان بهینه نصب با هدف کاهش تلفات مکان A12 می‌باشد. به عبارت دیگر مسأله طراحی منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری و هدف کاهش تلفات دارای نتایج متفاوت می‌باشند. شکل (۱۵) محل بهینه نصب منبع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات (بهبود پروفیل ولتاژ) را نشان می‌دهد.

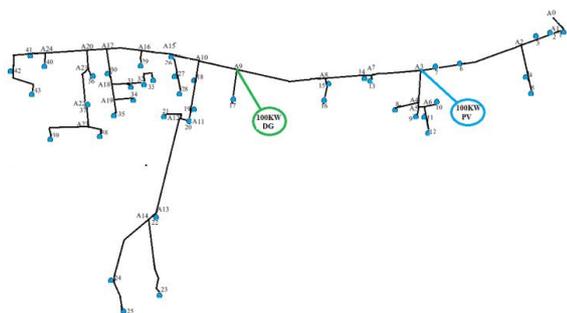
طوری که اگر میزان ظرفیت منابع از حد معینی افزایش یابد تأثیر آن بر روی تاب‌آوری شبکه بسیار ناچیز خواهد بود. این نتیجه حاصله به این شکل قابل تحلیل است که در هنگام وقوع حادثه طبیعی بخش زیادی از تجهیزات شبکه و سگشن‌های مربوطه دچار شکست می‌گردند. بنابراین مسیر انتقال توان برای تغذیه بسیاری از بارها مسدود می‌گردد. در مورد ظرفیت‌های پایین منابع تولید پراکنده با قراردادن آن‌ها در مکان مناسب، با تغذیه بیشترین بارهای قابل دسترس، استفاده بهینه از ظرفیت منابع در تأمین بار انجام می‌گردد و در نتیجه بیشترین اثر در افزایش تاب‌آوری شبکه حاصل می‌گردد. اما با افزایش ظرفیت منابع از میزان مشخصی، ممکن است نتوان از کل ظرفیت منابع در جهت تأمین بارها بدلیل عدم دسترسی به بارها و در نتیجه افزایش تاب‌آوری شبکه استفاده کرد. در واقع ظرفیت تولید پراکنده در دسترس می‌باشد، اما امکان استفاده از آن جهت تغذیه بار وجود ندارد. به همین دلیل اثر آن بر روی شاخص تاب‌آوری بسیار ناچیز می‌باشد.



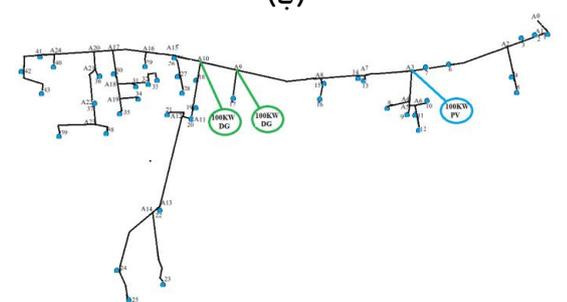
شکل (۱۱): تأثیر نوع و ظرفیت منابع تولید پراکنده بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع

۳-۶- بهینه‌سازی

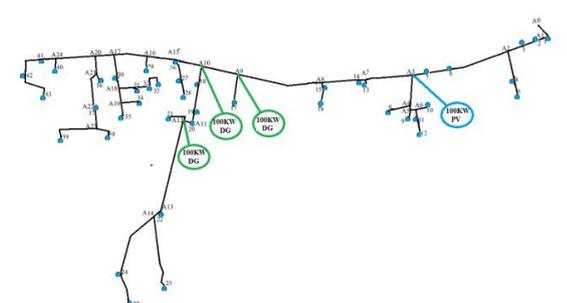
در این بخش به حل مسأله بهینه‌سازی طراحی منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری، با استفاده از الگوریتم ژنتیک در MATLAB پرداخته شده است. لازم به ذکر است جهت حل این مسأله فرض می‌گردد مقدار ظرفیت‌های منابع تولید پراکنده که جهت بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد، در شبکه موجود بوده و به همین علت از هزینه‌های احداث آن‌ها صرف نظر گردیده است. و طراحی منابع تولید پراکنده جهت تعیین نوع و مکان این منابع تنها با هدف بهبود تاب‌آوری شبکه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. انتخاب نوع و مکان نصب نیروگاه‌ها بر اساس مقادیر ژن‌های کروموزوم در پاسخ نهایی الگوریتم ژنتیک که دارای بیشترین برآوردگی (بیشترین تاب‌آوری شبکه) می‌باشد، تعیین گردیده‌اند. پاسخ بهینه مسأله طراحی منابع تولید پراکنده با اجرای چندین بار مراحل مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای هر حالت بر روی شبکه نمونه و به‌دست آوردن بهترین نتایج در اجراهای مختلف، اطمینان



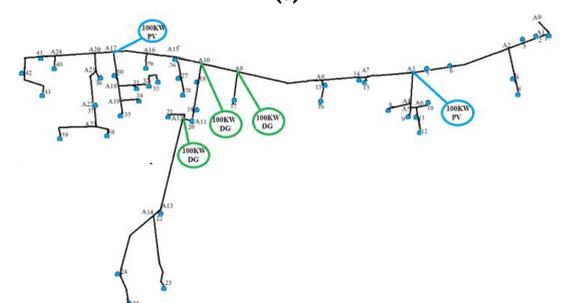
(ب)



(ج)



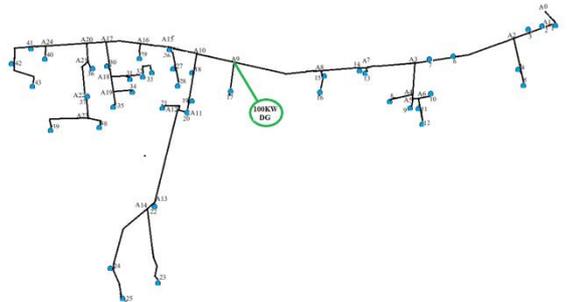
(د)



(ه)

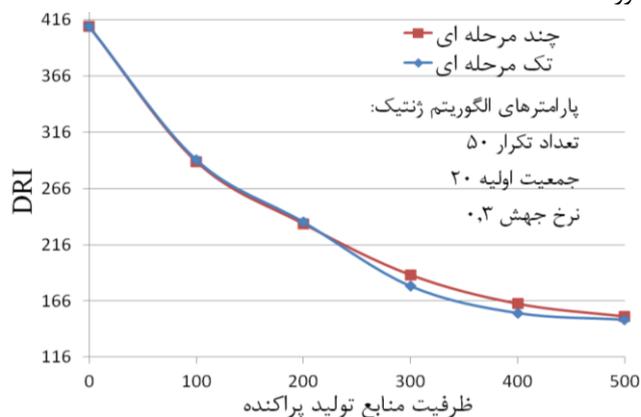
شکل (۱۳): طرح های بهینه حالت چند مرحله ای

الف- ۱۰۰ KW، ب- ۲۰۰ KW، ج- ۳۰۰ KW، د- ۴۰۰ KW، ه- ۵۰۰ KW



(الف)

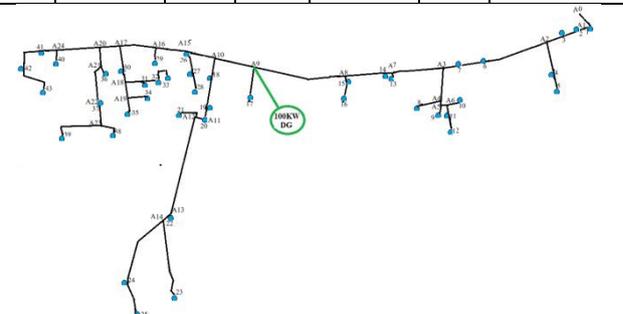
مقدار شاخص DRI و نوع منبع تولید پراکنده در دو حالت مختلف مورد مطالعه و با افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده، در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۱۲): اثر افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده بر روش شاخص تاب-آوری شبکه توزیع در دو حالت مورد مطالعه

جدول (۳): مقدار شاخص DRI و نوع منبع تولید پراکنده با افزایش ظرفیت منابع در دو حالت مختلف مورد مطالعه

تک مرحله ای			چند مرحله ای			ظرفیت منابع (KW)
DRI	محل نصب	نوع	DRI	محل نصب	نوع	
۴۱۰	-	-	۴۱۰	-	-	۰
۲۹۱.۵	A9	1DG	۲۹۱.۵	A9	1DG	۱۰۰
۲۳۶	A9	1DG	۲۳۶	A9	1DG	۲۰۰
	A3	1PV		A3	1PV	
۱۸۸	A8-A10	2DG	۱۹۰	A9-A10	2DG	۳۰۰
	A3	1PV		A3	1PV	
۱۵۹	A9-A12-A15	3DG	۱۶۴	A9-A10-A12	3DG	۴۰۰
	A3	1PV		A3	1PV	
۱۵۱	A8-A10-A12	3DG	۱۵۲	A9-A10-A12	3DG	۵۰۰
	A3-A17	2PV		A3-A17	2PV	

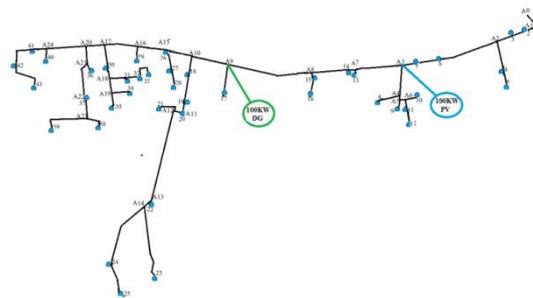


(الف)

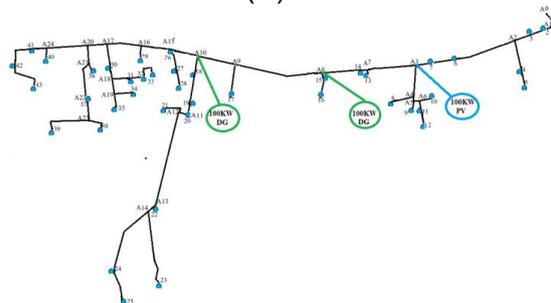
با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع علاوه بر این که موجب بهبود تاب‌آوری شبکه می‌گردد، بلکه جهت داشتن بیشترین سطح تاب‌آوری در شبکه توزیع با ظرفیت موجود منابع تولید پراکنده، باید مسأله طراحی بهینه نوع و مکان این منابع در شبکه مورد توجه ویژه قرار گیرد. علاوه بر این مسأله بهینه‌سازی طراحی منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری و هدف کاهش تلفات نتایج متفاوتی را به دنبال خواهد داشت. و این امر نشان می‌دهد طرح‌هایی از شبکه توزیع که با هدف بهینه تلفات بدست می‌آیند، نمی‌توانند تاب‌آوری شبکه را تضمین نمایند. همچنین طراحی منابع تولید پراکنده به صورت تک مرحله‌ای منجر به بهبود بیشتر سطح تاب‌آوری شبکه توزیع نسبت به حالت چند مرحله‌ای می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

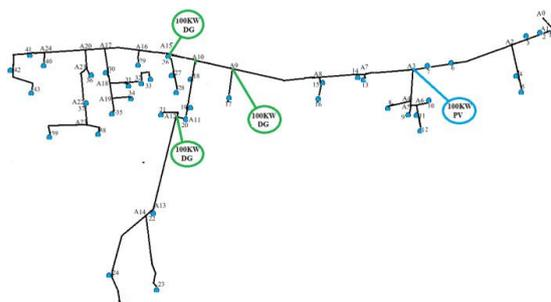
در این مقاله سعی گردید با ارائه مفهوم تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده به نحوه مدل‌سازی حوادث طبیعی متداول مانند سیل و طوفان پرداخته و سپس به منظور بررسی تأثیر این منابع بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع با ارائه شاخص جدید، تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده (سلول‌های خورشیدی و منابع گازسوز متداول) به صورت مستقل از هم، فرموله-بندی ریاضی گردید. در ادامه به مطالعه تأثیر نوع و ظرفیت نیروگاه-های خورشیدی و منابع گازسوز متداول بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته و در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی به حل مسأله‌ی طراحی بهینه منابع تولید پراکنده با هدف بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته شد. نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه‌ی نمونه واقعی نشان می‌دهد، میزان تاب-آوری شبکه وابسته به نوع و ظرفیت منابع تولید پراکنده مورد استفاده در شبکه می‌باشد، به طوری که در صورت استفاده از منابع گاز سوز متداول دارای توان خروجی ثابت، در مقایسه با منابع فتوولتائیک، میزان تاب‌آوری شبکه بیشتر افزایش می‌یابد. همچنین نرخ افزایش شاخص تاب‌آوری با افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده در ابتدا زیاد بوده و با افزایش ظرفیت منابع از میزان مشخصی، این نرخ کاهش می‌یابد. علاوه بر این جهت داشتن بیشترین سطح تاب‌آوری در شبکه توزیع و استفاده بهینه از ظرفیت‌های موجود منابع تولید پراکنده، پیشنهاد می‌گردد مسأله طراحی بهینه نوع و مکان این منابع در امر طراحی و توسعه شبکه مورد توجه ویژه قرار گیرد. همچنین طراحی منابع تولید پراکنده به صورت تک مرحله‌ای منجر به نتایج بهتری در سطح تاب‌آوری شبکه توزیع نسبت به حالت چند مرحله‌ای می‌گردد. در این مقاله با استفاده از مدل جدید ارائه شده به طراحی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با هدف بهبود تاب‌آوری پرداخته شد. در مطالعات بعدی تلاش خواهد گردید با استفاده از مدل ارائه شده، به مسأله طراحی جامع شبکه توزیع یعنی طراحی هر یک از اجزای



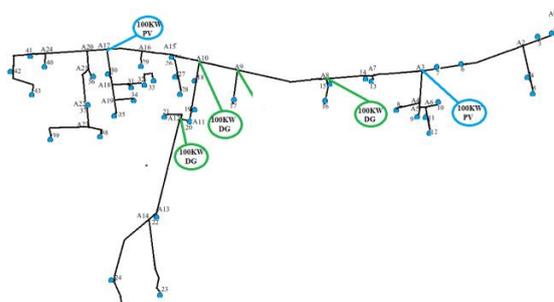
(ب)



(ج)



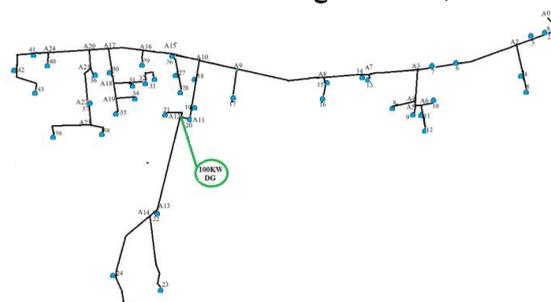
(د)



(ه)

شکل (۱۴): طرح‌های بهینه حالت تک مرحله‌ای

الف- ۱۰۰ KW، ب- ۲۰۰ KW، ج- ۳۰۰ KW، د- ۴۰۰ KW، ه- ۵۰۰ KW



شکل (۱۵): طرح بهینه با هدف کاهش تلفات

- Enhanced Resilience", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 535-545, Jan. 2019.
- [16] S. Wang, Z. Li, L. Wu, M. Shahidehpour and Z. Li, "New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution systems", IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 2852-2861, Aug. 2013.
- [17] H. Falaghi, C. Singh, M.-R. Haghifam, M. Ramezani, "DG integrated multistage distribution system expansion planning", Electrical Power and Energy Systems, vol. 33, pp. 1489-1497, 2011.
- [18] Zhaoyu Wang, Bokan Chen, Jianhui Wang, "Robust optimization based optimal DG placement in microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 5, pp. 2173-2182, Sept. 2014
- [19] N. Hatziaargyriou, H. Asano, R. Irvani and C. Marnay, "Microgrids", IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, 2007.
- [20] M. Al-Muhaini, Gerald T. Heydt, "Evaluating future power distribution system reliability including distributed generation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2264-2272, 2013.
- [21] W. Caisheng and M. Hashem Nehrir, "Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 23, no. 3, pp. 957-967, Sept. 2008.
- [22] Mohammad saad Alam and David, "Modeling and Analysis of a Wind/PV/Fuel Cell Hybrid Power System in HOMER", Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics and Applications, PP.1594-1599, 2007.
- [23] M. Rahman, M. Hasanuzzaman and N.A. Rahim, "Effects of Various Parameters on PV-Module Power and Efficiency", Energy Conversion and Management, Vol. 103, pp. 348-358, 2015.
- [24] D. Torres-Lobera, and S. Valkealahti, "Inclusive Dynamic Thermal and Electric Simulation Model of Solar PV Systems under Varying Atmospheric Conditions", Solar Energy, 105, pp. 632-647, 2014.
- [25] Energy Nexus Group, "Technology characterization-microturbine", USA Environmental Protection Agency, 2002.
- [26] V. Camargo, M. Lavorato, R. Romero, "Specialized genetic algorithm to solve the electrical distribution system expansion planning", IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), pp. 1-5, 2013.
- [27] D.T.C. Wang, L.F. Ochoa, G.P. Harrison, "Modified GA and data envelopment analysis for multistage distribution network expansion planning under uncertainty", IEEE Transactions on Power Systems, vol.26, no.2, pp.897-904, 2011.
- [28] E. Carrano, L. Soares, R. Takahashi, R. Saldanha and O. Neto, "Electric distribution network multiobjective design using a problem-specific genetic algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 2, pp. 995-1005, April 2006.
- سیستم (پست توزیع، فیدر و منابع تولید پراکنده) در کنار یکدیگر و به صورت همزمان با هدف بهبود تاب آوری پرداخته شود.
- ### مراجع
- [1] Y. Wang, C. Chen, J. Wang and R. Baldick, "Research on resilience of power systems under natural disasters-a review", IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 2, pp. 1604-1613, Mar. 2016
- [2] R. J. Campbell, "Weather-related power outages and electric system resiliency", Congressional Research Service, Library of Congress, 2012.
- [3] A. Khodaei, "Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1584-1591, July 2014.
- [4] M. Panteli and P. Mancarella, "Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: impacts and possible mitigation strategies", Electric Power Systems Research, vol. 127, pp. 259-270, Oct. 2015.
- [5] H. Gao, Y. Chen, Y. Xu, and C.-C. Liu, "Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2837-2848, Nov. 2016.
- [6] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, and D. Zhao, "Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 2, pp. 958-966, Mar. 2016.
- [7] A. Yazdanejadi, A. Hamidi, S. Golshannavaz, F. Aminifar, S. Teimourzadeh, "Impact of Inverter-based DERs Integration on Protection, Control, Operation, and Planning of Electrical Distribution Grids", The Electricity Journal, vol. 32, no. 6, pp. 43-56, 2019.
- [8] R. Nateghi, "Multi-Dimensional Infrastructure Resilience Modeling: An Application to Hurricane-Prone Electric Power Distribution Systems", vol. 9, no. 4, pp. 2918-2929, July 2018.
- [9] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziaargyriou, "Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, no. 6, pp. 2913 - 2922, Nov. 2016.
- [10] P. Bajpai, S. Chanda, K. Srivastava, "A Novel Metric to Quantify and Enable Resilient Distribution System using Graph Theory and Choquet Integral", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 9, no. 4, pp. 2918 - 2929, July 2018.
- [11] W. Yuan, J. Wang, F. Qiu, C. Chen, C. Kang and B. Zeng, "Robust Optimization-Based Resilient Distribution Network Planning Against Natural Disasters", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, no. 6, pp. 2817 - 2826, Nov. 2016.
- [12] S. Ma, B. Chen, Z. Wang, "Resilience Enhancement Strategy for Distribution Systems under Extreme Weather Events", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 9, no. 2, pp. 1442 - 1451, March 2018.
- [13] J. Kim, Y. Dvorkin, "Enhancing Distribution System Resilience with Mobile Energy Storage and Microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 5, pp. 4996-5006, Sept. 2019.
- [14] M. Bahramabadi, A. Abbaspour, M. Fotuhi, M. Aghtaie, "Resilience-based framework for switch placement problem in power distribution", IET Gener. Transm. Distrib. Vol. 12 no. 5, pp. 1223-1230, 2018.
- [15] B. Zhang, P. Dehghanian and M. Kezunovic, "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for