

انتخاب ترکیب بهینه منابع تولید پراکنده به منظور افزایش امنیت انرژی در سایت‌های دفاعی با رویکرد پدافند غیرعامل

رضا غفارپور^{۱*}، علیرضا جم^۲، علیمحمد رنجبر^۳

۱- مربی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۳- استاد، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۹۴/۰۲/۱۰، پذیرش: ۹۴/۰۸/۳۰)

چکیده

امنیت انرژی الکتریکی سایت‌های دفاعی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله حوادث طبیعی و حملات دشمن قرار دارد. از این رو، توجه به اصول پدافند غیرعامل به منظور طراحی و توسعه شبکه‌های الکتریکی در مراکز مهم دفاعی، امری حیاتی است. هدف این مطالعه، افزایش امنیت تأمین انرژی الکتریکی سایت‌های دفاعی از دیدگاه پدافند غیرعامل است. با توجه به حضور منابع تولید پراکنده و عدم قطعیت تولید توان آن‌ها، روش‌های متداول بررسی امنیت تأمین انرژی به طور مستقیم قابل اعمال نیستند. در این مقاله یک مدل سازی جدید برای تعیین ترکیب بهینه منابع انرژی ترکیبی (تعیین نوع، ظرفیت و محل نصب مناسب) در مراکز حساس تدوین شده است، به طوری که قیود فنی شبکه در کنار عدم قطعیت منابع انرژی و اولویت قطع بارهای حساس برآورده شوند. کفایت تأمین انرژی مصرف‌کنندگان با حل مجموعه‌ای از مسئله‌های پخش بار بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. الگوریتم ارائه شده به منظور حل مسئله مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری، کاهش سناریو و پخش بار بهینه، ارائه شده است. مدل ارائه شده در محیط نرم‌افزارهای MATLAB و GAMS حل شده است و ترکیب بهینه منابع انرژی برای افزایش امنیت انرژی سایت‌های دفاعی و کاهش میزان خاموشی بارهای حساس، در راستای تحقق اصول پدافند غیرعامل (متعددسازی، متنوع‌سازی و پراکنده‌سازی)، به دست آمده است. نتایج نهایی نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی در طراحی مناسب منابع انرژی ترکیبی و افزایش قابل توجه امنیت تأمین انرژی الکتریکی است.

کلید واژه‌ها: اصول پدافند غیرعامل، امنیت انرژی سایت‌های دفاعی، پخش بار بهینه اصلاح شده، الگوریتم رقابت استعماری.

Optimal Mix of Distributed Generation Allocation to Improve the Security of Energy Supply in Defensive Sites Using Principles of Passive Defence

R. Gaffarpour*, A. Jam, A. M. Ranjbar

Imam Hossein University

(Received: 30/04/2015; Accepted: 21/11/2015)

Abstract

Security of electrical energy supply in defensive sites is affected by different parameters like natural disasters and enemy attacks. So, attention to principles of passive defence for design and enhancement of electrical networks in defensive sites is critical. The objective of this study is to increase security of energy supply in defensive sites from the standpoint of passive defence. Due to the presence of DG units and the uncertainty of their power, common methods of security evaluation of energy supply are not applicable directly. For this propose, a new framework for optimal allocation of hybrid energy resources in these sites is presented so that networks technical constraints is satisfied beside energy resources uncertainty and sensitive loads priorities. Supply adequacy of consumers is evaluated by solving a set of optimal power flow equations. Finally, a comprehensive algorithm based on imperialist competitive algorithm, scenario reduction, and optimal power flow is proposed. The optimization problem is formulated as combination of a mixed integer nonlinear programming main problem and a set of nonlinear programming sub problems, taking into consideration the system constraints during all computational steps. The proposed model is presented in MATLAB and GAMS environments and optimal mix of energy resources is obtained to increase energy security of defensive sites and to reduce outage of critical loads, towards principles of passive defence (proliferation, diversification, and dispersion). Final results show the effectiveness of the proposed algorithm in optimal design of hybrid energy resources and remarkable improvement of energy supply security.

Keywords: Passive Defence, Energy Security, Optimal Power Flow, Renewable Energy, Imperialist Competitive Algorithm.

* Corresponding Author E-mail: Rghaffarpour@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

است. با قراردادن تلفات انرژی سالیانه سیستم توزیع به‌عنوان تابع هدف، روشی برای مکان‌یابی مناسب توربین‌های بادی برای به حداقل رساندن تابع هدف، ارائه شده است و مسئله در محیط نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی و حل شده است [۹].

در برخی مطالعات، ارزیابی کیفیت سیستم‌های توزیع شامل واحدهای تولید پراکنده بادی و طی مدهای مختلف عملکردی، با استفاده از دو روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تکنیک تحلیلی با در نظر گرفتن حالت جزیره‌ای برای ارزیابی قابلیت اطمینان، بررسی شده است [۱۰]. برای تخصیص بهینه DG در محل مناسب، یک تابع چندهدفه در نظر گرفته شده است و برای حل مسئله از یک روش ترکیبی تجمع ذرات بهبودیافته و شبیه‌سازی مونت‌کارلو^۲ استفاده شده است [۱۱]. شاخص انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار^۳ (EENS) پس از تقسیم شبکه مورد بررسی به هشت ناحیه مختلف، محاسبه شده است. نصب DG با هدف حداکثر نمودن سود این واحدها (به تعویق افتادن هزینه سرمایه‌گذاری، کاهش تلفات انرژی و بهبود قابلیت اطمینان) بررسی شده است [۱۲]. در این مقاله، عملکرد جزیره‌ای برای بهبود قابلیت اطمینان، زمانی مجاز شمرده شده است که توان تولیدی DG بیش‌تر از درصد مشخصی از بار باشد.

مدلی کامپیوتری با استفاده از مدل مارکوف، برای بیان توان خروجی یک مزرعه بادی در مطالعات قابلیت اطمینان ارائه شده است [۱۳]. مدل سری زمانی^۴ ARMA نیز برای پیش‌بینی سرعت باد مناطق مختلف استفاده شده است [۱۴] و مدلی مشترک برای مزارع بادی در مناطق مختلف به‌دست آمده است. رای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در حضور توربین‌های بادی، ابتدا شاخص‌های مورد بررسی برای مقادیر مختلف توان خروجی محاسبه شده و سپس، از مفهوم امید ریاضی برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه استفاده شده است [۱۵].

احداث DG در مجاورت سایت‌های حساس نظامی می‌تواند این مراکز را از خطر خاموشی در مواقع بحرانی نجات دهد. امکان تشکیل جزیره برنامه‌ریزی شده می‌تواند سطح قابلیت اطمینان مشترکان را بهبود دهد و از خاموشی مراکز حساس نظامی جلوگیری کند. بدین منظور، الگوریتمی برای بهره‌برداری از این منابع در شرایط بحرانی ارائه شده است [۲]. در برخی گزارشات [۱۱، ۱۶ و ۱۷]، عملکرد DG را به‌صورت متصل به شبکه و در گزارشات دیگر [۱۸] و [۱۹] به‌ترتیب به‌صورت پشتیبان آماده به‌کار و دارای عملکرد مستقل از شبکه در نظر گرفته‌اند. در اکثر مطالعات انجام‌شده، به‌منظور ارزیابی تأثیر DG

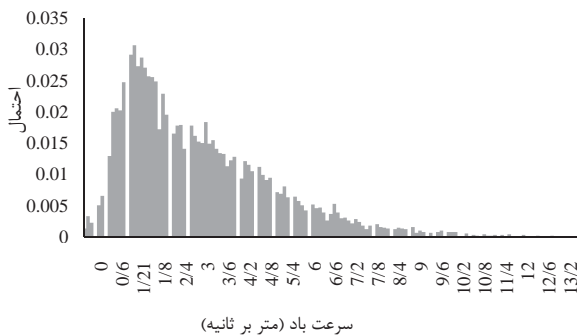
پدافند غیرعامل به کلیه اقدامات و تدابیری گفته می‌شود که موجب افزایش پایداری، تداوم فعالیت‌های ضروری کشور، کاهش آسیب‌پذیری، افزایش هزینه‌های دشمن و تسهیل مدیریت بحران در برابر تهدیدات دشمن و اقدامات نظامی دشمن می‌گردد و به‌کارگیری آن‌ها مستلزم استفاده از سلاح نیست [۱]. چنانچه اصول مربوط به پدافند غیرعامل در احداث و یا تقویت سیستم‌های تأمین انرژی سایت‌های دفاعی رعایت نشود، حملات دشمن می‌تواند منجر به خسارت‌های جبران‌ناپذیر و از کارافتادن این مراکز شود. از جمله نکات مهم در کاهش آسیب‌پذیری تأمین انرژی الکتریکی، توجه به اصول و قواعد پدافند غیرعامل از جمله کوچک سازی، متعددسازی، متنوع سازی و پراکنده سازی است. در این راستا، استفاده از واحدهای تولید پراکنده^۱ (DG) و به‌کارگیری منابع انرژی اولیه متنوع برای تولید انرژی الکتریکی، راهگشا است. تخصیص بهینه منابع انرژی با هدف تعیین نوع، ظرفیت و محل نصب مناسب این منابع و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی منابع و مصرف‌کنندگان و به‌منظور تأمین اهداف مشخص انجام می‌شود.

امکان بهره‌گیری از واحدهای تولید توان الکتریکی به‌ویژه واحدهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌صورت تولید پراکنده باعث می‌شود تا بتوان از این منابع برای برقرسانی به‌صورت متصل و جدا از شبکه، استفاده نمود [۲-۴]. این موضوع باعث می‌شود تا از نقطه نظر پدافند غیرعامل، علاوه بر کاهش میزان آسیب‌های وارده به واحدهای تولید توان الکتریکی در مقایسه با واحدهای متمرکز، در مواقع بروز بحران در مناطق حساس و استراتژیک بتوان از انرژی‌های تجدیدپذیر، بدون نیاز به اتصال به شبکه گاز یا برق، برای تأمین برق مورد نیاز بهره برد و بدین ترتیب با تمرکززدایی و متنوع‌سازی منابع تأمین انرژی، امنیت این مناطق و تاسیسات را افزایش داد.

روش‌های مختلفی برای تخصیص بهینه واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های الکتریکی وجود دارد و تحقیقات گوناگون با اهداف مختلف از قبیل بهبود قابلیت اطمینان سیستم، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش تلفات شبکه و غیره صورت گرفته است. در برخی گزارشات، هدف از مکان‌یابی DG، مینیم‌نمودن تلفات شبکه در بازه زمانی مورد مطالعه است [۹-۵]. برای حل مسئله کاهش تلفات شبکه، عدم قطعیت بار، ضریب نفوذهای مختلف DG و امکان تأمین توان راکتیو توسط DG را برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده و از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است [۷]. ورودی‌های شبکه عصبی شامل بار باس‌های PQ، کل ظرفیت DG نصب‌شده و ضریب توان DGها

^۲ Monte Carlo Simulation^۳ Expected Energy Not Supplied^۴ AutoRegressive Moving Average^۱ Distributed Generation

استفاده از توان خروجی توربین بادی در مسئله‌های مربوط به برنامه‌ریزی شبکه قدرت، نیاز است تا به صورت یک مدل چندحالتی وارد مسئله شوند. بدین منظور، داده‌های به دست آمده برای سرعت باد به دسته‌های مختلف (حالت) تقسیم‌بندی می‌شود و هر حالت نشان‌دهنده بازه مشخصی از سرعت باد است. تعداد مناسب حالت‌ها با در نظر گرفتن همزمان دقت مورد نیاز و ابعاد مسئله، در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱) نشان‌دهنده تابع احتمال سرعت باد در منطقه مورد بررسی است که به بازه‌هایی با گام ۰/۱ متر بر ثانیه تقسیم شده است.

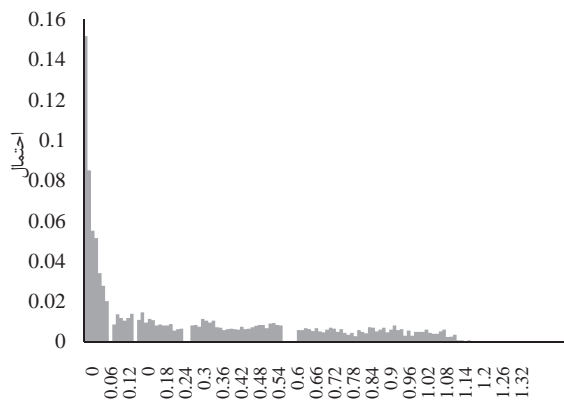


سرعت باد (متر بر ثانیه)

شکل ۱. تابع چگالی احتمال سرعت باد [۲۲]

۲-۲. مدل‌سازی عدم قطعیت تابش خورشید

با توجه به ماهیت تصادفی تابش خورشید، در اینجا نیز مشابه مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد، از روی اطلاعات نمونه‌گیری شده ۳ ساله، مشخصه تابش خورشید به صورت یک مدل احتمالاتی چندحالتی وارد مسئله برنامه‌ریزی نمود. شکل (۲) نشان‌دهنده تابع احتمال تابش خورشید در منطقه مورد بررسی است که به بازه‌هایی با گام ۰/۰۱ کیلووات بر مترمربع تقسیم شده است.



تابش خورشید (کیلووات بر متر مربع)

شکل ۲. تابع چگالی احتمال تابش خورشید [۲۲]

بر شبکه از روش‌های تحلیلی استفاده شده است و DG تنها زمانی می‌تواند به صورت جزیره‌ای عمل کند که توان آن بزرگ‌تر از درصدی از توان بار باشد [۳، ۱۷ و ۲۰]. برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است [۱۰، ۱۱ و ۲۱]. در این روش‌ها برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه، قیود فنی مربوط به ولتاژ و توان عبوری خطوط در نظر گرفته نمی‌شود.

بررسی مطالب انجام‌شده نشان می‌دهد که در اکثر آن‌ها، برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه در حضور منابع تولید پراکنده، قیود فنی شبکه لحاظ نشده است در حالی که وقوع یک پیشامد در شبکه و وقوع اضافه بار یا خارج شدن ولتاژ از محدوده مجاز نیز می‌تواند منجر به قطعی شود. هدف این مطالعه، کاهش آسیب‌پذیری تأمین انرژی سایت‌های دفاعی و بررسی تأثیر نصب منابع انرژی ترکیبی بر روی امنیت تأمین انرژی الکتریکی این مراکز با در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تولیدی این منابع، در کنار اولویت بارهای حساس است. الگوریتم پیشنهادی، با لحاظ نمودن این قیود، ارزیابی دقیقی از کیفیت تأمین انرژی سایت‌های دفاعی، با محاسبه مجموعه‌ای از مسئله‌های پخش بار بهینه اصلاح‌شده^۱، ارائه داده است. از طرفی، مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید، با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع موجود، توسط درخت سناریو^۲ مناسب مدل شده است. در بخش ۲۰، مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید با مدل‌سازی عدم قطعیت این منابع، ارائه شده است. در بخش ۳۰، فرمول‌بندی مناسب برای محاسبه توان سیستم‌های بادی و خورشیدی بررسی شده است. بخش ۴۰، مدل پیشنهادی شامل تابع هدف و قیود کامل مسئله و الگوریتم حل مسئله را به صورت دقیق نشان داده است. بخش‌های ۵ و ۶ ارائه‌دهنده نتایج نهایی و نتیجه‌گیری مسئله هستند.

۲. مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید

هدف این بخش این است که از روی اطلاعات ۳ ساله مربوط به سایت مورد بررسی که به صورت ۱۵ دقیقه‌ای نمونه‌گیری شده است [۲۲]، مشخصه سالیانه برای سرعت باد و تابش خورشید ارائه شود.

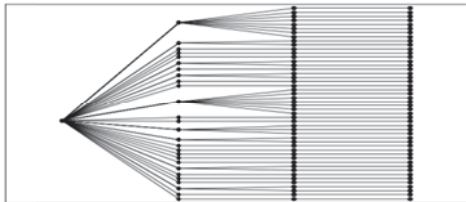
۲-۱. مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد

از آنجاکه توان خروجی توربین بادی علاوه بر مقادیر مشخصه توربین به سرعت باد نیز بستگی دارد، نیاز است تا عدم قطعیت سرعت باد در ناحیه مورد نظر به خوبی مدل شود تا بتوان تأثیر توان خروجی توربین بر روی شبکه را بررسی نمود. برای

^۱ پارامترهای مورد نیاز مسئله به معادلات پخش بار بهینه اضافه شده است.

^۲ Scenario Tree

درصد کاهش سناریو از پارامترها تأثیرگذار بر زمان محاسبات است که با توجه به تعداد بالای سناریوها و زمان بر بودن انجام محاسبات و با در نظرگیری همزمان دقت و زمان محاسبات، درصد کاهش سناریو ۱۰٪ برای حل مسئله انتخاب شده است. تعداد سناریوهای کاهش یافته برابر ۴۸ عدد است و شکل (۴) درخت سناریو کاهش یافته را نشان داده است.



شکل ۴. درخت سناریوی کاهش یافته شامل ۴۸ سناریو

۳. محاسبه توان سیستم‌های تامین انرژی

توان خروجی منابع مورد بررسی به شدت به شرایط آب و هوایی مانند سرعت باد، تابش آفتاب، دمای محیط و غیره وابسته است، بنابراین استفاده از مدلی مناسب برای تعیین توان خروجی آنها اولین قدم برای توسعه این منابع است.

۳-۱. توان تولیدی توربین بادی

رابطه بین توان خروجی توربین بادی و سرعت باد در یک منطقه مشخص با استفاده از پارامترهای فنی توربین که توسط کارخانه سازنده ارائه می‌شود، تعیین می‌شود. توان خروجی توربین بر حسب درصدی از توان نامی آن با استفاده از رابطه زیر مشخص می‌شود [۲۴]:

$$D(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq V_{ci} \\ (A + B \times v + C \times v^2) & V_{ci} \leq v \leq V_r \\ 1 & V_r \leq v \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq v \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} [V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4(V_{ci} \times V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right)^3] \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} [4(V_{ci} \times V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right)^3 - (3V_{ci} + V_r)] \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} [2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right)^3] \quad (5)$$

$$P_{WT}(v) = P_r \cdot D(v) \quad (6)$$

به دلیل تأثیر توان تزریقی واحدهای تولید پراکنده بر تأمین بار شبکه، انتخاب نوع مناسب توربین بادی با توجه به شرایط منطقه نصب آن، ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه از ۳ توربین بادی مختلف با ظرفیت‌ها و پارامترهای متفاوت طبق جدول ۱ (۱) استفاده شده است [۲۵].

۳-۲. تعیین مدل ترکیبی سرعت باد - تابش

خورشید

۳-۱-۳. کاهش سناریو در فرآیندهای تصادفی

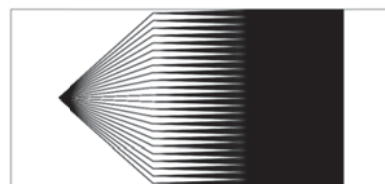
برای فرمول‌بندی و حل مسائل دارای عدم قطعیت، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی تصادفی، متغیر تصادفی توسط تعداد محدودی از سناریوها تعریف می‌شود. برای مثال «متغیر تصادفی λ توسط $\lambda(\omega)$ ، $\omega = 1, \dots, N_\Omega$ تعریف می‌شود که ω اندیس سناریوها و N_Ω تعداد کل سناریوها و Ω مجموعه سناریوها است. هر متغیر تصادفی $\lambda(\omega)$ در سناریو ω دارای احتمال $\pi(\omega)$ است که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$\pi(\omega) = P(\omega / \lambda = \lambda(\omega)), \quad \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) = 1. \quad (1)$$

برای بیان یک فرآیند تصادفی با دقت مناسب نیاز است که تعداد کافی از سناریوها تولید شود به طوری که این سناریوها رفتار واقعی فرآیند را با دقت مناسب بیان کند. روش‌های کاهش سناریو به دنبال این هستند که ابعاد سناریوها را تا حد امکان کم کنند به طوری که اطلاعات تصادفی موجود در سناریوهای اولیه تا حد امکان دست‌نخورده باقی بماند. در این مطالعه از روش انتخاب پیش‌رو^۱ برای کاهش سناریو استفاده شده است [۲۳].

۳-۲-۲. مدل نهایی سرعت باد-تابش خورشید

پس از به دست آوردن تابع چگالی احتمال سرعت باد و تابش خورشید در منطقه مورد بررسی، برای تعیین مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید، نیاز به تشکیل درخت سناریو است. تعداد سناریوهای به دست آمده برابر $N_w \cdot N_s$ است که N_w تعداد حالت‌های سرعت باد و N_s تعداد حالت‌های تابش خورشید را مشخص می‌کند. شکل (۳) درخت سناریوی تشکیل شده برای مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید را نشان می‌دهد. در این درخت، سطح صفر یک سطح ساختگی است و سطوح ۱ تا ۳ به ترتیب نشان‌دهنده سرعت باد، تابش خورشید و دمای محیط هستند. تعداد سناریوهای تشکیل شده با توجه به گام‌های انتخاب شده برابر ۷۹۵۴ است.



شکل ۳. درخت سناریو مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید

^۱ Forward Selection

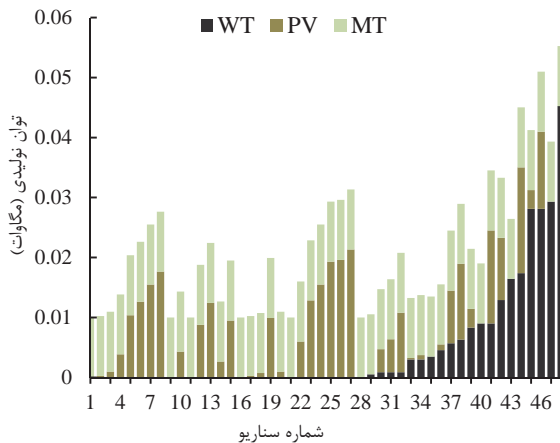
جدول ۱. پارامترهای فنی توربین‌های بادی

WT3	WT2	WT1	
۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	(KW) P_{r_n}
۳/۳۳۳	۳/۳۳۳	۲/۷۸۸	(m/s) V_{ci}
۸/۳۳۳	۱۱/۱۱	۱۲/۵	(m/s) V_r
۱۵/۲۸	۲۲/۲۲	۱۹/۴۴	(m/s) V_{co}

جدول ۳. توان تولیدی میکروتوربین‌ها

MT3	MT2	MT1	
۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	(KW) P_{r_n}

شکل (۵) توان تولیدی منابع انرژی مختلف را طی سناریوهای مختلف و به صورت تفکیک شده نشان می‌دهد.



شکل ۵. توان تولیدی منابع انرژی به صورت تفکیک شده

۴. مدل پیشنهادی و الگوریتم حل مسئله

یکی از مهمترین اصول پدافند غیرعامل و آمایش دفاعی، اصل مکان‌یابی بهینه برای فعالیت‌ها و مراکز مختلف است. تولیدات پراکنده می‌توانند با قرارگیری در محل مناسب امنیت شبکه را بهبود بخشند درحالیکه تخصیص نامناسب این واحدها در شبکه توزیع اثرات منفی بر روی ولتاژ، توان عبوری فیدهای توزیع و جهت شارش توان به دنبال خواهد داشت. عدم قطعیت موجود در سرعت باد و تابش خورشید نیز می‌تواند باعث ایجاد مشکل در تعادل توان بین تولید و تقاضا در شرایط مختلف شود. در این بخش، روشی جدید (مبتنی بر معادلات پخش بار بهینه اصلاح شده) برای اختصاص ترکیب بهینه توربین‌های بادی، ماژول‌های فتوولتائیک و میکروتوربین‌ها در سایت‌های دفاعی، به منظور تامین انرژی امن در این سایت‌ها ارائه شده است.

۴-۱. تابع هدف

نصب DG در شبکه توزیع از طریق تأمین بار یک ناحیه جزیره شده تا زمان بازیابی شبکه، می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. در این مسئله، در صورتی که یک حادثه مشخص باعث بروز اشکال در سیستم شود، برای برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید، کاهش نقض قیود و مینیمم نمودن بار قطع شده، از پخش بار بهینه استفاده شده است و حل مسئله، مقادیر قطع بار در باس‌ها را نشان می‌دهد

۳-۲. توان تولیدی ماژول فتوولتائیک

کاتالوگ کارخانه‌های سازنده، مشخصه و اطلاعات ماژول‌های فتوولتائیک مانند I_{SC} و V_{OC} را در شرایط استاندارد مشخص می‌کند. جریان اتصال کوتاه به طور مستقیم به تابش خورشید و ولتاژ مدار باز به طور معکوس به دمای محیط وابسته است. توان خروجی یک ماژول فتوولتائیک شامل n_M سلول، در شرایط دما و تابش مشخص از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$P_M^s = n_M \times FF \times V_{OC}^s \times I_{SC}^s \quad (7)$$

$$T^s = T^A + G^s \times \left(\frac{N_{OT} - 20}{0.8} \right) \quad (8)$$

$$I_{SC}^s = G^s \cdot [I_{SC} + K_i \cdot (T^s - 25)] \quad (9)$$

$$V_{SC}^s = V_{OC} - K_v \cdot T^s \quad (10)$$

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (11)$$

به منظور بررسی تأثیر توان تزریقی ماژول‌های مختلف بر امنیت انرژی شبکه، انتخاب نوع مناسب ماژول‌های فتوولتائیک با در نظر گرفتن شرایط منطقه، صورت می‌گیرد. در این مطالعه از ۳ نوع ماژول فتوولتائیک با توان نامی و پارامترهای متفاوت طبق جدول ۲ (۲) استفاده شده است [۲۷].

۳-۳. میکروتوربین

در این مطالعه در کنار واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر با توان تولیدی دارای عدم قطعیت، از میکروتوربین‌ها به صورت توان ثابت و دارای توان نامی ۱/۵ و ۱۰/۵ مگاوات طبق جدول ۳ (۳) استفاده می‌شود.

جدول ۲. پارامترهای فنی ماژول‌های فتوولتائیک

PV3	PV2	PV1	
۷۵	۶۰	۵۰	(W) P_{r_n}
۲۱/۹۸	۲۱/۱	۵۵/۵	(V) V_{OC}
۵/۳۲	۳/۸	۱/۸	(A) I_{SC}
۱۷/۳۲	۱۷/۱	۳۸	(V) V_{MPP}
۴/۷۶	۳/۵	۱/۳۲	(A) I_{MPP}
۱۴/۴	۷۵	۱۹۴	(mV/°C) K_v
۱/۲۲	۳/۱	۱/۴	(mA/°C) K_i
۴۳	۴۳	۴۳	(°C) N_{OT}

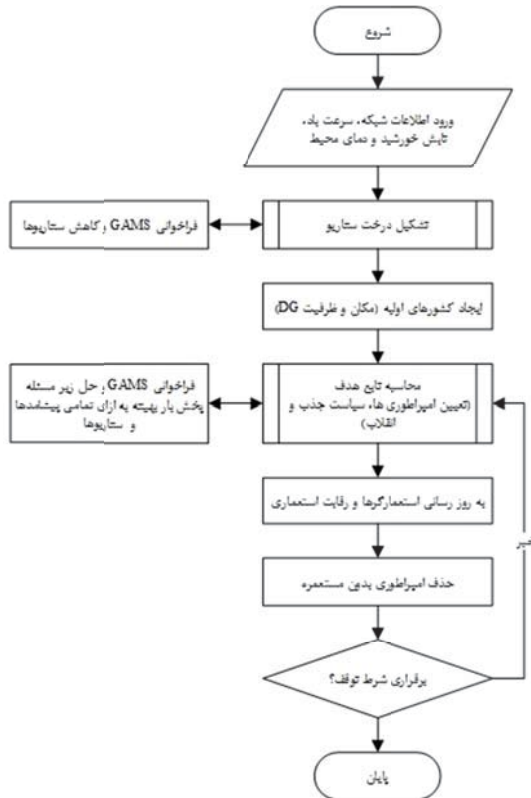
▪ ظرفیت نصب شده منابع انرژی

$$\begin{aligned} P_{WTG_{i,w}}^s &= N_{i,w} \cdot P_{r_w} \cdot D^s, \quad \forall s, i, w \\ P_{PV_{i,p}}^s &= N_{i,p} \cdot P_{M_p}^s, \quad \forall s, i, p \\ P_{MT_{i,m}} &= N_{i,m} \cdot P_{r_m}, \quad \forall i, m \end{aligned} \quad (۲)$$

۳-۴. الگوریتم پیشنهادی

محاسبات اصلی در الگوریتم پیشنهادی توسط الگوریتم رقابت استعماری (ICA) [۳۰] و در محیط MATLAB انجام می شود. الگوریتم رقابت استعماری از یک پدیده اجتماعی- انسانی الهام گرفته است. همانند سایر روش های بهینه سازی تکاملی، این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه شروع می شود. هر عنصر جمعیت یک کشور نامیده می شود و کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می شوند. سیاست جذب، انقلاب و رقابت استعماری هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می دهند و کشورها را به سمت مینیمم مطلق تابع حرکت می دهد. به منظور محاسبه شاخص قابلیت اطمینان، نرم افزار GAMS [۳۱] فراخوانی می شود و طی این فراخوانی، یک مجموعه مسئله NLP^۱ جداگانه حل می شود.

فلوچارت (۶) حل مسئله را مشخص می کند.



شکل ۶. فلوچارت پیشنهادی حل مسئله

[۲۸ و ۲۹]. تابع هدف مسئله بهینه سازی به صورت زیر بیان می شود:

$$EENS = \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_{l,c} \cdot [\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \rho_{s,i} \cdot C_{s,i}(l,c)] \cdot 8760 \quad (۱۲)$$

۲-۴. قیدهای مسئله

▪ معادلات پخش بار

$$P_{G_{s,i}} + \sum_{w \in \mathcal{W}} P_{WTG_{i,w}}^s + \sum_{p \in \mathcal{P}} P_{PV_{i,p}}^s + \sum_{m \in \mathcal{M}} P_{MT_{i,m}} - P_{D_i} \quad (۱۳)$$

$$= \sum_{i \in \mathcal{I}} V_{s,i} V_{s,j} Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{s,j} - \delta_{s,i}), \quad \forall i, s$$

$$Q_{G_{s,i}} - Q_{D_i} = - \sum_{j \in \mathcal{I}} V_{s,i} V_{s,j} Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{s,j} - \delta_{s,i}), \quad \forall i, s \quad (۱۴)$$

▪ زیر مسئله محاسبه بار قطع شده در هر پیشامد

مدل ارائه شده برای محاسبه EENS، بار قطع شده سیستم را در شرایطی حداقل می کند که قیود معادلات پخش بار، توان عبوری خطوط، ولتاژ باس ها و محدودیت های توان تولیدی ژنراتورها برقرار شوند. در این معادلات، $G(V, \delta)$ مجموعه قیود مساوی شامل پخش بار و $H(V, \delta)$ مجموعه قیود نامساوی شامل محدودیت بار قطع شده، محدودیت توان عبوری خطوط و محدودیت ولتاژ باس ها است و به صورت یک مجموعه مسئله برنامه ریزی غیر خطی بیان می شود.

$$C = \text{Minimize} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \rho_{s,i} (LP_i \cdot C_{s,i} + E_{s,i}) \quad (۱۵)$$

s.t.

$$G(V, \delta) = 0$$

$$H(V, \delta) \leq 0$$

▪ ولتاژ باس اسلک

$$V_{s,slack} = V_0, \quad \forall s \quad (۱۶)$$

$$\delta_{s,slack} = 0, \quad \forall s$$

▪ ولتاژ سایر باس ها

$$V_{min} \leq V_{s,i} \leq V_{max}, \quad \forall s, i \notin slack \quad (۱۷)$$

▪ توان عبوری خطوط

$$0 \leq S_{ij}^s \leq S_{ij,max}, \quad \forall s, i, j \quad (۱۸)$$

▪ نفوذ منابع انرژی در هر باس

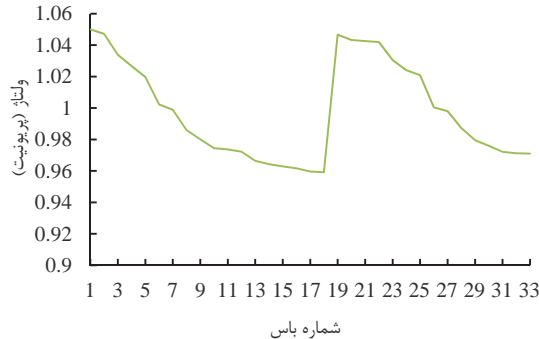
$$\sum_{w \in \mathcal{W}} N_{i,w} \cdot P_{r_w} + \sum_{p \in \mathcal{P}} N_{i,p} \cdot n_{M_p} \cdot P_{r_p} + \sum_{m \in \mathcal{M}} N_{i,m} \cdot P_{r_m} \leq P_{max}, \quad \forall i \in \mathcal{C}_I \quad (۱۹)$$

▪ نفوذ منابع انرژی در کل شبکه

$$\sum_{i \in \mathcal{C}_I} [\sum_{w \in \mathcal{W}} CF_w \cdot P_{WTG_{i,w}} + \sum_{p \in \mathcal{P}} CF_p \cdot P_{PV_{i,p}} + \sum_{m \in \mathcal{M}} CF_m \cdot P_{MT_{i,m}}] \leq x \cdot \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{D_i} \quad (۲۰)$$

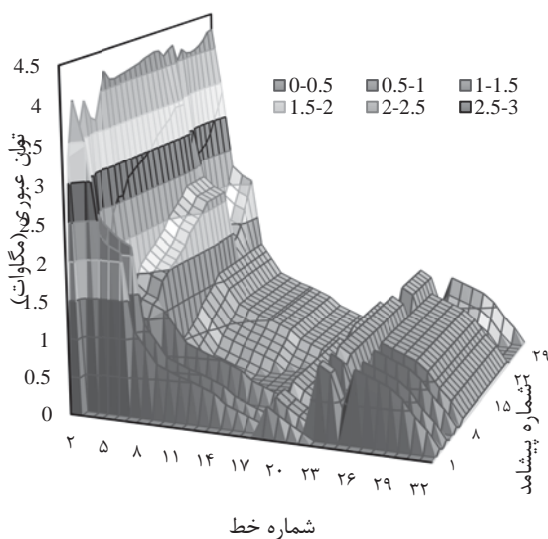
¹ Non Linear Programming

انتظار شبکه را قبل از نصب DG نشان می‌دهد. حداقل ولتاژ برابر 0.9591 p.u است که در باس ۱۸ رخ داده است.



شکل ۸. پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه (حالت پایه)

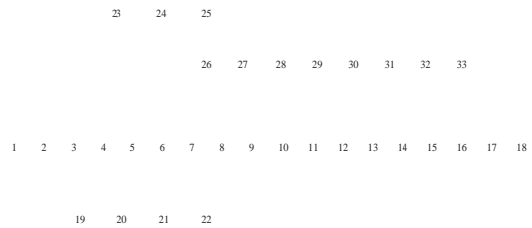
به منظور بررسی دقیق تاثیر منابع تولید پراکنده بر EENS، نیاز است محدودیت‌های فیدرها طی محاسبات شبکه در نظر گرفته شوند زیرا در برخی پیشامدها، علی‌رغم این‌که DG می‌تواند توانی بیش از حد حرارتی فیدرها تولید کند (بدون ایجاد مشکل مربوط به حدود ولتاژ)، خطوط و کابل‌ها تحت تأثیر حدود حرارتی قرار می‌گیرند. شکل (۹) توان مورد انتظار عبوری از خطوط شبکه را طی هر پیشامد مشخص می‌کند. نصب DG در شبکه لزوماً موجب کاهش بارگذاری خطوط در تمام پیشامدها نمی‌شود بلکه با تغییر جهت عبور توان می‌تواند منجر به افزایش بارگذاری در خطوط نزدیک خود شود، هر چند وجود قیود خطوط طی محاسبات EENS مانع از عبور این توان از حد مجاز می‌شود.



شکل ۹. توان عبوری خطوط طی هر پیشامد (حالت پایه)

۵. شبیه‌سازی و بررسی نتایج

سیستم تحت مطالعه یک سیستم توزیع شعاعی ۳۳ باسه و استاندارد IEEE است و اطلاعات مربوط به شبکه مورد مطالعه در جدول (۶) ارائه شده است. سایر اطلاعات فنی در دیگر گزارشات ارائه شده است [۲۹، ۳۴-۳۲]. شکل (۷)، دیاگرام تک‌خطی این شبکه را نشان می‌دهد. کل شبکه به‌عنوان سیستمی در نظر گرفته شده است که اولویت قطع بار در نقاط مختلف آن متفاوت است و مراکز نظامی بخشی از آن را شامل می‌شود. از آنجا که مراکز نظامی بسیار حساس هستند، این مراکز دارای کم‌ترین اولویت (اولویت ۳) فرض شده‌اند که به معنی حساسیت بالای آن‌ها است. سطح ولتاژ پست اصلی برابر $12/66$ کیلوولت و توان نامی آن 100 مگاوات‌آمپر است. در این مسئله، مجموعه $C_x = \{10, 14, 24, 29, 32\}$ به‌عنوان مجموعه باس‌های کاندیدا برای نصب DG انتخاب شده‌اند [۲۹ و ۳۵] و ظرفیت نفوذ DG در این شبکه طبق [۱۱ و ۳۶] انتخاب شده‌اند.



شکل ۷. دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۳ باسه IEEE

اولویت قطع بارهای موجود در شبکه طبق جدول ۴ (۴) فرض شده است.

جدول ۴. اولویت قطع بارهای شبکه

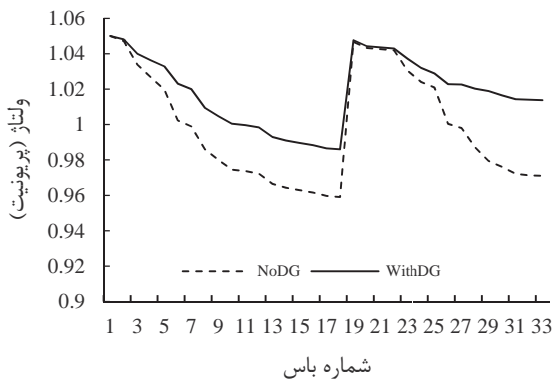
اولویت	شماره باس
۱	۳، ۴، ۹، ۱۱، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۶، ۲۳، ۲۶، ۲۷
۲	۲، ۵، ۷، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۵، ۲۸، ۳۹، ۳۰، ۳۲، ۳۳
۳	۶، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۲۰، ۳۲، ۲۴، ۳۱

۵-۱. حالت پایه (پیش از نصب منابع انرژی)

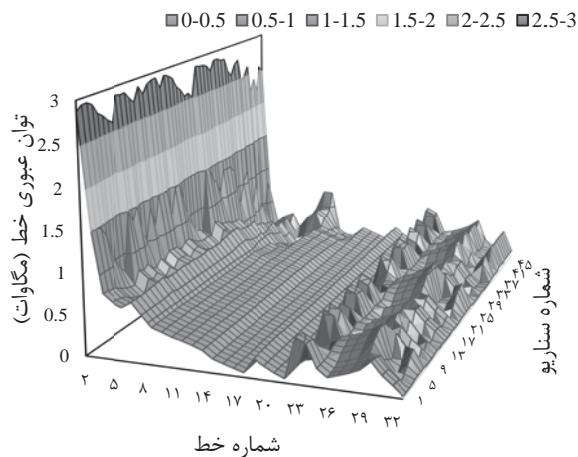
به منظور بررسی اولیه شبکه و دستیابی به میزان بهبود ایجادشده پس از نصب منابع انرژی ترکیبی، نیاز است تا شبکه در حالت پایه مورد ارزیابی قرار بگیرد. مجموع بار اکتیو و راکتیو این شبکه به ترتیب $3/72$ مگاوات و $2/3$ مگاوار، توان تلف‌شده در این شبکه 0.1884 مگاوات و انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار $54/969$ مگاوات‌ساعت است. شکل (۸) پروفیل ولتاژ مورد

۲-۵. تخصیص بهینه منابع انرژی ترکیبی

نصب DG در سیستم و تأمین توان در نزدیک بارها می تواند باعث کاهش توان عبوری برخی خطوط یا به عبارتی آزادسازی ظرفیت خطوط شود، هرچند امکان افزایش توان عبوری خطوط به ویژه خطوط نزدیک به محل نصب DG نیز وجود دارد. کاهش بارگذاری خطوط از طریق افزایش طول عمر تجهیزات نیز می تواند منجر به افزایش امنیت تأمین انرژی شود. شکل (۱۱) توان عبوری خطوط شبکه در حضور ترکیب بهینه منابع انرژی و برای سناریوهای مختلف را نشان می دهد.



شکل ۱۰. پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه (ترکیب بهینه منابع انرژی)



شکل ۱۱. توان عبوری خطوط طی هر سناریو (ترکیب بهینه منابع انرژی)

میزان آزادسازی ظرفیت خطوط برای سناریوهای مختلف، متفاوت است و همان طور که در شکل (۱۲) مشخص است، بیشترین آزادسازی ظرفیت مربوط به خط ۲۴ و به میزان ۹۹/۴٪ است که طی سناریو ۲۳ رخ داده است. به همین ترتیب، بیشترین افزایش توان عبوری در خط ۳۲ و به میزان ۲۵/۷٪ است که برای سناریو ۴۷ رخ داده است. طبق این شکل، بیشترین میزان تغییرات در توان عبوری خطوط (کاهش یا افزایش بارگذاری) مربوط به خطوط اطراف باس های کانیددا است.

انرژی یک ورودی حیاتی و ضروری در تمام فعالیت های نظامی است. منابع مطمئن انرژی به منظور سوخت رسانی به وسایل نقلیه نظامی و تولید انرژی برای مراکز مهم دفاعی مورد نیاز است و باید اطمینان حاصل شود که منابع انرژی ما مطمئن و به طور مداوم در دسترس خواهند بود. استراتژی مربوط به انرژی در مراکز دفاعی شامل اقداماتی با سه موضوع بهبود کارایی دارایی ها و تجهیزات موجود، ارائه زیرساخت ها و تجهیزات جدید و کارآمد و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزین است [۳۷].

پارامترهای فنی منابع انرژی در کنار ساختار شبکه، از مولفه های تأثیرگذار در طراحی و انتخاب ترکیب مناسب این منابع است. با توجه به اهمیت تأمین انرژی در مراکز دفاعی، در این بخش تخصیص بهینه منابع انرژی ترکیبی با هدف کاهش EENS به عنوان یکی از مولفه های ارزیابی امنیت انرژی صورت گرفته است. طبق جدول ۵ (۵)، نتایج نشان دهنده بهبود قابل توجه قابلیت اطمینان شبکه پس از تخصیص بهینه این منابع است. به علت تعداد زیاد سناریوهای به دست آمده (۴۸ سناریو)، امکان تشریح تمام سناریوها وجود ندارد و در بررسی نتایج سعی شده است سناریوهایی مورد بررسی قرار گیرند که بیشترین میزان بهبود در نتایج را ایجاد می کنند. تمامی سناریوها به صورت مشابه قابل تحلیل هستند.

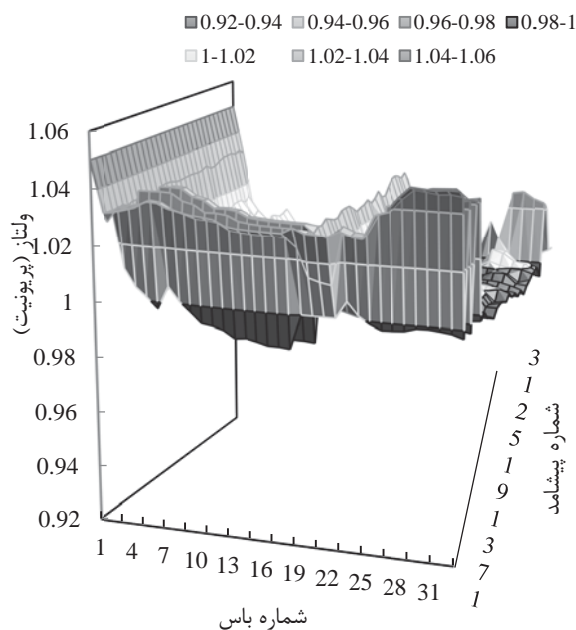
جدول ۵. ترکیب بهینه منابع انرژی

منبع انرژی	نوع	توان (مگاوات)	محل نصب	EENS (مگاوات ساعت)	
پایه	-	-	-	۵۴/۹۶۹	
ترکیب بهینه منابع انرژی	توربین بادی	WT1	۱۴	۱/۵	
		WT3	۱۰	۲	
		WT3	۳۲	۲	
	ماژول فتوولتائیک	PV1	۳۲	۰/۹۸	۲۷/۵۸۰
		PV2	۲۹	۰/۰۱۲	
		PV3	۲۴	۱/۳۵	
میکروتوربین	MT1	۲۹	۱		

شکل (۱۰) پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه را با در نظر گرفتن طراحی بهینه منابع انرژی در مقایسه با حالت پایه نشان می دهد. حداقل ولتاژ شبکه قبل از نصب DGها برابر 0.959 p.u. بوده است که در باس ۱۸ رخ داده است. با نصب DG، حداقل ولتاژ به 0.986 p.u. افزایش پیدا کرده است که مربوط به باس ۱۸ است. بهبود پروفیل ولتاژ در این مسئله یکی از اثرات جانبی نصب منابع انرژی است.

شکل (۱۴) بیانگر دقت محاسبات مسئله است به طوری که در این مسئله، قطع بار نه تنها به دلیل جداماندن یک باس پس از خرابی چند خط، بلکه به دلیل اضافه بار خطوط یا خارج شدن ولتاژ از محدوده پس از یک پیشامد خرابی ارزیابی شده است.

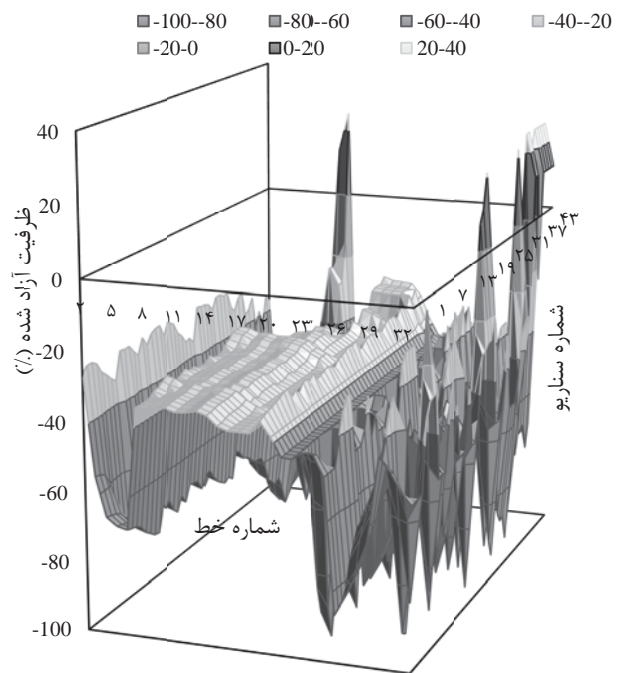
شکل (۱۵) تلفات توان شبکه، توان تزریقی منبع اصلی (باس ۱)، مجموع بار قطع شده و مجموع توان تولیدی مازاد منابع انرژی را برای هر یک از سناریوها مشخص می‌کند. تلفات شبکه بدون نصب DG برابر ۰/۱۸۸۴ مگاوات است در حالی که بیشترین کاهش تلفات مربوط به سناریو ۳۹ و برابر ۰/۰۸۱ مگاوات است.



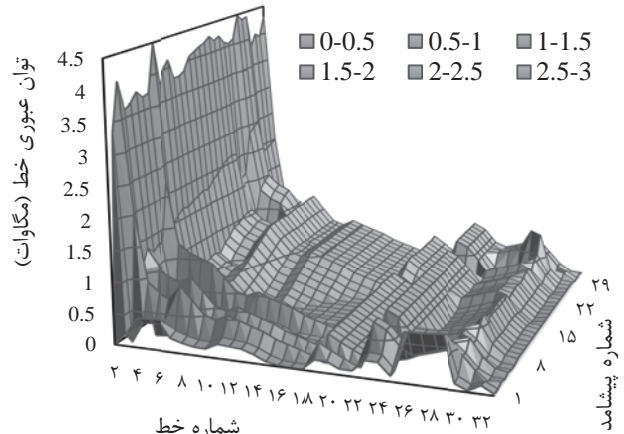
شکل ۱۴. پروفیل ولتاژ شبکه طی هر پیشامد (ترکیب بهینه منابع انرژی)

در این سناریو، DGها توان‌های ۰/۰۰۳۹، ۰/۰۰۵۵، ۰/۰۰۱۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ مگاوات را به ترتیب در باس‌های ۱۰، ۱۴، ۲۴، ۲۹ و ۳۲ تولید می‌کنند. تزریق توان توسط DGها باعث کاهش میزان توان تزریقی توسط منبع اصلی شبکه می‌شود. طبق این شکل، کمترین میزان توان تولیدی باس اسلک مربوط به سناریو ۴۱ و برابر ۰/۳۵ مگاوات است. همچنین طی سناریو ۴۸، منابع انرژی حداکثر توان خود را تولید می‌کنند و ۱/۴۹ مگاوات توان توسط باس اسلک جذب می‌شود. وقتی تجهیزاتی از مدار خارج می‌شود، ممکن است باعث قطع تغذیه برخی بارها از منبع اصلی شود. نصب DG در شبکه امکان تغذیه بخشی از سیستم را که در معرض خطا نیستند ولی به واسطه خطا از شبکه جدا شده‌اند را فراهم می‌کند. کمترین میزان بار قطع شده مربوط به سناریو

شکل (۱۳) توان عبوری مورد انتظار خطوط شبکه طی هر پیشامد را مشخص می‌کند. فرمول‌بندی دقیق مسئله و در نظر گرفتن قیود فنی در تمامی مراحل محاسبات موجب شده است تا در هیچ یک از پیشامدها، توان عبوری از حد مجاز خارج نشود. شکل (۱۴) نمودار مشابهی را برای پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه طی هر پیشامد نشان می‌دهد. طبق این شکل، ولتاژ باس‌ها در تمامی پیشامدها در محدوده مجاز قرار گرفته است.



شکل ۱۲. ظرفیت آزاد شده خطوط (ترکیب بهینه منابع انرژی)



شکل ۱۳. توان عبوری خطوط طی هر پیشامد^۱ (ترکیب بهینه منابع انرژی)

۱- هر پیشامد بیانگر خروج یکی از خطوط است. شماره خط و پیشامد با هم یکسان و برابر عدد بزرگ‌تر در دو سر خط است.

۶. نتیجه گیری

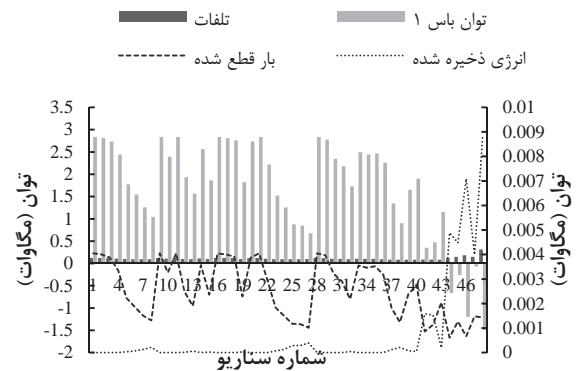
در این مطالعه، ترکیب بهینه منابع انرژی برای افزایش امنیت انرژی سایت های دفاعی و کاهش میزان خاموشی بارهای حساس، در راستای تحقق اصول پدافند غیرعامل به دست آمده است. حضور منابع تولید پراکنده در مسئله، استفاده مستقیم از روش های متداول محاسبه قابلیت اطمینان را نامناسب می سازد. علی رغم استفاده اکثر مقالات از روش بخش بندی به منظور ساده سازی و عدم در نظر گرفتن قیود فنی شبکه طی محاسبات، در این مطالعه، فرمول بندی کامل و محاسبات دقیق به کار گرفته شده است. در نهایت یک فرمول بندی احتمالاتی به منظور انتخاب و تخصیص بهینه DG ها در شبکه، از میان نوع توربین بادی، ۳ نوع مازول فتوولتائیک و ۳ نوع میکروتوربین، ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که نصب DG به طور متوسط باعث کاهش بارگذاری اکثر خطوط شده است. کاهش بارگذاری خطوط در کنار تخصیص بهینه منابع تولید توان، از طریق تعدد سازی، متنوع سازی و پراکنده سازی تامین توان منجر به افزایش امنیت تامین انرژی در سایت های مورد بررسی می شود. انتخاب منابع انرژی مناسب باید با در نظر گرفتن شرایط فنی شبکه در کنار عدم قطعیت این منابع و شرایط محیطی، صورت گیرد و ضریب ظرفیت نمی تواند به تنهایی ملاکی برای انتخاب این منابع باشد. محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان با استفاده از پخش بار بهینه، تمامی قیود فنی سیستم را مد نظر قرار می دهد، در حالی که روش های متداول فاقد این مزیت می باشند. قیود مربوط به ظرفیت خطوط و حدود ولتاژ می توانند در میزان بار قطع شده و جهت عبور توان اثر گذار باشند.

۷. پیوست

جدول (۶) اطلاعات مربوط به شبکه استاندارد ۳۳ باسه IEEE را

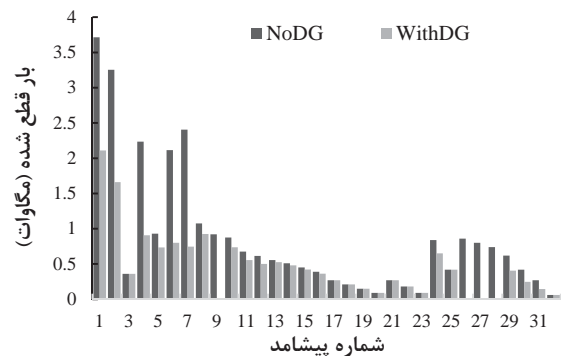
نشان می دهد .

۴۴ و برابر ۰/۰۰۰۶ مگاوات است.

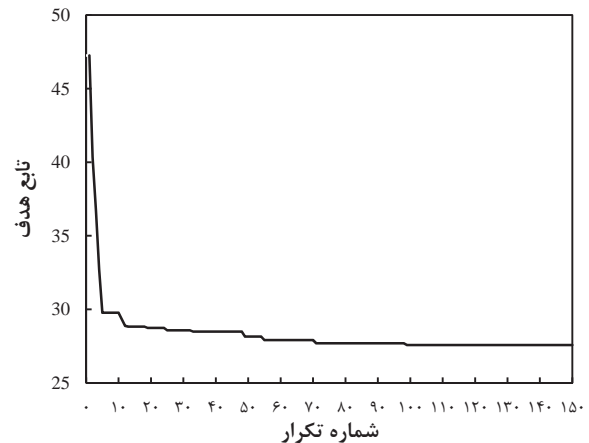


شکل ۱۵. تلفات توان، توان باس ۱، بار قطع شده و توان مازاد در هر سناریو

شکل (۱۶) میزان بار قطع شده به ازای تمام پیشامدها را برای حالت پایه و بعد از تخصیص بهینه منابع انرژی ترکیبی، نشان می دهد به طوری که بار قطع شده در تمامی پیشامدها کاهش یافته است. شکل (۱۷) همگرایی الگوریتم حل مسئله را بعد از ۱۵۰ تکرار و به ازای جمعیت اولیه ۸۰، نشان می دهد.



شکل ۱۶. بار قطع شده به ازای هر پیشامد



شکل ۱۷. همگرایی الگوریتم پیشنهادی

جدول ۶. اطلاعات فنی شبکه ۳۳ باسه IEEE

شماره خط	از گره	به گره	پیشامد	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$\lambda(\text{fail/yr})$	$r(\text{h})$	$S^{max}(\text{MVA})$
۲	۱	۲	۱	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷۷	۰/۰۶	۶	۴/۶
۳	۲	۳	۲	۰/۴۹۳۰	۰/۲۵۱۱	۰/۰۶	۶	۴/۱
۴	۳	۴	۴	۰/۳۶۶۰	۰/۱۸۶۴	۰/۰۶	۳	۲/۹
۵	۴	۵	۶	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۰/۰۶	۳	۲/۹
۶	۵	۶	۷	۰/۸۱۹۰	۰/۷۰۷۰	۰/۰۶	۳	۲/۹
۷	۶	۷	۸	۰/۱۸۷۲	۰/۶۱۸۸	۰/۰۶	۳	۱/۵
۸	۷	۸	۱۰	۱/۷۱۱۴	۱/۲۳۵۱	۰/۰۶	۳	۱/۰۵
۹	۸	۹	۱۱	۱/۰۳۰۰	۰/۷۴۰۰	۰/۰۶	۳	۱/۰۵
۱۰	۹	۱۰	۱۲	۱/۰۰۴۰	۰/۷۴۰۰	۰/۰۶	۳	۱/۰۵
۱۱	۱۰	۱۱	۱۳	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵۰	۰/۰۶	۳	۱/۰۵
۱۲	۱۱	۱۲	۱۴	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۰/۰۶	۳	۱/۰۵
۱۳	۱۲	۱۳	۱۵	۱/۴۶۸۰	۱/۱۵۵۰	۰/۰۶	۲	۰/۵
۱۴	۱۳	۱۴	۱۶	۰/۵۴۱۶	۰/۷۱۲۹	۰/۰۶	۳	۰/۴۵
۱۵	۱۴	۱۵	۱۷	۰/۵۹۱۰	۰/۵۲۶۰	۰/۰۶	۳	۰/۳
۱۶	۱۵	۱۶	۱۸	۰/۷۴۶۳	۰/۵۴۵۰	۰/۰۶	۳	۰/۲۵
۱۷	۱۶	۱۷	۱۹	۱/۲۸۹۰	۱/۷۲۱۰	۰/۰۶	۳	۰/۲۵
۱۸	۱۷	۱۸	۲۰	۰/۷۳۲۰	۰/۵۷۴۰	۰/۰۶	۳	۰/۱
۱۹	۲	۱۹	۳	۰/۱۶۴۰	۰/۱۵۶۵	۰/۰۶	۶	۰/۵
۲۰	۱۹	۲۰	۲۱	۱/۵۰۴۲	۱/۳۵۵۴	۰/۰۶	۶	۰/۵
۲۱	۲۰	۲۱	۲۲	۰/۴۰۹۵	۰/۴۷۸۴	۰/۰۶	۶	۰/۲۱
۲۲	۲۱	۲۲	۲۳	۰/۷۰۸۹	۰/۹۳۷۳	۰/۰۶	۶	۰/۱۱
۲۳	۳	۲۳	۵	۰/۴۵۱۲	۰/۳۰۸۳	۰/۰۶	۶	۱/۰۵
۲۴	۲۳	۲۴	۲۴	۰/۸۹۸۰	۰/۷۰۹۱	۰/۰۶	۶	۱/۰۵
۲۵	۲۴	۲۵	۲۵	۰/۸۹۶۰	۰/۷۰۱۱	۰/۰۶	۶	۰/۵
۲۶	۶	۲۶	۹	۰/۲۰۳۰	۰/۱۰۳۴	۰/۰۶	۶	۱/۵
۲۷	۲۶	۲۷	۲۶	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷	۰/۰۶	۶	۱/۵
۲۸	۲۷	۲۸	۲۷	۱/۰۵۹۰	۰/۹۳۳۷	۰/۰۶	۶	۱/۵
۲۹	۲۸	۲۹	۲۸	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۰۶	۰/۰۶	۶	۱/۵
۳۰	۲۹	۳۰	۲۹	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۵	۰/۰۶	۶	۱/۵
۳۱	۳۰	۳۱	۳۰	۰/۹۷۴۴	۰/۹۶۳۰	۰/۰۶	۶	۰/۵
۳۲	۳۱	۳۲	۳۱	۰/۳۱۰۵	۰/۳۶۱۹	۰/۰۶	۶	۰/۵
۳۳	۳۲	۳۳	۳۲	۰/۳۴۱۰	۰/۵۳۰۲	۰/۰۶	۶	۱

۸. تعریف اصطلاحات

جریان در نقطه حداکثر توان سلول فتوولتائیک (A)

 I_{MPP}

جریان اتصال کوتاه سلول فتوولتائیک (A)

 I_{SC} ضریب دمایی جریان ($A/^{\circ}C$) K_i ضریب دمایی ولتاژ ($V/^{\circ}C$) K_v ضریب اولویت قطع بار موجود در باس i LP_i تعداد میکروتوربین m در باس i $N_{i,m}$ تعداد آرایه‌ی فتوولتائیک p در باس i $N_{i,p}$ بار قطع شده طی سناریو s در باس i (MW) $C_{s,i}$

ضریب ظرفیت واحدهای تولیدی

 CF توان تولیدی مازاد منابع انرژی سناریو s در باس i (MW) $E_{s,i}$

ضریب تامین ماژول فتوولتائیک

 FF تابش خورشید بر سطح ماژول فتوولتائیک (W/m^2) G^s

۹. مراجع

- [1] Kia, M.; Aalami, H. A. "A New Approach for Optimal Location of Power Dispatching Centers Based on Passive Defence Criteria Using EAHP"; *Advanced Defence Sci. & Tech.* 2014, 5, 19-29. (In Persian).
- [2] Aalami, H.; Ramezani, H. "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions"; *Passive Defence Sci. & Tech.* 2012, 3, 231-241. (In Persian).
- [3] Shaaban, M. F.; Atwa, Y. M.; El-Saadany, E. F. "A Multi-Objective Approach for Optimal DG Allocation"; *2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, 2011, 1-7.
- [4] Pepermans, G.; Driesen, J.; Haeseldonckx, D.; Belmans, R.; D'haeseleer, W. "Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues"; *Energy policy* 2005, 33, 787-798.
- [5] Karimyan, P.; Gharehpetian, G.; Abedi, M.; Gavili, A. "Long Term Scheduling for Optimal Allocation and Sizing of DG Unit Considering Load Variations and DG Type"; *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.* 2014, 54, 277-287.
- [6] Gopiya Naik, S.; Khatod, D.; Sharma, M. "Optimal Allocation of Combined DG and Capacitor for Real Power Loss Minimization in Distribution Networks"; *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.* 2013, 53, 967-973.
- [7] Ugranlı, F.; Karatepe, E. "Multiple-Distributed Generation Planning Under Load Uncertainty and Different Penetration Levels"; *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.* 2013, 46, 132-144.
- [8] Khatod, D. K.; Pant, V.; Sharma, J. "Evolutionary Programming Based Optimal Placement of Renewable Distributed Generators"; *IEEE Transactions on Power Systems* 2013, 28, 683-695.
- [9] Atwa, Y. M.; El-Saadany, E. F. "Probabilistic Approach for Optimal Allocation of Wind-Based Distributed Generation in Distribution Systems"; *IET Renewable Power Generation* 2011, 5, 79-88.
- [10] Atwa, Y.; El-Saadany, E.; Guise, A.-C. "Supply Adequacy Assessment of Distribution System Including Wind-Based DG During Different Modes of Operation"; *IEEE Transactions on Power Systems* 2010, 25, 78-86.
- [11] Abdi, S.; Afshar, K. "Application of IPSO-Monte Carlo for Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing"; *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.* 2013, 44, 786-797.
- [12] Shaaban, M. F.; Atwa, Y. M.; El-Saadany, E. "DG Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks"; *IEEE Transactions on Power Systems* 2013, 28, 639-649.
- [13] Leite, A. P.; Borges, C. L.; Falcao, D. M. "Probabilistic Wind Farms Generation Model for Reliability Studies Applied to Brazilian Sites"; *IEEE Transactions on Power Systems* 2006, 21, 1493-1501.
- [14] Karki, R.; Hu, P.; Billinton, R. "A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation"; *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2006, 21, 533-540.
- [15] Haghifam, M.-R.; Omidvar, M. "Wind Farm Modeling in Reliability Assessment of Power System"; *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2006.

$N_{i,w}$	تعداد توربین بادی w در باس i
N_{OT}	دمای عملکرد نامی سلول فتوولتائیک ($^{\circ}C$)
P_{D_i}	توان اکتیو مصرفی بار i (MW)
P_{G_i}	توان اکتیو تولیدی باس اسلک (MW)
P_{Max}	حداکثر ظرفیت قابل نصب در هر باس (MW)
$P_{MTi,m}$	توان تولیدی میکروتوربین m در باس i (MW)
$P_{M_p}^s$	توان تولیدی ماژول فتوولتائیک p در باس i طی سناریو s (MW)
$P_{PV_i,p}^s$	توان تولیدی آرایه‌ی فتوولتائیک p در باس i طی سناریو s (MW)
$P_{WTG_{i,w}}^s$	توان تولیدی توربین بادی w در باس i طی سناریو s (MW)
P_m	توان نامی میکروتوربین m
P_p	توان نامی سلول فتوولتائیک p
P_w	توان نامی توربین بادی w
Q_{D_i}	توان راکتیو مصرفی بار i (MVar)
Q_{G_i}	توان راکتیو تولیدی باس اسلک (MVar)
S_{ij}	توان عبوری از خط $i - j$ (MVA)
T^A	دمای محیطی سلول فتوولتائیک ($^{\circ}C$)
T^s	دمای سلول فتوولتائیک طی سناریو s ($^{\circ}C$)
v	سرعت باد (m/s)
V	اندازه ولتاژ (V)
V_{ci}, V_r, V_{co}	سرعت قطع، نامی و وصل توربین (m/s)
V_{MPP}	ولتاژ در نقطه حداکثر توان سلول فتوولتائیک (V)
V_{OC}	ولتاژ مدار باز سلول فتوولتائیک (V)
x	ماکزیمم نفوذ مجاز DG (%)
Y_{ij}	اندازه المان $i - j$ ماتریس ادمیتانس
δ	زاویه ولتاژ (rad)
θ_{ij}	زاویه المان $i - j$ ماتریس ادمیتانس (rad)
ρ_s	احتمال رخداد سناریو s
i	اندیس باس شبکه
s	اندیس سناریو
m	اندیس نوع میکروتوربین
p	اندیس نوع ماژول فتوولتائیک
w	اندیس نوع توربین بادی
C	ماتریس قطع بارها
C_T	مجموعه باس‌های کاندیدای نصب منابع انرژی
\mathcal{I}	مجموعه باس‌های شبکه
\mathcal{L}	مجموعه پیشامدها
\mathcal{M}	مجموعه میکروتوربین‌ها
\mathcal{P}	مجموعه ماژول‌های فتوولتائیک
\mathcal{S}	مجموعه سناریوها
\mathcal{W}	مجموعه توربین‌های بادی

- [27] Atwa, Y.; El-Saadany, E.; Salama, M.; Seethapathy, R. "Distribution System Loss Minimization using Optimal DG Mix"; IEEE Power & Energy Society General Meeting, PES'09, 2009.
- [28] Endrenyi, J. "Reliability Modeling in Electric Power Systems"; John Wiley & Sons Ltd: New York, 1979.
- [29] Jam, A.; Ardehali, M. M.; Hoseinian, S. H. "A Comprehensive Algorithm for Optimal Wind Farm Design in Distribution Network for Reliability Improvement and Loss Reduction"; 29th International Power System Conference, 2013, (In Persian).
- [30] Atashpaz-Gargari, E.; Lucas, C. "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition"; IEEE Congress on Evolutionary Computation 2007.
- [31] Rosenthal, R. E., "GAMS--a user's guide"; 2013.
- [32] Zhang, J.; Cheng, H.; Wang, C. "Technical and Economic Impacts of Active Management on Distribution Network"; Int. J. Elec. Power & Energy Syst. 2009, 31, 130-138.
- [33] Venkatesh, B.; Ranjan, R.; Gooi, H. "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability"; IEEE Transactions on Power Systems 2004, 19, 260-266.
- [34] Raoofat, M. "Simultaneous Allocation of DGs and Remote Controllable Switches in Distribution Networks Considering Multilevel Load Model"; Int. J. Elec. Power & Energy Syst. 2011, 33, 1429-1436.
- [35] Golshan, M. H.; Arefifar, S. "Distributed Generation, Reactive Sources and Network-Configuration Planning for Power and Energy-Loss Reduction"; IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 2006, 153, 127-136.
- [36] Chen, M.-Y.; Cheng, S. "Multi-Objective Optimization of the Allocation of DG Units Considering Technical, Economical and Environmental Attributes"; Przegląd Elektrotechniczny 2012, 88, 233-237.
- [37] Healy, M. "Defence Estate Energy Strategy (2014-2019)"; Defending Australia and its National Interests, 2013.
- [16] Atwa, Y. M. "Distribution System Planning and Reliability Assessment under High DG Penetration"; University of Waterloo, 2010.
- [17] Banerjee, B.; Islam, S. M. "Reliability Based Optimum Location of Distributed Generation"; Int. J. Elec. Power & Energy Syst. 2011, 33, 1470-1478
- [18] Arya, R.; Choube, S.; Arya, L. "Reliability Evaluation and Enhancement of Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation Based on Standby Mode"; Int. J. Elec. Power & Energy Syst. 2012, 43, 607-616.
- [19] Liu, X.; Islam, S. "Reliability evaluation of a wind-diesel hybrid power system with battery bank using discrete wind speed frame analysis," International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems 2006.
- [20] Attwa, Y.; El-Saadany, E. "Reliability Based Analysis for Optimum Allocation of DG"; Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada, 2007.
- [21] Bae, I.-S.; Kim, J.-O.; Kim, J.-C.; Singh, C. "Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability worth"; IEEE Transactions on Power Systems 2004, 19, 287-292.
- [22] U.S. D.O.T. (2012). U.S. Department of the Interior. Available: <http://www.usbr.gov/pn/agrimet/wxdata.html>
- [23] Conejo, A. J.; Carriàon, M.; Morales, J. M. "Decision making under uncertainty in electricity markets"; Springer, 2010, 153.
- [24] Billinton, R.; Chowdhury, A. "Incorporation of Wind Energy Conversion Systems in Conventional Generating Capacity Adequacy Assessment"; IEE Proceedings Conference (Generation, Transmission and Distribution), 1992, 47-56.
- [25] Kaigui, X.; Billinton, R. "Determination of the Optimum Capacity and Type of Wind Turbine Generators in a Power System Considering Reliability and Cost"; IEEE Transactions on Energy Conversion 2011, 26, 227-234.
- [26] Koutroulis, E.; Kolokotsa, D.; Potirakis, A.; Kalaitzakis, K. "Methodology for Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic/Wind-Generator Systems using Genetic Algorithms"; Solar Energy 2006, 80, 1072-1088.