

## ارائه یک رویکرد کاربردی در طرح ریزی و مکان یابی منابع تولید پراکنده بر مبنای الگوریتم ژنتیک چند هدفه

محمد رضا علیزاده پهلوانی<sup>۱\*</sup>، مجید خسروی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۶/۰۳/۰۷، پذیرش: ۹۶/۰۶/۲۱)

### چکیده

افزایش سهم تولیدات پراکنده در منابع انرژی الکتریکی باعث شده است تا دقت در برنامه ریزی این منابع بیشتر مورد توجه قرار گیرد. به طور مثال مکان یابی، ظرفیت و تعداد نادرست DGها می تواند موجب افزایش تلفات و آسیب رسیدن به شبکه قدرت شود. گوناگونی و تناقض توابع هدف، عدم اطمینان از سودمندی و یا مشکل داشتن یک روش و مناسب بودن یا نبودن یک طرح برای رفع یک مورد خاص، مواردی است که در روش های نوین جهت بررسی منابع انرژی، مورد بحث قرار می گیرد. در این مقاله، به جهت افزایش دقت و سرعت، به جای استفاده از الگوریتم های مرسوم و متداول تک هدفه همچون الگوریتم ژنتیک، الگوریتم اجتماع ذرات، الگوریتم کلونی مورچه و ...، از یک برنامه چند هدفه جهت بهینه سازی، مکان یابی و تعیین ظرفیت DGها در سامانه قدرت بهره برده شده است. شبکه نمونه با افق طرح ریزی برای اجرا و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب و با بهره گیری از تولباکس Matpower در متلب مدل سازی شده است. هزینه اولیه و اجرایی DGها با توجه به یک دوره برنامه ریزی مشخص مورد بحث واقع شده است. نتایج نشان می دهد که طرح چند هدفه معرفی شده اجازه اعمال راه حل های گوناگونی را می دهد و بر مبنای انتخاب کمترین توابع هدف، بیشترین بازدهی و استقلال از شبکه را به ارمغان می آورد.

**کلیدواژه ها:** تولید پراکنده، الگوریتم ژنتیک غیر مغلوب، توابع چند هدفه، بهینه سازی

## Presentation of a Practical Approach in Planning and Placement of Distributed Generation Sources Based on Multi-Objective Genetic Algorithms

M. R. Alizadeh Pahlavani\*, M. Khosravi

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 28/05/2017; Accepted: 12/09/2017)

### Abstract

Increasing rate of scattered productions in electrical energy resources has led to pay more attention in planning accuracy. For example, location, capacity and DG incorrect numbers, can increase the rate of losses and damages to the power grids. Diversity and contradiction in objective functions, the uncertainty of the usefulness or having problem with a proper procedure, are the issues that are discussed in new techniques for energy resources. In this paper, in order to increase the accuracy and processing speed, instead of the conventional single-objective algorithms such as genetic algorithm, particle swarm algorithm, ant colony algorithm and etc, a multi-objective optimization location and determination of DG capacities in the power systems has been discussed. The sample network with planning horizon for implementing and using non-dominant sorting genetic algorithm, has been modeled in Matpower toolbox in MATLAB. DG initial and operational planning costs with respect to the certain proposed time period has been considered. The results show that the proposed multi objective plan, lets us to apply various solutions. It also gives the independency from the grid and maximum yield by choosing less objective functions

**Keywords:** Distributed Generation, Non-Dominated Genetic Algorithm, Multi Objective Functions, Optimization

\*Corresponding Author E-mail: Mr\_Alizadehp@mut.ac.ir

## ۱. مقدمه

کشور ایران مانند سایر کشورها در جهت کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و نشر کربن در محیط‌زیست، به سمت استفاده از منابع انرژی تولید پراکنده<sup>۱</sup> قدم برمی‌دارد. منابع انرژی تجدید پذیر بخش عمده‌ای از DGها را تشکیل می‌دهند. هدف اصلی پروژه‌های صنعت برق در زمینه برنامه‌ریزی و توسعه DGها، ترکیب بهینه این منابع در کنار یکدیگر است. مطالعات جامع و هدفمندی نیاز است تا عملکرد DGها در شبکه قدرت را شناخته و از تأثیرات سوء آن‌ها جلوگیری شود [۱].

یکی از اقداماتی که در زمان جنگ توسط دشمن انجام می‌شود، تخریب زیرساخت‌های حیاتی و گسترده از جمله ایجاد اختلال در برق‌رسانی به محیط‌های حساس و مهم مانند سایت‌های استقرار نیروهای مسلح است. در نتیجه بروز خاموشی‌های گسترده و طولانی مدت در سایت‌های فرماندهی نیروهای مسلح، ارتباط یگان‌ها و عملیات لجستیکی و تدارکات مختل می‌شود. از سوی دیگر برای پادگان‌های دورافتاده مسئله تأمین انرژی الکتریکی برای مصارف نظامی و یا رفاهی، حائز اهمیت است. بنابراین، استفاده از منابع تولید پراکنده برای پایگاه‌های نظامی حساس رواج یافته است تا اینکه بتوان تغذیه پایدار سایت‌های فوق را در شرایط بحرانی تضمین کرده و شاخص پدافند غیرعامل را افزایش داد. به طور نمونه ارتش آمریکا در افغانستان با مشکل حمله القاعده به کاروان‌های سوخت‌رسانی برای پایگاه‌های خود مواجه شده و به منظور گذر از این بحران به سمت سایت‌های شامل منابع تولید پراکنده گام برداشته و در این زمینه سرمایه‌گذاری هنگفتی کرده است.

در حل مسائل سامانه‌های قدرت به صورت چند هدفه، مزایا و کارایی الگوریتم مورد نظر به صورت پراکنده و در برخی از منابع علمی مورد بحث قرار گرفته است [۲ و ۳]. در این مقاله، تلاش بر این است تا یک روش کارآمد و بهینه برای یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده در شبکه قدرت از نظر تعیین مکان و ظرفیت آن‌ها ارائه شود. در این نوشته از روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۲</sup> (یا در واقع نسخه دوم الگوریتم ژنتیک که به اختصار NSGA-II است) بر مبنای سامانه‌های موجود در MATPOWER<sup>۳</sup> در جهت پیدا کردن یک راه‌حل سریع و قابل اعتماد برای طرح‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده استفاده شده است. همچنین دو سامانه ۹ و ۳۳ باسه استاندارد IEEE برای ارزیابی روش مورد بحث به کار برده شده است.

روش برنامه‌ریزی چند هدفه مورد بحث، ارائه دهنده یک راهکار کارآمد جهت همگرایی سریع و همچنین ترکیب کننده اهداف فنی و اقتصادی در برنامه‌ریزی DGها از دید طراح شبکه می‌باشد. همچنین این روش در مواجه با محدودیت‌های پخش بار (از جمله: قیود پایداری ولتاژ، برابری میزان تولید توان و بار درخواستی و محدودیت توان اکتیو و راکتیو تولیدی) عملکرد مطلوبی دارد و می‌تواند برای طرح‌ریزی سایر منابع انرژی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. معرفی الگوریتم NSGA-II و مزیت آن نسبت به الگوریتم ژنتیک تک هدفه

نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب که موسوم به NSGA-II است، با هدف کاستن حجم محاسبات الگوریتم ژنتیک تک هدفه، در سال ۲۰۰۲ و توسط دیب معرفی شد [۴].

هدف ما در این برنامه‌ریزی، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه ژنراتورهای پراکنده جهت به‌کار بردن در شبکه توزیع و مناطق نظامی دورافتاده است. از آنجایی که تأکید بر کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و به‌کار بردن منابع انرژی در نزدیکی مصرف کنندگان است، اهمیت این موضوع مشخص می‌شود. اگر طرح‌ریزی با دقت انجام نشود، ممکن است که توابع هدف مورد نظر حاصل نشوند و قابلیت اطمینان سامانه نیز کاهش یابد. اهداف زیادی باید در طرح‌ریزی یک سامانه قدرت مورد بررسی قرار گیرند، بنابراین لازم است تا به جای به‌کار بردن توابع با یک هدف، از توابع چند هدفه استفاده شود.

روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، بهینه‌سازی تکاملی چند هدفه<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. روش MOE بر مبنای اصل جبهه‌پارتو<sup>۵</sup> بیان شده است که در آن راه‌حل‌ها<sup>۶</sup> (در این نوشته منظور از راه‌حل‌ها همان اعضای جمعیت<sup>۷</sup> است) در یک فضای n بعدی (برای n تابع هدف) قرار دارند. مشابه تمام روش‌های بهینه‌سازی، سه اصل مهم باید مشخص شود: ضابطه و ملاک توابع (یا توابع هدف)، طراحی (یا کنترل) متغیرها و قیود مسئله.

روش NSGA-II را شاید به توان به عنوان معروف‌ترین فراگیرترین الگوریتم چند هدفه در نظر گرفت. مشکل روش‌های غیر مستقیم در حل مسائل چند هدفه این است که نمی‌توان به کمک آن روش‌ها در فضای دوبعدی و بر روی جبهه‌پارتو،

<sup>۴</sup> Multi Objective Evolutionary Optimization (MOE)

<sup>۵</sup> Pareto Front

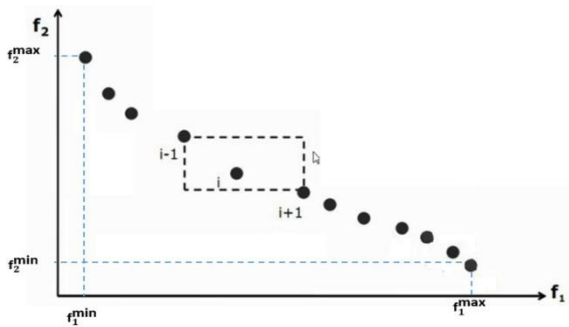
<sup>۶</sup> Solutions

<sup>۷</sup> Individuals

<sup>۱</sup> Distributed Generation (DG)

<sup>۲</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

<sup>۳</sup> Package of MATLAB M-files for Solving Power Flow Problems



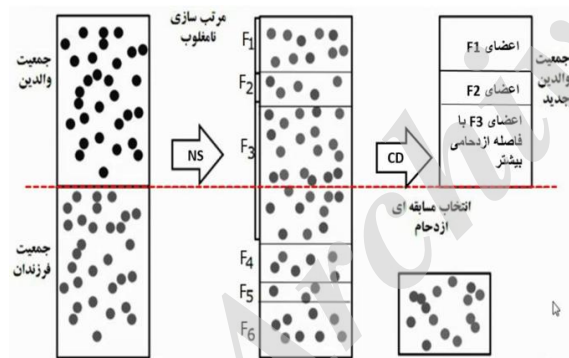
شکل ۲. نمایش فاصله ازدحامی برای دو تابع هدف

با کمک دو مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی می‌توان نحوه تولید جمعیت جدید از والدین در NSGA-II را به صورت ۳ مرحله زیر خلاصه کرد (شکل ۳):

(الف) ابتدا دو عضو از جمعیت به تصادف انتخاب می‌شوند.

(ب) اگر رتبه دو عضو انتخاب شده یکسان نباشد، عضوی که دارای رتبه کمتری است (در جبهه پارتو پایین‌تری است) انتخاب می‌شود.

(ج) اگر رتبه دو عضو انتخاب شده یکسان باشد، عضوی که دارای فاصله ازدحامی بیشتر است، انتخاب می‌شود.



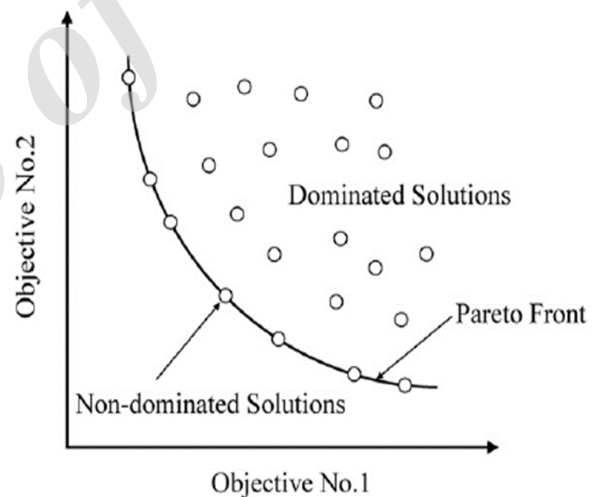
شکل ۳. انتخاب نسل جدید در NSGA-II

### ۱-۲ فرمول نویسی و پیاده‌سازی سامانه در الگوریتم NSGA-II

در این نوشته، سامانه مورد بحث با استفاده از NSGA-II و بر مبنای جهش گوسی<sup>۳</sup>، تقاطع میانی<sup>۴</sup> و انتخاب دوتایی<sup>۵</sup> در متلب مدل‌سازی شده است. همان‌گونه که از نام این روش مشخص است در جمعیت غیر مغلوب، هیچ یک از اعضای جمعیت بر دیگری برتری ندارد. به عبارت دیگر تمامی راه‌حل‌ها در یک مرتبه و درجه قرار دارند. روش NSGA-II به عنوان یک روش مؤثر و

مرتب‌سازی را انجام داد؛ به همین منظور یکی از کارهای صورت گرفته در NSGA-II که موجب افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان پردازش است، استفاده از الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب است که برای رتبه‌بندی اعضای جمعیت و تراز کردن آن‌ها در جبهه پارتوهای مختلف استفاده می‌شود. غلبه کردن به این معنی است که اعضای از جمعیت که راه‌حل‌های بهتری هستند، در جبهه پارتوهای پایین‌تری قرار می‌گیرند و به اصطلاح بر سایر اعضا غلبه دارند (شکل ۱).

از جمله کارهای ارزشمند دیگری که در الگوریتم NSGA-II به جهت سهولت در تنظیم پارامترها و همچنین افزایش دقت الگوریتم صورت گرفته است، حذف روش مرسوم در الگوریتم ژنتیک تک هدفه با نام اشتراک شایسته<sup>۱</sup> و استفاده از مفهوم ساده‌تری به نام فاصله ازدحامی<sup>۲</sup> است. روش فاصله ازدحامی یک ملاک ثانویه برای انتخاب اعضا است و بر اساس همسایه قبلی و بعدی و اولین و آخرین عضو جمعیت تعیین می‌شود (شکل ۲).



شکل ۱. مفهوم غلبه کردن در NSGA-II

فاصله ازدحامی هر چه بیشتر باشد و ناحیه بیشتری را پوشش دهد بهتر است، چرا که جواب انتخاب شده به تنوع راه‌حل‌های ما کمک می‌کند. فاصله ازدحامی برای نقطه  $i$  ام نسبت به تابع هدف  $z$  ام به صورت رابطه (۱) است. در حالت کلی و برای  $m$  تابع هدف، فاصله ازدحامی نقطه  $i$  ام به صورت رابطه (۲) است.

$$d_i^j = \frac{|f_j^{i+1} - f_j^{i-1}|}{f_j^{max} - f_j^{min}} \quad (1)$$

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 + \dots + d_i^m = \sum_{j=1}^m d_i^j \quad (2)$$

<sup>3</sup> Gaussian Mutation  
<sup>4</sup> Intermediate Crossover  
<sup>5</sup> Binary Tournament Selection

<sup>1</sup> Fitness Sharing  
<sup>2</sup> Crowding Distance (CD)

جدول ۱. برخی از داده‌های مسئله

نوع داده	سامانه ۹ باسه	سامانه ۳۳ باسه
تعداد DG	۲	۲
ظرفیت حداقل MW	۰/۱	۰/۱
ظرفیت حداکثر MW	۴	۱/۵
تعداد تکرار	۵۰	۵۰
تعداد اعضای جمعیت	۵۰	۵۰
درصد برخورد	%۷۰	%۷۰
درصد جهش	%۴۰	%۴۰
بازه زمانی	۵ سال	۵ سال
نرخ رشد بار در سال	۰/۰۳	۰/۰۳
نرخ کاهش ارزش سرمایه در هر سال	۰/۱۱	۰/۱۱
هزینه سرمایه‌گذاری هر واحد DG (\$/MW)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
هزینه نگهداری و عملکرد (\$/MW)	۵۰	۵۰

از آنجایی که شبکه‌های ۹ و ۳۳ باسه به کار رفته متعلق به شبکه فشار متوسط است، ظرفیت‌ها بر حسب MW گفته شده است. فرض بر این است که DGها توان اکتیو به شبکه تزریق کنند. همچنین هر یک از DGهای پیشنهاد شده در نتایج، الزاماً نباید به صورت یک منبع مستقل باشد. بلکه می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده باشد مشابه یک مزرعه بادی.

### ۳-۲. مدل‌سازی ریاضی

همان‌طور که قبلاً گفته شد یکی از توابع هدف مجموع توان تلفات سامانه است که در معادله (۳) آورده شده است.  $S_{ij}$  توان ظاهری مبادله شده بین باس  $i$  و  $j$  است. برای  $i \neq j$ .

$$P_{loss}^{total} = Real\{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (S_{ij} + S_{ji})\} \quad (3)$$

$S_{ij}$  و  $S_{ji}$  مشابه معادله‌های (۴) و (۵) هستند که در آن‌ها  $V_i$  و  $V_j$  دامنه ولتاژ باس  $i$  و  $j$  است.  $y_{i0}$  و  $y_{j0}$  به ترتیب برابر با ادمیتانس بین شاخه  $i$  و  $j$  و ادمیتانس بین باس  $i$  و زمین است.

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i^2 (y_{ij} y_{i0}) - V_i y_{ij}^* V_j^* \quad (4)$$

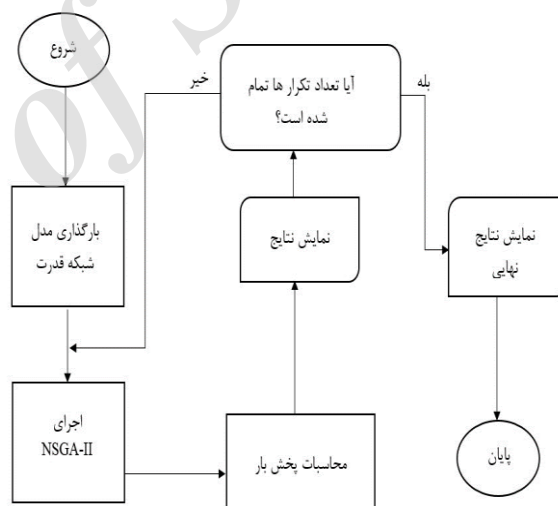
$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j^2 (y_{ij} y_{j0}) - V_j y_{ij}^* V_i^* \quad (5)$$

تابع هدف دوم که در معادله (۶) گفته شده، هزینه ساعتی است. DG  $C_{in}$  بیانگر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در هر ساعت

سودمند در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته شده است [۵] و [۶] و برای رفع مشکلات متنوعی در سامانه قدرت به کار برده شده است، از جمله: توزیع اقتصادی [۶]، گسترش تولیدات [۷] و برنامه‌ریزی توان راکتیو [۸]. برنامه مورد نظر به این صورت عمل می‌کند که مدل سامانه قدرت را فراخوانی می‌کند و هر مرحله و به ازای افراد جمعیت، با مکان‌یابی DG پخش بار را بر روی آن اعمال می‌کند و نتایج را نشان می‌دهد. این فرآیند تا اتمام تعداد تکرارها ادامه می‌یابد. شمای کلی طرح در شکل (۴) مشخص است.

### ۲-۲. تعریف مسئله

برای حل یک مسئله بهینه‌سازی با روش NSGA-II باید پارامترهای بهینه‌سازی همچون تعداد متغیرها، تعداد اهداف و تعداد حدود معین باشد. برخی از اطلاعات مسئله مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۴. ساختار روش مورد بحث

برای بهینه‌سازی سامانه‌های مورد نظر به این صورت عمل می‌شود که، ابتدا مدل‌سازی بار انجام می‌شود و شبکه را به قالب کدهای متلب درآورده و بعد از آن اطلاعات را در حلقه اصلی NSGA-II وارد می‌شود. تلاش بر این است تا تأثیر این روش را در جایابی منابع تولید پراکنده در سامانه قدرت مشاهده شود و همچنین برنامه باید امکان اعمال تغییرات را بسته به نظر طراح داشته باشد.

توابع هدف ما عبارتند از: تابع تلفات حقیقی شبکه و تابع هزینه DGهای اضافه شده. تابع هزینه ابتدا به صورت ساعتی محاسبه شده و سپس برای یک بازه زمانی ۵ ساله تعمیم داده شده است.

مدل سازی بار و قیمت برق: در مدل سازی غیر قطعی مسئله، از دو فاکتور تقاضای بار و ارزش قیمت برق به عنوان ورودی استفاده شده است. برای این منظور مدل سازی احتمالی عدم قطعیت بار در شبکه های توزیع با روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین<sup>۵</sup> را به کار برده شده است [۱۱]. با در نظر گرفتن  $\alpha$  به عنوان نرخ رشد بار و بار مورد نیاز مبنا در باس  $i$  ام  $(P_{i,base}^D, Q_{i,base}^D)$  و مدت زمان  $t$  و در ساعت  $h$  ام، روابط (۱۳-۱۵) را به دست آورده می شود.

$$P_{i,t,h}^D = P_{i,base}^D \times DLF_{i,t,h} \times (1 + \alpha) \quad (13)$$

$$Q_{i,t,h}^D = Q_{i,base}^D \times DLF_{i,t,h} \times (1 + \alpha)^t \quad (14)$$

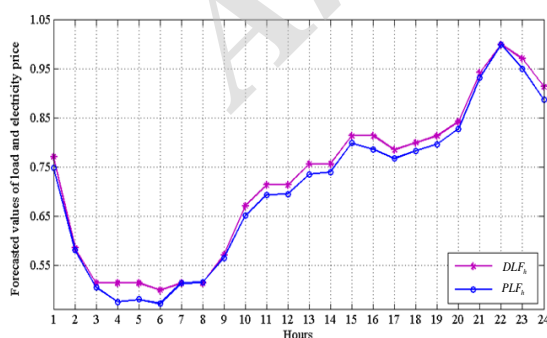
$$S_{i,t,h}^D = P_{i,t,h}^D + jQ_{i,t,h}^D \quad (15)$$

در روابط (۱۳-۱۵)  $Q_{i,t,h}^D$  و  $P_{i,t,h}^D$ ،  $S_{i,t,h}^D$  به ترتیب بیانگر توان ظاهری، اکتیو و راکتیو در باس  $i$  در مدت  $t$  سال و در سطح تقاضای بار در ساعت  $h$  هستند. قیمت برق خریداری شده از شبکه اصلی و قیمت برق فروخته شده به مشتریان بسته به بازار برق تعیین می شود و این مقدار برای هر سطح تقاضا به صورت یکسان تعریف نشده است. از این رو، در حالت کلی قیمت برق برای بازه زمانی  $t$  و سطح تقاضا در ساعت  $h$  به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود [۱۲].

$$\rho_{t,h} = \rho \times PLF_{t,h} \quad (16)$$

در معادله (۱۶)،  $\rho$  برابر قیمت پایه برق و  $PLF_{t,h}$  برابر ضریب قیمت برق در بازه زمانی  $t$  و سطح تقاضای ساعت  $h$  است. ضریب قیمت برق با توجه به بازار انرژی متغیر خواهد بود.

نمودار تغییرات قیمت و تقاضای بار برای ۲۴ ساعت یک شبانه روز در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵. نمودار درخواست توان و قیمت برق برای یک شبانه روز برای به کارگیری توربین بادی به عنوان DG در شبکه، نیاز به مدل سازی DG است. برای این منظور و بر اساس روابط توزیع ویبول<sup>۶</sup> که در مراجع [۱۲ و ۱۳] گفته شده است، می توان

می باشد و  $C_{om DG}$  بیانگر هزینه عملکرد و نگهداری<sup>۱</sup> DG ها است.

$$C_{total} = C_{in DG} + C_{om DG} \quad (6)$$

برای همه انواع DG ها هزینه سرمایه گذاری عبارت است از: ظرفیت DG ضرب در هزینه اولیه برای تولید یک مگاوات توان. با در نظر گرفتن بازه زمانی ۵ ساله،  $C_{in DG}$  مطابق رابطه (۷) است.

$$C_{in DG} = \frac{C_{inv1} \times m_1 + C_{inv2} \times m_2}{Rev \times 8760} \quad (7)$$

در رابطه (۷) دارید:

$m_1$ : ظرفیت DG اول (MW)

$m_2$ : ظرفیت DG دوم (MW)

$C_{inv1}$ : هزینه سرمایه گذاری DG اول ( $\frac{\$}{MW}$ )

$C_{inv2}$ : هزینه سرمایه گذاری DG دوم ( $\frac{\$}{MW}$ )

معکوس بازه زمانی در نظر گرفته شده را با عنوان  $Rev$  بیان می شود که رابطه آن در معادله (۸) است. نرخ نزول<sup>۲</sup> که با  $d$  نمایش داده شده، عبارت است از نرخ کاهش ارزش سرمایه برای یک سال نسبت به سال بعد و  $T$  عبارت است از زمان پیش رو [۹].

$$Rev = \frac{(1+d)^T - 1}{d(1+d)^T} \quad (8)$$

محدودیت ها: در Matpower توان تولیدی واقعی در شین اسلک نامعلوم در نظر گرفته می شود و اجازه می دهد تا سامانه قیود آمده در معادله های (۹ و ۱۰) را ارضاء کند. در معادله (۱۰)  $K$  شماره باس مورد نظر و  $V$  ولتاژ آن است.

$$P_{Demand}^{Total} + P_{Loss}^{Total} = P_{Generation}^{Total} \quad (9)$$

$$V_{Kmin} < V_K < V_{Kmax} \quad (10)$$

سایر قیود عبارت است از: محدودیت تولید توان (معادله ۱۱) و محدودیت میزان توان واقعی بر روی هر باس بار (معادله ۱۲).

$$P^{Total} \leq P_{max}^{Total} \quad (11)$$

$$P^K \leq P_{max}^K \quad (12)$$

#### ۴-۲. مدل سازی سامانه

برای واقعی تر شدن طرح، DG های به کار رفته توربین بادی در نظر گرفته شده اند و فرض شده است که تنها توان اکتیو را به شبکه تزریق می کنند. با توجه به عدم قطعیت و ثابت نبودن مقدار توان خروجی، از دو ضریب قیمت برق<sup>۳</sup> و ضریب درخواست توان<sup>۴</sup> بهره برده شده است [۱۰].

<sup>1</sup> Operation and Maintenance (O&M)

<sup>2</sup> Discount Rate

<sup>3</sup> Price Level Factor (PLF)

<sup>4</sup> Demand Level Factor (DLF)

<sup>5</sup> Latin Hypercube Sampling (LHS)

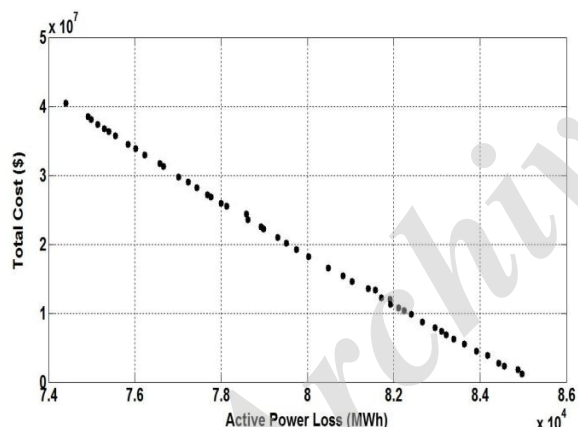
<sup>6</sup> Weibull Distribution

هزینه منابع تولید پراکنده نیز خود به دو دسته تقسیم می‌شود که عبارت است از: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه نگهداری و عملکرد در طول دوره ۵ ساله برنامه‌ریزی.

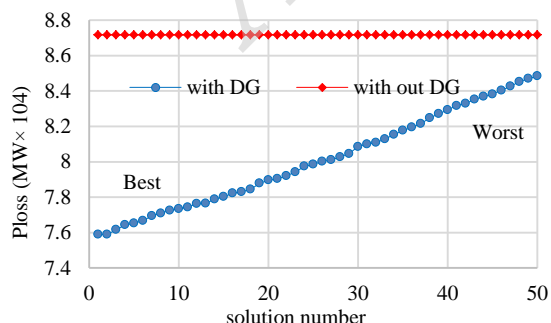
به منظور اعمال روش مورد نظر و به دست آوردن نتایج حاصله، یک سامانه توزیع شعاعی ۹ باسه را در نظر گرفته شده که شامل یک ایستگاه فشار قوی kv ۳۲/۱۳۲ است که ۸ شین بار را تغذیه می‌کند. دیاگرام خطی و داده‌های مربوط به این شبکه در پیوست (۱) بیان شده است.

نمودار جبهه پارتو در شکل (۷) رسم شده و به ازای هر یک از راه‌حل‌ها (اعضای جمعیت) تلفات و هزینه سامانه محاسبه شده است. از آنجا که ۵۰ عضو جمعیت وجود دارد، هر یک از آن‌ها را یک راه‌حل برای مسئله تعریف می‌شود و تأثیرشان را بر پارامترهای مختلف سامانه مشاهده می‌شود.

تلفات شبکه برای بازه زمانی ۵ سال و در حالت عدم استفاده از DGها برابر با  $10^4 \times 87164$  MWh است. این مقدار به ازای سناریوهای مختلف قرار دادن DGها تغییر می‌کند (شکل (۸)).



شکل ۷. نمودار جبهه پارتو شبکه ۹ باسه IEEE



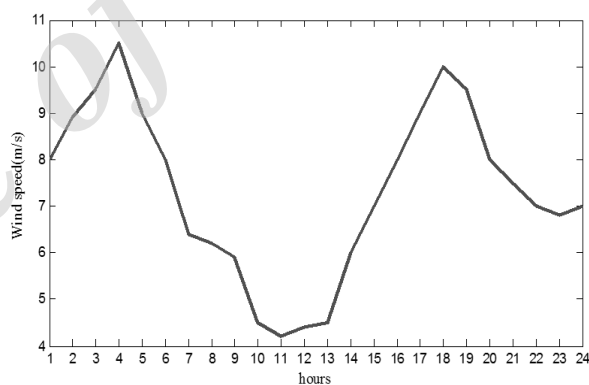
شکل ۸. تلفات شبکه به ازای راه‌حل‌های مختلف سامانه ۹ باسه

در شکل (۸) تأثیر راه‌حل‌های مختلف بر تلفات شبکه در سامانه ۹ باسه نمایش داده شده است. اعضای جمعیت به ترتیب سودمندی‌شان مرتب شده‌اند به طوری که اولین راه‌حل بهترین

خروجی توربین را مدل‌سازی کرد. برنامه‌ریزی بر روی توان خروجی توربین، وابستگی زیادی به سرعت باد در آن منطقه دارد. با کمک تابع توزیع احتمالی<sup>۱</sup> که در مراجع [۱۴ و ۱۵] معرفی شده است، می‌توان سرعت باد را مدل‌سازی کرد و روابط بین سرعت باد و توان خروجی توربین را در رابطه (۱۷) بیان کرد. شکل (۶) نیز نمودار تغییرات سرعت باد در یک شبانه‌روز را نشان می‌دهد.

در رابطه (۱۷)  $P_{i,r}^{wg}$  برابر با توان نامی توربین،  $P_{i,t,h}^{wg}$  توان تولیدی توربین بادی،  $v_{out}^{cut}$  حد بالای سرعت باد،  $v_{in}^{cut}$  حد پایین سرعت باد و  $v_{rated}$  سرعت نامی باد است.

$$P_{i,t,h}^{wg} = \begin{cases} 0 & \text{if } v \leq v_{in}^{cut} \text{ or } v \geq v_{out}^{cut} \\ P_{i,r}^{wg} \frac{v - v_{in}^{cut}}{v_{rated} - v_{in}^{cut}} & \text{if } v_{in}^{cut} \leq v \leq v_{rated} \\ P_{i,r}^w & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$



شکل ۶. نمودار تغییرات سرعت باد در یک شبانه‌روز

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. نتایج به دست آمده از سامانه ۹ باسه

برای شروع شبیه‌سازی، ابتدا دو تابع هدفی را که در نظر گرفته شده بود، مجدد معرفی می‌شود.

۱- تلفات شبکه

۲- هزینه منابع تولید پراکنده

تلفات شبکه پس از مدل‌سازی بار و انجام پخش بار به روش نیوتون-رافسون برای ما مشخص می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۴) و الگوی داده شده، به تعداد اعضای جمعیت و بعد از هر بار تکرار، مجدد پخش بار گرفته می‌شود که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

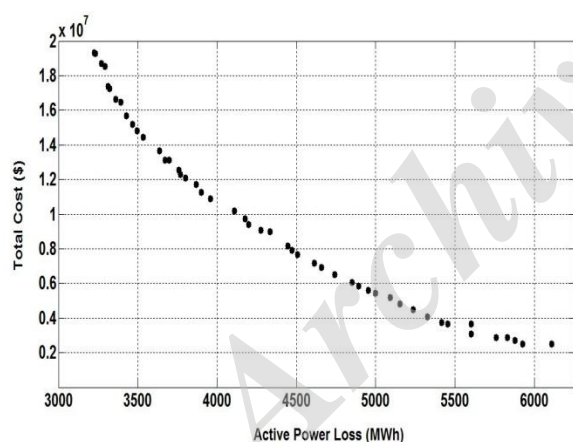
<sup>۱</sup> Probability Density Function (PDF)

### ۳-۲. نتایج به‌دست آمده از سامانه ۳۳ باسه

در این قسمت به بررسی سامانه ۳۳ باسه IEEE پرداخته می‌شود. مدل‌سازی بار، توابع هدف و تعداد DG‌های به‌کار رفته مشابه سامانه ۹ باسه است. دیاگرام تک‌خطی و اطلاعات مربوط به این سامانه در پیوست (۲) گفته شده است.

سامانه مورد بحث دارای سطح ولتاژ  $12/66 \text{ Kv}$  می‌باشد همچنین ظرفیت فیدر تغذیه نیز برابر با  $8 \text{ MW}$  است. مشابه بخش قبل در اینجا نیز به بررسی و تحلیل نتایج راه‌حل‌های مختلف بر روی سامانه مورد نظر پرداخته می‌شود. تلفات شبکه برای بازه زمانی ۵ سال و در حالت عدم استفاده از DG‌ها برابر با  $6/5364 \times 10^7 \text{ MWh}$  است. این مقدار به ازای سناریوهای مختلف قرار دادن DG‌ها تغییر می‌کند. نمودار جبهه پارتو این سامانه در شکل (۱۱) آورده شده است.

مشابه شکل (۸) در اینجا نیز به ازای هر یک از راه‌حل‌ها تلفات سامانه محاسبه شده است (شکل ۱۲). بدیهی است که به ازای راه‌حل‌هایی که تلفات سامانه کمتر می‌شود، مجموع هزینه عملکرد و سرمایه‌گذاری بیشتر خواهد شد.



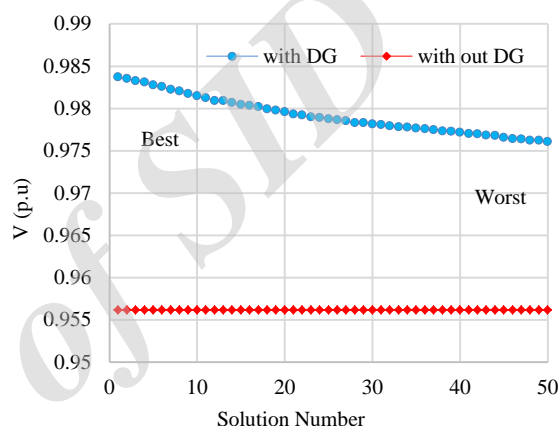
شکل ۱۱. نمودار جبهه پارتو سامانه ۳۳ باسه

در شکل (۱۲) نیز راه‌حل‌ها به ترتیب کارایی‌شان مرتب گشته‌اند، به طوری که اولین راه بیشترین و آخرین راه‌حل کمترین تأثیر را بر روی کاهش تلفات سامانه داشته است.

میانگین پروفیل ولتاژ کل سامانه در بازه زمانی ۵ ساله برابر است با  $0/94633$  پرونیت. در شکل (۱۳) تأثیر راه‌حل‌های مختلف بر پروفیل ولتاژ شبکه نشان داده شده است. مشابه شکل (۱۲)، در اینجا نیز راه‌حل‌ها به ترتیب بهینه بودن مرتب شده‌اند به طوری که اولین راه‌حل بیشترین و آخرین راه‌حل کمترین تأثیر را بر پروفیل ولتاژ شبکه داشته است.

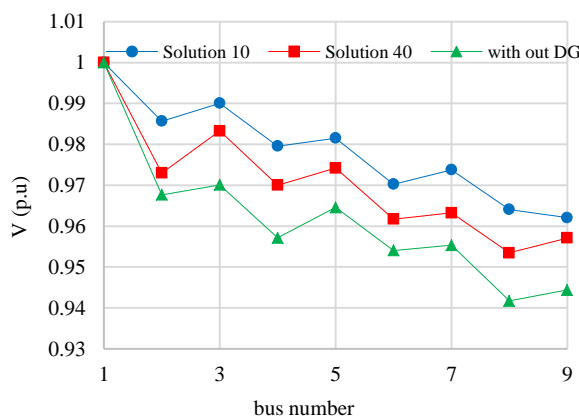
آن‌ها و آخرین راه‌حل ضعیف‌ترین آن‌ها در کاهش تلفات شبکه می‌باشد. بدیهی است که به ازای راه‌حل‌هایی که تلفات سامانه را بیشتر کاهش می‌دهند، مجموع هزینه‌های راه‌اندازی و سرمایه‌گذاری بیشتر خواهد شد (شکل ۷).

میانگین پروفیل ولتاژ کل سامانه در بازه زمانی ۵ ساله برابر است با  $0/95614$  پرونیت. در شکل (۹) تأثیر راه‌حل‌های مختلف بر پروفیل ولتاژ شبکه نشان داده شده است. مشابه شکل (۸)، در اینجا نیز راه‌حل‌ها به ترتیب سودمندی‌شان مرتب شده‌اند به طوری که اولین راه‌حل و آخرین راه‌حل به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را در بهبود پروفیل ولتاژ شبکه داشته‌اند.



شکل ۹. میانگین ولتاژ کل سامانه به ازای راه‌حل‌های مختلف در سامانه ۹ باسه

با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) این نتیجه حاصل می‌شود: راه‌حل‌هایی که تلفات سامانه را بیشتر کاهش داده‌اند، در بهبود پروفیل ولتاژ نیز عملکرد بهتری داشتند. به عنوان نمونه در شکل (۱۰) میانگین پروفیل ولتاژ دو راه‌حل انتخابی ۱۰ و ۴۰ را برای یک شبانه‌روز و به صورت مجزا برای هر باس باهم مقایسه می‌شود. با توجه به شکل (۹) انتظار داریم تا بهبود پروفیل ولتاژ در هر یک از باس‌ها به ازای راه‌حل ۱۰، بهتر از راه‌حل ۴۰ باشد. نتایج حاصله صحت این ادعا را نشان می‌دهد.



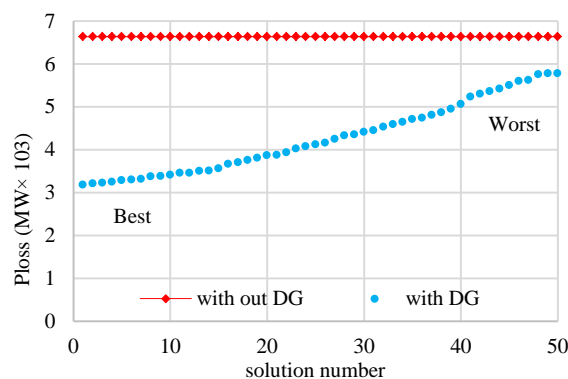
شکل ۱۰. مقایسه تأثیر دو راه‌حل انتخابی بر پروفیل ولتاژ سامانه ۹ باسه

#### ۴. نتیجه‌گیری

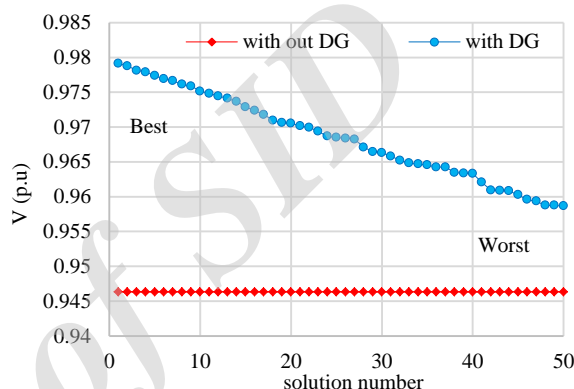
امروزه به دلیل پیچیدگی سامانه‌های قدرت و حجم زیاد محاسبات مربوط به اینگونه شبکه‌ها، استفاده از روش‌های ابتکاری در حل مسائل سامانه‌های قدرت امری متداول و مرسوم است. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی دقیق بار و در نظر گرفتن توربین بادی به عنوان یک منبع تولید پراکنده و به کمک بهره‌گیری از روش NSGA-II، بر روی دو سامانه ۹ و ۳۳ باسه IEEE جایابی بهینه DGها اعمال شده است. روش ارائه شده از آنجا که به صورت چند هدفه است و به طور هم‌زمان کمینه‌سازی هزینه و تلفات را انجام می‌دهد، نسبت به روش الگوریتم تک هدفه دقت و سرعت بیشتری دارد. نتایج به دست آمده از این روش برای هر دو سامانه باحالتی که DGها در شبکه قرار ندارند، مقایسه شده است و توانمندی این الگوریتم در کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ نشان داده شده است به طوری که در بحث کاهش تلفات به ازای بهترین راه‌حل در سامانه ۹ و ۳۳ باسه به ترتیب شاهد ۱۳٪ و ۵۲٪ کاهش تلفات شبکه هستیم. همچنین روش معرفی شده به دلیل جامع بودن و انعطاف‌پذیری آن در پیاده‌سازی می‌تواند برای طرح‌ریزی سایر منابع انرژی نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان یک پیشنهاد برای کارهای آینده، می‌توان نتایج حاصل از روش ذکر شده در این مقاله را با یک روش ابتکاری دیگر مقایسه کرد و به تحلیل کارآمدی هر یک از روش‌ها پرداخت و نقاط ضعف و قوت هر یک را برشمرد

#### ۵. مراجع

- [1] Ruiz-Romero, S.; Colmenar-Santos, A. "Integration of Distributed Generation in the Power Distribution Network: The Need for Smart Grid Control Systems, Communication and Equipment for a Smart City"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014, 38, 223-234.
- [2] Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II"; *IEEE Trans. Evolutionary Computation* 2002, 6, 182-197.
- [3] Matlab Global Optimization Toolbox User's Guide (r2014b), [online]. Available: <http://www.mathworks.co.uk/help/toolbox/gads/>
- [4] Deb, K. "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms"; Singapore: John Wiley & Sons, 2001, 171-180.
- [5] King, R. T. F. A.; Rughooputh, H. C. S. "Elitist Multiobjective Evolutionary Algorithm for Environmental/Economic Dispatch"; *Congress on Evolutionary Computation* 2003, 2, 1108-1114 & 2, 8-12.
- [6] Kannan, S.; Baskar, S.; McCalley, J. D.; Murugan, P. "Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning"; *IEEE Trans. Power Systems* 2009, 24, 454-461.
- [7] Begovic, Zh. L.; Xianzhong Duan, M. M. "Reactive Power Planning Using a Two Level Optimizer Based on Multi-Objective Algorithms"; *15<sup>th</sup> Int. Conference on Intelligent*



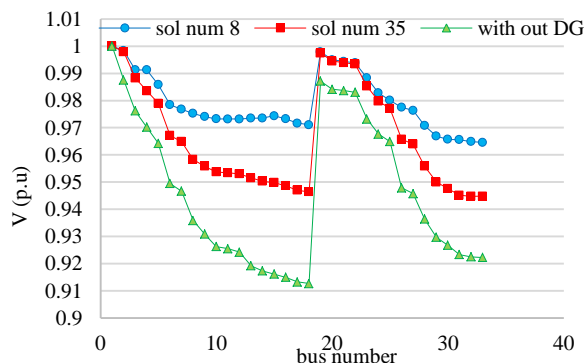
شکل ۱۲. تلفات شبکه به ازای راه‌حل‌های مختلف سامانه ۳۳ باسه



شکل ۱۳. میانگین ولتاژ کل سامانه به ازای راه‌حل‌ها مختلف سامانه ۳۳ باسه

با مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به این نتیجه رسیده می‌شود: راه‌حلی که تلفات سامانه را بیشتر کاهش داده‌اند، در بهبود پروفیل ولتاژ نیز عملکرد بهتری داشتند.

به عنوان نمونه در شکل (۱۴) میانگین پروفیل ولتاژ دو راه‌حل انتخابی ۸ و ۳۵ را برای یک شبانه‌روز و به صورت مجزا برای هر باس باهم مقایسه می‌شود. با توجه به شکل (۱۳) انتظار داریم تا بهبود پروفیل ولتاژ در هر یک از باس‌ها به ازای راه‌حل ۸، بهتر از راه‌حل ۳۵ باشد. نتایج حاصله بیانگر درستی محاسبات است.



شکل ۱۴. مقایسه تأثیر دو راه‌حل انتخابی بر پروفیل ولتاژ سامانه ۳۳ باسه



اطلاعات باس بارها:

شماره شین	دامنه ولتاژ (pu)	زاویه ولتاژ (pu)	بار اکتیو (MW)	بار راکتیو (MVar)
۱	۱	۱	۰	۰
۲	۱	۰	۱۱/۲	۰
۳	۱	۰	۶	۰
۴	۱	۰	۷	۰
۵	۱	۰	۸/۸	۰
۶	۱	۰	۵	۰
۷	۱	۰	۸/۸	۰
۸	۱	۰	۸/۷	۰
۹	۱	۰	۱۰/۲	۰

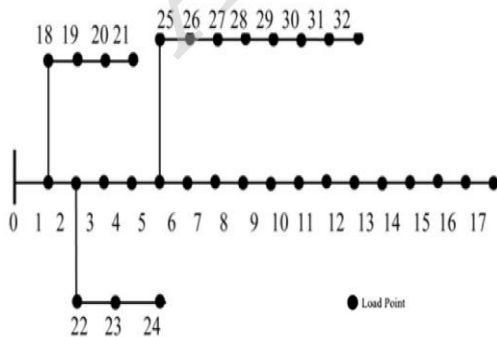
اطلاعات خط:

پاس شروع	پاس انتها	p.u مقاومت	p.u راکتانس
۱	۳	۰/۱۲۸۶	۰/۱۳۷۷
۳	۷	۰/۲۵۵۳	۰/۵۰۵۱
۱	۲	۰/۱۸۳۷	۰/۳۶۷۳
۲	۶	۰/۲۵۷۱	۰/۵۰۵۱
۱	۵	۰/۱۵۶۱	۰/۱۵۶۱
۵	۹	۰/۱۹۲۸	۰/۳۶۷۳
۱	۴	۰/۲۰۷۵	۰/۴۱۳۲
۴	۸	۰/۲۲۰۴	۰/۴۵۹۱

پیوست (۲):

اطلاعات شبکه ۳۳ باسه IEEE در ادامه آورده شده است.

دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ باسه (تمامی شین ها به جز شین شماره صفر، شین بار هستند).



System Applications to Power Systems 2009, 1-6, 8-12

[8] Abapour, S.; Zare, K.; Mohammadi-Ivatloo, B. "Evaluation of Technical Risks in Distribution Network Along with Distributed Generation Based on Active Management"; IET Gener. Transm. Distrib. 2014, 8, 609-618.

[9] Abapour, S.; Zare, K.; Mohammadi-Ivatloo, B. "Dynamic Planning of Distributed Generation Units in Active Distribution Network"; IET Gener. Transm. Distrib. 2015, 8, 12.

[10] Mazidi, M.; Zakariazadeh, A.; Jadid, Sh.; Pierluigi, S. "Integrated Scheduling of Renewable Generation and Demand Response Programs in a Microgrid"; Energy Convers. Manag. 2014, 86, 1118-1127.

[11] Willis L. "Power Distribution Planning"; Second Edition, ABB, Inc. Raleigh, North Carolina, U.S.A. 2005

[12] Cartaa, J. A.; Ramírezb, P.; Velázquezc, S. "A Review of Wind Speed Probability Distributions Used in Wind Energy Analysis: Case studies in the Canary Islands"; Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009, 13, 933-955

[13] Naci Celik, A. "A Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Rayleigh Models at The Southern Region of Turkey"; Renewable Energy 2004, 29, 593-604

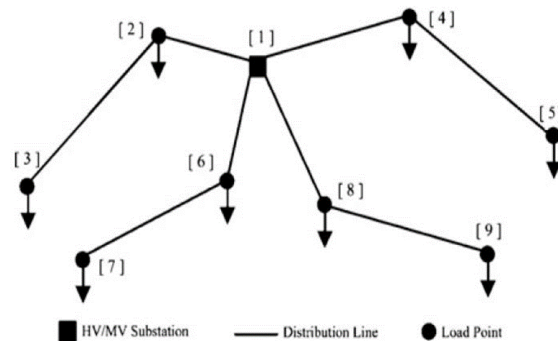
[14] Zimmerman, R. D.; Murillo-Sánchez, C. E.; Thomas, R. J. "Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education"; IEEE Trans. Power Systems 2011, 26, 12-19,

[15] Shu, Zh.; Jirutitijaroen, P. "Latin Hypercube Sampling Techniques for Power Systems Reliability Analysis with Renewable Energy Sources"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 2066 - 2073.

۶. پیوست ها

پیوست (۱):

دیاگرام خطی شبکه ۹ باسه (به جز باس اسلک که شین شماره ۱ است، تمام شین ها دارای بار هستند).



شماره شاخه	شین شروع	شین انتها	مقاومت ( $\Omega$ )	راکتانس ( $\Omega$ )	توان اکتیو بار (KW)	توان راکتیو بار (KVar)
۱	۰	۱	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷۰	۱۰۰	۶۰
۲	۱	۲	۰/۴۹۳۰	۰/۲۵۱۱	۹۰	۴۰
۳	۲	۳	۰/۳۶۶۰	۰/۰۱۸۶۴	۱۲۰	۸۰
۴	۳	۴	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۶۰	۳۰
۵	۴	۵	۰/۸۱۹۰	۰/۷۰۷۰	۶۰	۲۰
۶	۵	۶	۰/۱۸۷۲	۰/۶۱۸۸	۲۰۰	۱۰۰
۷	۶	۷	۰/۷۱۱۴	۰/۲۳۵۱	۲۰۰	۱۰۰
۸	۷	۸	۱/۰۳	۰/۷۴	۶۰	۲۰
۹	۸	۹	۱/۰۴۴	۰/۷۴	۶۰	۲۰
۱۰	۹	۱۰	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵۰	۴۵	۳۰
۱۱	۱۰	۱۱	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۶۰	۳۵
۱۲	۱۱	۱۲	۱/۴۶۸۰	۰/۱۵۵۰	۶۰	۳۵
۱۳	۱۲	۱۳	۰/۵۴۱۶	۰/۷۱۲۹	۱۲۰	۸۰
۱۴	۱۳	۱۴	۰/۵۹۱۰	۰/۵۲۶۰	۶۰	۱۰
۱۵	۱۴	۱۵	۰/۷۴۶۳	۰/۵۴۵۰	۶۰	۲۰
۱۶	۱۵	۱۶	۱/۲۸۹۰	۱/۷۲۱۰	۶۰	۲۰
۱۷	۱۶	۱۷	۰/۷۳۲۰	۰/۵۷۴۰	۹۰	۴۰
۱۸	۱	۱۸	۰/۱۶۴۰	۰/۱۵۶۵	۹۰	۴۰
۱۹	۱۸	۱۹	۱/۵۰۴۲	۱/۳۵۵۴	۹۰	۴۰
۲۰	۱۹	۲۰	۰/۴۰۹۵	۰/۴۷۸۴	۹۰	۴۰
۲۱	۲۰	۲۱	۰/۷۰۸۹	۰/۹۳۷۳	۹۰	۴۰
۲۲	۲	۲۲	۰/۴۵۱۲	۰/۳۰۸۳	۹۰	۵۰
۲۳	۲۲	۲۳	۰/۸۹۸۰	۰/۷۰۹۱	۴۲۰	۲۰۰
۲۴	۲۳	۲۴	۰/۸۹۶۰	۰/۷۰۱۱	۴۲۰	۲۰۰
۲۵	۵	۲۳	۰/۲۰۳۰	۰/۱۰۳۴	۶۰	۲۵
۲۶	۲۵	۲۶	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷	۶۰	۲۵
۲۷	۲۶	۲۷	۱/۰۵۹۰	۰/۹۳۳۷	۶۰	۲۰
۲۸	۲۷	۲۸	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۰۶	۱۲۰	۷۰
۲۹	۲۸	۲۹	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۵	۱۲۰	۶۰۰
۳۰	۲۹	۳۰	۰/۹۷۴۴	۰/۹۶۳۰	۱۵۰	۷۰
۳۱	۳۰	۳۱	۰/۳۱۰۵	۰/۳۶۱۹	۲۱۰	۱۰۰
۳۲	۳۱	۳۲	۰/۵۰۳۲	۰/۵۳۰۲	۶۰	۴۰