

# ارائه روشی جدید به منظور جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده ترکیبی بادی و خورشیدی در شبکه مشکین شهر توسط الگوریتم (GSA)

فرشید مستوفی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۹۱/۶/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۱/۱۰/۱۰

چکیده:

ترکیب بهینه واحدهای تولید پراکنده در سال های اخیر با هدف بهبود قابلیت اطمینان سیستم های تولید پراکنده و نیز کاهش تلفات در سیستم های توزیع طراحی شده است. در این مقاله، یک الگوریتم بهینه ساز قدرتمند در بهینه سازی مقادیر متغیر مسأله با نام الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) معرفی می شود. تابع هدف مورد مطالعه در این مقاله شامل تلفات توان واقعی، قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی، پروفیل ولتاژ شبکه، اندازه بهینه واحد تولید پراکنده و در نهایت بهبود هزینه احداث نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی است. بنابراین، متغیرهای مسأله دارای قید تأمین مطمئن بار و کمترین هزینه ممکن در طی فرایند بهینه سازی است. به منظور دستیابی به این هدف در این مطالعه، شبکه ۲۰ باسه شهرستان مشکین شهر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم نشان دهنده کاهش تلفات کل سیستم بعد از نصب DG نسبت به حالت بدون DG و بهبود سایر مقادیر متغیر در این شبکه بوده است.

کلمات کلیدی:

جایابی بهینه، قابلیت اطمینان، کاهش تلفات، سیستم ترکیبی، الگوریتم GSA

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اردبیل، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اردبیل، ایران  
f.mostofi@srbiau.ac.ir

## مقدمه

منابع تولیدات پراکنده برای تولید انرژی الکتریکی به طور پراکنده و در نزدیکی محل مصرف در سیستم های الکتریکی به کار گرفته می شوند. رویکرد کنونی شرکت های توزیع نیز به سوی گسترش این طرح به طور گسترده در کشور است. اما بعضاً تولیدات پراکنده به فناوری هایی که از منابع تجدیدپذیر برای تولید برق استفاده می کنند، اطلاق می شود. واحدهای تولید پراکنده توسط مشتری یا تولید کنندگان برق احداث و مستقیماً به شبکه توزیع متصل می شوند. همه منابع تولیدی نصب شده در مکان های خصوصی مانند خانه ها و ادارات نیز جزو این منابع محسوب می شوند.

منابع تولیدات پراکنده در آینده نقش بسیار مهمی در تأمین تقاضای مشترکین در سیستم قدرت خواهند داشت. از این رو، جابجایی بهینه این منابع از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. تعیین مناسب تعداد، مکان، اندازه و نوع منابع تولیدات پراکنده در سیستم قدرت، سبب کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ خطوط انتقال در شبکه توزیع می شود. این منابع تولید انرژی دارای مزایای زیادی می باشند که از جمله آن می توان به افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی، تأمین نیاز مشترکین با کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی رو به اتمام و نیز کاهش اثرات زیست محیطی و آلودگی اشاره کرد. یافتن منابع جدید انرژی از مهمترین دغدغه های بشر در قرن حاضر بوده است و با افزایش توجه در سال های اخیر به منابع انرژی های تجدیدپذیر، انرژی های بادی و خورشیدی، مسائل مربوط به آن نیز اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. طبق پیش بینی ها، استفاده از انرژی بادی و خورشیدی، بیشترین پیشرفت را در بین منابع دیگر انرژی داشته ولی با این حال، غیر قابل پیش بینی بودن پارامترهای وزش باد و تابش خورشید، بزرگترین ضعف آن به عنوان یک منبع انرژی است. توان تولیدی هر سیستم تبدیل انرژی خورشیدی، به شدت تابش خورشید بستگی دارد، لذا هرگونه تلاشی برای پیش بینی توان تولیدی به وسیله آنها، نیازمند آگاهی از این پارامتر است. بنابر این، توانایی پیش بینی شدت تابش خورشید در طول سال الزامی است. از جمله سایر مزایای تخمین پارامترهای خورشید، توانایی کنترل و تنظیم پنل های خورشیدی برای استحصال حداکثر توان ممکن از شدت تابش خورشید است. به منظور رفع این مشکلات، در این مقاله انرژی حاصل از توربین های بادی با سیستم خورشیدی ترکیب شده که علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان DG، هزینه احداث واحد DG نیز به دلیل ترکیب این دو واحد دارای مقدار کمتری نسبت به حالت فقط خورشیدی یا فقط بادی است. انرژی حاصل از خورشید در اوقات روز قابل دسترس است و انرژی بادی نیز جز در مواقع وزش حداقل سرعت باد به منظور چرخش پره های توربین امکان پذیر نیست. لذا سیستم پیشنهادی با هدف استحصال حداکثر توان ممکن از انرژی های تجدیدپذیر تحت شرایط جوی مختلف طراحی شده است.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مکان یابی انواع واحدهای تولیدات پراکنده در شبکه های توزیع انجام شده است که در آنها کاهش هزینه های مرتبط با تلفات، قابلیت اطمینان و هزینه احداث واحدهای تولیدی به عنوان هدف طراحی، مورد نظر بوده است [۱۶ و ۱۷ و ۱۸]. در [۸]، مسأله جابجایی واحدهای تولید پراکنده در فیدرهای شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توسط

الگوریتم META-PSO حل شده است. در [۱۰]، ضمن بررسی تأثیر واحدهای DG روی تلفات اهمی و ظرفیت سیستم توزیع، الگوریتمی برای یافتن پاسخ تقریبی مکان واحدهای DG روی خطوط به منظور کاهش تلفات سیستم پیشنهاد شده است. مسأله جایابی واحدهای DG روی فیدرها در قالب بهینه سازی چند منظوره در [۱۳] مدل سازی و حل شده است. روش تحلیلی نیز جهت مکان یابی واحدهای DG با هدف کاهش تلفات در [۱۸] ارائه شده است. مکان یابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن خطای تجهیزات و عدم قطعیت در تولید توسط شبیه سازی مونت کارلو در [۹] انجام گرفته است.

در این مقاله، داده‌های مربوط به شدت تابش خورشیدی و شدت وزش باد بر اساس توان قابل استحصال از پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی در مسأله بهینه‌سازی اعمال شده است و سپس با توجه به شاخص‌های احتمالی، نتایج حاصله توسط الگوریتم GSA و پخش بار رفت و برگشتی در شبکه توزیع مورد مطالعه، انجام و مکان و تعداد پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی، با در نظر گرفتن اهداف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ و قابلیت اطمینان سیستم و اندازه و ظرفیت واحد تولید پراکنده و نهایتاً کاهش هزینه نصب و بهره‌برداری از سیستم ترکیبی تولید پراکنده بادی و خورشیدی در شبکه مورد مطالعه، انجام شده است. قیود در نظر گرفته شده در این مسأله، ولتاژ و جریان باس‌ها و محدوده تولید منابع تولید پراکنده در هر باس می‌باشد.

### تعریف مسأله

در این قسمت، فرمول بندی ریاضی جهت تعیین مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده ترکیبی بادی و خورشیدی، در مکان‌های کاندید در شبکه توزیع ارائه شده است. هدف اصلی در این مقاله، تعیین محل و ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده با در نظر گرفتن پنج هدف کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود قابلیت اطمینان سیستم، اندازه بهینه واحد DG و هزینه احداث نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی می‌باشد [۱۲]. هر یک از این اهداف تکی با استفاده از ضرایب وزنی به یک تابع هدف منفرد تبدیل شده اند. این ضرایب با استفاده از روش AHP تعیین و در تابع هدف مسأله اعمال شده اند. مدل AHP اولین بار توسط (Thomas L. Saaty) در دهه ۱۹۷۰ به کار گرفته شد. AHP یک روش ساده محاسباتی بر پایه عملیات اصلی روی ماتریس می‌باشد که با ایجاد سلسله مراتب مناسب و پردازش گام به گام و ساخت ماتریس‌های تطبیقی در سطوح مختلف، مقادیر ویژه آن را محاسبه کرده و در بردار ضرایب وزنی نهایی، اهمیت نسبی هر گزینه با توجه به هدف رأس سلسله مراتب تعیین می‌شود. مرحله اول محاسبه ضرایب وزنی، ارزش دهی به معیارهای مسأله بر حسب اولویت می‌باشد. این مقادیر به صورت اولویت‌های ۵ گانه در این تحقیق در رابطه (۱) اعمال می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & \dots & W_1/W_5 \\ \dots & \dots & \dots \\ W_5/W_1 & \dots & W_n/W_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در مرحله دوم، ضریب سازگاری توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۲)$$

در رابطه فوق،  $RI$  شاخص تصادفی بوده و  $CI$  توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CI = \frac{L - N}{N - 1} \quad (۳)$$

$$L = \frac{1}{N} \left( \sum_i^N \left( \frac{WA_i}{W_i} \right) \right) \quad (۴)$$

با توجه به روابط فوق، مقدار ضرایب وزنی در این مسأله بر حسب ارجحیت محاسبه و به ترتیب اهمیت برابر با  $W_1=0/3877$ ،  $W_2=0/2186$ ،  $W_3=0/1943$ ،  $W_4=0/1564$  و  $W_5=0/043$  به دست آمده است. به طور کلی، تابع هدف مسأله به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\min F = \sum_{m=1}^5 W_m \cdot F_m \quad (۵)$$

### تلفات توان

تلفات توان همواره یکی از اهداف مهم در مطالعات مربوط به تولیدات پراکنده می‌باشد و در اینجا نیز به عنوان مهمترین هدف تکی در نظر گرفته شده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_i = \sum_{K=1}^{BR} P_{LK} + \sum_{K=1}^{BR} P_{loss,k} \quad (۶)$$

$$Q_i = \sum_{K=1}^{BR} Q_{LK} + \sum_{K=1}^{BR} Q_{loss,K} \quad (۷)$$

که در آن،  $BR$  مجموع تمام گره‌هایی است که بعد از شاخه  $i$  قرار دارند.  $P_{LK}$  و  $Q_{LK}$  توان اکتیو و راکتیو بار در گره  $K$  ام،  $P_i$  و  $Q_i$ ، توان اکتیو و راکتیو تغذیه کننده باس  $i$  ام و  $P_{loss,k}$  و  $Q_{loss,K}$  تلفات توان اکتیو و راکتیو در شاخه  $k$  ام می‌باشند که توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_{loss,K} = \frac{P_K^2 + Q_K^2}{V_K^2} (r_K) \quad (۸)$$

$$Q_{\text{loss},K} = \frac{P_K^2 + Q_K^2}{V_K^2} (X_K) \quad (۹)$$

در روابط فوق،  $X$  و  $r$  به ترتیب مقاومت و راکتانس شاخه  $k$  ام می‌باشند. بنابراین، تابع مربوط به تلفات سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$F_1 = (w_1) \cdot S_{ik} \quad (۱۰)$$

### قابلیت اطمینان سیستم

برای نشان دادن نمایی ملموس تر از وضعیت کل شبکه، از شاخص‌های قابلیت اطمینان مرتبط با سیستم که رفتار کل فیدر را نشان می‌دهد، استفاده شده است. تعدادی از این شاخص‌ها که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از:

#### شاخص متوسط دفعات خاموشی سیستم (SAIFI):

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \cdot N_i}{\sum N} \quad (۱۱)$$

در این رابطه،  $\lambda_i$  نرخ وقوع خطا در شین  $i$  ام و  $N$  تعداد روزهای سال در این مقاله در نظر گرفته شده است.

#### شاخص متوسط مدت زمان خاموشی (SAIDI):

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا،  $U_i$  متوسط زمان خاموشی سالیانه برحسب ( $h/yr$ ) می‌باشد.

#### شاخص متوسط انرژی تامین نشده (AENS):

$$AENS = \frac{ENS}{\sum N_i} \quad (۱۳)$$

که در آن،  $ENS$  میزان انرژی تامین نشده سیستم برحسب ( $KWh/yr$ ) می‌باشد. ضریب وزنی ( $w_2$ ) که مربوط به قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد، به سه زیر معیار ( $w_{2_1}$ )، ( $w_{2_2}$ ) و ( $w_{2_3}$ ) برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه تقسیم می‌شود. بنابراین، شاخص مربوط به قابلیت اطمینان سیستم توسط رابطه زیر مدل سازی می‌شود:

$$F_2 = (w_2).(\text{Reliability Indices})$$

$$F_{2_1} = (w_{2_1}).\left(\frac{SAIFI_i}{SAIFI_{base}}\right), F_{2_2} = (w_{2_2}).\left(\frac{SAIDI_i}{SAIDI_{base}}\right), F_{2_3} = (w_{2_3}).\left(\frac{AENS_i}{AENS_{base}}\right) \quad (14)$$

در رابطه بالا،  $SAIFI_i$  میزان دفعات خاموشی پس از نصب DG و  $SAIFI_{base}$  میزان دفعات خاموشی برای شبکه اولیه بدون نصب DG است. سایر شاخص‌های رابطه بالا نیز به همین صورت می‌باشند [۱۷]. این شاخص‌ها یکبار قبل از نصب DG و با انجام پخش بار در شبکه مورد مطالعه محاسبه و بار دیگر و پس از نصب DG در باس مورد نظر، توسط نتایج حاصله از پخش بار برگشتی محاسبه و نتایج بدست آمده در جدول (۲) نشان داده شده است.

### اندازه DG

اندازه و ظرفیت بهینه واحد تولید پراکنده ترکیبی توسط شاخص زیر قابل محاسبه است:

$$F_3 = (w_3). \frac{P_{DG_{i,j}}}{\sum_{j=1}^{N_p} P_{load,j}} \quad (15)$$

که در آن،  $P_{DG_{i,j}}$  توان منصوبه در باس  $j$  برای  $i$  امین شاخه،  $P_{load,j}$  توان اکتیو نقطه بار  $j$  ام و  $N_p$  تعداد کل نقاط بار است [۷].

### پروفیل ولتاژ شبکه

تابع  $F_4$ ، شاخص پروفیل ولتاژ بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_4 = (w_4). \sum_{i=1}^n (1 - |V_i|)^2 \quad (16)$$

در این رابطه،  $V_i$  ولتاژ باس  $i$  ام است [۱۴].

### هزینه بهره برداری سیستم ترکیبی

تابع  $F_5$ ، شاخص در نظر گرفته شده برای هزینه کل سیستم ترکیبی بادی و خورشیدی است و توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_5 = (w_5). \left(\frac{C_{DG}}{C_{DG_T}}\right) \quad (17)$$

$$C_{DG} = \sum_S NPC(S) = N \times (\text{Capital Cost} + (\text{Re placement Cost} \times k)) + (O \& M \text{ Cost} \times \frac{1}{CRF(ir, \pi)}) \quad (18)$$

که در آن، بردار  $S$  برابر  $S = \{Photovoltaic, Wind Turbine, Inverter\}$ ،  $C_{DG_T}$  هزینه پایه بوده و برابر

$C_{DG_T} = 10^6$  (\$) بوده و  $CRF$  ضریب بازگشت سرمایه و توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$CRF(ir, R) = \frac{ir(1+ir)^R}{(1+ir)^R - 1} \quad (19)$$

که  $ir$  نرخ تنزیل و  $R$  طول عمر پروژه است [۱۲].

### قیود مسأله

قیود مربوط در مسأله به صورت زیر در شبیه سازی سیستم اعمال شده‌اند:

- قید توازن توان

$$P_{Stack} + \sum_{i=1}^N P_{DG_i} = \sum P_{D_i} + P_L \quad (20)$$

- قیود مربوط به توان‌های اکتیو و راکتیو

$$\begin{aligned} Q_{DG_i}^{\min} \leq Q_{DG_i} \leq Q_{DG_i}^{\max} \\ P_{DG_i}^{\min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{\max} \end{aligned} \quad (21)$$

- قید تلفات

$$\sum Loss_k(withDG) \leq \sum Loss_k(withoutDG) \quad (22)$$

- قیود مربوط به قابلیت اطمینان سیستم

$$\begin{aligned} \sum SAIDI_k(withDG) \leq \sum SAIDI_k(withoutDG) \\ \sum SAIFI_k(withDG) \leq \sum SAIFI_k(withoutDG) \\ \sum AENS_k(withDG) \leq \sum AENS_k(withoutDG) \end{aligned} \quad (23)$$

- قید محدودیت تعداد پنل‌های فتوولتائیک (PV) و توربین‌های بادی (WT)

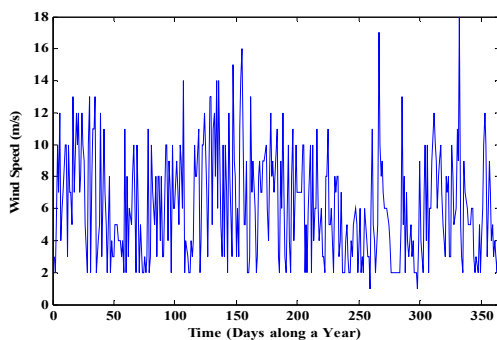
$$\begin{aligned} N_{PV}^{\min} \leq N_{PV} \leq N_{PV}^{\max} \\ N_{WT}^{\min} \leq N_{WT} \leq N_{WT}^{\max} \end{aligned} \quad (24)$$

- قید ولتاژ و جریان باس

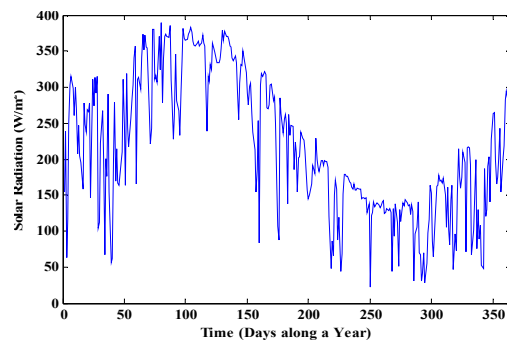
$$\begin{aligned} |V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max} \\ |I_i| \leq |I_i|^{\max} \end{aligned} \quad (25)$$

### مدل سازی نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی

رفتار غیر متناوب شدت تابش خورشیدی سبب شده است نیروگاه های خورشیدی دارای مشخصه ای پیوسته و کنترل پذیر نباشند. نیروگاه های بادی نیز به علت منقطع بودن شدت وزش باد دارای مشخصه ای یکنواخت نمی باشند. در این مقاله، به منظور دستیابی به انرژی یکنواخت توسط منابع تجدید پذیر از ترکیب واحدهای بادی و خورشیدی استفاده می شود. از دیدگاه سیستم قدرت، نیروگاه خورشیدی که شامل چندین پنل فتوولتائیک با ظرفیت های متنوع باشد، یکی از منابع عدم قطعیت در سیستم است [۲]. در مطالعات سیستم در حضور نیروگاه های بادی و خورشیدی ابتدا می بایست توان خروجی آنها مشخص شود. توان خروجی نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی به شدت تابش خورشید و شدت وزش باد در منطقه نصب وابسته است. بنابراین، ابتدا باید شدت تابش خورشید و وزش باد در منطقه مورد مطالعه محاسبه و مدل پنل خورشیدی و بادی مشخص شود [۱۲]. مطالعات این مقاله بر اساس داده های شدت تابش خورشیدی و وزش باد به صورت میانگین روزانه از سازمان انرژی های نو ایران (سانا) برای منطقه مشکین شهر واقع در شمال غرب ایران اخذ و در شبیه سازی سیستم اعمال شده است. نمودارهای مربوط به شدت تابش خورشیدی و شدت وزش باد در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲) نمودار شدت وزش باد در طول سال



شکل ۱) نمودار شدت تابش خورشیدی در طول سال

### سیستم فتوولتائیک

توان خروجی پنل های فتوولتائیک را با استفاده از روابط (۲۶) الی (۲۸) می توان محاسبه کرد که این مدل شامل تأثیرات تابشی خورشید و دمای پنل بر روی توان خروجی آن است [۵]. این روابط در نقطه بیشینه توان خروجی به صورت زیر است:

$$P_{PV} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (26)$$

$$V_{MPP} = V_{MPP,ref} + P_{v,oc} (T_C - T_{C,ref}) \quad (27)$$



$$I_{MPP} = I_{MPP,ref} + I_{SC,ref} \left( \frac{G_T}{G_{ref}} \right) + \dots + P_{I,SC} (T_C - T_{C,ref}) \quad (28)$$

که  $P_{PV}$  توان پنل،  $V_{mpp}$  ولتاژ پتانسیل،  $V_{mpp,ref}$  همان  $V_{mpp}$  در شرایط عملکرد استاندارد (V) ، جریان پنل  $I_{MPP}$  و  $I_{SC,ref}$  جریان اتصال کوتاه در شرایط عملکرد استاندارد است،  $G_T$  میانگین روزانه تابش خورشید ( $W/m^2$ ) و  $G_{ref}$  معادل ( $W/m^2$ ) ۱۰۰۰ برای عملکرد در شرایط استاندارد در نظر گرفته شده است.  $P_{I,SC}$  و  $P_{V,oc}$  به ترتیب ضرایب دمایی برای ولتاژ مدار باز ( $V^p C$ ) و جریان اتصال کوتاه ( $A^p C$ ) هستند.  $T_{C,ref}$  دمای پنل فتوولتائیک در شرایط عملکرد استاندارد است که  $25^\circ C$  در نظر گرفته شده و  $T_C(t)$  دمای عملکرد پنل فتوولتائیک است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_C(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G_T \quad (29)$$

در اینجا،  $T_a(t)$  دمای محیط ( $^p C$ )،  $NOCT$  (دمای سلول در عملکرد نرمال) که برای عملکرد پنل تحت تابش ( $W/m^2$ ) ۵۰۰ و دمای  $20^\circ C$  تعریف شده و معمولاً بین  $40^\circ C$  تا  $46^\circ C$  در نظر گرفته می‌شود. پنل‌های فتوولتائیک که به صورت ردیف‌های سری به هم وصل شده باشند، تعدادشان را با  $N_{PN,S}$  نشان داده و با استفاده از ولتاژ باس بار  $DC$  و ولتاژ نامی پنل تعریف می‌شود و توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$N_{PN,S} = \frac{V_{Bus}}{N_{pv,nom}} \quad (30)$$

که  $N_{pv,nom}$  ولتاژ نامی پنل فتوولتائیک است. باید توجه داشت که  $N_{PN,S}$  هدف مورد بهینه‌سازی نبوده و تعداد پنل‌های اتصال یافته به صورت موازی هدف مورد بهینه‌سازی است.

### توربین بادی

سرعت باد در ارتفاع مرجع  $h_r$ ، به صورت میانگین روزانه برای تعیین سرعت باد برخورد کرده با توربین باد در مدل ارائه شده در زیر به کار می‌رود. مدل توربین باد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V(t) = V_r(t) \cdot \left( \frac{h}{h_r} \right)^\gamma \quad (31)$$

که  $V$  سرعت باد در ارتفاع  $h$  است،  $V_r$  سرعت باد که در ارتفاع  $h$  ثبت گردیده و  $\gamma$  نمای قانونی توان نام دارد که مقدار آن بین ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ است [۵].

این فرمول از محاسبه سرعت باد برای محاسبه توان خروجی توربین و  $P_{WT}(t)$  به کار می‌رود که به صورت زیر است :

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} av^r(t) - bP_R & V_{Ci} < V < V_r \\ P_R & V_r < V < V_{CO} \\ \cdot & \text{other wise} \end{cases} \quad (32)$$

در رابطه فوق،  $a = \left( \frac{P_r}{V_r^3 - V_{Ci}^3} \right)$ ،  $b = \left( \frac{V_{Ci}^3}{V_r^3 - V_{Ci}^3} \right)$ ،  $P_r$ ،  $b$ ،  $V_{CO}$ ،  $V_r$ ،  $V_{Ci}$  به ترتیب سرعت قطع پایین، سرعت نامی و سرعت قطع بالای توربین بادی است.

### مبدل DC/AC

مبدل DC/AC به منظور تبدیل توان DC حاصل از نیروگاه ترکیبی به برق AC با فرکانس مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور بررسی توان مبدل بر حسب توان خروجی نیروگاه ترکیبی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_{inv-load} = (P_{Ren-inv}) \times \eta_{inv} \quad (33)$$

که  $\eta_{inv}$  بازده مبدل می‌باشد.

هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، جایگزینی قطعات و هزینه‌های عملیاتی سیستم، همگی به صورت مقادیر واقعی در جدول (۱) نشان داده می‌شوند.

جدول (۱) مشخصات فنی تجهیزات [۵ و ۱۲]

تجهیزات	هزینه سرمایه‌گذاری (\$/unit)	هزینه جایگزینی (\$/unit)	هزینه سالیانه (تعمیر و نگهداری) (\$/unit-yr)	طول عمر (yr)	توان نامی (KW)	قابلیت دسترسی (%)	بازده (%)
پنل‌های PV	۸۰۰۰۰	۷۵۰۰۰	۵۰۰	۲۰	۱۰	۹۶	--
توربین‌های بادی WG	۶۵۰۰۰۰	۶۴۰۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۶۶۰	۹۶	--
اینورتر DC/AC	۱۹۰۰۰	۱۸۰۰۰	۳۵۰	۱۵	۱۵	۹۹/۸۹	۹۰

### کمینه‌سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)

الگوریتم جستجوی گرانشی، با الهام از قانون جاذبه و نیروی گرانش در طبیعت معرفی و پارامترهای آن به صورت شهودی تنظیم شده‌اند. کارآمدی این الگوریتم در بهینه‌سازی توابع محک استاندارد، برای مسائل تک هدفه به اثبات رسیده است [۱۵]. برای توضیح بیشتر این الگوریتم، سیستمی را به صورت مجموعه‌ای از  $m$  جرم در یک فضای  $n$  بعدی تصور کنید. موقعیت بعد  $d$  از جرم  $i$ ، با  $X_i^d$ ، نشان داده می‌شود.

$$X_i = (X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^n) \quad (34)$$

موقعیت جرم، نقطه‌ای در فضا است که جوابی از مسأله است. در ابتدای تشکیل سیستم، هر جرم به صورت تصادفی در یک نقطه از فضای جستجو قرار می‌گیرد. جرم هر عامل با توجه به تابع هدف تعیین می‌شود:

$$q_i = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (35)$$

$$M_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^m q_i} a \quad (36)$$

که در این رابطه،  $fit_i(t)$  میزان برازندگی جرم  $i$  و  $worst(t)$  و  $best(t)$  به ترتیب نشان دهنده بدترین و بهترین مقدار برازندگی در کل جمعیت، در زمان  $t$  هستند.

سرعت هر جرم برابر مجموع ضربی از سرعت فعلی جرم و شتاب جرم است که طبق رابطه (۳۷) تعریف می‌شود. مکان جدید هر جرم از مجموع مکان فعلی جرم و سرعت جرم به دست می‌آید (رابطه ۳۸).

$$V_i^d(t+1) = rand_i \times V_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (37)$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + V_i^d(t+1) \quad (38)$$

در این روابط،  $rand_i$  و  $rand_j$ ، اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۰،۱] هستند که برای حفظ خاصیت تصادفی بودن جستجو استفاده شده‌اند.

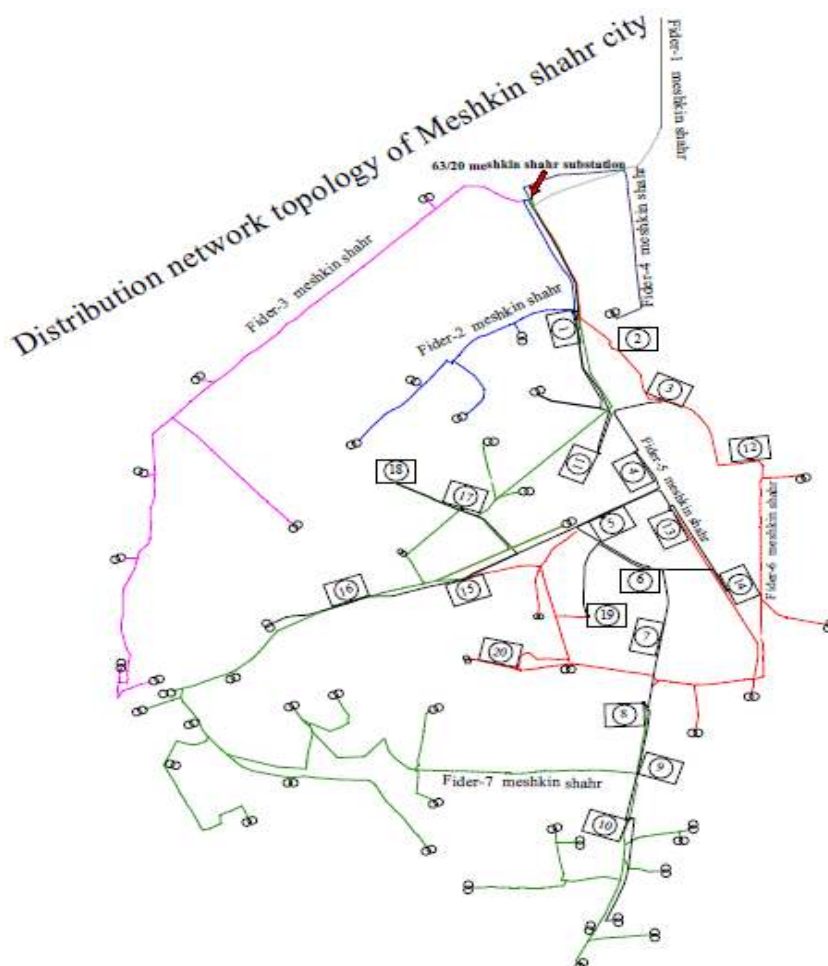
پس از تشکیل سیستم در هر تکرار، اجرام ارزیابی و سپس تغییر مکان هر جرم پس از محاسبه روابط (۳۴) و (۳۸) محاسبه می‌شود.

### نتایج شبیه سازی

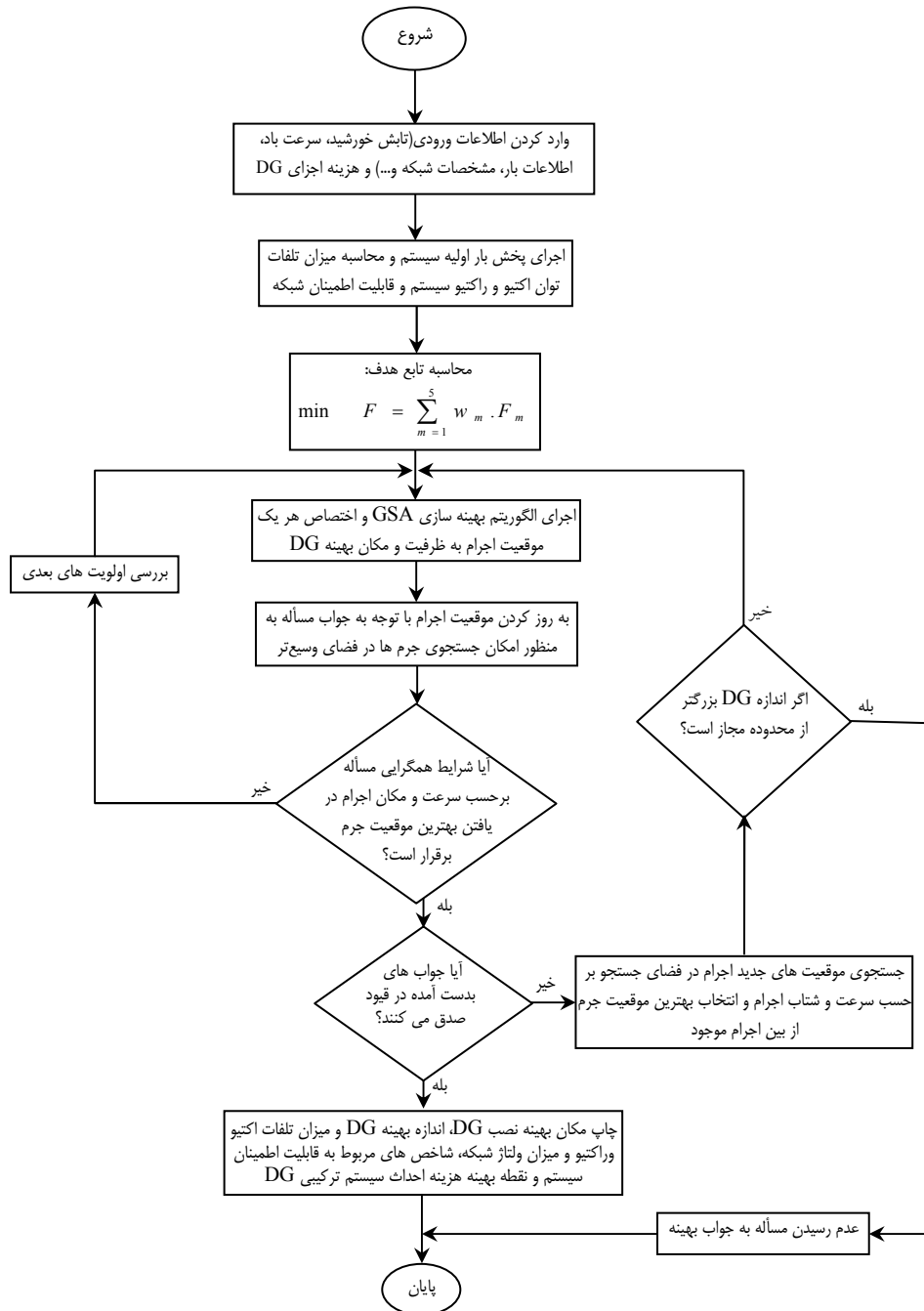
به منظور نشان دادن صحت و دقت الگوریتم GSA، شبکه ۲۰ شینه شعاعی شهرستان مشکین شهر مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته و در شکل (۳) نشان داده شده است. نمودار جریانی الگوریتم GSA به منظور حل مسأله بهینه‌سازی نیز در شکل (۴) ارائه شده است. با در نظر گرفتن میزان تلفات شبکه قبل از نصب DG و نیز افت ولتاژ ناشی از آن در سیستم قدرت، ظرفیت DG انتخابی برای شبکه فوق برابر (۳/۴۳) MW به دست آمده است.

با توجه به اینکه قیمت خرید برق توسط واحد های تجدید پذیر به شبکه در ایران برابر ۰/۰۴۵ دلار بازاری هر کیلووات می باشد، نرخ بازگشت سرمایه با توجه به رابطه (۱۹) محاسبه و برابر مقدار ۷/۶ سال در طول دوره بهره برداری از سیستم

حاصل شده است.

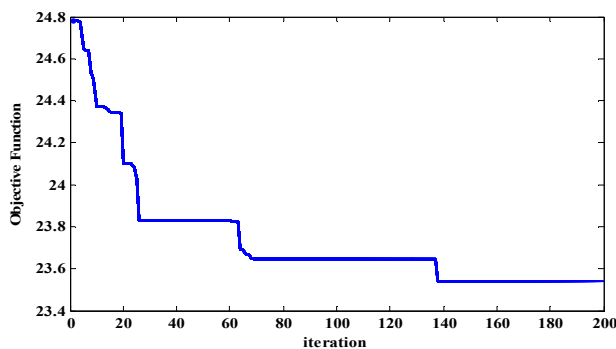


شکل ۳) دیاگرام تک خطی شبکه مشکین شهر



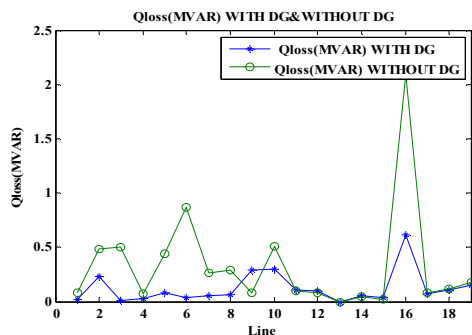
شکل ۴) نمودار جریان الگوریتم GSA برای حل مسأله جایابی بهینه

روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی به منظور حل مسأله با اهداف مختلف و در قالب یک مسأله تک هدفه در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است.

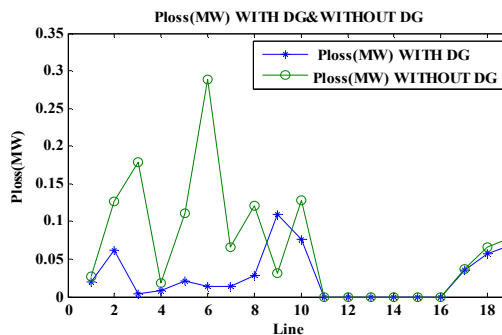


شکل ۵) روند همگرایی الگوریتم GSA

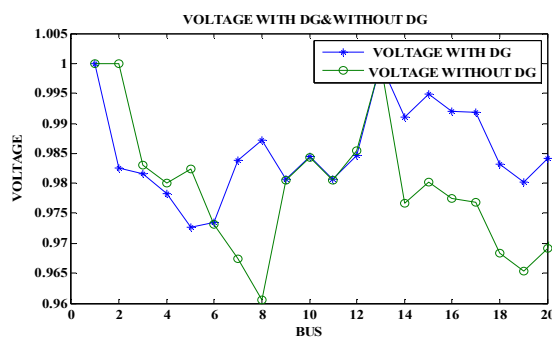
مقادیر بدست آمده برای تلفات سیستم، قبل و بعد نصب DG و نیز میزان بهبود پروفیل ولتاژ شبکه بعد از نصب DG، به ترتیب در نمودار شکل‌های ۶، ۷ و ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۷) میزان تلفات راکتیو شبکه قبل و بعد از نصب DG



شکل ۶) میزان تلفات اکتیو شبکه قبل و بعد از نصب DG



شکل ۸) نمودار پروفیل ولتاژ شبکه قبل و بعد از نصب DG

نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم نیز به صورت عددی در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به جدول (۲)، پروفیل

ولتاژ کل شبکه به میزان  $0/2078$  (p.u.) بعد از نصب DG بهبود یافته است. کاهش مطلوب مقادیر مربوط به قابلیت اطمینان سیستم با توجه به مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های SAIDI و SAIFI و AENS در این جدول قابل مشاهده است. میزان ظرفیت مورد نیاز شبکه به منظور طراحی و نصب DG برابر مقدار  $3/43$  (MW) به دست آمده است که برای تأمین این مقدار انرژی، ۲۴ عدد پنل فتوولتائیک، ۵ عدد توربین بادی و ۱۱ عدد اینورتر با هزینه کل  $1/552$  (M\$) بازی هر MW توان DG مورد نیاز است.

جدول ۲) نتایج شبیه سازی حاصل از الگوریتم GSA

هزینه احداث نیروگاه ترکیبی (DG) (M\$/MW)	تعداد اینورتر	تعداد توربین‌های بادی	تعداد پنل‌های فتوولتائیک	AENS (KW/h/yr)	SAIFI (h/yr.cent)	SAIDI (h/yr.cent)	کمترین ولتاژ (p.u.)	تلفات توان (KW)	مجموع ظرفیت DG (MW)	مکان DG (باس)	پارامترها بهینه سازی
-	-	-	-	۳۲۸/۷۹	۶/۴۵	۱۹/۸	۰/۷۳۴۶	۱۷۲/۶۴	-	-	قبل از نصب DG
۱/۵۵۲	۱۱	۵	۲۴	۱۲۶/۴۲	۱/۰۴	۴/۳۶	۰/۹۴۲۴	۷۲/۴۸	۳/۴۳	۸	بعد از نصب DG

با توجه به نتایج حاصله، میزان کل تلفات بعد از نصب DG به میزان  $72/48$  (KW) کاهش یافته است. هزینه احداث واحد نیروگاهی DG نیز در این حالت دارای مقدار بسیار پایینی در مقایسه با مطالعات پیشین بوده است که این به دلیل انتخاب ترکیبی بهینه از واحدهای بادی و خورشیدی به منظور تأمین مطمئن بار مورد نظر در شبکه مورد مطالعه بوده است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، جاییابی و تعیین ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده برای شبکه مشکین شهر توسط الگوریتم GSA انجام گرفته است. صحت و دقت بالای الگوریتم پیشنهادی به دلیل عدم نیاز به پارامترهای کنترلی زیاد، از دلایل انتخاب این الگوریتم بوده است. مدل سازی تابع هدف مسأله شامل تلفات توان، پروفیل ولتاژ، قابلیت اطمینان، اندازه DG و هزینه احداث واحد تولید پراکنده ترکیبی بادی و خورشیدی در این مطالعه بوده است. نتایج حاصل از بهینه سازی، نشانگر  $61/23$  درصد کاهش تلفات کل سیستم بعد از نصب DG و بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم بخصوص شاخص متوسط تعداد دفعات خاموشی سیستم (SAIFI) از  $6/45$  (h/yr.cent) به  $1/04$  (h/yr.cent) بعد از نصب DG بوده است. کاهش هزینه احداث واحد DG، افزایش مطلوب قابلیت اطمینان شبکه و کاهش چشمگیر تلفات توان، از مزایای انتخاب حالت ترکیبی بادی و خورشیدی در شبکه مورد مطالعه بوده است. نرخ بازگشت سرمایه نیز برای سیستم ترکیبی پیشنهادی در این مقاله محاسبه و دارای میزان  $7/6$  سال در طول دوره بهره برداری از سیستم به دست آمده است.

## پیوست :

جدول ۱- پیوست: مشخصات شین های شبکه مورد مطالعه

۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره باس
۱	۰	۰	۸	۴	۰	۳	۱۱	۱	۲	۰	۳	۴	۱	۲	۶	۰	۱	۰	۰	مشترکین هر باس
۵	۰	۰	۴۲	۲۱	۰	۱۴	۵۶	۵	۱۱	۰	۱۵	۲۱	۵	۱۱	۳۱	۰	۵	۰	۰	P(KW)
۲	۰	۰	۲۲	۱۱	۰	۸	۳۱	۲	۵	۰	۸	۱۰	۲	۵	۱۶	۰	۲	۰	۰	Q(KVAR)

جدول ۲- پیوست: مشخصات خطوط شبکه مورد مطالعه

۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره خط
۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۲	۱۲	۸	۱۰	۹	۸	۷	۶	۳	۴	۳	۲	۱	۲۰	باس مبدا
۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	باس مقصد
۰/۳۱۷	۰/۱۰۷	۰/۷۷	۰/۳۳۸	۱/۰۲۱	۰/۲۰۲	۱/۹۸	۴/۰۲۴	۱/۱۵۴	۳/۸۹۱	۵/۲۳۶	۰/۱۱۸	۰/۰۴	۱۱/۳۳	۱۴/۲۹	۲/۲۱۲	۱۲/۳۸	۰/۶۵	۰/۹۷	$\square/(f/yT)$

## مراجع

- [۱] Acharya, N., and Mahat, P., and Mithulananthan, N., (۲۰۰۶) "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network" *Int. J. Electrical Power & Energy Systems*, Vol. ۲۸, No. ۱۰, pp. ۶۶۹-۶۷۸.
- [۲] Atwa, Y.M., and El-Saadany, E.F., and Salama, M.M.A., and Seethapathy, R., (۲۰۱۰) "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization" *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. ۲۵, No. ۱, pp. ۳۶۰-۳۷۰.
- [۳] Celli, G., and Ghaiani, E., and Mocci, S., and Pilo, F., (۲۰۱۰) "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. ۲۰, No. ۲.
- [۴] Das, D., (۱۹۹۴). "Novel method for solving radial distribution networks" *IEEE Proc. Gene*, Vol. ۳۲, No. ۶, pp. ۱۳۲-۱۴۶.
- [۵] Diaf, S. (۲۰۰۸). "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions", *Applied Energy*, Vol. ۱۰, pp. ۹۶۸-۹۸۷.
- [۶] Eusuff, M.M., and Lansey, K., and Pasha, F., (۲۰۰۶) "Shuffled frog leaping algorithm: a



- memetic meta heuristic for discrete optimization” *Engineering Optimization*, Vol. ۳۸, No. ۲, pp. ۱۲۹-۱۵۴.
- [۷] Gandomkar, M., and Vakilian, M., and Ehsan, M., (۲۰۰۵) “A combination of genetic algorithm and simulated annealing for optimal distributed DG allocation in distributed networks”, *Proc of IEEE Electrical and Computer Eng Canadian Conference*, pp. ۶۴۵-۶۴۸.
- [۸] Hamouda, A., and Zehar, Kh., (۲۰۰۶) “Efficient Load Flow Method for Radial Distribution Feeders” *Journal of Applied Sciences*, Vol. ۶, No. ۱۳, pp. ۲۷۴۱-۲۷۴۸.
- [۹] Haque, M.H., (۱۹۹۶) “Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration” *IEEE Proc. Gene. Trans. Distribution*, Vol. ۱۴, No. ۳, pp. ۳۳-۳۸.
- [۱۰] Keane, M., and Malley, O., (۲۰۰۶) “Optimal distributed generation plant mix with novel loss adjustment factors”, *IEEE Power Eng Society General Meeting*, pp. ۳۴۵-۳۶۲.
- [۱۱] Singh, D., and Verma, K.S., (۲۰۰۹) “Multi objective optimization for DG planning with load models”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. ۲۴, No. ۱, pp. ۴۲۷-۴۳۶.
- [۱۲] Mostofi, F., and Javadi, M., and Ghezeli, G., and Shayeghi, H., and Javidan, J., (۲۰۱۲) “modelling and design of hybrid renewable energy sources for electrification iran rurals”, *17th Electric Power Distribution Conference (EPDC)*, Tehran, iran, may ۱۲-۱۳, pp. ۱۲۴-۱۳۶.
- [۱۳] Phonrattanasak, P., (۲۰۰۹) “Optimal placement of DG using multi objective particle swarm optimization” *International Conf*, pp. ۹۷۸-۹۹۲.
- [۱۴] Ranjan, R., and Venkatesh, B. and Das, D., (۲۰۰۳) “Voltage stability analysis of radial distribution networks” *Elect. Power Components Sys*, Vol. ۳۱, pp. ۵۰۱-۵۱۱.
- [۱۵] Rashedi, E. and Nezamabadi, H. and Saryazdi, S., (۲۰۰۹) “A Gravitational Search Algorithm”, *Information Sciences*, Vol. ۱۷۹, No. ۱۳, pp. ۲۲۳۲-۲۲۴۸.
- [۱۶] Silvestri, S.B. and Buonanno S., (۱۹۹۹) “Distributed generation planning using genetic algorithms” *IEEE PowerTech*, Budapest, Vol. ۹۹, No. ۲۹, pp. ۸۳-۹۲.
- [۱۷] Thong, V.V., and Driesen, J., and Belmans, R., (۲۰۰۷) “Transmission system operation concerns with high penetration level of distributed generation” *Proc. of Inter. Universities Power Engineering Conference*, Brighton, pp. ۸۶۷-۸۷۱.

- [۱۸] Wang, and Nehrir M.H., (۲۰۱۰) “Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems” *IEEE conference*, may, pp. ۲۱-۲۲.