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[۱]

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 سیستم‌های 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 می‌شود. 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 بهینه‌سازی است. به منظور دستیابی به این هدف در این مطالعه، شبکه ۲۰ باسه شهرستان مشکین‌شهر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی 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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مقدمه

منابع تولیدات پراکنده برای تولید انرژی الکتریکی به طور پراکنده و در نزدیکی محل مصرف در سیستم های الکتریکی به کار گرفته می‌شوند. رویکرد کنونی شرکت‌های توزیع نیز به سوی گسترش این طرح به طور گسترده در کشور است. اما بعضاً تولیدات پراکنده به فناوری‌هایی که از منابع تجدیدپذیر برای تولید برق استفاده می‌کنند، اطلاق می‌شود. واحدهای تولید پراکنده توسط مشتری یا تولید کنندگان برق احداث و مستقیماً به شبکه توزیع متصل می‌شوند. همه منابع تولیدی نصب شده در مکان‌های خصوصی مانند خانه‌ها و ادارات نیز جزو این منابع محسوب می‌شوند.

منابع تولیدات پراکنده در آینده نقش بسیار مهمی در تأمین تقاضای مشترکین در سیستم قدرت خواهند داشت. از این رو، جایابی 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 می‌شود. این منابع تولید انرژی دارای مزایای زیادی می‌باشند که از جمله آن می‌توان 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 دغدغه‌های بشر در قرن حاضر بوده است و با افزایش توجه در سال‌های اخیر به منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های بادی و خورشیدی، مسائل مربوط به آن نیز اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. طبق پیش‌بینی‌ها، استفاده از انرژی بادی و خورشیدی، بیشترین پیشرفت را در بین منابع دیگر انرژی داشته ولی با این حال، غیر قابل پیش‌بینی 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 توربین‌های 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 پره‌های توربین امکان پذیر نیست. لذا سیستم پیشنهادی با هدف استحصال حداکثر توان ممکن از انرژی‌های تجدیدپذیر تحت شرایط جوی مختلف طراحی شده است.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مکان یابی انواع واحدهای تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع انجام شده است که در آنها کاهش هزینه‌های مرتبط با تلفات، قابلیت اطمینان و هزینه احداث واحدهای تولیدی به عنوان هدف طراحی، مورد نظر بوده است [۱و۳و۴و۱۶]. در [۸] ، مسأله جایابی واحدهای تولید پراکنده در فیدرهای شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توسط

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

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 واحدهایDG روی فیدرها در قالب بهینه سازی چند منظوره در [۱۳] مدل‌سازی و حل شده است. روش تحلیلی نیز جهت مکان یابی واحدهای DG با هدف کاهش تلفات در [۱۸] ارائه شده است. مکان‌یابی 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 درنظر 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.

$$A=\begin{bmatrix} W_1/W_1 & \dots & W_1/W_5 \\ \dots & \dots & \dots \\ W_5/W_1 & \dots & W_n/W_5 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_5 \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

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=۰/۳۸۷۷، w_2=۰/۲۱۸۶، w_3=۰/۱۹۴۳، w_4=۰/۱۵۶۴ و w_5=۰/۰۴۳ به دست آمده است. به طور کلی، تابع هدف مسأله به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\min \; F = \sum_{m=1}^{5} w_m . F_m \quad (۵)$$

تلفات توان

تلفات توان همواره یکی از اهداف مهم در مطالعات مربوط به تولیدات پراکنده می باشد 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 گره هایی 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:

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

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

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

$$F_1 = (w_1).S_{ik} \quad (۱۰)$$

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 می دهد، استفاده شده است. تعدادی از این شاخص‌ها که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از:

شاخص متوسط دفعات خاموشی سیستم (SAIFI):

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

در این رابطه، λ_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):

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

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 مدل‌سازی می‌شود:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$F_2 = (w_2).(\text{Re}\,liability\ Indices)$$
$$F_{2_1} = (w_{2_1}).(\frac{SAIFI_i}{SAIFI_{base}}), F_{2_2} = (w_{2_2}).(\frac{SAIDI_i}{SAIDI_{base}}), F_{2_3} = (w_{2_3}).(\frac{AENS_i}{AENS_{base}}) \quad (۱۴)$$

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 می باشند [۱۷]. این شاخص ها 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:

$$F_3 = (w_3).\frac{P_{DG_{i,\,j}}}{\sum_{j=1}^{N_P} P_{load_{,\,j}}} \quad (۱۵)$$

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 $F_۴$، شاخص پروفیل ولتاژ بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_4 = (w_4).\sum_{i=1}^{n}(1-|V_i|)^2 \quad (۱۶)$$

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

هزینه بهره برداری سیستم ترکیبی

تابع $F_۵$، شاخص در نظر گرفته شده برای هزینه کل سیستم ترکیبی بادی و خورشیدی است و توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_5 = (w_5).(\frac{C_{DG}}{C_{DG_T}}) \quad (۱۷)$$

$$C_{DG} = \sum_S NPC(S) = N \times (CapitalCost + (\text{Re}\,placementCost \times k)) + (O\,\&\,M\,Cost \times \frac{1}{CRF(ir,\pi)}) \quad (۱۸)$$

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

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

$$CRF\ (ir, R) = \frac{ir(1+ir)^R}{(1+ir)^R - 1} \quad (۱۹)$$

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

$$P_{Slack} + \sum_{i=1}^{N} P_{DG_i} = \sum P_{D_i} + P_L \quad (۲۰)$$

- قیود مربوط به توان‌های اکتیو و راکتیو

$$\begin{aligned} Q_{DGi}^{\min} \le Q_{DGi} \le Q_{DGi}^{\max} \\ P_{DGi}^{\min} \le P_{DGi} \le P_{DGi}^{\max} \end{aligned} \quad (۲۱)$$

- قید تلفات

$$\sum Loss_k\,(withDG\ ) \le \sum Loss_k\,(withoutDG\ ) \quad (۲۲)$$

- قیود مربوط به قابلیت اطمینان سیستم

$$\begin{aligned} \sum SAIDI_k\,(withDG) \le \sum SAIDI_k\,(withoutDG) \\ \sum SAIFI_k\,(withDG) \le \sum SAIFI_k\,(withoutDG) \\ \sum AENS_k\,(withDG) \le \sum AENS_k\,(withoutDG) \end{aligned} \quad (۲۳)$$

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

$$\begin{aligned} N_{PV}^{\min} \le N_{PV} \le N_{PV}^{\max} \\ N_{WT}^{\min} \le N_{WT} \le N_{WT}^{\max} \end{aligned} \quad (۲۴)$$

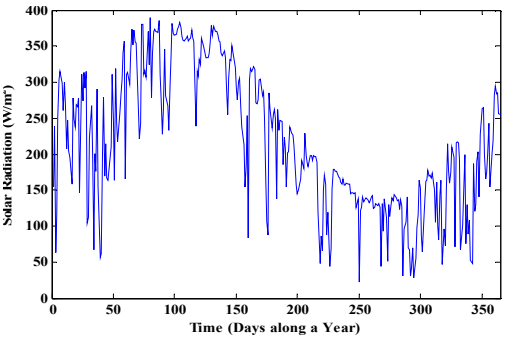
- قید ولتاژ و جریان باس

$$\begin{aligned} \left|V_i\right|^{\min} \le \left|V_i\right| \le \left|V_i\right|^{\max} \\ \left|I_i\right| \le \left|I_i\right|^{\max} \end{aligned} \quad (۲۵)$$

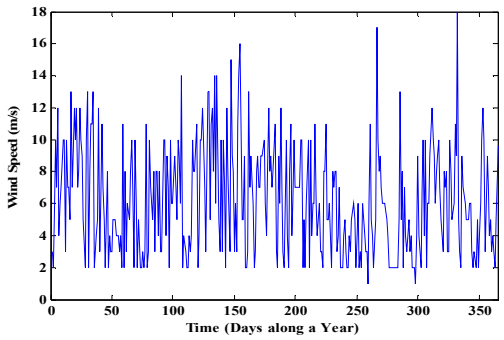
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مدل سازی نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی

رفتار غیر متناوب شدت تابش خورشیدی سبب شده است نیروگاه های خورشیدی دارای مشخصه‌ای پیوسته و کنترل پذیر نباشند. نیروگاه های بادی نیز به علت منقطع بودن شدت وزش باد دارای مشخصه‌ای یکنواخت نمی باشند. در این مقاله، به منظور دستیابی به انرژی یکنواخت توسط منابع تجدید پذیر از ترکیب واحدهای بادی و خورشیدی استفاده می‌شود. از دیدگاه سیستم قدرت، نیروگاه خورشیدی که شامل چندین پنل فتوولتائیک با ظرفیت‌های متنوع باشد، یکی از منابع عدم قطعیت در سیستم است [۲]. در مطالعات سیستم در حضور نیروگاه‌های بادی و خورشیدی ابتدا می‌بایست 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 داده‌های شدت تابش خورشیدی و وزش باد به صورت میانگین روزانه از سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) برای منطقه مشکین‌شهر واقع در شمالغرب ایران اخذ و در شبیه‌سازی سیستم اعمال شده است. نمودارهای مربوط به شدت تابش خورشیدی و شدت وزش باد در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است.



شکل۱) نمودار شدت تابش خورشیدی در طول سال



شکل۲) نمودار شدت وزش باد در طول سال

سیستم فتوولتائیک

توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک را با استفاده از روابط (۲۶) الی (۲۸) می‌توان 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:

$$P_{PV} = V_{MPP}.I_{MPP} \quad (۲۶)$$

$$V_{MPP} = V_{MPP,ref} + P_{v,oc}(T_C - T_{C,ref}) \quad (۲۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$I_{MPP} = I_{MPP,ref} + I_{SC,ref}(\frac{G_T}{G_{ref}}) + ... + P_{I,SC}(T_C - T_{C,ref}) \quad (۲۸)$$

که P_{PV} توان پنل، V_{mpp} ولتاژ پتانسیل، $V_{mpp,ref}$ همان V_{mpp} در شرایط عملکرد استاندارد (V) ، I_{mpp} جریان پنل 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. $P_{V,oc}$ و $P_{I,SC}$ به ترتیب ضرایب دمایی برای ولتاژ مدار باز $(V/^oC)$ و جریان اتصال کوتاه $(A/^oC)$ هستند. $T_{C,ref}$ دمای پنل فتوولتائیک در شرایط عملکرد استاندارد است که ^oC ۲۵ درنظر گرفته شده و $T_C(t)$ دمای عملکرد پنل فتوولتائیک است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_C(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800}.G_T \quad (۲۹)$$

در اینجا، $T_a(t)$ دمای محیط (^oC)، $NOCT$ (دمای سلول در عملکرد نرمال) که برای عملکرد پنل تحت تابش (w/m^2) ۵۰۰ و دمای ^oC ۲۰ تعریف شده و معمولا بین ^oC ۴۰ تا ^oC۴۶ درنظر 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:

$$N_{PN,S} = \frac{V_{Bus}}{N_{pv,nom}} \quad (۳۰)$$

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:

$$V(t) = V_r(t).\left(\frac{h}{h_r}\right)^{\gamma} \quad (۳۱)$$

که V سرعت باد در ارتفاع h است، V_r سرعت باد که درارتفاع h ثبت گردیده و γ نمای قانونی توان نام دارد که مقدار آن بین۰/۱۴ 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 :

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$P_{WT}(t)=\begin{cases} av^{۲}(t)-bP_R & V_{C_i}<V<V_r \\ P_R & V_r<V<V_{CO} \\ ۰ & other\ wise \end{cases} \quad (۳۲)$$

در رابطه فوق، $a=\left(\frac{P_r}{V_r^{۳}-V_{Ci}^{۳}}\right)$ ، $b=\frac{V_{Ci}^{۳}}{\left(V_r^{۳}-V_{Ci}^{۳}\right)}$، P_r توان مجاز 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:

$$P_{inv-load}=(P_{\mathrm{Re}n-inv})\times\eta_{inv} \quad (۳۳)$$

که η_{inv} بازده مبدل می‌باشد.

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

جدول۱) مشخصات فنی تجهیزات [۱۲و۵]

تجهیزات	هزینه سرمایه‌گذاری ($/unit)	هزینه جایگزینی ($/unit)	هزینه سالیانه (تعمیر و نگهداری) ($/unit-yr)	طول عمر (yr)	توان نامی (KW)	قابلیت دسترسی (٪)	بازده (٪)
پنل های 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 می شود.

$$X_i=(X_i^{1},...,X_i^{d},...,X_i^{n}) \quad (۳۴)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

موقعیت جرم، نقطه‌ای در فضاست 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:

$$q_i = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (۳۵)$$

$$M_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^{m} q_i} a \quad (۳۶)$$

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 ضریبی 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).

$$V_i^d(t+1) = rand_i \times V_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (۳۷)$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + V_i^d(t+1) \quad (۳۸)$$

در این روابط، $rand_i$ و $rand_j$، اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۱و۰] 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.

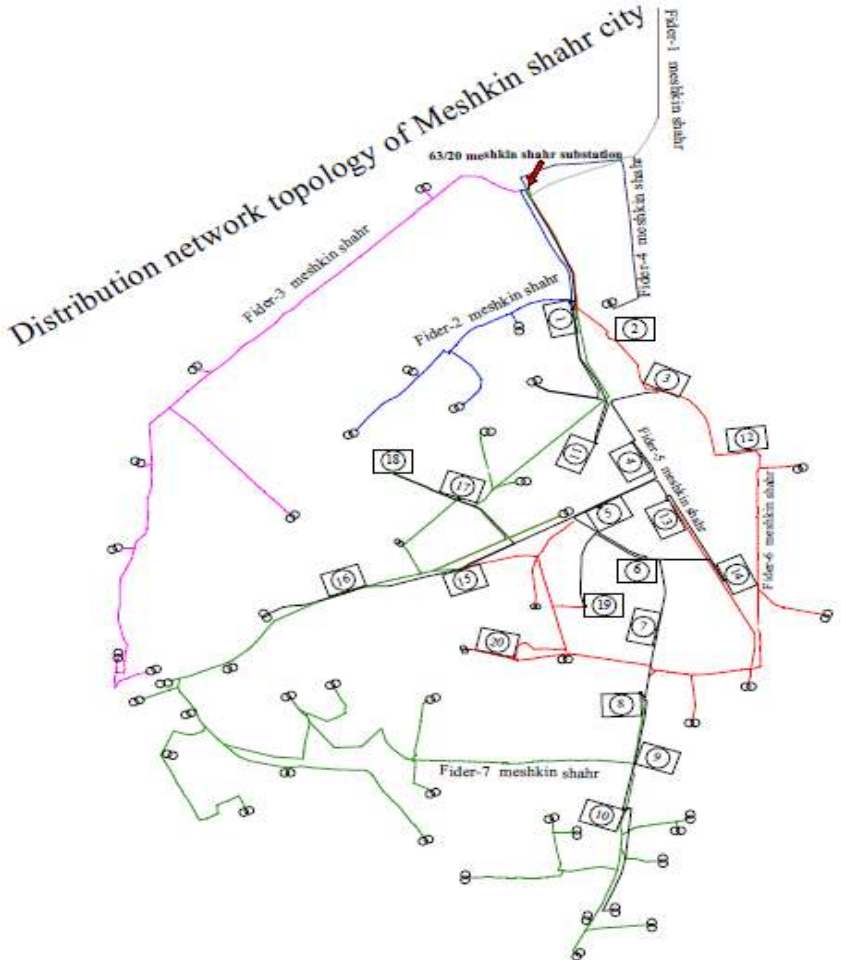
نتایج شبیه سازی

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(MW) ۳/۴۳ به دست آمده است.

با توجه به اینکه قیمت خرید برق توسط واحد های تجدید پذیر به شبکه در ایران برابر ۰/۰۴۵ دلار بازای 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

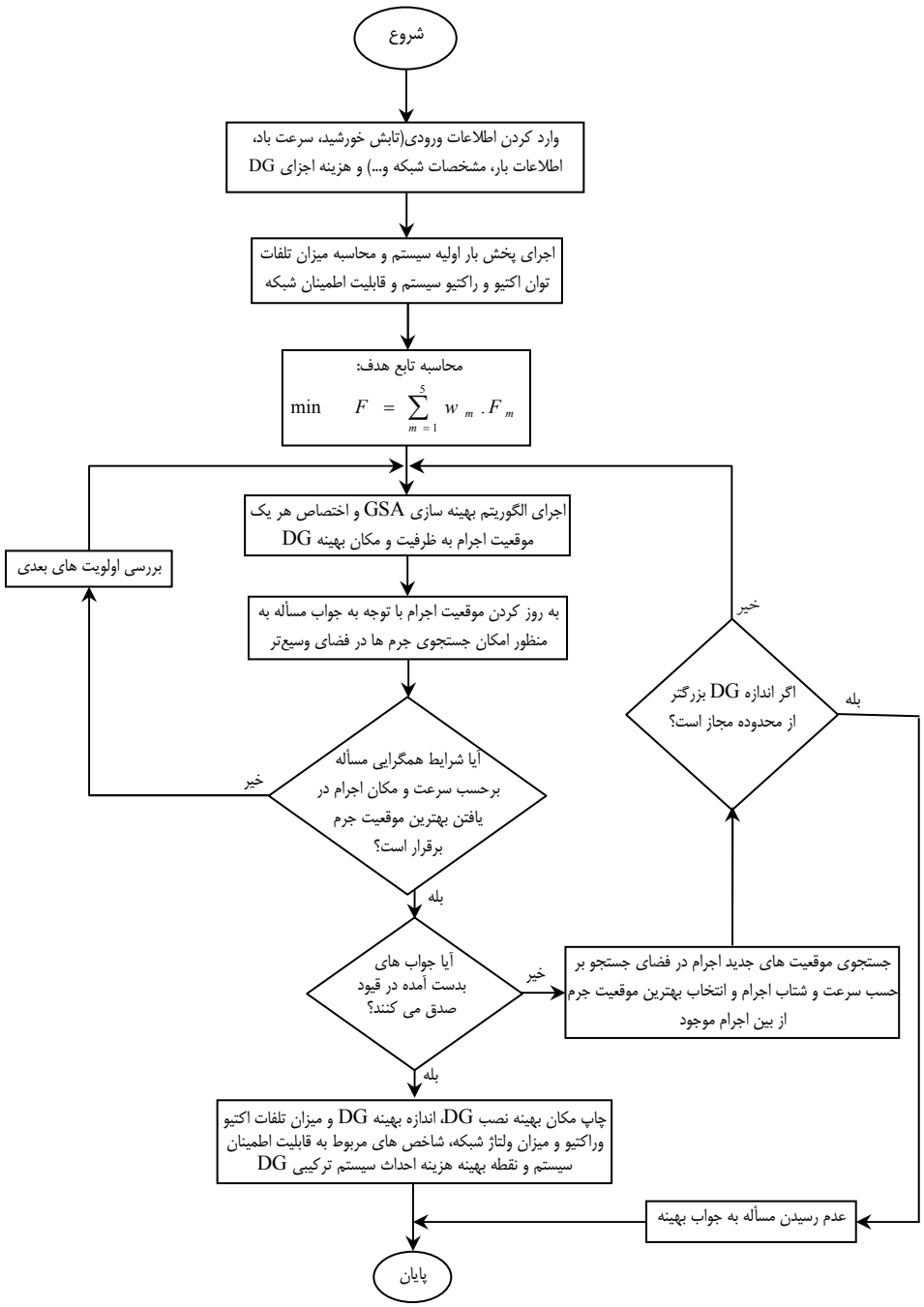
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

حاصل شده است.



شکل۳) دیاگرام تک خطی شبکه مشکین شهر

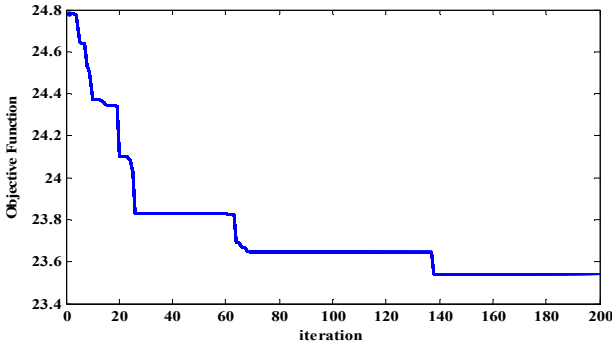
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ٤) نمودار جریانی الگوریتم GSA برای حل مسأله جایابی بهینه

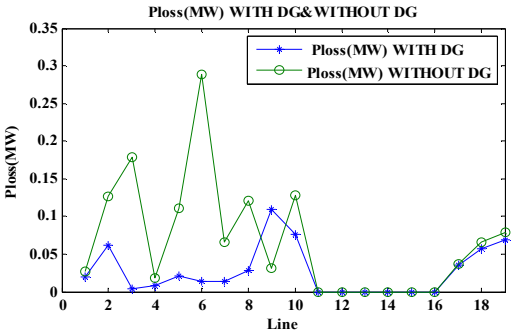
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

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.

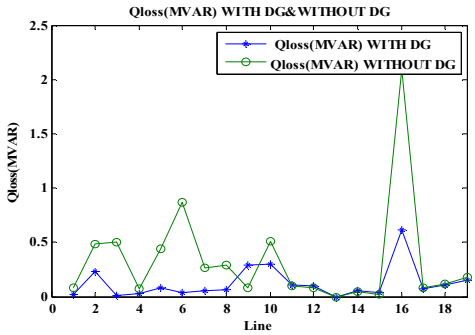


شکل۵) روند همگرایی الگوریتمGSA

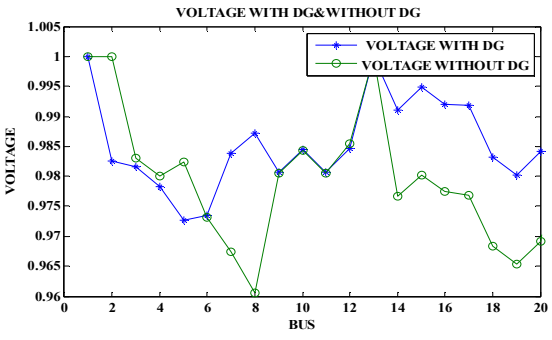
مقادیر بدست آمده برای تلفات سیستم، قبل و بعد نصب DG و نیز میزان بهبود پروفیل ولتاژ شبکه بعد از نصب DG، به ترتیب در نمودار شکل‌های ۶ ، ۷ و ۸ قابل مشاهده است.



شکل٦) میزان تلفات اکتیو شبکه قبل و بعد از نصبDG



شکل۷) میزان تلفات راکتیو شبکه قبل و بعد از نصبDG



شکل۸) نمودار پروفیل ولتاژ شبکه قبل و بعد از نصبDG

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

ولتاژ کل شبکه به میزان (p.u.) ۰/۲۰۷۸ 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 (MW) ۳/۴۳ 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 (M$) ۱/۵۵۲ بازای هر MW توان DG مورد نیاز است.

جدول۲) نتایج شبیه سازی حاصل از الگوریتم GSA

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

با توجه به نتایج حاصله، میزان کل تلفات بعد از نصب DG به میزان (KW) ۷۲/۴۸ 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، جایابی 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 ۶۱/۲۳ درصد کاهش تلفات کل سیستم بعد از نصب DG و بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم بخصوص شاخص متوسط تعداد دفعات خاموشی سیستم (SAIFI) از (h/yr.cent) ۶/۴۵ به (h/yr.cent)۱/۰۴ 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 ۷/۶ سال در طول دوره بهره برداری از سیستم به دست آمده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

پیوست :

جدول۱- پیوست: مشخصات شین های شبکه مورد مطالعه

شماره باس	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤	۱٥	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
مشترکین هر باس	۰	۰	۱	۰	٦	۲	۱	٤	۳	۰	۲	۱	۱۱	۳	۰	٤	۸	۰	۰	۱
P(KW)	۰	۰	٥	۰	۳۱	۱۱	٥	۲۱	۱٥	۰	۱۱	٥	٥٦	۱٤	۰	۲۱	٤۲	۰	۰	٥
Q(KVAR)	۰	۰	۲	۰	۱٦	٥	۲	۱۰	۸	۰	٥	۲	۳۱	۸	۰	۱۱	۲۲	۰	۰	۲

جدول ۲- پیوست: مشخصات خطوط شبکه مورد مطالعه

شماره خط	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤	۱٥	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹
باس مبدا	۲۰	۱	۲	۳	٤	۳	٦	۷	۸	۹	۱۰	۸	۱۲	۱۲	۱٤	۱٥	۱٦	۱۷	۱۸
باس مقصد	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤	۱٥	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹
□/(f/yr)	۰/۹۷	۰/٦٥	۱۲/۲۸	۲/۲۱۲	۱٤/۲۹	۱۱/۳۳	۰/۰٤	۰/۱۱۸	٥/۲۳٦	۳/۸۹۱	۱/۱٥٤	٤/۰۲٤	۱/۹۸	۰/۲۰۲	۱/۰۲۱	۰/۳۲۸	۰/۷۷	۰/۱۰۷	۰/٦۱۷

مراجع

[۱] Acharya, N., and Mahat, P., and Mithulananthan, N., (۲۰۰٦) "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network" *Int. J. Electrical Power & Energy Systems*, Vol. ۲۸, No. ۱۰, pp. ٦٦۹-٦۷۸.

[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. ۲٥ , No. ۱, pp. ۳٦۰-۳۷۰.

[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" *IEEETransactions on Power Systems*, Vol. ۲۰, No. ۲.

[۴] Das, D., (۱۹۹٤). "Novel method for solving radial distribution networks" *IEEE Proc. Gene*, Vol. ۳۲, No. ٦, pp. ۱۳۲-۱٤٦.

[٥] Diaf, S. (۲۰۰۸). "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions", *Applied Energy* ,Vol. ۱۰, pp. ۹٦۸–۹۸۷.

[۶] Eusuff, M.M., and Lansey, K., and Pasha, F., (۲۰۰٦) "Shuffled frog leaping algorithm: a

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

memetic meta heuristic for discrete optimization" *Engineering Optimization*, Vol. ۳۸, No. ۲, pp.۱۲۹–۱٥٤.

[۷] Gandomkar, M., and Vakilian, M., and Ehsan, M., (۲۰۰٥) "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. ٦٤٥–٦٤٨.

[۸] Hamouda, A., and Zehar, Kh., (۲۰۰٦) "Efficient Load Flow Method for Radial Distribution Feeders" *Journal of Applied Sciences*, Vol. ٦, No. ۱۳, pp. ۲۷٤۱-۲۷٤۸.

[۹] Haque, M.H., (۱۹۹٦) "Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration" *IEEE Proc. Gene. Trans. Distribution*, Vol. ۱٤, No. ۳, pp. ۳۳-۳۸.

[۱۰] Keane, M., and Malley, O., (۲۰۰٦) "Optimal distributed generation plant mix with novel loss adjustment factors", *IEEE Power Eng Society General Meeting*, pp. ۳٤٥-۳٦۲.

[۱۱] Singh, D., and Verma, K.S., (۲۰۰۹) "Multi objective optimization for DG planning with load models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. ۲٤, No. ۱, pp.٤۲۷–٤۳٦.

[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", *۱۷th Electric Power Distribution Conference (EPDC)* ,Tehran, iran, may ۱۲-۱۳, pp. ۱۲٤-۱۳٦.

[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. ٥۰۱-٥۱۱.

[۱٥] Rashedi, E. and Nezamabadi, H. and Saryazdi, S., (۲۰۰۹) "A Gravitational Search Algorithm", *Information Sciences*, Vol. ۱۷۹, No. ۱۳, pp. ۲۲۳۲-۲۲٤۸.

[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. ۸٦۷–۸۷۱.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]