

توزیع اقتصادی توان در نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی و شاخص‌های پایداری سیستم با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه

حسین شریفی و محمود اوکاتی صادق

وجود دارد ولی گاهی به دلیل پیچیدگی تابع هزینه و وجود محدودیت‌های زیاد، رسیدن به نقطه بهینه واقعی مشکل می‌شود. یکی از محدودیت‌های عملی مسئله پخش بار اقتصادی در نظر گرفتن فرم واقعی تابع هزینه سوخت می‌باشد. منحنی هزینه سوخت یک واحد نیروگاهی معمولاً توسط یک تابع درجه دو مدل‌سازی می‌شود اما ملاحظات عملی همچون در نظر گرفتن اثر شیر بخار باعث اضافه‌شدن مؤلفه‌های سینوسی به تابع فوق شده که در نهایت به یک منحنی ناصاف و پیچیده منجر می‌شود [۱].

یکی از مهم‌ترین اهداف شرکت‌های برق، تولید انرژی الکتریکی و انتقال و توزیع آن بین مصرف‌کنندگان با قابلیت اطمینان بالا و کمترین هزینه بهره‌برداری است. قبل از معرفی مفهوم امنیت سیستم قدرت، مسئله پخش بار اقتصادی بیشتر بر مسایل اقتصادی بهره‌برداری متمرکز بود تا بر امنیت سیستم. امروزه با گسترده‌ی شبکه قدرت و افزایش بار سیستم‌ها، ترکیب شاخص‌های پایداری سیستم با مسئله پخش بار اقتصادی تبدیل به یک ضرورت مهم شده است [۲]. در این مقاله محدودیت در شارش توان خطوط^۱ و محدودیت در اندازه ولتاژ باس‌های مصرف شبکه به عنوان شاخص‌های امنیتی و یا پایداری سیستم قدرت در نظر گرفته می‌شوند.

برای حل مسئله پخش بار اقتصادی (ED) با در نظر گرفتن قیود مسئله از جمله شاخص‌های پایداری شبکه و قیود عملی نیروگاه‌ها، روش‌های متعددی را از جمله برنامه‌ریزی تکاملی [۳]، روش نقطه داخلی [۴]، روش جستجوی الگو [۵]، الگوریتم ژنتیک [۶] و الگوریتم اجتماع ذرات بهبودیافته [۷] می‌توان نام برد.

استفاده از انرژی مطمئن کلید رشد و توسعه اقتصادی کشورها محسوب می‌شود. هرچند انرژی فسیلی عمده‌ترین و رایج‌ترین انرژی مورد استفاده در تمامی کشورها است، لیکن آلودگی^۲ زیست‌محیطی از مهم‌ترین پیامدهای خارجی استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد که تأثیرات منفی گرانباری بر کره زمین بر جای نهاده است. در نیروگاه‌ها سه گاز آلوده‌کننده اصلی وجود دارد که این سه گاز دی‌اکسید کربن^۳، اکسید سولفور^۴ و ترکیبات آن و دی‌اکسید نیتروژن^۵ و ترکیبات آن می‌باشند. بدین ترتیب، مسئله پخش آلاینده‌ی با در نظر گرفتن تابع انتشار آلاینده‌ی نیروگاه‌ها به عنوان یک تابع هدف در کنار مسئله پخش بار اقتصادی مطرح می‌شود. ظاهراً در اینجا می‌توان هر یک از دو تابع مطرح‌شده را به طور جداگانه حل و بهینه‌سازی نمود اما نکته قابل توجه این است که با افزایش میزان

چکیده: حساسیت افکار عمومی نسبت به مسایل زیست‌محیطی در مسئله پخش بار اقتصادی نیز تأثیرگذار می‌باشد و در این صورت لازم است تابع هزینه مربوط به آلودگی نیز در مسئله پخش بار اقتصادی در نظر گرفته شود. قبل از معرفی مفهوم امنیت سیستم قدرت، مسئله پخش بار اقتصادی به‌طور معمول بر جنبه‌های اقتصادی بهره‌برداری متمرکز بود تا بر جنبه‌های امنیتی سیستم. امروزه با گسترده‌ی شبکه قدرت و افزایش بار، ترکیب شاخص‌های پایداری شبکه با مفهوم پخش بار اقتصادی به یک ضرورت مهم تبدیل شده است. این مقاله به حل مسئله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن مسئله آلاینده‌ی نیروگاه‌ها و شاخص‌های امنیتی شبکه می‌پردازد. شاخص‌های امنیتی سیستم توسط توابع پناستی به تابع هدف مسئله پخش بار اقتصادی اضافه شده است. از آنجایی که کاهش هزینه‌های سوخت و آلاینده‌ی دو هدف نسبتاً متضاد می‌باشند حل مسئله توزیع اقتصادی توان و کاهش آلاینده‌ی به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه منجر می‌شود. پیچیدگی توابع هدف و لزوم در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری نیروگاه‌ها و شاخص‌های امنیتی نیاز به استفاده از روش‌های کارآمد بهینه‌سازی را بیش از پیش آشکار می‌کند. در این مقاله الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه (MOHS) برای حل مسئله به کار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که MOHS از جهت همگرایی و دقت از قابلیت بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های به کار گرفته شده برخوردار است. سیستم تست به کار رفته برای حل مسئله پیشنهادی، سیستم تست IEEE با ۱۰ واحد نیروگاهی، ۳۹ باس و ۴۶ خط انتقال می‌باشد.

کلیدواژه: توزیع بار اقتصادی، الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه، محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها، آلاینده‌های زیست‌محیطی، شاخص‌های امنیت شبکه قدرت.

۱- مقدمه

هدف از توزیع اقتصادی بار تخصیص تقاضا بین واحدهای مشارکت‌کننده و از پیش تعیین شده با شرط حداقل نمودن هزینه سوخت می‌باشد. بهره‌برداری اقتصادی برای یک سیستم قدرت از نظر برگشت سود سرمایه‌گذاری انجام‌شده بسیار مهم بوده و نرخ‌های تعیین شده به وسیله ارگان‌های دولتی و اهمیت صرفه‌جویی در سوخت، شرکت‌های برق را جهت حصول حداکثر بازدهی ممکن تحت فشار قرار می‌دهند. برای حل یک مسئله بهینه‌سازی همانند مسئله پخش بار اقتصادی روش‌های زیادی

این مقاله در تاریخ ۲۷ اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱۶ تیر ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

حسین شریفی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: hoseinsharif94@yahoo.com).

محمود اوکاتی صادق (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: oukati@ece.usb.ac.ir).

1. Line Flow
2. Pollution
3. CO₂
4. SO_x
5. NO_x

MOHS) مسئله توزیع اقتصادی بار را با در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری شبکه قدرت، آلاینده‌های زیست‌محیطی و محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها حل می‌کند. این الگوریتم از دسته الگوریتم‌های فراابتکاری است و مشکل الگوریتم‌های ابتکاری همچون طولانی‌بودن زمان محاسبات یا افتادن در نقطه بهینه محلی را ندارد. در واقع این الگوریتم از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری است که دارای راهکارهای برون‌رفت از بهینه محلی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسایل هستند. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم‌ها در سال‌های اخیر توسعه یافته است. الگوریتم حاصل بر روی سیستم نمونه، اجرا و نتایج به دست آمده با الگوریتم‌های دیگر مقایسه شده است. الگوریتم به کارگیری شده از جمله الگوریتم‌های فرااتکاملی می‌باشد که امکان همگراشدن آن در نقاط بهینه محلی به مراتب از الگوریتم‌های دیگر کمتر است.

در بخش ۲ فرمول‌بندی مسئله توزیع بار اقتصادی ارائه می‌شود. بخش ۳ بهینه‌سازی چندهدفه و مفهوم جواب‌های غالب و مغلوب را بیان می‌کند. الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه در بخش ۴ معرفی می‌شود. در بخش ۵ نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی روی سیستم آزمون ارائه گردیده و بخش ۶ نهایتاً به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

حل مسئله توزیع اقتصادی توان در نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه منجر می‌شود که در آن حداقل دو تابع هزینه اقتصادی سوخت و هزینه آلاینده‌ها می‌بایست به طور هم‌زمان بهینه شوند. این بهینه‌سازی می‌بایست با در نظر گرفتن قیود عملی نیروگاه‌ها و شبکه قدرت انجام پذیرد. در ادامه فرمول‌بندی مسئله به شرح ذیل بیان می‌شود.

۲-۱ تابع هدف در مسئله پخش بار اقتصادی

توزیع اقتصادی بار، امکان بهره‌برداری یک سیستم قدرت را با کمترین هزینه فراهم می‌کند. هدف اولیه آن مینیمم‌کردن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری نیروگاه‌ها می‌باشد. منحنی هزینه نیروگاه‌ها معمولاً توسط یک تابع درجه دوم مدل‌سازی می‌شود. این در حالی است که به کارگیری تابع درجه سوم می‌تواند دقت مدل‌سازی را افزایش دهد. به همین دلیل جهت نزدیکی به واقعیت، در این مقاله از یک تابع درجه سوم جهت مدل‌سازی منحنی هزینه سوخت به شرح ذیل استفاده شده است

$$\text{minimize } F = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_i^3) \quad (1)$$

که در آن F کل هزینه سوخت نیروگاه‌ها، a_i ، b_i ، c_i و d_i ضرایب هزینه‌ای واحد نیروگاهی i ام و n تعداد نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌باشد. همچنین در صورت در نظر گرفتن اثرات موقعیت شیر بخار توابع سینوسی به شکل زیر به تابع هدف هزینه سوخت اضافه می‌شود

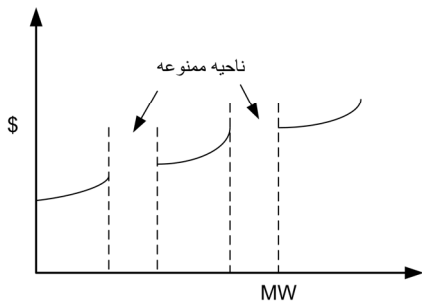
$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_i^3 + |e_i \sin(f_i(P_i^{\min} - P_i))| \$/h \quad (2)$$

که در آن e_i و f_i به ترتیب ضرایب بازگشت نقطه زانویی می‌باشند. شکل ۱ تغییرات تابع هزینه را با در نظر گرفتن اثرات شیر بخار برای

آلاینده‌گی میزان هزینه سوخت نیروگاه‌ها کاهش می‌یابد و بالعکس. بنابراین برای بهینه‌سازی دو مسئله پخش بار اقتصادی و پخش آلاینده‌گی، باید دو تابع هدف را به صورت هم‌زمان بهینه کرد و بین دو مقدار از دو تابع هدف مصالحه برقرار نمود.

برای حل مسئله توزیع بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی تاکنون از روش‌های متعددی از جمله برنامه‌ریزی نیمه‌معین [۸]، روش نیوتن رافسون [۹]، روش ازدحام ذرات [۱۰]، تکامل تفاضلی [۱۱]، جستجوی گرانشی [۱۲] و جهش قورباغه [۱۳] استفاده شده است. در [۱۴] مسئله پخش بار اقتصادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اصلاح‌شده کلاغ حل گردیده است. در این مقاله تنها تابع هزینه سوخت به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در [۱۵] الگوریتم گرده‌افشانی گل جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی و انتشار آلودگی به کار گرفته شده است. در این مقاله دو تابع هدف با استفاده از یک فاکتور جریمه قیمت با هم ترکیب گردیده و یک تابع هدف واحد را تشکیل می‌دهند و در نهایت مسئله به صورت تک‌هدفه حل می‌شود. مقاله [۱۶] روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری را جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی مورد استفاده قرار داده است. در این مقاله نیز از در نظر گرفتن تابع انتشار آلودگی و قیود امنیتی سیستم صرف نظر شده است. در [۱۷] الگوریتم جلبک مصنوعی با روش جستجوی سیمپلکس ترکیب و روش ترکیبی جلبک مصنوعی جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای این روش خودتنظیم بوده و جواب‌های حاصل در مقایسه با روش جلبک مصنوعی اولیه از عملکرد محاسباتی و پایداری بهتری برخوردار می‌باشد. در این مقاله قیود تعادل و مناطق ممنوعه بهره‌برداری در نظر گرفته شده‌اند اما از در نظر گرفتن مسئله پخش آلودگی صرف نظر شده است. روش جدید بهینه‌سازی طوفان‌های موازی جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی و انتشار آلودگی در [۱۸] به کار گرفته شده است. این مقاله از در نظر گرفتن قیود مربوط به نواحی ممنوعه بهره‌برداری ژنراتورها صرف نظر کرده است. نویسندگان در [۱۹] الگوریتم بازار ارز را جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی مورد استفاده قرار داده‌اند که این روش با الهام از بازار بورس به دنبال حل مسایل بهینه‌سازی است. در این مقاله تنها به حل مسئله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری و صرف نظر کردن از قیود امنیتی شبکه پرداخته شده است. آنچه در مقالات منتشرشده به ویژه در سال‌های اخیر مشاهده می‌شود معرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی کارآمد جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی است. در این مقالات توجه کمتری به حل مسئله بهینه‌سازی انتشار آلودگی شده است. قیود در نظر گرفته شده عمدتاً محدود به قیود بهره‌برداری نیروگاه‌ها و تلفات شبکه می‌باشند و از سایر قیود امنیتی شبکه صرف نظر شده است. همچنین در مواردی که تابع انتشار آلودگی به عنوان یکی از اهداف بهینه‌سازی مد نظر قرار می‌گیرد اغلب با تابع هزینه سوخت ترکیب و مسئله به صورت بهینه‌سازی تک‌هدفه حل می‌شود. از آنجایی که بهینه‌سازی تابع هزینه سوخت و تابع انتشار آلودگی اغلب رفتاری متضاد و مخالف هم دارند حل این گونه مسایل به صورت تک‌هدفه نمی‌تواند به جواب‌های بهینه مورد نظر بهره‌بردار با توجه به شرایط بهره‌برداری و اولویت‌های مد نظر آن ختم شود. با توجه به موارد ذکرشده، در این مقاله از بهینه‌سازی چندهدفه جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی و انتشار آلودگی نیروگاه‌ها استفاده می‌شود.

این مقاله با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه



شکل ۲: تأثیر نواحی ممنوعه بهره‌برداری بر تابع هزینه سوخت نیروگاه.

۲-۳-۳-۳ قید نامساوی نرخ افزایش یا کاهش تولید

این قید در مدل‌های پیشرفته‌تر مسئله پخش بار اقتصادی مطرح می‌گردد ولی به دلیل این که با اعمال این قید روش‌های کلاسیک همچنان قابل اجرا هستند، می‌توانند در فرم کلاسیک مسئله نیز منظور گردند.

توان خروجی نیروگاه‌ها امکان تغییر ناگهانی برای هر مقدار را نداشته و نمی‌توانند به صورت آنی به مقدار دیگری افزایش یا کاهش یابند. به همین دلیل برای نیروگاه‌ها، میزان تغییرات مجاز توان خروجی در واحد زمان تعیین شده و به صورت نرخ تولید بیان می‌گردد. نرخ تغییرات توان خروجی نیروگاه‌ها به مشخصات مکانیکی و ترمودینامیکی آنها وابسته است.

این قیود در (۷) و (۸) به ترتیب برای حالات افزایش تولید و کاهش تولید آورده شده است

$$P_i - P_i^* \leq UR_i \quad (7)$$

$$P_i^* - P_i \leq DR_i \quad (8)$$

که در آن P_i^* مقدار اولیه تولید و یا حالت فعلی آن و UR_i و DR_i به ترتیب نرخ افزایش تولید و کاهش تولید نیروگاه i ام است. این محدودیت در (۶) اثر گذاشته و آن را به (۹) تبدیل می‌کند

$$\max(P_i^{\min}, P_i^* - DR_i) \leq P_i \leq \min(P_i^{\max}, P_i^* + UR_i) \quad (9)$$

۲-۳-۴ در نظر گرفتن نواحی ممنوعه

یکی دیگر از محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها نواحی ممنوعه می‌باشد. در حقیقت این عملکرد ناشی از عملکرد فنی نیروگاه‌ها (مشکلاتی در لوازم جانبی از قبیل پمپ و بویلر) در هنگام تولید به وجود می‌آید. در نتیجه واحدهای نیروگاهی نمی‌توانند در تمام محدوده معرفی شده در (۶) توان تولید کنند.

یک ژنراتور توان الکتریکی با مناطق اجرایی ممنوعه، نمودار هزینه سوخت ناپیوسته‌ای دارد. این قید با اعمال (۱۰) تا (۱۲) مدل می‌شود

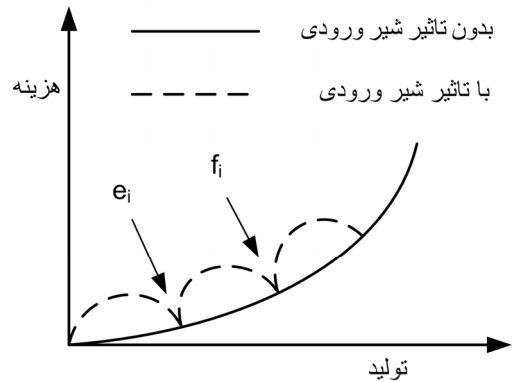
$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{LB}, \quad i = 2, 3, \dots, N_{PZi} \quad (10)$$

$$P_i^{UB_{k-1}} \leq P_i \leq P_i^{LB_k}, \quad i = 2, 3, \dots, N_{PZi} \quad (11)$$

$$P_i^{UB_k} \leq P_i \leq P_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{GPZ} \quad (12)$$

که در آن $P_i^{UB_k}$ و $P_i^{LB_k}$ به ترتیب کران‌های بالا و پایین مناطق اجرایی ممنوعه k ام از ژنراتور i ام (MW)، N_{PZi} تعداد مناطق ممنوعه ژنراتور i ام و N_{GPZ} تعداد ژنراتورهای توان الکتریکی با مناطق اجرایی ممنوعه می‌باشد.

نمودار هزینه سوخت ناپیوسته ژنراتور با در نظر گرفتن مناطق اجرایی ممنوعه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: تأثیر شیر ورودی بخار بر منحنی هزینه سوخت نیروگاه‌ها.

یک واحد نیروگاهی نشان می‌دهد. ژنراتورها معمولاً چندین شیر متفاوت برای بخار دارند که باعث می‌شود منحنی ورودی- خروجی از حالت یک تابع هزینه هموار خارج شود. هر شیر بخاری که باز شود تأثیر بارگذاری خود را به صورت ریبل در شکل ۱ نشان می‌دهد.

۲-۲ تابع هدف در مسئله انتشار آلاینده‌گی

امروزه کاهش میزان آلاینده‌گی ناشی از گازهای خروجی نیروگاه‌ها از اهداف مهم بهره‌برداری از واحدهای تولیدی می‌باشد. میزان آلاینده‌گی هر نیروگاه را می‌توان توسط یک تابع درجه دوم به صورت ریاضی مدل‌سازی نمود. در نتیجه هدف از حل مسئله پخش آلودگی، حداقل نمودن مجموع این توابع درجه دوم می‌باشد. رابطه (۳) تابع هزینه آلودگی نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد [۱۰]

$$E = \sum_{i=1}^n 10^{-t} (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) \text{ ton/h} \quad (3)$$

در این رابطه E میزان آلودگی و α_i ، β_i و γ_i ضرایب آلودگی نیروگاه‌ها می‌باشند.

۲-۳-۲ قیود مسئله

۲-۳-۲-۱ شرط برابری تولید و مصرف با در نظر گرفتن تلفات

به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی در سیستم قدرت باید توازن توان در سیستم قدرت را به عنوان یک قید در نظر گرفت. در این صورت مجموع توان تولیدی نیروگاه‌ها از (۴) به دست می‌آید

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (4)$$

در این رابطه مقدار P_D توان مورد تقاضای شبکه و P_L تابع تلفات شبکه است که از (۵) محاسبه می‌شود [۲۰]

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{.i} P_i + B_{..} \quad (5)$$

که در آن $B_{.i}$ ، B_{ij} و $B_{..}$ ضرایب تلفات خطوط انتقال را نشان می‌دهند.

۲-۳-۲-۲ محدودیت‌های تولید توان در نیروگاه‌ها

محدودیت‌های تولید نیروگاه‌ها شامل محدودیت در تولید توان اکتیو ژنراتورها می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود

$$P_i^{\min} < P_i < P_i^{\max} \quad (6)$$

در رابطه بالا P_i^{\min} و P_i^{\max} به ترتیب مینیمم و ماکسیمم توان اکتیو تولیدی هر واحد نیروگاهی را نشان می‌دهند.

۲-۳-۵ قیود امنیت شبکه قدرت

یکدیگر غالب نمی‌باشند اما بر هر جوابی خارج از مجموعه فوق غالب هستند. در واقع به ازای هر جوابی خارج از مجموعه جواب‌های غالب همیشه می‌توان یک جوابی در مجموعه غالب یافت که بر آن جواب غالب باشد. این بدین معنی است که جواب‌های مجموعه غالب در مقایسه با سایر جواب‌ها بهتر می‌باشند.

۴- معرفی الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه MOHS

۴-۱ مقدمه‌ای بر الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی یکی از ساده‌ترین و جدیدترین روش‌های ابتکاری است که در فرایند جستجوی جواب شذنی بهینه در مسایل بهینه‌سازی، از فرایند نواختن هم‌زمان گروه ارکستر الهام گرفته است. به عبارت دیگر میان پیدا کردن یک حل بهینه در مسئله بهینه‌سازی و فرایند اجرای موزیک تشابه وجود دارد. این روش حل را ابتدا گیم^۱ در سال ۲۰۰۱ میلادی ارائه کرد [۲۴]. مطابق با منطق این روش فراابتکاری، تلاش برای به دست آمدن هماهنگی در یک فرایند موزیک، مشابه پیدا کردن حل بهینه در مسایل بهینه‌سازی است. در سال‌های اخیر به دلیل محاسبات کم، مفهوم ساده، پارامترهای کم، اجرای آسان و کاربردی بودن برای مسایل بهینه‌سازی گسسته و پیوسته، الگوریتم جستجوی هارمونی به یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حل مسایل مختلف تبدیل شده است. این الگوریتم به دلیل الزامات ریاضیاتی کمتری که در مقایسه با سایر روش‌های فراابتکاری دارد می‌تواند در حل مسایل مختلف مهندسی به کار گرفته شود. پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی شامل اندازه حافظه هارمونی (HMS)، نرخ ملاحظه حافظه هارمونی (HMCR) و نرخ تنظیم گام (PAR) و پهناى باند (BW) می‌باشند. هر هارمونی در واقع یک جواب احتمالی مسئله بهینه‌سازی است. مراحل الگوریتم جستجوی هارمونی به ترتیب شامل تعریف مسئله و پارامترهای الگوریتم، مقداردهی حافظه هارمونی، ایجاد هارمونی جدید، به روز رسانی حافظه هارمونی و چک کردن شرط اتمام الگوریتم که معمولاً رسیدن به حداکثر تعداد تکرار است می‌باشد.

۴-۲ الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی چندهدفه

در الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه یک Archive همه هارمونی‌های نامغلوب را در هر مرحله از تکرار نگهداری می‌کند [۲۵]. در این الگوریتم جهت مرتب‌سازی سریع جواب‌های غالب از روشی که در الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II^۲ به کار گرفته شده استفاده می‌شود. این روش در [۲۶] توضیح داده شده است. جزئیات الگوریتم MOHS پیشنهادی برای حل توأمان مسئله پخش بار اقتصادی و پخش آلودگی به صورت زیر بیان می‌شود:

مرحله ۱: مقداردهی اولیه پارامترها

مقداردهی پارامترها از قبیل HMS (اندازه حافظه هارمونی)، AS (اندازه حافظه Archive) و HMCR (نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی) در این مرحله انجام می‌شود.

مرحله ۲: مقداردهی به حافظه هارمونی (HM)

در این مرحله طبق ماتریس زیر به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن

محدودیت ولتاژ در باس‌های مصرف و محدودیت شارش توان در خطوط انتقال شبکه به عنوان قیود امنیت شبکه در نظر گرفته شده و به صورت (۱۳) و (۱۴) بیان می‌شوند [۲۱]

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_B \quad (13)$$

که V_i^{\min} ، V_i^{\max} و N_B به ترتیب ولتاژ باس‌ها، حداقل و حداکثر ولتاژ هر باس و تعداد باس‌های مصرف یا PQ شبکه می‌باشند

$$LF_k \leq LF_k^{\max}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N_L \quad (14)$$

در این رابطه LF توان شارشی هر خط انتقال، LF_k^{\max} حداکثر توان انتقالی هر خط و N_L تعداد خطوط انتقال موجود در شبکه می‌باشد.

در صورت نقض قیود امنیت، توابع پناالتی مربوط طبق رابطه زیر به تابع هدف (F) افزوده می‌شود [۲۲]

$$F^* = F + \lambda_1 \sum_{k=1}^{N_L} (LF_k - LF_k^{\max}) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_B} (V_i - V_i^{\lim}) \quad (15)$$

در این رابطه V_i^{\lim} توسط رابطه زیر بیان می‌شود

$$V_i^{\lim} = \begin{cases} V_i^{\max}, & V_i > V_i^{\max} \\ V_i^{\min}, & V_i < V_i^{\min} \end{cases} \quad (16)$$

ضرایب λ_1 و λ_2 نیز ضرایب جریمه برای حد ولتاژ باس‌ها و توان اکتیو خطوط می‌باشند که مقدار آنها در اینجا ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۳- بهینه‌سازی چندهدفه و مفهوم جواب‌های غالب و مغلوب

در مسایل بهینه‌سازی چندهدفه با بیش از یک تابع هدف روبه‌رو هستیم. در گذشته، مسایل بهینه‌یابی چندهدفه به صورت یک مسئله بهینه‌یابی تک‌هدفه تبدیل و حل شده است اما تفاوت‌های بنیادین بین اصول کارکردی الگوریتم‌های بهینه‌یابی تک‌هدفه و چندهدفه وجود دارد. بیان عمومی مسأله بهینه‌یابی چندهدفه به شکل ذیل است

$$\min f_m(x), \quad m = 1, 2, \dots, m$$

subject to:

$$g_i(x) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (17)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

در این روابط J محدودیت و یا قید نامساوی و K محدودیت و یا قید تساوی وجود دارد. $x_i^{(L)}$ و $x_i^{(U)}$ نیز حدود پایینی و بالایی متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند. در بهینه‌یابی چندهدفه معمولاً به جای یک جواب با مجموعه‌ای از جواب‌ها روبه‌رو هستیم. بررسی جواب‌ها نشان می‌دهد بعضی از آنها در کلیه اهداف نسبت به بقیه جواب‌ها بهتر می‌باشند. در اینجا با مفهوم جواب‌های غالب و مغلوب روبه‌رو می‌شویم. اگر x_1 و x_2 جواب‌هایی از یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه باشند گفته می‌شود x_1 ، x_2 را مغلوب می‌کند اگر و فقط اگر داشته باشیم [۲۳]

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, m\} : f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \wedge \exists j \in \{1, 2, \dots, m\} : f_j(x_1) < f_j(x_2) \quad (18)$$

در اینجا m تعداد توابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. لذا مجموعه جواب‌ها به دو مجموعه جواب‌های غالب و جواب‌های مغلوب تقسیم می‌شوند. در مجموعه جواب‌های غالب هر دو جواب انتخاب شده بر

1. Geem

2. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

مرحله ۷: به دست آوردن بهترین جواب سازگار

جواب‌های موجود در آرشیو جواب‌های جبهه بهینه پارتو اطلاق می‌شوند. بهترین جواب سازگار را می‌توان بر اساس قاعده عضویت فازی [۲۸] که به صورت زیر توصیف می‌شود استخراج نمود:

(۱) با استفاده از تمام جواب‌های موجود در آرشیو ابتدا مقدار F_i^{\min} و F_i^{\max} مربوط به تابع هدف i ام به دست می‌آید.

– مقدار عضویت فازی هر جواب برای هر تابع هدف را می‌توان از طریق تابع عضویت فازی خطی به شکل زیر محاسبه نمود

$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & , F_i = F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & , F_i^{\min} \leq F_i \leq F_i^{\max} \\ 0 & , F_i = F_i^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه بالا μ_i^k مقدار عضویت فازی مربوط به جواب k ام از تابع هدف i ام می‌باشد.

(۳) مقدار تابع عضویت فازی μ^k مربوط به جواب k ام می‌تواند به شکل زیر محاسبه شود

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{nObj} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{AS} \sum_{i=1}^{nObj} \mu_i^k} \quad (22)$$

که $nObj$ تعداد توابع هدف را نشان می‌دهد. بهترین جواب سازگار با توابع هدف جوابی است که مقدار μ^k را ماکسیمم کند. شکل ۳ روند نامی روش بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی هارمونی را نشان می‌دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی در سیستم مورد مطالعه

سیستم نمونه به کار رفته برای شبیه‌سازی، یک سیستم ۱۰ ژنراتوری شامل ۳۹ باس و ۴۶ خط انتقال می‌باشد. اطلاعات مرتبط با ضرایب تابع هزینه سوخت، تابع آلودگی، محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها شامل محدودیت در تولید توان، نرخ شیب و محدودیت نواحی ممنوعه برای سیستم مورد نظر در قسمت پیوست داده شده و تقاضای بار برای سیستم نمونه مورد نظر ۲۰۰۰ مگاوات می‌باشد.

حد مینیمم و ماکسیمم برای ولتاژ باس‌های مصرف شبکه به ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ و حد ماکسیمم برای توان انتقالی خطوط ۳/۵ پریونیت در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی در دو حالت انجام می‌پذیرد. در حالت اول شاخص‌های پایداری شبکه اعمال نمی‌شوند و نتایج حاصل از پخش بار اقتصادی و همچنین ولتاژ باس‌ها و توان خطوطی که از محدوده خود تجاوز نموده‌اند در سیستم تست محاسبه می‌شوند. در حالت بعد شاخص‌های پایداری سیستم از طریق تابع جریمه به تابع هدف مسئله فوق اعمال شده و مقادیر متجاوز از محدوده برای ولتاژ باس‌ها و توان خطوط اصلاح می‌شود.

جهت حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه از الگوریتم MOHS در کنار دو الگوریتم معروف NSGA-II و ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) استفاده می‌شود [۲۱]. همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود در حالت ۱، الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه دارای هزینه سوخت

حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم‌گیری به حافظه مقداردهی می‌شود

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_1^3 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_1^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_1^{HMS+1} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (19)$$

در ماتریس بالا HMS تعداد هارمونی‌های حافظه و N تعداد متغیرهای هر هارمونی می‌باشد.

مرحله ۳: تولید Archive

در این مرحله ابتدا مقدار هر یک از توابع هدف با استفاده از هارمونی‌های موجود در حافظه هارمونی محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از نتایج حاصل از توابع هدف، هارمونی‌های موجود با استفاده از روش مرتب‌سازی سریع پاسخ‌های نامغلوب، رتبه‌بندی می‌گردند. آن گاه هارمونی‌های با رتبه اول در *Archive* نگهداری و سایر هارمونی‌های با رتبه‌های پایین‌تر در حافظه هارمونی (HM) باقی می‌مانند.

مرحله ۴: تولید هارمونی‌های جدید

(۱) یک هارمونی x^{ND} به طور تصادفی از *Archive* و یک هارمونی x^D به طور تصادفی از حافظه هارمونی HM انتخاب می‌شود.
(۲) یک هارمونی جدید با استفاده از هارمونی‌های انتخابی بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} x_i^{NEW} &= x_i^{ND} + rand(-1,1) \times (x_i^{ND} - x_i^D) \\ &\text{if } rand(0,1) < HMRC \\ x_i^{NEW} &= x_i^{\min} + rand(0,1) \times (x_i^{\max} - x_i^{\min}) \\ &\text{if } rand(0,1) \geq HMRC \end{aligned} \quad (20)$$

$i = 1, 2, \dots, NH$

در این روابط x_i^{NEW} متغیر i ام از هارمونی جدید x^{NEW} ، x_i^{ND} و x_i^D متغیر i ام از هارمونی‌های تصادفی x^{ND} و x^D و x_i^{\max} و x_i^{\min} نیز کران‌های پایین و بالا برای هر متغیر می‌باشند. چنانچه متغیری از حد بالا و پایین خود فراتر رفت مقدار حد بالا و پایین به ترتیب برای مقدار متغیر تنظیم می‌شود. NH نیز تعداد گام یا متغیرها در یک هارمونی می‌باشد. – قسمت ۱ و ۲ در مرحله ۴ به تعداد HMS بار تکرار می‌شوند.

مرحله ۵: به روز رسانی *Archive* و *HM*

در این مرحله هارمونی‌های موجود در *Archive* و *HM* و هارمونی‌های جدید تولیدشده با هم ترکیب و سپس هارمونی‌های جمع‌آوری شده با استفاده از قاعده مرتب‌سازی سریع پاسخ‌های نامغلوب رتبه‌بندی می‌شوند. در نهایت، هارمونی‌های با رتبه اول در *Archive* ذخیره و هارمونی‌های با رتبه‌های پایین‌تر در حافظه هارمونی باقی می‌مانند. اگر تعداد هارمونی‌های موجود در *Archive* از اندازه آن فراتر رفت با استفاده از معیار تراکم که در [۲۷] آمده است به حذف هارمونی‌های اضافی می‌پردازیم. همچنین چنانچه تعداد هارمونی‌های موجود در *HM* از اندازه آن کمتر باشد، با انتخاب تعداد مناسبی از هارمونی‌های تصادفی حافظه هارمونی به اندازه HMS پر می‌شود.

مرحله ۶: چک‌نمودن شرط اتمام الگوریتم

اگر تعداد تکرار به تعداد ماکسیمم رسید الگوریتم به مرحله ۷ و در غیر این صورت به مرحله ۴ باز می‌گردد.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی در حالت ۱ و مقایسه آن با سایر روش‌ها.

Case 1	MOHS	MOPSO	NSGA-II
P_1	۴۰۶,۳۷۴۶	۳۸۰	۳۹۵,۱۰۰۸
P_2	۳۲۱,۸۵۲۴	۳۴۱,۸۷۶۶	۳۶۵,۳۲۸۵
P_3	۳۲۰,۱۶۶۲	۳۴۱,۹۰۵۷	۳۱۵,۷۲۴۸
P_4	۱۹۹,۹۳۰۴	۲۰۳,۵۶۰۲	۱۹۸,۳۱۷۶
P_5	۲۳۵,۶۰۶۹	۲۱۶,۴۰۱۹	۲۱۹,۵۹۶۵
P_6	۱۵۰	۱۵۰	۱۴۶,۵۱۴۱
P_7	۱۲۵	۱۲۴,۱۹۶۴	۱۲۱,۸۳۴۲
P_8	۹۰	۹۰	۸۷,۷۵۶۷
P_9	۷۹,۷۱۸۰	۸۰	۷۹,۰۳۷۴
P_{10}	۷۹,۹۳۳۶	۷۹,۶۲۸۷	۷۸,۷۶۲۸
$\sum P_i$	۲۰۰۸,۶	۲۰۰۷,۶	۲۰۰۸,۰
P_L	۷,۴۸۰,۶	۷,۴۴۸,۲	۷,۵۱۳,۷
Cost	۱۶۲۶۰۰	۱۶۲۹۱۰	۱۶۳۲۰۰
Emission	۳۲۰,۵۳	۳۲۳۷۳	۳۳۱۹۸

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی در حالت ۲ و مقایسه آن با سایر روش‌ها.

Case 2	MOHS	MOPSO	NSGA-II
P_1	۴۵۴,۳۵۲۱	۴۵۵,۱۶۲۸	۴۵۶,۶۶۹۳
P_2	۲۸۴,۷۴۵۱	۳۰۷,۷۵۸۹	۳۰۵
P_3	۲۹۰,۸۹۵۵	۲۷۱,۶۸۵۳	۲۷۹,۱۲۶۷
P_4	۲۲۸,۵۰۰	۲۳۴,۰۱۷۱	۲۲۹,۸۸۳۰
P_5	۲۲۶,۴۵۸۸	۲۲۳,۵۵۵۲	۲۳۰
P_6	۱۴۹,۲۵۰۲	۱۴۶,۶۱۱۲	۱۴۸,۷۲۷۴
P_7	۱۲۴,۶۹۰۵	۱۲۳,۶۰۴۵	۱۱۷,۵۰۵۱
P_8	۸۹,۶۴۵۰	۸۹,۲۱۶۳	۸۹,۹۵۲۵
P_9	۸۰	۷۸,۳۱۲۲	۷۸,۵۷۰۳
P_{10}	۷۹,۹۲۹	۷۸,۱۲۰۵	۷۶,۹۷۶۲
$\sum P_i$	۲۰۰۸,۵	۲۰۰۸	۲۰۱۲,۴
P_L	۷,۵۲۶۶	۷,۵۵۰۷	۷,۵۸۲۳
Cost	۱۷۱۸۲۰	۱۷۳۳۵۰	۱۷۴۸۲۰
Emission	۳۲۴۱۵	۳۲۷۲۳	۳۳۰۵۵

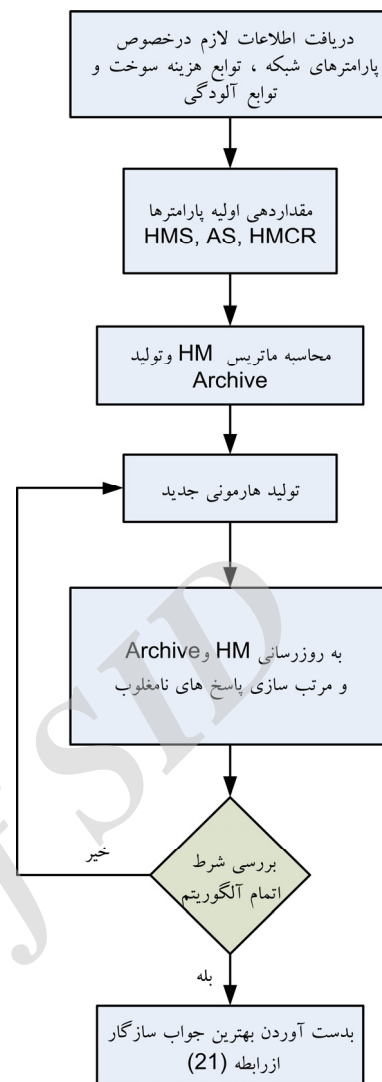
جدول ۳: مقادیر متجاوز از محدوده برای خطوط.

LF_2 (توان انتقالی خط ۲)	۴,۰۹۶۱ (p.u)
LF_{10} (توان انتقالی خط ۱۵)	۳,۷۳۶۴ (p.u)
LF_{78} (توان انتقالی خط ۳۸)	۳,۵۵۴۶ (p.u)

جدول ۴: مقادیر اصلاح شده توان خطوط پس از اعمال ضرایب جریمه.

LF_2 (توان انتقالی خط ۲)	۳,۴۶۷۴ (p.u)
LF_{10} (توان انتقالی خط ۱۵)	۳,۱۰۶۵ (p.u)
LF_{78} (توان انتقالی خط ۳۸)	۳,۴۲۳۱ (p.u)

گرفت. جهت نزدیکی بیشتر با واقعیت و بالابردن دقت، تابع هزینه سوخت نیروگاه‌ها از درجه سوم و کلیه قیود عملی نیروگاه‌ها در نظر گرفته شد. موارد فوق باعث پیچیدگی مسئله شده و نیاز به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مؤثر و کارآمد را بیش از پیش لازم می‌دارد. با توجه به پیچیدگی مسئله، روش بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی هارمونی به همراه دو روش بهینه‌سازی پیشرفته دیگر به کار گرفته شده است. ملاحظه می‌شود الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه جواب‌های بهتری در



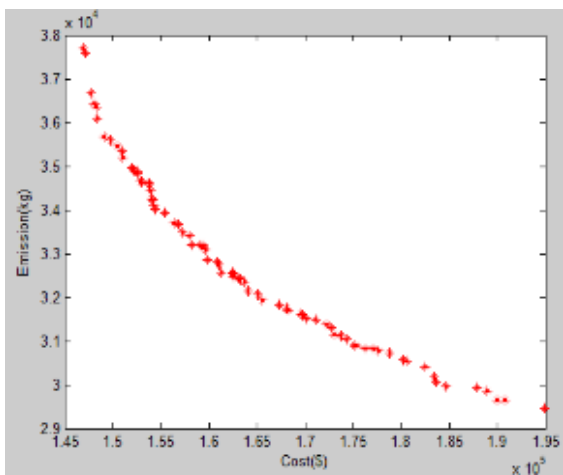
شکل ۳: روندنمای روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم MOHS.

بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها و در عین حال دارای میزان آلاینده‌گی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها است. با توجه به جدول ۲ در حالت دوم پس از اعمال قیود امنیت شبکه الگوریتم چندهدفه فوق نتایج بهتری را نسبت به حالت ۱ ارائه می‌دهد. مقادیر هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی به دست آمده برای این الگوریتم دارای مقادیر بهینه‌تری نسبت به الگوریتم‌های ازدحام ذرات چندهدفه و ژنتیک چندهدفه می‌باشند.

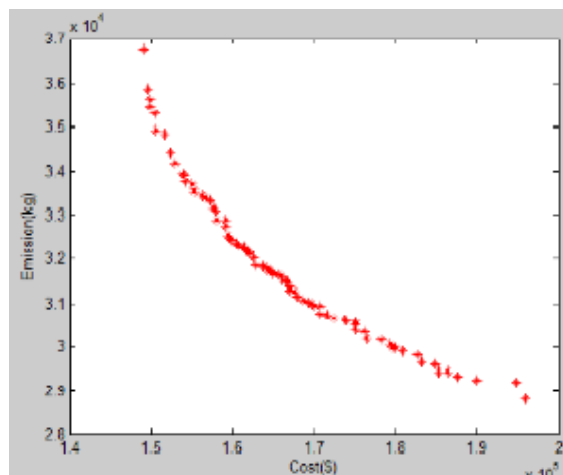
پس از شبیه‌سازی و با توجه به جدول ۳ مشخص شد در حالت ۱، خطوط ۲، ۱۵ و ۳۸ دارای اضافه‌بار و توان عبوری بیش از حد مجاز می‌باشند. در حالت دوم پس از اعمال ضرایب جریمه، خطوط مذکور در بارگذاری عادی قرار گرفته‌اند و توان آنها کاهش یافته که این نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. در هر دو حالت ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز می‌باشند. هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی در حالت دوم نسبت به حالت قبل افزایش داشته است. در نظر گرفتن قیود امنیتی دلیل این افزایش می‌باشد. منحنی‌های جواب‌های نامغلوب در شکل‌های ۴ تا ۹ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها محور عمودی مقادیر تابع آلودگی و محور افقی مقادیر تابع هزینه سوخت را نشان می‌دهند.

۶- نتیجه‌گیری

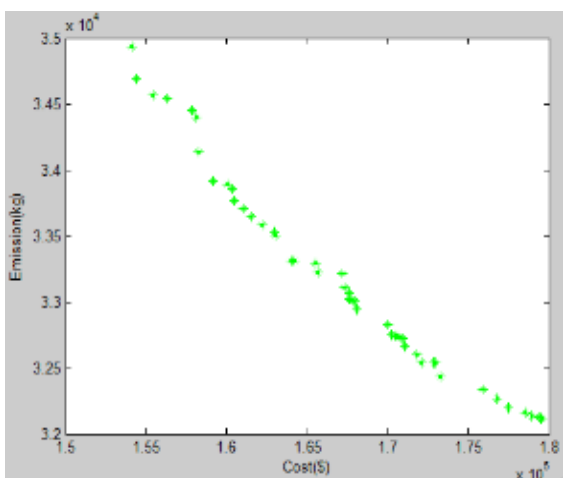
در این مقاله مسئله پخش بار اقتصادی نیروگاه‌ها در کنار پخش بار آلاینده‌گی با در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری شبکه مورد بررسی قرار



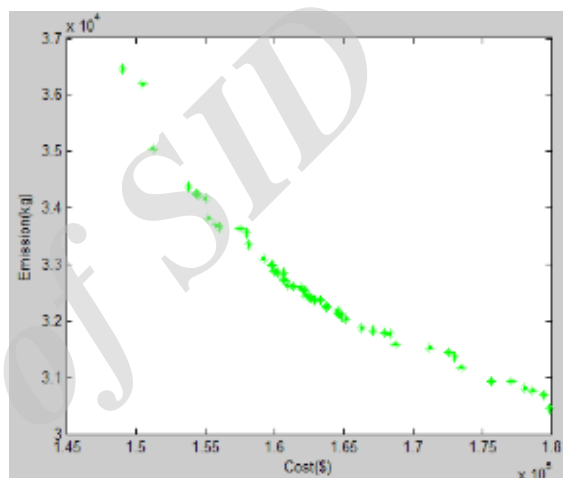
شکل ۷: منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه- حالت ۲.



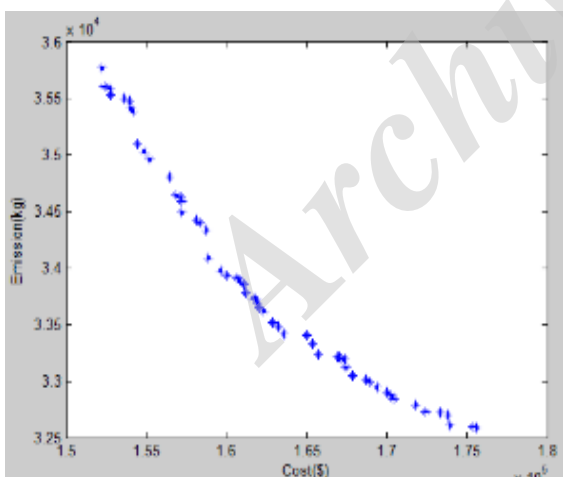
شکل ۴: منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه- حالت ۱.



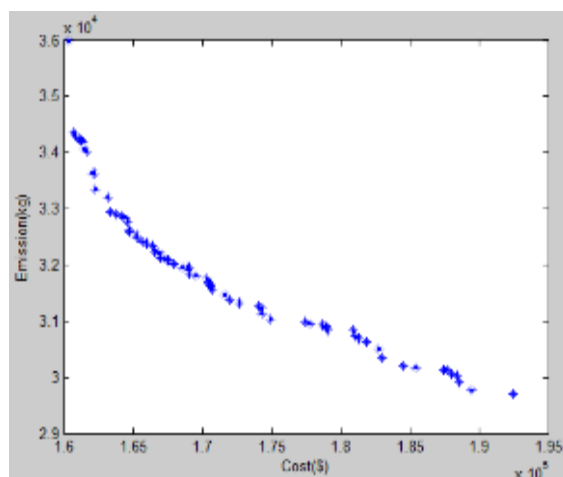
شکل ۸: منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه- حالت ۲.



شکل ۵: منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه- حالت ۱.



شکل ۹: منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم ژنتیک چندهدفه- حالت ۲.



شکل ۶: منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم ژنتیک چندهدفه- حالت ۱.

پیوست

اطلاعات مربوط به پارامترهای مقاله در جداول پ-۱ تا پ-۵ آمده است.

مراجع

[1] J. B. Park, Y. W. Jeong, W. N. Lee, and J. R. Shin, "An improved particle swarm optimization for economic dispatch problems with nonsmooth cost functions," in *Proc. IEEE Conf. and Exposition on*

مقایسه با سایر الگوریتم‌های موجود ارائه می‌دهد. این جواب‌ها باعث کاهش بیشتر هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی نسبت به جواب سایر الگوریتم‌ها می‌شود. همچنین مشخص شد در صورت در نظر نگرفتن قیود امنیتی سیستم خطوط ۲، ۱۵ و ۳۸ دارای اضافه بار و توان بیش از حد مجاز می‌باشند. در حالت دوم پس از اعمال ضرایب جریمه، خطوط مذکور در بارگذاری عادی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی در حالت دوم نسبت به حالت قبل افزایش می‌یابد که دلیل آن برآورده کردن قیود و شاخص‌های پایداری در شبکه می‌باشد.

جدول پ-۱: اطلاعات مربوط به ضرایب تابع هزینه سوخت.

Units	A	B	C	D	E	F
۱	۵۵۰	۸٫۱	۰٫۰۰۰۲۸	۰٫۰۰۰۰۰۰۴۱	۳۰۰	۰٫۰۳۵
۲	۳۰۹	۸٫۱	۰٫۰۰۰۰۵۶	۰٫۰۰۰۰۰۰۸۱	۲۰۰	۰٫۰۴۲
۳	۳۰۹	۸٫۱	۰٫۰۰۰۰۵۶	۰٫۰۰۰۰۰۰۸۱	۲۰۰	۰٫۰۴۲
۴	۲۴۰	۷٫۷۴	۰٫۰۰۰۳۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۱۵۰	۰٫۰۶۳
۵	۲۴۰	۷٫۷۴	۰٫۰۰۰۳۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۱۵۰	۰٫۰۶۳
۶	۲۴۰	۷٫۷۴	۰٫۰۰۰۳۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۱۵۰	۰٫۰۶۳
۷	۲۴۰	۷٫۷۴	۰٫۰۰۰۳۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۱۵۰	۰٫۰۶۳
۸	۲۴۰	۷٫۷۴	۰٫۰۰۰۳۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۱۵۰	۰٫۰۶۳
۹	۲۴۰	۷٫۷۴	۰٫۰۰۰۳۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۱۵۰	۰٫۰۶۳
۱۰	۱۲۶	۸٫۶	۰٫۰۰۰۲۸۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۲۳	۱۰۰	۰٫۰۸۴

Transmission and Distribution. Power Delivery, vol. 3, pp. 1-7, Jun. 2006.

[2] D. Heur, P. Jung-Keun, B. H. Kim, and S. Kwang-Myoung, "Security constraint optimal power flow for the evaluation of transmission capability on Korea electric power system," in Proc. Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 1133-1138, Vancouver, BC, Canada, 15-19 Jul. 2001.

[3] P. Somasundaram and K. Kuppusamy, "Application of evolutionary programming to security constrained economic dispatch," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 27, no. 6, pp. 343-351, Jul. 2005.

[4] K. Kyoung-Shin, J. Leen-Hark, K. Y. Lee, and M. Un-Chul, "Security constrained economic dispatch using interior point," in International Conf. on Power System Technology, 6 pp., Chongqing, China, 22-26 Oct. 2006.

[5] A. K. Al-Othman and K. M. El-Naggar, "Application of pattern search method to power system security constrained economic dispatch with non-smooth cost function," Electric Power System Research, vol. 78, no. 4, pp. 667-675, Apr. 2008.

[6] H. K. Youssef and K. M. El-Naggar, "Genetic based algorithm for security constrained power system economic dispatch," Electric Power System Research, vol. 53, no. 1, pp. 47-51, Jan. 2000.

[7] G. Baskar and M. R. Mohan, "Security constrained economic load dispatch using improved particle swarm optimization suitable for utility system," International J. of Electric Power and Energy Systems, vol. 30, no. 10, pp. 609-618, Dec. 2008.

[8] A. M. Jubril, O. A. Olaniyan, O. A. Komolafe, and P. O. Ogunbona, "Economic emission dispatch problem: a semidefinite programming approach," J. of Applied Energy, vol. 134, pp. 446-455, 1 Dec. 2014.

[9] S. D. Chen and J. F. Chen, "A direct Newton_Raphson economic emission dispatch," International J. of Electric Power and Energy Systems, vol. 25, no. 5, pp. 411-417, Jun. 2003.

[10] A. S. Kumar, K. Dhanushkodi, J. J. Kumar, and C. K. C. Paul, "Particle swarm optimization solution to emission and economic dispatch problem," in Proc. IEEE Conf. on Convergent Technologies for the Asia Pacific Region, TENCON'03, vol. 1, pp. 435-439, Bangalore, India, 15-17 Oct. 2003.

[11] R. E. Perez-Guerrero and J. R. Cedeno-Maldonado, "Differential evolution based economic environmental power dispatch," in Proc. of the 37th Annual North American Power Symp., pp. 191-197, Ames, IA, USA, 23-25 Oct. 2005.

[12] U. Govenc, Y. Sonmez, S. Duman, and N. Yorukeren, "Combined economic emission dispatch solution using gravitational search algorithm," Scintia Iranica, vol. 19, no. 6, pp. 1754-1762, Dec. 2012.

[13] G. Chen, "Combined economic emission dispatch using SFLA," in Proc. IEEE Int Conf. on Information Engineering and Computer Science, 4 pp., Wuhan, China, 19-20 Dec. 2009.

[14] F. Mohammadi and H. Abdi, "A modified crow search algorithm (MCSA) for solving economic load dispatch problem," Applied Soft Computing, vol. 71, pp. 51-65, Oct. 2018.

[15] A. Y. Abdelaziz, E. S. Ali, and S. M. Abd Elazim, "Implementation of flower pollination algorithm for solving economic load dispatch and combined economic emission dispatch problems in power systems," Energy, vol. 101, pp. 506-518, 15 Apr. 2016.

[16] M. Pradhan, P. Kumar Roy, and T. Pal, "Grey wolf optimization applied to economic load dispatch problems," International J. of Electrical Power & Energy Systems, vol. 83, pp. 325-334, Dec. 2016.

[17] M. Kumar and J. S. Dhillon, "Hybrid artificial algae algorithm for economic load dispatch," Applied Soft Computing, vol. 71, pp. 89-109, Oct. 2018.

جدول پ-۲: اطلاعات مربوط به ضرایب تابع انتشار آلاینده‌ها.

Units	α	β	γ
۱	۷۵	-۵٫۷۶	۰٫۰۹
۲	۶۳	-۵٫۴۶	۰٫۰۹۳
۳	۶۳	-۵٫۴۶	۰٫۰۹۳
۴	۷۲	-۵٫۴۲	۰٫۰۵۴
۵	۷۲	-۵٫۴۳	۰٫۰۵۴
۶	۷۲	-۵٫۴۳	۰٫۰۵۴
۷	۷۲	-۵٫۴۳	۰٫۰۵۴
۸	۷۲	-۵٫۴۳	۰٫۰۵۴
۹	۷۲	-۵٫۴۳	۰٫۰۵۴
۱۰	۶۹	-۴٫۲۰	۰٫۰۴۵

جدول پ-۳: اطلاعات مربوط به محدودیت‌های نرخ شیب و محدودیت در تولید.

Units	P_i	UR_i	DR_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}
۱	۲۵۰	۲۱۰	۲۱۰	۱۰۰	۵۰۰
۲	۲۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۵	۵۰۰
۳	۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۷۰	۴۰۰
۴	۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۳۵۰
۵	۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۰	۲۵۰
۶	۱۰۰	۵۰	۵۰	۵۰	۲۰۰
۷	۷۵	۵۰	۵۰	۲۰	۱۵۰
۸	۵۰	۴۰	۴۰	۴۰	۱۴۰
۹	۵۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۰۰
۱۰	۵۰	۳۰	۳۰	۵۰	۱۰۰

جدول پ-۴: اطلاعات مربوط به محدودیت نواحی ممنوعه.

Units	Zone ۱	Zone ۲
۱	[۳۵۰ ۳۸۰]	-
۲	[۲۰۰ ۲۱۰]	[۲۴۰ ۲۶۰]
۳	[۱۵۰ ۱۷۰]	-
۴	[۸۰ ۹۰]	[۱۱۰ ۱۲۰]
۵	[۹۰ ۱۱۰]	[۱۲۰ ۱۳۵]
۶	[۱۰۰ ۱۰۵]	-
۷	[۱۵۰ ۱۷۰]	-
۸	[۷۰ ۷۵]	-
۹	[۷۵ ۸۰]	[۱۱۰ ۱۲۵]
۱۰	-	-

جدول پ-۵: اطلاعات مربوط به ماتریس ضرایب تابع تلفات.

	۰٫۰۰۰۰۴۹	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۷	۰٫۰۰۰۰۱۷	۰٫۰۰۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۰۱۹	۰٫۰۰۰۰۲۰	$\times 10^{-1}$
	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۴۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۷	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۰۱۸	
	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۳۹	۰٫۰۰۰۰۱۰	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۶	
	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۰	۰٫۰۰۰۰۴۰	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۰	۰٫۰۰۰۰۱۱	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۵	
B	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۷	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۳۵	۰٫۰۰۰۰۱۱	۰٫۰۰۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	
	۰٫۰۰۰۰۱۷	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۰	۰٫۰۰۰۰۱۱	۰٫۰۰۰۰۳۶	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۵	
	۰٫۰۰۰۰۱۷	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۱	۰٫۰۰۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۳۸	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۸	
	۰٫۰۰۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۰۱۲	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۴۰	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	
	۰٫۰۰۰۰۱۹	۰٫۰۰۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۴۲	۰٫۰۰۰۰۱۹	
	۰٫۰۰۰۰۲۰	۰٫۰۰۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۰۱۶	۰٫۰۰۰۰۱۹	۰٫۰۰۰۰۴۴	
B.											-
B.											-

[25] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thielle, *SPEA-II: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Zurich, Switzerland, 2001.

[26] K. Deb, A. Pratab, S. Agrawal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, Apr. 2002.

[27] M. A. Abido, "Multi objective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 10, no. 3, pp. 315-329, Jun. 2006.

[18] R. M. Rizk-Allah, R. A. El-Sehiemy, and G. G. Wang, "A novel parallel hurricane optimization algorithm for secure emission/ economic load dispatch solution," *Applied Soft Computing*, vol. 63, pp. 206-222, Feb. 2018.

[19] N. Ghorbani and E. Babaei, "Exchange market algorithm for economic load dispatch," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 19-27, Feb. 2016.

[20] A. Safari and H. Shayeghi, "Iteration particle swarm optimization procedure for economic load dispatch with generator constraints," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 6043-6048, May 2011.

[21] B. Goswami and V. Agrawal, "Security constrained economic dispatch using a hybrid fuzzy genetic algorithm," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Communication and Informatics*, 6 pp., Coimbatore, Coimbatore, India, 4-6 Jan. 2013.

[22] S. Sivasubramani and S. Swarup, "Multiagent based particle swarm optimization approach to economic dispatch with security constraints," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power Systems*, 6 pp., Kharagpur, India, 27-29 Dec. 2009.

[23] S. Sivasubramani and K. S. Swarup, "Environmental economic dispatch using multi-objective harmony search algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 81, no. 9, pp. 144-153, Sept. 2014.

[24] Z. W. Geem, J. H. Kim, G. V. Loganathan, "A new heuristic optimization algorithm: harmony search," *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60-68, 1 Feb. 2001.

حسین شریفی فارغ‌التحصیل مهندسی برق در مقاطع لیسانس و فوق لیسانس به ترتیب از دانشگاه‌های بیرجند و سیستان و بلوچستان در سال‌های ۹۲ و ۹۴ می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان توزیع اقتصادی بار، مدیریت انرژی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است.

محمود اوکاتی صادق فارغ‌التحصیل دانشگاه تهران در مقاطع لیسانس و فوق لیسانس بوده و مدرک دکتری خویش را از دانشگاه استراسکالاید در انگلستان دریافت نموده است. نام‌برده هم‌اکنون عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان بوده و زمینه تحقیقاتی مورد علاقه ایشان بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت، شبکه‌های توزیع برق و شبکه‌های هوشمند می‌باشد.