

## توزیع اقتصادی توان و حرارت (CHPED) با در نظر گرفتن آلاینده‌ها و قیود عملیاتی نیروگاه‌ها با الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه (MOHS)

حسین شریفی<sup>۱</sup>، محمود اوکاتی صادق<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

hoseinsharifi94@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

oukati@ece.usb.ac.ir

چکیده: در سیستم‌های تولید سستی، انرژی دریافتی از سوخت صرفاً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، درحالی‌که در سیستم‌های تولید همزمان (CHP)، انرژی سوخت افزون بر تولید انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی نیز تولید می‌کند؛ از این رو، بازده این سیستم‌ها بسیار بیشتر از سیستم‌های سنتی است و این لزوم استفاده از سیستم‌های CHP را توجیه می‌کند. ظهور سیستم‌های CHP در کنار نیروگاه‌های سوخت فسیلی باعث می‌شود توزیع اقتصادی توان و حرارت بین واحدهای تولیدکننده انرژی به نحوی که کمترین هزینه را داشته باشد، از مسائل مهم بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به شمار آید. در این میان، لزوم در نظر گرفتن آلاینده‌های ناشی از واحدهای تولیدکننده انرژی در کنار سایر قیود عملیاتی نیروگاه‌ها باعث پیچیدگی مسئله توزیع اقتصادی بار می‌شود. حضور توابع هدف متعدد و گاه متضاد، مسئله فوق را به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌کند. این مقاله ضمن بررسی مسئله توزیع اقتصادی بار در نیروگاه‌ها در کنار واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، از روش فراابتکاری الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه در حل مسئله پخش اقتصادی توان و حرارت استفاده می‌کند. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، از سیستمی با ۴ واحد تولید توان الکتریکی، ۲ واحد تولید همزمان و یک واحد تولید توان حرارتی استفاده می‌شود. کارایی الگوریتم پیشنهادی از طریق مقایسه با سایر روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی چندهدفه نظیر NSGA-II و MOPSO نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع اقتصادی توان و حرارت، قیود عملیاتی نیروگاه‌ها، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، آلاینده‌های زیست‌محیطی.

## ۱. مقدمه

محدودیت در تولید توان و گرما برای نیروگاه‌های سه‌گانه در این مسئله در نظر گرفته شده است. کاربردهای الگوریتم فراتکاملی کلونی زنبورها<sup>۴</sup> در حل مسئله پخش اقتصادی توان حرارت را می‌توان در مرجع [۶] جست‌وجو کرد. در این مسئله، محدودیت در تولید توان و حرارت، به صورت یک ناحیه امکان‌پذیر نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی از نظر زمان محاسباتی و نتایج عددی بر سایر روش‌ها برتری دارد.

به منظور بهبود بخشیدن به پاسخ‌های به‌دست‌آمده در [۶] از روش پیشنهادی به نام تجزیه بندرز<sup>۵</sup> در مرجع [۷] استفاده شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد این روش در اثبات کارایی خود نسبت به روش پیشنهادی به کاررفته در مرجع [۶] موفق بوده است. همچنین در مرجع [۸] روش تجزیه بندرز مضاعف برای حداکثرسازی سود اقتصادی نیروگاه‌ها همزمان با کاهش آلودگی محیط‌زیست به کار گرفته شده است. در این مقاله، از نیروگاه‌های تولید همزمان (CHP) در کنار نیروگاه‌های تولید حرارت استفاده شده است. در مرجع [۹] الگوریتم تبادل بازار برای بهینه‌سازی مسئله پخش بار اقتصادی در واحدهای تولید همزمان به کار گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله نشان از توانمندی‌های الگوریتم مذکور در حل مسائل مربوط به بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی واحدهای تولید همزمان دارد. الگوریتم فاخته نیز در مرجع [۱۰] برای حل مسئله پخش بار اقتصادی واحدهای تولید همزمان با در نظر گرفتن اثر شیربخار بر تابع هزینه سوخت نیروگاه‌های تولید توان و تلفات خطوط انتقال به کار گرفته شده است.

در مرجع [۱۱] برای حل مسئله پخش بار اقتصادی آلودگی توان و حرارت<sup>۶</sup> مدنظر، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است. داده‌ها و سیستم آزمون مورد نیاز برای شبیه‌سازی و حل مسئله در مرجع [۶] آمده است. در مسئله مذکور، ابتدا هریک از مسائل پخش بار اقتصادی و پخش آلودگی به صورت مجزا بهینه‌سازی می‌شوند؛ این بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم تک‌هدفه کدشده ژنتیک انجام می‌شود. در مرحله بعد به حل توأمان هر دو مسئله فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه پرداخته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از به کارگیری الگوریتم چندهدفه ژنتیک با نسخه دوم الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر قوت پارتو<sup>۷</sup> مقایسه می‌شود. برای حل مسائل فوق از سیستم تست اول با ۷ واحد تولیدی شامل ۴ واحد حرارتی متداول، دو واحد CHP و یک واحد گرمایشی و سیستم تست دوم با ۵ واحد تولیدی، یک واحد حرارتی متداول، ۳ واحد CHP و یک واحد گرمایشی استفاده می‌شود. اطلاعات

امروزه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP)<sup>۱</sup> به سبب بازدهی بیشتر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در نتیجه افزایش مصرف انرژی و استفاده روزافزون از سیستم‌های CHP، بهینه‌سازی تولید توان و کاهش هزینه تولید در سال‌های اخیر اهمیت یافته است.

هدف از مسئله پخش اقتصادی توان و حرارت (CHPED)<sup>۲</sup> توزیع همزمان و بهینه توان و حرارت بین واحدهای تولیدی است؛ به گونه‌ای که حداقل هزینه را با در نظر گرفتن قیود عملی تولید توان و حرارت بین واحدهای تولیدی در بر داشته باشد. این در حالی است که بارهای چندگانه و وابستگی متقابل ظرفیت حرارتی الکتریکی در واحدهای تولید همزمان، منجر به پیچیدگی مسئله توزیع بار اقتصادی در سیستم‌های قدرت الکتریکی می‌شود. تاکنون روش‌های متعددی برای حل مسئله پخش اقتصادی توان و حرارت نظیر تکرار لاندل<sup>۱</sup>، لاگرانژ<sup>۲</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> در مراجع ارائه شده است.

روش ارائه‌شده در مرجع [۱] برای حل مسئله پخش اقتصادی توان و حرارت مبتنی بر جدایی‌پذیری، تابع هدف مسئله مدنظر است؛ یعنی تابع هدف مدنظر مجموع توابع هزینه واحدهای مجزا، و بیشترین قیود مربوط به یک واحد معین است. در این روش، استراتژی دوسطحی در نظر گرفته شده است. سطح پایینی با استفاده از روش تکرار لاندل ( $\lambda$ ) به حل مسئله توزیع اقتصادی برای واحدهای مجزا، با ضرایب متناظر با بارهای حرارتی و الکتریکی داده‌شده می‌پردازد و سطح بالایی با استفاده از ضرایب حساسیت، ضرایب متناظر با بارهای الکتریکی و حرارتی را به‌نگام می‌کند. این فرایند تا زمان تأمین بارهای حرارتی و الکتریکی تکرار می‌شود. در مرجع [۲] از روش لاگرانژ برای حل مسئله فوق استفاده شده است. در اینجا مسئله به دو زیرمسئله توزیع توان الکتریکی و توزیع توان حرارتی تجزیه می‌شود. در مرجع [۳] الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله توزیع اقتصادی توان و حرارت با استفاده از توابع جریمه<sup>۳</sup> بهبودیافته ارائه شده است.

در مرجع [۴] برای حل مسئله فوق، از روش برنامه‌ریزی تکاملی استفاده شده است. سیستم تست به کاررفته در این مسئله شامل ۱ واحد تولیدی، ۲ واحد تولید همزمان و ۱ واحد تولید حرارت است. الگوریتم تکاملی تفاضلی از دیگر روش‌های تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی است که در مرجع [۵] برای حل مسئله پخش بار اقتصادی در نیروگاه‌های CHP به کار رفته است. قیود تعادل توان و تعادل گرما و همچنین

4. Heuristic Bee Colony Algorithm  
5. Benders Decomposition  
6. Combined Heat and Power Economic Emission Dispatch  
7. Strength Pareto Evolutionary Algorithm

1. Combined Heat and Power  
2. Combined Heat and Power Economic Dispatch  
3. Penalty Function

آلاینده‌گی به‌عنوان یک تابع هدف در فرایند بهینه‌سازی مصرف سوخت و هزینه‌های تولید قرار می‌گیرد.

عمده‌ترین گازهای آلوده‌کننده تولیدی توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی عبارت است از: دی‌اکسیدکربن<sup>۳</sup>، دی‌اکسید سولفور<sup>۴</sup> و ترکیبات آن و دی‌اکسید نیتروژن<sup>۵</sup> و ترکیبات آن. با اندازه‌گیری میزان آلودگی ناشی از نیروگاه می‌توان تابع انتشار آلاینده‌گی نیروگاه را که نشان‌دهنده هزینه آلاینده‌گی ناشی از مصرف سوخت هر نیروگاه است، به دست آورد. بدین ترتیب در مسئله پخش بار اقتصادی در کنار بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌توان به بهینه‌سازی تابع انتشار آلاینده‌گی نیروگاه‌ها نیز پرداخت.

در بخش ۲، به طرح مسئله پخش بار اقتصادی توان و حرارت در نیروگاه‌های تولید همزمان پرداخته شده است. در بخش ۳، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته ارائه می‌شود. بخش ۴ به شبیه‌سازی در سیستم تست مدنظر و در نهایت بخش ۵ به بررسی نتایج اختصاص یافته‌اند.

## ۲. فرمول‌بندی مسئله

### ۱.۲. تابع هزینه سوخت

تابع هزینه سوخت در مسئله پخش بار اقتصادی توان و حرارت به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$F_{Total} = F_P + F_{CHP} + F_H \quad (1)$$

که  $F_P$ ،  $F_{CHP}$  و  $F_H$  به‌ترتیب توابع هزینه سوخت برای واحدهای تولید توان الکتریکی، تولید همزمان توان الکتریکی حرارتی و تولید توان حرارتی هستند که روابط آن‌ها به‌ترتیب زیر آمده است [۱۳]:

$$F_P = \sum_{i=1}^{N_p} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (2)$$

تابع هزینه سوخت در نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی، به‌شکل‌های گوناگونی مدل می‌شود، اما استفاده از تابع هزینه درجه دوم مرسوم‌ترین شکل مدل کردن است. این تابع درجه دوم معمولاً به‌کمک آزمایش‌های مختلف و تست واحدهای نیروگاهی در شرایط مختلف تعیین می‌شود.

علاوه بر این، ژنراتورها معمولاً چندین شیر متفاوت برای بخار دارند که باعث می‌شود منحنی ورودی‌خروجی از حالت یک تابع هزینه هموار خارج شود. در نتیجه یک مؤلفه سینوسی به رابطه تابع

مربوط به توابع هدف و انتشار آلاینده‌گی واحدهای نیروگاهی و همچنین ضرایب تلفات برای دو سیستم تست در مرجع [۱۱] داده شده است. نمودارهای همگرایی پاسخ‌ها مربوط به حل مسئله در حالت اول و همچنین منحنی جواب‌های نامغلوب<sup>۱</sup> برای حل مسئله مدنظر در حالت دوم برای دو سیستم تست پیشنهادی، در ادامه آورده شده است.

در مرجع [۱۲] برای حل مسئله دینامیکی پخش توان و حرارت و با در نظر گرفتن اثر شیر بخار از نسخه خودتعلیم تطبیقی الگوریتم جست‌وجوی سیستم شارژ<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. الگوریتم جست‌وجوی سیستم شارژ از دسته روش‌های تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی است. از قیود اعمال‌شده به این مسئله، می‌توان به محدودیت در تولید توان و حرارت، محدودیت نرخ شیب دینامیکی که به واحدهای تولید توان و تولید همزمان توان و گرما اعمال می‌شود و محدودیت ذخیره چرخان اشاره کرد. حل مسئله مدنظر در ۳ حالت صورت می‌گیرد: در حالت اول، مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی با در نظر گرفتن محدودیت ذخیره چرخان و بدون واحدهای تولید همزمان CHP و تولید گرما حل می‌شود. در این حالت، حل مسئله در یک سیستم ۱۰ واحدی و با/بدون در نظر گرفتن تلفات انجام می‌شود. در حالت دوم مسئله پخش بار اقتصادی مشابه حالت اول ولی با در نظر گرفتن تنها واحدهای گرمایشی بررسی می‌شود. در این حالت، از سیستم‌های تست ۱۰، ۳۰ و ۱۵۰ واحدی استفاده می‌شود. در حالت سوم، واحدهای CHP و گرمایشی هر دو در نظر گرفته می‌شوند. نتایج مسئله پخش بار مدنظر با در نظر گرفتن ۲۴ بازه زمانی در جدول بیان شده است. مقایسه‌ای بین روش به‌کاررفته در مرجع [۱۲] و روش‌هایی از قبیل برنامه‌ریزی مربعی متوالی، برنامه‌ریزی تکاملی، تکامل تفاضلی تطبیقی، ازدحام ذرات بهبودیافته، ترکیبی ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی مربعی متوالی و همچنین نسخه متداول الگوریتم پیشنهادی فوق صورت گرفته است که برتری نتایج عددی روش به‌کاررفته را در تمامی حالت‌ها به اثبات می‌رساند.

تأمین انرژی کافی و مطمئن از الزامات رشد اقتصادی جوامع به حساب می‌آید، اما متأسفانه استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی باعث گسترش آلودگی و افزایش گازهای گلخانه‌ای شده و تأثیرات مخرب و جبران‌ناپذیری را بر محیط‌زیست تحمیل می‌کند. از آنجایی که نیروگاه‌های سوخت فسیلی از بزرگ‌ترین عوامل تولید آلاینده‌گی و گازهای گلخانه‌ای هستند، مسئله کاهش آلاینده‌گی ناشی از نیروگاه‌ها به‌طور وسیعی مدنظر محققان و بهره‌برداران واحدهای تولیدی قرار گرفته است. به همین دلیل در مسئله پخش بار اقتصادی، موضوع کاهش

3. CO<sub>2</sub>  
4. SO<sub>x</sub>  
5. NO<sub>x</sub>

1. Non-Dominated Solutions  
2. Self-Adaptive Learning Charged System Search Algorithm

$$E_{CHP} = \sum_{j=1}^{N_C} (\theta_j + \eta_j + \psi_j) P_j \quad (7)$$

که  $\theta_j$  و  $\eta_j$  به ترتیب ضرایب تابع انتشار آلاینده‌های SOx و NOx در نیروگاه‌های تولید همزمان و  $\psi_j$  نیز ضریب تابع انتشار آلاینده‌های گاز CO<sub>2</sub> در نیروگاه‌های فوق هستند.

$$E_H = \sum_{k=1}^{N_H} (\pi_k + \rho_k + \sigma_k) P_k \quad (8)$$

که  $\rho_k$  و  $\pi_k$  به ترتیب ضرایب تابع انتشار آلاینده‌های حاصل از گازهای NOx و SOx و  $\sigma_k$  ضریب تابع آلاینده‌های ناشی از گاز CO<sub>2</sub> در نیروگاه‌های تولید توان حرارتی هستند.

### ۳.۲. قیود مسئله

#### ۱.۳.۲. تعادل در تولید توان الکتریکی و حرارتی

روابط این قید به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$\sum_{i=1}^{N_P} P_i + \sum_{j=1}^{N_C} P_j = P_D + P_L \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{N_C} H_j + \sum_{k=1}^{N_H} H_k = H_D \quad (10)$$

که  $P_D$  و  $H_D$  به ترتیب توان الکتریکی و حرارتی مورد تقاضا هستند و  $P_L$  مقدار تلفات توان الکتریکی در سیستم را نشان می‌دهد. در رابطه (۹)،  $P_j$  و  $P_i$  به ترتیب توان الکتریکی خروجی در واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان است.

در رابطه (۱۰)،  $H_j$  و  $H_k$  به ترتیب توان حرارتی در نیروگاه‌های تولید همزمان و تولید توان حرارتی را نشان می‌دهند.  $N_C$ ،  $N_H$  و  $N_P$  نیز به ترتیب تعداد نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی، تولید همزمان و تولید توان حرارتی را نشان می‌دهد.

مقدار تلفات را می‌توان از روش‌های مختلف پخش بار به دست آورد. اما یک روش تخمینی ساده‌تر نیز برای انجام این کار وجود دارد. به کمک رابطه (۱۱) که به رابطه کرون<sup>۱</sup> معروف است، می‌توان مقدار تلفات را با دقت مناسبی به دست آورد [۱۴]:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_C+N_P} \sum_{j=1}^{N_C+N_P} P_i B_{ij} P_j \quad (11)$$

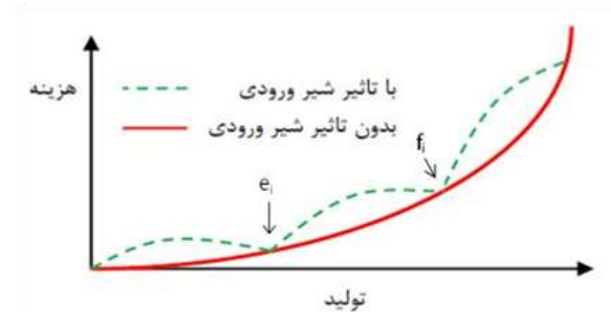
که  $N_C$  و  $N_P$  به ترتیب تعداد واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان و  $B_{ij}$  نیز عناصر ماتریس ضرایب تلفات است.

هزینه سوخت درجه دوم افزوده می‌شود. هر شیر بخاری که باز شود، تأثیر بارگذاری خود را به صورت ریپل در شکل (۱) نشان می‌دهد.

$$F_{CHP} = \sum_{j=1}^{N_C} f_j(P_j, h_j) = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2 + d_j H_j + e_j H_j^2 + f_j P_j H_j \quad (3)$$

$$F_H = \sum_{k=1}^{N_H} f_k(H_k) = a_k + b_k H_k + c_k H_k^2 \quad (4)$$

که  $N_C$ ،  $N_H$  و  $N_P$  به ترتیب تعداد واحدهای تولیدی توان الکتریکی، تولید همزمان و تولید توان حرارتی هستند.



شکل (۱): منحنی هزینه سوخت بر حسب توان تولیدی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار

### ۲.۲. تابع انتشار آلاینده‌ها

تابع انتشار آلاینده‌ها برای نیروگاه‌های سه‌گانه مشابه تابع هزینه سوخت در رابطه (۵) بیان می‌شود [۱۴]:

$$E_{Total} = E_P + E_{CHP} + E_H \quad (5)$$

که  $E_P$ ،  $E_{CHP}$  و  $E_H$  به ترتیب توابع میزان انتشار آلاینده‌ها برای واحدهای تولید توان الکتریکی، تولید همزمان توان الکتریکی حرارتی و تولید توان حرارتی هستند که روابط آن‌ها در ادامه آمده است. هریک از این روابط، به صورت حاصل جمع دو مؤلفه بیان می‌شود: مؤلفه اول تابع انتشار ناشی از گازهای اکسید نیتروژن و اکسید گوگرد را بیان می‌کند؛ مؤلفه دوم نیز تابع انتشار ناشی از گازهای دی‌اکسید کربن را نشان می‌دهد [۱۴]:

$$E_P = \sum_{i=1}^{N_P} (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \zeta_i \exp(\lambda_i P_i) + \tau_i P_i) \quad (6)$$

که  $\alpha_i$ ،  $\beta_i$ ،  $\gamma_i$ ،  $\zeta_i$  و  $\lambda_i$  ضرایب تابع هزینه آلاینده‌ها حاصل از گازهای SOx و NOx در نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی و  $\tau_i$  ضریب تابع هزینه آلودگی حاصل از گاز CO<sub>2</sub> در این نیروگاه‌ها هستند.

### ۲.۳.۲. محدودیت در تولید توان الکتریکی و حرارتی

نیروگاه‌ها با توجه به طراحی آن‌ها و مشخصات فیزیکی و ترمودینامیکی می‌توانند در بازه مشخصی به تولید توان بپردازند. مقدار تولید نیروگاه‌ها از حد ماکزیمم نمی‌تواند بیشتر شود. همچنین با توجه به شرایط راه‌اندازی و عملکرد نمی‌توانند در مقادیر پایین نیز تولید داشته باشند. پس حد مینیمم تولید برای آن‌ها تعریف می‌شود. بنابراین توان خروجی واحدهایی که تنها اقدام به تولید توان و یا حرارت می‌کنند با حداقل و حداکثر ظرفیت تولیدی آن‌ها محدود می‌شود. در نیروگاه‌های تولید همزمان (CHP) چون خروجی نیروگاه شامل دو کمیت توان و حرارت است. لذا قید محدودیت در تولید، شامل محدودیت در تولید توان الکتریکی و تولید حرارت به صورت توأم است. بنابراین نمایش این قید مانند نیروگاه‌های حرارتی به صورت بازه‌ای نیست. بلکه به صورت یک منحنی بسته ABCDEF مطابق شکل (۲) خواهد بود.

روابط این قیود به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

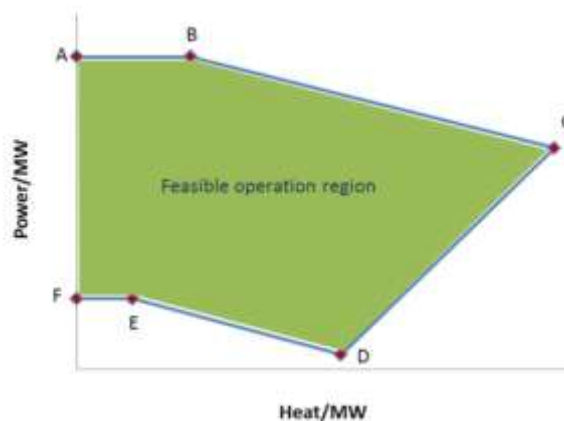
$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, i \in 1, 2, \dots, N_P \quad (12)$$

$$P_j^{\min}(H_j) \leq P_j \leq P_j^{\max}(H_j), j \in 1, 2, \dots, N_C \quad (13)$$

$$H_j^{\min}(P_j) \leq H_j \leq H_j^{\max}(P_j), j \in 1, 2, \dots, N_C \quad (14)$$

$$H_k^{\min} \leq H_k \leq H_k^{\max}, k \in 1, 2, \dots, N_H \quad (15)$$

که  $P_i^{\max}$  و  $P_i^{\min}$  به ترتیب حد پایین و بالا برای توان الکتریکی تولیدی در واحدهای تولید توان الکتریکی،  $H_k^{\max}$  و  $H_k^{\min}$  به ترتیب حد پایین و بالا برای توان حرارتی در واحدهای تولید توان حرارتی است. روابط (۱۳) و (۱۴) روابط نامساوی و خطی هستند که محدودیت در تولید توان الکتریکی و حرارتی را در نیروگاه‌های تولید همزمان نشان می‌دهند. این دو رابطه به صورت توأم یک ناحیه عملکردی را نشان می‌دهند که در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲) می‌توان به رابطه توان الکتریکی و حرارتی در نیروگاه‌های تولید همزمان پی برد.



شکل (۲): ناحیه عملکردی برای سیستم تولید همزمان

### ۳.۳.۲. محدودیت در کاهش یا افزایش تولید توان الکتریکی

این محدودیت در نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی و تولید همزمان مطرح است؛ یعنی در شرایط واقعی مقدار تغییر تولید در هر ساعت نسبت به تولید اولیه دارای محدودیت است. با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها شرایط مسئله به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌شود. روابط مربوط به محدودیت‌های فوق به صورت رابطه‌های (۱۶) تا (۱۷) است [۱۳]:

$$P_i^{PO} - P_{i,0}^{PO} \leq UR_i^{PO}, i \in 1, \dots, N_P \quad (16)$$

$$P_{i,0}^{PO} - P_i^{PO} \leq DR_i^{PO}, i \in 1, \dots, N_P \quad (17)$$

$$P_j^{CHP} - P_{j,0}^{CHP} \leq UR_j^{CHP}, j \in 1, \dots, N_C \quad (18)$$

$$P_{j,0}^{CHP} - P_j^{CHP} \leq DR_j^{CHP}, j \in 1, \dots, N_C \quad (19)$$

که  $UR_i^{PO}$  و  $DR_i^{PO}$  به ترتیب حد افزایش و کاهش تولید توان الکتریکی در نیروگاه‌های توان الکتریکی،  $UR_j^{CHP}$  و  $DR_j^{CHP}$  به ترتیب حد افزایش و کاهش تولید توان الکتریکی در نیروگاه‌های تولید همزمان است.  $P_{i,0}^{PO}$  و  $P_{j,0}^{CHP}$  نیز به ترتیب توان اولیه تولیدی در نیروگاه‌های توان الکتریکی و تولید همزمان است.

### ۴.۳.۲. محدودیت تولید در نواحی ممنوعه

یکی دیگر از محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها محدودیت ناشی از نواحی ممنوعه است. در حقیقت این محدودیت ناشی از عملکرد فنی نیروگاه‌هاست که به دلیل مشکلاتی در لوازم جانبی، از قبیل پمپ و بویلر در هنگام تولید به وجود می‌آید و باعث می‌شود واحدهای نیروگاهی نتوانند در تمام محدوده معرفی شده در رابطه (۱۲) توان تولید کنند. شکل (۳) نواحی ممنوعه را در تابع هزینه سوخت یک نیروگاه نشان می‌دهد.

این محدودیت برای واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان تعریف می‌شود و رابطه آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_j^{\min} \leq P_j \leq P_j^{LB_1} \quad (20)$$

$$P_j^{UB_{k-1}} \leq P_j \leq P_j^{LB_k} \quad k = 2, 3, \dots, N_{PZj} \quad (21)$$

$$P_j^{UB_k} \leq P_j \leq P_j^{\max} \quad k = N_{PZj} \quad (22)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_{GPZ}$$

که  $P_j^{LB_k}$  و  $P_j^{UB_k}$  به ترتیب محدوده‌های بالا و پایین مناطق اجرایی ممنوعه  $k$ ام از واحد تولید همزمان  $(MW)$ ،  $N_{PZj}$  تعداد مناطق ممنوعه ژنراتور  $j$ ام و  $N_{GPZ}$  مجموع تعداد واحدهای تولید همزمان و تولید توان الکتریکی با مناطق اجرایی ممنوعه است.

هدف امکان‌پذیر است. با این‌همه در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، مفهوم جواب‌های نامغلوب در مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده به کار گرفته می‌شوند.

اگر  $x_1$  و  $x_2$  جواب‌هایی از مسئله معین باشند، گفته می‌شود  $x_1$  را مغلوب می‌کند اگر و فقط اگر داشته باشیم [۱۷]:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, m\} : f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \wedge \exists j \in \{1, 2, \dots, m\} : f_j(x_1) < f_j(x_2) \quad (24)$$

که  $m$  تعداد توابع هدف مسئله است. در این صورت یک مرتب‌سازی جزئی در میان مجموعه جواب‌های به‌دست‌آمده تعریف می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت جواب‌های به‌دست‌آمده به دو گروه جواب‌های غالب (نامغلوب) و مغلوب تقسیم‌بندی می‌شوند. مجموعه جواب‌های غالب، مجموعه جواب‌های بهینه پارتو<sup>۳</sup> و مجموعه توابع اهداف ناشی از آن‌ها، جبهه بهینه پارتو<sup>۴</sup> نامیده می‌شوند.

### ۳.۳. معرفی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه

یکی از اولین روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم NSGA-II است [۱۸]. این روش به‌صورت موفقیت‌آمیزی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به کار رفته است. در این مقاله، از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مدنظر استفاده و نتایج با پاسخ‌های حاصل از سایر روش‌های مرسوم مقایسه خواهد شد. روش مرتب‌سازی سریع پاسخ‌های نامغلوب که در الگوریتم NSGA-II در مرجع [۱۸] توصیف شده، در الگوریتم MOSH نیز به کار می‌رود. در الگوریتم MOSH یک بایگانی [۱۹] همه جواب‌های نامغلوب را در هر مرحله از تکرار نگهداری می‌کند. جزئیات الگوریتم MOSH مدنظر برای حل توأمان مسئله پخش بار اقتصادی و پخش آلودگی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

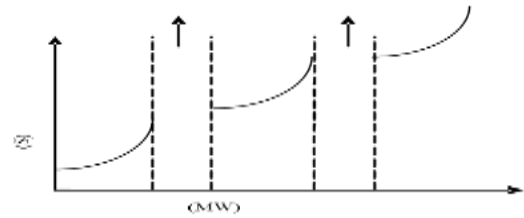
#### مرحله ۱: مقداردهی اولیه پارامترها

مقداردهی پارامترها از قبیل HMS (اندازه حافظه هارمونی)، AS (اندازه حافظه بایگانی؛ 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 حافظه مقداردهی می‌شود:

$$(25)$$



شکل (۳): تأثیر نواحی ممنوعه بهره‌برداری بر تابع هزینه سوخت نیروگاه [۱۵]

### ۳. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه (MOHS)<sup>۱</sup>

#### ۱.۳. مقدمه‌ای بر الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی روش ابتکاری ساده و جدیدی است که در راستای جست‌وجوی جواب بهینه در مسائل بهینه‌سازی، از فرایند نواختن همزمان گروه ارکستر موزیک الهام می‌گیرد. به عبارت دیگر، میان پیدا کردن یک حل بهینه در مسئله‌ای پیچیده و فرایند اجرای موزیک تشابه وجود دارد. این روش حل را ابتدا گیم<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۱ میلادی ارائه کرد [۱۶]. مطابق با منطق این روش فراابتکاری تلاش برای به‌دست‌آوردن هماهنگی در یک فرایند موزیک، مشابه پیدا کردن جواب بهینه در مسائل بهینه‌سازی است. مراحل الگوریتم جست‌وجوی هارمونی به‌ترتیب شامل تعریف مسئله و پارامترهای الگوریتم، مقداردهی حافظه هارمونی، ایجاد هارمونی جدید، به‌روزرسانی حافظه هارمونی و بررسی شرط اتمام الگوریتم است که معمولاً رسیدن به حداکثر تعداد تکرار است.

#### ۲.۳. بهینه‌سازی چندهدفه و مفهوم جواب‌های غالب و مغلوب

بهینه‌سازی چندهدفه در واقع تعمیم بهینه‌سازی تک‌هدفه برای تعدادی محدود از اهداف است که می‌تواند حتی با یکدیگر در تعارض باشند. در کاربردهای عملی بهینه‌سازی چندهدفه، اهمیت بسزایی دارد و به‌شکل رابطه (۲۳) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min/Max } f_m(x) \quad m = 1, 2, \dots, M \\ & \text{subject to } g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \\ & h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \\ & x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \end{aligned} \quad (23)$$

قیود  $g_j$  و  $h_k$  به‌همراه حدود  $x_i^{\min}$  و  $x_i^{\max}$  فضای ممکن جواب و یا تصمیم‌گیری ( $\Omega$ ) را تشکیل می‌دهند. در مسائل بهینه‌سازی، چندهدفه اغلب با بیش از یک جواب بهینه روبه‌رو هستیم. با افزایش تعداد اهداف مقایسه این جواب‌ها پیچیده می‌شود. این در حالی است که در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه مقایسه جواب‌ها از طریق خود تابع



باقی می‌ماند. اگر تعداد هارمونی‌های موجود در Archive از اندازه آن فراتر رفت، با استفاده از معیار تراکم که در مرجع [۱۸] آمده است، به حذف هارمونی‌های اضافی پرداخته می‌شود. 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: بررسی شرط اتمام الگوریتم

اگر تعداد تکرار به تعداد ماکزیمم رسید، الگوریتم به مرحله (۷) و در غیر این صورت به مرحله (۴) بازمی‌گردد.

#### مرحله ۷: به دست آوردن بهترین جواب سازگار

بهترین جواب سازگار بر اساس قاعده عضویت فازی [۱۹] که به صورت زیر توصیف شده است، استخراج می‌شود:

۱. ابتدا تمام پاسخ‌هایی که تابع هدف نام آن‌ها بین  $F_i^{max}$  و  $F_i^{min}$  است، جست‌وجو می‌شود.

۲. مقدار عضویت فازی پاسخ‌ها برای هر تابع هدف را می‌توان از طریق تابع عضویت فازی خطی، به شکل رابطه (۲۷) محاسبه کرد:

$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & F_i = F_i^{min} \\ \frac{F_i^{max} - F_i}{F_i^{max} - F_i^{min}} & F_i^{min} \leq F_i \leq F_i^{max} \\ 0 & F_i = F_i^{max} \end{cases} \quad (27)$$

که  $\mu_i^k$  مقدار عضویت فازی مربوط به جواب  $k$ ام از تابع هدف  $i$ ام است.

۳. تابع عضویت فازی مرتبط با مقدار تابع  $\mu_k$  برای جواب  $k$ ام می‌تواند بدین صورت محاسبه شود:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{nObj} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{AS} \sum_{i=1}^{nObj} \mu_i^k} \quad (28)$$

$nObj$  در اینجا تعداد توابع هدف و  $AS$  تعداد هارمونی‌های موجود در Archive هستند. بهترین جواب سازگار با توابع هدف جوابی است که مقدار  $\mu^k$  را ماکزیمم کند.

#### ۴. مروری بر سایر الگوریتم‌های به کار برده شده

##### ۱.۴. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

کندی<sup>۲</sup> و ابرهات<sup>۳</sup> ایده الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO<sup>۴</sup> را برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ مطرح کردند. PSO یک الگوریتم

$$HM = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_{N-1}^1 & X_N^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & \dots & X_{N-1}^2 & X_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_1^{HMS-1} & X_2^{HMS-1} & \dots & X_{N-1}^{HMS-1} & X_N^{HMS-1} \\ X_1^{HMS} & X_2^{HMS} & \dots & X_{N-1}^{HMS} & X_N^{HMS} \end{bmatrix}$$

که HMS تعداد هارمونی‌های حافظه و  $N$  تعداد متغیرهای هر هارمونی است.

#### مرحله ۳: تولید حافظه بایگانی

در این مرحله، ابتدا مقدار هریک از توابع هدف هارمونی‌های موجود در حافظه هارمونی محاسبه می‌شوند. سپس هارمونی‌های موجود با استفاده از روش مرتب‌سازی سریع پاسخ‌های نامغلوب و همچنین معیار ازدحام ذرات که در مرجع [۱۸] بیان شده است رتبه‌بندی می‌شوند. آنگاه هارمونی‌های با رتبه بالاتر در حافظه بایگانی (Archive) نگهداری و هارمونی‌هایی 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 هارمونی دیگر  $X_D$  به طور تصادفی از حافظه هارمونی HM انتخاب می‌شوند.

۲. یک هارمونی جدید از هارمونی‌های انتخابی  $X_{ND}$  و  $X_D$  با استفاده از رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} x_i^{NEW} &= x_i^{ND} + rand(-1, 1) * (x_i^{ND} - x_i^D) \\ \text{if } rand < HMCR \\ x_i^{NEW} &= x_i^{min} + rand(0, 1) * (x_i^{max} - x_i^{min}) \end{aligned} \quad (26)$$

$\text{if } rand \geq HMCR$   
 $i = 1, 2, \dots, NH$

که  $x_i^{NEW}$  متغیر نام از هارمونی جدید  $X^{NEW}$  است و  $x_i^{ND}$  و  $x_i^D$  متغیر نام از هارمونی‌های تصادفی  $X_{ND}$  و  $X_D$  هستند.  $x_i^{max}$  و  $x_i^{min}$  نیز کران‌های پایین و بالا برای هر متغیر است. چنانچه تغییری از حد بالا و پایین خود فراتر برود، مقدار حد بالا و پایین به ترتیب برای مقدار متغیر تنظیم می‌شود. NH نیز تعداد گام یا متغیرها در یک هارمونی است. قسمت (۱) و (۲) در مرحله (۴) به تعداد HMS بار تکرار می‌شوند.

#### مرحله ۵: به روزرسانی HM و Archive

در این مرحله، هارمونی‌های موجود در HM و Archive و هارمونی‌های جدید تولیدشده با هم ترکیب می‌شوند. سپس هارمونی‌های جمع‌آوری‌شده 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

تمام ذرات؛

- تعیین بهترین ذره و بهترین خاطره شخصی هریک از ذرات؛
- در صورت محقق نشدن شرایط خاتمه به ۳ بروید و در غیر این صورت پایان.

#### ۱.۱.۴. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات چندهدفه (MOPSO)<sup>۱</sup>

الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ذرات در مفهوم و پارامترها دارای تفاوت‌هایی با نسخه تک‌هدفه آن است. با ذکر مراحل الگوریتم چندهدفه، تفاوت‌های آن با نسخه تک‌هدفه معین می‌شود. مفهوم جواب‌های نامغلوب در رابطه (۲۴) بیان شد. در الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات نیز مانند جست‌وجوی هارمونی چندهدفه حافظه‌ای به نام مخزن<sup>۲</sup> برای نگهداری جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود. تفاوتی که مابین این الگوریتم و نسخه تک‌هدفه آن ایجاد می‌شود، در مرحله تعیین بهترین ذره و بهترین خاطره شخصی اتفاق می‌افتد. به گونه‌ای که در نسخه تک‌هدفه، این به‌روزرسانی بر مبنای یک مقایسه عددی است که بین مقادیر توابع هدف اتفاق می‌افتد، اما در نسخه چندهدفه، این مقایسه یک مقایسه برداری است که بر مبنای مفهوم جواب‌های غالب و مغلوب و مقایسه بردارهای توابع هدف اتفاق می‌افتد [۲۱].

#### ۲.۴. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از فن‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند. این الگوریتم را نخستین بار، جان هلند معرفی کرد. الگوریتم ژنتیک به‌طور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به‌صورت فرایندهای تصادفی انتخاب می‌شوند. مراحل الگوریتم ژنتیک عبارت است از:

- ایجاد جمعیت تصادفی و ارزیابی آن‌ها؛
- انتخاب والدین و ترکیب آن‌ها برای ایجاد جمعیت فرزندان (Crossover)؛
- انتخاب اعضای جمعیت برای اعمال جهش و ایجاد جمعیت جهش‌یافتگان (Mutation)؛
- ادغام جمعیت اصلی، فرزندان و جهش‌یافتگان و ایجاد جمعیت اصلی جدید؛
- اگر شرایط خاتمه محقق نشود، از مرحله ۲ تکرار می‌شود؛
- پایان.

#### ۱.۲.۴. الگوریتم ژنتیک چندهدفه

محاسبه‌ای تکاملی الهام‌گرفته از طبیعت و بر اساس تکرار است. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته‌جمعی پرندگان و ماهی‌ها بود. از آنجایی که PSO نیز با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه شروع می‌شود، شبیه بسیاری دیگر از الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک پیوسته و الگوریتم رقابت استعماری است. برخلاف الگوریتم ژنتیک، PSO هیچ عملگر تکاملی همانند جهش و توزیع ندارد. هر عنصر جمعیت، یک ذره نامیده می‌شود (که همان معادل کروموزوم در GA و یا کشور در الگوریتم رقابت استعماری) است. در واقع الگوریتم PSO از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می‌شود که به‌طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت مدل می‌شوند. این ذرات به‌صورت تکرارشونده‌ای در فضای  $n$  بُعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به‌عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جست‌وجو کنند. بُعد فضای مسئله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مدنظر برای بهینه‌سازی است. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش‌آمده در میان همه ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای  $n$  بُعدی مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه بهینه عام پیدا شود. ذرات سرعت‌ها و موقعیتشان را برحسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی به‌روز می‌کنند. رابطه به‌روزرسانی سرعت و موقعیت برای این الگوریتم در روابط زیر آمده است [۲۰]:

$$v(t+1) = w * v(t) + c_1 * r_1 (p(t) - x(t)) + c_2 * r_2 * (g(t) - x(t)) \quad (29)$$

در رابطه به‌روزرسانی سرعت در بالا  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب شتاب یا ضریب نوستالژی،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی بین صفر و یک،  $w$  ضریب اینرسی،  $v(t)$ ،  $x(t)$  به ترتیب سرعت و مکان قبلی ذره و  $v(t+1)$  سرعت جدید ذره است.  $g(t)$  و  $p(t)$  نیز به ترتیب بهترین موقعیت ذرات و بهترین خاطره شخصی برای هر ذره است [۲۰]:

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (30)$$

که  $x(t+1)$  موقعیت جدید ذره است.

مراحل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات عبارت است از:

- ایجاد جمعیت اولیه؛
- تعیین بهترین ذره و بهترین خاطره شخصی هریک از ذرات؛
- به‌روزرسانی سرعت و موقعیت از روابط (۲۹) و (۳۰) برای



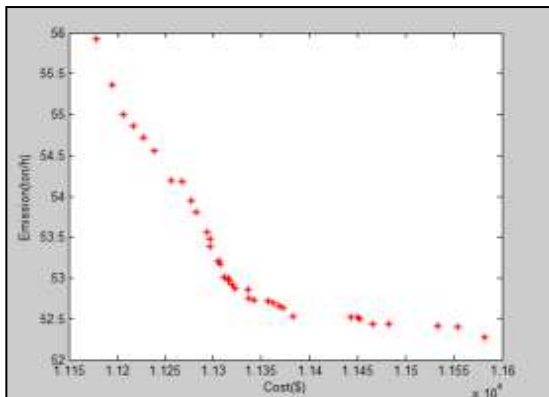
جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با سایر روش‌ها

Case	MOHS	MOPSO	NSGA-II
P1	۶۹/۹۹۸۴	۶۹/۹۶۹۱	۵۵/۷۵۸۴
P2	۹۵/۰۰	۱۱۰/۲۷۴۲	۱۰۵/۰۰
P3	۱۱۲/۷۳۶۷	۱۳۵/۰۰	۱۲۲/۷۷۱۲
P4	۱۸۱/۷۷۰۷	۱۴۱/۵۱۵۴	۱۷۳/۰۶۷۸
P5	۸۱/۴۳۴۳	۸۴/۱۹۰۵	۸۴/۱۳۸۰
P6	۶۰/۰۰	۶۰/۰۰	۶۰/۰۰
H1	۱۰۲/۷۵۵۴	۸۶/۴۴۶۹	۸۶/۷۵۷۶
H2	۱/۸۳۴۱	۰/۰۰	۰/۰۰
H3	۴۵/۶۲۲۹	۶۳/۸۴۴۱	۶۵/۵۴۸۷
$\sum P_i$	۶۰۰/۹۴۰۱	۶۰۰/۹۴۹۱	۶۰۰/۷۳۵۴
$\sum H_i$	۱۵۰/۲۱۲۴	۱۵۰/۲۹۱۰	۱۵۲/۳۰۶۳
PL	۰/۷۲۶۱	۰/۷۲۰۶	۰/۷۲۳۵
Cost	۱۱۳۳/۲	۱۱۴۰/۰	۱۱۴۲/۳
Emission	۵۲/۷۵۲۶	۵۲/۹۳۳۱	۵۳/۴۱۳۳

همان‌طور که در بخش ۳.۳ اشاره شد، الگوریتم NSGA-II که در واقع نسخه چندهدفه الگوریتم ژنتیک به حساب می‌آید، از موفق‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است. تفاوتی که الگوریتم فوق با نسخه تک‌هدفه ژنتیک دارد، مشابه تفاوت سایر الگوریتم‌های تک‌هدفه با چندهدفه نام‌برده در بالاست. برخلاف سایر الگوریتم‌های چندهدفه فوق، این الگوریتم به یک حافظه مجزا مانند آرشیو یا مخزن برای نگهداری جواب‌های نامغلوب در هر تکرار نیاز ندارد؛ و مراحل حذف و رتبه‌بندی جواب‌ها در میان اعضای جمعیت انجام می‌شود. تنها تفاوتی که میان این الگوریتم و نسخه تک‌هدفه آن ایجاد می‌شود، در مرحله ۴ از نسخه تک‌هدفه است؛ زیرا برای ایجاد جمعیت جدید در این الگوریتم نیاز به حذف و در آخر رتبه‌بندی وجود دارد. معیار رتبه‌بندی در دو نسخه تک‌هدفه و چندهدفه متفاوت است.

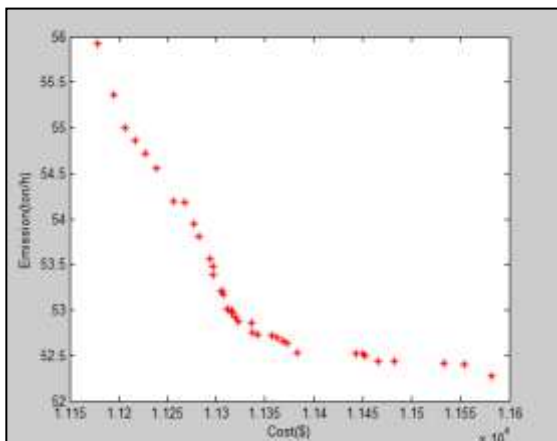
### ۵. نتایج شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه

سیستم آزمایشی مورد استفاده در این مقاله، شامل ۴ واحد تولید توان الکتریکی، ۲ واحد تولید همزمان (CHP) و ۱ واحد تولید توان حرارتی است. میزان توان الکتریکی و حرارتی مورد تقاضا برای این مسئله به ترتیب ۶۰۰ و ۱۵۰ مگاوات است. اطلاعات مربوط به ضرایب توابع هزینه سوخت نیروگاه‌های سه‌گانه فوق، محدودیت در تولید توان الکتریکی، محدودیت نرخ شیب برای نیروگاه‌های توان الکتریکی و تولید همزمان و ماتریس تلفات سیستم در قسمت ضمیمه آمده است. نواحی عملکردی برای نیروگاه‌های تولید همزمان در مرجع [۲۲] داده شده است.



شکل (۴): منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه

در ادامه، نتایج مسئله توزیع بار اقتصادی در سیستم آزمایشی مورد مطالعه با در نظر گرفتن قیود عملیاتی نیروگاه‌ها و آلاینده‌های زیست‌محیطی، تأثیر توان الکتریکی و حرارتی دیماندر بر هزینه سوخت نیروگاه‌ها و میزان آلاینده‌های آن‌ها و همچنین نمودار همگرایی آن بیان شده است. نتایج به‌خوبی قابلیت الگوریتم‌های مطرح‌شده در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مدنظر را به‌رغم پیچیدگی آن نشان می‌دهد. مطابق جدول (۱)، نتایج حاصل از الگوریتم MOHS در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بهینه‌ترند. جداول (۲) و (۳) تأثیر افزایش دیماندر توان الکتریکی و توان حرارتی را بر میزان هزینه و آلاینده‌ها نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول که با استفاده از الگوریتم MOHS به دست آمده است، افزایش دیماندر توان الکتریکی تأثیر بیشتری بر میزان آلاینده‌ها در مقایسه با افزایش دیماندر در توان حرارتی دارد. شکل‌های (۴-۶) به ترتیب جواب‌های نامغلوب به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل (۵): منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه

MOPSO (ازدحام ذرات چندهدفه) و NSGA-II (ژنتیک چندهدفه) نشان می‌دهد. تأثیر افزایش توان الکتریکی و حرارتی مورد تقاضا بر هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی نیروگاه‌های سه‌گانه نشان داده شده است. همان طور که جداول نشان می‌دهد، با افزایش توان حرارتی و الکتریکی مورد تقاضا، میزان هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی در نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد.

### ضمائم

جدول (۴): اطلاعات مربوط به ضرایب تابع هزینه سوخت در واحدهای تولید توان الکتریکی

Units	A	B	C	E	F
۱	۲۵	۲/۰۰	۰/۰۰۸	۱۰۰	۰/۰۴۲
۲	۶۰	۱/۸	۰/۰۰۳	۱۴۰	۰/۰۴
۳	۱۰۰	۲/۱	۰/۰۰۱۲	۱۶۰	۰/۰۳۸
۴	۱۲۰	۲/۰۰	۰/۰۰۱	۱۸۰	۰/۰۳۷

جدول (۵): اطلاعات مربوط به محدودیت‌های نرخ شیب و محدودیت در تولید در واحدهای تولید توان الکتریکی

Units	$P_i^0$	$UR_i$	$DR_i$	$P_i^{min}$	$P_i^{max}$
۱	۴۰	۳۰	۳۰	۱۰	۷۵
۲	۷۵	۴۰	۴۰	۲۰	۱۲۵
۳	۱۰۰	۵۰	۵۰	۳۰	۱۷۵
۴	۱۵۰	۹۰	۹۰	۴۰	۲۵۰

جدول (۶): اطلاعات مربوط به محدودیت نواحی ممنوعه در واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان در مسئله

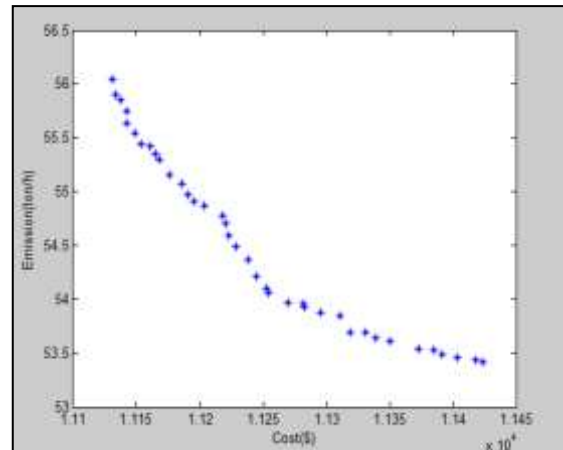
Units	Zone 1	Zone 2
۱	[۲۵ ۳۰]	[۴۵ ۵۰]
۲	[۵۵ ۶۵]	[۹۵ ۱۰۵]
۳	[۶۵ ۷۵]	[۱۳۰ ۱۳۵]
۴	[۸۵ ۱۰۰]	-
۵	[۱۳۵ ۱۴۰]	-
۶	[۷۵ ۹۰]	[۱۰۰ ۱۰۵]

جدول (۷): اطلاعات مربوط به ضرایب تابع هزینه سوخت و محدودیت نرخ شیب در واحدهای تولید همزمان

Units	$\alpha$	$\beta$	$\xi$	$\gamma$	$\lambda$	$\varphi$	$P_0$	UR	DR
۱	۲۶۵۰	۱۴/۵	۰/۰۳۴۵	۴/۲	۰/۰۳	۰/۰۳۱	۱۰۰	۵۰	۵۰
۲	۱۲۵۰	۳۶	۰/۰۴۳۵	۰/۶	۰/۰۲۷	۰/۰۱۱	۱۰۰	۴۰	۴۰

جدول (۸): اطلاعات مربوط به ضرایب تابع هزینه سوخت برای واحدهای تولید توان حرارتی

Units	$\sigma$	$\mu$	$\rho$	$H^{min}$	$H^{max}$
۱	۹۵۰	۲/۰۱۰۹	۰/۰۳۸	۰	۲۶۹۵/۲



شکل (۶): منحنی جواب‌های نامغلوب برای الگوریتم ژنتیک چندهدفه

جدول (۲): تأثیر افزایش توان الکتریکی دیماندر بر هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی

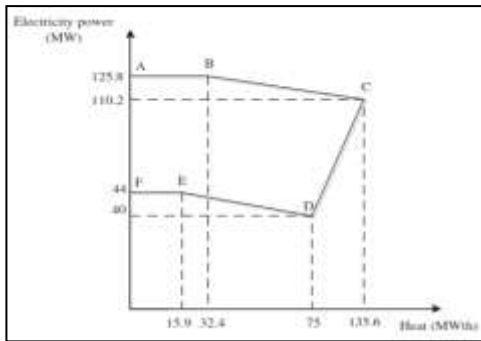
$P_D$	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰	۷۵۰	۸۰۰
Cost	۱۱۳۳۲	۱۱۵۵۶	۱۱۷۶۹	۱۲۶۵۹	۱۴۳۱۶
Emission	۵۲/۷۵۲۶	۵۷/۷۸۸۲	۶۴/۴۱۶۲	۷۳/۳۳۶۲	۸۷/۲۷۹۲

جدول (۳): تأثیر افزایش توان حرارتی مورد تقاضا بر هزینه سوخت و آلاینده‌گی

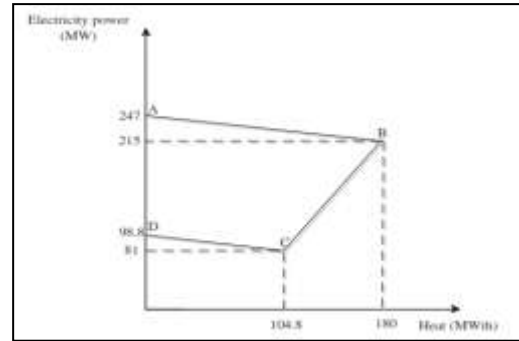
HD	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
Cost	۱۱۳۳۲	۱۱۶۵۱	۱۲۰۹۳	۱۲۶۱۸	۱۳۳۳۲
Emission	۵۲/۷۵۲۶	۵۴/۲۳۲۹	۵۴/۳۴۴۴	۵۴/۰۹۳۲	۵۴/۷۵۶۰

### ۶. نتیجه گیری

در این مقاله، مسئله پخش اقتصادی توان در نیروگاه‌های سوخت فسیلی در حضور منابع تولید همزمان (CHP) و حرارتی و با در نظر گرفتن مبحث آلاینده‌گی و قیود عملیاتی نیروگاه‌ها بررسی شد. با توجه به ماهیت مسئله و وجود اهداف در تعارض، از روش بهینه‌سازی چندهدفه در حل مسئله فوق استفاده شد. الگوریتم‌های موفق و مطرح در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به کار رفت. نتایج شبیه‌سازی در این مرحله، توانایی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه را در پیدا کردن جواب بهینه از دو جنبه هزینه سوخت و میزان آلاینده‌گی آن‌ها در مقایسه با الگوریتم‌های



شکل (۸): ناحیه عملکردی برای واحد تولید همزمان شماره ۲ [۱۹]



شکل (۷): ناحیه عملکردی برای واحد تولید همزمان شماره ۱ [۱۹]

جدول (۹): اطلاعات مربوط به ماتریس ضرایب تابع تلفات

B	$\begin{bmatrix} 49 & 14 & 15 & 15 & 20 & 25 \\ 14 & 45 & 16 & 20 & 18 & 19 \\ 15 & 16 & 39 & 10 & 12 & 15 \\ 15 & 20 & 10 & 40 & 14 & 11 \\ 20 & 18 & 12 & 14 & 35 & 17 \\ 25 & 19 & 15 & 11 & 17 & 39 \end{bmatrix} \times 10^{-7}$
B0	-
B00	-

## مراجع

- [1] Rooijers, F. J. and Van. R. A. M., "Static Economic Dispatch for Co-Generation Systems", IEEE Transaction on Power System, Vol. 9, No. 3, pp. 1392-1398, Aug. 1994.
- [2] Guo, T., Henwood, M. I. and Van Ooijen, M., "An Algorithm for Combined Heat and Power Economic Dispatch", IEEE Transaction on Power System, Vol. 11, No. 4, pp. 1778-1784, 1996.
- [3] Songand, Y. H. and Xuan, Q. Y., "Combined Heat and Power Economic Dispatch Using Genetic Algorithm Based Penalty Function Method", Electric Mach. Power Syst, Vol. 26, pp. 363-372, 1998.
- [4] Wong, K. P. and Algie, C., "Evolutionary Programming Approach for Combined Heat and Power Dispatch", Electric Power System Research, Vol. 61, No. 3, pp. 227-232, Apr. 2002.
- [5] Sinha, N., Saikia, L. C. and Malakar, T., "Optimal Solution For non-Convex Heat and Power Dispatch Problems Using Differential Evolution", IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, pp. 1-5, Dec. 2010.
- [6] Basu, M., "Bee Colony Optimization for Combined Heat and Power Economic Dispatch", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 38, No. 11, pp. 13527-13531, Oct. 2011.
- [7] Abdolmohammadi, H. and Kazemi, A., "A Benders Decomposition Approach for a Combined Heat and Power Economic Dispatch", Energy Conversion and Management, Vol. 71, pp. 21-31, Jul 2013.
- [8] Sadeghian, H.R. and Ardehali, M.M., "A Novel Approach for Optimal Economic Dispatch Scheduling of Integrated Combined Heat and Power Systems for Maximum Economic Profit and Minimum Environmental Emissions Based on Benders Decomposition", Energy, Vol. 102, pp 10-23, 2016.
- [9] Ghorbani, N., "Combined Heat and Power Economic Dispatch Using Exchange Market Algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 82, pp. 58-66, 2016.
- [10] Nguyen, T. T., Vo, D. N. and Dinh, B. H., "Cuckoo Search Algorithm for Combined Heat and Power Economic Dispatch", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 81, pp. 204-214, 2016.
- [11] Basu, M., "Combined Heat and Power Economic Emission Dispatch Using Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II", International Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 53, pp. 135-141, Dec 2013.
- [12] Bahmani, B., Farjah, E. and Seifi, A., "A New Algorithm for Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch Considering Valve Point Effect", Energy, Vol. 52, pp. 320-332, Apr 2013.
- [13] Firoozi, B., Farjah, E. and Seifi, A., "A New Algorithm for Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch Considering Valve Point Effect", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 52, pp. 320-332, Apr. 2013
- [14] Shi, B., Yan, L. and Wu, W., "Multi Objective Optimization for Combined Heat and Power Economic Dispatch with Power Transmission Loss and Emission Reduction", Journal of Energy, Vol. 56, pp. 135-143, Jul. 2013.
- [15] Jadhav, H. T. and Roy, R., "Gbest Guided Artificial Bee Colony Algorithm for Environmental/Economic Dispatch Considering Wind Power", Expert Systems with Applications, pp. 6385-6399, 2013.
- [۱۶] تقی‌لو، علی و خان تیموری، علیرضا، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و کاربرد در مسائل بهینه‌سازی، چهاردهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، ۱۳۹۰.

- [17] Sivasubramani, S. and Swarup, K.S., "Environmental Economic Dispatch Using Multi Objective Harmony Search Algorithm", Electric Power System Research, Vol. 81, No. 9, pp. 144-153, 2014.
- [18] Deb, K., Pratab, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T., "Multi Objective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Trans on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197. 2002.
- [19] Zitler, E., Laumanns, M. and Thielle, L., *SPEA-II: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Zurich, Switzerland.
- [20] Benayed, F.Z., Lahouari, A. and Mostefa, R., *Harmony Search Algorithm Optimization for the Combined Heat and Power Economic Dispatch*, 2015.
- [21] Abido, M.A., "Multi Objective Particle Swarm for Environmental Economic Dispatch Problem", International Power Engineering Conference, Singapore, pp. 1385-1390, Dec 2007.
- [22] Benayed, F.Z., Lahouari, A. and Mostefa, R., *Harmony Search Algorithm Optimization for the Combined Heat and Power Economic Dispatch*, 2015.