**ارائه الگوریتم نوین ازدحام ذرات اصلاح شده برای بهینه­سازی مساله پخش بار اقتصادی نیروگاه­های حرارتی**

**مرتضی برخی,[[1]](#footnote-1)1، امین رنجبران2**

**1- دانشجوی دکتری، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد**

**2- استادیار، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد**

**خلاصه**

مساله برنامه­ریزی تولید واحدهای تولیدی یکی از مسائل مهم در بین مسائل مربوط به سیستم­های قدرت می­باشد. این اهمیت از جوانب فنی و اقتصادی در اولویت می­باشد. در مساله برنامه­ریزی واحدهای تولیدی، در صورت معلوم بودن وضعیت در مدار بودن واحدهای تولیدی، بایستی پخش­بار اقتصادی به­نحوی انجام شود که علاوه بر رعایت تمامی قیود و محدودیت­های فنی حاکم بر سیستم، توجیه اقتصادی نیز داشته باشد. در صورت در نظر گرفتن تمامی مسائل فنی و اقتصادی، مساله پخش­بار اقتصادی به یک مساله غیرخطی با ابعاد بالا تبدیل می­گردد. برای حل چنین مساله­ای نیازمند روش­های مبتنی بر تکرار عددی می­باشد. با توجه به وجود مجهولات غیرخطی و تعدد آن­ها، دقت و سرعت همگرایی الگوریتم­های هوشمند معمول کافی نمی­باشد و نیازمند فراابتکاری می­باشد. در این مقاله، نسخه اصلاح شده جدیدی برای الگوریتم ازدحام ذرات (CCPSO) پیشنهاد شده است که دقت و سرعت بالایی در همگرایی مسائل غیرخطی دارد. به این ترتیب، مساله پخش­بار اقتصادی واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن قیود فنی و اقتصادی به کمک الگوریتم CCPSO حل گردیده است. تابع هدف در این مساله به­صورت مجموع وزن­دار هزینه تولید واحدها و تلفات توان عبوری از خطوط تعریف شده که باید حداقل گردد. روش پیشنهادی به دو شبکه دارای 6 و 13 واحد تولیدی اعمال شده و ارزیابی گردیده است.

**کلمات کليدي:** اثر شیرهای بخار، الگوریتم اصلاح شده ازدحام ذرات، پخش­بار اقتصادی، تلفات توان، نواحی ممنوعه.

**1. مقدمه**

يكي از مهم‌ترین مسائل روز بهینه‌سازی توليد انرژي، تعيين نحوه آرايش نیروگاه‌ها جهت توليد بار مصرفی در یک دوره زمانی است که از آن به­عنوان مسئله مشارکت نیروگاه­ها یاد می­شود. اين مسئله به دلیل حجم زياد محاسباتي و وسعت ابعاد در زمره مسائل دشوار قرار می‌گیرد. مسئله توزيع اقتصادي بار به‌عنوان زیرمجموعه مسئله مشاركت نیروگاه‌ها می‌باشد. توزيع اقتصادي بار به‌صورت يك مسئله بهینه‌سازی باهدف مينيمم كردن تابع هزينه سوخت نیروگاه‌های بخاري بيان می‌شود. تابع هزينه سوخت با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته شده براي مسئله به‌صورت مدل‌های رياضي گوناگوني مطرح می‌شود. در مسائل توزيع اقتصادي بار اوليه، اين تابع هزينه سوخت به‌صورت يك تابع درجه دوم مدل شده است و تنها محدودیت‌های تأمین تقاضاي بار و حدود توليد در نظر گرفته شده است.

با اضافه شدن توربین‌های بزرگ به نیروگاه‌ها، مدل تابع هزينه سوخت از يك معادله درجه دوم پيوسته به يك تابع مركب چندجمله‌ای و غير محدب تبديل شده است. در توربین‌های بخار بزرگ، شيرهاي حرارتي به ترتيب با افزايش توان توليدي ژنراتورها باز می‌شوند. هنگامی‌که شيري در ابتدا باز می‌شود به علت زياد شدن سريع تلفات دريچه بخار، نرخ افزايشي حرارتي به‌صورت ناگهاني زياد می‌شود. اين مدل به خاطر در نظر گرفتن قيد شير بخار، در تابع هزينه سوخت ناهمواری‌هایی را به وجود می‌آورد. همچنین به­دلیل امکان تغذیه نیروگاه­ها توسط چندین نوع سوخت، مشخصه مسئله پخش­بار اقتصادی غیرخطی شده و ابعاد این مساله افزایش می­یابد.

از دیگر محدودیت­های مساله پخش­بار اقتصادی، محدودیت نرخ افزایشی توان خروجی واحدها [1]، تلفات خطوط انتقال [2] و محدودیت رزرو چرخان واحدها [3] می­باشند. تاكنون مطالعات و تحقيقات مختلفي براي حل مسئله توزيع اقتصادي بار انجام شده است. به‌طورکلی روش‌های حل موجود به دو دسته كلي تقسیم می­شوند.

در [4] از روش برنامه­­ریزی غیرخطی در حل مساله پخش­­بار اقتصادی استفاده شده است. تابع هزینه سوخت به­صورت یک تابع درجه دوم مدل­سازی شده و محدودیت مناطق ممنوعه که منجر به ناپیوستگی تابع هزینه سوخت می­شوند، نیز در نظر گرفته شده­اند. در [5] از الگوريتم تكرار لامبدا استفاده شده و براي حل مشكل مناطق ممنوعه نیز از روش ميانگين­گيري در بازه­هاي جداسازي استفاده نموده است.

علیرغم وجود نظریه‌ها و روش‌های متنوع محاسباتی و با وجود تلاش‌های بی‌وقفه تحقیقاتی، فقط تعداد معدودی از روش‌های محاسباتی برای استفاده در بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت مفیدند. دلایل مختلفی برای این امر وجود دارد، که عمدتاً ناشی از بزرگ بودن ابعاد سیستم‌های قدرت و کمبود حافظه کامپیوتری موردنیاز است. روش‌های مبتنی بر محاسبات ریاضی شامل لامبدا، گرادیان و .... ممکن است در بهینه‌های محلی به دام بیفتند.

الگوریتم‌های هوشمند ژنتیک (GA[[2]](#endnote-1)) [6]، ازدحام ذرات (PSO[[3]](#endnote-2)) [7]، تبرید تدریجی شبیه­سازی شده (SA[[4]](#endnote-3)) [8]، الگوریتم انتشار ذرات (PDA[[5]](#endnote-4)) [9]، الگوریتم عنکبوت اجتماعی (SSA[[6]](#endnote-5)) [10]، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC[[7]](#endnote-6)) اصلاح شده [11] و برنامه­ریزی تکاملی (EP[[8]](#endnote-7)) [12] نمونه­هایی از این الگوریتم­ها می­باشند.

مسئله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن اثر شير بخار نیز موردتوجه بسياري از محققان قرار گرفته است. با استفاده از روش‌های بسياري می‌توان اين اثر را در نظر گرفت. برنامه­ریزی درجه دوم [13]، ترکیب روش ازدحام ذرات (PSO) و برنامه­ریزی درجه دوم ترتیبی (SQP) [14]، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته [15]، الگوریتم کرم شب­تاب [16]، استراتژی جست‌وجوی معکوس [17]، الگوریتم تکامل تفاضلی [18]، الگوریتم اصلاح شده خفاش [19] و ... ازجمله این روش­ها می­باشند. همچنین، در برخی مراجع نیز اثر انواع سوخت­ها بر توابع هزینه و مساله پخش­بار اقتصادی نیز بررسی شده است. در مرجع [20] از الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم ژنتیک [15]، الگوریتم ازدحام ذرات [21] و ... براي يافتن توليد بهينه با سوخت بهتر استفاده شده است. البته براي حالتي كه اثر شير بخار هم در نظر گرفته شود تعدادي مقاله وجود دارد. در اين حالت مسئله بسيار پیچیده‌تر می‌شود. در [22] از الگوریتم جست‌وجوی بازگشتی، در [15] از الگوريتم ژنتيك بهبود یافته‌ای كه از تکثیرکننده‌های به‌روز رسان بهره می‌گیرد براي حل مسئله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن اثر شیرهای بخار و انواع سوخت­ها استفاده شده است. با توجه به مراجع ذكر شده می‌توان دريافت كه تنها با استفاده از الگوریتم‌های تكاملي بهبودیافته می‌توان به ميزان هزينه سوخت كمينه دست پيدا كرد.

**2.1. جمع­بندی**

اگرچه اين الگوریتم‌های تكاملي هميشه تضمين رسيدن به جواب‌های بهينه كلي را نمی‌دهند، اما در زمان معين و محدود، آن‌ها اغلب با سرعت بيشتر به حل‌های نزديك و يا زير نقطه بهينه كلي می‌رسند. اما اين روش‌ها از مشكلاتي از قبيل همگرايي سريع و يكنواختي جمعيت بعد از چند تكرار رنج می‌برند.

براي حل اين مشكلات در سال‌های اخير از تکنیک‌های مختلفي به‌منظور تغيير در ماهيت استاندارد اين الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. يكي از اين تکنیک‌ها، تركيب كردن اين الگوریتم‌ها با همديگر و يا تركيب با روش‌های رياضي می‌باشد.

برای مثال [23] از تركيب يك الگوريتم EP با روش برنامه پذير خطي در حل مساله پخش­بار اقتصادی استفاده شده است. الگوریتم EP در آغاز، سرعت همگرایی بالایی دارد. ولی در ادامه روند همگرایی، سرعت به­شدت کاهش می­یابد. برای حل این مشکل، جواب­های به­دست آمده از EP بعد از چند تکرار به LP داده می­شود.

به­دلیل ساده بودن مفاهیم ساختاری الگوریتم PSO، آسان بودن فرآیند پیاده­سازی این الگوریتم، قابل تنظیم بودن پارامترهای آن و همگرایی سریع آن، دامنه کاربرد این الگوریتم در حال مسائل بهینه­سازی مختلف توسعه یافته است [24]. با این وجود، الگوریتم PSO مانند سایر الگوریتم­های تکاملی نیز دارای نقطه ضعف به دام افتادن در نقاط بهینه محلی و توقف همگرایی روش پس از گذشت چند تکرار می­باشد.

در این مقاله، اولاً مساله پخش­بار اقتصادی واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن تمامی مسائل فنی و اقتصادی مدل­سازی شده است. به این منظور، تمامی محدودیت­های فنی ازجمله تلفات خطوط انتقال، اثر شیرهای بخار واحدهای حرارتی، مناطق ممنوعه در نواحی عملکردی واحدهای تولیدی و دیگر قیود فنی در نظر گرفته شده است. برای رعایت توجیه­پذیری اقتصادی اجرای طرح پیشنهادی، مجموع هزینه­های مربوط به تولید توان واحدها و هزینه­های جانبی طرح ازجمله هزینه تلفات و ... در قالب تابع هدف مساله بهینه­سازی تعریف گردیده است.

دوما، نسخه اصلاح شده­ای از الگوریتم ازدحام ذرات (CCPSO[[9]](#endnote-8)) ارائه شده است که قابلیت بالایی در دست­یابی به نقاط بهینه سراسری دارد. مساله پخش­بار اقتصادی واحدهای تولیدی با دقت و سرعت بیش­تری به کمک الگوریتم پیشنهادی CCPSO حل گردیده است.

**2.** **مسئله توزيع اقتصادي بار**

براي اقتصادي شدن تولید واحدهاي تولید انرژي باید به سوخت آن‌ها توجه نمود. زیرا سوخت مهم‌ترین مسئله‌ای است که یک واحد براي تولید انرژي باید براي آن هزینه زیادي بپردازد. ازاین‌رو اگر از سوخت به‌صورت بهینه استفاده شود، هزینه کل تولید انرژي کاهش خواهد یافت و به دنبال آن مصرف‌کننده نیز هزینه کمتري خواهد پرداخت.

توزيع اقتصادي بار كلاسيك، يك مسئله بهینه‌سازی می‌باشد كه توان خروجي هر واحد نيروگاهي در مدار را با رويكرد كاهش هزينه سوخت تعيين می‌کند. هدف اين مسئله، به حداقل رساندن هزينه كل توليد با مينيمم كردن مجموع تابع هزينه سوخت نهايي واحدهاي در مدار می‌باشد. رابطه (1) اين هدف را به زبان رياضي بيان می‌کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

C کل هزینه تولید، تابع هزینه سوخت iامین واحد، توان خروجی iامین ژنراتور و N تعداد ژنراتورهاي در حال بهره‌برداری سيستم می­باشند.

تابع هزينه سوخت هر ژنراتور هر به‌صورت رابطه بين توان‌های اكتيو تزريق شده به سيستم به‌وسیله ژنراتور به دست می‌آید. تابع هزینه برحسب واحد پول بر ساعت (مثلاً دلار بر ساعت ) می­باشد و از حاصل‌ضرب هزینه سوخت در نرخ حرارت ورودي به واحد (H) به دست می‌آید. لازم به ذکر است که نرخ حرارت ورودی (H) برحسب می­باشد.

نیروگاه‌ها معمولاً شیرهای متعددي دارند كه به‌منظور كنترل توان خروجي واحدها استفاده می‌شوند. در این واحدها با افزایش بار واحد با باز شدن شیرهاي بخار، بخار ورودي به واحد زیاد می‌شود و مابین نقاط گشایش هر یک از دو شیر نرخ افزایشی حرارتی () کاهش می‌یابد. وقتی شیري باز می‌شود، با افزایش سریع تلفات دریچه بخار، نرخ افزایشی حرارتی به‌صورت جهشی زیاد می‌شود. مطابق شکل 1 این موضوع باعث ناپیوستگی در مشخصه هزینه نیروگاه می‌گردد.



شکل 1: منحني هزينه سوخت براي ژنراتورها با 5 شير بخار

مطابق (2)، تابع هزينه سوخت به‌صورت حاصل جمع دو جمله در مسئله توزيع اقتصادي بار لحاظ می‌شود. جمله اول يك تابع درجه دوم و جمله دوم قدر مطلق يك تابع سينوسي است [25]. ضرایب ، ، ، و ضرایب تابع هزینه واحدهاي تولید انرژي حرارتی با در نظر گرفتن اثر باز شدن شیرهای بخار می­باشند.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

مشابه محدودیت­های موجود در هر مسئله بهینه‌سازی، مسئله پخش بار اقتصادی نیز با محدودیت­هایی مواجه است. در ادامه، برخی از مهم­ترین آن­ها تشریح شده­اند:

* **توازن توليد و مصرف در سيستم**

هنگام کمینه‌سازی هزينه توليد انرژي، مجموع توان توليدي توسط نیروگاه‌ها، باید مطابق قید (3) با ميزان بار تقاضا شده از شبكه () و تلفات خط () برابر باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

تلفات سيستم می‌تواند به‌صورت دقيق، از حل مسئله پخش بار توان به دست آيد [26]. يك روش به دست آوردن تخميني تلفات، روش Kron می‌باشد كه در آن تلفات به‌صورت تابعي از توان‌های خروجي ژنراتورها به دست می­آید [27]. اين محدودیت به‌صورت (4) بیان می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

، و ضرایب تلفات می­باشند که مطابق روابط (5) الی (7) قابل محاسبه هستند [2].

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |
| (6) |  |
| (7) |  |

توان مورد تقاضای iامین بار، و به­ترتیب دامنه و فاز ولتاژ شین iام می­باشند که از اجرای پخش­بار (مثلاً به روش نیوتن رافسون) قابل محاسبه­اند. تعداد شین­های سیستم و قسمت حقیقی ماتریس امپدانس سیستم است.

* **حدود توليد**

واحدهای توليدي داراي محدوديت توليد توان بين دو حد كمينه () و بیشینه () می­باشند که مستقیماً با طراحي ماشين رابطه دارد. اين محدوديت به‌صورت يك رابطه نامساوي مطابق (8) بيان می‌شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

* **محدوديت نرخ شيب**

خروجي ژنراتورها نمی‌تواند به‌صورت آني به هر مقداري افزايش يا كاهش پيدا كند. ميزان تغيير براي واحدهاي در مدار، بایستی مطابق (9) رعایت شود. در این روابط، توان تولیدی واحد iام در ساعت قبل، و به ترتیب محدودیت کاهش و محدودیت افزایشی نرخ شیب واحد iام می­باشند.

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

* **مناطق ممنوعه**

هر واحد نيروگاهي ظرفيت توليد توان مشخصي را دارد. عوامل بسياري از قبيل عملكرد شير بخار، لرزش ناگهاني در شافت­ها و محدودیت‌های فيزيكي در تجهيزات ماشين، می‌توانند ناپیوستگی‌هایی در بازه‌هایی از اين حد در منحني تابع هزينه سوخت به وجود آورند. لذا بهره‌بردار شبكه بايد اين اثر را در نظر بگيرد و اجازه ندهد كه واحد توليد نيروگاهي در اين بازه‌ها توان توليد نمايد. ناپیوستگی‌های به وجود آمده در منحني تابع هزينه سوخت به‌خوبی در شكل زير قابل‌مشاهده می‌باشد. شکل 2، منحني هزينه سوخت با دو منطقه ممنوعه را نشان می‌دهد.



شکل 2: منحني هزينه سوخت ناپيوسته با در نظر گرفتن مناطق ممنوعه

اين اثر را می‌توان به‌صورت يك محدوديت براي مقدار توان اكتيو توليدي واحدها به‌صورت (10) مدل كرد.

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

و به ترتیب کم­ترین و بیش­ترین مقدار توان Zامین بازه منطقه ممنوعه iامین واحد نیروگاهی تولید توان می­باشد. براي در نظر گرفتن اثر مناطق ممنوعه در حل مسائل پخش بار اقتصادی از روش ضریب استفاده می­شود.

ابتدا بازه‌های مناطق ممنوعه واحد iام به‌صورت دو ناحيه چپ و راست تقسيم می­شود. پس با توجه به توان توليدي آن واحد، ضريب به­صورت رابطه (11) به دست می­آید. از آنجا كه توليد در اين بازه‌ها منجر به توليد نوسانات ناميرايي در تجهيزات نیروگاه‌های بخاري می‌شود، لذا بايد مقدار توليدي واحدها را در يكي از نقاط با كمترين يا بيشترين اين بازه‌ها برابر نمود. استراتژي نحوه برابري می‌تواند توسط رابطه (12) به دست آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |
| (12) |  |

در حالت تساوي (يعني ) از روش‌های تصادفي براي اينكه در كدام ناحيه بيافتد استفاده می‌شود.

**3. الگوریتم بهینه­سازی پیشنهادی CCPSO**

در این قسمت، ابتدا شمای کلی از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO[[10]](#endnote-9)) تشریح گردیده و سپس نسخه اصلاح شده که دقت و سرعت بالاتری در حل مسائل غیرخطی و پیچیده دارد، ارائه شده است.

**3.1. ساختار کلی الگوریتم PSO**

PSO از دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که بر مبنای تولید تصادفی جمعیت اولیه عمل می‌کنند. در این الگوریتم با الگو گیری و شبیه‌سازی رفتار پرواز دسته‌جمعی (گروهی) پرندگان یا حرکت دسته‌جمعی (گروهی) ماهی‌ها بنا نهاده شده است. هر عضو در این گروه توسط بردار سرعت و بردار موقعیت در فضای جستجو تعریف می‌گردد. در هر تکرار، موقعیت جدید ذرات با توجه به بردار سرعت فعلی، بهترین موقعیت یافت شده توسط آن ذره و بهترین موقعیت یافت شده توسط بهترین ذره موجود در گروه، به‌روزرسانی می‌گردد.

در شکل 3 ساختار کلی الگوریتم PSO نمایش داده شده، که در ادامه، هر گام از این الگوریتم نیز تشریح شده است.



شکل 3: فلوچارت الگوریتم بهینه­سازی ازدحام ذرات

**مرحله اول**، تولید تصادفی جمعیت اولیه ذرات است. این مرحله تقریباً در تمامی الگوریتم‌های بهینه‌سازی احتمالاتی وجود دارد. اما در این الگوریتم علاوه بر محل تصادفی اولیه ذرات، مقداری برای سرعت اولیه ذرات نیز اختصاص می‌یابد. رنج پیشنهادی اولیه برای سرعت ذرات را می‌توان از رابطه زیر استخراج کرد.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

**مرحله دوم**، ارزیابی تابع هدف (محاسبه هزینه یا برازندگی ذرات) می­باشد. در این مرحله باید هر یک از ذرات را که نشان‌دهنده یک حل برای مسئله مورد بررسی است، ارزیابی شوند. بسته به مسئله مورد بررسی، روش ارزیابی متفاوت خواهد بود. مثلاً اگر امکان تعریف یک تابع ریاضی برای هدف وجود داشته باشد، با جایگذاری پارامترهای ورودی در این تابع ریاضی، به‌راحتی مقدار هزینه این ذره محاسبه خواهد شد.

**مرحله سوم**، ثبت بهترین موقعیت هر ذره () و موقعیت کل ذره‌ها () می­باشد. در این مرحله با توجه به شماره تکرار، دو حالت قابل‌بررسی است. اگر در تکرار اول باشد (t=1). موقعیت فعلی هر ذره به‌عنوان بهترین محل یافت شده برای آن ذره در نظر گرفته می­شود. در سایر تکرارها، مقدار هزینه به دست آمده برای ذرات در مرحله 2 با مقدار بهترین هزینه به دست آمده برای تک‌تک ذرات مقایسه می­شود. اگر این هزینه کمتر از بهترین هزینه ثبت شده برای این ذره باشد، آنگاه محل و هزینه این ذره جایگزین مقدار قبلی می‌گردد. در غیر این صورت تغییری در محل و هزینه ثبت شده برای این ذره ایجاد نمی‌شود.

**مرحله چهارم**، به‌روزرسانی بردار سرعت تمامی ذره‌ها مطابق رابطه (14) می­باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |

ضرایب c1 و c2 با توجه به مسئله موردنظر به روش تجربی تعیین می‌گردند. c2 و c3 نیز نباید زیاد بزرگ انتخاب شوند زیرا انتخاب مقادیر بزرگ برای این دو ضریب باعث انحراف شدید ذره از مسیر خودی می‌شود. w ضریب اینرسی می­باشد و برای کنترل سرعت حرکت ذرات استفاده می­شود. مقدار آن باید کمتر از یک باشد. زیرا اگر بزرگ‌تر از یک انتخاب شود، V(t) دائماً افزایش می‌یابد تا جایی که واگرا گردد. مطابق رابطه (15) w به­صورت خطی و برحسب افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم، از تا کاهش می­یابد [28].

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |

تعداد کل تکرارهای انجام شده برای الگوریتم در مرحله iام می­باشد. هرچند در تئوری ضریب w می‌تواند منفی نیز باشد، اما در استفاده عملی از این الگوریتم هیچ‌گاه این ضرایب را منفی در نظر گرفته نمی­شود. زیرا منفی بودن w موجب ایجاد نوسان در V(t) می‌شود. انتخاب مقدار کوچک برای این ضریب (w) نیز مشکلاتی را در پی خواهد داشت.

مرحله پنجم تست همگرایی یا بررسی شرط توقف می­باشد. به این منظور می‌توان تعداد مشخصی تکرار را از همان ابتدا معلوم شده و در هر مرحله بررسی گردد که آیا تعداد تکرارها به مقدار تعیین شده رسیده است؟ اگر تعداد تکرارها کوچک‌تر از مقدار تعیین شده اولیه باشد، آنگاه باید به مرحله 2 بازگردید. در غیر این صورت الگوریتم پایان می‌پذیرد. روش دیگر این است که اگر در چند تکرار متوالی، بهبودی در هزینه بهترین ذره ایجاد نگردد، آنگاه الگوریتم پایان یابد.

**3.2. الگوریتم پیشنهادی ازدحام ذرات اصلاح شده CCPSO**

همان­طور که توضیح داده شد، موقعیت و سرعت ذرات در اولین تکرار از PSO به­صورت کاملاً تصادفی انتخاب گردیده و ذرات در فضای جست‌وجوی D بعدی پخش می­شوند. پس از گذشت چند تکرار، ذرات تحت تأثیر ذره بهینه سراسری قرار گرفته و به سمت آن حرکت می­کنند. درصورتی‌که فاصله بین هر ذره تا بهترین ذره () کم باشد، ذره مذکور در دسته بهترین پاسخ­ها قرار گرفته و در تکرار بعدی، جابجایی بسیار کمی خواهد داشت. به این ترتیب، امکان به دام افتادن PSO در بهینه­های محلی مسائل پیچیده با ابعاد بزرگ وجود دارد.

برای حل این مشکل، الگوریتم CCPSO که نوع اصلاح شده PSO است، پیشنهاد می­شود. تفاوت اصلی CCPSO این است که اولا مقدار تمامی ذرات با یکدیگر مقایسه می­شوند، در حالی که در الگوریتم PSO، تمامی ذرات فقط با بهترین ذره مقایسه می­شود. دوما، از یک تابع با خصوصیات آشوبی برای نگاشت فضای پاسخ استفاده گردیده است. به این ترتیب، بر فضای جست­وجوی متغیرها، کنترل بیش­تری اعمال شده و الگوریتم مذکور می­تواند به­صورت منظم به سمت پاسخ بهینه حرکت کند.

* **اصلاحیه بخش اول**

در روش CCPSO پیشنهادی، هر ذره در تعیین بهترین مسیر تأثیرگذار هستند. در ادامه، با یک مثال ساده، تفاوت بین عملکرد PSO و CCPSO تشریح گردیده است. فرض شود که پاسخ­های پیشنهادی سه ذره برابر (16) و موقعیت واقعی بهترین ذره برابر (17) باشند.

|  |  |
| --- | --- |
| (16) |  |
| (17) |  |

مطابق (18)، در PSO از مقایسه مجموع فواصل تمامی ذره­ها نسبت به مقدار مبنا بهترین ذره انتخاب می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (18) |  |

بنابراین، به­عنوان بهترین ذره انتخاب می­گردد. اما در روش CCPSO، بهترین ذره به­صورت (19) تعیین می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (19) |  |

به این منظور، در الگوریتم پیشنهادی CCPSO یک ذره (Swarm2) به تعداد کل ذرات در هر تکرار (M ذره Swarm1) افزوده می­شود. درنتیجه، تعداد کل ذرات به M+1 ذره افزایش پیدا می­کند. وظیفه Swarm2، اعمال ضرایب جریمه به بخش­های مختلف هر ذره می­باشد تا عملکرد الگوریتم مرسوم PSO بهبود یابد. شمای کلی از ساختار ذرات الگوریتم CCPSO در شکل 4 نمایش داده شده است. همان­طور که مشاهده می­شود، در این الگوریتم، M ذره Swarm1 پاسخ­های پیشنهادی برای مساله می­باشند که ساختار آن­ها کاملاً مشابه PSO هستند. اما، ذره Swarm2 یک ذره با k\*M بخش می­باشد. هر بخش حاوی یک ضریب جریمه و برای اعمال به ذرات Swarm1 می­باشند.



شکل 4: شمای کلی از ساختار ذرات در الگوریتم پیشنهادی CCPSO

* **اصلاحیه بخش دوم**

در اصلاح دیگری که در الگوریتم PSO اعمال شده، از یک روش با خصوصیات آشوبی استفاده گردیده است. به این منظور، نگاشت منطقی (LM[[11]](#endnote-10)) که یک نگاشت از درجه 2 است، بکار گرفته شده است. مطابق رابطه (20)، الگوریتم LM قادر می­باشد رفتار آشوبناک یک سیستم را در قالب معادله دینامیکی غیرخطی ساده توصیف کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (20) |  |

به ازای مقادیر که بین محدوده 56995/3 تا 4 قرار گیرند، ثابت می­شود که سیستم دارای رفتار آشوبی خواهد بود. در این پژوهش، از این خاصیت استفاده شده و مقادیر rand1 و rand2 در رابطه (14) به کمک تابع LM مقداردهی می­شوند. به عبارت ساده، روابط rand1 و rand2 به­صورت تابع LM توصیف شده و سپس در این رابطه جایگزین شده­اند.

در این روشو مقادیر قابل تنظیم می‌باشند که به کمک آن‌ها می‌توان فضای جستجو را به نحو مناسب کنترل نمود. در این صورت، بر فضای جست­وجوی متغیرها، کنترل بیش­تری اعمال شده که ضمن انتخاب مقدار مناسبی برای ، پاسخ­های بهتری از الگوریتم PSO حاصل خواهد شد. درنتیجه، در روش CCPSO، با انتخاب روند مناسبی برای تغییرات ، می­توان به­صورت منظم به سمت پاسخ بهینه حرکت نمود.

در شکل 5، ساختار کلی این الگوریتم نمایش داده شده است. PSO1 با هدف بهینه­سازی ضرایب جریمه (ضرایب B) و PSO2 با هدف دست­یابی به بهترین پاسخ پیشنهادی برای مساله اجرا می­شود.



شکل 5: شمای کلی از الگوریتم پیشنهادی CCPSO

کلیات نحوه پیشرفت و عملکرد این الگوریتم به­صورت زیر می­باشد:

* ابتدا مقدار ذرات Swarm1 با هدف بهبود مقدار تابع هدف (مثلاً کمینه­سازی هزینه) مشخص می­شوند. مکانیسم تعیین برازندگی ذرات Swarm1 کاملاً مشابه مساله PSO است.
* سپس، مقدار ذره Swarm2 به نحوی تعیین می­گردد تا ضرایب جریمه اعمالی به ذرات Swarm1 با مقادیر این ذرات تطابق یابد.

به­طور ساده، این الگوریتم پیشنهادی به­صورت دو الگوریتم PSO تودرتو اجرا می­شوند. حلقه خارجی، مقادیر ضرایب B (ضرایب جریمه) رو (Swarm2) بهینه­ می­سازد. حلقه داخلی، با توجه به ضرایب B پیشنهادی، پاسخ­های پیشنهادی برای مساله (ذرات Swarm1) را بهینه می­سازند.

روند همگرایی الگوریتم CCPSO در راستای کمینه­سازی مقدار تابع هدف می­باشد. درنتیجه، تابع هدف مطابق رابطه (21) به­صورت مجموع وزن­دار هزینه تولید واحدها و مجموع تلفات خطوط انتقال در واحد مبنا تعریف می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (21) |  |

و به­ترتیب ضرایب وزنی مربوط به تلفات و هزینه iامین طرح پیشنهادی می­باشد. و به­ترتیب تلفات و هزینه تولید واحدها در شرایط حداکثر تولید توان می­باشند. و نیز به­ترتیب تلفات و هزینه تولید توان واحدهای حرارتی بر اساس iامین طرح پیشنهادی می­باشند. در صورت استفاده از تابع هدف پیشنهادی در رابطه (21)، امکان حل بهینه مساله به­صورت تک هدفه وجود دارد. به­دلیل تقسیم شدن تلفات و هزینه طرح پیشنهادی بر حداکثر مقادیر متناظر، مقادیری به­صورت درصد حاصل می­گردد که به سهولت قابل تجمیع با یکدیگر می­باشند.

**4. نتایج شبیه­سازی**

در این قسمت، مساله برنامه­ریزی تولید واحدها به کمک الگوریتم CCPSO به­صورت بهینه حل می­گردد. در این راستا، با توجه به عوامل مختلفی ازجمله تلفات خطوط انتقال، اثر شیرهای بخار، نواحی ممنوعه و ... سناریوهای مختلفی برای مساله در نظر گرفته شده است. برای بررسی عددی روش پیشنهادی نیز، سیستم­های مختلفی با توجه به تعداد واحدهای تولیدی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**4.1. برنامه­ریزی تولید سیستم دارای 6 واحد تولید حرارتی**

در این قسمت، برنامه­ریزی تولید یک سیستم قدرت دارای 6 واحد تولیدی بررسی شده است. سیستم مذکور دارای 6 واحد حرارتی، 26 شین قدرت، 46 خط انتقال و مجموعه­ای از بارها با کل توان درخواستی 1093 مگاوات می­باشد. اطلاعات کامل تمامی واحدها در جدول 1 آورده شده است [29].

جدول 1: مشخصات واحدهای تولید حرارتی در شبکه 6 واحدی [29]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| نواحی ممنوعه | |  |  |  |  |  |  |  |  | شماره |
| [380 350] | [240 210] | 120 | 80 | 440 | 007/0 | 7 | 240 | 500 | 100 | 1 |
| [160 140] | [110 90] | 90 | 50 | 170 | 0095/0 | 10 | 200 | 200 | 50 | 2 |
| [240 210] | [170 150] | 100 | 65 | 200 | 009/0 | 5/8 | 220 | 300 | 80 | 3 |
| [120 110] | [90 80] | 90 | 50 | 150 | 009/0 | 11 | 200 | 150 | 50 | 4 |
| [150 140] | [110 90] | 90 | 50 | 190 | 008/0 | 5/10 | 220 | 220 | 50 | 5 |
| [105 100] | [85 75] | 50 | 40 | 110 | 0075/0 | 12 | 190 | 120 | 50 | 6 |

ضرایب تلفات مورد نیاز در روش کرون، برای سیستم مورد مطالعه در (1) آورده شده است [29].

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |
|  |
|  |

در ادامه، برای برنامه­ریزی سیستم فوق چند سناریو در نظر گرفته شده و در هر حالت، مساله برنامه­ریزی به کمک الگوریتم هوشمند CCPSO حل گردیده است. برای همسان­سازی کمیت مقدار هر دو هدف (هزینه و تلفات) و تعریف یک تابع تک هدفه، بایستی حداکثر مقدار برای هر دو هدف محاسبه شود. با توجه به توضیحات فصل قبلی، حداکثر هزینه مجموع تولید واحدها و حداکثر تلفات توان عبوری از خطوط، به ازای حداکثر توان تولیدی ممکن واحدها به­صورت تقریبی تخمین زده شده است. نتایج حاصل شده در شرایط بحرانی حداکثر تولید واحدها، در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2: نتایج حاصل شده در شرایط حداکثر تولید تمامی واحدهای شبکه 6 واحدی

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| مجموع | واحد 1ام | واحد 2ام | واحد 3ام | واحد 4ام | واحد 5ام | واحد 6ام |  |
| 1490 | 500 | 200 | 300 | 150 | 220 | 120 | توان تولیدی (مگاوات) |
| 7/18357 | 5490 | 2580 | 3580 | 5/2052 | 2/2917 | 1738 | هزینه تولید (ساعت/دلار) |
| 083/23 | --- | | | | | | تلفات شبکه (مگاوات) |

در ادامه، براساس شرایط در نظر گرفته شده در حین حل مساله برنامه­ریزی تولید واحدهای حرارتی، سناریوهایی در نظر گرفته شده که تمامی آن­ها در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3: سناریوهای فرض شده در فرآیند حل مساله برنامه­ریزی تولید 6 واحد حرارتی

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| محدودیت تغییر توان خروجی | نواحی ممنوعه | تلفات توان | اثر شیرهای بخار | سیستم | شماره سناریو |
| 🗴 | 🗴 | 🗴 | 🗴 | 6 واحدی | 1 |
| 🗴 | 🗸 | 🗴 | 🗴 | 2 |
| 🗸 | 🗸 | 🗸 | 🗴 | 3 |
| 🗴 | 🗴 | 🗴 | 🗴 | 13 واحدی | 4 |
| 🗴 | 🗴 | 🗴 | 🗸 | 5 |
| 🗸 | 🗸 | 🗸 | 🗸 | 6 |

در قسمت­های بعدی، به تفکیک هر سناریو، نتایج بهینه حاصل شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**4.1.1. سناریو 1**

در این بخش، تعیین توان خروجی واحدهای تولیدی در شرایط کلاسیک بدون در نظر گرفتن اثر شیرهای بخار، نرخ افزایش یا کاهشی خروجی واحدها، نواحی ممنوعه و تلفات توان خطوط به­طور بهینه تعیین شده است. بهینه­سازی مذکور از دیدگاه حداقل سازی هزینه تولیدی هر واحد صورت گرفته است. نتایج بهینه حاصل شده در جدول 4 آورده شده است.

جدول 4: نتایج بهینه حاصل شده در شرایط سناریو 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| مجموع | واحد 1ام | واحد 2ام | واحد 3ام | واحد 4ام | واحد 5ام | واحد 6ام |  |
| 1092.50 | 412.2 | 146.8 | 235.7 | 99.1 | 142.2 | 56.4 | توان تولیدی (مگاوات) |
| 13056.2 | 4315.1 | 1872.3 | 2724.0 | 1378.8 | 1875.0 | 891.0 | هزینه تولید (ساعت/دلار) |

برنامه­ریزی تولید واحدها تحت شرایط سناریو 1، ضمن رعایت قیود شبکه ازجمله تعادل بین تولید و مصرف، عدم‌تخطی توان خروجی واحدها از حدود مجاز و ... انجام شده است. در قید تعادل بین تولید و مصرف، حداکثر نامتعادلی مجاز برابر 5/0 مگاوات در نظر گرفته که کم­تر از 05/0 درصد از کل توان مصرفی شبکه است. طبق نتایج بهینه حاصل شده در جدول 4، مشاهده می­گردد که مجموع توان تولیدی با 5/0 مگاوات انحراف، برابر کل توان مصرفی شبکه می­باشند.

مجموع هزینه تولیدی تمام واحدها نیز برابر 2/13056 دلار در ساعت می­باشد. از نسبت این مبلغ نسبت به بیش­ترین هزینه حالت مبنا (7/18357)، مقدار تابع هدف 71121/0 حاصل می­شود. در شکل 6 روند همگرایی الگوریتم CCPSO آورده شده است. همان­طور که مشاهده می­گردد، مقدار بهینه تابع هدف (71121/0) تقریباً پس از گذشت 500 تکرار حاصل شده است. شایان ذکر است، ضرایب وزنی W1 و W2 به­ترتیب برابر 0 و 1 لحاظ شده تا تلفات توان عبوری از خطوط، تأثیری در روند همگرایی CCPSO نداشته باشد.



شکل 6: روند همگرایی الگوریتم CCPSO در برنامه­ریزی تولید شبکه دارای 6 واحد تحت شرایط سناریو 1

مقادیر پارامترهای تنظیم مربوط به ساختار الگوریتم CPSOC در جدول 5 آورده شده است.

جدول 5: مقادیر پارامترها تعیین­کننده ساختار الگوریتم CPSOC

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| شرط توقف | حداکثر تعداد تکرار | تعداد ذرات | تولید نسل اولیه |
| عدم بهبود تابع هدف پس از گذشت 300 تکرار | 5000 | 300 - 500 | تصادفی یکنواخت |

**4.1.2. سناریو 2**

اگر نتایج سناریو 1 (توان­های تولیدی واحدها در جدول 4) با نواحی ممنوعه تعریف شده در جدول 1 مقایسه شوند، مشخص می­گردد که توان خروجی واحدهای حرارتی شماره 2، 3 و 5 داخل نواحی ممنوعه قرار گرفته است. بنابراین در واقعیت امکان پیاده­سازی چنین طرح تولیدی وجود نداشته و نیازمند اصلاح می­باشند.

در این قسمت، مساله برنامه­ریزی تولید واحدها با در نظر گرفتن نواحی ممنوعه توان خروجی واحدهای حرارتی مجدداً حل گردیده و نتایج حاصل شده در جدول 6 آورده شده است. بدیهی است به­دلیل وجود نواحی ممنوعه، فضای پاسخ مساله محدودتر گردیده و انتظار می­رود، تا حدودی شاخص­های کیفی مساله تنزل یابند.

جدول 6: نتایج بهینه حاصل شده در شرایط سناریو 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| مجموع | واحد 1ام | واحد 2ام | واحد 3ام | واحد 4ام | واحد 5ام | واحد 6ام |  |
| 5/1092 | 5/412 | 140 | 240 | 6/98 | 150 | 4/51 | توان تولیدی (مگاوات) |
| 9/13056 | 4318 | 1/1786 | 4/2778 | 6/1372 | 1975 | 8/826 | هزینه تولید (ساعت/دلار) |

از مقایسه نتایج جدول 6 با جدول 4 مشاهده می­گردد که توان خروجی واحد 2ام با تقلیل از8/146 مگاوات به 140 مگاوات، واحد تولیدی 3ام با افزایش تولید از 7/235 مگاوات به 240 مگاوات و همچنین واحد تولیدی 5ام با افزایش تولید از 2/142 مگاوات به 150 مگاوات، نقطه کار خود را اصلاح کرده و در مرز خارجی نواحی مجاز قرار گرفته­اند.

**4.1.3. سناریو 3**

در این قسمت، مساله برنامه­ریزی تولید واحدها با وجود تلفات توان عبوری از خطوط انتقال، نواحی ممنوعه و محدودیت نرخ تغییرات توان خروجی واحدها مجدداً حل گردیده و نتایج حاصل شده در جدول 7 آورده شده است. بدیهی است به­دلیل نیاز به تأمین توان تلف شده توسط واحدها، توان خروجی واحدها باید افزایش یابد. بالطبع آن نیز، هزینه تولید توان واحدها نیز افزایش خواهند یافت.

جدول 7: نتایج بهینه حاصل شده در شرایط سناریو 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| مجموع | واحد 1ام | واحد 2ام | واحد 3ام | واحد 4ام | واحد 5ام | واحد 6ام |  |
| 7/1106 | 380 | 8/185 | 1/192 | 150 | 9/113 | 85 | توان تولیدی (مگاوات) |
| 3/13317 | 8/3910 | 4/2385 | 7/2184 | 5/2052 | 7/1519 | 2/1264 | هزینه تولید (ساعت/دلار) |
| 2342/14 | --- | | | | | | تلفات توان (مگاوات) |

مجموع تلفات توان عبوری از خطوط برابر 2342/14 مگاوات می­باشد. درنتیجه، مجموع توان تولیدی واحدهای حرارتی به 7/1106 مگاوات افزایش یافته است. بالطبع آن، مجموع هزینه­­های تولید واحدها به 3/13302 دلار در ساعت افزایش یافته است. همچنین به­دلیل در نظر گرفتن محدودیت نواحی ممنوعه در توان خروجی واحدها، پاسخ بهینه پیشنهادی نیز کاملاً شرایط جدول 4 را رعایت کرده است. از طرف دیگر، به­دلیل در نظر گرفتن محدودیت نرخ افزایشی/کاهشی توان خروجی واحدها، مشاهده می­شود که تغییرات توان خروجی برخی واحدها محدود گردیده است. برای توضیح بیش­تر این موضوع، جدول 8 در نظر گرفته شود.

در این جدول، کران­های بالا و پایین توان خروجی واحدها در دو حالت تأثیر و عدم تأثیر نرخ تغییرات توان خروجی واحدها آورده شده است. به­عنوان مثال، توان خروجی واحد حرارتی 6ام در شرایطی که محدودیت نرخ کاهشی واحدها در نظر گرفته نشده (مثلاً در جدول 6)، توان بهینه از 110 مگاوات شرایط اولیه به 4/51 مگاوات کاهش یافته و برنامه­ریزی شده است. درحالی‌که با وجود محدودیت نرخ کاهشی توان خروجی واحدها، میزان کاهش (در جدول 7) به 60 مگاوات محدود شده است.

جدول 8: محدوده مجاز عملکرد 6 واحد حرارتی با در نظر گرفتن محدودیت نرخ افزایشی/کاهشی

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| با تاثیر نرخ تغییر توان | | بدون تاثیر نرخ تغییر توان | | شماره  واحد | با تاثیر نرخ تغییر توان | | بدون تاثیر نرخ تغییر توان | | شماره  واحد |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 150 | 60 | 150 | 50 | 4 | 500 | 320 | 500 | 100 | 1 |
| 220 | 100 | 220 | 50 | 5 | 200 | 80 | 200 | 50 | 2 |
| 120 | 60 | 120 | 50 | 6 | 265 | 100 | 300 | 80 | 3 |

**4.2. برنامه­ریزی تولید سیستم دارای 13 واحد تولید حرارتی**

در این قسمت، علاوه بر این­که سیستم مورد مطالعه به شبکه دارای 13 منبع حرارتی تغییر یافته، اثر شیرهای بخار نیز در ارزیابی­ها نیز لحاظ گردیده است. اطلاعات کامل هر واحد تولیدی در جدول 1 آورده شده است [12، 30]. مجموع توان مصرفی تمامی مشترکین شبکه برابر 2520 مگاوات می­باشد.

جدول 9: مشخصات واحدهای تولید حرارتی در شبکه 13 واحدی [12، 30]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| نواحی ممنوعه | | | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | شماره |
| [420 390] | [335 260] | | [200 180] | 035/0 | 300 | 00028/0 | 1/8 | 550 | 360 | 335 | 420 | 680 | 0 | 1 |
| [335 305] | [225 185] | | [45 30] | 042/0 | 200 | 00056/0 | 1/8 | 309 | 290 | 250 | 280 | 360 | 0 | 2 |
| [335 305] | [220 180] | | [40 30] | 042/0 | 200 | 00056/0 | 1/8 | 307 | 290 | 250 | 280 | 360 | 0 | 3 |
| --- | | | | 063/0 | 150 | 00324/0 | 74/7 | 240 | 130 | 80 | 120 | 180 | 60 | 4 |
| --- | | | | 063/0 | 150 | 00324/0 | 74/7 | 240 | 130 | 80 | 150 | 180 | 60 | 5 |
| --- | | | | 063/0 | 150 | 00324/0 | 74/7 | 240 | 130 | 80 | 130 | 180 | 60 | 6 |
| --- | | | | 063/0 | 150 | 00324/0 | 74/7 | 240 | 130 | 80 | 160 | 180 | 60 | 7 |
| --- | | | | 063/0 | 150 | 00324/0 | 74/7 | 240 | 130 | 80 | 140 | 180 | 60 | 8 |
| --- | | | | 063/0 | 150 | 00324/0 | 74/7 | 240 | 130 | 80 | 140 | 180 | 60 | 9 |
| [75 65] | | [55 45] | | 084/0 | 100 | 00284/0 | 6/8 | 126 | 120 | 120 | 100 | 120 | 40 | 10 |
| [75 65] | | [55 45] | | 084/0 | 100 | 00284/0 | 6/8 | 126 | 120 | 120 | 80 | 120 | 40 | 11 |
| --- | | | | 084/0 | 100 | 00284/0 | 6/8 | 126 | 120 | 120 | 80 | 120 | 55 | 12 |
| --- | | | | 084/0 | 100 | 00284/0 | 6/8 | 126 | 120 | 120 | 75 | 120 | 55 | 13 |

ضرایب تلفات مورد نیاز در روش کرون، برای سیستم مورد مطالعه در (2) آورده شده است [31].

برای تعیین حداکثر هزینه مجموع تولید واحدها و حداکثر تلفات توان عبوری از خطوط، به ازای توان تولیدی واحدها در حداکثر مقدار ممکن تنظیم شده و نتایج حاصل شده در جدول 10 آورده شده است.

جدول 10: نتایج حاصل شده در شرایط حداکثر تولید تمامی 13 واحد حرارتی

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره واحد | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| توان تولیدی (مگاوات) | 680 | 360 | 360 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 5/6187 | 6/3297 | 6/3295 | 2/1738 | 2/1738 | 2/1738 | 2/1738 |
| شماره واحد | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | --- |
| توان تولیدی (مگاوات) | 180 | 180 | 120 | 120 | 120 | 120 | --- |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 2/1738 | 2/1738 | 9/1198 | 9/1198 | 9/1198 | 9/1198 | --- |
| تلفات توان (مگاوات) | 65/55 | مجموع تولید | | 2519 | مجموع هزینه | | 3/28005 |

در قسمت­های بعدی، به تفکیک سناریوهای در نظر گرفته شده برای سیستم دارای 13 واحد حرارتی، نتایج بهینه حاصل شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| (2) |  |  |  |

**4.2.1. سناریو 4**

در این قسمت، برنامه­ریزی تولید در شبکه با 13 واحد حرارتی بدون در نظر گرفتن تلفات توان، اثر شیرهای بخار، نواحی ممنوعه و محدودیت نرخ تغییرات توان خروجی واحدها انجام شده است. نتایج حاصل شده که در جدول 11 آورده شده است، مبنای ارزیابی قسمت­های بعدی می­باشد.

جدول 11: نتایج حاصل شده در شرایط سناریو 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره واحد | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| توان تولیدی (مگاوات) | 680 | 6/359 | 9/359 | 2/168 | 5/154 | 2/157 | 4/155 |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 4/6187 | 1/3294 | 9/3294 | 2/1633 | 6/1513 | 2/1537 | 3/1521 |
| شماره واحد | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | --- |
| توان تولیدی (مگاوات) | 6/143 | 6/145 | 4/41 | 2/43 | 3/55 | 55 | --- |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 6/1418 | 5/1435 | 7/486 | 8/502 | 4/610 | 6/607 | --- |
| تلفات توان (مگاوات) | --- | مجموع تولید | | 2519 | مجموع هزینه | | 3/24043 |

بر اساس برنامه­ریزی تولید بهینه پیشنهادی در جدول 11، مجموع هزینه تولید تمامی 13 واحد برابر 3/24043 دلار در ساعت می­باشد. از تقسیم این هزینه بر حداکثر مقدار ممکن (3/28005 دلار در حالت مبنا)، کم­ترین مقدار تابع هدف الگوریتم CCPSO برابر 858526/0 حاصل شده است.

**4.2.2. سناریو 5**

در این قسمت، اثر شیرهای بخار در روند محاسبه تابع هزینه تولید واحدهای حرارتی در شبکه دارای 13 واحد حرارتی در نظر گرفته شده است. در این شرایط، نتایج حاصل شده، اگرچه به واقعیت نزدیک­تر هستند؛ اما منجر به افزایش هزینه تولید واحدها می­گردند. این نتایج در جدول 12 آورده شده است.

جدول 12: نتایج حاصل شده در شرایط سناریو 5

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره واحد | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| توان تولیدی (مگاوات) | 3/628 | 360 | 360 | 7/159 | 7/159 | 7/159 | 7/159 |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 9/5749 | 5/3408 | 5/3406 | 1559 | 1559 | 1559 | 1559 |
| شماره واحد | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | --- |
| توان تولیدی (مگاوات) | 7/159 | 60 | 4/77 | 40 | 2/102 | 4/92 | --- |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 1559 | 1/716 | 7/808 | 5/474 | 2/1108 | 9/944 | --- |
| تلفات توان (مگاوات) | --- | مجموع تولید | | 2519 | مجموع هزینه | | 3/24412 |

از مقایسه نتایج جدول 12 با جدول 11 مشاهده می­گردد که تعیین نقطه کار واحدها که رابطه مستقیم با هزینه واحدها دارند، بیش­تر گردیده است. از طرف دیگر، به­دلیل عدم تأثیر تلفات توان بر همگرایی روش، برنامه­ریزی بهینه پیشنهادی به نحوی است که توان خروجی واحدهای مشابه، یکسان در نظر گرفته شده­اند.

در هرحال، در نظر گرفتن اثر شیرهای بخار منجر به افزایش هزینه کل به میزان 5/1 درصد گردیده است.

**4.2.3. سناریو 6**

در این قسمت، برای اضافه شدن اثر تلفات توان عبوری از خطوط به مساله برنامه­ریزی تولید واحدها، مقادیر ضرایب وزنی W1 و W2 در تابع هدف هر دو به مقدار 5/0 تغییر یافته است. سپس، ضمن وجود اثر شیرهای بخار نیز، مساله مذکور مجدداً حل گردیده و پاسخ­های بهینه حاصل شده در جدول 13 آورده شده است.

جدول 13: نتایج حاصل شده در شرایط سناریو 6 شبکه دارای 13 واحد حرارتی

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره واحد | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| توان تولیدی (مگاوات) | 680 | 360 | 6/231 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 6479 | 5/3408 | 9/2271 | 7/1881 | 7/1881 | 7/1881 | 7/1881 |
| شماره واحد | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | --- |
| توان تولیدی (مگاوات) | 60 | 60 | 4/77 | 120 | 120 | 120 | --- |
| هزینه تولید (ساعت/دلار) | 1/716 | 1/716 | 7/808 | 2/1241 | 2/1272 | 2/1272 | --- |
| تلفات توان (مگاوات) | 96/29 | مجموع تولید | | 9/2548 | مجموع هزینه | | 8/25712 |

با توجه به نتایج جدول 13، مشاهده می­شود که به­دلیل اضافه شدن تلفات 96/29 مگاواتی خطوط به مجموع بارهای شبکه، حجم توان تولیدی واحدها به 9/2548 مگاوات افزایش یافته است. بالطبع آن نیز، هزینه کل اجرای برنامه­ریزی پیشنهادی نیز به 8/25712 دلار در ساعت افزایش یافته است.

در جدول 14 محدوده مجاز عملکرد 13 واحد حرارتی در هر دو شرایط وجود و عدم وجود محدودیت نرخ تغییر توان خروجی واحدها آورده شده است. از مقایسه برنامه تولیدی پیشنهادی جدول 13 با محدوده مجاز جدول 14، مشاهده می­شود که تمامی توان خروجی واحدها در حدود مجاز مربوط به خود قرار دارند.

جدول 14: محدوده مجاز عملکرد 13 واحد حرارتی با در نظر گرفتن محدودیت نرخ افزایشی/کاهشی

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | شماره واحد |
| 60 | 0 | 0 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 40 | 40 | 55 | 55 |  |
| 680 | 360 | 360 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 120 | 120 | 120 | 120 |  |

**4.3. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج برخی مراجع مرتبط**

در انتها، نتایج حاصل شده از روش پیشنهادی با نتایج برخی مراجع مرتبط با این موضوع، مطابق جدول 15 مقایسه گردیده است. در این جدول مجموع هزینه تولید تمامی نیروگاه­های سیستم 6 واحده و تلفات توان کل در بهترین آرایش تولیدی روش پیشنهادی CCPSO با بهترین نتایج حاصل شده از الگوریتم­های GA[[12]](#endnote-11) و PSO در مرجع [7] و SPSO[[13]](#endnote-12)، IPSO[[14]](#endnote-13) و CCPSO[[15]](#endnote-14) در [32] مقایسه شده است.

همان­طور که مشاهده می­شود، کم­ترین مجموع هزینه تولید واحدها با مقدار 3/13317 دلار بر ساعت مربوط به روش پیشنهادی است. این مزیت درعین‌حالی است که کم­ترین تلفات توان با مقدار 7/1106 مگاوات نیز مربوط به روش پیشنهادی CCPSO در این پژوهش می­باشد. اگرچه سناریوهای تحلیل شده در مراجع [7] و [32] یکسان نمی­باشند، اما رتبه­های بعدی در کم­ترین هزینه تولید واحدها به­ترتیب مربوط به الگوریتم­های PSO، GA، CPSO، IPSO و SPSO می­باشند. علاوه بر این، از دیدگاه حجم پردازش­های لازم برای اجرای روش پیشنهادی و زمان هم­گرایی آن، روش پیشنهادی با مدت زمان 31/103 ثانیه، سریع­ترین روش می­باشد. رتبه­های بعدی مربوط به روش CPSO، IPSO، PSO، GA و SPSO می­باشند.

جدول 15: مقایسه نتایج حاصل شده از روش پیشنهادی با نتایج برخی مراجع مرتبط

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| زمان اجرای  پردازش­ها (ثانیه) | مجموع تلفات  توان (مگاوات) | مجموع هزینه تولید  تمامی واحدها (ساعت/دلار) | روش  بهینه­­سازی | مرجع |
| 31/103 | 1106/7 | 3/13317 | CCPSO | روش  پیشنهادی |
| 14/165 | 0217/13 | 15459 | GA | [7] |
| 6/145 | 9584/12 | 15450 | PSO |
| 34/170 | ---- | 14682 | SPSO | [32] |
| 83/135 | 14648 | IPSO |
| 21/111 | 14635 | CPSO |

**5. نتیجه­گیری**

در این مقاله برای افزایش دقت در برنامه­ریزی تولید واحدهای نیروگاهی، از مدل­سازی غیرخطی استفاده شده است. این مدل به خاطر وجود قید اثر شیرهای بخار، مناطق ممنوعه تولید و تلفات توان از حالت خطی و پیوسته به‌صورت غیرخطی و ناپیوسته تبدیل شده است. به­دلیل پیچیدگی بالا و احتمال عدم دست­یابی به نقطه بهینه سراسری در چنین مساله­ای، الگوریتم جدید CCPSO که نسخه اصلاح شده­ای از PSO می­باشد برای حل بهینه مساله غیرخطی برنامه­ریزی تولید واحدها پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی نه تنها دارای دقت و سرعت همگرایی بیش­تری نسبت به الگوریتم PSO می­باشد. بلکه براساس نتایج عددی مشخص گردید که این الگوریتم دارای سرعت و دقت بیش­تری نسبت به سایر نسخه­های اصلاح شده PSO ازجمله CPSO، IPSO و SPSO و الگوریتم GA می­باشد. الگوریتم CCPSO نسبت به رتبه بعدی که الگوریتم CPSO می­باشد، 9 درصد کاهش در هزینه­ها و 7 درصد افزایش سرعت را در پی دارد. همچنین نسبت به الگوریتم­های مرسوم GA و PSO، 85/13 درصد کاهش هزینه، 16/46 درصد کاهش تلفات و 44/37 درصد افزایش سرعت همگرایی دارد.

**6. مراجع**

1. M. R. AlRashidi and M. E. El-Hawary, "A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems," IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 13, no. 4, pp. 913-918, 2008.
2. J. Dhillon and D. Kothari, "Economic-emission load dispatch using binary successive approximation-based evolutionary search," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 3, no. 1, pp. 1-16, 2009.
3. T. A. A. Victoire and A. E. Jeyakumar, "Reserve constrained dynamic dispatch of units with valve-point effects," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1273-1282, 2005.
4. L. G. Papageorgiou and E. S. Fraga, "A mixed integer quadratic programming formulation for the economic dispatch of generators with prohibited operating zones," Electric power systems research, vol. 77, no. 10, pp. 1292-1296, 2007.
5. T. Adhinarayanan and M. Sydulu, "A new optimising concept to ramp-rate constrained economic dispatch with prohibited operating zones," in 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1-6: IEEE.
6. S. Orero and M. Irving, "Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no. 6, pp. 529-534, 1996.
7. Z.-L. Gaing, "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints," IEEE transactions on power systems, vol. 18, no. 3, pp. 1187-1195, 2003.
8. R. C. K. Hota, PK Chattopadhyay, P, "A simulated annealing-based goal-attainment method for economic emission load dispatch with nonsmooth fuel cost and emission level functions," Electric Machines &Power Systems, vol. 28, no. 11, pp. 1037-1051, 2000.
9. L. Han, C. E. Romero, and Z. Yao, "Economic dispatch optimization algorithm based on particle diffusion," Energy conversion and management, vol. 105, pp. 1251-1260, 2015.
10. J. James and V. O. Li, "A social spider algorithm for solving the non-convex economic load dispatch problem," Neurocomputing, vol. 171, pp. 955-965, 2016.
11. D. C. Secui, "A new modified artificial bee colony algorithm for the economic dispatch problem," Energy Conversion and Management, vol. 89, pp. 43-62, 2015.
12. N. Sinha, R. Chakrabarti, and P. Chattopadhyay, "Evolutionary programming for economic load dispatch," IEEE Transactions on evolutionary computation, vol. 7, no. 1, pp. 83-94, 2003.
13. L. S. Coelho and V. C. Mariani, "Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect," IEEE Transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp. 989-996, 2006.
14. T. A. A. Victoire and A. E. Jeyakumar, "Hybrid PSO–SQP for economic dispatch with valve-point effect," Electric Power Systems Research, vol. 71, no. 1, pp. 51-59, 2004.
15. C.-L. Chiang, "Improved GA for power economic dispatch with valve-point effects and multiple fuels," IEEE transactions on power systems, vol. 20, no. 4, pp. 1690-1699, 2005.
16. X.-S. Yang, S. S. S. Hosseini, and A. H. Gandomi, "Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect," Applied soft computing, vol. 12, no. 3, pp. 1180-1186, 2012.
17. P. Arumugam, M. Panchapakesan, S. Balraj, and R. C. Subramanian, "Reverse Search Strategy Based Optimization Technique to Economic Dispatch Problems with Multiple Fuels," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 14, no. 2, pp. 595-601, 2019.
18. D. He, L. Yang, and Z. Wang, "Adaptive Differential Evolution Based on Simulated Annealing for Large-Scale Dynamic Economic Dispatch with Valve-Point Effects," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2018, 2018.
19. B. Mahdad, "Solution of Non-Smooth Economic Dispatch Using Interactive Grouped Adaptive Bat Algorithm: Solving Practical Economic Dispatch," International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE), vol. 8, no. 1, pp. 88-114, 2019.
20. Y. K. Reddy and M. D. Reddy, "Grey Wolf Optimization for Solving Economic Dispatch with Multiple Fuels and Valve Point Loading," International Journal of Information Engineering and Electronic Business, vol. 11, no. 1, p. 50, 2019.
21. A. Mahor, V. Prasad, and S. Rangnekar, "Economic dispatch using particle swarm optimization," Renewable and sustainable energy reviews, vol. 13, no. 8, pp. 2134-2141, 2009.
22. M. Modiri-Delshad, S. H. A. Kaboli, E. Taslimi-Renani, and N. A. Rahim, "Backtracking search algorithm for solving economic dispatch problems with valve-point effects and multiple fuel options," Energy, vol. 116, pp. 637-649, 2016.
23. P. Somasundaram, K. Kuppusamy, and R. K. Devi, "Economic dispatch with prohibited operating zones using fast computation evolutionary programming algorithm," Electric Power Systems Research, vol. 70, no. 3, pp. 245-252, 2004.
24. R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, pp. 39-43: Ieee.
25. N. Amjady and H. Nasiri-Rad, "Nonconvex economic dispatch with AC constraints by a new genetic algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 3, pp. 1489-1502, 2009.
26. Z.-X. Liang and J. D. Glover, "A zoom feature for a dynamic programming solution to economic dispatch including transmission losses," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 2, pp. 544-550, 1992.
27. A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, Power generation, operation, and control. John Wiley & Sons, 2013.
28. G.-h. GUO and Z.-g. WANG, "A Modified Particle Swarm Optimization [J]," Journal of Harbin University of Science and Technology, vol. 2, 2010.
29. S. Chakraborty, T. Senjyu, and eta, "Solving economic load dispatch problem with valve-point effects using a hybrid quantum mechanics inspired particle swarm optimisation," IET generation, transmission & distribution, vol. 5, no. 10, pp. 1042-1052, 2011.
30. S.-K. Wang, J.-P. Chiou, and C.-W. Liu, "Non-smooth/non-convex economic dispatch by a novel hybrid differential evolution algorithm," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, no. 5, pp. 793-803, 2007.
31. A. S. Reddy and K. Vaisakh, "Shuffled differential evolution for large scale economic dispatch," Electric Power Systems Research, vol. 96, pp. 237-245, 2013.
32. B. Mohammadi-Ivatloo, M. Moradi-Dalvand, and A. Rabiee, "Combined heat and power economic dispatch problem solution using particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients," Electric Power Systems Research, vol. 95, pp. 9-18, 2013.

**7. زیرنویس­ها**

1. **Corresponding author: دانشجوی دکتری برق قدرت، دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد**

   **Email: morteza\_1364b@yahoo.com** [↑](#footnote-ref-1)
2. Genetic Algorithm [↑](#endnote-ref-1)
3. Particle Swarm Optimization [↑](#endnote-ref-2)
4. Simulated Annealing [↑](#endnote-ref-3)
5. Particle Diffusion Algorithm [↑](#endnote-ref-4)
6. Social Spider Algorithm [↑](#endnote-ref-5)
7. Artificial Bee Colony [↑](#endnote-ref-6)
8. Evolutionary Programming [↑](#endnote-ref-7)
9. Comparative Chaotic Particle Swarm Optimization [↑](#endnote-ref-8)
10. Particle Swarm Optimization [↑](#endnote-ref-9)
11. Logistic Map [↑](#endnote-ref-10)
12. Genetic Algorithm [↑](#endnote-ref-11)
13. Standard Particle Swarm Optimization [↑](#endnote-ref-12)
14. Inertia based Particle Swarm Optimization [↑](#endnote-ref-13)
15. Constriction Coefficient Particle Swarm Optimization [↑](#endnote-ref-14)