

## حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بهینه تحت قيود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان

فرید محمدی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ حمدی عبدی<sup>۲</sup>، استادیار؛ احسان دهنوی<sup>۳</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - ifaridmohammadi@gmail.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - hamdiabdi@razi.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - dehnavi.eh@gmail.com

**چکیده:** توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک<sup>۱</sup> (DEED)، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی است که توان خروجی بهینه ژنراتورهای سیستم را در کل دوره توزیع بار با لحاظ قیود مختلفی مانند بار مورد تقاضا، اثر نقطه-دریچه، نواحی ممنوعه عملکرد و ذخیره چرخان تعیین می‌کند. در این مقاله، مسئله DEED به صورت ترکیبی با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری<sup>۲</sup> (EDRP) جهت کمینه کردن هم‌زمان هزینه سوخت و آلودگی و مشخص کردن مبلغ تشویقی بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. EDRP یکی از انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق است که در آن به مشترکین مبلغی به‌عنوان تشویق پرداخت می‌شود تا مصرف خود را طی ساعات پیک بار کاهش داده یا به ساعات کم‌باری انتقال دهند. ترکیب مسائل DEED و EDRP یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی پیچیده است که روش‌های معمول قادر به حل آن نیستند. در این مقاله، مسئله فوق توسط چهار الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت حل شده و مدل پیشنهادی روی یک سیستم ده واحدی و برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده در کاهش هزینه سوخت و آلودگی و بهبود مشخصات منحنی بار بسیار مؤثر است.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک، اثر نقطه-دریچه، ذخیره چرخان، برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، مبلغ تشویقی بهینه.

## Solving Dynamic Economic Emission Dispatch Problem with Optimal Emergency Demand Response Program Considering Spinning Reserve and Valve Point-effect Constraints

Farid Mohammadi<sup>1</sup>, MSc Student; Hamdi Abdi<sup>2</sup>, Assistant Professor; Ehsan Dehnavi<sup>3</sup>, MSc Student

1- Department of Electrical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: ifaridmohammadi@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: hamdiabdi@razi.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: dehnavi.eh@gmail.com

**Abstract:** Dynamic economic emission dispatch (DEED) is a multi-objective optimization problem by which the generators power output are scheduled over the whole dispatch period in order to minimize the fuel cost and emission. This multi-objective optimization problem should meet the load demand constraint and some non-linear constraints such as the valve-point loading effect, prohibited operating zones, and spinning reserve requirements. In this paper an integrated model of the DEED problem and the emergency demand response program (EDRP) has been presented. In the integrated model, the fuel cost and emission are minimized and the optimal incentive is determined simultaneously. In EDRP which is one of the incentive-based demand response programs, incentives are paid to the customers to motivate them reduce their consumption during peak hours or shift it to off-peak hours. The proposed model (DEED-EDRP) is a non-linear complicated optimization problem which may not be solved by the conventional methods. So, four different population-based meta-heuristic algorithms have been used to solve the combined problem. The proposed model has been applied on a ten units test system. Results show that the proposed model is so effective in reducing the total cost and emission and improving the load curve characteristics.

**Keywords:** Dynamic economic emission dispatch, Valve-point loading effect, Spinning reserve requirements, Emergency demand response program, Optimal incentive.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۲۴

نام نویسنده مسئول: حمدی عبدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمانشاه - بلوار طالق‌بستان - دانشگاه رازی - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

متمركز هستند، برای بررسی جامع‌تر، تلفیق این دو مسئله بسیار سودمند است. DRPs از تأثیرات نامطلوب ناشی از خرابی‌هایی که معمولاً باعث تحمیل هزینه‌های مالی به مشتریان و ناراضیاتی آن‌ها می‌شود، جلوگیری می‌کند. از این‌رو ارزیابی تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر بهبود امنیت سیستم‌های تجدید ساختاریافته یک چالش مهم برای اپراتورهای سیستم مستقل<sup>۷</sup> (ISO) و سازمان‌های انتقال منطقه‌ای<sup>۸</sup> است. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به دو دسته کلی برنامه‌های مبتنی بر قیمت و مبتنی بر تشویق، تقسیم می‌شوند. در این مقاله، برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) که یک برنامه مبتنی بر تشویق است، مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است. یکی از مسائل مهم در برنامه‌های مبتنی بر تشویق، تعیین نرخ تشویق بهینه است. در صورتی که نرخ تشویقی توسط یک برنامه به صورت نامناسب تعیین گردد، ممکن است باعث تحمیل هزینه‌های اضافی در سمت تولید و یا احتمالاً ایجاد پیک جدید در ساعات دیگر شود.

تعداد بسیار اندکی از مقالات، مسائل DEED و EDRP را به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۱۶]، سه فرمول‌بندی مختلف از تلفیق برنامه توزیع بار اقتصادی و DRP ارائه شده است که بیشتر بر بارهای قابل قطع متمركز است. بررسی کامل‌تر این موضوع در [۱۷] انجام شده که در آن، جزئیات بیشتری در نظر گرفته شده و یک مدل ترکیبی از توزیع بار اقتصادی با پاسخ سمت تقاضا ارائه شده است. در این مدل در ساعات پیک بار سیگنال قیمت توسط شرکت تولیدکننده یک ساعت قبل به مشتری اعلام می‌شود. در مدل مذکور از برخی شرایط عملی در برنامه توزیع اقتصادی صرف‌نظر شده و هدف کمینه‌سازی آلودگی لحاظ نگردیده است. از طرف دیگر این مدل فقط به ساعات پیک بار قابل اعمال بوده و امکان اعمال به تمام ساعات روز را ندارد. در مرجع [۱۸] برنامه پاسخ‌گویی بار بر مبنای تئوری بازی‌ها با برنامه DEED تلفیق شده است. در این مدل اثر نقطه-دریچه، نواحی ممنوعه عملکرد و ذخیره چرخان در نظر گرفته نشده‌اند. عیب عمده کار صورت پذیرفته در این مرجع، واضح نبودن مدل نهایی است. از طرفی دیگر در مدل مذکور در تمام ساعات به مشتریان پاداش داده می‌شود و در تمام ساعات بار کاهش می‌یابد. این رویکرد یک رویکرد عملی، واقعی و اقتصادی نیست و همچنین ممکن است مطابق سیاست‌های ISO نباشد. به عبارت دیگر در مدل فوق، فقط بارهای قابل کاهش و قطع در نظر گرفته شده و از اثر بارهای قابل انتقال صرف‌نظر شده است. از طرف دیگر در عمل تمامی بارها در برنامه پاسخ‌گویی بار شرکت نمی‌کنند و یک ضریب مشارکت باید اعمال شود. بنابراین در نظر گرفتن این ضریب و مدل‌سازی بار بر اساس ماتریس الاستیسیته قیمت<sup>۹</sup> (PEM) یک رویکرد منطقی، قابل اجرا و اقتصادی است.

لازم به ذکر است که تلفیق مسئله DEED و EDRP برای حداقل کردن هزینه سوخت و آلودگی و تعیین هم‌زمان نرخ پاداش بهینه با در نظر گرفتن شرایط غیر خطی عملی از قبیل اثر نقطه-دریچه، نواحی ممنوعه عملکرد و ذخیره چرخان برای اولین بار در این مقاله بررسی شده

توزیع بار اقتصادی دینامیک<sup>۲</sup> (DED) توان خروجی همه نیروگاه‌ها را طی تمامی بازه‌های زمانی توزیع بار جهت کمینه کردن کل هزینه سوخت، مشخص می‌کند به گونه‌ای که قیدهای مشخصی برآورده شوند [۱]. مسئله DED بر اساس کمینه کردن هزینه سوخت و بدون توجه به شرط آلودگی طراحی شده است. برخی از گازهای آلاینده ناشی از سوخت فسیلی واحدهای حرارتی نظیر  $SO_2$ ،  $NO_x$ ،  $CO$  و  $CO_2$  به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر سلامتی انسان تأثیرگذار هستند [۲]. توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک (DEED) می‌تواند به عنوان روشی جهت در نظر گرفتن شرط آلودگی در مسئله DED به کار برده شود. DEED یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است که هزینه سوخت و آلودگی را به طور هم‌زمان تحت شرط نرخ-شیب<sup>۴</sup> و سایر قیدها کمینه می‌کند [۳].

طی سال‌های اخیر روش‌های هوش محاسباتی عملکرد مناسبی در پاسخ به مسائل توزیع بار اقتصادی داشته‌اند. در این خصوص تحقیقات زیادی جهت پاسخ به مسئله DED [۴-۶] و مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی<sup>۵</sup> [۷، ۸] انجام شده است؛ اما تعداد اندکی از مقالات به مسئله DEED پرداخته‌اند. برخی از این مطالعات گزارش شده عبارت‌اند از: الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش [۹]، روشی ترکیبی مبتنی بر تکامل دیفرانسیل و برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی [۲]، روش بهینه‌ساز جستجوی گروه با عملیات چندگانه [۱۰]، الگوریتم جستجوی هارمونی دیفرانسیل خود-تطبیق [۱۱]، الگوریتم آموزش خفاش خود-تطبیق چندهدفه [۱۲]، ترکیب الگوریتم‌های جستجوی باکتری و nelder-mead (که الگوریتم BF-NM خوانده می‌شود) [۱۳] و الگوریتم اپسیلون-ژنتیک چندهدفه (ev-MOGA) [۱۴].

در مراجع [۲، ۹، ۱۰] از الگوریتم‌های مختلف جهت کاهش هزینه‌های سوخت و آلودگی مربوط به عملکرد واحدهای تولیدی استفاده شده است. در [۱۱] محدودیت ولتاژ شین‌ها و توان حقیقی جاری در خطوط تحت عنوان قیود امنیتی به مسئله DEED اضافه شده‌اند. به منظور ارائه مدلی جامع از مسئله DEED، در نظر گرفتن اثر ذخیره چرخان بسیار سودمند است. در همین رابطه در [۱۲] سه نوع مختلف ذخیره چرخان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. [۱۳، ۱۴] علاوه بر قیدهای معمول مسئله DEED، روش‌های جدیدی جهت لحاظ قیدهای ذخیره چرخان، قید فرکانس (انحراف فرکانس و حداقل فرکانس) و حداکثر آلودگی ارائه کرده‌اند.

تمركز مسئله DEED بر خروجی بهینه نیروگاه‌ها در سمت تولید بدون در نظر گرفتن مسائل سمت مصرف‌کننده است. از طرف دیگر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار<sup>۶</sup> (DRPs) قادر به تغییر الگوی مصرف مشترکین، بهبود کارایی بازار انرژی و کاهش نوسانات قیمت هستند [۱۵]. در واقع توجه اصلی برنامه پاسخ‌گویی بار بر کنترل مصرف انرژی الکتریکی مشترکین، در سمت مصرف‌کننده است. با توجه به ماهیت مسائل DEED و DRPs که به ترتیب بر سمت تولید و سمت مصرف

## ۲-۲- تابع آلودگی

تابع آلودگی می‌تواند توسط دو روش مختلف فرمول‌بندی شود. در روش اول، اهداف آلودگی  $NO_x$  و  $SO_x$  به صورت دو تابع درجه دو مجزا در نظر گرفته می‌شوند. در روش دوم که در این مقاله استفاده شده است، تابع آلودگی نیروگاه‌های سوخت فسیلی به صورت ترکیب اهداف آلودگی  $NO_x$  و  $SO_x$  است که به صورت مجموع یک تابع درجه دو و یک تابع نمایی مدل شده است [۷]. رابطه کلی برای آلودگی در تمام دوره توزیع  $[0, T]$  به صورت رابطه (۲) است.

$$Em(P_{i,t}) = \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^{Ng} \left[ \alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2 + \eta_i \exp(\delta_i P_{i,t}) \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $\alpha_i$ ،  $\beta_i$ ،  $\gamma_i$ ،  $\eta_i$  و  $\delta_i$  ضرایب منحنی آلودگی واحدها می‌باشند.

## ۳- برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)

مدل‌سازی رفتار مشتریان بر اساس PEM یکی از بهترین و قوی‌ترین روش‌ها در این زمینه است. همچنین برای به‌دست آوردن مصرف بهینه در سمت تقاضا، الاستیسیته به صورت حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود [۲۱-۱۹].

$$E(t, t') = \frac{\rho_0(t')}{d_0(t)} \frac{\partial d(t)}{\partial \rho(t')} \begin{cases} E(t, t') \leq 0 & \text{if } t = t' \\ E(t, t') \geq 0 & \text{if } t \neq t' \end{cases} \quad (3)$$

که در آن،  $E$  الاستیسیته،  $d(t)$  و  $d_0(t)$  تقاضای مصرف‌کننده قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار هستند.  $\rho_0(t')$  و  $\rho(t')$  قیمت انرژی قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار در طول دوره  $t'$  هستند.

به‌طور کلی بارها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. دسته اول شامل بارهایی مانند روشنایی هستند که نمی‌توانند به دیگر دوره‌ها منتقل شوند و تنها می‌توانند قطع یا کاهش یابند. الاستیسیته در این حالت الاستیسیته خودی<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شود که همواره دارای مقداری منفی است (عناصر قطری ماتریس PEM). در گروه دوم بارهایی قرار دارند که می‌توانند به دوره‌های دیگر منتقل شوند. الاستیسیته در این حالت الاستیسیته متقابل<sup>۱۱</sup> نامیده می‌شود و همواره دارای مقداری مثبت است (عناصر غیر قطری ماتریس PEM). برای ۲۴ ساعت یک روز، الاستیسیته خودی و متقابل می‌توانند به صورت یک ماتریس  $24 \times 24$  مطابق رابطه (۴) نمایش داده شوند.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta d(1)}{d_0(1)} \\ \frac{\Delta d(2)}{d_0(2)} \\ \frac{\Delta d(3)}{d_0(3)} \\ \dots \\ \frac{\Delta d(24)}{d_0(24)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(1,1) & \dots & E(1,24) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E(24,1) & \dots & E(24,24) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\Delta \rho(1)}{\rho_0(1)} \\ \frac{\Delta \rho(2)}{\rho_0(2)} \\ \frac{\Delta \rho(3)}{\rho_0(3)} \\ \dots \\ \frac{\Delta \rho(24)}{\rho_0(24)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ستون  $\lambda$  ماتریس بیانگر تأثیر تغییرات قیمت در ساعت  $\lambda$  روی مصرف ساعات دیگر است. اگر درایه‌های بالای قطر اصلی غیر صفر باشند، بدین معنی است که مصرف‌کنندگان با افزایش مصرف پیش از ساعات گرانی برق، می‌خواهند از روبرویی با قیمت‌های بیشتر جلوگیری کنند و اگر

است. نوآوری‌های عمده این مقاله در مقایسه با مطالعات قبلی عبارت‌اند از: (۱) تلفیق مسئله بهینه‌سازی DEED با EDRP (DEED-EDRP) جهت مشخص نمودن برنامه خروجی نیروگاه‌ها و تعیین پاداش بهینه. (۲) اضافه کردن برخی از قیدهای عملی مانند اثر نقطه-دریچه، نواحی ممنوعه عملکرد و ذخیره چرخان. (۳) بررسی تأثیر مدل تلفیقی DEED-EDRP بر بهبود مشخصات منحنی بار. افزون بر این اهداف زیر نیز در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند: (۱) بررسی تأثیرگذاری مدل نهایی به‌وسیله پیاده‌سازی آن بر روی سیستم ۱۰ ژنراتوری نمونه و مطالعه آن در سه مورد مطالعاتی مختلف. (۲) پاسخ به مسئله DEED-EDRP توسط چهار روش فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت.

ساختار این مقاله به شرح زیر است. ابتدا مسئله DEED در بخش دوم معرفی شده است. سپس مدل EDRP با جزئیات لازم در بخش سوم تشریح شده است. تلفیق مسئله DEED و EDRP در بخش چهارم و پیاده‌سازی مدل ارائه‌شده بر سیستم ۱۰ واحدی در بخش پنجم بیان شده و مقاله با توصیف مهم‌ترین نتایج در بخش ششم به پایان می‌رسد.

## ۲- فرمول‌بندی مسئله توزیع بار اقتصادی-آلودگی دینامیکی (DEED)

DEED یک مسئله بهینه‌سازی جهت مشخص نمودن برنامه تولید هریک از نیروگاه‌ها به‌گونه‌ای است که هم‌زمان هزینه سوخت کل و آلودگی در کل دوره توزیع کمینه شده و مجموعه‌ای از قیود مساوی و نامساوی برآورده شوند. توابع هدف و قیدهای زیر در فرمول‌بندی مسئله DEED در نظر گرفته می‌شوند.

### ۲-۱- تابع هزینه سوخت

هزینه سوخت واحدهای تولیدی معمولاً توسط یک تابع درجه دوم تقریب زده می‌شود. در این‌گونه نیروگاه‌ها، توربین‌ها معمولاً دارای چندین دریچه بخار هستند که جهت کنترل توان خروجی هر واحد استفاده می‌شوند. فرآیند باز شدن دریچه بخار در توربین‌هایی که چندین دریچه بخار دارند، نمودار سرعت گرمایی توربین را موج‌دار می‌کند و همچنین، موجب منفصل و غیر محدب شدن تابع هزینه می‌شود. برای مدل کردن دقیق اثرات دریچه بخار، یک تابع سینوسی به تابع هزینه اضافه می‌شود [۱، ۲]. بنابراین، تابع هزینه سوخت کل در تمام دوره توزیع  $[0, T]$  با در نظر گرفتن اثر نقطه-دریچه در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$Fc(P_{i,t}) = \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^{Ng} \left[ a_i + b_i P_{i,t} + c_i (P_{i,t})^2 + \left| d_i \sin(e_i (P_{i,t}^{\min} - P_{i,t})) \right| \right] \quad (1)$$

در رابطه فوق:  $a_i$ ،  $b_i$ ،  $c_i$  ضرایب منحنی تابع سوخت مربوط به واحد  $i$ ام؛  $d_i$  و  $e_i$  نشانگر اثر نقطه-دریچه هستند؛  $T$  تعداد ساعت‌هایی که سیستم مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛  $Ng$  تعداد واحدهای تولیدی موجود در مدار؛  $P_{i,t}$  توان تولیدی خروجی واحد  $i$ ام در طول دوره  $t$ ام (ساعت  $t$ ام)؛  $P_{i,min}$  حداقل توان تولیدی مجاز واحد  $i$ ام.

$$\left\{ 1 + \sum_{\substack{t'=1 \\ t' \neq t}}^{24} E(t, t') \times \frac{[\rho(t') - \rho_0(t') + inc(t') - pen(t')]}{\rho_0(t')} \right\}$$

سرانجام مدل ترکیبی که شامل مدل‌های تک‌پریودی و چندپریودی است، به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$d(t) = d_0(t) \times \left\{ 1 + \frac{\rho(t) - \rho_0(t) + inc(t) - pen(t)}{\rho_0(t)} E(t, t) + \sum_{\substack{t'=1 \\ t' \neq t}}^{24} E(t, t') \times \frac{[\rho(t') - \rho_0(t') + inc(t') - pen(t')]}{\rho_0(t')} \right\} \quad (15)$$

#### ۴- تلفیق DEED و EDRP (DEED-EDRP)

مدل تلفیقی DEED و EDRP یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کلی کمیته‌سازی هم‌زمان هزینه و آلودگی و تعیین مبلغ تشویق بهینه است که در این قسمت برای فرمول‌بندی مسئله DEED-EDRP از روش جمع وزنی توابع هدف و ضریب جریمه قیمت استفاده شده و مسئله مذکور به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفی تبدیل شده است [۹]. هزینه اضافی ناشی از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار که باید به هزینه کل مسئله DEED اضافه شود، به صورت رابطه (۱۶) است.

$$C_{EDRP}(t) = (d_0(t) - d(t)) inc(t) \quad (16)$$

تابع هدف نهایی با در نظر گرفتن هزینه سوخت و آلودگی واحدها و هزینه اجرای EDRP، کمیته کردن رابطه (۱۷) است.

$$TOF(P_{i,t}) = \left\{ \begin{aligned} & W_{FC} \times \left[ \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ a_i + b_i P_{i,t} + c_i (P_{i,t})^2 + \left| d_i \sin(e_i (P_i^{min} - P_{i,t})) \right| \right\} \right] + \\ & \sum_{t=1}^T \left\{ W_{FC} \times C_{EDRP}(t) + \right. \\ & \left. W_{EC} \times \left[ \sum_{i=1}^{N_g} pff(i) \times \left( \frac{\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2}{\eta_i \exp(\delta_i P_{i,t})} \right) \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

در رابطه فوق داریم:  $W_{FC} + W_{EC} = 1$  و ضریب جریمه قیمت هر واحد تولیدی است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$pff(i) = \frac{Fc(P_i^{max})}{Em(P_i^{max})} \quad (18)$$

$$\frac{a_i + b_i P_i^{max} + c_i (P_i^{max})^2 + \left| d_i \sin(e_i (P_i^{min} - P_i^{max})) \right|}{\alpha_i + \beta_i P_i^{max} + \gamma_i (P_i^{max})^2 + \eta_i \exp(\delta_i P_i^{max})}$$

#### ۴-۱- قیدهای واقعی عملکرد سیستم

برای کمیته‌سازی رابطه (۱۷) باید یک سری از قیدهای مساوی و نامساوی زیر برآورده شوند:

درایه‌های زیر قطر اصلی این ستون صفر نباشند به این معنی است که مشتریان با به تأخیر انداختن مصرف، منتظر پایین آمدن قیمت‌ها می‌شوند و مصرف برق خود را به تأخیر می‌اندازند.

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تشویقی برای مصرف‌کنندگان این انگیزه را به وجود می‌آورد تا مصرفشان را کاهش دهند. پرداختی کل به مصرف‌کنندگان به صورت رابطه (۵) است.

$$INC(\Delta d(t)) = inc(t) \times [\Delta d(t)] \quad (5)$$

که در آن،  $inc(t)$  مقدار پاداش داده شده به مصرف‌کنندگان جهت کاهش میزان مصرفشان است (\$/MWh). مقدار بار کاهش داده شده است. برخی برنامه‌ها برای مشتریانی که متعهد به شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار شده‌اند، ولی برخلاف قرارداد در ساعات مورد نظر بار خود را کاهش نمی‌دهند، جریمه‌ای را به صورت زیر در نظر می‌گیرند:

$$PEN(\Delta d(t)) = pen(t) \times \{IC(t) - [\Delta d(t)]\} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $IC(t)$  مقدار باری است که مصرف‌کننده متعهد به کاهش یا انتقال آن است. لذا تابع سود مشتری به صورت زیر خواهد بود:

$$NP(t) = B(d(t)) - d(t)\rho(t) + INC(\Delta d(t)) - PEN(\Delta d(t)) \quad (7)$$

که در آن،  $B$  میزان سودی است که مشتریان از مصرف بار به دست می‌آورند. برای حداکثر کردن سود، مشتق رابطه (۷) باید صفر باشد.

$$\frac{\partial NP}{\partial d(t)} = \frac{\partial B(d(t))}{\partial d(t)} - \rho(t) + \frac{\partial INC}{\partial d(t)} - \frac{\partial PEN}{\partial d(t)} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial B(d(t))}{\partial d(t)} = \rho(t) + inc(t) + pen(t) \quad (9)$$

سری تیلور  $B$  به صورت رابطه (۱۰) است.

$$B(d(t)) = B(d_0(t)) + \frac{\partial B(d_0(t))}{\partial d(t)} [d(t) - d_0(t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B(d_0(t))}{\partial d^2(t)} [d(t) - d_0(t)]^2 \quad (10)$$

برای به دست آوردن مصرف بهینه که توسط آن مصرف‌کنندگان حداکثر سود را به دست می‌آورند، طبق رابطه (۱۰) داریم:

$$B(d(t)) = B(d_0(t)) + \rho_0(t) [d(t) - d_0(t)] + \frac{1}{2} \frac{\rho_0(t)}{E(t,t)d_0(t)} [d(t) - d_0(t)]^2 \quad (11)$$

با مشتق‌گیری:

$$\frac{\partial B(d(t))}{\partial d(t)} = \rho_0(t) \left( 1 + \frac{d(t) - d_0(t)}{E(t,t)d_0(t)} \right) \quad (12)$$

با ترکیب رابطه‌های (۹) و (۱۲) برای مدل تک‌پریودی بار (بارهای قابل کاهش):

$$d(t) = d_0(t) \times \left( 1 + \frac{\rho(t) - \rho_0(t) + inc(t) + pen(t)}{\rho_0(t)} E(t,t) \right) \quad (13)$$

برای مدل چند پریودی بار (بارهای قابل انتقال):

$$d(t) = d_0(t) \times \quad (14)$$

#### ۴-۱-۱- محدودیت نرخ پاداش

نرخ تشویقی لحاظ شده در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، باید در یک محدوده قابل قبول به صورت زیر قرار گیرد:

$$inc(t)^{min} \leq inc(t) \leq inc(t)^{max} \quad (۱۹)$$

معمولاً حداکثر و حداقل نرخ پاداش پرداختی به مشتریان به ترتیب ده و یک‌دهم برابر قیمت اولیه انرژی ( $\rho_0(t')$ ) در نظر گرفته می‌شود [۲۲].

#### ۴-۱-۲- قید تساوی بار

$$\sum_{i=1}^{Ng} (P_{i,t}) - P_{D,t} - P_{Loss,t} = 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (۲۰)$$

در رابطه فوق  $P_{D,t}$  و  $P_{Loss,t}$  به ترتیب بار مورد تقاضا و توان اتلافی خطوط انتقال در دوره  $t$ ام می‌باشند. معمولاً  $P_{Loss,t}$  توسط رابطه تلفات کرون<sup>۱۲</sup> طبق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$P_{Loss,t} = \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^{Ng} P_{i,t} B_{i,j} P_{j,t} \quad (۲۱)$$

که در آن،  $B_{i,j}$  ضریب تلفات توانی شبکه انتقال است.

#### ۴-۱-۳- قید ظرفیت تولید نیروگاه‌ها

تحت عملکرد عادی سیستم؛ خروجی واحد  $t$ ام باید دارای مقداری بین  $P_i^{min}$  و  $P_i^{max}$  مطابق رابطه (۲۲) باشد.

$$P_i^{min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max}, \quad i = 1, \dots, Ng, \quad t = 1, \dots, T \quad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲)،  $P_i^{max}$  حداکثر توان تولیدی مجاز واحد  $t$ ام است.

#### ۴-۱-۴- نواحی عملکرد ممنوعه

در عمل، ژنراتورها نباید در نواحی عملکرد ممنوعه به کار گرفته شوند. دلیل اصلی این محدودیت ارتعاشات یاتاقان‌های شفت ژنراتور است؛ در غیر این صورت احتمال بروز یک سری از خطاها وجود دارد. نواحی عملکرد مجاز مربوط به ژنراتور  $t$ ام به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} P_{(i,t)}^{min} \leq P_{i,t} \leq P_{(i,t),1}^l \quad or \\ P_{(i,t),q-1}^u \leq P_{i,t} \leq P_{(i,t),q}^l \quad or \\ P_{(i,t),n_i}^u \leq P_{i,t} \leq P_{(i,t)}^{max} \end{aligned} \quad (۲۳)$$

برای هر واحد تولیدی،  $n_i$  مشخص‌کننده تعداد نواحی عملکرد ممنوعه است.

#### ۴-۱-۵- قید نرخ شیب

قید نرخ شیب برای واحد  $t$ ام، مشخص‌کننده حداکثر افزایش یا کاهش توان تولیدی از هر دوره زمانی به دوره بعد است که در رابطه (۲۴) بیان شده است.

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq RU_i \quad \text{در صورت کاهش تولید} \quad (۲۴)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RD_i \quad \text{در صورت افزایش تولید}$$

در رابطه (۲۴)،  $P_{i,t-1}$  توان خروجی مربوط به دوره قبل است.  $RU_i$  و  $RD_i$  به ترتیب حداکثر افزایش و کاهش توان مجاز واحد تولیدی  $t$ ام هستند (MW/h).

#### ۴-۱-۶- قید ذخیره چرخان

با توجه به این‌که نرخ افزایش توان واحدهای تولیدی متفاوت است و مدت‌زمانی لازم است تا خروجی هر واحد تولیدی به مقدار بیشینه خود برسد؛ برای اطمینان از این‌که در صورت از دست رفتن یک واحد تولیدی، بقیه واحدها قادر به جبران توان از دست‌رفته در یک بازه زمانی مشخص (مثلاً ۱۰ یا ۶۰ دقیقه) باشند، ذخیره چرخان باید به‌عنوان یک قید اضافی در نظر گرفته شود. در این مقاله قید ذخیره چرخان برای مسئله DEED توسط سه رابطه زیر بیان شده است:

$$Delta1_i^{(1)} = \sum_{i=1}^{Ng} P_i^{max} - (P_{D,t} + P_{Loss,t} + SRR_t) \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (۲۵)$$

$$Delta2_i^{(2)} = \sum_{i=1}^{Ng} (\min(P_i^{max} - P_{i,t}, RU_i)) - SRR_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (۲۶)$$

$$Delta3_i^{(3)} = \sum_{i=1}^{Ng} (\min(P_i^{max} - P_{i,t}, \frac{RU_i}{6})) - SRR_t' \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (۲۷)$$

در رابطه فوق  $SRR_t'$  و  $SRR_t$  به ترتیب مقدار ذخیره چرخان مورد نیاز برای ۶۰ دقیقه و ۱۰ دقیقه در ساعت  $t$ ام برحسب MW هستند.

معمولاً قیده‌های (۲۵) و (۲۶) جهت برآورده کردن شرط زمان جبران ۶۰ دقیقه‌ای به مسئله DEED اعمال می‌شوند. به‌کار بردن رابطه (۲۷) موجب برآورده شدن شرط زمان جبران ۱۰ دقیقه‌ای شده و مقدار آن وابسته به حداکثر افزایش توان مجاز واحدهای تولیدی است.  $RU_i$  حداکثر افزایش توان مجاز واحد  $t$ ام مربوط به گذر از ساعت  $t$  به ساعت  $t+1$ ام، بوده و واحد آن مگاوات بر ساعت است؛ این مقدار برای مدت جبران ۱۰ دقیقه‌ای برابر  $RU_i/6$  است [۶، ۱۲].

اگر چنانچه قیده‌های غیر خطی نظیر قید تساوی بار، ظرفیت تولید توان نیروگاه، نواحی عملکرد ممنوعه، قید نرخ شیب و قید ذخیره چرخان نیز در نظر گرفته شوند، باعث پیچیدگی مسئله DEED-EDRP شده و پاسخ‌گویی به آن را دشوار می‌سازند. بیشتر روش‌های بهینه‌سازی سنتی برای یافتن یک جواب بهینه کلی در پاسخ به این‌گونه مسائل ناموفق هستند؛ روش‌های مذکور نسبت به حدس اولیه بسیار حساس هستند و تنها به یک جواب بهینه محلی همگرا می‌شوند و به‌دلیل حجم بالای محاسبات سرعت پایینی دارند. از این‌رو، در این مقاله جهت حل مسئله DEED-EDRP، از چند الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت استفاده شده است.

#### ۴-۲- پاسخ به مسئله DEED-EDRP

در این قسمت یک روند کلی جهت حل مسئله DEED-EDRP با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری مبتنی جمعیت معرفی شده است. به‌طورکلی در این‌گونه الگوریتم‌ها، جمعیت شامل تعدادی از جواب‌های ممکن مسئله بهینه‌سازی است. تعداد جواب‌های ممکن، مشخص‌کننده اندازه جمعیت است [۲۳]. در انواع روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت، جواب‌های ممکن مسئله نام‌های متفاوتی دارند به‌عنوان مثال در الگوریتم ICA تحت عنوان کشورها، در PSO تحت عنوان ذرات، در ABC تحت عنوان زنبور عسل مصنوعی و ... یاد می‌شوند. در این قسمت جهت سهولت در توضیحات، هر جواب ممکن مربوط به

الگوریتم انتخابی، یک کاندیدا نامیده می‌شود. در مسئله DEED-EDRP، خروجی واحدها در هر ساعت تشکیل یک بردار می‌دهد که نشان‌دهنده یک جزء از جمعیت است. به عبارت دیگر می‌توان آن را یک کاندیدای مسئله بهینه‌سازی DEED-EDRP در هر ساعت دانست. اگر چنانچه تعداد ژن‌تورهای که توان را برای بار مورد تقاضا تولید می‌کنند،  $N_g$  باشد، آن‌گاه موقعیت فعلی کاندیدای  $k$ ام در هر ساعت ( $PG_k$ ) می‌تواند به صورت رابطه (۲۸) تعریف شود.

$$PG_k = [pg_{k,1}, pg_{k,2}, \dots, pg_{k,i}, \dots, pg_{k,N_g}] \quad (28)$$

$, k = 1, 2, \dots, PS$

در رابطه فوق،  $PG_k$ ، موقعیت فعلی بردار  $k$ ام؛  $N_g$ ، تعداد واحدهای تولیدی؛  $PS$ ، اندازه جمعیت؛  $i$ ، شماره ژن‌تور؛  $pg_{k,i}$ ، توان خروجی واحد  $k$ ام در کاندیدای  $k$ ام.

شرط تساوی بار در رابطه (۲۰) می‌تواند با اعمال یک مقدار جریمه به رابطه (۱۷) برآورده شود. در این حالت تابع مورد ارزیابی مسئله DEED-EDRP، کمینه‌سازی رابطه (۲۹) خواهد بود.

$$EF(P_{i,t}) = \sum_{i=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} TOF(P_{i,t}) + K_n \cdot abs \left( \sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} - P_{D,t} - P_{Loss,t} \right) \right\} \quad (29)$$

در رابطه فوق،  $K_n$  نشان‌دهنده ضریب جریمه بوده که در واقع یک عدد حقیقی مثبت است (در این مقاله ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است).

#### ۳-۴- روند پیشنهادی و برآورده‌سازی قیود

پیش از بیان نحوه پاسخ‌گویی به مدل پیشنهادی توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری، لازم است به این نکته اشاره شود که تفاوت اصلی مسئله توزیع بار اقتصادی استاتیک<sup>۱۳</sup> و دینامیک، تنها به دلیل وجود قید نرخ شیب است. پاسخ به مسئله توزیع بار اقتصادی دینامیک در طول یک دوره (۲۴ ساعت) با تقسیم کل دوره به تعدادی بازه‌های زمانی کوچک‌تر (بازه‌های یک‌ساعتی) و سپس حل مسئله توزیع بار اقتصادی استاتیک برای هر بازه تحت قید نرخ-شیب بین بازه‌های مختلف حل می‌شود [۴، ۶]. نظر به توضیحات فوق و با توجه به طبیعت احتمالاتی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، برای به دست آوردن نتایج با دقت بیشتر، مدل ارائه شده با ده بار حل مسئله توزیع بار استاتیک در هر ساعت ( $N_{trial}=10$ )، پاسخ داده شده است. جهت حل مدل پیشنهادی و برآورده نمودن قیود واقعی سیستم روند کلی زیر ارائه می‌شود.

**مرحله ۱.** تعریف داده‌های اولیه واحدها، منحنی بار روزانه،  $\rho_0(t)$ ، ماتریس الاستیسیته قیمت. تنظیم مقدار اولیه نرخ تشویق در مقدار صفر. تنظیم تعداد ساعات مورد مطالعه برای یک شبانه‌روز ( $T=24$ ). تعیین تعداد تکرارهای الگوریتم بهینه‌سازی (iteration). در این مقاله برای تمام الگوریتم‌ها این مقدار برابر ۱۰۰ تکرار لحاظ شده است.

**مرحله ۲.** افزایش مقدار نرخ تشویق به اندازه گام تغییرات آن توسط ISO. در این مقاله، گام تغییرات نرخ تشویق ۰/۲۵ دلار بر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است ( $inc=inc+0/25$ ).

**مرحله ۳.** تنظیم شماره ساعت بر روی صفر ( $t=0$ ).

**مرحله ۴.**  $t=t+1$

**مرحله ۵.** تعیین مقدار تقاضای بار در هر ساعت توسط رابطه (۱۵).

**مرحله ۶.** تنظیم تعداد حل مسئله توزیع بار اقتصادی روی مقدار صفر ( $trial=0$ )

**مرحله ۷.**  $trial=trial+1$

**مرحله ۸.** تعیین جمعیت اولیه الگوریتم بهینه‌سازی (مجموعه‌ای از جواب‌های ممکن مسئله DEED-EDRP) مطابق ۶ گام به صورت زیر:

گام ۱.  $k=1$  (نشانگر شماره کاندیدا در جمعیت است).

گام ۲. مطابق توضیحات قبل و رابطه (۲۸)، کاندیدای  $k$ ام را (برنامه خروجی نیروگاه‌ها برای عضو  $k$ ام جمعیت) به طور تصادفی و در بازه مجاز توان هر نیروگاه طبق رابطه (۲۲) تولید کن.

گام ۳. محاسبه تلفات خط انتقال برای کاندیدای  $k$ ام با توجه به رابطه (۲۱).

گام ۴. برای کاندیدای  $k$ ام قیود زیر را بررسی کن.

قید ۱. توان خروجی هر نیروگاه در نواحی ممنوعه قرار نداشته باشد (رابطه ۲۳).

قید ۲. قید نرخ شیب را بررسی کن. به این صورت که افزایش و کاهش توان خروجی هر نیروگاه در بازه قابل قبول رابطه (۲۴) باشد. اگر توان اولیه نیروگاه‌ها معلوم نباشد، فرض بر این است که توان اولیه تمام واحدها در بازه مجاز بوده و نیاز به بررسی این شرط در ساعت اول نیست.

قید ۳. توان خروجی نیروگاه‌ها در روابط (۲۵) تا (۲۷) (قید ذخیره چرخان) صدق می‌کنند.

گام ۵. اگر تمامی قیود گام ۴ رعایت شده‌اند، یک واحد به  $k$  اضافه کن ( $k=k+1$ ).

گام ۶. اگر مقدار  $k$ ، کوچک‌تر یا مساوی اندازه جمعیت انتخابی ( $PS$ ) است، به گام ۲ برگرد.

**مرحله ۹.** اجرای حلقه اصلی الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب شده.

لازم به ذکر است این روند در هر الگوریتم بهینه‌سازی متفاوت است به عنوان مثال در الگوریتم ICA، اعضای جمعیت اولیه به تعدادی کشور امپریالیست و مستعمره تقسیم می‌شوند. سپس مستعمرات توسط سیاست جذب بین امپراتوری‌ها تقسیم می‌شوند. در هر امپراتوری مستعمرات در راستای بهبود شاخص‌های خود (بهینه شدن مقدار تابع هدف) به سمت کشور امپریالیست حرکت می‌کنند. در صورت بهتر شدن وضعیت یک مستعمره در یک امپراتوری، جای مستعمره و امپریالیست عوض می‌شود و به اصطلاح انقلاب رخ می‌دهد. سپس در بین امپراتوری‌ها، رقابت استعماری شکل می‌گیرد، به طوری که ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراتوری جدا شده و بین سایر امپراتوری‌ها تقسیم می‌شود و امپراتوری که تمام کشورهای خود را از دست بدهد سقوط می‌کند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که تنها یک امپراتوری واحد باقی بماند و یا تعداد تکرارهای الگوریتم به پایان برسد. در

**مرحله ۱۲.** اگر مقدار  $inc$  برابر با مقدار بیشینه در رابطه (۱۹) نیست، به مرحله ۲ برگرد. در غیر این صورت نرخ تشویق متناظر بهترین جواب کل را به عنوان نرخ تشویق بهینه انتخاب کن.

### ۵- شبیه‌سازی و نتایج

تأثیرگذاری و امکان‌پذیر بودن مدل ارائه‌شده، توسط اعمال آن به یک سیستم ده ژنراتوری و مطالعه آن در قالب سه مورد مطالعاتی مختلف، نشان داده شده است. سیستم آزمایشی در قسمت ۵-۱ معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی در قسمت ۵-۲ ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

#### ۵-۱- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم ۱۰ ژنراتوری به دست آمده است. خصوصیات مربوط به این سیستم و ماتریس تلفات خط انتقال مطابق [۱۸] بوده و با اعمال برخی تغییرات در جداول ۱ و ۲ و رابطه (۳۰) آورده شده است. برای لحاظ نمودن قید ذخیره چرخان مقادیر  $SRR_t$  و  $SRR_t$ ، در روابط (۲۵) تا (۲۷) به ترتیب روی ۵ و  $(5 \times 10/60)$  درصد از بار مورد تقاضا در هر ساعت تنظیم شده‌اند. علاوه بر این، اطلاعات مربوط به منحنی تقاضای بار روزانه در جدول ۳ موجود است. منحنی تقاضای بار روزانه به ترتیب به ساعات (۵ - ۰) کم‌باری، ساعات (۹ - ۶) و (۱۹ - ۱۵) میان‌باری و ساعات (۱۴ - ۱۰) و (۲۴ - ۲۰) پیک بار، تقسیم شده است. همچنین درصد مشارکت برنامه پاسخ‌گویی بار، ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. بدین معنی که از کل مشتریان برق تنها ۲۰ درصد در برنامه پاسخ‌گویی بار شرکت نموده‌اند. قیمت اولیه هر مگاوات ساعت برق نیز برای تمامی بازه‌های زمانی، ۲۰ دلار در نظر گرفته شده است. پارامترهای ماتریس الاستیسیته قیمت از [۲۴] استخراج شده و در جدول ۴ نشان داده شده است.

#### ۵-۲- شبیه‌سازی

در این بخش، برنامه DEED با اهداف کمینه‌سازی هزینه سوخت و کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه سوخت و آلودگی در ترکیب با EDRP، در قالب سه مورد مطالعاتی مختلف بررسی شده است. در موارد مطالعاتی اول و دوم، مسئله برای حالت‌های کمینه‌سازی قیمت سوخت و کمینه‌سازی هم‌زمان قیمت سوخت و آلودگی بررسی شده و از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) به عنوان ابزار بهینه‌سازی جهت پاسخ به مسئله DEED-EDRP، استفاده شده است. همچنین نحوه تأثیر الاستیسیته و تشویق بر مقدار نتایج به دست آمده، بیان شده است. برای موارد مطالعاتی اول و دوم، سه گروه دارای مقادیر مختلف نرخ تشویق و PEM، در قالب ۱۰ سناریو به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند. در مورد مطالعاتی سوم برای مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف، چهار الگوریتم بهینه‌سازی برای پاسخ به مدل ارائه شده به کار رفته است. همچنین، در این قسمت هشت سناریو مطابق جدول ۵ مورد مطالعه قرار گرفته است.

این صورت شاخص‌های بهترین امپراتور (متغیرهای بهینه‌سازی)، به عنوان بهینه‌ترین جواب انتخاب می‌شود [۴].

جهت برآورده شدن قیود مسئله DEED-EDRP، حلقه اصلی الگوریتم بهینه‌سازی مطابق گام‌های زیر صورت می‌پذیرد:

گام ۱.  $iteration=1$

گام ۲.  $k=1$  (ک نشانگر شماره کاندیدا در جمعیت است).

گام ۳. محاسبه تلفات خط انتقال برای کاندیدای  $k$ ام با توجه به رابطه (۲۱).

گام ۴. تعیین هزینه اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار با توجه به رابطه (۱۶).

گام ۵. محاسبه مقدار تابع ارزیابی برای هر کاندیدا توسط رابطه (۲۹).

گام ۶. جهش مقدار کاندیدای  $k$ ام به منظور همگرایی مقدار تابع هدف آن به حالت بهینه (به عنوان مثال اعمال سیاست جذب در الگوریتم ICA).

گام ۷. بررسی قیود برای کاندیدای  $k$ ام.

قید ۱. توان خروجی هر نیروگاه در نواحی ممنوعه قرار نداشته باشد (رابطه ۲۳).

قید ۲. قید نرخ شیب را بررسی کن، به این صورت که افزایش و کاهش توان خروجی هر نیروگاه در بازه قابل قبول رابطه (۲۴) باشد. اگر توان اولیه نیروگاه‌ها معلوم نباشد، فرض می‌شود که توان اولیه تمام واحدها در بازه مجاز بوده و نیاز به بررسی این شرط در ساعت اول نیست.

قید ۳. توان خروجی نیروگاه‌ها در روابط (۲۵) تا (۲۷) (قید ذخیره چرخان) صدق کنند.

گام ۸. اگر تمامی قیود گام ۷ رعایت شده‌اند، یک واحد به  $k$  اضافه کن ( $k=k+1$ ).

گام ۹. اگر مقدار  $k$  کوچک‌تر یا مساوی اندازه جمعیت انتخابی (PS) است، به گام ۳ برگرد.

گام ۱۰. تعیین بهترین کاندیدا (کمترین مقدار تابع ارزیابی) توسط الگوریتم بهینه‌سازی در پایان هر تکرار.

به عنوان مثال در الگوریتم ICA، بهترین کشور (کاندیدا) در هر تکرار، پس از بررسی شرط انقلاب در هر امپراتوری و رقابت استعماری بین امپراتوری‌ها مشخص می‌شود.

گام ۱۱. یک واحد به  $iter$  اضافه کن ( $iter=iter+1$ ).

گام ۱۲. اگر تعداد تکرارها تمام نشده است، به گام ۲ برگرد. در غیر این صورت بهترین کاندیدا را برای ساعت  $t$ ام ذخیره کن.

**مرحله ۱۰.** اگر مقدار  $trail$  برابر با  $Ntrail$  نشده است، به مرحله ۷ برگرد. در غیر این صورت از بین  $Ntrail$  کاندیدا، بهترین را به عنوان پاسخ نهایی ساعت  $t$ ام انتخاب کن.

**مرحله ۱۱.** اگر مقدار  $t$  برابر با  $T$  نیست، به مرحله ۴ برگرد. در غیر این صورت جواب کل (برنامه تولید واحدها طی ۲۴ ساعت) را برای نرخ تشویق مربوطه ذخیره کن.

جدول ۱: مشخصات ژنراتورهای سیستم ده واحدی

واحدها	$P_{max}$ (MW)	$P_{min}$ (MW)	$a_i$ (\$/h)	$b_i$ (\$/MWh)	$c_i$ (\$/MWh <sup>2</sup> h)	$d_i$ (\$/h)	$e_i$ (rad/MW)	$RU_i$ (MW/h)	$RD_i$ (MW/h)
۱	۴۷۰	۱۵۰	۹۵۸/۲۰	۲۱/۶۰	-/۰۰۰۴۳	۴۰	-/۰۱۴۱	۸۰	۸۰
۲	۴۶۰	۱۳۵	۱۳۱۳/۶۰	۲۱/۰۵	-/۰۰۰۶۳	۶۰	-/۰۱۳۶	۸۰	۸۰
۳	۳۴۰	۷۳	۶۰۴/۹۷	۲۰/۸۱	-/۰۰۰۳۹	۳۰	-/۰۱۲۸	۸۰	۸۰
۴	۳۰۰	۶۰	۴۷۱/۶۰	۲۳/۹۰	-/۰۰۰۷۰	۲۰	-/۰۱۵۲	۵۰	۵۰
۵	۲۴۳	۷۳	۴۸۰/۲۹	۲۱/۶۲	-/۰۰۰۷۹	۲۰	-/۰۱۶۳	۵۰	۵۰
۶	۱۶۰	۵۷	۶۰۱/۷۵	۱۷/۸۷	-/۰۰۰۵۶	۳۰	-/۰۱۴۸	۵۰	۵۰
۷	۱۳۰	۲۰	۵۰۲/۷۰	۱۶/۵۱	-/۰۰۰۲۱۱	۳۰	-/۰۱۶۸	۳۰	۳۰
۸	۱۲۰	۴۷	۶۳۹/۴۰	۲۳/۲۳	-/۰۰۰۴۸۰	۳۲	-/۰۱۶۲	۳۰	۳۰
۹	۸۰	۲۰	۴۵۵/۶۰	۱۹/۵۸	-/۱۰۰۹۰۸	۲۵	-/۰۱۷۸	۳۰	۳۰
۱۰	۵۵	۱۰	۶۹۲/۴۰	۲۲/۵۴	-/۰۰۰۹۵۱	۳۳	-/۰۱۷۴	۳۰	۳۰

جدول ۲: مشخصات ژنراتورهای سیستم ده واحدی

واحدها	$\alpha_i$ (lb/h)	$\beta_i$ (lb/MWh)	$\gamma_i$ (lb/MWh <sup>2</sup> h)	$\eta_i$ (lb/h)	$\delta_i$ (1/MW)	نواحی ممنوعه (MW)
۱	۳۶۰/۰۰۱۲	-۳/۹۸۶۴	-/۰۴۷۰۲	-/۴۵۳۵	-/۰۲۰۴	—
۲	۳۵۰/۰۰۵۶	-۳/۹۵۲۴	-/۰۴۶۵۲	-/۴۵۳۵	-/۰۲۰۴	[۱۶۵-۲۰۵] [۲۹۵-۳۱۵] [۴۳۵-۴۴۵]
۳	۳۳۰/۰۰۵۶	-۳/۹۰۲۳	-/۰۴۶۵۲	-/۴۴۶۸	-/۰۲۰۱	—
۴	۳۳۰/۰۰۵۶	-۳/۹۰۲۳	-/۰۴۶۵۲	-/۴۴۶۸	-/۰۲۰۱	[۸۰-۱۲۰] [۱۷۰-۲۱۰] [۲۵۵-۲۸۵]
۵	۱۳/۸۵۹۳	-/۳۲۷۷	-/۰۰۴۲	-/۰۵۰۷	-/۰۰۲۲	—
۶	۱۳/۸۵۹۳	-/۳۲۷۷	-/۰۰۴۲	-/۰۵۰۷	-/۰۰۲۲	[۶۵-۱۰۵] [۱۲۰-۱۵۵]
۷	۴۰/۲۶۶۹	-/۵۴۵۵	-/۰۰۶۸	-/۰۵۱۵	-/۰۰۲۵	[۳۰-۵۵] [۷۰-۸۵] [۹۰-۱۱۵]
۸	۴۰/۲۶۶۹	-/۵۴۵۵	-/۰۰۶۸	-/۰۵۱۵	-/۰۰۲۵	—
۹	۴۲/۸۹۵۵	-/۵۱۱۲	-/۰۰۴۶	-/۰۵۲۴	-/۰۰۲۸	[۲۵-۴۰] [۵۵-۷۰]
۱۰	۴۲/۸۹۵۵	-/۵۱۱۲	-/۰۰۴۶	-/۰۵۲۴	-/۰۰۲۸	—

$$B = \begin{bmatrix} 49 & 14 & 15 & 15 & 16 & 17 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ 14 & 45 & 16 & 16 & 17 & 15 & 15 & 16 & 18 & 18 \\ 15 & 16 & 39 & 10 & 12 & 12 & 14 & 14 & 16 & 16 \\ 15 & 16 & 10 & 40 & 14 & 10 & 11 & 12 & 14 & 15 \\ 16 & 17 & 12 & 14 & 35 & 11 & 13 & 13 & 15 & 16 \\ 17 & 15 & 12 & 10 & 11 & 36 & 12 & 12 & 14 & 15 \\ 17 & 15 & 14 & 11 & 13 & 12 & 38 & 16 & 16 & 18 \\ 18 & 16 & 14 & 12 & 13 & 12 & 38 & 16 & 16 & 18 \\ 19 & 18 & 16 & 14 & 15 & 14 & 16 & 15 & 42 & 19 \\ 20 & 18 & 16 & 15 & 16 & 15 & 18 & 16 & 19 & 44 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \quad (30)$$

جدول ۳: منحنی اولیه بار روزانه

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بار (MW)	۱۴۵۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰	۱۴۵۰	۱۶۰۰	۱۶۵۰	۱۷۰۰	۱۷۲۵	۱۷۷۵	۱۹۰۰	۲۰۲۵	۲۱۵۰
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
بار (MW)	۲۰۷۵	۱۹۲۵	۱۷۷۵	۱۵۵۰	۱۴۷۵	۱۶۲۵	۱۷۷۵	۱۹۷۵	۱۹۲۵	۱۸۷۵	۱۷۲۵	۱۶۰۰



توجه به جدول ۶، در تمام سناریوها، پس از اجرای EDRP هزینه کل کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش هزینه برابر ۳۷۷۵۴/۸۷۸۷ دلار بوده که در سناریو (۹) رخ داده و کمترین کاهش هزینه برابر ۷۵۰۹/۵۹۷۳ دلار بوده که مربوط به سناریو (۷) است. مطابق معادلات (۱۵) و (۱۶)، پاداش کل پرداختی به مشتریان با افزایش PEM، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سود مشتریان در هر گروه با نرخ تشویقی و PEM رابطه مستقیمی دارد (بیشترین مقدار پاداش پرداخت شده به مشتریان مربوط به سناریو (۱۰) و برابر ۷۵۱۶۶ دلار است).

هنگامی که مقدار تشویق پرداختی افزایش یابد، مقدار بار در ساعات پیک کاهش می‌یابد که موجب کاهش قیمت سوخت در تمام روز می‌شود. از سوی دیگر میزان تشویق کل که توسط ISO پرداخت، به‌عنوان یک ترم اضافی ( $C_{EDRP}$ ) به هزینه کل اضافه می‌شود (رابطه ۱۷). بنابراین، تعیین نرخ تشویق بهینه توسط ISO یک امر ضروری است. مقدار نرخ تشویق بهینه برای تمام گروه‌ها محاسبه و نتایج در آخرین سطر مربوط به هر گروه آورده شده است. ملاحظه می‌شود که در تمام سناریوها، مقدار تلفات کل کاهش می‌یابد. همچنین تمام مشخصات منحنی بار مربوط به هر سه گروه بهبود یافته‌اند. پس از اجرای EDRP، منحنی بار به‌ازای مقادیر بهینه نرخ تشویق (جدول ۶) برای تمام گروه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱ و همان‌طور که در قبل اشاره شد، بار در ساعات پیک کاهش یافته و به ساعات کم‌باری و میان‌باری انتقال می‌یابد.

سناریو ۱: حالت پایه بدون اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار.

سناریو ۲ تا ۴: گروه اول با PEM برابر با  $E$  مانند جدول ۴ با پاداش‌های به‌ترتیب ۱۰ و ۱۴ (\$/MWh).

سناریو ۵ تا ۷: گروه دوم با PEM برابر با  $0.5 \times E$  با پاداش‌های به‌ترتیب ۱۰ و ۱۴ (\$/MWh).

سناریو ۸ تا ۱۰: گروه سوم با PEM برابر با  $2 \times E$  با پاداش‌های به‌ترتیب ۱۰ و ۱۴ (\$/MWh).

#### ۵-۲-۲ مورد مطالعاتی دوم: تلفیق مسئله DEED مبتنی بر قیمت سوخت-آلودگی و برنامه بهینه EDRP

در این مورد مطالعاتی، اثرات اجرای EDRP بر قیمت سوخت و آلودگی کل مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین باید یک نوع مصالحه بین هزینه سوخت و آلودگی انجام شود. در این قسمت میزان تأثیر هر دو پارامتر برابر در نظر گرفته شده است. لذا  $W_{FC}$  و  $W_{EC}$  هر دو در مقدار  $0.5$  تنظیم شده‌اند. با توجه به شرایط مختلف عملکرد سیستم، می‌توان مقادیر متفاوتی را برای ضرایب وزنی در نظر گرفت.

جدول ۴: الاستیسیته قیمت

دوره	پیک‌بار	میان‌باری	کم‌باری
[۱-۵]	۰/۰۱۲	۰/۰۱	-۰/۱
[۶-۹], [۱۵-۱۹]	۰/۰۱۶	-۰/۱	۰/۰۱
[۲۰-۲۴], [۱۰-۱۴]	-۰/۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲

جدول ۵: معرفی سناریوهای مورد مطالعاتی سوم

روش حل	نرخ تشویق (\$/MWh)	الاستیسیته قیمت	شماره سناریو
ABC	حالت پایه	حالت پایه	۱
HS			۲
ICA			۳
RDPSO			۴
ABC	مقدار بهینه نرخ تشویق در مورد مطالعاتی دوم	مطابق جدول ۴	۵
HS			۶
ICA			۷
RDPSO			۸

برای نشان دادن تأثیر اجرای برنامه EDRP بر روی منحنی بار، برخی از فاکتورها به‌صورتی که در ادامه آمده است، تعریف می‌شوند. برای ارزیابی میزان صاف بودن منحنی بار، ضریب بار مطابق رابطه (۳۱) تعریف شده است. در حالت ایده‌آل، مقدار این ضریب  $100\%$  است؛ بدین معنی که در تمامی ساعات عملکرد سیستم، مقدار بار تقاضا ثابت بوده و در طول روز تغییری نمی‌کند.

$$Load - factor\% = 100 \times \left( \frac{\sum_{t=1}^T d(t)}{T \times d^{max}(t)} \right) \quad (31)$$

شاخص‌های مهم دیگر در اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار عبارت‌اند از: درصد اختلاف پیک و دره، نسبت جبران پیک و نسبت جبران اختلاف پیک و دره که در روابط (۳۲)-(۳۴) معرفی شده‌اند.

$$Peak - to - valley\% = 100 \times \left( \frac{d^{max}(t) - d^{min}(t)}{d^{max}(t)} \right) \quad (32)$$

$$Peak - compensate\% = 100 \times \left( \frac{d_0^{max}(t) - d^{max}(t)}{d_0^{max}(t)} \right) \quad (33)$$

$$Deviation - of - peak - to - valley\% = 100 \times \left( 1 - \frac{d^{max}(t) - d^{min}(t)}{d_0^{max}(t) - d_0^{min}(t)} \right) \quad (34)$$

#### ۵-۲-۱ مورد مطالعاتی اول: تلفیق مسئله DEED مبتنی بر قیمت سوخت و برنامه بهینه EDRP

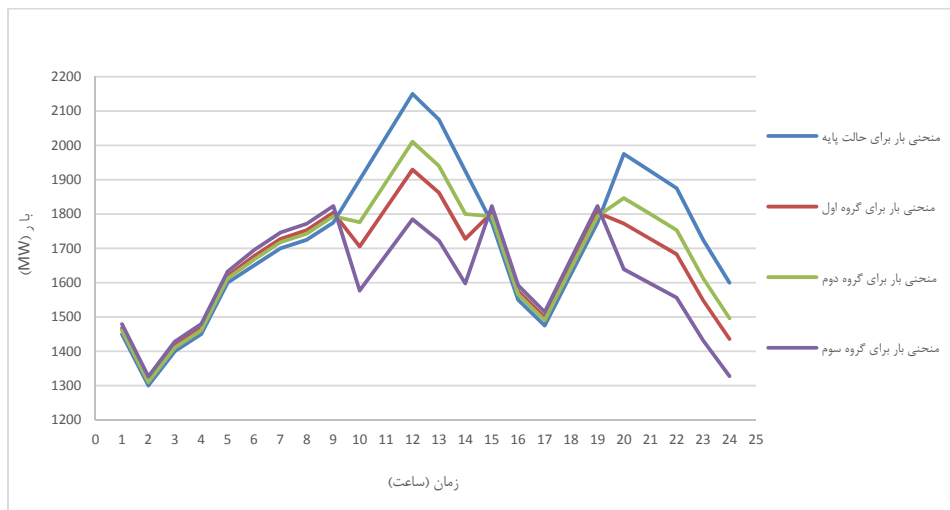
در این مورد مطالعاتی، اثرات اجرای EDRP روی قیمت کل سوخت مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر این اساس، مقادیر  $W_{FC}$  و  $W_{EC}$  به‌ترتیب یک و صفر در نظر گرفته شده‌اند. نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است. با

جدول ۶: مقایسه قیمت کل برای سناریوهای مورد مطالعاتی اول

سناریو	شماره گروه	نرخ بهینه تشویق (\$/MWh)	هزینه تولید واحدها (\$)	پاداش کل (\$)	هزینه کل (\$)	تلفات توان کل (MW)	ضریب بار	درصد اختلاف پیک و دره	نسبت جبران پیک	نسبت جبران و دره
۱	حالت پایه	—	۱۰۷۹۱۳۳/۵۵۸۱	—	۱۰۷۹۱۳۳/۵۵۸۱	۱۴۷۴/۰	۸۰/۲۸	۳۹/۵۳	—	—
۲	اول	—	۱۰۵۴۲۹۸/۷۹۲۸	۶۹۰۳/۰۰	۱۰۶۱۲۰۱/۷۹۲۸	۱۴۰۲/۳	۸۳/۴۴	۳۵/۲۱	۶/۰۰	۱۶/۲۸
۳			۱۰۴۰۹۱۹/۲۳۷۹	۱۹۱۷۵/۰۰	۱۰۶۰۰۹۴/۲۳۷۹	۱۳۴۸/۸	۸۵/۷۸	۳۲/۰۱	۱۰/۰۰	۲۷/۱۳
۴			۱۰۲۶۵۹۶/۵۸۱۱	۳۷۵۸۳/۰۰	۱۰۶۴۱۷۹/۵۸۱۱	۱۳۰۶/۴	۸۸/۳۳	۲۸/۵۱	۱۴/۰۰	۳۷/۹۸
بهینه			۱۰/۲۵	۱۰۳۸۴۲۳/۲۴۸۰	۲۰۱۴۵/۷۳	۱۰۵۸۵۶۸/۹۸۲۴	۱۳۶۰/۱	۸۵/۹۳	۳۱/۸۰	۱۰/۲۵
۵	دوم	—	۱۰۶۶۰۴۵/۸۸۸۳	۳۴۵۱/۵۰	۱۰۶۹۴۹۷/۳۸۸۳	۱۴۲۸/۳	۸۱/۸۱	۳۷/۴۴	۳/۰۰	۸/۱۴
۶			۱۰۵۸۹۷۳/۶۱۲۴	۹۵۸۷/۵۰	۱۰۶۸۵۶۱/۱۱۲۴	۱۴۲۱/۳	۸۲/۸۸	۳۵/۹۷	۵/۰۰	۱۳/۵۶
۷			۱۰۵۲۸۳۲/۴۶۰۸	۱۸۷۹۱/۵۰	۱۰۷۱۶۲۳/۹۶۰۸	۱۳۶۳/۱	۸۴/۰۰	۳۴/۴۴	۷/۰۰	۱۸/۹۹
بهینه			۱۳	۱۰۵۲۱۴۹/۵۷۹۶	۱۶۲۰۲/۸۷	۱۰۶۸۳۵۲/۴۵۴۶	۱۳۸۸/۹	۸۳/۷۲	۳۴/۸۳	۶/۵۰
۸	سوم	—	۱۰۳۳۳۲۳/۳۲۴۷	۱۳۸۰۶/۰۰	۱۰۴۷۱۲۹/۳۲۴۷	۱۳۲۸/۶	۸۷/۰۲	۳۰/۳۰	۱۲/۰۰	۳۲/۵۵
۹			۱۰۰۳۰۲۸/۶۷۹۴	۳۸۲۵۰/۰۰	۱۰۴۱۳۷۸/۶۷۹۴	۱۲۳۷/۶	۸۶/۹۹	۳۰/۱۲	۱۴/۸۰	۳۵/۰۸
۱۰			۹۸۲۱۹۹/۹۸۹۸	۷۵۱۶۶/۰۰	۱۰۵۷۳۶۵/۹۸۹۸	۱۱۶۸/۶	۸۳/۰۷	۳۷/۸۸	۱۳/۷۴	۱۷/۳۵
بهینه			۸/۵	۱۰۱۲۳۴۰/۹۵۳۲	۲۷۷۰۷/۸۷	۱۰۴۰۰۴۸/۸۲۸۲	۱۲۷۴/۱	۸۸/۴۹	۲۷/۲۴	۱۵/۱۹

جهت مشاهده تأثیر اجرای تلفیقی برنامه‌های DEED و EDRP در برآورده کردن قید ذخیره چرخان، مقادیر  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  و  $\Delta t_3$  برای حالت پایه و حالت بهینه گروه اول جدول ۷ محاسبه و در شکل ۲ آورده شده‌اند. با توجه به شکل ۲، هر سه قید دارای مقادیر بزرگ‌تر از صفر هستند. همچنین مشاهده می‌شود که با اجرای برنامه EDRP، در ساعات پیک بار مقادیر مذکور بزرگ‌تر از حالت پایه هستند. توان خروجی بهینه تمام واحدها برای حالت پایه و حالت بهینه گروه اول از جدول ۷ محاسبه و در پیوست نشان داده شده‌اند.

نتایج در جدول ۷ نشان شده است. نتایج به‌ازای مقادیر بهینه نرخ تشویق برای تمام گروه‌ها محاسبه شده و در سطر آخر هر گروه قرار گرفته است. مقدار تابع هدف برای هر گروه در جدول ۷ دارای مقدار کمتری نسبت به سناریوهای با نرخ تشویق ثابت هستند. مقدار تابع هدف برای مشتریان گروه سوم کاهش بیشتری داشته است. این موضوع به این دلیل است که مشتریان این گروه دارای حساسیت بالاتری (PEM بزرگ‌تر) هستند و بنابراین تمایل بیشتری به کاهش بار خود در ساعات پیک و با انتقال آن به ساعات کم‌باری یا میان‌باری دارند. همچنین با توجه به جدول ۸، خصوصیات منحنی بار به‌ازای مقادیر بهینه تشویق بهبود یافته است.



شکل ۱: تأثیر اجرای برنامه برای تمام گروه‌ها روی پروفیل بار در مورد مطالعاتی اول

جدول ۷: مقایسه قیمت سوخت و آلودگی برای سناریوهای مورد مطالعاتی دوم

شماره سناریو	شماره گروه	نرخ بهینه تشویق (\$/MWh)	هزینه تولید واحدها (\$)	آلودگی (lb)	پاداش کل (\$)	تابع هدف	تلفات توان کل (MW)
۱	حالت پایه	—	۱۰۸۸۹۶۱/۴۸۶۹	۳۸۰۵۹۱/۶۶۵۷	—	۹۲۶۱۲۴/۲۱۸۳	۱۴۵۴/۱۱۰۲
۲	اول	—	۱۰۶۶۶۸۹/۷۶۵۵	۳۵۴۴۵/۱۷۹۹	۶۹۰۳/۰۰	۸۹۶۴۲/۷۷۱۰	۱۳۸۰/۴۶۹۵
۳			۱۰۵۰۷۴۳/۸۰۷۹	۳۳۵۲۲/۷۶۲۶	۱۹۱۵۷/۰۰	۸۸۳۳۶۶/۵۳۵۵	۱۳۳۰/۱۱۲۰
۴			۱۰۳۴۲۹۳/۹۴۶۸	۳۲۰۶۲۰/۳۰۸	۳۷۵۸۳/۰۰	۸۷۶۳۴۴/۳۴۲۵	۱۲۸۳/۱۲۳۸
بهینه			۱۴/۵	۱۰۳۵۰۲۰/۷۲۶۲	۳۱۵۱۲۸/۲۶۶۴	۴۰۳۱۵/۴۴	۸۷۵۶۱۳/۰۴۷۷
۵	دوم	—	۱۰۷۸۳۹۶/۴۹۵۲	۳۸۳۳۵۲/۲۸۳۲	۳۴۵۱/۵۰	۹۱۷۵۰۸/۲۷۰۴	۱۴۲۱/۲۱۲۳
۶			۱۰۷۲۷۵۱/۷۷۴۴	۳۵۷۷۱۰/۲۲۳۵	۹۵۸۷/۵۰	۹۰۴۹۳۱/۰۴۹۴	۱۳۹۰/۹۱۷۹
۷			۱۰۶۳۹۳۹/۰۶۵۲	۳۵۳۵۶۰/۹۳۸۲	۱۸۷۹۱/۵۰	۸۹۸۴۰۵/۶۵۲۹	۱۳۷۱/۰۲۰۲
بهینه			۲۴	۱۰۴۴۷۷۴/۹۱۲۹	۳۴۰۸۹۳/۵۰۳۸	۵۵۲۲۴/۰۰	۸۹۳۴۱۸/۳۹۵۸
۸	سوم	—	۱۰۴۵۲۸۲/۸۳۶۲	۳۱۸۰۲۳/۰۷۵۶	۱۳۸۰۶/۰۰	۸۷۲۰۰۸/۷۴۲۷	۱۳۰۳/۷۸۶۶
۹			۱۰۱۳۹۴۷/۱۴۲۳	۳۰۳۷۶۶/۷۱۴۰	۳۸۳۵۰/۰۰	۸۵۵۶۸۸/۶۶۹۷	۱۲۱۹/۴۴۴۱
۱۰			۹۸۸۷۹۸/۷۶۴۳	۳۰۵۲۸۵/۸۸۹۰	۷۵۱۶۶/۰۰	۸۵۵۷۹۳/۰۲۷۴	۱۱۵۶/۰۹۵۸
بهینه			۱۱/۷۵	۱۰۰۳۲۵۴/۴۴۴۰	۳۰۲۴۶۹/۹۹۸۸	۵۲۹۴۶/۹۷	۸۵۴۵۷۱/۳۵۸۲

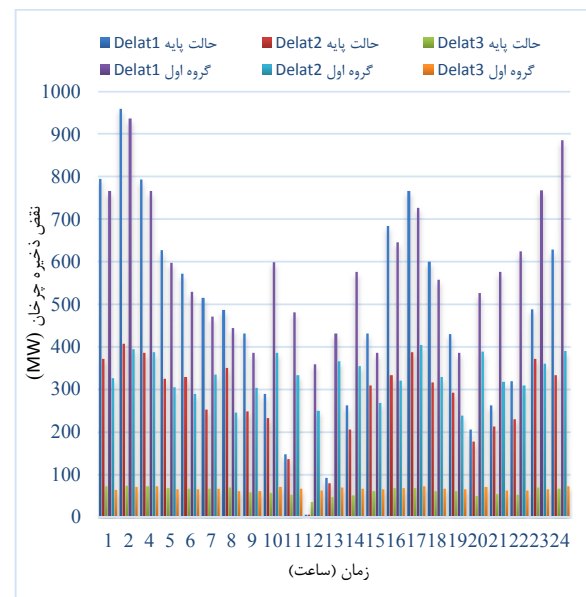
۵-۲-۳- مورد مطالعاتی سوم: تلفیق مسئله DEED مبتنی بر قیمت سوخت-آلودگی و برنامه بهینه EDRP، با در نظر گرفتن چهار روش بهینه‌سازی مختلف

در این قسمت برای اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در پاسخ‌گویی به مدل پیشنهادی و همچنین اطلاع از کارآمدی مدل پیشنهادی در خصوص کاهش هزینه سوخت و آلودگی، مسئله DEED-EDRP توسط چهار الگوریتم بهینه‌سازی مختلف پاسخ داده شده است. این مورد مطالعاتی مشابه مورد قبل است با این تفاوت که با توجه به این‌که در موارد مطالعاتی قبل، الگوریتم ICA برای حل مسئله بهینه‌سازی به کار برده شد، در این قسمت نتایج با استفاده از سه روش بهینه‌سازی دیگر محاسبه شده‌اند. این روش‌ها عبارتند از: ABC، RDPSO و HS. جهت اطلاعات بیشتر از الگوریتم‌های نامبرده در حل مسائل بهینه‌سازی، به ترتیب می‌توان به مراجع [۴]، [۲۵]، [۲۶] و [۲۷] مراجعه نمود.

نتایج در جدول ۹ نشان داده شده‌اند و برای سناریوهای (۵) تا (۸)، نرخ تشویق بهینه ۱۴/۵ در نظر گرفته شده که برابر با مقدار بهینه به دست آمده در جدول ۷ است. ملاحظه می‌شود که به‌زای هر چهار الگوریتم، اجرای برنامه DEED-EDRP باعث کاهش قیمت سوخت، آلودگی، تابع هدف کل و تلفات خطوط انتقال نسبت به حالت پایه متناظر شده است (به‌طور مثال برای الگوریتم ABC، کاهش تابع هدف با مقایسه سناریوهای ۱ و ۵ برابر ۵۱۷۶۹/۲۰۲۰ دلار است). بنابراین مدل ارائه شده دارای عملکرد موفق‌تری در کاهش قیمت سوخت و آلودگی است. همچنین در هر دو حالت اجرای برنامه DEED معمولی و DEED-EDRP، الگوریتم ICA با داشتن مقادیر تابع هدف به ترتیب ۹۲۶۱۲۴/۲۱۸۳ دلار و ۸۷۵۶۱۳/۰۴۷۷ دلار دارای عملکرد بهتری

جدول ۸: خصوصیات منحنی بار در مورد مطالعاتی دوم

شماره گروه	ضریب بار	درصد اختلاف پیک و دره	نسبت جبران پیک	نسبت جبران اختلاف پیک و دره
حالت پایه	۸۰/۲۸	۳۹/۵۳	—	—
اول	۸۸/۶۷	۲۸/۰۵	۱۴/۵۰	۳۹/۳۴
دوم	۸۷/۰۲	۳۰/۳۰	۱۲/۰۰	۳۲/۵۵
سوم	۸۵/۲۶	۳۳/۵۴	۱۴/۳۴	۲۷/۳۲



شکل ۲: برآورده کردن قید ذخیره چرخان سیستم ده واحدی در مورد مطالعاتی دوم

نقطه-دریچه، نواحی عملکرد ممنوعه و ذخیره چرخان در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. مدل پیشنهادی DEED-EDRP دارای یک سری مزایا شامل کاهش هزینه سوخت و آلودگی، تعیین مقدار تشویق بهینه و بهبود شاخص‌های منحنی بار شامل ضریب بار و شاخص‌های درصد اختلاف پیک و دره، نسبت جبران پیک و نسبت جبران اختلاف پیک و دره است. برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بر اساس ماتریس الاستیسته قیمت توسعه داده شده که در واقع یکی از روش‌های قدرتمند مدل‌سازی بار در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. برای نشان دادن مزیت‌های واقعی مدل پیشنهادی، نتایج برای یک سیستم آزمایشی ده ژنراتوری در قالب سه مورد مطالعاتی مختلف بررسی شده است. تأثیرات مربوط به تغییر PEM و مقدار تشویق مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شد اگر چنانچه مقدار تشویق بهینه به درستی مشخص نشود، ممکن است باعث تحمیل هزینه‌های اضافی در سمت تولید شود. در آخرین مورد مطالعاتی، مدل ارائه‌شده توسط چند الگوریتم فرا ابتکاری پرکاربرد و قدرتمند، پاسخ داده شده است. در این مقاله برخی از قیدهای مسئله DEED مانند قید فرکانس، محدودیت حداکثر آلودگی و قید حداکثر جریان جاری در خطوط در نظر گرفته نشده است که بررسی این شرایط می‌تواند به‌عنوان پیشنهادی برای کار آینده محسوب شود.

نسبت به سایر روش‌ها بوده و پس از آن به ترتیب الگوریتم‌های ABC و RDPSO دارای پاسخ بهتری بوده و نهایتاً الگوریتم HS دارای ضعیف‌ترین عملکرد بوده است.

**جدول ۹: مقایسه هزینه سوخت و آلودگی برای سناریوهای مختلف مورد مطالعاتی سوم**

شماره سناریو	هزینه تولید واحدها (\$)	آلودگی (lb)	تابع هدف
۱	۱۰۸۹۷۷۰/۵۵۷۸	۳۸۰۸۲۲/۰۱۸۶	۹۲۸۶۲۰/۷۸۰۳
۲	۱۰۸۸۹۷۱/۳۴۴۸	۳۸۵۲۷۸/۶۹۹۴	۹۳۱۲۹۵/۶۱۷۹
۳	۱۰۸۸۹۶۱/۴۸۶۹	۳۸۰۵۹۱/۶۶۵۷	۹۲۶۱۲۴/۲۱۸۳
۴	۱۰۸۹۴۸۷/۹۶۱۹	۳۷۵۶۵۴/۷۸۸۷	۹۲۹۱۱۳/۵۹۷۹
۵	۱۰۳۶۷۸۴/۷۱۸۹	۳۱۷۹۸۰/۱۴۳۷	۸۷۶۸۵۱/۵۷۸۳
۶	۱۰۳۵۰۶۸/۴۶۰۹	۳۲۹۰۶۵/۵۰۴۶	۸۸۱۲۴۴/۶۲۴۶
۷	۱۰۳۵۰۲۰/۷۲۶۲	۳۱۵۱۲۸/۲۶۶۴	۸۷۵۶۱۳/۰۴۷۷
۸	۱۰۳۵۶۴۳/۶۲۰۹	۳۰۵۲۱۴/۴۶۱۰	۸۷۷۴۲۶/۰۲۸۱

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله DEED به‌صورت تلفیقی با EDRP جهت کمیته‌سازی هزینه سوخت و آلودگی و تعیین هم‌زمان نرخ تشویق بهینه، بررسی شده است. برخی از قیدهای واقعی عملکرد سیستم نظیر اثر

### پیوست

**پیوست ۱: بهترین توزیع بار محاسبه‌شده برای حالت پایه در مورد مطالعاتی دوم**

بار (MW)	P <sub>1</sub> (MW)	P <sub>2</sub> (MW)	P <sub>3</sub> (MW)	P <sub>4</sub> (MW)	P <sub>5</sub> (MW)	P <sub>6</sub> (MW)	P <sub>7</sub> (MW)	P <sub>8</sub> (MW)	P <sub>9</sub> (MW)	P <sub>10</sub> (MW)
۱	۲۲۸/۵۷۶۰	۳۲۳/۶۹۱۸	۲۰۹/۹۹۵۰	۱۵۸/۴۱۹۱	۱۲۵/۹۰۴۱	۱۱۵/۴۹۳۵	۱۲۰/۶۰۷۲	۱۰۸/۴۹۹۹	۷۰/۴۸۷۲	۱۹/۲۶۲۳
۲	۳۰۸/۵۷۶۰	۲۷۷/۳۳۷۹	۱۲۹/۹۹۵۰	۱۳۱/۵۳۹۰	۸۵/۹۰۴۱	۱۱۰/۴۰۱۹	۱۱۵/۶۱۸۸	۷۸/۴۹۹۹	۵۲/۰۶۲۹	۴۴/۲۶۸۶
۳	۲۶۸/۸۰۷۳	۲۸۱/۱۷۹۹	۲۰۹/۹۹۵۰	۱۴۰/۷۶۶۲	۱۲۵/۹۰۴۱	۱۰۵/۱۱۸۸	۸۵/۶۱۸۸	۸۹/۱۳۲۰	۷۳/۴۳۷۰	۴۸/۵۶۳۷
۴	۲۹۵/۱۷۴۱	۳۶۱/۱۷۹۹	۲۲۴/۹۶۶۳	۱۲۳/۷۷۵۹	۸۵/۹۰۴۱	۱۱۱/۵۹۱۲	۱۱۵/۶۱۸۸	۶۴/۹۷۹۹	۷۴/۱۹۵۳	۳۵/۶۲۰۲
۵	۳۷۵/۱۷۴۱	۲۸۱/۱۷۹۹	۲۵۳/۰۰۹۳	۱۳۷/۲۳۸۲	۱۲۵/۹۰۴۱	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۱۷۲۹	۷۹/۴۶۵۷	۷۰/۰۰۰۰	۴۹/۳۲۹۳
۶	۲۹۵/۱۷۴۱	۳۶۱/۱۷۹۹	۲۶۰/۰۳۰۱	۱۳۶/۱۸۳۷	۱۸۵/۹۰۴۱	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۸۲/۰۱۶۹	۷۰/۰۰۰۰	۴۳/۵۴۵۱
۷	۲۹۸/۳۵۷۶	۳۸۵/۹۰۹۹	۱۹۲/۶۶۶۴	۱۴۶/۴۱۸۴	۲۲۸/۳۱۰۶	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۲۱/۸۷۹۳	۱۱۲/۰۱۶۹	۷۰/۰۰۰۰	۴۶/۹۱۹۶
۸	۳۷۸/۳۵۷۶	۳۶۶/۷۰۰۱	۲۷۲/۶۶۶۴	۱۵۵/۵۱۶۰	۱۸۸/۲۵۰۹	۱۰۶/۳۱۷۱	۱۱۵/۰۰۰۰	۸۲/۰۱۶۹	۷۰/۲۵۵۶	۵۰/۶۷۱۰
۹	۲۹۸/۳۵۷۶	۳۸۵/۹۱۳۰	۲۷۲/۰۴۳۴	۱۶۹/۰۹۰۶	۲۲۸/۲۵۰۹	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۷۸/۷۸۹۲	۷۰/۰۰۰۰	۵۵/۰۰۰۰
۱۰	۳۷۸/۳۵۷۶	۳۹۰/۴۰۴۵	۳۰۶/۶۳۴۳	۲۱۹/۰۹۰۶	۲۴۳/۰۰۰۰	۱۱۶/۴۶۵۵	۸۵/۰۰۰۰	۱۰۸/۷۸۹۲	۷۱/۷۱۹۷	۵۳/۵۱۰۹
۱۱	۴۳۳/۴۲۲۳	۳۹۰/۰۸۱۰	۳۳۷/۶۹۷۸	۲۸۵/۰۰۰۰	۱۹۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۷۸/۷۸۹۲	۷۰/۰۰۰۰	۵۰/۲۵۱۸
۱۲	۴۱۷/۱۱۳۳	۴۴۷/۷۲۶۲	۳۴۰/۰۰۰۰	۲۸۵/۰۰۰۰	۲۴۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۲۲/۰۹۱۲	۱۰۸/۷۸۹۲	۷۰/۰۰۰۰	۵۰/۰۰۰۰
۱۳	۴۲۸/۵۷۰۹	۳۶۷/۷۵۳۱	۳۲۵/۳۲۱۱	۲۹۵/۲۵۸۳	۲۴۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۱۰۶/۱۶۲۶	۷۰/۳۱۵۵	۵۵/۰۰۰۰
۱۴	۳۴۸/۵۷۰۹	۴۰۱/۸۶۷۸	۳۴۰/۰۰۰۰	۲۴۹/۳۵۰۲	۱۹۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۴۹۰۳	۷۶/۱۶۲۶	۷۳/۲۹۳۲	۴۶/۳۹۵۰
۱۵	۳۶۲/۳۵۳۸	۳۶۹/۴۳۲۰	۲۶۰/۵۲۸۳	۲۱۶/۵۸۲۶	۱۵۷/۷۳۸۶	۱۵۵/۰۰۰۰	۸۵/۴۹۰۳	۱۰۶/۱۶۲۶	۷۰/۰۰۰۰	۵۵/۰۰۰۰
۱۶	۲۸۲/۳۵۳۸	۳۱۸/۶۳۶۴	۱۸۰/۵۳۸۳	۱۶۶/۵۸۲۶	۲۰۷/۷۳۸۶	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۴۴۲	۷۷/۳۸۰۶	۴۴/۶۳۰۰	۴۹/۰۶۷۷
۱۷	۲۴۶/۸۴۴۳	۳۷۰/۰۲۲۸	۱۸۸/۵۴۵۷	۱۳۴/۷۸۷۵	۱۵۷/۷۳۸۶	۱۰۷/۷۰۷۷	۱۱۵/۷۹۴۱	۹۲/۷۴۵۳	۴۹/۷۱۹۸	۵۴/۵۶۸۵
۱۸	۳۲۶/۸۴۴۳	۲۹۰/۰۲۲۸	۲۶۸/۵۴۵۷	۱۶۴/۷۹۰۷	۱۶۲/۲۱۴۵	۱۵۶/۶۲۵۹	۸۵/۷۹۴۱	۹۵/۱۶۳۶	۷۲/۰۰۶۷	۵۵/۰۰۰۰

ادامه پیوست ۱: بهترین توزیع بار محاسبه شده برای حالت پایه در مورد مطالعاتی دوم

ساعت	بار (MW)	P <sub>1</sub> (MW)	P <sub>2</sub> (MW)	P <sub>3</sub> (MW)	P <sub>4</sub> (MW)	P <sub>5</sub> (MW)	P <sub>6</sub> (MW)	P <sub>7</sub> (MW)	P <sub>8</sub> (MW)	P <sub>9</sub> (MW)	P <sub>10</sub> (MW)
۱۹	۱۷۷۵	۳۹۳/۲۲۴۱	۳۷۰/۰۲۲۸	۱۹۲/۶۴۵۸	۲۱۴/۷۹۰۷	۲۰۷/۴۱۶۶	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۶۵۲۳	۶۵/۱۶۳۶	۷۰/۰۰۰۰	۵۵/۰۰۰۰
۲۰	۱۹۷۵	۴۱۱/۴۹۲۵	۳۸۰/۴۱۸۴	۲۳۱/۷۹۴۱	۲۸۵/۰۰۰۰	۲۴۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۹/۴۸۷۷	۹۵/۱۶۳۶	۷۷/۱۱۷۸	۵۵/۰۰۰۰
۲۱	۱۹۲۵	۳۵۷/۵۴۷۱	۳۹۷/۸۵۹۸	۳۱۱/۷۹۴۱	۲۴۲/۹۰۱۴	۱۹۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۹۴۵۶	۸۹/۴۸۷۷	۱۲۰/۰۰۰۰	۷۷/۴۸۲۴	۵۳/۱۰۸۷
۲۲	۱۸۷۵	۳۹۶/۱۳۰۶	۳۱۷/۸۵۹۸	۲۳۵/۸۳۴۴	۲۸۵/۰۰۰۰	۲۴۳/۰۰۰۰	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۹/۴۸۷۷	۹۰/۰۰۰۰	۴۷/۴۸۲۴	۵۵/۰۰۰۰
۲۳	۱۷۲۵	۳۳۴/۷۶۶۰	۳۴۲/۷۴۶۶	۲۵۲/۰۲۲۹	۲۳۵/۰۰۰۰	۱۹۹/۵۶۸۸	۱۱۴/۰۱۰۲	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۰/۴۷۷۳	۵۲/۶۰۷۳	۴۷/۸۵۰۴
۲۴	۱۶۰۰	۳۱۴/۶۶۴۵	۲۷۳/۴۲۲۷	۲۰۱/۷۲۵۸	۲۱۲/۱۳۰۸	۱۹۹/۵۸۲۲	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۸/۹۴۵۹	۷۲/۶۸۸۰	۵۱/۱۳۱۴	۵۰/۴۳۳۶

پیوست ۲: بهترین توزیع بار محاسبه شده برای گروه اول در مورد مطالعاتی دوم

ساعت	بار (MW)	P <sub>1</sub> (MW)	P <sub>2</sub> (MW)	P <sub>3</sub> (MW)	P <sub>4</sub> (MW)	P <sub>5</sub> (MW)	P <sub>6</sub> (MW)	P <sub>7</sub> (MW)	P <sub>8</sub> (MW)	P <sub>9</sub> (MW)	P <sub>10</sub> (MW)
۱	۱۴۷۵/۲۳	۲۹۶/۳۴۲۱	۳۲۳/۱۲۶۹	۱۶۸/۹۴۲۳	۱۶۲/۸۲۷۵	۱۱۲/۵۴۲۵	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۵۹/۹۲۷۸	۷۰/۰۰۰۰	۵۴/۸۶۹۱
۲	۱۳۲۲/۶۲	۲۳۳/۳۶۱۹	۲۴۳/۱۲۶۹	۱۸۳/۰۵۴۵	۱۵۴/۸۶۵۰	۱۲۸/۲۸۳۷	۱۰۵/۰۰۰۰	۱۱۷/۵۵۰۱	۸۴/۶۱۹۳	۵۴/۲۳۲۸	۵۲/۰۹۷۲
۳	۱۴۲۴/۳۶	۲۵۸/۶۷۵۰	۲۹۳/۹۵۰۱	۱۷۳/۷۶۶۷	۱۳۴/۳۱۵۷	۱۳۹/۹۶۱۱	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۲۶۰۶	۷۱/۰۵۲۱	۷۰/۳۹۵۶	۵۱/۵۵۴۱
۴	۱۴۷۵/۲۳	۳۳۸/۶۷۵۰	۲۸۱/۰۱۳۷	۲۵۳/۷۶۶۷	۱۳۹/۵۵۲۵	۱۳۱/۶۵۵۲	۱۱۰/۹۲۶۰	۸۵/۲۶۰۶	۵۵/۷۴۳۴	۷۴/۲۷۸۱	۴۸/۳۰۹۴
۵	۱۶۲۷/۸۴	۳۴۸/۷۰۰۷	۲۵۸/۷۷۹۰	۲۷۱/۱۲۸۰	۱۳۷/۶۱۶۶	۱۸۱/۶۵۵۲	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۲۶۰۶	۸۵/۶۶۷۵	۷۷/۰۰۲۷	۴۹/۲۸۴۸
۶	۱۶۸۸/۲۸	۳۰۷/۶۰۶۵	۳۳۸/۷۷۹۰	۲۸۸/۴۰۲۱	۱۴۹/۳۸۲۴	۲۱۶/۱۴۵۱	۱۱۴/۶۴۸۶	۸۵/۲۶۰۶	۱۱۵/۶۶۷۵	۷۵/۴۶۵۵	۵۳/۵۲۰۳
۷	۱۳۷۹/۴۴	۳۸۷/۶۰۶۵	۳۶۰/۲۴۰۷	۲۴۸/۱۵۹۱	۱۵۷/۸۵۱۷	۲۱۲/۲۸۴۸	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۲۶۰۶	۸۵/۶۶۷۵	۴۵/۴۶۵۵	۳۳/۱۴۳۷
۸	۱۷۶۵/۰۲	۳۱۱/۱۰۷۲	۳۴۶/۲۲۴۵	۲۰۵/۳۱۰۸	۲۸۵/۰۰۰۰	۱۶۲/۲۸۴۸	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۲۴/۴۴۵۰	۱۰۹/۷۸۳۹	۷۱/۹۲۶۹	۵۵/۰۰۰۰
۹	۱۸۱۶/۱۸	۳۸۰/۰۷۰۶	۳۲۳/۲۸۵۸	۲۶۱/۷۸۷۵	۲۳۵/۰۸۷۹	۱۹۵/۴۲۴۲	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۱/۰۲۱۷	۷۰/۰۰۰۰	۵۵/۰۰۰۰
۱۰	۱۶۲۴/۵۰	۳۲۶/۱۸۵۳	۳۵۰/۶۸۰۸	۲۶۳/۶۶۴۵	۲۲۱/۷۳۷۸	۱۴۵/۴۲۴۲	۱۰۵/۰۰۰۰	۸۵/۰۰۰۰	۶۵/۲۶۴۲	۷۰/۸۸۰۲	۴۳/۸۲۱۷
۱۱	۱۷۳۱/۳۷	۳۳۸/۸۲۱۰	۳۱۵/۹۳۹۹	۲۳۷/۱۰۰۸	۲۴۴/۵۷۰۶	۱۹۵/۴۲۴۲	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۲/۸۲۷۷	۴۵/۸۳۶۴	۴۹/۶۶۹۴
۱۲	۱۸۳۸/۲۵	۴۱۸/۸۲۱۰	۳۲۴/۱۶۸۲	۲۴۲/۹۹۰۸	۲۵۴/۹۱۱۸	۲۲۹/۸۴۴۶	۱۵۵/۰۰۰۰	۸۵/۰۰۰۰	۶۷/۸۷۶۲	۷۵/۸۳۶۴	۵۱/۹۹۹۴
۱۳	۱۷۷۴/۱۲	۳۷۵/۷۹۹۰	۳۸۶/۵۸۰۳	۲۴۲/۸۵۴۲	۲۲۹/۱۲۴۱	۱۷۹/۸۴۴۶	۱۱۴/۵۱۹۷	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۷/۸۷۶۲	۵۰/۷۱۰۴	۴۵/۶۶۵۴
۱۴	۱۶۴۵/۸۷	۳۰۱/۸۶۹۸	۳۶۲/۷۰۶۸	۲۰۵/۲۴۱۵	۲۲۶/۱۷۰۳	۲۰۸/۷۸۲۳	۱۵۵/۰۰۰۰	۸۵/۰۰۰۰	۶۷/۸۷۶۲	۵۳/۴۲۹۹	۳۳/۵۱۷۸
۱۵	۱۸۱۶/۱۸	۳۸۱/۸۶۹۸	۲۸۲/۷۰۶۸	۲۸۵/۲۴۱۵	۲۳۷/۴۵۴۹	۲۲۶/۲۰۸۴	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۷/۸۷۶۲	۴۹/۹۴۸۸	۴۹/۷۹۲۸
۱۶	۱۵۸۵/۹۶	۳۰۷/۶۲۷۶	۲۰۹/۵۱۳۴	۲۰۵/۲۴۱۵	۲۵۴/۸۸۹۵	۱۷۶/۲۰۸۴	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۱/۸۲۲۰	۷۳/۷۴۸۰	۴۴/۹۵۲۳
۱۷	۱۵۰۹/۲۲	۳۸۷/۶۲۷۶	۲۸۹/۵۱۳۴	۱۷۳/۸۶۸۶	۲۱۶/۸۴۳۸	۱۲۶/۲۰۸۴	۱۱۶/۳۸۷۴	۸۵/۰۰۰۰	۶۱/۹۰۶۸	۵۱/۳۳۴۵	۴۷/۱۹۶۷
۱۸	۱۶۶۲/۷۰	۳۰۷/۶۲۷۶	۳۶۹/۵۱۳۴	۲۴۸/۲۸۵۸	۱۶۶/۸۴۳۸	۱۷۶/۲۰۸۴	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۶۶/۳۸۴۸	۷۲/۵۴۰۰	۴۰/۳۵۹۷
۱۹	۱۸۱۶/۱۸	۳۶۶/۴۲۵۸	۲۸۹/۵۱۳۴	۳۰۱/۷۴۰۸	۲۱۶/۸۴۳۸	۲۲۶/۲۰۸۴	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۹۰/۴۶۱۵	۷۰/۰۳۴۷	۴۹/۷۵۲۶
۲۰	۱۶۸۸/۶۲	۳۸۴/۶۲۱۰	۳۶۹/۵۱۳۴	۲۵۹/۶۷۰۸	۱۶۶/۸۴۳۸	۱۷۶/۲۰۸۴	۱۰۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۷۳/۶۴۸۵	۵۰/۳۲۷۴	۴۶/۲۷۴۱
۲۱	۱۶۴۵/۸۷	۳۱۴/۳۰۶۹	۳۵۳/۶۳۳۰	۲۰۵/۳۲۱۶	۲۱۶/۸۴۳۸	۱۲۶/۲۰۸۴	۱۵۵/۰۰۰۰	۱۱۵/۰۰۰۰	۸۸/۳۶۹۰	۷۰/۰۰۰۰	۵۵/۰۰۰۰
۲۲	۱۶۰۳/۱۲	۳۱۴/۹۱۲۸	۲۷۳/۶۳۳۰	۲۸۵/۳۲۱۶	۱۶۶/۸۴۳۸	۱۶۳/۲۰۸۱	۱۵۵/۰۰۰۰	۸۵/۰۰۰۰	۸۴/۵۰۹۴	۷۰/۰۴۸۰	۵۵/۰۰۰۰
۲۳	۱۴۷۴/۸۷	۲۳۴/۹۱۲۸	۳۵۳/۶۳۳۰	۲۰۵/۳۲۱۶	۱۳۷/۸۸۱۳	۱۷۱/۷۳۶۰	۱۵۹/۱۰۳۹	۸۶/۱۳۷۱	۶۶/۷۶۸۰	۵۲/۸۸۳۵	۴۹/۳۹۵۹
۲۴	۱۳۶۸/۰۰	۲۷۸/۲۲۵۶	۲۷۳/۶۳۳۰	۱۸۴/۸۸۳۰	۱۶۳/۳۲۰۲	۱۲۱/۷۳۶۰	۱۱۹/۱۰۸۳	۵۶/۱۳۷۱	۹۳/۴۱۹۴	۷۰/۰۰۰۰	۴۴/۴۶۰۴

effects,” *Electric Power Systems Research*, vol. 103, pp. 192-200, 2013.

- [3] M. Basu, “Dynamic economic emission dispatch using non-dominated sorting genetic algorithm-II,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, pp. 140-149, 2008.
- [4] B. Mohammadi-ivatloo, A. Rabiee, A. Soroudi, and M. Ehsan, “Imperialist competitive algorithm for solving non-convex dynamic economic power dispatch,” *Energy*, vol. 44, pp. 228-240, 2012.
- [5] T. Niknam, and F. Golestaneh, “Enhanced adaptive particle swarm optimization algorithm for dynamic

مراجعه

- [1] D. He, G. Dong, F. Wang, and Z. Mao, “Optimization of dynamic economic dispatch with valve-point effect using chaotic sequence based differential evolution algorithms,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 1026-1032, 2011.
- [2] A.M. Elaiw, X. Xia, and A.M. Shehata, “Hybrid DE-SQP and hybrid PSO-SQP methods for solving dynamic economic emission dispatch problem with valve-point

- Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1786-1795, 2011.
- [17] A. Ashfaq, S. Yingyun, and A.Z. Khan, "Optimization of economic dispatch problem integrated with stochastic demand side response," *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, pp. 116-121, 2014.
- [18] N.I. Nwulu, and X. Xia, "Multi-objective dynamic economic emission dispatch of electric power generation integrated with game theory based demand response programs," *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 963-974, 2015.
- [19] S. Yousefi, M.P. Moghaddam, and V.J. Majd, "Optimal real-time pricing in an agent-based retail market using a comprehensive demand response model," *Energy*, vol. 36, pp. 5716-5727, 2011.
- [20] H.A. Aalami, M.P. Moghaddam, and G.R. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible /curtail-able loads and capacity market programs," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 243-250, 2010.
- [21] G. Cailian, L. Li, Z. Tieyan, and Z. Yang, "Demand response model and impact studies based on bidirectional interactive of information and electrical energy," *China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-6, 2012.
- [22] FERC, Staff Report, *Assessment of Demand Response and Advanced Metering*, Available at: <http://www.ferc.gov/>, Dec. 2008.
- [23] P.S. Nasab, M. Parastegari, and M. Moallem, "Adopting artificial bee colony algorithm to optimize inductively coupled contactless power transmission systems for EV charging," *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 43, no.2, pp. 9-20, 2013.
- [24] M. Nikzad, and B. Mozafari, "Reliability assessment of incentive- and priced-based demand response programs in restructured power systems," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 56, pp. 83-96, 2014.
- [25] G.P. Dixit, H.M. Dubey, M. Pandit, and B.K. Panigrahi, "Artificial bee colony optimization for combined economic load and emission dispatch," *International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON)*, pp. 340-345, 2011.
- [26] J. Sun, V. Palade, X.J. Wu, W. Fang, and Z. Wang, "Solving the power economic dispatch problem with generator constraints by random drift particle swarm optimization," *IEEE Transactions On Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 222-232, 2014.
- [27] S. Sivasubramani, and K.S. Swarup, "Environmental/economic dispatch using multi-objective harmony search algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1778-1785, 2011.
- economic dispatch of units considering valve point effects and ramp rates," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 6, no. 5, pp. 424-435, 2013.
- [6] T. Niknam, R.A. Abarghoee, and J. Aghaei, "A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch," *IEEE Power Systems Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 749-763, 2013.
- [7] D.N. Jayakumar, and P. Venkatesh, "Glowworm swarm optimization algorithm with topics for solving multiple objective environmental economic dispatch problem," *Applied Soft Computing*, vol. 23, pp. 375-386, 2014.
- [8] K. Bhattacharjee, A. Bhattacharya, and S. Halder-nee Dey, "Solution of economic emission load dispatch problems of power systems by real coded chemical reaction algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 59, pp. 176-187, 2014.
- [9] N. Pandit, A. Tripathi, S. Tapaswi, and M. Pandit, "θ-multi-objective teaching-learning-based optimization algorithm for dynamic economic emission dispatch," *IEEE Systems Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 341-352, 2012.
- [10] C.X. Guo, J.P. Zhan, and Q.H. Wu, "Dynamic economic emission dispatch based on group search optimizer with multiple producers," *Electric Power Systems Research*, vol. 86, pp. 8-16, 2012.
- [11] R. Arul, S. Velusami, and G. Ravi, "Self-adaptive differential harmony search algorithm to solve dynamic economic dispatch problem with emission and security constraints," *IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, pp. 32-37, 2014.
- [12] T. Niknam, R. Azizipanah-Abarghoee, M. Zare, and B. Bahmani Firouzi, "Reserve constrained dynamic environmental/economic dispatch: a new multi-objective self-adaptive learning bat algorithm," *IEEE Systems Journal*, pp. 763-776, 2013.
- [13] R. Hooshmand, M. Parastegari, and M.J. Morshed, "Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using the hybrid bacterial Foraging-Nelder-Mead algorithm," *Applied Energy*, vol. 89, pp. 443-453, 2012.
- [14] E. Afzalan, M. Joorabian, "Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using epsilon-multi-objective genetic algorithm variable," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 52, pp. 55-67, 2013.
- [15] M. Ziaii, A. Kazemi, M. Fotuhi Firuzabad, and M. Parvania, "Demand response provision via domestic air conditioner direct load control by the retailers," *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 27-38, 2013.
- [16] Y. Chen, and J. Li, "Comparison of security constrained economic dispatch formulations to incorporate reliability standards on demand response resources into Midwest ISO co-optimized energy and ancillary service market,"

## زیر نویس ها

<sup>8</sup> Regional transmission organizations<sup>9</sup> Price elasticity matrix<sup>10</sup> Self-Elasticity<sup>11</sup> Cross-Elasticity<sup>12</sup> Kron's loss formula<sup>13</sup> Static economic dispatch<sup>1</sup> Dynamic economic emission dispatch<sup>2</sup> Emergency Demand Response Program<sup>3</sup> Dynamic economic dispatch<sup>4</sup> Ramp-Rate<sup>5</sup> Static economic emission dispatch<sup>6</sup> Demand Response Programs<sup>7</sup> Independent system operators