اجرای برنامه همزمان مشارکت واحدها با قید امنیت و پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) بهینه با استفاده از مدل‌سازی اقتصادی

محسن کیا[۱]، مهرداد ستایش نظر[۲]، محمدصادق سپاسیان[۳]، رضا اعتماد[۴]، محمدصادق قاضی‌زاده[۵]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۲/۰۵/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۲/۰۸/۱۰

کلمات کلیدی:
الاستیسیته بار، پاسخ‌گویی بار اضطراری، مدل اقتصادی، مدیریت سمت بار، مشارکت واحدها با قید امنیت

چکیده:

استفاده از برنامه‌های مدیریت مصرف برق (Demand Side Management) یکی از روش‌های حفظ منافع مشترک جامعه، شرکت‌های برق و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی است. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (Demand Response) در برگیرنده روش‌هایی از برنامه‌های مدیریت مصرف برق است که به تغییر میزان مصرف در اثر تغییر در بازار اطلاق می‌شود. یکی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار که بر مبنای پرداخت تشویقی به مصرف کنندگان می‌باشد، برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (Emergency Demand Response Programming) است. در این مقاله، به اجرای همزمان دو برنامه مشارکت واحدها با قید امنیت (Secutity Constraint Unit Commitment) و برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) بهینه پرداخته شده است ضمن اینکه نسبت به پارامترهای مؤثر در برنامه EDRP، تحلیل حساسیت ارائه شده و نتایج بدست آمده مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به اینکه اجرای همزمان مسأله مشارکت واحدها و برنامه پاسخ‌گویی بار یک مسأله پیچیده غیرخطی با متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشد، با استفاده از روش‌های خطی‌سازی از تکنیک برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح (Mix Integer Linear Programming) استفاده شده است. برای اجرای بهینه‌سازی از نرم‌افزار GAMS 23.6 استفاده شده که نرم‌افزار بسیار قوی در امر بهینه‌سازی می‌باشد. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ شین استاندارد IEEE-RTS اجرا شده و نتایج در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۱) دانشجوی دکتری ـ پردیس فنی شهید عباسپور-دانشگاه شهید بهشتی- (نویسنده مسئول) mohsenkia80@gmail.com
۲) استادیار ـ پردیس فنی شهید عباسپور-دانشگاه شهید بهشتی msnazar@pwut.ac.ir
۳) استادیار ـ پردیس فنی شهید عباسپور-دانشگاه شهید بهشتی sepasian@pwut.ac
۴) دانشجوی دکتری ـ پردیس فنی شهید عباسپور-دانشگاه شهید بهشتی re.etemad@gmail.com
۵) استادیار ـ پردیس فنی شهید عباسپور-دانشگاه شهید بهشتی ghazizadeh@pwut.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

مقدمه

مدیریت سمت تقاضا در سال ۱۹۸۰ توسط موسسه EPRI[1] معرفی شده است. مدیریت سمت تقاضا (DSM[2]) شامل مجموعه فعالیت‌هایی می‌شود که توسط دولت جهت تغییر مقدار یا زمان مصرف انرژی به منظور نیل به مزایای رفاه اجتماعی انجام می‌پذیرد. در واقع مدیریت سمت تقاضا تعریف کلی برای فعالیت‌هایی مانند مدیریت بار، بهره‌وری انرژی، ذخیره انرژی و ... می‌باشد [۵]. وقوع پدیده تجدید ساختار و مقررات‌زدایی در صنعت برق موجب به وجود آمدن اصطلاحاتی مانند پاسخ‌گویی بار (DR[3]) گردیده است. در دهه اخیر پیشرفت‌های زیادی در تحقیقات و پیاده‌سازی برنامه پاسخ‌گویی بار رخ داده است [۷]، [۹]، [۱۲]، [۱۵] و [۱۶]. طبق تعریف سازمان انرژی (DOE[4]) پاسخ‌گویی بار به تغییر در مصرف انرژی الکتریکی توسط مصرف‌کنندگان از مقدار عادی مصرفشان در پاسخ به تغییر در قیمت برق در طی زمان و یا دریافت هزینه-های تشویقی تعیین شده برای کاهش مصرف، در ساعاتی که قیمت برق در بازار بالا بوده و یا قابلیت اطمینان سیستم در خطر باشد، گفته می‌شود [۱۷]. به طور کلی هدف از پاسخ‌گویی بار کاهش مصرف برق در ساعات بحرانی می‌باشد. ساعات بحرانی ساعاتی هستند که در آن‌ها قیمت بازار عمده فروشی بسیار بالا بوده و یا به علت وقوع پیشامدهای اتفاقی سطح ذخیره سیستم پایین می‌باشد. در [۴] مدل برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری و برنامه قیمت زمان استفاده پیاده‌سازی شده که در آن از مدل بار تک و چند بازه‌ای بر پایه مفهوم الاستیسیته بار استفاده شده است؛ در این مرجع روش پیشنهادی بر روی شبکه برق ایران پیاده‌سازی شده و نشان داده شده که تقاضا و منحنی بار در اثر اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار به صورت مناسبی تغییر خواهد کرد ولی به برنامه‌ریزی تولید پرداخته نشده است. در [۱۸] طراحی پاسخ‌گویی بار اضطراری برای بهبود امنیت سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با ذکر این نکته که پاسخ‌گویی بار نقش اساسی در شبکه هوشمند دارا می‌باشد که بیان می‌کند مقدار، موقعیت و سرعت کاهش بار در برنامه پاسخ‌گویی بار توسط امنیت و بهره‌وری سیستم قدرت تعیین می‌گردد. در این مقاله، برنامه پاسخ‌گویی بار به منظور مصون نمودن سیستم در برابر فروپاشی ولتاژ مورد استفاده قرار گرفته است و تابع هدف مسأله بهینه‌سازی حداقل‌سازی هزینه با حفظ رزرو بهره‌برداری در سطح مورد انتظار بوده است. در این مقاله روش بهینه‌سازی چند مرحله‌ای برای حل مسأله بهینه‌سازی غیر خطی به کار گرفته شده است. در این روش، مسأله غیرخطی به دسته‌ای از مسائل خطی تقسیم شده و در چندین مرحله حل می‌گردد. در [۱۱] به بررسی ترکیب تولید در صورت وجود پاسخ‌گویی بار کوتاه مدت و نفوذ مزارع بادی پرداخته شده است. در این مقاله برای تنظیم میزان تقاضا در پاسخ به تغییرات قیمت از الاستیسیته استفاده شده است. این مقاله نشان می‌دهد که پاسخ‌گویی بار موجب پیک‌سایی و انتقال بار به نقاط دره در منحنی بار می‌گردد؛ که در این مقاله به طور خاص به نوعی از پاسخ‌گویی بار

1) Electrical Power Research Institute
2) Demand Side Management
3) Demand Response
4) Department Of Energy

[Downloaded from ...ournals.ir on 2026-06-11]

پرداخته نشده است. در [۱۴] به بررسی تأثیر حضور سمت تقاضا در بازار برق کوتاه مدت کشور اسپانیا پرداخته شده است. در این مقاله با بیان این‌که منابع پاسخ‌گویی بار یکی از بهترین منابع جهت بهبود بهره‌وری در بازار برق می‌باشد، به بررسی پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است. پاسخ‌گویی بار اجازه می‌دهد که مصرف‌کنندکان در ساعات کم‌باری به علت قیمت کم برق به خرید انرژی بپردازند و در ساعات پیک مصرف و قیمت گران برق تقاضای خود را کاهش دهند. پیاده‌سازی روش پیشنهاد شده در مقاله نشان داده که مصرف‌کنندگان می‌توانند با حضور فعالانه در بازار برق به کسب سود بپردازند.

با توجه به اینکه برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) و برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با قید امنیت (SCUC) هر دو در افق زمانی برنامه‌ریزی روز-بعد قرار دارند، لذا بررسی این دو برنامه در کنار هم و به طور همزمان مورد اهمیت است. لذا در این مقاله به اجرای همزمان دو برنامه‌ی مشارکت واحدها با قید امنیت (SCUC) و برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) بهینه پرداخته می‌شود؛ برای این مسئله یک فرمولاسیون خطی پیشنهاد شده که با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح (MILP) و نرم‌افزار تجاری GAMS بهینه‌سازی اجرا شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ شین استاندارد IEEE-RTS پیاده‌سازی شده و نتایج در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

تکنیک برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح (MILP[1])

صورت کلی مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} \min imize\ f(x,y) \\ s.t.\ g(x,y) \subseteq 0 \\ \quad h(x,y) = 0 \\ \quad x \in \Re^n \\ \quad y \in Z^m \end{cases} \qquad (۱)$$

در رابطه نشان داده شده، g(x,y) و h(x,y) توابع معینی از بردارهای x و y می‌باشند و پارامترهای m و n اعداد صحیح مثبت بوده و Z مجموعه اعداد صحیح را نشان می‌دهد. به طور کلی دو دلیل اصلی برای استفاده از اعداد صحیح در مدل-سازی مسائل با برنامه‌ریزی خطی بیان می‌گردد:

- اعداد صحیح نشان‌دهنده متغیرهایی باشند که تنها می‌توانند مقادیر صحیح داشته باشند. به عنوان مثال ساخت ۳/۷ عدد ماشین امکان‌پذیر نمی‌باشد و تعداد ماشین‌های ساخته شده باید عدد صحیح باشد، یعنی یا ۳ ماشین یا ۴ ماشین.

1) Mixed Integer Linear Programming

[Downloaded from ...ournals.ir on 2026-06-11]

- اعداد صحیح نشان‌دهنده متغیر تصمیم‌گیری باشند، لذا تنها مقادیر ۰ و ۱ را می‌توانند داشته باشند. در بهینه‌سازی این مقاله فقط از این نوع عدد صحیح که متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهنده‌ی وضعیت بوده استفاده شده است.

در حل مسائل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح وجود توابع غیرخطی مانند ضرب دو متغیر، یا اعمال توابع غیرخطی بر روی یک متغیر مجاز نبوده و برای این منظور باید توابع غیرخطی را با استفاده از روش‌های خطی‌سازی به توابع خطی تبدیل نمود که در این مقاله از خطی سازی برای تابع هزینه‌ی واحدهای تولید و همچنین هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ-گویی بار اضطراری با مدل اقتصادی استفاده شده است.

لازم به ذکر است که در حل مسائل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح می‌توان از روش‌های ابتکاری نیز استفاده نمود؛ استفاده از روش‌های ابتکاری برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح معمولاً نسبت به روش‌های ریاضی زمان‌برتر بوده و ممکن است که با توجه به محدودیت تکرارها به جواب بهینه کلی نرسند، ولی در حل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح جواب حاصله، بهینه‌ی کل می‌باشد. با توجه به توضیحات بیان شده در این مقاله از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده شده و مسأله برای این منظور فرموله شده است.

مدیریت سمت بار

در سیستم‌های سنتی برنامه‌های مدیریت مصرف به منظور فائق آمدن بر برخی مشکلات سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گرفت. در این بین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نیز به عنوان بخشی از این برنامه‌ها مطرح بود. اما پس از تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، این برنامه‌ها به دلیل عدم تطابق‌هایی که با ماهیت بازار داشت، رفته رفته کنار گذاشته شدند؛ پس از مدتی به علت مشکلاتی که به وجود آمد، مانند متغیر بودن قیمت‌ها، اجرای مجدد برنامه‌های مدیریت مصرف مورد توجه قرار گرفت. اجرای برنامه مدیریت مصرف با تغییراتی با ساختار مدیریت سیستم قدرت تجدید ساختار یافته هماهنگ شدند. پس از تجدید ساختار سیستم قدرت، برنامه پاسخ‌گویی بار بخش عمده‌ای از مدیریت مصرف را تشکیل می‌دهد. مدیریت سمت تقاضا مفهومی در فعالیت‌های بازار برق می‌باشد که از آن می‌توان جهت اصلاح نحوه مصرف و همچنین ایجاد تغییرات مورد نظر در شکل بار، به منظور افزایش رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان استفاده نمود. تغییر مناسب منحنی بار موجب کاهش قیمت برق و افزایش قابلیت اطمینان می‌گردد [۲].

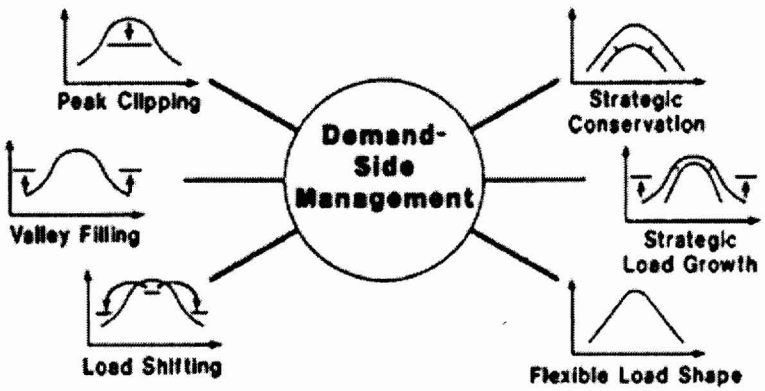
نیاز روز افزون دنیا به ویژه کشورهای صنعتی به منابع انرژی که هم‌زمان با کاهش توان تولید کشورهای صاحب ذخایر منابع فسیلی همراه شده است، نگرانی هر چه بیشتر جهان در مورد عرضه‌ی انرژی را برانگیخته است. راه‌حل‌های مدیریت سمت تقاضا به عنوان راه‌کاری برای کاهش مصرف انرژی به کار گرفته شده‌اند، اما با وقوع تجدید ساختار در صنعت برق این راه‌کارها دچار تغییراتی شدند. تشکیل بازار برق و تجدید ساختار در صنعت برق، اهداف مدیریت مصرف را

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

نیز دچار دگرگونی‌هایی ساخت و شکل جدیدی از برنامه‌های مدیریت سمت بار به وجود آمد. تأکید اصلی برنامه های مدیریت سمت بار در محیط بازار برق، پاسخ‌گوی مشترک به تغییرات قیمت برق می‌باشد [۱].

در پایان ذکر این نکته ضروری است که حضور مشترک در بازار و استفاده از روش‌های مدیریت مصرف مطابق عملیات بازار علاوه بر این‌که منجر به مصرف بهینه‌ی انرژی الکتریکی می‌شود، حالت رقابتی بازار را نیز حفظ می‌نماید و در ضمن تأثیرات مهمی نیز در کاهش قیمت برق در بازارهای الکتریکی دارد و قابلیت اطمینان شبکه را نیز بهبود می‌بخشد و همچنین به تسهیل فعالیت بازار کمک شایان توجهی می‌نماید [۳].

شکل (۱) استراتژی‌های مورد مصرف جهت مدیریت سمت تقاضا را نشان می‌دهد [۲]. منافع اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف به سه دسته عمده منافع مشترکین، منافع جامعه و منافع شرکت برق تقسیم می‌شوند [۱]. مدیریت بار که زیر مجموعه‌ی مدیریت تقاضا می‌باشد، شامل برنامه‌هایی است که برای کاهش پیک مصرف طراحی و اجرا می‌شوند. در واقع به برنامه‌هایی مانند پیک‌سایی، جابه‌جایی بار و ایجاد بار در زمان‌های غیر پیک اطلاق می‌شود.



شکل ۱) استراتژی‌های مورد مصرف جهت مدیریت سمت تقاضا

مدل اقتصادی برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)

در این برنامه به مصرف‌کنندگان بابت قطع یا کاهش بار در حوادث اضطراری و مواقعی که قابلیت اطمینان سیستم در خطر است، پاداش پرداخت می‌گردد. همچنین در این روش می‌توان جریمه‌ای برای شرکت‌کنندگان در صورت کم نکردن مصرفشان در مواقع اضطراری در نظر گرفت، اما به طور معمول مشارکت کاملاً اختیاری می‌باشد و به شرکت‌کنندگان در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری پاداشی پرداخت خواهد شد [۱۳].

بهره‌بردار مستقل شبکه با اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری به کمک اطلاعات قیمت و پیش‌بینی بار کوتاه مدت قصد دارد تا حدودی بار پیک شبکه را کاهش دهد. بهره‌بردار مستقل شبکه این کار را با پرداخت پاداشی به مشترکین جهت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

ایجاد انگیزه در آنان انجام می‌دهد. مصرف‌کنندگان بزرگی که مایلند مقداری یا همه بار خود را قطع کنند در این برنامه بطور داوطلبانه شرکت می‌کنند و همچنین مشترکینی که اقدام به کاهش بار خود نمی‌کنند از سوی بهره‌بردار شبکه جریمه نمی‌شوند.

در سال‌های اول تجدید ساختار در صنعت برق، عمده بازیگران بازار برق تولیدکنندگان مستقل توان، شرکت‌های منطقه‌ای خطوط انتقال و قانون‌گذاران بازار بودند و مصرف‌کنندگان کمترین مشارکت را در بازار داشتند. مصرف‌کنندگان از سود بازار بهره‌ای نداشتند و از اخبار آن مطلع نمی‌شدند. اما در حال حاضر قیمت برق به طور مستقیم از میزان تقاضا تأثیر می‌پذیرد و مشترکین، مصرف خود را با قیمت برق تنظیم می‌کنند. الاستیسیته عبارتست از حساسیت تقاضا نسبت به تغییرات قیمت [۱۳]:

$$\varepsilon = \frac{\partial DEM}{\partial \Pr ice} = \frac{\Pr ice_{old}}{DEM_{old}} \times \frac{d\,DEM}{d\,\Pr ice} \qquad (۱)$$

که در این رابطه میزان تقاضای اولیه $DEM_{old}(i)$ و قیمت اولیه انرژی $\Pr ice_{old}(i)$ می‌باشد. براساس تعریف فوق، الاستیسیته تقاضای بازه iام نسبت به بازه jام به صورت زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$\varepsilon(i,j) = \frac{\partial DEM(i)}{\partial \Pr ice(j)} = \frac{\Pr ice_{old}(j)}{DEM_{old}(i)} \times \frac{d\,DEM(i)}{d\,\Pr ice(j)} \qquad (۲)$$

الاستیسیته بیانگر نحوه تغییرات مصرف در بازه iام نسبت به تغییرات قیمت در بازه jام می‌باشد. هنگامی که در یک بازه قیمت افزایش می‌یابد، تمایل مصرف کنندگانِ به استفاده از انرژی در آن بازه کاهش یافته و از سوی دیگر مصرف-کنندگان تمایل دارند بار خود را در صورت امکان به ساعات و بازه‌های دیگر منتقل نمایند، لذا الاستیسیته خودی همواره منفی و الاستیسیته متقابل همواره مثبت می‌باشد [۴].

$$\varepsilon(i,i) = \frac{\Delta\,DEM(i)}{\Delta \Pr ice(i)} \subseteq 0$$
$$\varepsilon(i,j) = \frac{\Delta\,DEM(i)}{\Delta \Pr ice(i)} \subseteq 0 \qquad (۳)$$

در رابطه‌های بالا، $\varepsilon(i,i)$ الاستیسیته خودی، بیان‌گر تغییرات بار در پریود i به تغییرات قیمت در همان پریود می‌باشد و $\varepsilon(i,j)$ الاستیسیته متقابل، بیانگر تغییرات بار در پریود i به تغییرات قیمت در پریود j می‌باشد.

به‌دلیل ویژگی خاص انرژی الکتریکی، مصرف‌کنندگان کوچک به سختی به تغییرات قیمت آن پاسخ می‌دهند و از طرفی مصرف‌کنندگان صنعتی به منظور کاهش هزینه‌های خود تمایل به کاهش بار خود در هنگام پیک بار و افزایش

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

مصرف در هنگام کم‌باری و میان‌باری دارند. مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی هنگامی که با قیمت‌های گران انرژی الکتریکی در دوره پیک بار و قیمت‌های ارزان انرژی الکتریکی در زمان‌های کم‌باری مواجه می‌شوند، سعی می‌کنند مصرف خود را با قیمت انرژی الکتریکی تطبیق داده و بار خود را از ساعات گران قیمت به ساعات ارزان قیمت منتقل کنند. بنابراین تابع مازاد خالص مصرف کننده (NCS)[1] به صورت رابطه (۴) خواهد بود [۴].

$$NCS = \{(GCS(DEM_{new}(t))\} + \{(INCENT(t) \times DEM_{old}(t) - DEM_{new}(t))\} \quad (۴)$$

مقدار مازاد ناخالص مصرف کننده (GCS)[2] بیانگر درآمد مشترکین به دلیل تولید کالا در اثر مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد. حداکثر سود خالص مصرف‌کننده زمانی حاصل می‌شود که مشتق تابع سود خالص مصرف‌کننده نسبت به بار مصرفی صفر شود، که در رابطه (۵) نشان داده شده است [۴]:

$$\frac{\partial NCS}{\partial DEM_{new}(t)} = 0$$
$$\Rightarrow \frac{\partial NCS}{\partial DEM_{new}(t)} = \frac{\partial GCS(DEM_{new}(t))}{\partial DEM_{new}(t)} - \Pr ice(t) - INCENT(t) = 0 \quad (۵)$$
$$\Rightarrow \frac{\partial GCS(DEM_{new}(t))}{\partial DEM_{new}(t)} = \Pr ice(t) + INCENT(t)$$

عبارت مازاد ناخالص مصرف کننده معمولاً به صورت یک تابع درجه دوم از مقدار بار مصرفی در نظر گرفته می‌شود که در رابطه (۶) نشان داده شده است [۴]:

$$GCS(DEM_{new}(t)) = GCS(DEM_{old}(t)) + \Pr ice(t) \times (DEM_{new}(t) - DEM_{old}(t))$$
$$\times \left(1 + \frac{DEM_{new}(t) - DEM_{old}(t)}{2DEM_{old}(t) \times \sum_{t'=1}^{T} \varepsilon(t,t')}\right) \quad (۶)$$

در اینصورت با مشتق‌گیری از رابطه (۶) و جایگذاری در رابطه (۵) میزان بار مصرف‌کننده به صورت رابطه (۷) بدست خواهد آمد [۴]:

$$DEM_{new}(t) = DEM_{old}(t) \times \left(1 + \frac{INCENT(t) \times \sum_{t'=1}^{N_t} \varepsilon(t,t')}{\Pr ice(t)}\right) \quad (۷$$

1) Net Consumer Surplus
2) Gross Consumer Surplus

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

در این رابطه $DEM_{new}(t)$ و $DEM_{old}(t)$ بار مصرفی بعد و قبل از شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری و 't بازه مصرف که شامل سه بخش پیک بار، میان‌باری و کم باری است، می‌باشد.

هزینه‌ی اجرای برنامه پاسخ‌گویی‌بار اضطراری برای شرکت تولید (GenCo) به‌خاطر تغییرات قیمت انرژی الکتریکی و تغییرات بار شبکه می‌باشد. به عبارت دیگر این هزینه برابر با تغییرات درآمد GenCo می‌باشد که به صورت رابطه‌ی (۸) بدست می‌آید [۱۳]:

$$C_{EDRP}(t) = INCENT(t) \times (DEM_{old}(t) - DEM_{new}(t)) \quad (۸)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هزینه اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری تابع پارامترهایی همچون کشش تقاضا، میزان مصرف شبکه در دو حالت قبل و بعد از اجرای برنامه برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری می‌باشد.

با جایگذاری مقدار $DEM_{old}(t)$ در رابطه‌ی (۹) داریم:

$$C_{EDRP}(t) = INCENT^2(t) \times \left(\frac{\sum_{t'=1}^{N_1} \varepsilon(t,t')}{\mathrm{Price}(t)} \right) \quad (۹)$$

در صورتی که از رابطه فوق در مسأله بهینه‌سازی استفاده شود، مسأله به یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی ترکیبی با اعداد حقیقی تبدیل می‌گردد؛ جهت خطی‌سازی، تابع درجه دوم پاداش به صورت تکه‌ای خطی مدل می‌شوند [۱۳]. با استفاده از روابط فوق با تقریب بسیار خوبی می‌توان تابع درجه دوم فوق را به صورت خطی مدل کرد و هر چه تعداد تکه‌های خطی بیشتر باشد دقت جواب‌ها بهتر خواهد بود. از آن جا که تابع هزینه اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار، تابعی یکنوا (یکنوا صعودی) می‌باشد، لذا شیب نمودار همواره در حال افزایش است و از آن جهت میزانِ تشویقی در هر بخشِ تابع هزینه، پیش از بخش بعدی، به ماکزیمم حد خود می‌رسد و سپس بخش بعدی شروع به پر شدن می‌کند.

$$\begin{aligned} & INCENT_{seg}(t,seg) \subseteq INCENT_{\max}(t,seg) && \forall t, seg \\ & INCENT(t) = \sum_{seg=1}^{N_{seg}} INCENT_{seg}(t,seg) && \forall t \\ & INCENT^2(t) = \sum_{seg=1}^{N_{seg}} S_{INCENT} \times INCENT_{seg}(t,seg) && \forall t \end{aligned} \quad (۱۰)$$

فرمول‌بندی و ساختار پیشنهادی

در این مقاله مسأله اجرای بهینه همزمان برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری و مشارکت واحدها با در نظر گرفتن محدودیت توان عبوری خطوط انجام شده است. تابع هزینه مسأله‌ی بهینه‌سازی که در رابطه (۱۱) نشان داده شده، بیانگر

[Downloaded from journals.ir on 2026-06-11]

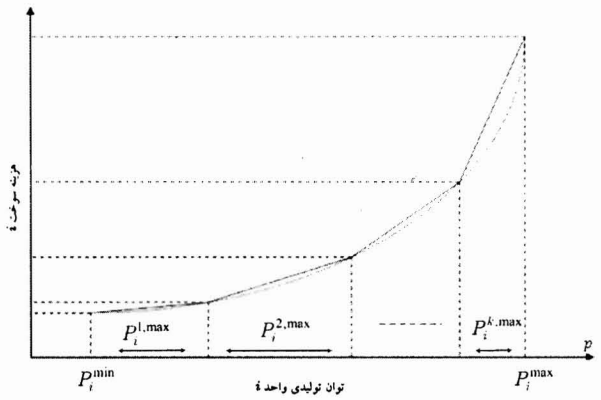
هزینه‌ی تولید انرژی، هزینه راه‌اندازی و هزینه‌ی خاموش شدن واحدها، هزینه‌ی برنامه‌ریزی ذخیره چرخشی بالارونده و پایین رونده و هزینه‌ی اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری می‌باشد.

$$\min Total\ Cost = \sum_{t=1}^{N_t} \left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_{i=1}^{N_g} F_i\left(P_{\min}(i,t)\right) \times I(i,t) + \sum_{seg=1}^{N_{seg}} S_g(i,t,seg) \times P(i,t,seg) \right) \\ + \alpha(i,t) \times STU(i,t) + \beta(i,t) \times STD(i,t) \\ + \sum_{j=1}^{N_d} \left(C_{EDRP}(j,t) \right) \end{array} \right\} \quad (۱۱)$$

در رابطه فوق همانطور که مشاهده می‌شود، هدف حداقل‌کردن هزینه کلی واحدهای تولید و بدست آوردن هزینه بهینه اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری می‌باشد. توابع هزینه واحدهای تولیدی غالباً غیرخطی می‌باشند و معمولاً با یک تابع درجه دوم تخمین زده می‌شوند:

$$F_1\left(P(i,t)\right) = a(i) \times P^2(i,t) + b(i) \times P(i,t) + c(i) \quad (۱۲)$$

در صورتی که از رابطه فوق در مسأله بهینه‌سازی استفاده شود، یک مسأله غیرخطی ترکیبی با اعداد حقیقی بـه دسـت می‌آید؛ جهت خطی‌سازی، توابع هزینه به صورت تکه‌ای خطی مدل می‌شوند که در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲) تابع هزینه سوخت تکه‌ای خطی شده

$$F_i\left(P(i,t)\right) = F_i\left(P_{g\min}(i,t)\right) \times I(i,t) + \sum_{seg=1}^{N_{seg}} S_g(i,t,seg) \times P(i,t,seg)$$
$$0 \le P(i,t,seg) \le P_{\max seg}(i,t,seg) \qquad \forall seg = 1,2,\ldots,N_{seg} \quad (۱۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

میزان توان تولیدی هر واحد توسط رابطه ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_g(i,t) = P_{g\min}(i,t) \times I(i,t) + \sum_{seg=1}^{N_{seg}} S(i,t,seg) \times P(i,t,seg) \qquad \forall i,t \tag{۱۴}$$

همانند تابع هزینه اجرای پاسخ‌گویی بار تابع هزینه پیشنهادی نیز تابعی یکنوا (یکنوا صعودی) می‌باشد و شیب نمودار همواره در حال افزایش است.

قیود اعمال شده در پیاده‌سازی روش پیشنهادی این مقاله را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- قید تعادل توان

$$\sum_{i=1}^{N_g} P(i,t) = \sum_{j=1}^{N_d} DEM_{new}(j,t) \qquad \forall t = 1,\ldots,N_t \tag{۱۵}$$

- حداقل و حداکثر توان تولیدی واحد

$$\begin{aligned} P_g(i,t) &\geq P_{g\min}(i,t) \times I(i,t) \qquad \forall i,t \\ P_g(i,t) &\leq P_{g\max}(i,t) \times I(i,t) \qquad \forall i,t \end{aligned} \tag{۱۶}$$

- حداقل زمان روشن بودن هر واحد

$$\left(I(i,t-1) - I(i,t) \times \left(X_{on}(i,t-1) - T_{ON\min}(i)\right)\right) > 0 \qquad \forall i,t \tag{۱۷}$$

- حداقل زمان خاموش بودن هر واحد

$$\left(I(i,t) - I(i,t-1)\right) \times \left(X_{off}(i,t-1) - T_{OFF\min}(i)\right) > 0 \qquad \forall\ i,t \tag{۱۸}$$

- محدودیت حداکثر شیب افزایشی هر واحد

$$P(i,t) - P(i,t-1) \leq \left(1-\alpha(i,t)\right) \times RAMP_{UP}(i) + \alpha(i,t) \times P_{g\min}(i) \qquad \forall i,t \tag{۱۹}$$

- محدودیت حداکثر شیب کاهشی هر واحد

$$P(i,t-1) - P(i,t) \leq \left(1-\beta(i,t)\right) \times RAMP_{DN}(i) + \beta(i,t) \times P_{g\min}(i) \qquad \forall i,t \tag{۲۰}$$

- قیود مربوط به وضعیت راه‌اندازی و خاموش‌شدن واحدها

$$\begin{aligned} \alpha(i,t) + \beta(i,t) &\leq 1 \qquad \forall i,t \\ \alpha(i,t) - \beta(i,t) &= I(i,t) - I(i,t-1) \qquad \forall i,t \end{aligned} \tag{۲۱}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

- محدودیت توان عبوری از خطوط

برای این منظور ابتدا توان عبوری خطوط با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{gB}} P_g(i,t) - \sum_{j=1}^{N_{dB}} DEM_{new}(j,t) = \sum_{l=1}^{N_{lB}} Line\ Flow(l,t) \qquad \forall B,t$$
$$Line\ Flow(l,t) = \frac{1}{X_{line}} \times \left(\delta_{send}(l-t) - \delta_{recieve}(l,t)\right) \qquad \forall l,t \tag{۲۲}$$

محدودیت توان عبوری خطوط به صورت زیر می‌باشد:

$$\left|LineFlow(l,t)\right| \le LineFlow_{\max}(l) \qquad \forall l,t \tag{۲۳}$$

با در نظر گرفتن قیود فوق در مسأله بهینه‌سازی و حداقل‌سازی تابع هدف، مقدار پاداش بهینه برای اجرای برنامه پاسخ-گویی بار اضطراری و مقدار توان تولیدی (مشارکت) واحدها بدست می‌آید.

شبیه‌سازی و مطالعه موردی

در این بخش به نتایج اجرای همزمان برنامه مشارکت واحدها و برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) که فرمولاسیون آن‌ها در قسمت‌های پیشین آمده، پرداخته شده است. در این مقاله برای اجرای بهینه‌سازی از نرم‌افزار GAMS 23.6 که نرم‌افزاری بسیار قوی در امر بهینه‌سازی می‌باشد، برای حل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح (MILP) استفاده شده است [۸]. یکی از روش‌های کارا در حل مسائل MILP، روش CPLEX می‌باشد که در این مقاله این روش مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. نتایج شبیه‌سازی‌های ارایه شده به وسیله‌ی یک دستگاه لپ‌تاپ مدل Dell Vostro1520 با مشخصات پردازشگر Core2duo (CPU) ۲/۲۰ و ۴ گیگابایت RAM اجرا شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ شین استاندارد IEEE RTS پیاده‌سازی شده است.

شبیه‌سازی شبکه ۲۴ شین استاندارد IEEE

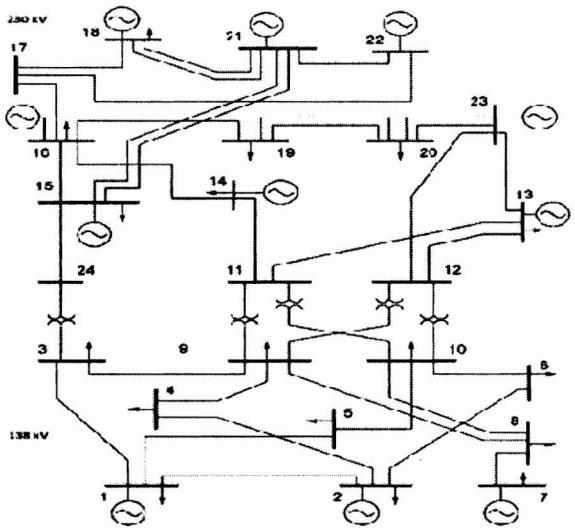
روش پیشنهاد شده در این مقاله بر روی شبکه‌ی ۲۴ شین IEEE RTS پیاده‌سازی شده که توپولوژی شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. تمامی اطلاعات مورد نیاز این شبکه مانند هزینه‌ی راه‌اندازی و هزینه‌ی خاموشی واحدها، محدوده‌ی مجاز توان تولیدی واحدها، شیب افزایشی و کاهشی توان تولیدی واحدها، حداقل زمان خاموش و روشن بودن واحدها و ... از مرجع [۱۰] گرفته شده است؛ تنها واحدهای حرارتی در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده و واحدهای آبی موجود در این شبکه لحاظ نشده است. بار ساعتی مورد استفاده متناسب با یک روز تابستان با بار پیک ۲۸۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. مدت زمان مورد مطالعه بصورت ۲۴ ساعته (یک شبانه روز) می‌باشد. فرض شده که پاسخ‌گویی بار اضطراری در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

تمامی شین‌های دارای مصرف‌کننده (۱۷ شین) پیاده‌سازی می‌شود. جدول (۱) اطلاعات مربوط به الاستیسیته خودی و متقابل شبکه‌ی ۲۴ شین IEEE RTS در سه دوره متفاوت را نشان می‌دهد.

جدول (۱) اطلاعات مربوط به الاستیسیته شبکه ۲٤ باسه

	کم‌باری ۰۱:۰۰ – ۰۹:۰۰	پیک ۱۰:۰۰ – ۱۸:۰۰	میان‌باری ۱۹:۰۰ – ۲٤:۰۰
کم‌باری	-۰/۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲
پیک	۰/۰۱۶	-۰/۱	۰/۰۱
میان‌باری	۰/۰۱۲	۰/۰۱	-۰/۱



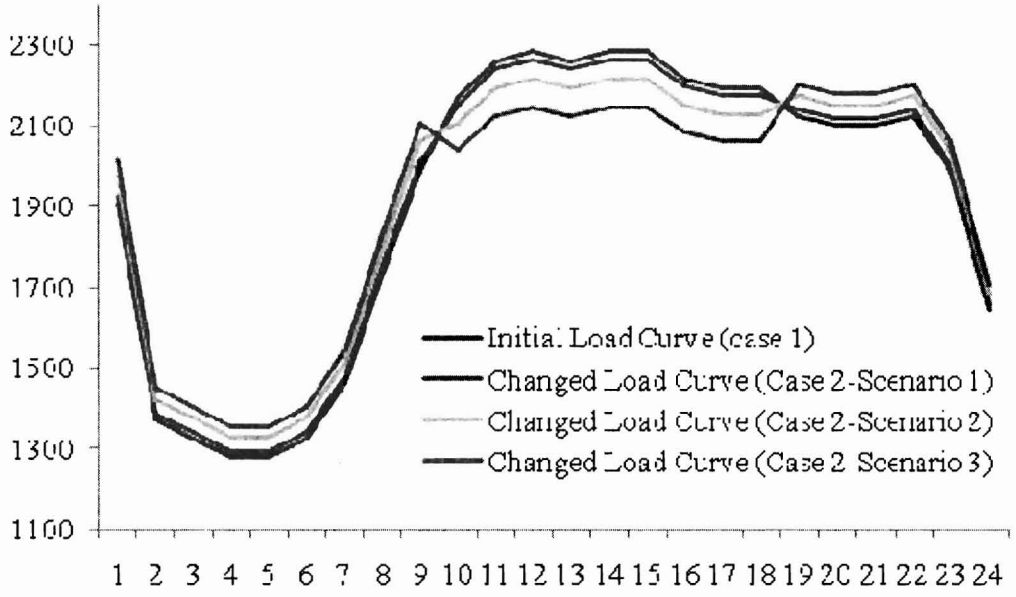
شکل ۳) دیاگرام شبکه ۲٤ شین استاندارد IEEE RTS

در شبیه‌سازی‌های فوق از ساعت ۱ تا ۹ کم‌باری، از ساعت ۱۰ تا ۱۸ پیک و از ساعت ۱۹ تا ۲۴ میان‌باری می‌باشد. هزینه انرژی در ساعات کم باری ۲۵ دلار بر مگاوات ساعت، در ساعات میان‌باری ۴۵ دلار بر مگاوات ساعت و در ساعات پیک ۷۵ دلار بر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است. شبکه ۲۴ شین IEEE RTS، ۲۴ شین، ۲۶ واحد تولید حرارتی، ۱۷ بار و ۳۸ خط انتقال را شامل می‌شود.

بیه‌سازی‌ها در دو حالت ارائه می‌شود، در حالت اول ابتدا برنامه مشارکت واحدها با قید امنیت بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری اجرا شده است؛ در حالت دوم برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری همزمان با برنامه‌ی مشارکت واحدهای تولید با قید امنیت با پتانسیل مشارکت‌های مختلف مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری اجرا می‌شود. مشارکت‌های مصرف‌کنندگان در سه سناریوی مختلف برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری با پتانسیل اجرای ۳۰٪ ،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

۵۰٪ و پتانسیل اجرای کامل (۱۰۰٪) مورد بررسی قرار گرفته است. پتانسیل اجرای ۳۰٪ به این معنی است که فرض شده که ۳۰٪ از مشترکین در برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری شرکت کرده‌اند. نتایج منحنی بار در شکل (۴) ارائه شده و همچنین نتایج مختلف این شبیه‌سازی بطور مختصر در جدول (۲) جدول آورده شده است.

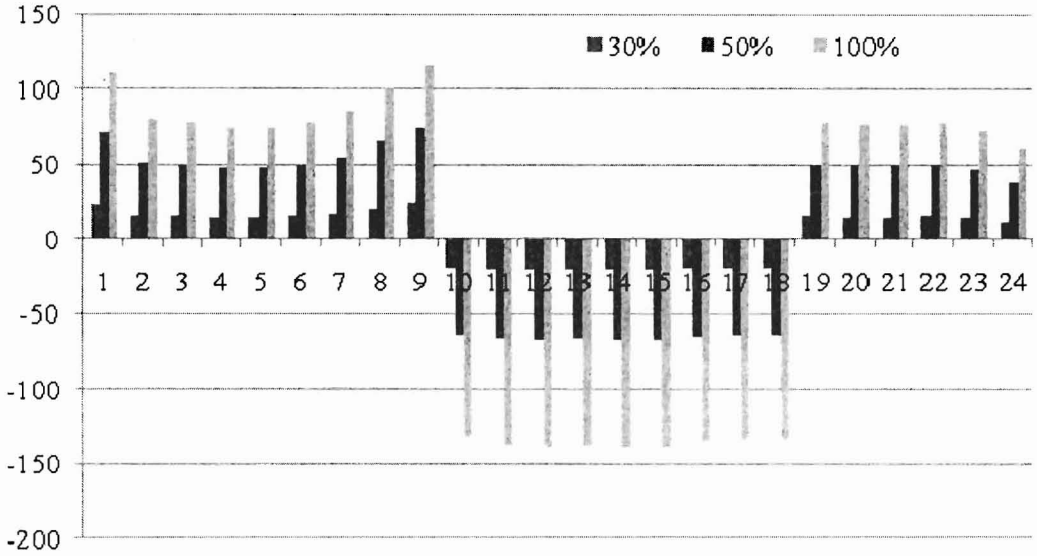


شکل ٤) منحنی بار اولیه و تغییر یافته برای شبکه ۲٤ شین IEEE-RTS با پتانسیل‌های مختلف اجرای پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)

در منحنی‌های شکل (۴) مشاهده می‌شود که در اثر افزایش پتانسیل مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، منحنی بار بهتر و صاف‌تری بدست آمده که یکی از دلایل مهم اجرای برنامه‌های مدیریت سمت بار می‌باشد. در جدول (۵) به برخی از دیگر نتایج این شبیه‌سازی‌ها اشاره شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری، هزینه‌ی بهره‌برداری کل کاهش می‌یابد و با افزایش پتانسیل مشارکت مشترکین این کاهش هزینه بیشتر شده است؛ به طوری که در حالت اول میزان هزینه‌ی کل بهره‌برداری برابر ۷۴۶۸۶۵/۹ دلار بوده و در حالت دوم به ازای پتانسیل اجرای کامل برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار، هزینه‌ی کل بهره‌برداری به ۷۳۲۷۱۴/۱ دلار کاهش یافته است که از این هزینه میزان ۴۰۶۷/۷ دلار سهم هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری شده است.

در شکل (۵) میزان بار تغییر یافته در ازای پتانسیل‌های مختلف اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری نمایش داده شده است؛ مشاهده می‌شود که در ازای افزایش پتانسیل اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، تغییرات میزان سطح بار در هر ساعت به دلیل افزایش مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخ‌گویی بار بیشتر شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل ۵) نمودار میزان بار تغییر یافته برای شبکه ٢٤ شین IEEE-RTS با پتانسیل‌های مختلف اجرای پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)

ضریب بار شاخصی است که به نوعی بیانگر صاف بودن منحنی بار است و از رابطه‌ی (۲۴) بدست می‌آید و در ایده‌آل‌ترین حالت مقدار این شاخص برابر ۱۰۰٪ است که بیانگر این است که در کل ساعات بهره‌برداری میزان بار ثابت بوده است؛ هر چه مقدار بار در ساعات مختلف متفاوت‌تر باشد و بین نقاط پیک و دره اختلاف بیشتری باشد این مقدار از مقدار ایده‌آل فاصله می‌گیرد. همانطور که در نتایج دیده می‌شود در ازای اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری میزان ضریب بار بهبود یافته است؛ با افزایش پتانسیل اجرای این برنامه، ضریب بار از میزان ۸۳/۷۱ درصد به میزان ۸۶/۸۶ درصد افزایش یافته که بیانگر صاف‌تر شدن منحنی بار در طول افق برنامه‌ریزی است.

$$Load\ Factor\% = 100 \times \left(\frac{\sum_{t=1}^{N_t} DEM(t)}{N_t \times \max\left(DEM(t)\right)} \right) \qquad (۱۴)$$

درصد اختلاف پیک و دره، نسبت جبران پیک و نسبت جبران اختلاف پیک و دره دیگر شاخص‌های مهم در اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار می‌باشند که از طریق روابط (۲۵)-(۲۷) بدست آمده‌اند؛ مشاهده می‌شود که با افزایش پتانسیل اجرای برنامه از ۳۰٪ به ۱۰۰٪ تمامی این شاخص‌ها بهبود یافته‌اند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

$$Peak\,to Valley = \left(\frac{\max(DEM(t)) - \min(DEM(t))}{\max(DEM(t))} \right) \quad (۲۵)$$

$$Peak\,Compensate\,\%100 \times \left(\frac{\max(DEM_{old}(t)) - \max(DEM_{new}(t))}{\max(DEM_{old}(t))} \right) \quad (۲۶)$$

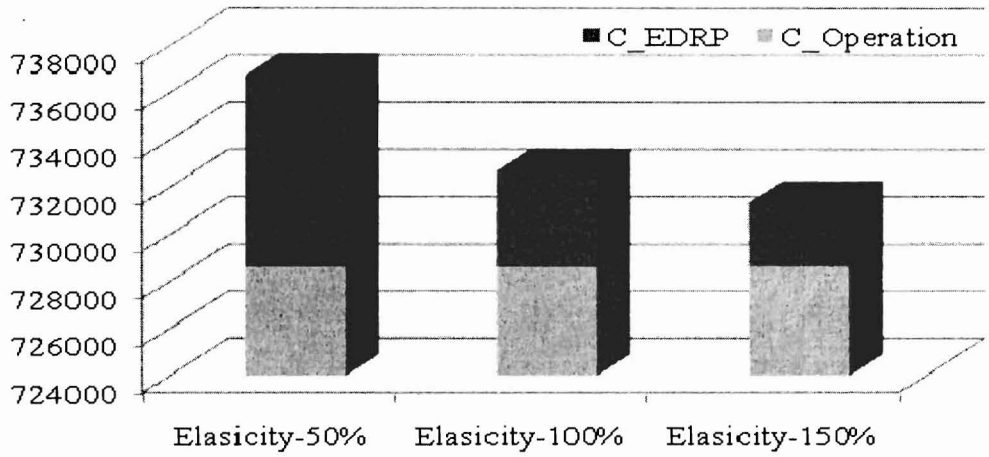
$$Deviation of\ Peak to valley\% = 100 \times \left(1 - \frac{[\max(DEM_{new}(t)) - \min(DEM_{new}(t))]}{[\max(DEM_{old}(t)) - \min(DEM_{old}(t))]} \right) \quad (۲۷)$$

جدول (۲) : نتایج شبیه سازی برنامه همزمان مشارکت واحدها و برنامه پاسخ گویی بار اضطراری در شبکه ٢٤ باسه IEEE RTS

حالت‌های بهینه‌سازی / شاخص‌های محاسبه شده	حالت ۱	حالت ۲ سناریوی ۱ (٪۳۰)	حالت ۲ سناریوی ۲ (٪۵۰)	حالت ۲ سناریوی ۳ (٪۱۰۰)
هزینه کل ($) Total Cost	۷۴۶۸۶۵/۹	۷۴۳۰۱۴/۵	۷۳۹۹۶۸/۹	۷۳۲۷۱۴/۱
هزینه اجرای برنامه پاسخ گویی بار اضطراری	----	۳۴۹/۶	۲۲۹۵/۴	۴۰۶۷/۷
ضریب بار (درصد) Load Factor	۸۳/۷۱	۸۴/۵۸	۸۶/۶۲	۸۶/۸۶
درصد اختلاف پیک و دره Peak to Valley	۴۴/۰۴	۴۲/۸۹	۴۰/۲۰	۳۸/۵۸
نسبت جبران پیک Peak Compensate	----	۰/۸۶۶	۲/۹۲۶	۳/۵۹۰
نسبت جبران اختلاف پیک و دره Deviation of Peak to Valley	----	۳/۴۶۵	۱۱/۴۰۲	۱۵/۵۵
مقدار پاداش بهینه	----	۴/۹۱۴	۹/۱۸۱	۹/۷۵۴

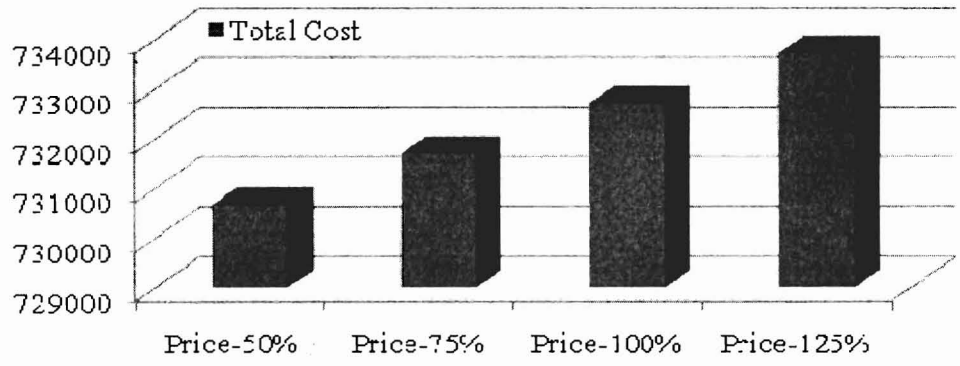
در شکل (۶) نمودارهای هزینه‌ی کل بهره‌برداری (تابع هدف) و هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری در ازای الاستیسیته‌های مختلف نشان داده شده است، بدین صورت کـه اطلاعـات مربـوط بـه الاستیـسیته خـودی و متقابـل شبکه‌ی ۲۴ شین IEEE RTS در سه دوره‌ی پیک، میان باری و کم باری که در جدول (۱) جدول آورده شـده، تغییـر داده شده است؛ این تغییر به صورت ۵۰٪ از الاستیسیته پایه افزایش و یا کاهش یافته می‌باشد و نتایج آن نشان داده شده است. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان الاستیسیته هزینه‌ی کل بهره‌برداری و هزینه‌ی اجرای برنامـه‌ی پاسـخ-گویی بار اضطراری در کل کاهش می‌یابد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



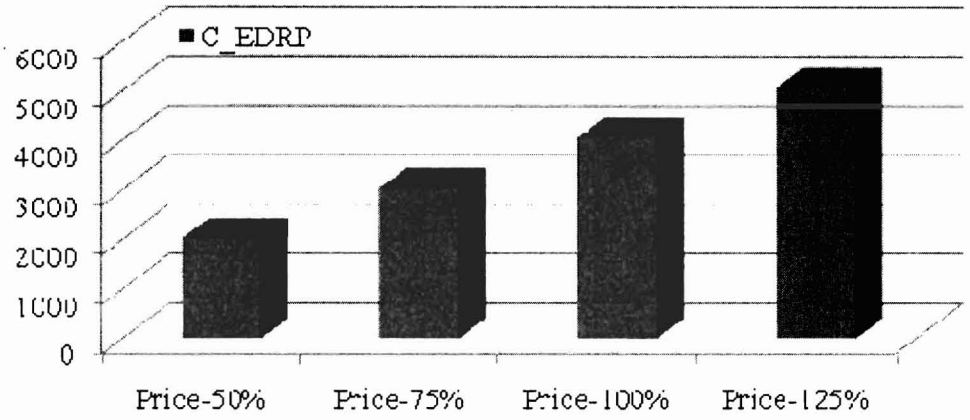
شکل (٦) نمودار هزینه کل بهینه سازی با اجرای پاسخ گویی بار زمان اضطراری در ازای الاستیسیته های مختلف

در شکل (۷) و شکل (۸) نمودارهای هزینه‌ی کل بهره‌برداری (تابع هدف) و هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری در ازای تعرفه‌های مختلف انرژی الکتریکی نشان داده شده است، بدین صورت که مقدار افزایش قیمت انرژی الکتریکی در سه دوره‌ی پیک، میان باری و کم باری به میزان درصدی از قیمت پایه انرژی الکتریکی (۸ دلار کم باری، ۱۶ دلار میان باری و ۲۴ دلار پیک) افزایش و یا کاهش یافته است؛ میزان این تغییرات ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ بوده که نتایج این سناریوهای مختلف در شکل‌ها نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۷) و شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان قیمت انرژی الکتریکی هزینه‌ی کل بهره‌برداری و هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری افزایش می‌یابد.



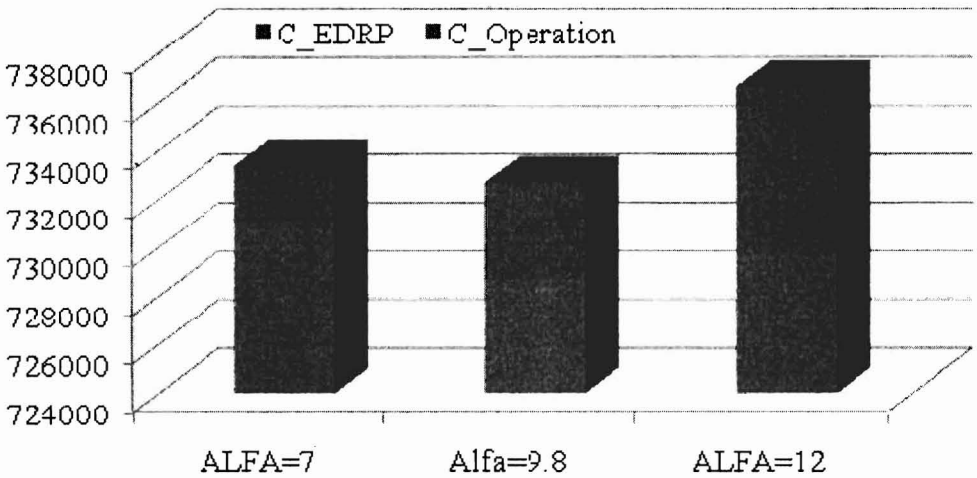
شکل (۷) نمودار هزینه کل بهینه سازی با اجرای پاسخ گویی بار اضطراری (EDRP) در ازای تعرفه های مختلف انرژی الکتریکی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل (۸) نمودار هزینه اجرای پاسخ گویی بار اضطراری (EDRP) در ازای تعرفه های مختلف انرژی الکتریکی

در شکل (۹) نمودارهای هزینه‌ی کل بهره‌برداری (تابع هدف) و هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار اضطراری در ازای مقادیر پاداش‌های غیر بهینه نشان داده شده است؛ مقدار پاداش بهینه بدست آمده در این شبیه‌سازی به ازای پتانسیل اجرای ۱۰۰٪ برابر ۹/۸ دلار بدست آمده است که با کمی افزایش و یا کاهش در مقدار پاداش مقدار هزینه‌های بهره‌برداری بدست آمده است؛ میزان این تغییرات حدود ۲۵٪ بوده که نتایج این سناریوهای مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از مقدار بهینه‌ی پاداش تشویقی، هزینه‌ی کل بهره‌برداری افزایش می‌یابد.



شکل (۹) نمودار هزینه بهره برداری و هزینه اجرای پاسخ گویی بار اضطراری (EDRP) در ازای مقادیر غیر بهینه میزان تشویق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

نتیجه گیری

در سیستم‌های تجدید ساختار یافته، از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار که یکی از روش‌های برنامه‌های مدیریت مصرف بوده برای فائق آمدن بر مشکلات سیستم قدرت استفاده می‌شود. در این مقاله از یک مدل اقتصادی برای برنامه‌ریزی منابع پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) استفاده شده که به صورت همزمان با مسأله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن قید امنیت اجرا می‌شود؛ مدل برنامه‌ریزی مورد استفاده یک مدل مختلط با اعداد صحیح است که با خطی‌سازی تابع هدف و قیود مسأله به افزایش سرعت اجرای برنامه کمک شده است. روش پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه ۲۴ شین استاندارد IEEE RTS پیاده‌سازی شده و نتایج آن در دو حالت مورد بررسی قرار داده شد؛ حالت اول، برنامه‌ریزی تولید SCUC بدون برنامه EDRP، حالت دوم، برنامه‌ریزی تولید SCUC همزمان با برنامه EDRP می‌باشد.

در گام اول شبیه‌سازی‌ها، مشاهده شد که اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری سبب بهبود ضریب بار و شاخص-های درصد اختلاف پیک و دره، نسبت جبران پیک و نسبت جبران اختلاف پیک و دره شده است؛ با این کار منحنی بار شبکه مسطح‌تر شده و باعث بهبود شاخص‌های وضعیت شبکه می‌شود و در مجموع هزینه تولید نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش پتانسیل اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری میزان هزینه‌ی کل بهره‌برداری کاهش یافته است. در گام دوم، تاثیر میزان الاستیسیته در هر دوره‌ی زمانی، میزان تعرفه‌های مختلف انرژی الکتریکی و همچنین میزان پاداش‌های تشویقی غیر بهینه مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش الاستیسیته هزینه‌ی کل بهره‌برداری کاهش یافته است؛ در قبال افزایش تعرفه انرژی الکتریکی و همچنین با فاصله گرفتن از مقدار بهینه‌ی پاداش تشویقی برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، میزان هزینه‌ی بهره‌برداری افزایش می‌یابد.

همانطور که در ابتدای مقاله بیان شد برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انواع زیادی داشته که بررسی و مدل‌کردن سایر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در کنار برنامه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت و تأثیر این برنامه‌ها بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان به عنوان ادامه این تحقیق می‌باشد، که می‌توان در آینده به آن پرداخت.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانیم که از آقایان دکتر حبیب اله اعلمی و دکتر محمود فتوحی فیروزآباد به‌خاطر هم فکری‌هایی که داشته‌اند، تشکر نماییم.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

منابع

[۱] اعلمی، ح. یوسفی، غ. پارسا مقدم، م. (۱۳۸۷)، تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر منحنی مصرف برق روزانه کشور، نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، سال ۶، شماره ۴، صفحات ۳۰۸-۳۱۶.

[۲] سلسله گزارشات تخصصی سیستم‌های اندازه‌گیری و شبکه هوشمند، سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا)، www.saba.org.ir

[۳] شایسته، ا. کاظم‌پور، ج. اعلمی، ح. (۱۳۸۸)، اختصاص میزان تشویقی بهینه صنایع حاضر در برنامه پاسخ‌دهی بار با استفاده از ارزیابی اقتصادی در ایران، چهاردهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق.

[4] Aalami, H., Yousefi, G. R., and Parsa-Moghadam, M., (2008) "Demand Response Model Considering EDRP and TOU Programs", *IEEE Cnf.,*

[5] Charles River Associates, (2005) Primer on demand side management. Report for the World Bank,.

[6] CPLEX 11.0 Manual, IBM Corporation, Armonk, NY, 2010.

[7] Doudna, J. H., (2001) "Overview of california ISO summer 2000 demand response programs," *Proc. IEEE PES Winter Meet.* vol. 1, pp. 228–233.

[8] GAMS User Guide Available: At Http://www.GAMS.com.

[9] Goel, L., Wu, Q., and Wang, P., (2006) "Reliability enhancement of a deregulated power system considering demand response," *Proc. IEEE PES Gen. Meet.* pp. 1–6.

[10] Grigg, C., and et al., "The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee", *IEEE Trans. on Power Syst.,* Vol. 14, No. 3, pp. 1010-1020 , 1999.

[11] Jonghe, C. D., Hobbs, B. F., and Belmans, R., "Optimal Generation Mix With Short-Term Demand Response and Wind Penetration", *IEEE Trans. on Power Syst.,* Vol. 27, No. 2, pp. 830-839, 2012.

[12] Rahimi, F. and Ipakchi, A., "Demand response as a market resource under the smart grid paradigm," *IEEE Trans. On Smart Grid,* Vol. 1, No. 1, pp. 82–88, 2010.

[13] Sahebi, M. M., Duki, E. A., Kia, M., Soroudi, A., and Ehsan, M., "Simultanous emergency demand response programming and unit commitment programming in comparison with interruptible load contracts", *IET Gen., Trans. and Dist.,* Vol. 6, Iss. 7, pp. 605-611, 2012.

[14] Salazar, L. V., Alvarez, C., Escriva, G. E., and Ortega, M. A., "Simulation of demand side participation in Spanish short term electricity markets", *Elsevier Energy Conversion and Management,* Vol. 52, pp. 2705-2711, 2011.

[15] Shayesteh, E., Yousefi, A., Moghaddam, M. P., and Sheikh-ELEslami, M. K., (2009) "ATC enhancement using emergency demand response program," *Proc. IEEE PES PSCE,* pp. 1–7,.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

[16] Tyagi, R., and Black, J. W., (2010) "Emergency demand response for distribution system contingencies," *Proc. IEEE PES Transm on. Dist. Conf. Expo.,* pp. 1–4.

[17] U. S. Department of Energy, (2006) Energy policy Act of 2005. section 1252.

[18] Yunfei, W., Rahimi, P. I., and Wilsun, X., "An Event-Driven Demand Response Scheme for Power System Security Enhancement", *IEEE Trans. on Power Syst.,* Vol. 2, No. 1, pp. 23-29, 2011.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

علائم و نشانه‌ها

$F_i(P)$	تابع هزینه تولید توان p توسط ژنراتور iام
$I(i,t)$	وضعیت مشارکت واحد iام در زمان t (۱ بیانگر درمدار بودن واحد i در زمان t)
$\alpha(i,t)$	وضعیت روشن شدن واحد iام در زمان t (۱ بیانگر روشن شدن واحد i در زمان t)
$\beta(i,t)$	وضعیت خاموش شدن واحد iام در زمان t (۱ بیانگر خاموش شدن واحد i در زمان t)
STU	هزینه راه‌اندازی واحد
STD	هزینه خاموش شدن واحد
$C_{EDRP}(j,t)$	هزینه اجرای برنامه EDRP
$INCENT$	میزان پاداش تشویقی مشارکت‌کنندگان در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری
S_{INCENT}	شیب تابع پاداش در هر تکه
$DEM(t)$	میزان تقاضا در زمان t (MWh)
ε	مقدار الاستیسیته
GCS	مازاد ناخالص سود مصرف‌کننده
NCS	مازاد خالص سود مصرف‌کننده
$Price(t)$	تعرفه انرژی الکتریکی در زمان t ($\$/MWh$)
$S_g(i,t,seg)$	شیب تابع هزینه واحد iام در زمان t در تکه seg
a_i ، b_i و c_i	ضرایب تابع هزینه واحد تولیدی iام
$P(i,t,seg)$	توان تولیدی واحد iام در زمان t و تکه seg
$P_{g\min}$	حداقل تولید مجاز واحد تولیدی (MW)
$P_{\max seg}(i)$	حداکثر بازه تقسیم‌شده واحد iام

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

$T_{ON\min}(i)$	حداقل مدت زمان روشن بودن واحد iام
$T_{OFF\min}(i)$	حداقل مدت زمان خاموش بودن واحد iام
$X_{ON}(i,t)$	مدت زمان بدون خاموشی بودن واحد iام تا قبل از زمان t
$X_{OFF}(i,t)$	مدت زمان خاموش بودن واحد iام تا قبل از زمان t
$Line\ Flow(l,t)$	توان عبوری از خط lام در زمان t
$Line\ Flow_{\max}(l)$	حداکثر توان عبوری از خط lام
$\delta_{send}(l)$	زاویه بار در شین ارسال
$\delta_{recieve}(l)$	زاویه بار در شین دریافت
$X_{line}(l)$	راکتانس خط lام
N_{seg}	تعداد تقسیمات در هنگام خطی‌سازی توابع غیر خطی
N_g	تعداد ژنراتورها
N_d	تعداد بارها
N_t	تعداد ساعات شبانه‌روز
N_{gB}	تعداد ژنراتورها در هر شین
N_{dB}	تعداد بارها در هر شین
N_{lB}	تعداد خطوط متصل به هر شین

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]