بررسی تأثیرات مالی و زیست‌محیطی برنامه‌های پاسخگویی بار در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطوط انتقال

سید عرفان حسینی[1] علیمراد خواجه‌زاده[2] مهدیه اسلامی[3]

۱- دکتری- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران
SEH@dr.com

۲- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران
khajehzadeh@iauk.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران
m.eslami@iauk.ac.ir

چکیده: آگاهی عمومی از آلودگی و گرم شدن کره زمین، بخش‌های مختلف صنعت را ملزم به توجه بیشتر به این موضوع و انجام برخی اقدامات در این زمینه کرده است. صنعت برق به‌عنوان پایه اکثر صنایع دیگر باید تلاش بیشتری را به این امر اختصاص دهد. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها فرآیند تعیین وضعیت واحدها برای بازار روز آینده است. بنابراین، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها بهترین گزینه برای کاهش آلودگی است. بااین‌حال در شبکه هوشمند، مشتریان می‌توانند از طریق برنامه‌های پاسخگویی بار بخشی از بازار باشند. از سوی دیگر، پرشدگی یکی از مشکلات اصلی شبکه انتقال است. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند تأثیر مثبتی بر کاهش پرشدگی داشته باشد زیرا کل توان منتقل‌شده از طریق سیستم انتقال را کاهش می‌دهد. در این مقاله، تأثیر برنامه‌های پاسخگویی بار به‌عنوان نیروگاه‌های مجازی بر هزینه عملیات، پرشدگی و انتشار تعهد واحد محدود به شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تأثیر اجرای بهینه برنامه پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن بهترین نرخ مشوق پرداخت‌شده به شرکت‌کنندگان به‌عنوان یکی از روش‌های برنامه پاسخ‌گویی بار، بر کاهش هزینه مشارکت واحدها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه به دلیل اجرای هم‌زمان مسئله مشارکت واحدها و برنامه پاسخ‌گویی بار که یک مسئله پیچیده غیرخطی با متغیرهای پیوسته و گسسته است، از روش برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح و غیر صحیح (MILP) استفاده شده است. مسئله بهینه‌سازی با استفاده از تکنیک CPLEX که در حل مسائل مختلط با اعداد صحیح بسیار کارا است، در برنامه GAMS پیاده‌سازی شده است. علاوه بر این، سیستم انتقال نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده تا تأثیر مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بازار برق و تأثیر آن‌ها بر کاهش پرشدگی به‌طور کامل مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. استراتژی توصیه‌شده بر روی سیستم تست قابلیت اطمینان ۲۴ باسه IEEE برای اثبات اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای کاهش هزینه و کاهش انتشار انجام می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، کاهش ضریب انتشار، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، مدیریت پرشدگی، شبکه‌های هوشمند.

DOI: 10.61186/jiaeee.20.4.2442

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیمراد خواجه‌زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – کرمان – بلوار ولی‌عصر– دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان – دانشکده‌ی فنی و مهندسی

علائم و نشانه ها	
δ	زاویه توان
η	راندمان
Γ	پارامتر نسبت بار
A	مشوق مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
a,b,c	ضرایب منحنی قیمت ارائه شده
CF	ضریب تبدیل انتشار یک واحد
D	تقاضا
D_{DR}	تقاضا پس از پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
$E()$	کشش برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
Emi	تابع انتشار
emi_{seg}	انتشار در بخش seg
Emi_{Min}	انتشار در مرزهای تولید پایین
$f_{\ell t}$	انتقال توان از طریق خط l
F	تابع قیمت ارائه شده
F_{Min}	هزینه تولید در تولید برق در حد پایین
$F_{\ell}^{\max}$	حداکثر توان مجاز عبوری از طریق خط l
H	تعداد ساعت‌های افق مطالعه
h	ساعت
HU, HC	تعداد ساعات روشن/خاموش یک واحد در ابتدای افق مطالعه
MU, MD	محدودیت زمانی بالا/پایین
N	تعداد واحدها
NS	تعداد بخش‌های مربوط به تابع قیمت خطی ارائه شده
P	تولید توان یک واحد
P_{Min}, P_{Max}	حداقل/حداکثر قابلیت تولید
P_{seg}	تولید در بخش seg در منحنی قیمت خطی ارائه شده
$\Pr$	قیمت انرژی بعد از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
$\Pr_0$	قیمت انرژی قبل از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
RDR	نرخ کاهش شیب
RUR	نرخ افزایش شیب
s, r	ارسال/دریافت گره‌های یک خط
SC	هزینه راه‌اندازی یک واحد
SD	هزینه خاموشی یک واحد
Sl_{seg}	شیب بخش seg در تابع قیمت خطی پیشنهادی شده
$SU()$	هزینه راه‌اندازی
TI	کل مشوق پرداختی به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در هر ساعت
u	نشانگر وضعیت واحد
X	راکتانس یک خط
$y()$	نشان‌دهنده راه‌اندازی
$z()$	نشان‌دهنده خاموشی

۱- مقدمه

با یک نگاه موشکافانه به مصرف انرژی می‌توان پی برد که میزان کل انرژی مصرفی به دو مؤلفه اصلی جمعیت و استاندارد زندگی بستگی دارد، که خود برحسب تولید ناخالص داخلی ارزیابی می‌شوند. آمارهای موجود رشد ۴ تا ۸ درصدی مصرف انرژی در سراسر جهان را نشان می‌دهند [۱]. مطمئناً تحمیل چنین رشدی بر منابع سنتی سوخت‌های فسیلی منطقی نیست. افزایش بهره‌وری انرژی و مدیریت مصرف، راه‌حل‌های خوبی به‌عنوان برنامه‌های بلندمدت هستند. تقاضای روزافزون انرژی در نقاط مختلف جهان سبب ایجاد چالش عظیمی برای شرکت‌های خدمات‌رسانی شده است. از طرفی، معاهدات بین‌المللی با هدف کاهش سطح آلودگی، محدودیت‌های انتشار دی‌اکسید کربن را افزایش داده است. این مشکلات مستلزم جایگزینی روش‌های قدیمی تولید انرژی با روش‌های جدید است؛ برخی از روش‌های جدید نظیر تولید انرژی هسته‌ای مسائل و چالش‌های خود را دارا هستند، و برخی نظیر انرژی باد، خورشید و آب شدیداً به شرایط اقلیمی بستگی دارند. بااین‌حال، این روش‌های جدید مزایای عمده‌ای نسبت به روش‌های سنتی تولید انرژی دارند، اما هنوز هم چالش‌های زیادی برای استفاده گسترده از آن‌ها وجود دارد. مسئله کمبود سوخت‌های فسیلی و همین‌طور افزایش سطح آلاینده‌های زیست‌محیطی به حدّی رسیده که کشورهای مختلف را ملزم به برداشتن گام‌های جدی برای حل این مسئله کرده است. سهم قابل‌توجهی از مصرف سوخت‌های فسیلی و ازاین‌رو آلودگی محیط‌زیست به واحدهای تولید برق مربوط می-شود. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها متعهد به حل وضعیت روشن/خاموش واحدهای تولیدی و همین‌طور سطح تولید آن‌هاست تا تقاضای پیش‌بینی‌شده برای افق زمانی تعیین‌شده را برآورده کند [۲]. بنابراین، بهترین ابزار برای کاهش انتشار سیستم برق به شمار می‌آید. واحدهای تولید کم بازده و محدود بودن منابع تولید برق، مقامات بازار برق را بر آن داشته تا استراتژی‌هایی برای مدیریت تقاضا در نظر بگیرند. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تکنیک‌های جهت‌دار برای کاهش مصرف برق را شامل می‌شود. علاوه بر این، انگیزه کافی برای مصرف‌کنندگان برای داشتن بازار کاملاً رقابتی باید وجود داشته باشد. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار چنین امکاناتی را برای مصرف‌کنندگان ایجاد کرده‌اند تا در عملکرد سیستم برق به‌عنوان یک شرکت‌کننده بازار عمل کنند [۳].

برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با داشتن نقشی حیاتی در عملکرد سیستم قدرت، توجه عده زیادی از محققان در حوزه سیستم قدرت را به خود جلب کرده است. تکنیک‌های مختلفی ازجمله الگوریتم‌های کلاسیک، ابتکاری و تکاملی (EA) برای مقابله با این مسئله مورد استفاده قرار گرفته است. رویکردهای کلاسیک که بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است، شامل برنامه‌نویسی پویا [۴]، فهرست اولویت‌ها [۵] و تخفیف لاگرانژی [۶-۷] است. از طرفی، تقریباً تمام الگوریتم‌های تکاملی در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های ژنتیک [۸-۹]، کلونی مورچه‌ها [۱۰]، ذوب فلزات [۱۱]، جستجوی تابو [۱۲]، تجمع ذرات [۱۳]، تکامل افتراقی [۱۴]، جستجوی هارمونی [۱۵]، نهنگ دودویی [۱۶]، جستجوی گرانشی [۱۷]، ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی تجمع ذرات و گرگ خاکستری [۱۸]، همگی برای رفع این مشکل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هرچند الگوریتم‌های تکاملی اثربخشی خود را در یافتن راه‌حل بهینه نشان داده‌اند، اما معایب معدودی نیز در استفاده از آن‌ها وجود دارد. برای مثال، یافتن راه‌حل بهینه در این روش‌ها تضمین نشده است. از این گذشته، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده پس از هر بار اجرای این روش‌ها ممکن است تفاوت چشمگیری داشته باشد. علاوه بر این، با بزرگ شدن اندازه مسئله، زمان رسیدن الگوریتم‌ها به پاسخ بهینه به‌شدت افزایش می‌یابد. کاهش چشمگیر زمان حل جواب‌های برنامه‌نویسی ترکیبی اعداد صحیح و مختلط سبب محبوبیت بیشتر آن در میان محققان و کاربران شده است [۱۹]. بنابراین، برنامه‌نویسی ترکیبی اعداد صحیح و مختلط پرکاربردترین ابزار برای حل مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها است [۱۹-۲۰]. با پیدایش و توسعه شبکه هوشمند، مشتریان توانستند در بازار شرکت کنند. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار چنین مشارکتی را تسهیل کرده و به اپراتورهای مستقل سیستم در کاهش حداکثر بار و بهبود ضریب بار کمک کرده است [۳]. مدل اقتصادی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در [۲۱] توسعه یافته است. مطالعات زیادی با تمرکز بر ادغام برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها انجام شده است. تأثیر دو نوع مختلف از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف ازجمله محدودیت‌های سوخت در[۲۲] مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت؛ مدل مناسبی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تهیه شده است و برای یافتن بهترین راه‌حل از برنامه‌نویسی ترکیبی اعداد صحیح و مختلط استفاده شد. در [۲۳] برای بررسی تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه‌های

پاسخ‌گویی بار، الگوی مناسبی از برنامه‌های مبتنی بر مشوق استخراج شده است و ارزش بهینه مشوق مالی پرداختی به مشتریان تعیین شده است. مفهوم مالی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در [۲۴] ترکیب شده است؛ نتایج به‌دست‌آمده حاکی از اثربخشی رویکرد پیشنهادی برای کاهش هزینه بود. یک فرمول دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در [۲۵] پیشنهاد شده است و تغییرات تقاضای ساعتی و همچنین مشوق مالی یا مجازات مالی اختصاص داده شده به هر شرکت‌کننده در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مشخص گردیده است. مرجع [۲۶] ضمن تعیین زمان‌بندی بهینه برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، بار محدود شده در هر ساعت را تجزیه‌وتحلیل نموده و سعی دارد این بار را به ساعت‌های مجاور منتقل نماید. در [۲۷] تأثیر ادغام برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و خودروهای برقی بر برنامه‌ریزی مشارکت واحدها مبتنی بر امنیت بررسی شده است و نشان داده شده است که این منابع می‌توانند به‌طور مؤثر هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه را کاهش دهند و قابلیت اطمینان را بهبود بخشند. در [۳۵] به تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مسئله مشارکت واحدها برای کاهش ریسک عملکرد پرداخته شده است. مرجع [۳۶] برنامه‌های پاسخ‌گویی بار غیرقطعی بادی و واحدهای سیکل ترکیبی در شبکه‌های SCUC را در نظر می‌گیرد و نتایج را روی سیستم تست ۱۱۸ باسه مدل می‌نماید. در [۳۷] به برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در سیستم قدرت با انرژی بادی در مقیاس بزرگ و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است. مرجع [۳۸] به مشارکت پاسخ بار در برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌ها و پاسخگویی بار به‌منظور بالا بردن امنیت سیستم و اهداف اقتصادی، در قالب یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی در برنامه مشارکت واحدها پرداخته شده است. همچنین مرجع [۳۹] به تدوین راهبرد دفاع غیرعامل چندهدفه در برنامه‌ریزی مقاوم مشارکت واحدهای تولیدی با هدف کاهش آسیب‌پذیری، تداوم نیرورسانی، افزایش قابلیت اطمینان تولید و ارتقای بازدارندگی پرداخته است. در [۴۰] هم یک طرح قیمت‌گذاری زمان حقیقی و پویا برای برنامه‌های پاسخگویی بار پیشنهاد می‌گردد که به‌طور هم‌زمان سود مصرف‌کنندگان و نهاد خدمت رسان بار را افزایش می‌دهد و علاوه بر آن ضریب بار شبکه بهبود می‌یابد.

بااین‌حال، مطالعات زیادی به مسئله مداخله برنامه‌های پاسخ‌گویی بارها در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها پرداخته‌اند ضمن اینکه هر یک دارای نقصی هستند. در اکثر مطالعات، شبکه نادیده گرفته می‌شود [۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۲، ۲۳، ۲۴] درحالی‌که توجه به شبکه می‌تواند بر مزایای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تأکید کند، چراکه آن‌ها می‌توانند مدیریت مؤثری بر پرشدگی داشته باشند. از این گذشته، مقدار بهینه تشویقی پرداخت‌شده به مشتریان معمولاً ثابت فرض می‌شود [۲۴-۲۶] که منجر به راه‌حل‌های غیر بهینه خواهد شد. در برخی موارد که مقدار تشویقی از پیش تعیین نشده است، مقدار بهینه با استفاده از آزمون‌وخطا تعیین می‌شود [۲۲، ۲۳، ۲۷] که برای یک سیستم قدرت در مقیاس بزرگ یک مورد عملی به شمار نمی‌آید. از این گذشته، تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بارها بر چشم‌انداز محیطی سیستم قدرت تنها در چند مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]. سرانجام، سیستم آزمایشی مورد استفاده برای حل مسئله برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در سیستم قدرت در بسیاری از موارد آن‌قدر کوچک بود [۲۳-۲۴] که یافتن راه‌حل بهینه را آسان‌تر می‌کرد؛ درحالی‌که با توجه به اینکه برنامه‌ریزی مشارکت واحدها یک مقیاس بزرگ، پیچیده، غیرخطی و مسئله بهینه‌سازی ترکیبی صحیح است، با افزایش اندازه مسئله، پیچیدگی به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد.

در این مطالعه، تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطوط انتقال از منظر هزینه عملیات، پرشدگی و انتشار آلودگی موشکافی شده است. تمرکز این مطالعه بر ادغام بهینه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطوط انتقال است به‌نحوی‌که هزینه‌ها و انتشار را کاهش دهد. از این گذشته، نرخ ایدئال تشویقی‌های پرداختی به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای مشارکت در بازار نیز تعیین می‌شود. و همچنین با در نظر گرفتن شبکه سعی شده است، مدیریت مؤثری بر پرشدگی ایجاد شود. بنابراین، این مطالعه ادغام بهینه برنامه‌های پاسخ‌گویی بارها را در بازار برق از هر دو منظر مالی و محیطی مطرح می‌کند. بدین منظور، ابتدا مدل برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر انگیزه حاصل شده و سپس مدل خطی این برنامه توسعه می‌یابد تا مدل‌سازی آن در ارائه بازار برق تسهیل شود. درنتیجه، مقدار بهینه تشویقی پرداخت شده به مشتریان که در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار فهرست شده، تعیین می‌شود. علاوه بر این، سیستم انتقال نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده تا تأثیر مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بازار برق و تأثیر آن‌ها بر کاهش پرشدگی به‌طور کامل مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. مسئله مورد بررسی به دلیل اجرای هم‌زمان مشارکت واحدها و برنامه پاسخ‌گویی بار، یک مسئله

غیرخطی مختلط با اعداد صحیح می‌باشد. که در این مقاله با خطی سازی توابع و قیود مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح و غیر صحیح (MILP) ، به‌سرعت اجرای برنامه کمک شده است. طرح پیشنهادی بر روی سیستم تست قابلیت اطمینان ۲۴باسه IEEE (RTS) انجام می‌شود تا مفید بودن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای کاهش هزینه، پرشدگی و انتشار را نشان دهد. مسئله بهینه‌سازی با استفاده از تکنیک CPLEX که در حل مسائل مختلط با اعداد صحیح بسیار کارا است، در برنامه GAMS پیاده‌سازی شده است.

۲- مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای ایجاد تغییرات در بار الکتریکی مشتریان ایجاد شده‌اند. افزایش شدید مصرف برق موجب جذابیت بیشتر برنامه‌های پاسخگویی بار برای مشتریان و بهره‌بردارها شده است. مطالعات بسیاری به مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اختصاص داده شده‌اند [۲۸-۳۰]. مدل مالی بار پاسخگو که در [۲۱] معرفی شده، با استفاده از کشش قیمت و شناخت انگیزه مورد استفاده قرار گرفته است. فرمولاسیون کاملی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مطالعات فوق‌الذکر ارائه شده است.

کشش به‌صورت پاسخ به بار با توجه به تغییرات قیمت توصیف می‌شود [۳۱]:

$$E(h,h)=\frac{\Pr(h)}{D(h)}\frac{\partial D(h)}{\partial \Pr(h)} \quad (1)$$

ازاین‌رو کشش قیمت ساعت hام در مقابل ساعت tام را می‌توان به‌صورت [۳۰] تعریف کرد:

$$E(h,t)=\frac{\Pr(t)}{D(h)}\frac{\partial D(h)}{\partial \Pr(t)} \quad (۲)$$

مدل بارهای الاستیک تک دوره‌ای در معادله (۳) ارائه شده است [۲۱].

$$D_{DR}(h)=D(h)\left\{1+E(h,h)\frac{\left[\Pr(h)-\Pr_0(h)+\Gamma^s(h)A(h)\right]}{\Pr_0(h)}\right\} \quad (۳)$$

مدل اقتصادی بار پاسخگو با در نظر گرفتن بارهای الاستیک چند دوره‌ای از [۲۱] استخراج شده و در بخش زیر ارائه شده است:

$$D_{DR}(h)=\eta D(h)\left\{\begin{array}{l}1+E(h,h)\dfrac{[\Pr(h)-\Pr_0(h)+\Gamma^s(t)A(t)]}{\Pr_0(h)}\\ +\sum\limits_{\substack{t=1\\ t\neq h}}^{24}E(h,t)\dfrac{[\Pr(t)-\Pr_0(t)+\Gamma^s(t)A(t)]}{\Pr_0(t)}\end{array}\right\} \quad (۴)$$

لازم به ذکر است که در این مطالعه فرض بر این است که بهره‌بردار مستقل سیستم با ارائه تشویقی‌ها تنها مشتریان را به مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بارها ترغیب کرده و آن‌ها را در صورت عدم مشارکت، جریمه نخواهد کرد. بنابراین، تنها برنامه‌های داوطلبانه در این مطالعه مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند.

۳- فرمولاسیون مسئله

۳-۱- تدوین تعهد واحد متعارف

هدف برنامه‌ریزی مشارکت واحدها کشف حالت‌های بهینه همه واحدها و سطح تولید آن‌هاست. هدف این است که هزینه‌های عملیات، شامل هزینه‌های تولید، راه‌اندازی، خاموشی و انتشار کاهش یابد ضمن اینکه تمام محدودیت‌های سیستم‌ها و واحدها تأمین می‌شود. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها تمام اهداف و محدودیت‌های برنامه‌ریزی مشارکت واحدها همراه با محدودیت انتقال را در بر می‌گیرد. بنابراین، هدف مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را می‌توان به شرح زیر بیان کرد. تدوین این فرمول هزینه‌های تولید، راه‌اندازی، خاموشی، و انتشار آلودگی را در بر می‌گیرد.

$$Min\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{N}[F(i,h)u(i,h)+SU(i)u(i,h)(1-u(i,h-1)) +SD(i)u(i,h-1)(1-u(i,h)+E(i,h)u(i,h)] \quad (۵)$$

توضیحات بیشتر در مورد پارامترها و محدودیت‌های تابع هدف در زیر آمده است:

- هزینه سوخت

قیمت‌های پیشنهادی تولید برق توسط واحدها معمولاً به‌صورت یک تابع درجه دوم مدل‌سازی می‌شود:

$$F(i,h)=a(i)P^2(i,h)+b(i)P(i,h)+c(i) \quad (۶)$$

تابع قیمت پیشنهادی را می‌توان توسط بلوک‌های خطی به تفکیک تقریب زد [۲۹]. به‌شرط اینکه از بلوک‌های کافی استفاده شود، تابع تکه‌ای خطی یک تقریب دقیق از تابع درجه دو است. فرمول تابع تکه‌ای خطی در بخش زیر نشان داده شده است.

$$F(i,h)=F_{Min}(i)u(i,h)+\sum_{seg=1}^{NS(i)}p_{seg}(i,h)\times sl_{seg}(i) \quad (۷)$$

-هزینه انتشار

آلودگی انتشار دارای اثرات قابل‌توجهی بر زندگی انسان‌ها و زمین است. بنابراین، برای داشتن یک سیستم الکتریکی سازگار با محیط‌زیست، انتشار نیز باید مدل‌سازی و در نظر گرفته شود. میزان انتشار آلودگی واحدها به‌عنوان مقدار وزن آلودگی منتشر شده توسط آن‌ها مدل‌سازی می‌شود. بااین‌حال، برای ادغام مناسب میزان انتشار آلودگی واحدها در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال، فرمولاسیون هزینه انتشار آلودگی بر اساس ضریب تبدیل در اینجا بر اساس [۳۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$E(P(i,h))=CF(i)\times(a(i)P^2(i,h)+b(i)P(i,h)+c(i))$$

$$CF(i)=\frac{NCV(i)\times EF(i)\times OF(i)}{FSC(i)} \quad (۸)$$

که در آن، , CF(i) (tCO2/$) حاکی از انتشار آلودگی آن واحد (i) است. CF برای انواع مختلف واحدها برگرفته از (تصمیم کمیسیون ۲۰۰۴) است.

تابع انتشار آلودگی را می‌توآن‌همانند تابع قیمت پیشنهادی، با یک تابع تکه‌ای خطی تقریب زد:

$$E(i,h)=E_{Min}(i)u(i,h)+\sum_{seg=1}^{NS(i)} emi_{seg}(i,h)\times sl_{seg}(i) \quad (۹)$$

- هزینه راه‌اندازی

هزینه‌های راه‌اندازی باید از زمان روشن شدن یک واحد خاموش در نظر گرفته شود. در اینجا از یک فرمول متناسب با برنامه‌ریزی اعداد صحیح و ترکیبی از هزینه راه‌اندازی واحدهای تولیدی استفاده می‌شود [۲۰].

$$SU(i)\geq SC(i)[u(i,h)-\sum_{t=1}^{T}u(i,h-t)] \quad \forall i,h$$
$$SU(i)\geq 0 \quad (۱۰)$$

- هزینه خاموشی

هزینه خاموش کردن معمولاً ثابت است و با زمان تغییر نمی‌نماید و در صورت خاموش شدن یک واحد روشن، فعال می‌شود.

- محدودیت خروجی واحد

$$P_{Min}(i)u(i,h)+\sum_{seg=1}^{NS(i)} p_{seg}(i,h)\leq P_{Max}(i)u(i,h) \quad \forall i,h \quad (۱۱)$$

- شیب افزایشی و کاهشی توان تولیدی واحدها

$$P(i,h+1)-P(i,h)\leq RUR(i) \quad \forall i,h$$
$$P(i,h)-P(i,h+1)\leq RDR(i) \quad \forall i,h \quad (۱۲)$$

- محدودیت حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحدها

وقتی واحدی روشن است، الزاماً باید به مدت حداقل چند ساعت روشن باقی بماند [۲۰].

$$\sum_{h=1}^{UH(i)}(1-u(i,h))=0 \quad \forall i$$
$$y(i,h)+\sum_{m=h+1}^{\max[H,h+MU(i)-1]} z(i,m)\leq 1 \quad \forall i,\forall h=UH(i)+1,...,H$$
$$UH_0(i)=\max[0,Min(H,MU(i)-HU(i,0)u(i,0))] \quad (۱۳)$$

درنتیجه، اگر واحدی خاموش شود، لازم است تا به مدت چند بازه زمانی از پیش تعیین شده حالت خود را حفظ کند [۲۰].

$$\sum_{h=1}^{DH(i)}u(i,h)=0 \quad \forall i$$
$$z(i,h)+\sum_{m=h+1}^{\max[H,h+MD(i)-1]} y(i,m)\leq 1 \quad \forall i,\forall h=DH(i)+1,...,H$$
$$DH_0(i)=\max[0,Min(H,MD(i)-HD(i,0)(1-u(i,0)))] \quad (۱۴)$$

همبستگی میان نمادهای راه‌اندازی و خاموشی و وضعیت واحد [۲۰] به شرح زیر است:

$$y(i,h+1)-z(i,h+1)=u(i,h+1)-u(i,h) \quad \forall i,h \quad (۱۵)$$

ارتباط ساعتی بین وضعیت واحد، شاخص راه‌اندازی و خاموش کردن توسط رابطه زیر اعمال می‌شود. این رابطه بیان می‌دارد که یک واحد نمی‌تواند در یک ساعت توأماً روشن و خاموش باشد [۲۰]. درنتیجه:

$$y(i,h)+z(i,h)\leq 1 \quad \forall i,h$$
$$0\leq z(i,h)\leq 1 \quad \forall i,h \quad (۱۶)$$

محدودیت‌هایی که تحت تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار قرار می‌گیرند، بعداً شرح داده می‌شوند.

۳-۲- مدل برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

در این مقاله، برنامه‌های داوطلبانه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که برای بهره‌بردار مستقل سیستم ارزشمند هستند اما به دلیل عدم کاهش تقاضای آن‌ها جریمه نمی‌شوند. بنابراین، MWh/$ را به‌عنوان مقدار تشویقی در نظر گرفته و جریمه صفر خواهد شد. برای اینکه بتوانیم برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن خطوط انتقال مدل‌سازی کنیم، ابتدا باید از یک مدل خطی مشتق بگیریم. در معادلات مربوط به محاسبه کل تشویقی پرداخت شده به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، میزان کاهش بار باید در مقدار تشویقی ضرب شود. این معادله همان‌طور که در زیر نشان داده شده، غیرخطی است و باید ابتدا خطی شود تا در مدل برنامه‌ریزی مشارکت واحدها قابل استفاده باشد.

$$TI=A\times(D-D_{DR}) \quad (۱۷)$$

بنابراین، برای خطی کردن معادله بالا، A از معادله (۳) مشتق می‌شود.

$$A(h)=\frac{\left(\frac{D_{DR}-1}{\frac{D}{E(h,h)}}\right)PR_0(h)-PR(h)+PR_0(h)}{\Gamma^s(h)} \quad (۱۸)$$

با توجه به اینکه بیشتر شاخص‌ها ثابت هستند، A را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$A(h)=Const_1\times\left(\frac{D_{DR}-D}{D\times E(h,h)}\right)+Const_2 \quad (۱۹)$$

علاوه بر این، مقادیر D و E از پیش تعریف شده و بنابراین ثابت هستند. درنتیجه، مقدار کل تشویقی پرداخت شده به مشتریان را می‌توآن‌همان‌گونه که در زیر آمده، بازنویسی کرد:

$$TI=Const_3\times(D_{DR}-D)^2+Const_4\times(D_{DR}-D) \quad (۲۰)$$

درنتیجه، می‌توان دید که کل تشویقی پرداخت شده به شرکت‌کنندگان برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، تابعی درجه دو از میزان کاهش بار است. معادله فوق را می‌توان به همان روش تابع هزینه تولید، خطی کرد.

۳-۳- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن خطوط انتقال به همراه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر برنامه‌نویسی ترکیبی اعداد صحیح و مختلط

نکته این مطالعه ادغام برنامه‌های داوطلبانه پاسخ‌گویی بار در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطوط انتقال است. درنتیجه، مقدار تشویقی $MWh/$ و مقدار جریمه صفر خواهد شد.

تدوین هدف برای مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها به‌منظور کاهش هزینه و انتشار با برنامه‌های پاسخ‌گویی بارها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$Min \sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{N} \begin{matrix}[F_{Min}(i)u(i,h)+\sum_{seg=1}^{NS(i)} p_{seg}(i,h)\times sl_{seg}(i)+SC(i)[u(i,h)-\sum_{t=1}^{T}u(i,h-t)] \\ +SD(i)z(i,h)+Emi_{Min}(i)u(i,h)+\sum_{seg=1}^{NS(i)} emi_{seg}(i,h)\times sl_{seg}(i)]+TI(h)\end{matrix} \quad (۲۱)$$

- محدودیت عرضه تقاضا

توان تأمین شده توسط واحدهای تولیدی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار باید تقاضا را برآورده کند.

$$\sum_{i=1}^{N} P(i,h)u(i,h) = D_{DR}(h) \quad (22)$$

- محدودیت رزرو چرخان

رزرو چرخان برای حفظ سطح موردنظر برای قابلیت اطمینان شبکه لازم است.

$$\sum_{i=1}^{N} P(i,h)u(i,h) \geq D_{DR}(h)+SR(h) \quad (۲۳)$$

- محدودیت‌های عبور توان DC

توان انباشته حاصل از واحدها و مصرف انباشته باید در سطحی یکسان باشند، مشروط بر اینکه افت توان نادیده گرفته شود. بنابراین، جریان بار DC که به‌صورت زیر فرموله شده، در نظر گرفته می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{gb}} P(i,h) - \sum_{d=1}^{N_{db}} PD_{DR}(h) = \sum_{\ell=1}^{N_{\ell b}} f_{\ell}(h) \quad \forall i,h$$

$$f_{\ell}(h) = \frac{1}{X_l}(\delta_{\ell s}^{h} - \delta_{\ell r}^{h})$$

$$-F_{\ell}^{\max} \leq f_{\ell}(h) \leq F_{\ell}^{\max} \quad \forall i,h \quad (۲۴)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

رویکرد ارائه شده در مدت ۲۴ ساعت بر روی سیستم ۲۴ باسه IEEE-RTS انجام شده است. انتظار می‌رود که واحدهای تولیدکننده پیشنهادهای خود را همان‌طور که در [۳۴] ارائه شده، مطرح کنند. داده‌های دیگر برای این سیستم، ازجمله هزینه‌های راه‌اندازی، مرزهای محدودیت بالا و پایین تولید توان واحد، شیب افزایشی و کاهشی، نرخ رمپ و ضرایب انتشار تماماً از [۳۴] استخراج شده‌اند. یک روز هفته در تابستان، با اوج بار ۲۸۵۰ مگاوات برای این مطالعه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که واحدهای آبی لحاظ نشده‌اند و فرض بر این است که همان مقدار تشویقی برای بار تمام باسها در نظر گرفته می‌شود.

هشت مطالعه موردی مختلف دیگر برای بررسی کامل تأثیر مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بازار برق در نظر گرفته شده‌اند. در مورد اول، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن خطوط انتقال برای کاهش هزینه انرژی بدون برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انجام می‌شود. در مورد دوم، هدف کاهش هم‌زمان انرژی و هزینه انتشار آلودگی بدون برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. موارد سوم و چهارم همانند موارد اول و دوم هستند با این اختلاف که در شبکه انتقال، پرشدگی وجود دارد. موارد پنجم تا هشتم به ترتیب همانند چهار مورد اول هستند که از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هم در آن‌ها استفاده شده است.

مشخصات هزینه انتشار آلودگی و انواع مختلف آن‌ها از [۳۲] اقتباس شده و در جدول ۱ ارائه شده است. هزینه انتشار آلودگی واحدهای ذغال سوز بیشتر از واحدهای نفت‌سوز نشان داده شده است.

در این مطالعه، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در تمامی ۱۷ باس بار شبکه در نظر گرفته شده‌اند. کشش قیمت‌ها همان موارد ذکر شده در [۲۸] هستند و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. از این گذشته، تنها ۲۰٪ از بار در هر باس در هر ساعت برای مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته می‌شود.

علاوه بر این، به‌منظور ایجاد پرشدگی در سیستم انتقال، ظرفیت انتقال برخی از خطوط شبکه اصلاح شده است. این تغییرات بر اساس [۳۳] صورت گرفته که در آن ظرفیت‌های خطوط شماره ۱۸، ۲۴، و ۲۶ به ترتیب تا ۱۷۵ مگاولت آمپر، ۶۰ مگاولت آمپر و ۱۷۵ مگاولت آمپر کاهش یافته است. لازم به ذکر است که ظرفیت اولیه هر سه خط انتقال همان‌طور که در [۳۴] ارائه شده، ۵۰۰ مگاولت آمپر است.

جدول (۱): عوامل تبدیل انتشار [۳۲]

Unit Type	NCV (kJ/kg or kJ/m^3)	EF (tCO_2/TJ)	OF (%)	FSC ($/t or $/m^3)	CF (tCO_2/$)
Oil	41031	77.4	0.995	157	0.02013
Coal	29308	98.3	0.990	51.3	0.05560

جدول (۲): کشش یک‌طرفه و دوطرفه [۲۸]

Hour	Peak	Off-peak	Low level
Peak	-0.10	0.016	0.012
Off-peak	0.016	-0.10	0.01
Low level	0.012	0.01	-0.10

هزینه کل، شامل هزینه‌های انرژی و هزینه انتشار آلودگی، در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر این، مقدار تشویقی و مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نیز در این جدول ارائه شده است.

جدول (۳): هزینه‌های سیستم IEEE-RTS

Case No.	Operation Costs ($)	Energy Costs ($)	Emission Cost ($)	Incentive ($/MWh)	هزینه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ($)
1	1033355.99	1033355.99	0	0	0
2	1068173.58	1043605.59	24567.99	0	0
3	1060203.88	1060203.88	0	0	0
4	1094622.88	1059755.45	34867.43	0	0
5	1008348.06	960261.940	0	41.94	48086.12
6	1049593.24	976392.470	23930.73	42..13	49270.04
7	1023182.60	970584.710	0	42.73	52597.89
8	1070145.75	983333.720	33332.89	42.84	53479.14

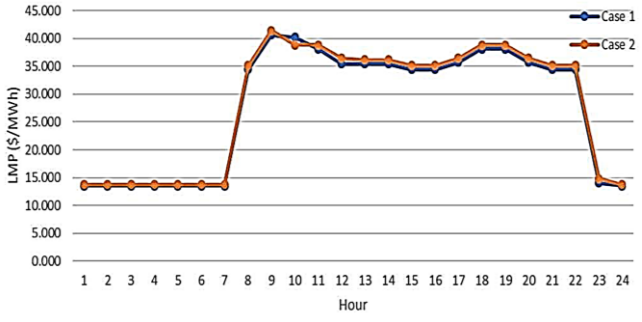
ازآنجایی‌که هزینه انتشار در این مطالعه به‌عنوان یک هزینه اضافی محسوب شده است، مقدار هزینه عملیاتی در مواردی که انتشار نیز مدل‌سازی و در نظر گرفته شده، کمی بیشتر است. علاوه بر این، ازآنجایی‌که در چنین مواردی مسائل زیست‌محیطی نیز یک عامل تصمیم‌گیری است، واحدهای گران قیمت‌تر که میزان انتشار کمتری دارند ممکن است بیش از واحدهایی بکار گرفته شوند که فقط هزینه انرژی دارند و ازاین‌رو هزینه انرژی و هزینه‌های عملیاتی بالاتری نیز دارند.

همان‌طور که در جدول فوق آمده است، استقرار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هم هزینه‌های عملیاتی و هم انتشار سیستم طی افق مطالعاتی ۲۴ ساعته را کاهش داده است. وقتی هزینه انتشار و همین‌طور پرشدگی در نظر گرفته شوند، راه‌حل نشان می‌دهد که مقدار تشویقی و بنابراین مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار کمی بیشتر است.

۴-۱- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال در حالت پایه بدون در نظر گرفتن پرشدگی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

برای مورد اول، که در آن انتشار، پرشدگی، و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته نشده‌اند، هزینه عملیاتی با هزینه انرژی برابر و حدود ۱۰۳۳۳۵۵ دلار است. در مورد دوم، هزینه عملیاتی هزینه انرژی و انتشار را در بر می‌گیرد. ازآنجایی‌که انتشار را نیز در بر می‌گیرد، هدف رویکرد پیشنهادی کم کردن هزینه انتشار علاوه بر هزینه انرژی است و ازاین‌رو در برخی ساعات، واحدهای دارای میزان انتشار پایین‌تر و احتمالاً با هزینه‌های بالاتر، بیشتر از مورد اول بکار گرفته شدند و درنتیجه، هزینه انرژی با توجه به مورد اول افزایش یافته است. این دو مورد به‌عنوان معیار برای تحلیل اثر یکپارچه‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مورد استفاده قرار خواهند گرفت. مقایسه هزینه حاشیه‌ای حدی باس ۱۸ سیستم طی افق مطالعاتی ۲۴ ساعته برای موارد اول و دوم در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان دید هزینه حاشیه‌ای حدی مورد دوم اندکی بیشتر از هزینه حاشیه‌ای حدی مورد اول است؛ که در انتشار مورد ۲ نیز به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در نظر گرفته شده است.

علاوه بر این، جدول ۴ وضعیت تعهد ایجاد واحدها برای مورد دوم را نشان می‌دهد و بر تفاوت‌های آن با مورد اول تأکید شده است. برای مورد ۲، برخی واحدها به‌صورت کامل یا جزئی بسته شده و برخی واحدها به طریقی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند تا هزینه انتشار در شبکه کاهش یابد.



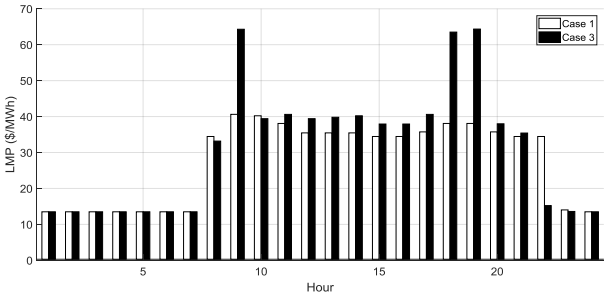
شکل (۱): هزینه حاشیه‌ای حدی باس ۱۸ سیستم برای موارد ۱ و ۲

جدول (۴): وضعیت روشن/خاموش شدن واحدها برای مورد ۲ در مقایسه با مورد ۱

U/H	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	0
10	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	1	1	1	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	0	0	0	0
11	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	1	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	0	0
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0**	0
13	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
14	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**1**	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

۴-۲- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال در حالت پایه با در نظر گرفتن پرشدگی و بدون برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

وقتی در شبکه انتقال، پرشدگی نبوده و هیچ برنامه‌های پاسخ‌گویی باری وجود نداشته نباشد، موارد ۳ و ۴ با مشکل برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال مواجه می‌شوند. این موارد همان مشکل مورد پایه (موارد ۱ و ۲)، اما با ظرفیت‌های انتقال اصلاح شده هستند. همان‌طور که نتایج این دو مورد نشان می‌دهد، پرشدگی در شبکه سبب افزایش در عملیات و هزینه انتشار شبکه شده است، چراکه بهره‌بردار مستقل سیستم باید برای غلبه بر پرشدگی در شبکه انتقال، از واحدهای تولید گران قیمت‌تری استفاده کند. در جدول ۵ نشان داده شده که به علت پرشدگی طی ساعات ۱۶ تا ۲۰ که شبکه با اوج بار مواجه است، تقریباً تمام واحدها روشن هستند. هزینه حاشیه‌ای حدی سیستم برای باس ۱۸ برای موارد ۱ و ۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، وقتی در شبکه پرشدگی وجود دارد افزایش هزینه حاشیه‌ای حدی سیستم، به‌ویژه در ساعات پرتقاضا مشاهده می‌شود.



شکل (۲): هزینه حاشیه‌ای حدی باس ۱۸ سیستم برای مورد ۳ در مقایسه با مورد ۱

جدول (۵): وضعیت روشن/خاموش واحدها برای مورد ۳ در مقایسه با مورد ۱

U/H	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**	**1**	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	0	0	0	0	0	0	**1**	**1**	**1**	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	**1**	**1**	**1**	0	0	0	0	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**1**	0	0	0
10	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**1**	0	0	0
11	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
12	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
13	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
14	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**1**	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

۴-۳- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال در حالت پایه بدون در نظر گرفتن پرشدگی و با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

مورد ۵ به هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر در مقایسه با مورد ۱ اشاره می‌کند، که در آن تنها تفاوت بین این دو مورد، استقرار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. بااین‌حال، بهره‌بردار مستقل سیستم برای بار مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار حدود ۴۸۰۸۶ دلار پرداخت کرده، که کل هزینه عملیات به‌اندازه ۲,۴۲٪ کاهش یافته است. بنابراین، حتی اگر نرخ بالایی از تشویقی (۴۱,۹۴ دلار در مگاوات ساعت) برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پرداخت شده باشد، کل هزینه سیستم کاهش قابل‌توجهی داشته است. این مورد اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را برای کاهش هزینه، وقتی‌که درست استفاده می‌شوند، اثبات می‌کند.

وضعیت تعهد واحدها برای مورد ۵ در قسمت زیر جدول‌بندی شده است. همان‌طور که تفاوت‌های بارز آن با مورد ۱ نشان می‌دهد، چارچوب پیشنهادی با استفاده از مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بازار توانسته گران‌ترین واحدها را تعطیل کند.

در مورد ۶، که در آن‌هم هزینه انتشار و هم کمک برنامه‌های پاسخ‌گویی بار موردتوجه قرار می‌گیرد، هزینه‌های عملیاتی و انتشار پایین‌تری ثبت می‌شوند. هزینه انرژی، در مقایسه با مورد ۲، با اختلاف ۱,۷۲٪ کاهش یافته و هزینه انتشار ۲,۶٪ کاهش را نشان می‌دهد که مقدار قابل ملاحظه‌ای است. هزینه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای این مورد بالاتر از مورد ۳ است چراکه در این مورد هزینه انتشار لحاظ شده و ازآنجایی‌که برنامه‌های پاسخ‌گویی بار دارای انتشار صفر هستند، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال سعی در استفاده هر چه بیشتر از این منابع دارند؛ تا اندازه‌ای که هیچ پیامد نامطلوبی در هزینه عملیاتی شبکه نداشته باشد. علاوه بر این، در این مورد، مقدار بیشتری تشویقی به بارها اختصاص داده شده، تا آن‌ها را برای مشارکت بیشتر تشویق کند. برای این مورد، چون هیچ پرشدگی وجود ندارد، هزینه حاشیه‌ای حدی آن مشابه مورد ۱ است.

جدول (۶): وضعیت روشن/خاموش واحدها برای مورد ۵ در مقایسه با مورد ۱

U/H	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0**	0	0	0
11	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	1	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	0	0
12	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0**	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
14	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	**1**	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	**1**	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	**1**	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	**1**	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

۴-۴- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال در حالت پایه با در نظر گرفتن پرشدگی و با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

در این زیر بخش، نتایج مربوط به برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم انتقال با پرشدگی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هر دو (موارد ۷ و ۸) ارائه و به بحث گذاشته شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود، وقتی پرشدگی وجود نداشته باشد، این دو مورد نسبت به موارد ۵ و ۶ دارای هزینه تولید و عملیات بالاتری هستند؛ اما پایین‌تر از موارد ۳ و ۴ که هیچ برنامه‌های پاسخ‌گویی باری وجود نداشت. بنابراین، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به‌صورت بهینه توسط رویکرد پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند تا اثر پرشدگی را حتی‌الامکان کاهش دهند. در مقایسه با مورد ۳، حدود ۳,۵٪ کاهش در هزینه‌های عملیاتی مورد ۷؛ هرچند تفاوت برای هزینه تولید خیلی بیشتر است، یعنی حدود ۸,۵٪ کاهش برای مورد ۷ در مقایسه با مورد ۳. بااین‌حال، بهره‌بردار مستقل سیستم باید برای مشترکانی که در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شرکت کردند، جبران کند و بخشی از آن صرفه‌جویی از طریق تشویقی‌ها به کاربران نهایی داده می-شود. مورد ۸ افزایش اندکی در هزینه‌های عملیاتی سیستم را نشان می‌دهد، زیرا هزینه انتشار در تابع هدف لحاظ شده است.

وضعیت روشن/خاموش واحدها برای مورد ۷ در جدول ۷ نشان داده شده است. با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ، بهره‌بردار مستقل سیستم توانسته است برخی از واحدها ازجمله واحدهای شماره ۱۲ و ۱۴ و ۱۹ را کمتر به کار گیرد. توان موردنیاز با استفاده از واحدهای باقیمانده و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار جبران می‌شود و با استفاده از این طرح، اپراتور سیستم می‌تواند هزینه‌های عملیاتی سیستم را کاهش دهد.

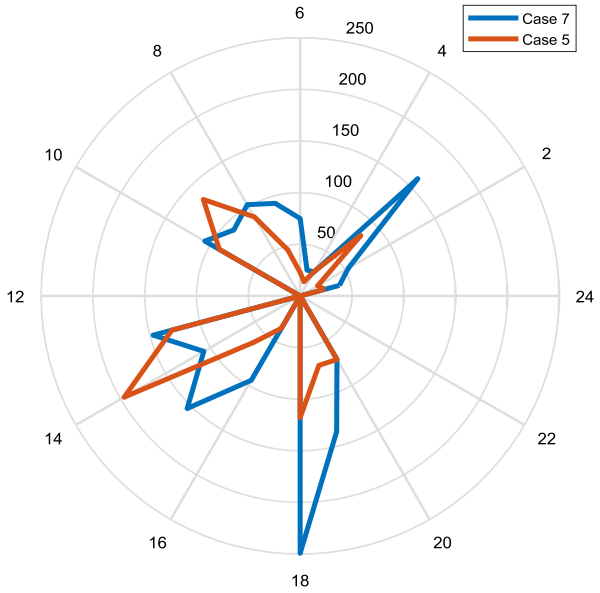
مشارکت بار تجمعی هر باس در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار طی ۲۴ ساعت برای موارد ۵ و ۷ در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است. بر اساس این شکل، نرخ مشارکت بار برای باس های بدون بار صفر است. باس ۱۸ سیستم دارای بیشترین مقدار هزینه حاشیه‌ای حدی در سناریوی پایه است وقتی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار لحاظ نشده باشند و دارای بیشترین مقدار کاهش بار با ۲۴۹,۱۸ مگاوات ساعت است. علاوه بر این، مشارکت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای مورد ۷ در مقایسه با مورد ۵ بیشتر است؛ بدین دلیل که بهره‌بردار مستقل سیستم سعی دارد از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای مدیریت پرشدگی استفاده کند.

مقایسه بین هزینه حاشیه‌ای حدی باس ۱۸ در موارد ۱ و ۳ و ۷ در شکل ۴ آمده است. بهره‌بردار مستقل سیستم توانسته است منحنی هزینه حاشیه‌ای حدی را در ساعات اوج به خط صاف تبدیل کند و از هزینه حاشیه‌ای حدی بالا در ساعات دارای بار زیاد با کمک برنامه‌های پاسخ‌گویی بار جلوگیری کند. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد،

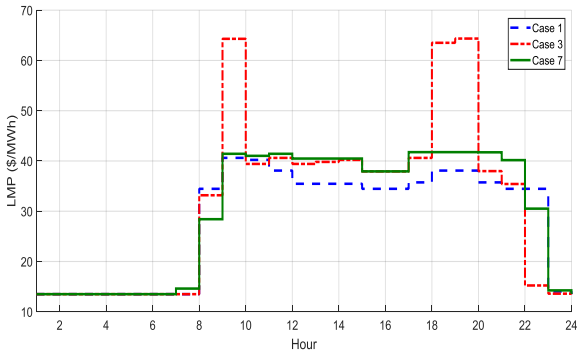
برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بیشتر در ساعت‌های ۱۱-۸ و ۲۰-۱۸ که سطح تقاضای سیستم بالاست، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول (۷): وضعیت روشن/خاموش واحدها برای مورد ۷ در مقایسه با مورد ۱

U/H	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2	0 0 0 0 0 0 0 0 **1** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
4	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
5	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6	0 0 0 0 0 0 0 0 **0** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 **0**
8	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
9	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 **1** 0 0
10	0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 **0** 0 0 0
11	**0 0 0 0 0 0 0** 1 1 **1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1** 0 0
12	**0 0 0 0 0 0 0 0 0 0** **0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0** 0
13	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
14	**0 0 0 0 0 0 0 0 0** 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 **1** 0
15	0 0 0 0 0 0 0 **0 0 0** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
16	0 0 0 0 0 0 0 **0 0 0** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
17	0 0 0 0 0 0 0 **0 0 0** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
18	0 0 0 0 0 0 0 **0 0 0** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
19	0 0 0 0 0 0 0 **0 0 0** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
20	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
21	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
22	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
23	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
24	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
25	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
26	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
27	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1



شکل (۳): مشارکت بار تجمعی باس های مختلف در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار طی ۲۴ ساعت برای موارد ۵ و ۷



شکل (۴): هزینه حاشیه‌ای حدی باس ۱۸ سیستم برای مورد ۷ در مقایسه با موارد ۱ و ۳

درنهایت با توجه به مطالعه انجام شده و بررسی نتایج آن در سیستم تست مورد استفاده و مقایسه با مطالعات دیگر به‌خوبی مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی به‌خوبی هزینه‌ها را کاهش داده و راه‌حل بهتری را در مقایسه با دیگر روش‌ها ارائه نموده است. این نتایج به تفکیک برای حالات مختلف در جدول ۴ و ۵ آورده شده است. درنتیجه می‌توان دریافت که هدف مطالعه به‌خوبی محقق می‌گردد.

جدول (۴): مقایسه هزینه‌های سیستم در حالت بدون پرشدگی

حالت	هزینه کل عملیات	هزینه انرژی	میزان تشویقی	هزینه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
پایه	1033355.99	1033355.99	0	0
مطالعه	1008348.06	960261.940	41.94	48086.12

جدول (۵): مقایسه هزینه‌های سیستم در حالت با پرشدگی

حالت	هزینه کل عملیات	هزینه انرژی	میزان تشویقی	هزینه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
پایه	1060203.88	1060203.88	0	0
مطالعه	1023182.60	970584.710	42.73	52597.89

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل جدیدی برای گنجاندن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار از طریق نیروگاه‌های مجازی در بازار عمده‌فروشی برق ارائه شد. یک مدل خطی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار معرفی شد و برای بررسی تأثیر این منابع بر مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن خطوط انتقال اعمال شد. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن خطوط انتقال انجام می‌شود تا به‌طور همزمان وضعیت روشن/خاموش

شدن واحدهای تولیدی، سطح تولید آن‌ها و همین‌طور استقرار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را مدیریت کند. علاوه بر این، هزینه انتشار آلودگی واحدهای تولیدی به‌عنوان یک هزینه اضافی مدل‌سازی شده و در چارچوب پیشنهادی گنجانده شده است تا اثر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر جنبه‌های زیست‌محیطی سیستم برق را نشان دهد. به‌علاوه این‌که مقدار بهینه تشویقی پرداخت شده به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای مشارکت در بازار به‌منظور جذب آن‌ها برای مشارکت و کاهش هم‌زمان کل هزینه عملیاتی تعیین شد. از این گذشته، نشان داده شد که وقتی پرشدگی در شبکه وجود داشته باشد، نرخ تشویقی که رویکرد پیشنهادی برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر می‌گیرد تا آن‌ها را ترغیب به مشارکت کند، بیشتر است. همچنین نشان داده شد که وقتی در شبکه پرشدگی وجود داشته باشد، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌توانند ابزار مناسبی برای مدیریت این موضوع باشند. مقایسه هزینه‌های حاشیه‌ای حدی برای موارد مختلف نشان داد که پرشدگی می‌تواند در برخی از ساعات موجب افزایش قیمت شود که اگر از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به‌طور اثربخش استفاده شود، قابل اجتناب است. کارایی روش پیشنهادی در سیستم آزمایشی ۲۴ باسه IEEE-RTS صورت گرفت. چندین مطالعه موردی انجام شد و نتایج تأکید کردند که برنامه‌های پاسخ‌گویی بار قادرند هزینه‌های عملیاتی و انتشار سیستم را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند.

مراجع

[1] Commission Decision 2004/156/EC (2004) establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council.

[2] Wang, C., and S. M. Shahidehpour. "Optimal generation scheduling for constrained multi-area hydrothermal power systems with cascaded reservoirs." Journal of optimization theory and applications 78, no. 1 (1993): 59-76.

[3] Staff, F. E. R. C. "Assessment of demand response and advanced metering." Federal Energy Regulatory Commission, Docket AD-06-2-000 (2006).

[4] Ouyang, Z., and S. M. Shahidehpour. "An intelligent dynamic programming for unit commitment application." IEEE Transactions on Power Systems 6, no. 3 (1991): 1203-1209.

[5] Padhy, Narayana Prasad. "Unit commitment-a bibliographical survey." IEEE Transactions on power systems 19, no. 2 (2004): 1196-1205.

[6] Fisher, Marshall L. "The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems." Management science 27, no. 1 (1981): 1-18.

[7] Redondo, N. Jiménez, and A. J. Conejo. "Short-term hydro-thermal coordination by Lagrangian relaxation: solution of the dual problem." IEEE Transactions on Power Systems 14, no. 1 (1999): 89-95.

[8] Swarup, K. S., and S. Yamashiro. "A genetic algorithm approach to generator unit commitment." International journal of electrical power & energy systems 25, no. 9 (2003): 679-687.

[9] Kazarlis, Spyros A., A. G. Bakirtzis, and Vassilios Petridis. "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem." IEEE transactions on power systems 11, no. 1 (1996): 83-92.

[10] Huang, Shyh-Jier. "Enhancement of hydroelectric generation scheduling using ant colony system based optimization approaches." IEEE Transactions on Energy Conversion 16, no. 3 (2001): 296-301.

[11] Annakkage, U. D., T. Numnonda, and N. C. Pahalawaththa. "Unit commitment by parallel simulated annealing." IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 142, no. 6 (1995): 595-600.

[12] Mantawy, A. H., S. A. Soliman, and M. E. El-Hawary. "A new tabu search algorithm for the long-term hydro scheduling problem." In LESCOPE'02. 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Conference Proceedings, pp. 29-34. IEEE, 2002.

[13] Zhao, B., C. X. Guo, B. R. Bai, and Y. J. Cao. "An improved particle swarm optimization algorithm for unit commitment." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 28, no. 7 (2006): 482-490.

[14] Kamboj, V.K., Bath, S.K. & Dhillon, J.S. Neural Comput & Applic (2017) 28: 1559. https://doi.org/10.1007/s00521-015-2124-4

[15] Afkousi-Paqaleh, M., M. Rashidinejad, and M. Pourakbari-Kasmaei. "An implementation of harmony search algorithm to unit commitment problem." Electrical Engineering 92, no. 6 (2010): 215-225.

[16] Kumar, V. & Kumar, D. Neural Comput & Applic (2018). https://doi.org/10.1007/s00521-018-3796-3

[17] Shukla, A. & Singh, S.N. INAEL (2016) 1: 21. https://doi.org/10.1007/s41403-016-0004-6

[18] Kamboj, V.K. Neural Comput & Applic (2016) 27: 1643. https://doi.org/10.1007/s00521-015-1962-4

[19] Xia, Yu, Muhammad Marwali, and Joe H. Chow. "A two-stage MIP based optimization framework for unit commitment and energy pricing." In 2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), pp. 1-6. IEEE, 2015.

[20] Li, Tao, and Mohammad Shahidehpour. "Price-based unit commitment: A case of Lagrangian relaxation versus mixed integer programming." IEEE transactions on power systems 20, no. 4 (2005): 2015-2025.

[21] Aalami, H. A., M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi. "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs." Applied Energy 87, no. 1 (2010): 243-250.

[22] Sahebi, Mir Mohammadreza, Esmail Abedini Duki, Mohsen Kia, Alireza Soroudi, and Mehdi Ehsan. "Simultanous emergency demand response programming and unit commitment programming in comparison with interruptible load contracts." IET generation, transmission & distribution 6, no. 7 (2012): 605-611.

[23] Abdollahi, Amir, Mohsen Parsa Moghaddam, Masoud Rashidinejad, and Mohammad Kazem Sheikh-El-Eslami. "Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC." IEEE transactions on smart grid 3, no. 1 (2011): 12-25.

[24] Arasteh, H. R., M. Parsa Moghaddam, M. K. Sheikh-El-Eslami, and A. Abdollahi. "Integrating commercial demand response resources with unit commitment." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 51 (2013): 153-161.

[25] Tumuluru, Vamsi Krishna, and Danny HK Tsang. "A two-stage approach for network constrained unit commitment problem with demand response." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 2 (2016): 1175-1183.
[26] Tumuluru, Vamsi Krishna, Zhe Huang, and Danny HK Tsang. "Integrating price responsive demand into the unit commitment problem." IEEE Transactions on Smart Grid 5, no. 6 (2014): 2757-2765.
[27] Rahmani, M., Hosseinian, S.H., Abedi, M., (2020), Sustainable Energy, Grids and Networks," 22, 2020, https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100348.
[28] Aalami, H. A., M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi. "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets." Electric Power Systems Research 80, no. 4 (2010): 426-435.
[29] Schweppe FC, Caramanis MC, Tabors RD, Bohn RE (1989) Spot Pricing of Electricity. Kluwer Academic Publishers. Appendix E
[30] Kirschen, Daniel S., Goran Strbac, Pariya Cumperayot, and Dilemar de Paiva Mendes. "Factoring the elasticity of demand in electricity prices." IEEE Transactions on Power Systems 15, no. 2 (2000): 612-617.
[31] Kirschen DS, Strbac G (2005) Fundamentals of Power System Economics. John Wiley & Sons Ltd, 2004C. R. Associates, Primer on demand side management. Report for the World Bank: 6–9
[32] Simopoulos, D. N., Y. S. Giannakopoulos, S. D. Kavatza, and C. D. Vournas. "Effect of emission constraints on short-term unit commitment." In MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 973-977. IEEE, 2006.
[33] Afkousi-Paqaleh, M., Noory, A.R., Abbaspour, A & Rashidinejad, M. (2010a) Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, 1-4, https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449393.
[34] Grigg, C., P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, M. Bhavaraju, R. Billinton, Q. Chen et al. "A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. The IEEE reliability test system-1996." IEEE. Trans. Power. Syst 14 (1999): 1010-1020.
[35] Y. F. Du, Y. Z. Li, C. Duan, H. B. Gooi, and L. Jiang. “An Adjustable Uncertainty Set Constrained Unit Commitment with Operation Risk Reduced through Demand Response” IEEE Transactions on Industrial Informatics (2020)
[36] MA Sadeghi, M Jafari Shahbazzadeh, A Abdollahib, M Eslami, M Alizadeh “Robust flexibility driven security constrained unit commitment under wind uncertainty considering demand response and combined-cycle units” International Journal of Electrical Power & Energy Systems (2021)
[37] Jiayin Xu, Yinghao Ma, Kun Li, Zhiwei Li “Unit commitment of power system with large-scale wind power considering multi time scale flexibility contribution of demand response” Energy Reports, Volume 7, Supplement 7, Pages 342-352 (2021)
[۳۸] ابراهیم زارعی، محسن محمدیان علی اکبر قره ویسی"مشارکت پاسخ بار در برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌ها" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران- سال سیزدهم- شماره سوم - پائیز ۱۳۹۵
[۳۹] رضا غفارپور، یاشار هاشمی، حبیب اله اعلمی "برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدهای تولیدی و ارائه مدل احتمالی دسترسناپذیری نیروگاهها در شرایط اضطراری" مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران- سال چهاردهم- شماره سوم- پائیز ۱۳۹۶
[۴۰] حمید کریمی، شهرام جدید "تعیین قیمت بهینه برای برنامه‌های پاسخگویی بار با هدف بهبود هم‌زمان سود مصرف‌کنندگان و ضریب بار شبکه" مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران- سال هفدهم- شماره دوم- تابستان ۱۳۹۹