نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران
Iranian Electric Industry Journal
Of Quality And Productivity

سال دوم شماره چهارم پاییز و زمستان ۱۳۹۲
Vol 2 –No.4 Autumn and Winter

ارزیابی اقتصادی پاسخگویی بار در حضور مقادیر بالای انرژی باد در سیستم قدرت

جواد صائبی[۲،۱]، دانشجوی دکتری، محمدحسین جاویدی[۲،۱]، استاد، مجید علومی بایگی[۱]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران
j.saebi@ut.ac.ir
۲- آزمایشگاه تخصصی مطالعات سیستم و تجدید ساختار - دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران
h-javidi@um.ac.ir

چکیده: **به دلیل نوسانات تولید نیروگاه‌های بادی، نفوذ مقادیر بالای انرژی باد در سیستم قدرت با چالش‌های فراوانی روبرو می-باشد. در این راستا، پاسخگویی بار به عنوان ابزاری در جهت افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت و رفع عدم توازن تولید و مصرف حاصله از نوسانات تولید بادی، مورد توجه می‌باشد. از طرفی، نفوذ مقادیر بالای انرژی باد در سیستم قدرت می‌تواند سبب کاهش قیمت‌های بازار گردد که خود کاهش تمایل مصرف‌کننده به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت را به‌همراه خواهد داشت. از این رو، ارائه راهکاری مناسب برای ارزشگذاری منصفانه و واقعی پاسخگویی بار با توجه به کارایی‌های آن در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت تحت نفوذ سطوح بالای باد می‌تواند به افزایش مشارکت سمت مصرف کمک نماید. در این مقاله، روشی برای ارزشگذاری پاسخگویی بار به عنوان یک منبع مجازی ارائه می‌گردد. در فرمولاسیون این روش، علاوه بر قابلیت پاسخگویی بار در کاهش هزینه‌های تامین بار، کارایی آن در کاهش هزینه‌های تامین رزرو، روشن و خاموش‌شدن واحدها، از دست رفتن بار و قطع تولید بادی لحاظ گردیده است. در واقع، در این روش ماکزیمم قیمت مقرون به صرفه برای بهره‌بردار برای خرید پاسخگویی بار به عنوان یک منبع مجازی تعیین می‌گردد. نتایج این روش اطلاعات مهمی برای بهره‌بردار شبکه و نیز ارائه‌دهندگان پاسخگویی بار فراهم می‌آورد. کارایی روش پیشنهادی با شبیه سازی بر روی شبکه نمونه ۶ شینه نشان داده شده است. صحه‌گذاری روش نیز با اعمال آن در بازار انرژی و رزرو تحت نفوذ مقادیر بالای بادی بررسی گردیده است.**

واژه های کلیدی: پاسخگویی بار، تولید بادی، بهره‌برداری شبکه قدرت، ارزش پاسخگویی بار

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۱۲/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول : جواد صائبی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : خراسان رضوی، مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، آزمایشگاه مطالعات سیستم و تجدید ساختار

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

۱- مقدمه

نگرانی‌های جهانی در زمینه آلودگی و تغییرات جوی و مسائل زیست محیطی ناشی از آن، محدود بودن منابع سوخت فسیلی، توسعه تکنولوژی‌های تولید انرژی از طریق منابع تجدیدپذیر و کاهش هزینه‌های مربوطه تمایل جهانی به سمت منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریسیته را به همراه داشته است. ویژگی اصلی منابع تجدیدپذیر ماهیت وابستگی آن‌ها به شرایط محیطی می‌باشد. لذا، معمولاً تولید انرژی الکتریکی از طریق منابع تجدیدپذیر با عدم قطعیت همراه می‌باشد. نفوذ مقادیر بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش تولید، دو مشکل عمده در بهره‌برداری سیستم قدرت را در پی خواهد داشت. اولاً، سیستم قدرت باید انعطاف کافی برای جبران عدم توازن تولید و مصرف ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر را داشته باشد. بنابراین، چنین سیستمی بایستی به منابعی از قبیل ژنراتورهای با عملکرد سریع، نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و تکنولوژی ذخیره‌سازی مجهز باشد. ثانیاً، بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر به میزان زیاد، بهره-برداری از ژنراتورهای معمول را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد و ممکن است باعث انحراف از نقطه بهره‌برداری بهینه سیستم گردد [۱-۳].

اثرات نفوذ منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت به میزان انعطاف‌پذیری سیستم قدرت ارتباط دارد. با افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، اثرات نفوذ منابع تجدیدپذیر در افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و نیازمندی‌های رزرو سیستم را می‌توان کنترل نمود. یکی از راه‌های موثر در افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، استفاده از پاسخگویی بار در بهره‌برداری از شبکه می‌باشد. در واقع، برنامه‌های پاسخگویی بار با فراهم آوردن رزرو مجازی، که دارای عملکرد سریع برای سیستم جهت جبران عدم توازن تولید و مصرف می‌باشد، ضمن کاهش اثرات ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر، امکان نفوذ این منابع را بیش از پیش فراهم می‌کنند [۴-۶].

در شرایطی که افزایش تولید بادی در سیستم قدرت نیازمندی‌های رزرو سیستم را افزایش می‌دهد، ممکن است نوسانات تولید بادی باعث افزایش تغییرات تولید واحدهای مرسوم تولیدی گردد که کاهش عمر مفید آنها را به همراه خواهد داشت. لذا، توجه به پاسخگویی بار به عنوان ابزاری در جهت کاهش اثرات تولید بادی در بهره‌برداری سیستم قدرت می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

مطالعات زیادی در زمینه کاهش اثرات ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر، به ویژه انرژی بادی، در بهره‌برداری سیستم قدرت از طریق مدیریت مصرف صورت گرفته است [۷-۱۲]. با این وجود، در اکثر این مطالعات، کاهش قیمت‌های بازار انرژی ناشی از نفوذ مقادیر بالای انرژی بادی در نظر گرفته نشده است. نفوذ مقادیر بالای منابع بادی در سیستم قدرت، به دلیل کاهش هزینه‌های تولید، قیمت‌های انرژی را کاهش می‌دهد [۱۳]. در نتیجه، کاهش قیمت‌ها سبب کاهش تمایل سمت مصرف به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار می‌گردد. از طرفی، نیازمندی به پاسخگویی بار در جهت کاهش اثرات تولید بادی در بهره‌برداری سیستم لزوما در ساعات پیک و پرباری خطوط نخواهد بود. در طول شبانه روز ، نوسانات بادی نیازمند جبرانسازی عدم توازن انرژی می‌باشند. لذا، فراهم نمودن بستر مناسب برای تبادل پاسخگویی بار به عنوان یک منبع مجازی در بازار انرژی و رزرو راهکار مناسبی در جهت افزایش مشارکت سمت مصرف و نیز افزایش کارایی پاسخگویی بار در جهت کاهش هزینه‌های بهره‌برداری تولید بادی می‌باشد. در این راستا، ارزشگذاری عادلانه پاسخگویی بار با توجه به کارایی آن در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

در این مقاله، روشی برای ارزشگذاری پاسخگویی بار ارائه گردیده است. در فرمولاسیون این روش، علاوه بر قابلیت پاسخگویی بار در کاهش هزینه‌های تامین بار، کارایی آن در کاهش هزینه‌های تامین رزرو، روشن و خاموش شدن واحدها، از دست رفتن بار و قطع تولید بادی نیز لحاظ گردیده است.

در معرفی روش ارائه شده، بخش ۲ مقاله به معرفی بازار انرژی و رزرو با تولید بادی می‌پردازد. در بخش ۳ فواید و هزینه‌های پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفته و روش پیشنهادی برای ارزش‌گذاری پاسخگویی بار ارائه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ گزارش گردیده است. در پایان، بخش ۵ به جمع‌بندی مقاله می‌پردازد.

۲- بازار انرژی و رزرو در حضور تولید بادی

با توجه به خطای پیش‌بینی تولید بادی و نوسانات تولید آن، در بازار انرژی و رزرو می‌بایست برنامه‌ریزی‌های لازم جهت جبران عدم توازن تولید و مصرف صورت پذیرد. لذا، لحاظ کردن سناریوهای محتمل تولید بادی در زمان بهره‌برداری در برنامه‌ریزی انرژی و رزرو سیستم قدرت با مقادیر بالای تولید بادی امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. در این زمینه، مدل‌های زیادی پیشنهاد گردیده است [۱۴-۲۰]. در مرجع [۱۴]، با استفاده از برنامه ریزی تصادفی و با لحاظ نمودن سناریوهای تولید بادی، چارچوبی برای تسویه بازار انرژی و رزرو به صورت همزمان پیشنهاد گردیده است. تسویه بازار در دو مرحله برنامه ریزی تولید و مرحله بهره‌برداری زمان واقعی صورت می‌گیرد. در مرحله برنامه‌ریزی، تولید ژنراتورها با توجه به سناریوهای محتمل بادی تعیین می‌گردد. سپس، در مرحله بهره‌برداری زمان واقعی، انحراف تولید ژنراتورها در هر کدام از سناریوهای محتمل و در نتیجه رزرو مورد نیاز تعیین می-گردد. لازم به ذکر است که در این چارچوب، برای تولید بادی نیز همانند سایر ژنراتورهای مرسوم متغیر برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است که میزان آن بر اساس سناریوهای محتمل تولید بادی و مینیمم سازی هزینه‌های رزرو تعیین می‌گردد [۱۴].

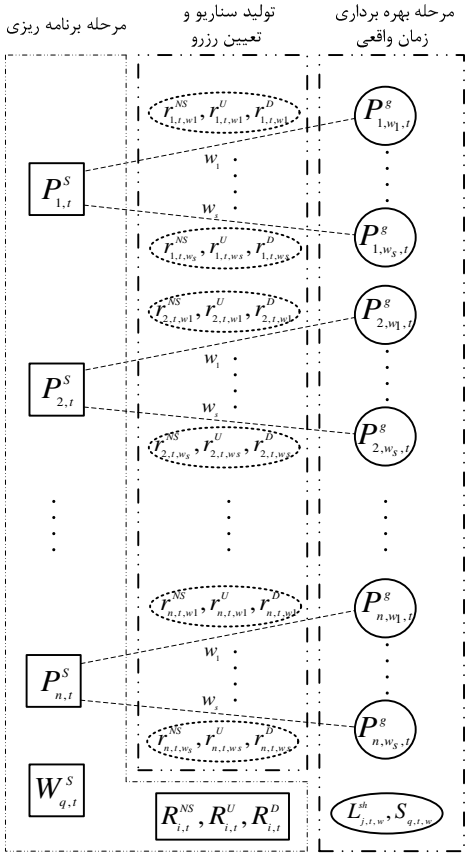
در این مقاله، از خروجی‌های بازار انرژی و رزرو مرجع [۱۴] به عنوان اطلاعات ورودی مورد نیاز به شرح زیر استفاده شده است:

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

- رزرو گردان افزایشی، کاهشی[1] و غیرگردان برنامه‌ریزی شده برای ژنراتورهای مرسوم در هر بازه زمانی که به ترتیب با $R^{U}_{i,t}$، $R^{D}_{i,t}$ و $R^{NS}_{i,t}$ نشان داده می‌گردد.
- رزرو گردان افزایشی، کاهشی و غیرگردان بکار گرفته شده برای ژنراتورهای مرسوم در هر بازه زمانی و در هر یک از سناریوهای محتمل تولید بادی که به ترتیب با $r^{U}_{i,t,w}$، $r^{D}_{i,t,w}$ و $r^{NS}_{i,t,w}$ نشان داده می‌گردد.
- مقادیر قطع ناخواسته بار در هر بازه زمانی و سناریوی تولید بادی که با $L^{sh}_{j,t,w}$ نشان داده می‌گردد.
- مقادیر قطع ناخواسته تولید بادی[2] برای هر تولیدکننده در هر بازه زمانی و سناریوی محتمل که با $S_{q,t,w}$ نشان داده می‌گردد.
- قیمت تسویه انرژی در هر بازه زمانی و سناریوی محتمل که با $\lambda^{E}_{t,w}$ نشان داده می‌گردد.

شکل (۱) شمای کلی تسویه بازار انرژی و رزرو با در نظر گرفتن سناریوهای تولید بادی را نشان می‌دهد. در این شکل متغییرهای مربوط به مرحله برنامه‌ریزی (روز قبل) داخل مربع و مستطیل و متغییرهای مربوط به بهره‌برداری در زمان واقعی داخل دایره و بیضی نشان داده شده اند. در این بازار، در مرحله برنامه‌ریزی، مقادیر تولید



شکل (۱): چگونگی تسویه بازار انرژی و رزرو

برنامه‌ریزی شده واحدهای تولیدی مرسوم بر اساس یک مقدار برنامه-ریزی شده برای تولید بادی ($W^{S}_{q,t}$) تعیین می‌گردد. تولید بادی برنامه‌ریزی شده بر اساس سناریوهای لحاظ شده برای آن و کاهش هزینه‌های تامین رزرو تعیین می‌گردد (به عنوان متغییر مساله). با تعیین مقادیر برنامه‌ریزی شده، رزرو مورد نیاز با قید تامین بار در هر یک از سناریوهای تولید بادی تعیین می‌گردد.

۳- ارزیابی اقتصادی پاسخگویی بار

در این بخش، به منظور یافتن ارزش واقعی پاسخگویی بار با توجه به پتانسیل آن در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ناشی از نوسانات تولید بادی یک فرمول‌بندی ریاضی ارائه شده است. با توجه به اینکه پاسخگویی بار هم به صورت کاهش مصرف و هم افزایش مصرف تعریف گردیده است [۲۱]، ارزش افزایش و کاهش بار در هر بازه زمانی بهره-برداری در این فرمول‌بندی تعیین می‌گردد. پاسخگویی بار به صورت کاهش مصرف تحت عنوان پاسخگویی بار افزاینده و افزایش مصرف در قالب پاسخگویی بار، تحت عنوان پاسخگویی بار کاهنده معرفی می-گردد.

۳-۱- فواید و هزینه‌های پاسخگویی بار

همانگونه که بیان گردید، ارزشگذاری پاسخگویی بار در این مقاله با توجه به کارایی آن در کاهش تاثیرات نوسانات تولید بادی در بهره-برداری از شبکه قدرت صورت می‌پذیرد. با توجه به شکل (۱)، اثرات عدم قطعیت تولید بادی در بهره‌برداری را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

- انحراف تولید واحدهای در مدار از مقادیر برنامه‌ریزی شده که در قالب برنامه‌ریزی رزرو گردان دیده می‌شود.
- نیاز به در مدار قرار گرفتن برخی واحدها در مرحله بهره-برداری زمان واقعی که در قالب رزرو غیرگردان دیده می-شود.
- نیاز به قطع بار در برخی از سناریوهای تولید بادی
- نیاز به قطع تولید بادی در برخی از سناریوهای تولید بادی

پاسخگویی بار با فراهم آوردن انعطاف در توازن تولید و مصرف، قادر به کاهش اثرات فوق و در نتیجه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد. لذا، به منظور تعیین ارزش واقعی پاسخگویی بار، کارایی آن در کاهش اثرات فوق بررسی و کمی‌سازی شده است. بدین منظور، با توجه به نتایج بازار انرژی و رزرو، مقدار کل پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده مورد نیاز سیستم برای جبران اثرات تولید بادی در بهره‌برداری محاسبه گردیده، سپس با توجه به این مقادیر، فواید حاصله از آن در قالب توابع ریاضی بیان شده است.

مقدار کل پاسخگویی بار افزاینده مورد نیاز ($Td^{U}_{t,w}$) را می‌توان با توجه به خروجی‌های بازارانرژی و رزرو بدست آورد. این مقدار از جمع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

مقادیر رزرو گردان افزایشی و رزرو غیرگردان بکارگرفته شده و میزان قطع بار فراخوانی شده در زمان t و سناریوی w بدست می‌آید:

$$Td^{U}_{t,w} = \sum_{i}(r^{U}_{i,t,w} + r^{NS}_{i,t,w}) + \sum_{j} L^{sh}_{j,t,w} \qquad (۱)$$

به طور مشابه، مقدار کل پاسخگویی بار کاهنده مورد نیاز ($Td^{D}_{t,w}$) از جمع مقادیر رزرو گردان کاهشی بکارگرفته شده و میزان قطع تولید بادی فراخوانی شده در زمان t و سناریوی w بدست می‌آید:

$$Td^{D}_{t,w} = \sum_{i} r^{D}_{i,t,w} + \sum_{q} S_{q,t,w} \qquad (۲)$$

در ادامه، فواید و هزینه‌های پاسخگویی بار ارائه می‌گردد:

۱- کاهش نیازمندی‌های رزرو سیستم: پاسخگویی بار افزاینده منجر به کاهش هزینه‌های رزرو افزایشی (گردان و غیرگردان) و پاسخگویی بار کاهنده باعث کاهش هزینه‌های رزرو گردان کاهشی برنامه‌ریزی شده می‌گردد. با استفاده از نتایج مدل تسویه بازار انرژی و رزرو [۱۴]، اگر $R^{U}_{i,t}$، $R^{D}_{i,t}$ و $R^{NS}_{i,t}$ به ترتیب مقادیر رزرو گردان افزایشی، کاهشی و غیرگردان برنامه‌ریزی شده واحد iام در زمان t باشند، با مقادیر کل پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده که به ترتیب با روابط (۱) و (۲) تعیین می‌شود، پاسخگویی بار جایگزین رزرو برنامه-ریزی شده می‌گردد. لذا، سود حاصله از پاسخگویی بار در کاهش هزینه‌های تامین رزرو گردان افزایشی، کاهشی و غیرگردان واحدها به ترتیب با توابع ρ_{RU}، ρ_{RD} و ρ_{NS} به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\rho_{RU}(i,t) = C^{RU}_{i,t} R^{U}_{i,t} \quad , \quad \forall i,t \qquad (۳)$$

$$\rho_{RD}(i,t) = C^{RD}_{i,t} R^{D}_{i,t} \quad , \quad \forall i,t \qquad (۴)$$

$$\rho_{RNS}(i,t) = C^{RNS}_{i,t} R^{NS}_{i,t} \quad , \quad \forall i,t \qquad (۵)$$

۲- کاهش هزینه‌های راه اندازی واحدها: در برخی از سناریوهای با تولید بادی پایین در بازار تسویه انرژی و رزرو، ممکن است به راه-اندازی واحدهای مرسوم نیاز داشته باشیم که در این صورت هزینه‌های بهره‌برداری سیستم افزایش می‌یابد. با انتخاب مقدار بیان شده در رابطه (۱) برای پاسخگویی بار افزاینده، از راه اندازی واحدهایی که در زمان t و سناریوی w در بازار انرژی و رزرو راه اندازی گردیده اند (دارای مقدار رزرو غیرگردان $r^{NS}_{i,t,w}$ غیر صفر می‌باشند) توسط پاسخگویی بار افزاینده ممانعت می‌گردد. بنابراین، به میزان هزینه راه اندازی این واحدها ($C^{SU}_{i,t}$)، هزینه‌های بهره‌برداری کاهش می‌یابد. در صورتیکه احتمال رخداد سناریوی w برابر π_w باشد، سود مورد انتظار پاسخگویی بار در کاهش هزینه راه اندازی واحد i به ازای $\{(i,t,w) \mid r^{NS}_{i,t,w} \neq 0\}$ در قالب تابع ρ_{SU} به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\rho_{SU}(i,t,w) = \pi_w . C^{SU}_{i,t} \qquad (۶)$$

۳- کاهش هزینه‌های از دست رفتن بار: نوسانات تولید بادی به همراه محدودیت‌های فنی واحدها و نیز محدودیت توان خطوط باعث قطع ناخواسته بار در برخی سناریوهای تولید بادی می‌گردد که هزینه-های بالای قطع بار را به همراه خواهد داشت. با انتخاب مقدار بیان شده در رابطه (۱) برای پاسخگویی بار افزاینده در زمان t و سناریوی w که قطع بار فراخوانی شده است، سودی معادل کاهش هزینه قطع بار ($C^{VOLL}_{j,t} . L^{sh}_{i,t,w}$) حاصل می‌گردد. در صورتیکه احتمال رخداد سناریوی w برابر π_w باشد، سود مورد انتظار حاصله از پاسخگویی بار در کاهش هزینه‌های قطع ناخواسته بار به ازای $\{(j,t,w) \mid L^{sh}_{j,t,w} \neq 0\}$ در قالب تابع ρ_{LS} بصورت زیر قابل بیان است:

$$\rho_{LS}(j,t,w) = \pi_w . C^{VOLL}_{j,t} . L^{sh}_{j,t,w} \qquad (۷)$$

۴- کاهش هزینه‌های قطع تولید بادی: محدودیت‌های فنی واحدها، محدودیت خطوط و نیز عوامل اقتصادی باعث می‌گردد که در برخی شرایط، مقداری از تولید بادی قطع گردد. اگر افزایش مصرف از طریق تغذیه مجدد بار در همچنین شرایطی روی دهد، قطع تولید بادی کاهش یافته و مزایای ناشی از استفاده از تولید بادی در بهره‌برداری شبکه افزایش می‌یابد. با انتخاب مقدار بیان شده در رابطه (۲) برای پاسخگویی بار کاهنده در زمان t و سناریوی w، که قطع تولید بادی فراخوانی شده است، سودی معادل کاهش هزینه قطع تولید بادی ($V^{S}_{q} . S_{q,t,w}$) حاصل می‌گردد. در صورتیکه احتمال رخداد سناریوی w برابر π_w باشد، تابع سود مورد انتظار پاسخگویی بار در کاهش قطع تولید بادی به ازای $\{(q,t,w) \mid S_{q,t,w} \neq 0\}$ به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$\rho_{SP}(q,t,w) = \pi_w . V^{S}_{q} . S_{q,t,w} \qquad (۸)$$

یک مگاوات تزریق تولید بادی واقع در شین q به سیستم قدرت، از یک طرف هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری را کاهش می‌دهد و از طرفی هزینه‌های مرتبط با عدم قطعیت در سیستم از جمله رزرو سیستم را افزایش می‌دهد [۱۴]. بنابراین، V^{S}_{q} از تفاضل میانگین سود (AB_q) و هزینه‌های عدم قطعیت (AUC_q) حاصله از تزریق یک مگاوات تولید بادی در شین q حاصل می‌گردد.

$$V^{S}_{q} = AB_{q} - AUC_{q} \qquad (۹)$$

به طوری که AB_q، کاهش هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری ناشی از تزریق یک مگاوات ساعت تولید بادی در شین q بر حسب دلار بر مگاوات ساعت بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$AB_{q} = \frac{EC^{*}_{0} - EC^{*}}{\bar{P}_{w,q}} \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، EC^{*}_{0} و EC^{*} به ترتیب مقادیر بهینه تابع هدف بازار انرژی و رزرو مرجع [۱۴] با لحاظ کردن تولید بادی و بدون تولید بادی می‌باشند و AUC_q، بر حسب دلار بر مگاوات ساعت، برابر با افزایش مورد انتظار هزینه‌های عدم قطعیت در بهره‌برداری ناشی از تزریق یک مگاوات ساعت تولید بادی در شین q بوده و به صورت زیر تعریف می-گردد:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

$$AUC_q = \frac{EC^* - EC_P^*}{\overline{P}_{W,q}} \quad (۱۱)$$

که در آن EC_P^* مقدار بهینه تابع هدف بازار انرژی و رزرو در صورت معلوم بودن مقدار دقیق تولید بادی می‌باشد.

۵-تغییر در هزینه‌های تامین بار: تغییر تقاضا در قالب پاسخگویی بار باعث تغییر هزینه‌های تامین بار می‌گردد. کاهش تقاضا، سبب کاهش در هزینه تامین بار تحت قیمت تسویه بازار انرژی می‌گردد. بالعکس، افزایش تقاضا افزایش هزینه‌های تامین بار را به‌همراه خواهد داشت. با توجه به قیمت تسویه انرژی ($\lambda_{t,w}^E$)، کاهش بار در قالب پاسخگویی بار افزاینده به میزان $Td_{t,w}^U$منجر به کاهش هزینه‌های تامین بار به میزان $\lambda_{t,w}^E.Td_{t,w}^U$ شده و افزایش بار در قالب پاسخگویی بار کاهنده منجر به افزایش هزینه‌های تامین بار به میزان $\lambda_{t,w}^E.Td_{t,w}^D$ می‌گردد. در صورتیکه احتمال رخداد سناریوی w برابر π_wباشد، تغییر در هزینه مورد انتظار تامین بار ناشی از پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t و سناریوی w به ترتیب در قالب توابع ξ^U و ξ^Dبصورت زیر قابل بیان است:

$$\xi^U(t,w) = \pi_w.\lambda_{t,w}^E.Td_{t,w}^U \quad (۱۲)$$

$$\xi^D(t,w) = -\pi_w.\lambda_{t,w}^E.Td_{t,w}^D \quad (۱۳)$$

علامت منفی در رابطه (۱۳) نشان دهنده افزایش هزینه با افزایش بار می‌باشد.

۶-هزینه‌های پاسخگویی بار: پرداخت به مصرف‌کننده‌ها بابت ارائه پاسخگویی بار تحت دو مولفه پرداخت بابت آمادگی و پرداخت جهت ارائه پاسخگویی بار صورت می‌گیرد. در این مقاله، فرض شده است که قیمت پرداختی بابت پاسخگویی بار برای همه مصرف‌کنندگان یکسان می‌باشد. به عبارت دیگر، به همه مصرف‌کنندگان بهای آمادگی یکسانی بابت ارائه پاسخگویی بار پرداخت می‌گردد و در صورت فراخوانی، قیمت یکنواخت پاسخگویی بار ملاک پرداخت خواهد بود. با فرض اینکه $C_t^{U,A}$ و $C_t^{D,A}$به ترتیب هزینه‌های آمادگی برای ارائه پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده باشند و TDR_t^Uو TDR_t^Dمیزان آمادگی مصرف‌کنندگان برای پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t باشند، آنگاه توابع η_A^Uو η_A^D به ترتیب هزینه آمادگی پرداخت شده به مصرف‌کنندگان برای پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده خواهد بود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta_A^U(t) = C_t^{U,A}\, TDR_t^U \quad (۱۴)$$

$$\eta_A^D(t) = C_t^{D,A}\, TDR_t^D \quad (۱۵)$$

مصرف‌کننده بایستی به میزان TDR_t^U و TDR_t^D به ترتیب برای ارائه پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t آماده باشد که مقادیر آنها برابر با بیشترین مقدار فراخوانی شده پاسخگویی بار در کلیه سناریوهای در نظرگرفته شده برای زمان t می‌باشد:

$$TDR_t^U = \max_w \left(Td_{t,w}^U\right), \quad \forall j,t \quad (۱۶)$$

$$TDR_t^D = \max_w \left(Td_{t,w}^D\right), \quad \forall j,t \quad (۱۷)$$

همچنین، در صورت فراخوانی پاسخگویی بار افزاینده یا کاهنده از جانب مصرف‌کننده، با توجه به قیمت پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده، بایستی پرداخت صورت گیرد. در صورتیکه قیمت پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t و سناریوی w به ترتیب با $\lambda_{t,w}^{D,U}$ و $\lambda_{t,w}^{D,D}$ نشان داده شوند، پرداخت مورد انتظار به مصرف‌کنندگان برای ارائه پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در شرایط بهره‌برداری زمان واقعی به ترتیب به کمک توابع η_R^Uو η_R^D قابل بیان می‌باشند:

$$\eta_R^U(t,w) = \pi_w.\lambda_{t,w}^{D,U}.Td_{t,w}^U \quad (۱۸)$$

$$\eta_R^D(t,w) = \pi_w.\lambda_{t,w}^{D,D}.Td_{t,w}^D \quad (۱۹)$$

۳-۲- ارزشگذاری پاسخگویی بار افزاینده

با توجه به فواید و هزینه‌های پاسخگویی بار افزاینده، که در بخش ۳-۱ ذکر گردید، به کمک روابط (۲۰) و (۲۱) می‌توان ارزش پاسخگویی بار افزاینده را در جهت کاهش اثرات نوسانات تولید بادی در بهره‌برداری سیستم قدرت محاسبه نمود. در واقع، ارزش پاسخگویی بار افزاینده برابر است با ماکزیمم مقدار ممکن برای $\lambda_{t,w}^{D,U}$از دیدگاه بهره‌بردار شبکه. پاسخگویی بار افزاینده باعث کاهش هزینه‌های رزرو گردان افزایشی، رزرو غیرگردان، راه‌اندازی واحدها، قطع بار و تامین بار می‌گردد. در مقابل، هزینه‌های آمادگی و فراخوانی پاسخگویی بار را برای بهره‌بردار به همراه خواهد داشت. در صورتیکه فواید پاسخگویی بار افزاینده از هزینه‌های آن بیشتر باشد، فراخوانی آن مقرون به صرفه خواهد بود، بنابراین:

$$\begin{aligned}&\sum_i \rho_{RU}(i,t) + \sum_i \rho_{RNS}(i,t) + \sum_i \rho_{SU}(i,t,w) \\ &+ \sum_j \rho_{LS}(j,t,w) + \xi^U(t,w) \geq \eta_A^U(t) + \eta_R^U(t,w)\end{aligned} \quad (۲۰)$$

با جایگذاری روابط (۳)، (۵)، (۶)، (۷)، (۱۲)، (۱۴) و (۱۸) در رابطه فوق و ساده‌سازی برحسب متغیر $\lambda_{t,w}^{D,U}$، حد بالای قیمت پاسخگویی بار افزاینده، که همان ارزش آن خواهد بود، بدست می‌آید:

$$\begin{aligned}\lambda_{t,w}^{D,U} \leq\ & \lambda_{t,w}^E + \frac{\sum_i \rho_{RU}(i,t) + \sum_i \rho_{RNS}(i,t)}{\pi_w.Td_{t,w}^U} \\ &+ \frac{\sum_{i\in I} \rho_{SU}(i,t,w) + \sum_{j\in I} \rho_{LS}(j,t,w)}{\pi_w.Td_{t,w}^U} \\ &- \frac{\eta_A^U(t)}{\pi_w.Td_{t,w}^U} \\ &= \overline{\lambda}_{t,w}^{D,U} = \lambda_{t,w}^E + \lambda_{t,w}^{B,U}\end{aligned} \quad (۲۱)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

همانطور که در رابطه (۲۱) مشاهده می‌گردد، ارزش کل پاسخگویی بار افزاینده ($\overline{\lambda}^{D,U}_{t,w}$) از جمع قیمت تسویه انرژی ($\lambda^{E}_{t,w}$) و پارامتر $\lambda^{B,U}_{t,w}$ بدست می‌آید. پارامتر $\lambda^{B,U}_{t,w}$ در واقع ارزش خالص یک مگاوات کاهش بار در بهره‌برداری سیستم قدرت می‌باشد.

۳-۳- ارزشگذاری پاسخگویی بار کاهنده

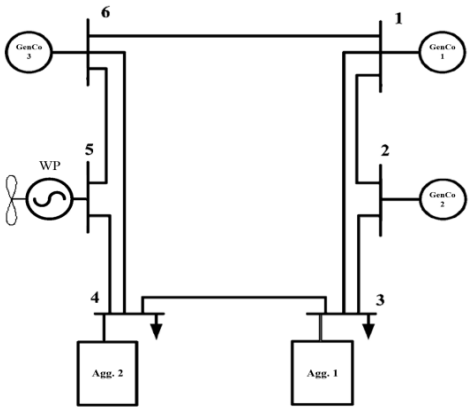
مشابه قسمت قبل، ارزش پاسخگویی بار کاهنده برابر است با ماکزیمم مقدار ممکن برای $\lambda^{D,D}_{t,w}$ از دیدگاه بهره‌بردار شبکه. پاسخگویی بار کاهنده باعث کاهش هزینه‌های رزرو گردان کاهشی، قطع تولید بادی و تامین بار می‌گردد. در مقابل، هزینه‌های آمادگی و فراخوانی پاسخگویی بار را برای بهره‌بردار به همراه خواهد داشت. در صورتیکه فواید پاسخگویی بار کاهنده از هزینه‌های آن بیشتر باشد، فراخوانی آن مقرون به صرفه خواهد بود، بنابراین:

$$\sum_{i}\rho_{RD}(i,t)+\sum_{q}\rho_{SP}(q,t,w)+\xi^{D}(t,w) \geq \eta^{D}_{A}(t)+\eta^{D}_{R}(t,w) \quad (۲۲)$$

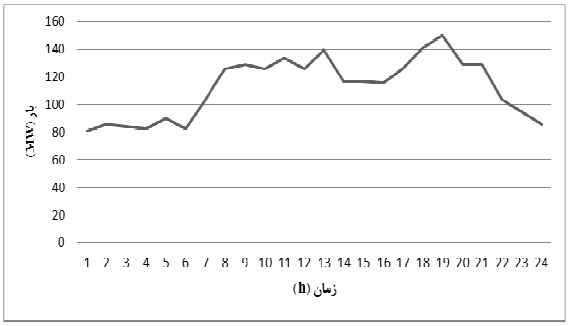
با جایگذاری روابط (۴)، (۸)، (۱۳)، (۱۵) و (۱۹) در رابطه فوق و ساده‌سازی برحسب متغییر $\lambda^{D,D}_{t,w}$، حد بالای قیمت پاسخگویی بار کاهنده، که همان ارزش آن خواهد بود، بدست می‌آید:

$$\lambda^{D,D}_{t,w} \leq -\lambda^{E}_{t,w}+\frac{\sum_{i}\rho_{RD}(i,t)}{\pi_{w}.Td^{D}_{t,w}}+\frac{\sum_{q}\rho_{SP}(q,t,w)}{\pi_{w}.Td^{D}_{t,w}} -\frac{\eta^{D}_{A}(t)}{\pi_{w}.Td^{D}_{t,w}} = \overline{\lambda}^{D,D}_{t,w} = -\lambda^{E}_{t,w}+\lambda^{B,D}_{t,w} \quad (۲۳)$$

همانطور که در رابطه (۲۳) مشاهده می‌گردد، ارزش کل پاسخگویی بار کاهنده ($\overline{\lambda}^{D,D}_{t,w}$) از تفریق قیمت تسویه انرژی ($\lambda^{E}_{t,w}$) و پارامتر $\lambda^{B,D}_{t,w}$ بدست می‌آید. این بدین معنی است که پاسخگویی بار کاهنده به میزان $\lambda^{B,D}_{t,w}$ در بهره‌برداری مفید بوده و در مقابل باعث افزایش هزینه تامین بار نیز می‌گردد. پارامتر $\lambda^{B,D}_{t,w}$ در واقع ارزش خالص یک مگاوات افزایش بار در بهره‌برداری سیستم قدرت می‌باشد.



شکل (۲): شبکه ۶ شینه مورد مطالعه



شکل (۳): پروفیل بار روزانه

۴- شبیه‌سازی

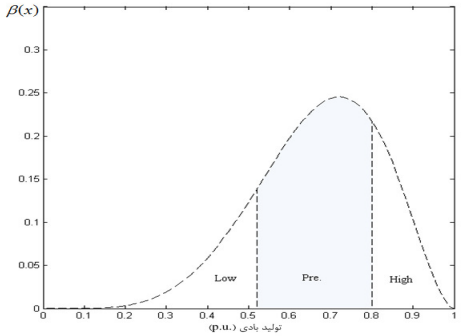
۴-۱- شبکه نمونه

به منظور بررسی روش پیشنهادی برای ارزیابی پاسخگویی بار، از یک سیستم ۶ شینه نمونه، که در شکل (۲) نشان داده شده، استفاده گردیده است. با توجه به هدف اصلی مقاله که ارزشگذاری پاسخگویی بار می باشد، نحوه پخش بار در نتایج تاثیر بسزایی نداشته، به همین دلیل، نظیر تحقیقات مشابه صورت گرفته در این زمینه، در این مقاله نیز از پخش بار DC استفاده گردیده و فارغ از نوع بارها، فقط بخش اکتیو آنها در پخش بار لحاظ گردیده است. اطلاعات مربوط به راکتانس خطوط در شبکه مورد مطالعه استخراج شده از مرجع [۲۲] در بخش ضمایم (جدول (۸)) گزارش گردیده است. سیستم نمونه مورد مطالعه، از ۳ شرکت ژنراتوری[۳] و ۲ ارائه‌دهنده پاسخگویی بار[۴] تشکیل شده

جدول (۱): اطلاعات شرکت‌های ژنراتوری

شرکت ژنراتوری	واحد	هزینه حدی ($/MWh)	$P^{\max}_{G_i}$ (MW)	$P^{\min}_{G_i}$ (MW)	$C^{RU}_{i,t}=C^{RD}_{i,t}$ ($/MWh)	$C^{RNS}_{i,t}$ ($/MWh)
۱	۱	۳۰	۵۰	۵	۸	۷
	۲	۶۰	۲۵	۵	۷	۶
۲	۳	۷۰	۲۵	۵	۷	۶
	۴	۸۰	۲۵	۵	۷	۶
۳	۵	۲۰	۵۰	۱۰	۱۰	۸

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]



شکل (۴): تابع توزیع بتا

است. هزینه آمادگی برای پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده برابر با ۱ $/MWh در نظر گرفته شده است. بازه زمانی در نظر گرفته شده برای بهره‌برداری ۲۴ ساعت لحاظ گردیده و پیک بار در بازه مورد نظر ۱۵۰ MW می‌باشد. شکل (۳) پروفیل بار روزانه در بازه زمانی برنامه-ریزی را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به بارمصرفی شبکه در بخش ضمایم (جدول (۷)) ارائه گردیده است . اطلاعات مرتبط با شرکت‌های ژنراتوری استخراج شده از [۱۴] در جدول (۱) نشان داده شده است. هزینه‌های قطع تولید بادی و قطع ناخواسته بار به ترتیب برابر با ۳۰ $/MWh و ۱۰۰۰ $/MWh لحاظ گردیده اند.

۴-۲- تعیین سناریوی‌های بادی

تولیدکننده بادی (WP) در شین ۵ قرار گرفته است. برای تعیین پروفیل تولید بادی روزانه از اطلاعات پیش بینی تولید بادی در یک روز تابستان در شبکه ایرلند استفاده گردیده است [۲۳]. به منظور لحاظ نمودن خطای پیش‌بینی تولید بادی در کوتاه مدت از تابع توزیع بتا[۵] [۲۴] حول مقدار پیش‌بینی شده در هر بازه زمانی استفاده شده است (شکل (۴)). برای سادگی تحلیل نتایج، تنها ۳ سناریو برای تولید بادی در نظر گرفته شده است. این سناریوها عبارتند از: سناریوی پیش‌بینی (Pre) با احتمال ۰/۵، سناریوی با تولید کم (Low) با

جدول (۲): سناریوهای تولید بادی

زیربازه	ساعت	تولید بادی (MW)		
		Pre	Low	High
۱	۱ تا ۶	۸	۶	۱۲
۲	۷ تا ۱۲	۶	۴	۹
۳	۱۳ تا ۱۸	۲۵	۱۹	۳۰
۴	۱۹ تا ۲۴	۲۰	۱۲	۲۵

احتمال ۰/۲ و سناریوی با تولید زیاد (High) با احتمال ۰/۳. نحوه تعیین این سناریوها از روی تابع توزیع بتا در شکل (۴) نشان داده شده است. به عنوان مثال، کل سناریوهای تولیدی واقع در کران پایین تابع توزیع بتا که احتمال وقوع آنها برابر ۰/۲ می‌باشد ($\int_0^x \beta(x)\,dx = 0.2$) را تحت یک سناریو به عنوان Low در نظر گرفته و مقدار مورد انتظار تولید در این محدوده بعنوان تولید بادی این سناریو لحاظ گردیده است. علاوه بر این، بازه زمانی مورد مطالعه، به ۴ زیر بازه زمانی ۶ ساعته با سناریوهای بادی یکسان تقسیم بندی شده است. لازم به ذکر است که درصد نفوذ بادی (نسبت تولید بادی به پیک بار) برابر با ۲۰ درصد لحاظ شده است. جدول (۲) سناریوهای تعیین شده در هر زیربازه را نشان می‌دهد.

۴-۳- تحلیل نتایج

به منظور حل مساله بازار انرژی و رزرو، که یک مساله باینری مخلوط خطی است [۱۴]، از حل کننده CPLEX [۲۵] تحت نرم افزار GAMS استفاده شده است [۲۶].

شکل (۵) ارزش پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده را در هر ساعت از بازه برنامه‌ریزی و سناریوهای تولید بادی نشان می‌دهد. در این شکل، ارزش خالص پاسخگویی بار ($\lambda^{B,\cdot\cdot}_{t,w}$)، ارزش کل پاسخگویی بار ($\bar{\lambda}^{D,\cdot\cdot}_{t,w}$) و قیمت تسویه بازار انرژی ($\lambda^{E}_{t,w}$) نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که ارزش پاسخگویی بار برابر است با بیشترین قیمتی که بهره-

جدول (۳): جزئیات ارزیابی پاسخگویی بار

زیربازه	ساعت	سناریو	ρ_{RU}	ρ_{RD}	ρ_{RNS}	ρ_{SU}	$\lambda^{E}_{t,w}$	$Td^{U}_{t,w}$	$Td^{D}_{t,w}$	$\lambda^{B,U}_{t,w}$	$\lambda^{B,D}_{t,w}$	$\bar{\lambda}^{D,U}_{t,w}$	$\bar{\lambda}^{D,D}_{t,w}$
۱	۳	pre	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	-۳۰
		Low	۱۶	۰	۰	۰	۳۰	۲	۰	۳۵	۰	۶۵	-۳۰
		High	۰	۳۲	۰	۰	۳۰	۰	۴	۰	۲۳/۳۳	۳۰	-۶/۶۷
۲	۱۱	pre	۰	۱۴	۳۰	۱۲۰	۸۰	۵	۲	۵۰	۱۲	۱۳۰	-۶۸
		Low	۰	۰	۳۰	۴۰	۸۰	۵	۰	۶۵	۰	۱۴۵	-۸۰
		High	۰	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۰	۶۰	-۶۰
۳	۱۶	pre	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	-۳۰
		Low	۸	۰	۳۰	۴۰	۶۰	۶	۰	۶۰	۰	۱۲۰	-۶۰
		High	۰	۴۰	۰	۰	۳۰	۰	۵	۰	۲۳/۳۳	۳۰	-۶/۶۷
۴	۲۲	pre	۰	۱۰۴	۰	۰	۳۰	۰	۸	۰	۲۴	۳۰	-۶
		Low	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	-۳۰
		High	۰	۱۰۴	۰	۰	۳۰	۰	۱۳	۰	۲۳/۳۳	۳۰	-۶/۶۷

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

بردار به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم حاضر است به مصرف کننده پرداخت نماید.

جزئیات نتایج حاصله از ارزیابی پاسخگویی بار در چهار ساعت مختلف در بازه زمانی برنامه‌ریزی در جدول (۳) گزارش گردیده است. در این جدول، فواید پاسخگویی بار به تفکیک مشخص گردیده و مقدار پاسخگویی بار مورد نیاز گزارش شده است. نتایج بدست آمده از ارزیابی پاسخگویی بار را می‌توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

۱- پاسخگویی بار افزاینده بیشتر در سناریوی با تولید بادی کم فراخوانی شده و ارزش آن در این سناریو بیشتر است.

۲- فراخوانی پاسخگویی بار، به منظور کاهش هزینه‌های تولید بادی، تنها در ساعات پرباری صورت نمی‌گیرد بلکه در سایر بازه‌های زمانی که اثر نوسانات بادی مشهود می‌باشد نیز روی می‌دهد. بعنوان نمونه در بازه‌های زمانی با تولید پایین بادی در شکل (۵) قسمت (الف-۲) پاسخگویی بار دارای ارزش خالص غیر صفر می‌باشد.

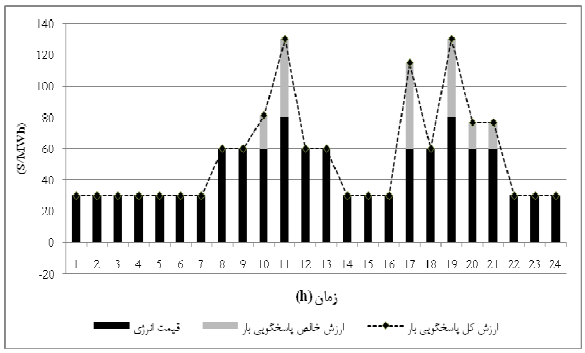
۳- ارزش پاسخگویی بار افزاینده در برخی ساعات شبانه روز تا حدود دو برابر قیمت انرژی در آن ساعت نیز افزایش می‌یابد. بعنوان نمونه، ارزش کل پاسخگویی بار افزاینده در ساعت ۱۱ و سناریوی Low (جدول (۳)) برابر ۱۴۵ دلار بر مگاوات ساعت می‌باشد که در این شرایط قیمت انرژی برابر ۸۰ دلار بر مگاوات ساعت است.

۴- در سناریوی با تولید بادی بالا، به دلیل بالا بودن تولید بادی، نیاز به کاهش بار کمتر بوده و در نتیجه ارزش خالص پاسخگویی بار در این شرایط پایین یا صفر می‌باشد (شکل (۵) قسمت (الف-۳)).

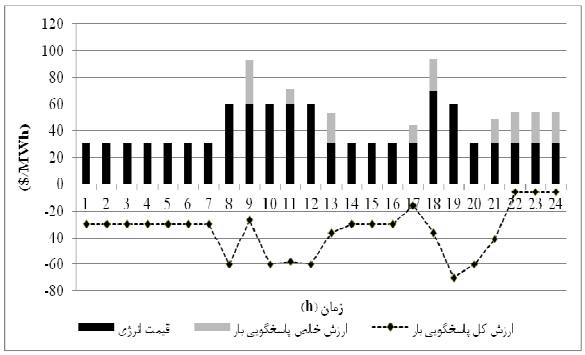
۵- با توجه به جزء آخر در رابطه (۲۱) و (۲۳)، مقدار هزینه آمادگی پاسخگویی بار در جایگزینی آن با رزرو برنامه‌ریزی شده تاثیر قابل توجهی خواهد داشت.

۶- فراخوانی و ارزش پاسخگویی بار کاهنده در سناریوی با تولید بادی بالا بیشتر است.

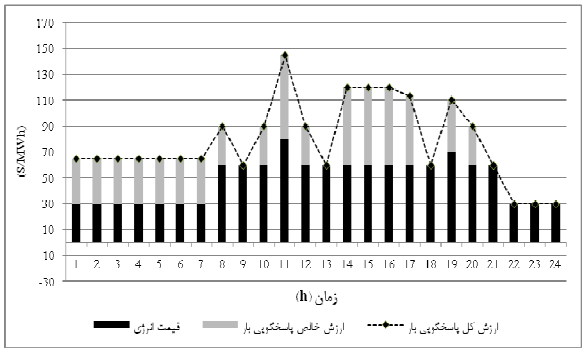
۷- ارزش کل پاسخگویی بار کاهنده معادل با قیمت تمام شده انرژی



(الف-۱): سناریوی Pre



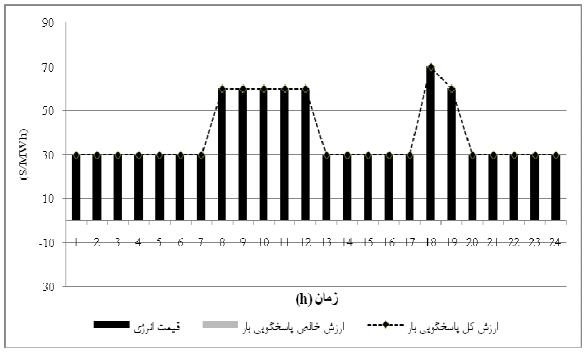
(ب-۱): سناریوی Pre



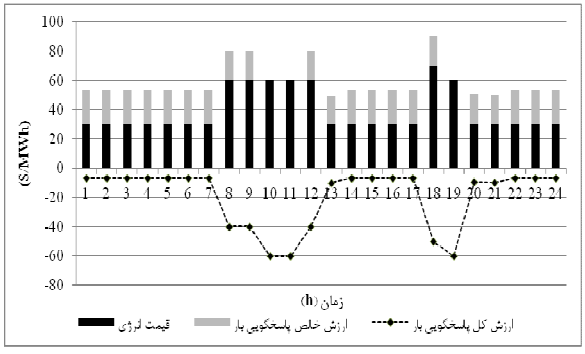
(الف-۲): سناریوی Low



(ب-۲): سناریوی Low



(الف-۳): سناریوی High



(ب-۳): سناریوی High

شکل (۵): ارزیابی پاسخگویی بار در بازه زمانی مورد مطالعه و سناریوهای تولید بادی: (الف) پاسخگویی بار افزاینده (ب) پاسخگویی بار کاهنده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

برای مصرف‌کنندگانی است که افزایش بار از طریق تغذیه مجدد بار خود را در ساعات موردنظر بهره‌بردار انجام می‌دهند (قدر مطلق $\overline{\lambda}_{t,w}^{D,D}$). به عبارتی دیگر، قیمت تمام شده انرژی برای شرکت‌کننده پاسخگویی بار افزاینده، در صورتی که جبران بار خود را در طول این ساعات انجام دهد، بسیار کمتر خواهد بود.

۸- در صورتیکه ارزش کل پاسخگویی بار کاهنده ($\overline{\lambda}_{t,w}^{D,D}$) مثبت باشد، و یا ارزش خالص پاسخگویی بار کاهنده بیشتر از قیمت انرژی باشد، به ارائه‌دهندگان پاسخگویی بار کاهنده در این شرایط به میزان $\overline{\lambda}_{t,w}^{D,D}$ بابت مصرف انرژی پرداخت صورت خواهد گرفت.

۹- ارزش پاسخگویی بار کاهنده در ساعات کم باری و با تولید بادی بالا بیشتر است (شکل (۵) قسمت (ب-۳)).

۱۰- با خطای پیش بینی باد ۵۰ درصد برای روز آینده، ماکزیمم ۸/۶ درصد پاسخگویی بار برای پوشش اثرات نوسانات بادی در بهره‌برداری از شبکه نیاز خواهد بود.

همانگونه که مشاهده گردید، در سناریوهای مورد مطالعه قطع تولید بادی و قطع بار رخ نداده و بالطبع اثرات آن در ارزشگذاری پاسخگویی بار لحاظ نگردیده است. نوسانات تولید بادی و محدودیت‌های فنی واحدهای تولیدی مرسوم ممکن است قطع تولید بادی و یا بار را به همراه داشته باشد. بدین منظور، دو حالت دیگر برای بررسی ارزیابی پاسخگویی بار بررسی شده است. در حالت اول، تولید بادی سناریوی با تولید زیاد (High) در زیر بازه ۴ در جدول (۲) از ۲۵ مگاوات به ۴۵ مگاوات افزایش داده شده است. افزایش تولید بادی در این زیر بازه با بار کم، قطع تولید بادی را به‌همراه خواهد داشت. در حالت دوم، تولید بادی سناریوی با تولید کم (Low) در زیربازه ۳، از ۱۹ به ۵ مگاوات کاهش داده شده و نرخ افزایش توان واحدها به ۲۰ مگاوات بر ساعت محدود گردیده است. در این حالت به دلیل کاهش تولید بادی و محدودیت واحدها، قطع بار رخ خواهد داد. جدول (۴) نتایج ارزیابی پاسخگویی بار در ساعت‌های ۲۴ و ۱۸ برای این دو حالت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، ارزش خالص پاسخگویی بار کاهنده در ساعت ۲۴ حالت اول بزرگتر از قیمت تسویه انرژی در این شرایط می‌باشد. به دلیل کاهش قطع تولید بادی در این شرایط، ارزش خالص افزایش بار در قالب پاسخگویی بار حتی بیشتر از قیمت انرژی می‌باشد. این بدین معنی می‌باشد که در صورتی‌که تغذیه مجدد بار توسط مصرف‌کنندگان در چنین شرایطی رخ دهد، مصرف‌کننده نه تنها هزینه‌ای بابت افزایش مصرف انرژی خود پرداخت نمی‌کند، بلکه پاداش هم دریافت خواهد کرد (۱۰ دلار بر مگاوات ساعت). در حالت دوم، به دلیل حذف هزینه قطع بار، ارزش پاسخگویی بار افزاینده تا هزینه قطع ناخواسته بار افزایش می‌یابد.

۴-۴- صحه‌گذاری روش پیشنهادی

از آنجایی که در پیشینه موضوع به ارزشگذاری پاسخگویی بار با توجه به پتانسیل آن در کاهش هزینه‌های ناشی از نوسانات بادی پرداخته نشده است، امکان مقایسه نتایج برای روش پیشنهادی وجود ندارد. با این وجود، به منظور صحه‌گذاری روش ارزیابی پاسخگویی بار پیشنهادی، بازار انرژی و رزرو ارائه شده در مرجع [۱۴] با در نظرگرفتن پیشنهاد رزرو از جانب مصرف‌کنندگان اجرا گردیده است. این تحلیل بر روی شبکه نمونه ساده (۴-۱) و نیز شبکه ۲۴ شینه استاندارد IEEE انجام گرفته است. در این تحلیل، دو سناریو برای قیمت پاسخگویی بار لحاظ شده است. در سناریوی اول، پاداش مالی به مصرف‌کنندگان برابر با همان مقادیر بدست آمده برای ارزیابی پاسخگویی بار در این مقاله در نظر گرفته شده است. بنابراین، در این سناریو قیمت پاسخگویی بار افزاینده برابر با $\lambda_{t,w}^{E}+\lambda_{t,w}^{B,U}$ و قیمت پاسخگویی بار کاهنده برابر با $\lambda_{t,w}^{B,D}$ در نظر گرفته شده است. در سناریوی دوم، قیمت پاسخگویی بار کمتر از سناریوی اول لحاظ گردیده است. قیمت پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در این سناریو به ترتیب برابر $\lambda_{t,w}^{E}+0.5\times\lambda_{t,w}^{B,U}$ و $0.5\times\lambda_{t,w}^{B,D}$ لحاظ گردیده است.

الف) شبکه نمونه ۶ شینه مورد مطالعه:

نتایج اجرای بازار انرژی و رزرو با و بدون لحاظ کردن پاسخگویی بار بر روی شبکه ۶ شینه نمونه و برای دو سناریوی در نظر گرفته شده، در جدول (۵) گزارش گردیده است. همانطور که در بخش‌های قبل بیان گردید، ارزش پاسخگویی بار بدست آمده در این مقاله برابر با بیشترین مقدار پاداش مالی قابل پرداخت به مصرف‌کنندگان بابت ارائه پاسخگویی بار از دیدگاه بهره‌بردار می‌باشد. با توجه به جدول (۵)، در سناریوی اول با وجود آنکه پاداش مالی به مصرف‌کنندگان برای ارائه پاسخگویی بار برابر حد ماکزیمم آن قرار داده شده است، پاسخگویی بار افزاینده در بازار انرژی و رزرو فراخوانی گردیده است. علاوه بر این، در این سناریو هزینه‌های رزرو و بهره‌برداری نسبت به حالت بهره‌برداری بدون پاسخگویی بار کاهش یافته است. همانگونه که انتظار می‌رفت، از آنجا که در این سناریو حد بالای قیمت پاسخگویی بار منظور گردیده است، کاهش اندکی در هزینه‌های کل حاصل گردیده است. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌گردد، کاهش قیمت پاسخگویی بار در سناریوی دوم باعث افزایش میزان فراخوانی پاسخگویی بار افزاینده تا

جدول (۴): نتایج ارزیابی پاسخگویی بار در حالت‌های ۱ و ۲

حالت	زمان	سناریو	ρ_{SP}	ρ_{LS}	$\lambda_{t,w}^{E}$	$Td_{t,w}^{U}$	$Td_{t,w}^{D}$	$\lambda_{t,w}^{B,U}$	$\lambda_{t,w}^{B,D}$	$\overline{\lambda}_{t,w}^{D,U}$	$\overline{\lambda}_{t,w}^{D,D}$
اول	۲۴	High	۷۷/۴	۰	۲۰	۰	۹/۵	۰	۳۰	۲۰	۱۰
دوم	۱۸	Low	۰	۲۰۰	۷۰	۱	۰	۱۰۰۰	۰	۱۰۷۰	-۷۰

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

جدول (۵): نتایج بازار انرژی و رزرو با و بدون لحاظ کردن پاسخگویی بار

	بدون پاسخگویی بار	با پاسخگویی بار	
		سناریوی اول	سناریوی دوم
کل رزرو گردان افزایشی برنامه‌ریزی شده (MWh)	۳۴	۶/۵۰	۰/۵۰
کل رزرو گردان کاهشی برنامه‌ریزی شده (MWh)	۱۳۸	۱۴۴	۱۴۴
کل رزرو غیر گردان برنامه‌ریزی شده (MWh)	۴۵	۲۲	۰
کل پاسخگویی بار افزاینده برنامه ریزی شده (MWh)	۰	۵۰/۵۰	۷۷/۵۰
کل پاسخگویی بار کاهنده برنامه ریزی شده (MWh)	۰	۰	۰
هزینه رزرو ($)	۲۳۶۷	۱۹۱۰/۲۵	۱۶۴۴/۷۵
هزینه کل بهره‌برداری ($)	۶۷۵۱۲	۶۷۳۳۳/۶۲	۶۶۸۵۲/۸۱۰

۷۷/۵ مگاوات ساعت گردیده است. در این سناریو کاهش در هزینه‌های رزرو و بهره‌برداری نسبت به سناریوی اول بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه شکل (۵)، چون ارزش کل پاسخگویی بار کاهنده در سیستم مورد مطالعه مقداری منفی می‌باشد (ارزش خالص پاسخگویی بار کاهنده کمتر از قیمت انرژی می‌باشد)، پاسخگویی بار کاهنده در تحلیل انجام شده فراخوانی نشده است. با این وجود، در صورتی که قیود تغذیه مجدد بار برای مصرف کنندگان در بازار انرژی و رزرو در نظر گرفته شود، پاسخگویی بار کاهنده در ساعاتی که ارزش خالص پاسخگویی بار غیر صفر می‌باشد فراخوانی خواهد شد.

در ادامه، بازار انرژی و رزرو در حالتی که قطع تولید بادی رخ می‌دهد (بخش ۴-۳) نیز اجرا گردیده است. با توجه به جدول (۴)، در ساعت ۲۴ ، ارزش خالص پاسخگویی بار کاهنده بیشتر از قیمت انرژی بدست آمده است. بنابراین از آنجایی که ارزش کل پاسخگویی بار کاهنده مقداری مثبت می‌باشد، در بازار انرژی و رزرو با حضور پاسخگویی بار به میزان ۸/۵۵ مگاوات ساعت فراخوانی گردیده است. فراخوانی پاسخگویی بار کاهنده در این حالت منجر به کاهش هزینه قطع تولید بادی و افزایش استفاده از این انرژی در شبکه به میزان ۲۱ درصد می‌گردد.

ب) شبکه ۲۴ شینه IEEE RTS:

به منظور تبیین بیشتر مزایای استفاده از روش پیشنهادی برای ارزیابی پاسخگویی بار، بازار انرژی و رزرو با درنظر گرفتن پیشنهاد رزرو از سمت مصرف بر روی شبکه بزرگتر نیز بررسی گردیده است. دیاگرام شبکه ۲۴ شینه استاندارد IEEE RTS به همراه اطلاعات شبکه در مرجع [۲۷] گزارش گردیده است. اطلاعات مربوط به ژنراتورها و بارها از مرجع [۲۸] استخراج گردیده است. نرخ پیشنهاد رزرو ژنراتورها برابر با ۲۵ درصد هزینه‌های حدی واحدها در نظر گرفته شده است [۱۴]. پیک بار در بازه زمانی مورد مطالعه (۲۴ ساعت) برابر با ۲۸۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است [۲۷]. هر شین بار به عنوان یک ارائه‌دهنده پاسخگویی بار لحاظ شده است. سایر اطلاعات مانند آنچه در بخش (۴-۱) ذکر گردید در نظر گرفته شده است. تولیدکننده بادی روی شین شماره ۷ قرار گرفته و ظرفیت آن برابر با ۲۰ درصد پیک بار لحاظ گردیده است. برای تولید سناریوی بادی از روش توضیح داده شده در بخش (۴-۲) استفاده شده است. به کمک روش پیشنهادی، ارزش پاسخویی بار در ۲۴ ساعت و هریک از سناریوهای تولید بادی محاسبه گردیده و با استفاده از نتایج این ارزیابی، بازار انرژی و رزرو با لحاظ کردن پیشنهاد رزرو از سمت مصرف برای دو سناریوی درنظر گرفته شده اجرا گردیده است. جدول (۶) نتایج بدست آمده از این تحلیل را نشان می‌دهد. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌گردد، استفاده از روش ارزیابی پاسخگویی بار ارائه شده در این مقاله منجر به کاهش هزینه‌های رزرو روز قبل، که به منظور جبران نوسانات تولید بادی پیش‌بینی‌شده است، می‌گردد. میزان این کاهش در سناریوی اول که حد بالای ارزش پاسخگویی بار لحاظ شده است برابر با ۱۸/۲ درصد و در سناریوی دوم ۳۵/۹ درصد می‌باشد.

نتایج بدست آمده از تحلیل بازار انرژی و رزرو با حضور پاسخگویی بار حاکی از این است که استفاده از روش ارزیابی ارائه شده برای پاسخگویی بار منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور منابع بادی می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل ریاضی مطلوب برای ارزیابی پاسخگویی بار، در سیستم قدرتی که از مقادیر بالای منابع بادی بهره می‌گیرد، توسعه یافته است. هدف اصلی این مقاله، تعیین ارزش واقعی و منصفانه پاسخگویی بار می‌باشد. در فرمولاسیون ارائه شده، کارکرد پاسخگویی بار در کاهش اثرات ناشی از خطای پیش‌بینی و نوسانات تولید بادی مورد توجه قرار گرفته است. افزایش بار در قالب پاسخگویی بار، همانند کاهش بار در این ارزیابی در نظر گرفته شده است. این مدل اطلاعات بسیار مفیدی در اختیار بهره‌بردار به منظور فراخوانی پاسخگویی بار و نیز ارائه‌دهندگان پاسخگویی بار به منظور پیشنهاد دهی قیمت برای ارائه پاسخگویی بار می‌دهد.

مدل پیشنهادی برای ارزیابی پاسخگویی بار روی شبکه نمونه ساده‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از بالابودن ارزش پاسخگویی بار افزاینده در سناریوهای با تولید باد کم و نیز بالا بودن ارزش پاسخگویی بار کاهنده در سناریوهای با تولید بادی بالا می‌باشد.

جدول (۶): کاهش هزینه‌های رزرو با پاسخگویی بار در شبکه ۲۴ شینه IEEE RTS

	بدون پاسخگویی بار	با پاسخگویی بار	
		سناریوی اول	سناریوی دوم
هزینه رزرو ($)	۳۰۱۳۱	۲۴۶۳۷	۱۹۳۲۷
کاهش (٪)	-	۱۸/۲	۳۵/۹

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

با اعمال نتایج بدست آمده از ارزیابی پاسخگویی بـار در بـازار انـرژی و رزرو با حضور پاسخگویی بار، کاهش در هزینه‌های بهره‌برداری سیستم مشاهده گردیـد. ارائـه مکـانیزم ارزشـگذاری منصـفانه و واقعـی بـرای پاسخگویی بار، مانند آنچه در ایـن مقالـه پیشـنهاد گردیـد، منجـر بـه افزایش مشارکت سمت مصرف و افزایش کارایی‌های آن در بهره‌برداری از سیستم قدرت می‌گردد.

فهرست علایم

$R^{U}_{i,t}, R^{D}_{i,t}$	رزرو گردان افزایشی و کاهشی برنامه‌ریزی شده در بازار انرژی و رزرو برای واحد i در زمان t بر حسب مگاوات
$R^{NS}_{i,t}$	رزرو غیرگردان برنامه‌ریزی شده در بازار انرژی و رزرو برای واحد i در زمان t بر حسب مگاوات
$r^{U}_{i,t,w}, r^{D}_{i,t,w}$	رزرو گردان افزایشی و کاهشی بکار گرفته‌شده در بازار انرژی و رزرو برای واحد i در زمان t بر حسب مگاوات
$r^{NS}_{i,t,w}$	رزرو غیرگردان بکار گرفته شده در بازار انرژی و رزرو برای واحد i در زمان t بر حسب مگاوات
$L^{sh}_{j,t,w}$	قطع ناخواسته بار jدر زمان t و سناریوی w تعیین شده در بازار انرژی و رزرو بر حسب مگاوات
$S_{q,t,w}$	قطع تولید بادی تولیدکننده q در زمان t و سناریوی w تعیین شده در بازار انرژی و رزرو بر حسب مگاوات
$\lambda^{E}_{t,w}$	قیمت تسویه انرژی در زمان t و سناریوی w تعیین شده در بازار انرژی و رزرو بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$P^{S}_{i,t}$	توان تولیدی برنامه‌ریزی شده در بازار انرژی و رزرو واحد i در زمان t بر حسب مگاوات
$P^{g}_{i,t,w}$	توان تولیدی واحد i در زمان t و سناریوی w در بازار انرژی و رزرو بر حسب مگاوات
$P^{\min}_{G_i}, P^{\max}_{G_i}$	حد بالا و پایین توان تولیدی ژنراتور i بر حسب مگاوات
$C^{SU}_{i,t}$	هزینه راه‌اندازی ژنراتور i در زمان t بر حسب دلار
$C^{RU}_{i,t}, C^{RD}_{i,t}$	هزینه آمادگی رزرو گردان افزایشی و کاهشی برای ژنراتور i در زمان t بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$C^{RNS}_{i,t}$	هزینه آمادگی رزرو غیرگردان برای ژنراتور i در زمان t بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$\overline{P}_{W,q}$	میانگین تولید بادی تولیدکننده q در بازه زمانی برنامه-ریزی بر حسب مگاوات
V^{S}_{q}	هزینه قطع تولید بادی تولیدکننده q بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
TDR^{U}_{t}	میزان آمادگی مصرف کننده برای ارائه پاسخگویی بار افزاینده در زمان t بر حسب مگاوات
TDR^{D}_{t}	میزان آمادگی مصرف کننده برای پاسخگویی بار کاهنده در زمان t بر حسب مگاوات
$Td^{U}_{t,w}, Td^{D}_{t,w}$	پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده فراخوانی شده در زمان t و سناریوی w بر حسب مگاوات
$C^{U,A}_{t}, C^{D,A}_{t}$	هزینه آمادگی بابت پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$C^{VOLL}_{j,t}$	هزینه قطع ناخواسته بار jدر زمان t بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$\lambda^{D,U}_{t,w}, \lambda^{D,D}_{t,w}$	ارزش کل پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$\lambda^{B,U}_{t,w}, \lambda^{B,D}_{t,w}$	ارزش خالص پاسخگویی بار افزاینده و کاهنده در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
π_{w}	احتمال وقوع سناریوی w
$\rho_{RU}(i,t)$	تابع سود پاسخگویی بار ناشی از کاهش هزینه رزرو گردان افزایشی ژنراتور i در زمان t بر حسب دلار بر ساعت
$\rho_{RD}(i,t)$	تابع سود پاسخگویی بار ناشی از کاهش هزینه رزرو گردان کاهشی ژنراتور i در زمان t بر حسب دلار بر ساعت
$\rho_{RNS}(i,t)$	تابع سود پاسخگویی بار ناشی از کاهش هزینه رزرو غیرگردان ژنراتور i در زمان t بر حسب دلار بر ساعت
$\rho_{SU}(i,t,w)$	تابع سود مورد انتظار پاسخگویی بار ناشی از کاهش هزینه راه‌اندازی ژنراتور i در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار
$\rho_{LS}(j,t,w)$	تابع سود مورد انتظار پاسخگویی بار ناشی از کاهش هزینه قطع ناخواسته بار jدر زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر ساعت
$\rho_{SP}(q,t,w)$	تابع سود مورد انتظار پاسخگویی بار ناشی از کاهش هزینه قطع تولید بادی تولیدکننده q در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر ساعت
$\xi^{U}(t,w)$	تابع سود مورد انتظار پاسخگویی بار افزاینده ناشی از کاهش هزینه‌های تامین بار در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر مگاوات ساعت
$\xi^{D}(t,w)$	تابع سود مورد انتظار پاسخگویی بار کاهنده ناشی از کاهش هزینه‌های تامین بار در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر ساعت
$\eta^{U}_{A}(t)$	تابع هزینه آمادگی برای پاسخگویی بار افزاینده در زمان t بر حسب دلار بر ساعت
$\eta^{D}_{A}(t)$	تابع هزینه آمادگی برای پاسخگویی بار کاهنده در زمان t بر حسب دلار بر ساعت
$\eta^{U}_{R}(t,w)$	پرداختی به مصرف‌کنندگان جهت ارائه پاسخگویی بار افزاینده در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر ساعت
$\eta^{D}_{R}(t,w)$	پرداختی به مصرف‌کنندگان جهت ارائه پاسخگویی بار کاهنده در زمان t و سناریوی w بر حسب دلار بر ساعت

ضمایم

اطلاعات بار مصرفی شبکه ۶ شینه مورد مطالعه در ۲۴ ساعت در جدول (۷) گزارش گردیده است. راکتانس خطوط ارتباطی در شبکه ۶ شینه مورد مطالعه، قابل استفاده در پخش بار DC، در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۷): بار شین‌های ۳ و ۴ بر حسب مگاوات

t	شین		t	شین		t	شین	
	۳	۴		۳	۴		۳	۴
۱	۲۷	۵۴	۹	۴۳	۸۶	۱۷	۴۲	۸۴
۲	۲۸/۵	۵۷	۱۰	۴۲	۸۴	۱۸	۴۷	۹۴
۳	۲۸	۵۶	۱۱	۴۴/۵	۸۹	۱۹	۵۰	۱۰۰
۴	۲۷/۵	۵۵	۱۲	۴۲	۸۴	۲۰	۴۳	۸۶
۵	۳۰	۶۰	۱۳	۴۶/۵	۹۳	۲۱	۴۳	۸۶
۶	۲۷/۵	۵۵	۱۴	۳۹	۷۸	۲۲	۳۴/۵	۶۹
۷	۳۴/۵	۶۹	۱۵	۳۹	۷۸	۲۳	۳۱/۵	۶۳
۸	۴۲	۸۴	۱۶	۳۸/۵	۷۷	۲۴	۲۸/۵	۵۷

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]

جدول (۸): اطلاعات خطوط انتقال شبکه ۶ شینه

شماره	از شین	به شین	راکتانس (pu)
۱	۱	۲	۰/۰۵۹۲
۲	۱	۳	۰/۲۲۳۰
۳	۱	۶	۰/۱۷۶۳
۴	۲	۳	۰/۱۱۸۳
۵	۳	۴	۰/۲۶۴۵
۶	۴	۵	۰/۰۸۵۲
۷	۴	۶	۰/۲۱۱۶
۸	۵	۶	۰/۰۷۶۹

مراجع

[1] Albadi, M. H., and El-Saadany, E. F., "*Overview of wind power intermittency impacts on power systems"*, Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 6, pp. 627-632, 2010.

[2] Smith, J., Milligan, M., DeMeo, E., Parsons, B., "*Utility wind integration and operating impact state of the art"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 900–908, 2007.

[3] Morales, J., *Impact on system economics and security of a high penetration of wind power*, PhD thesis, Ciudad Real, 2010.

[4] Moura, P. S., De Almeida, A. T., *"The role of demand-side management in the grid integration of wind power*", Applied Energy, Vol. 87, No. 8, pp. 2581-2588, 2010.

[5] Pina, A., Silva, C., Ferrão, P., "*The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity"*, Energy, Vol. 41, No. 1, pp. 128-137, 2012.

[6] Sioshansi, W. Short, "*Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation*" IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 516–524, 2009.

[7] Ilic ´, M. D., Xie, L., Joo, J., *"Efficient Coordination of Wind Power and Price-Responsive Demand—Part I: Theoretical Foundations"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 875-1884, 2011.

[8] Ilic ´, M. D., Xie, L., Joo, J., "*Efficient Coordination of Wind Power and Price-Responsive Demand—Part II: Case Studies*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 1885-1893, 2011.

[9] Klobasa, M., *"Analysis of demand response and wind integration in Germany's electricity market"*, IET renewable Power Generation, Vol. 4, No. 1, pp. 55-63, 2010.

[10] Kwag, H. G., Kim J. O., *"Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints",* Applied Energy, Vol. 96, pp. 161-170, 2012.

[11] Khodaei, A., Shahidehpour, M., Bahramirad, S., *"SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics",* IEEE Transactions on Smart Grid , Vol. 2, No. 3, pp. 564 –571, 2011.

[12] Cecati, C., Citro, C., Siano, P. *"Combined operations of renewable energy systems and responsive demand in a smart grid"*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 4, pp. 468-476, 2011.

[13] Morales, J. M., Conejo, A. J., Pérez-Ruiz, J., *"Simulating the impact of wind production on locational marginal prices",* IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 2, pp. 820-828, 2011.

[14] Morales, J. M., Conejo, A. J., Pérez-Ruiz, J., *"Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power",* IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 900-910, 2009.

[15] Bouffard F., Galiana, F. D., *"Stochastic security for operations planning with significant wind power generation"* IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, No. 2, pp. 306–316, 2008.

[16] Schlueter, R. A., Park, G. L., Lotfalian, M, Shayanfar, H., Dorsey, J., "*Modification of power system operation for significant wind generation penetration"* IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, No. 1, pp. 153–161, 1983.

[17] Eriksen, P. B., Ackermann, T., Abildgaard, H., Smith, P., Winter, W., & Rodriguez Garcia, J. M., *"System operation with high wind penetration."* IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 3 No. 6, pp. 65-74, 2005.

[18] Hirst, E., *"Integrating wind output with bulk power operations and wholesale electricity markets"*, Wind Energy, vol. 5, No. 1, pp. 19–36, 2002.

[19] Doherty R., O'Malley, M., *"A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity",* IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, No. 2, pp. 587–595, 2005.

[20] Söder, L., *"Reserve margin planning in a wind-hydro thermal power system"*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, No. 2, pp. 564–571, 1993.

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

[22] Haghighat, H., Kennedy, S.W., "*A Bilevel Approach to Operational Decision Making of a Distribution Company in Competitive Environments"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 4, pp. 1797-1807, 2012.

[23] Available:http://www.eirgrid.com/operations/systemperformancedata/windgeneration/

[24] Fabbri, A., Román, T., Abbad, J. R., Méndez Quezada, V.H., "*Assessment of the Cost Associated With Wind Generation Prediction Errors in a Liberalized Electricity Market*" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 1440-1446, 2005.

[25] ILOG CPLEX: *High-Performance Software for Mathematical Programming and Optimization*, 2006 [online] Available: http://www.ilog.com/products/cplex/.

[26] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., Rosenthal, R. E., *GAMS, a User's Guide*, Washington, DC: GAMS Development Cor-poration, 1998.

[27] Reliaility Test System Task Force, "The IEEE reliability test system—1996," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 3, pp. 1010–1020, Aug. 1999.

[28] F. Bouffard, F. D. Galiana, and A. J. Conejo, "Market-clearing with stochastic security-part II: Case studies," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 4, pp. 1827–1835, Nov. 2005.

زیرنویس‌ها

[1] Upward, downward spinning reserve
[2] Wind power spillage
[3] Generation Company (GenCo)
[4] Demand Response Provider (DRP)
[5] Beta distribution function

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1392.2.2.7.8]