



مدلسازی دینامیک تولید و بار پاسخگو به منظور بررسی دقیق اثرات بلندمدت نصب کنتورهای هوشمند برق در ایران

محمد حسین جاویدی
گروه برق، دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد
مشهد، ایران

مهدی صمدی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه حکیم سبزواری
سبزوار، ایران

افزایش است و بنابراین نیاز به تغییر در مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم نیز ضروری می‌باشد. ارزیابی تأثیرات پاسخگویی بار بر روند سرمایه‌گذاری در بخش تولید برای سیاستگذاران بسیار مهم قلمداد می‌شود [۳]. در ادامه و در بخش دوم به مرور تعدادی از مقالات مرتبط با موضوع پرداخته شده است. بخش سوم به توصیف مدل پیشنهادی می‌پردازد. در بخش چهارم سیستم مورد مطالعه معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه و تحلیل شده است. در نهایت نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه گردیده است.

مروری بر مقالات

تحقیقات زیادی در زمینه مدلسازی پاسخگویی بار در کوتاهمدت وجود دارد [۷-۴]، اما در زمینه مطالعه پاسخگویی بار در افق بلندمدت تحقیقات کمی انجام شده است. مرجع [۸] با استفاده از برنامه‌ریزی پویا مدلی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در محیط رقابتی ارائه نموده است. در مدل این مرجع، فقط پیک بار سالانه و تعامل آن با قیمت در نظر گرفته شده و نگاه نویسندگان بیشتر معطوف به دیدگاه شرکتهای تولیدی به مسئله توسعه تولید بوده است. در [۹] مدلی برای تعیین سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بهینه از ظرفیتهای تولید با هدف حداقل کردن هزینه ارائه شده که در آن پاسخگویی بار نیز لحاظ شده است. البته در این مرجع، جابجایی مصرف در نظر گرفته نشده است. در [۱۰] چارچوبی برای آنالیز تأثیر زیر ساخت اندازه‌گیری هوشمند و پاسخگویی بار بر قیمت بازار و قابلیت اطمینان در بلندمدت ارائه شده است. در این مرجع فرایند سرمایه‌گذاری در توسعه تولید مدلسازی نشده بلکه بصورت ورودی مسئله در نظر گرفته شده است.

چکیده — امروزه با توسعه برنامه‌های پاسخگویی بار، مشارکت مشتریان در بهره‌برداری رو به افزایش است. لذا، نیاز به در نظر گرفتن پاسخگویی بار در فرایند برنامه‌ریزی احساس می‌شود. سیاستگذاران به فهم ساده و روشن تأثیرات بلندمدت پاسخگویی بار از جنبه‌های فنی و اقتصادی، برای اتخاذ تصمیمات مناسب نیاز دارند.

در این مقاله با مدلسازی دینامیک سرمایه‌گذاری در توسعه تولید در یک سیستم شامل بار پاسخگو، به بررسی اثرات بلندمدت پاسخگویی بار پرداخته شده است. در این راستا سه شاخص مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیستم مورد مطالعه، سیستم عرضه انرژی الکتریکی در کشور ایران می‌باشد. همچنین نقش مؤثر پاسخگویی بار در بهبود شاخصهای سیستم در برابر عدم قطعیت‌های ممکن در آینده، تجزیه و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی — پاسخگویی بار؛ سرمایه‌گذاری در توسعه تولید؛ قابلیت اطمینان، سیستم عرضه برق ایران، کنتور هوشمند برق.

مقدمه

بهره‌برداری کارا و بهینه از بازار برق بستگی به تعامل مناسب تولید و مصرف دارد. از طرفی، تعادل کامل بین تولید و مصرف در همه زمانها، از ضروریات قابلیت اطمینان سیستم است. یکی از راههای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف، پاسخگویی بار (Demand Response) است [۱]. پاسخگویی بار میتواند موجب کاهش قیمت برق و نوسانات آن در بازار، لغو یا تعویق برنامه‌های توسعه تولید، انتقال و توزیع و نیز بهبود شاخصهای قابلیت اطمینان گردد [۲]. امروزه مشارکت مشتریان در بهره‌برداری رو به

روند فوق تا پایان افق برنامه‌ریزی تکرار می‌گردد. اطلاعات لازم برای محاسبه شاخصهای پیشنهادی در هر مرحله ذخیره و در نهایت به ارزیابی شاخصها پرداخته میشود.

مدلسازی فرایند سرمایه‌گذاری

تصمیم به سرمایه‌گذاری بر اساس ارزیابی میزان سودآوری و هزینه سرمایه‌گذاری سالانه (روش ارزش معادل سالیانه) مدل‌سازی شده است. سود سالیانه یک مگاوات ظرفیت تکنولوژی i در سال t ($profit_{i,t}$)، از تفاضل درآمد (Revenue) و هزینهها (حاصلضرب هزینه متغیر در تولید هر واحد) مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$profit_{i,t} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \Delta T_{isl} (Revenue_{i,isl} - VC_{i,t} \cdot PG_{i,isl})}{Capacity_{i,t}} \quad (1)$$

در این رابطه ΔT_{isl} ، طول زیر بازه l در فصل s در سال t بر حسب ساعت است. با در نظر گرفتن پرداخت بهای آمادگی، شاخص سوددهی (PI) برای هر تکنولوژی در هر سال میتواند از (۲) محاسبه شود [۱۳]:

$$PI_{i,t} = \frac{profit_{i,t} + CP_{i,t}}{FC_i} \quad \forall t, i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، FC_i هزینه ثابت و $CP_{i,t}$ بهای آمادگی پرداختی به هر مگاوات از واحدهای نوع i میباشد. برای مدل‌سازی سرمایه‌گذاری بر اساس PI، از یک تابع S شکل مطابق فرمول (۳) استفاده شده است [۱۴].

$$m_i(PI_i) = \frac{m_i^{\max}}{1 + e^{-(\lambda_i PI_i + \tau_i)}} \quad (3)$$

ظرفیت تولید جدید هر تکنولوژی بر اساس رابطه (۴) محاسبه میشود.

$$\Delta C_{i,t} = m_i(PI_{i,t}) \times (\Delta R_{i,t} + \Delta L_{i,t}) \quad \forall i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

در این رابطه، $\Delta R_{i,t}$ ظرفیت بازنشسته شده از هر تکنولوژی در سال t ، و $\Delta L_{i,t}$ سهم هر تکنولوژی در تأمین بار اضافه شده به سیستم (بخاطر رشد بار) است که از روابط (۵) و (۶) محاسبه میشود.

$$\Delta L_{i,t} = \alpha_{wind} \times \Delta D_t \quad \forall i = 4(wind) \quad (5)$$

$$\Delta L_{i,t} = (1 - \alpha_{wind}) \times \Delta D_t \times f_i \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

در (۵)، α_{wind} نشاندهنده سهم ظرفیت بادی در تأمین رشد تقاضاست (میزان نفوذ انرژی بادی) که بر اساس سیاستهای گسترش منابع انرژی نو تعیین میشود و ΔD_t حداکثر بار اضافه شده در سال t میباشد. برای سادگی فرض شده f_i تمام تکنولوژیهای حرارتی با هم برابر است. میزان بار

در [۱۱]، مدلی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در حضور پاسخگویی بار در یک محیط تجدید ساختار یافته پیشنهاد شده است. علیرغم ویژگیهای خوب این مدل، نظیر چارچوب غیرمتمرکز و در نظر گرفتن شبکه انتقال، پاسخگویی بار بصورت کامل مدل نشده و در مورد تغییرات بار فقط به پیک سال اکتفا گردیده است. همچنین در مورد قابلیت اطمینان سیستم نیز بحثی نشده است. در [۱۲]، روند دینامیک سرمایه‌گذاری تولید در یک سیستم شامل بارهای پاسخگو، بخوبی مدل‌سازی شده است. از ویژگیهای بارز این مدل میتوان مدل‌سازی مناسب عدم قطعتهای موجود در مسئله (شامل تولید مولدهای بادی) را نام برد.

در این مقاله قصد داریم با مدل‌سازی دینامیک سرمایه‌گذاری، اثرات بلندمدت پاسخگویی بار بر شاخصهای ارزیابی سیستم را، بخصوص در دو سناریوی محتمل در آینده (رشد بار پیشبینی نشده و سیاست توسعه بیشتر منابع انرژی نو) بررسی نماییم. برای توضیحات تکمیلی در مورد مدل بکار رفته میتوان به [۱۲] رجوع نمود. (قابل ذکر است که هدف ما تعیین روشی بهینه برای سرمایه‌گذاری توسعه تولید نیست بلکه استفاده از مدلی ساده و در عین حال کارا برای مدل‌سازی تأثیرات متقابل بین مصرف، قیمت بازار و توسعه تولید، برای تعیین اثرات بلندمدت پاسخگویی بار میباشد).

توصیف مدل

اندیسهای بکار رفته در مدل عبارتند از: اندیس t برای سال، s برای فصل، l برای سطوح بار، i مربوط به تکنولوژیهای تولید (بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، بادی)، n برای تکرارهای حلقه تعادل بار پاسخگو و K برای رخدادهای احتمالی سیستم. در ادامه روند اجرای الگوریتم پیشنهادی توضیح داده شده است:

- محاسبه ظرفیت در دسترس تولید در هر رخداد در سال t و همچنین احتمال هر رخداد.
- تسویه بازار برای هر یک از سطوح بار فصل s و محاسبه مقدار مورد انتظار متغیرها بر اساس احتمال رخداد آنها.
- محاسبه اختلاف بین قیمت تسویه بازار و تمایل به پرداخت بارهای پاسخگو (برای همه فصلها بصورت جداگانه)، اگر این اختلاف بزرگتر از حد مجاز بود، مقدار جدید بار پاسخگو محاسبه میگردد.
- پس از اتمام فصلها، میزان توسعه ظرفیت تولید با توجه به سود سالانه و رشد بار محاسبه و ظرفیت سال بعد مشخص میشود.

۳.۲.۳. مدل‌سازی نایقینی در عملکرد بار پاسخگو

برای مدل‌سازی نایقینی در عملکرد بار پاسخگو، ضریبی بنام نرخ صحت عملکرد پاسخگویی (Response Accuracy Rate) تعریف شده است. به این مفهوم که این بارها به احتمال RAR ($0 \leq RAR \leq 1$) به قیمت واکنش نشان میدهند و به احتمال $(1 - RAR)$ واکنشی ندارند و غیرکشسان در نظر گرفته میشوند. کل رخدادهای محتمل با نگاهت دو حالت بار پاسخگو، بر حالت‌های ممکن واحدهای تولیدی (حرارتی و بادی) تشکیل میشود.

فرایند تسویه بازار

مطابق رابطه (۱۴)، فرض شده بخشی از بار، پاسخگو به قیمت است که آن را با Dpr (price responsive demand) نشان دادیم.

$$Dpr_{isl}^{Max} = \gamma_{isl} \times D_{isl}^{Max} \quad \forall t, \forall s, \forall l \quad (14)$$

بار غیرپاسخگو با $Dpir_{isl}$ نشان داده شده که مقدار آن از تفاضل کل بار پیشبینی شده (D_{isl}^{Max}) از حداکثر بار پاسخگو بدست می‌آید.

$$Dpir_{isl} = D_{isl}^{Max} - Dpr_{isl}^{Max} \quad \forall t, \forall s, \forall l \quad (15)$$

در بعضی از رخدادهای تصادفی محتمل، ظرفیت تولید موجود در سیستم برای تأمین کل بار غیرکشسان سیستم کافی نیست. در این موارد، قیمت تسویه بازار به سقف قیمت مجاز میرسد و ممکن است مجبور به قطع بار ناخواسته بشویم. اگر مجموع ظرفیت موجود در هر حالت، بزرگتر از بار غیرکشسان باشد، مسئله بهینه‌سازی خطی (۱۷) حل میشود. در غیر این صورت، توان تولیدی واحدها در مقدار حداکثر خود خواهد بود (۱۸).

$$\text{If } \sum_{i=1}^5 Capacity_{i,t,K} \geq Dpir_{isl} \quad \forall t, \forall s, \forall l, \forall K \quad (16)$$

$$\text{Min } \sum_{i=1}^5 VC_{i,t} \times PG_{i,t,K} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^5 PG_{i,t,K} = Dpir_{isl} + Dpr_{isl}(n) : MCP_{isl,K}(n)$$

$$0 \leq PG_{i,t,K} \leq PG_{i,t,K}^{Max} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

else

اضافه شده به سیستم و پیک بار در هر سال از (۷) و (۸) بدست می‌آیند که g_t در این روابط، نرخ رشد بار در هر سال است.

$$\Delta D_t = g_t \times D_{t-1}^{Max} \quad (7)$$

$$D_t^{Max} = D_{t-1}^{Max} + \Delta D_t = (1 + g_t) \times D_{t-1}^{Max} \quad (8)$$

در نهایت، با احتساب مدت ساخت واحدهای جدید (T_c)، ظرفیت هر تکنولوژی در هر سال از (۹) محاسبه میشود:

$$Capacity_{i,t} = Capacity_{i,t-1} + \Delta C_{i,(t-T_c)} - \Delta R_{i,t} \quad \forall t, i = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

مدل‌سازی نایقینی رخدادهای محتمل

۳.۲.۱. نایقینی واحدهای حرارتی (بخاری، گازی، سیکل ترکیبی)

با در نظر گرفتن نرخ خروج اضطراری واحدهای حرارتی، ظرفیت معادل هر تکنولوژی حرارتی بصورت زیر خواهد بود:

$$EGC_{i,t} = \begin{cases} Capacity_{i,t} & \text{probability} = 1 - EFOR_{i,t} \\ Capacity_{i,t} - EOC_{i,t} & \text{probability} = EFOR_{i,t} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $EFOR$ (نرخ خروج معادل) از رابطه (۱۱) و EOC (ظرفیت معادل از دست رفته) از رابطه (۱۲) بدست می‌آیند.

$$EFOR_{i,t} = \sum_{q=1}^{NQ} \left(\frac{Nu_{i,t}}{q} \right) \times (FOR_i)^q \times (1 - FOR_i)^{Nu_{i,t}-q} \quad (11)$$

$$EOC_{i,t} = \frac{\sum_{q=1}^{NQ} \{ prob_{i,q,t} \times (q \times \text{Average Capacity}_i) \}}{\sum_{q=1}^{NQ} prob_{i,q,t}} \quad (12)$$

۳.۲.۲. مدل‌سازی نایقینی باد

برای مدل‌سازی نایقینی باد در بلندمدت، پس از دستبندی حالات ممکن برای وزش باد به دو حالت وزش باد کافی و وزش باد ناکافی، مقدار توان خروجی مولد بادی (در هر زیر بازه زمانی) و احتمال آن در دو حالت مطابق زیر بدست می‌آید:

$$\text{Wind power generation} = \begin{cases} PGW_{High}^{pu} = 0.925 & \pi_{wind,High} = 0.08 \\ PGW_{Low}^{pu} = 0.171 & \pi_{wind,Low} = 0.92 \end{cases} \quad (13)$$

سپس حالات مختلف ترکیب مزارع بادی سیستم در کنار هم، در نظر گرفته شده و مقدار تولید مولدهای بادی در هر حالت ممکن محاسبه و لحاظ میشود. توضیحات بیشتر در [۱۲] آمده است.

به این ترتیب بدون پیچیدگی زیاد، میتوان تغییرات بار پاسخگو در بلندمدت و اثر آن بر تغییر منحنی تداوم بار را به خوبی مدل‌سازی نمود.

مطالعات نشان میدهند که مصرف برق در بلندمدت کاملاً کثشان است و کثش قیمتی تقاضا، قابل صرف نظر کردن نیست. با وجود کثش قیمتی (خودی و متقابل)، بار در هر بازه تابعی از قیمت تمام بازها خواهد بود (۲۵). در این رابطه، کثش قیمتی بین دو سطح بار l و m است.

$$Dpr_{isl} = Dpr_{0,isl} + \sum_{m=1}^L E_{l,m} \cdot \frac{Dpr_{0,isl}}{P_{0,ism}} \cdot (P_{ism} - P_{0,ism}) \quad (25)$$

رابطه (۲۵) را میتوان به فرم ماتریسی (۲۶) نوشت. درایه‌های ماتریس $[A_{ts}]$ ، حداکثر بار پاسخگو در هر سطح بار میباشد (۲۷). بهسادگی اثبات میشود که درایه‌های $[B_{ts}]$ از (۲۸) بدست می‌آیند.

$$[Dpr_{ts}]_{L \times 1} = [A_{ts}] + [B_{ts}] [P_{ts}] \quad \forall t, \forall s \quad (26)$$

$$[A_{ts}] = [Dpr_{tsl}^{Max}]_{L \times 1} \quad (27)$$

$$[B_{ts}] = [b_{ts,lm}]_{L \times L}, \quad b_{ts,lm} = \frac{E_{l,m}}{1 - \sum_{m=1}^L E_{l,m}} \times \frac{Dpr_{tsl}^{Max}}{P_{0,ism}} \quad (28)$$

با استفاده از (۲۶)، ماتریس $[P_{ts}(n)]$ میتواند از (۲۹) محاسبه شود.

$$[P_{ts}(n)]_{L \times 1} = [B_{ts}]^{-1} ([Dpr_{ts}(n)] - [A_{ts}]) \quad (29)$$

برای تحقق ریاضی آنچه در (۲۴) بیان شد، رابطه (۳۰) پیشنهاد شده است. (بوسیله این رابطه، ماتریس $[Dpr_{ts}(n)]$ به هنگام میشود). تابع علامت (sign) در (۳۰)، باعث افزایش یا کاهش Dpr بر اساس وضعیت دو قیمت میگردد. شرط توقف تکرارها مطابق (۳۱) فرض شده است.

$$[Dpr_{ts}(n)] = [Dpr_{ts}(n-1)] + \left(\frac{1}{2}\right)^n \times [Dpr_{ts}^{Max}] \times \text{sign}([P_{ts}(n)] - [MCP_{ts}(n)]) \quad (30)$$

$$[Dpr_{ts}(n=1)] = \frac{1}{2} [Dpr_{ts}^{Max}]$$

$$\sum_{l=1}^L |P_{tsl}(n) - MCP_{tsl}(n)| = \| [P_{ts}(n)] - [MCP_{ts}(n)] \|_1 < \varepsilon \quad (31)$$

سیستم مورد مطالعه

آزمایش روش پیشنهادی، بر روی سیستم عرضه برق در ایران و برای یک افق ۲۰ ساله انجام شده است. بیک مصرف برق در کشور در سال ۱۳۹۰ برابر ۴۲۳۶۷ مگاوات بوده است. متوسط رشد مصرف برق در کشور در پنج سال گذشته برابر ۵.۱۱ بوده است. با واقعی شدن قیمت برق به تدریج از رشد مصرف برق کاسته میشود. در این مقاله رشد بار تا ۱۰ سال برابر ۵٪ و

برقراری شرط (۱۶)، قیمت تسویه بازار برابر سقف قیمت مجاز ($price_{CAP}$) خواهد بود (۱۹) و توان تأمین نشده (UP) از (۲۰) محاسبه میشود.

در این روابط، $VC_{i,t}$ هزینه متغیر واحدهای نوع i ، $PG_{i,tsl,K}$ توان تولیدی واحدهای نوع i در سال t ، فصل s ، سطح بار l و حادثه K و $PG_{i,tsl,K}^{Max}$ حداکثر توان قابل تولید واحدهای نوع i میباشد. درآمد کسب شده توسط هر تکنولوژی نیز از (۲۱) بدست خواهد آمد.

$$Revenue_{i,tsl,K} = MCP_{tsl,K} \times PG_{i,tsl,K} \quad (21)$$

فرایند تسویه بازار برای تمامی رخدادهای هر زیربازه زمانی بصورت جداگانه انجام میشود. بنابراین، برای هر متغیر مربوط به زیربازه tsl ، تعداد NK مقدار تصادفی با احتمال رخداد متفاوت وجود دارد (برای مثال $UP_{tsl,K}$). با محاسبه امید ریاضی هر متغیر (مطابق (۲۲))، مقادیر مورد انتظار متغیرها بدست می‌آید که در محاسبات مورد استفاده قرار میگیرند.

$$x_{tsl} = \sum_{K=1}^{NK} \pi_{tsl,K} \times x_{tsl,K} \quad (22)$$

بار تغذیه شده (DS)، مربوط به هر زیربازه نیز از (۲۳) بدست خواهد آمد.

$$Ds_{tsl} = Dpir_{tsl} + Dpr_{tsl} - UP_{tsl} \quad (23)$$

ارتباط دوطرفه بین بار پاسخگو و قیمت

در محیط رقابتی، بارها بصورت متقابل با قیمتها عمل میکنند. در صورت وجود مشوق قیمتی مناسب، مشتریان بار خود را از ساعتی که برق گران است به ساعات ارزان قیمت جابجا میکنند. متقابلاً، مصرف نیز بر قیمتها تأثیرگذار است. فعل و انفعال بین مصرف و قیمت تا جایی که اختلاف قیمت بازار و قیمت مورد انتظار مشتری کمتر از یک آستانه خاص شود، ادامه مییابد [۱۵]. اگر قیمت تسویه بازار (MCP) از تمایل به پرداخت بار پاسخگو (که با P نشان داده شده) بیشتر باشد، بار پاسخگو کاهش می‌یابد و بالعکس. این عکس‌العملها را میتوان بصورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} P < MCP \rightarrow Dpr \text{ decreases} \\ P = MCP \rightarrow Dpr \text{ does not change} \\ P > MCP \rightarrow Dpr \text{ increases} \end{cases} \quad (24)$$

پاسخگویی بار، منحنی بار روزانه را تغییر میدهد. تداوم این رفتار در طول سال، موجب تغییر منحنی تداوم بار (LDC) میشود. در این مقاله منحنی تداوم بار سالانه، با چهار فصل و هر فصل دارای سه سطح بار فرض شده است. برای مدل‌سازی بار پاسخگو در بلندمدت، برآیند تغییر مصرف در طول روز در واکنش به قیمت، با تغییر سطوح بار هر فصل مدل شده است.

دار قیمت تسویه بازار، بهای آمادگی و هزینه خاموشی بدست می‌آید. VOLL، ارزش بار از دست رفته است.

$$AMP_t = \text{Max}_{s,l} \{MCP_{tsl}\} \quad (32)$$

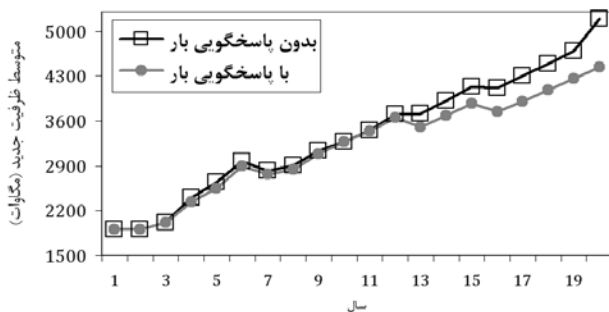
$$AEC_t = \frac{1}{8760} \left(\sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \Delta T_{tsl} \times MCP_{tsl} \right) + \frac{\sum_{i=1}^4 (CP_{i,t} \times \Delta C_{i,t}) + VOLL_t \times EENS_t}{\sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \Delta T_{tsl} \times DS_{tsl}} \quad (33)$$

سنجش قابلیت اطمینان سیستم نیز توسط شاخص بسیار متداول انرژی تغذیه نشده مورد انتظار (EENS)، انجام گرفته که از (۴۵) بدست می‌آید.

$$EENS_t = \left(\sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \Delta T_{tsl} \times \sum_{K=1}^{NK} \pi_{tsl,K} \times UP_{tsl,K} \right) [MWh] \quad (34)$$

نتایج شبیه‌سازی سالانه یک حالت نمونه

در ابتدا نتایج شبیه‌سازی در دو حالت وجود و عدم وجود پاسخگویی بار با هم مقایسه شده است. در حالتی که پاسخگویی بار وجود دارد مشارکت برابر ۱۰٪ فرض شده است. شکل ۱، متوسط ظرفیت جدید نصب شده در سیستم را در طول افق مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۱: متوسط ظرفیت جدید نصب شده در سیستم

طبق نتایج، پاسخگویی بار موجب کاهش نیاز به ظرفیتهای جدید تولید و در نتیجه کاهش هزینه لازم برای سرمایه‌گذاری در این بخش میشود. شکل ۲، تغییرات شاخص قابلیت اطمینان در طول افق مورد مطالعه را نشان میدهد. با اینکه ظرفیت تولید سیستم در حالت حضور پاسخگویی بار کمتر از حالت دیگر است، با این حال وجود پاسخگویی بار باعث کاهش شدید خاموشی شده و وضعیت قابلیت اطمینان را به مقدار قابل توجهی بهبود می‌دهد. با توجه به شکل، شاخص EENS در غیاب پاسخگویی بار از سال دهم شروع به افزایش میکند، در حالیکه در حضور بار پاسخگو این افزایش از سال هجدهم آغاز میشود، ضمن اینکه مقدار شاخص بسیار کمتر از حالت دیگر است.

در سالهای بعد برابر ۴٪ فرض شده است. بخش اعظم انرژی الکتریکی در کشور، توسط نیروگاههای بخاری، چرخه ترکیبی و گازی تولید میشود (مجموعاً ۹۴.۷٪ در سال ۱۳۹۰). در کشور ما با دورههای خشکسالی هر هشت سال یکبار، نیروگاههای برقی نمیتوانند نقطه اتکای مناسبی برای تأمین بار پایه باشند [۱۷]-[۱۶]. در این مقاله نیز برای توسعه تولید، تنها چهار نوع نیروگاه با مشخصات جدول ۱، مورد توجه قرار گرفته است. سایر اطلاعات مشابه مرجع [۱۲] میباشد.

جدول ۱: مشخصات واحدهای نامزد برای توسعه

نوع نیروگاه	بخاری	سیکل ترکیبی	گازی	بادی
ظرفیت اولیه (مگاوات)	۱۵۸۲۱	۱۴۷۸۰	۲۴۳۴۲	۹۴
طول عمر (سال)	۳۰	۳۰	۲۰	۲۰
طول مدت ساخت (سال)	۵	۵	۲	۱

نرخ بازگشت سرمایه همه تکنولوژیها برابر ۷٪ فرض شده است. سقف قیمتی و ارزش بار از دست رفته به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۵۰۰ (ده هزار ریال بر مگاوات ساعت) در نظر گرفته شدهاند. با توجه به اطلاعات آماری، ضرایب پیک بار فصلی به ترتیب برابر ۹۳٪، ۱۰۰٪، ۸۸٪ و ۷۷٪ پیک بار سال در نظر گرفته شدهاند. سهم هر یک از سطوح کم باری و میان باری و پر باری در فصول مختلف سال مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. سطوح بار در فصل تابستان برابر ۷۸٪، ۹۲٪ و ۱۰۰٪ پیک بار فصل و برای سایر فصول برابر ۶۴٪، ۸۵٪ و ۱۰۰٪ فرض شده است.

جدول ۲: مدت دوام سطوح مختلف بار در فصول سال

کم باری (%)	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
۲۶	۳۱	۳۴	۳۱	۳۱
۴۹	۴۹	۴۹	۳۸	۴۱
۲۵	۲۰	۲۸	۲۸	۲۸

نتایج شبیه‌سازی

شاخصهای ارزیابی سیستم

برای مطالعه تغییرات قیمت، دو شاخص حداکثر قیمت سالانه (AMP) و قیمت تمام شده برق برای مشترکین در سال (AEC) مطابق روابط (۳۲) و (۳۳) تعریف شدهاند. چون معمولاً هر هزینه‌ای در سمت تولید، بصورت غیرمستقیم به مشترکین تحمیل میشود، لذا AEC از مجموع میانگین وزن -

۵.۳.۱. تعریف شاخصهای بلندمدت

برای ارزیابی بهتر و ساده‌تر نتایج، سه شاخص بلندمدت پیشنهاد شده است. شاخص اول و سوم میانگین تغییرات شاخصهای قیمت و قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند و شاخص دوم، نشان‌دهنده نوسانات بلندمدت قیمت می‌باشد.

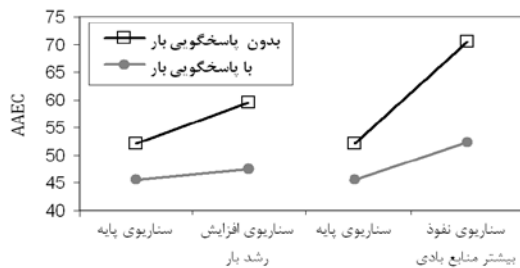
$$AAEC = \frac{\sum_{t=1}^T AEC_t}{NT} [$/MWh] \quad (35)$$

$$SAEC = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (AEC_t - AAEC)^2}{NT}} [$/MWh] \quad (36)$$

$$AEENS = \frac{\sum_{t=1}^T EENS_t}{NT} [MWh] \quad (37)$$

۵.۳.۲. اثر پاسخگویی بار در شاخصهای بلندمدت

در شکل ۴، تغییرات شاخص بلندمدت قیمت تمام شده برق، در اثر تغییر در شرایط آینده سیستم به نمایش درآمده است.

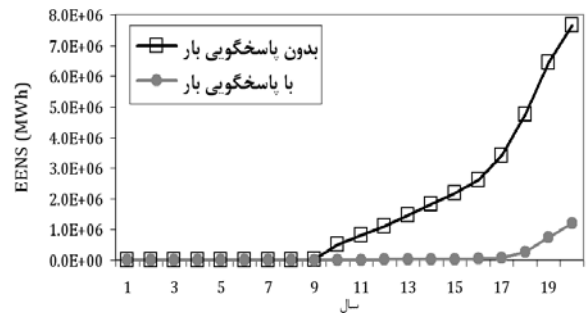


شکل ۴: میزان شاخص بلندمدت قیمت در هر سناریو

ملاحظه می‌شود، در هر دو سناریو (دوم و سوم)، وضعیت شاخص AAEC نسبت به حالت پایه بدتر شده است. با این حال وقتی پاسخگویی بار وجود دارد، میزان بدتر شدن شاخص در نتیجه این دو عدم قطعیت ممکن الوقوع، بسیار کمتر است. در جدول ۳، تغییرات شاخص SAEC، در سه سناریوی مفروض دیده می‌شود. که باز هم اثر قابل توجه پاسخگویی بار در بهبود شرایط سیستم بخوبی نمایان است. بعنوان مثال، سناریوی افزایش رشد بار، مقدار این شاخص در غیاب پاسخگویی بار را به ۱۵ میرساند، در حالیکه در حضور پاسخگویی بار این مقدار فقط ۳.۹ می‌باشد.

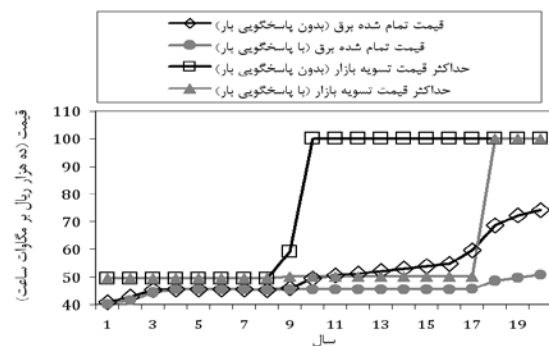
جدول ۳: شاخص سنجش نوسانات بلندمدت قیمت

سناریو	بدون پاسخگویی بار	با پاسخگویی بار
۱	9.6	2.3
۲	15.0	3.9
۳	26.6	11.6



شکل ۲: شاخص ارزیابی سالانه قابلیت اطمینان سیستم

در شکل ۳، شاخصهای قیمت به نمایش در آمده‌اند. در غیاب پاسخگویی بار، قیمت بازار از سال دهم به حداکثر مجاز خود میرسد، در حالیکه مقدار این شاخص در حضور پاسخگویی بار بسیار کمتر است. در مورد قیمت تمام شده برق نیز وقتی پاسخگویی بار در نظر گرفته می‌شود، منحنی قیمت علاوه بر کاهش قابل ملاحظه نسبت به حالت دیگر، با نوسانات کمتری مواجه می‌شود و روند هموارتری دارد.



شکل ۳: شاخصهای قیمت (در دو حالت حضور و عدم حضور پاسخگویی بار)

تأثیر پاسخگویی بار در افزایش مقاومت سیستم در برابر سناریوهای آینده

در این بخش، سه سناریوی ممکن الوقوع در نظر گرفته شده است.

- سناریو اول: حالت پایه (فرضیات اولیه سیستم)
 - سناریو دوم: افزایش نرخ رشد بار سالانه به اندازه ۰/۰۱
 - سناریو سوم: افزایش سطح منابع بادی (افزایش α_{wind} از ۲۵٪ به ۵۰٪)
- هدف از انجام شبیه‌سازیهای این بخش، بررسی اثر پاسخگویی بار بر مقاومت سیستم در برابر عدم قطعیت در رشد بار آینده (سناریو دوم) و همچنین سیاست گسترش بیشتر منابع انرژی نو (سناریو سوم) می‌باشد.

- [5] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi, "Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs", *Applied Energy*, January 2010.

[۶] حبیب‌الله اعلمی، محسن پارسا مقدم، غلامرضا یوسفی، "ارزیابی اجرای برنامه TOU کشور و پیشنهاد برنامه بهینه با استفاده از مدل DR"، ۲۴امین کنفرانس بین‌المللی برق، آبان ۱۳۸۸.

- [7] Chua-Liang Su, Kirschen D (2009) Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 24, Issue 3, pp 1199 – 1207.

- [8] Adelino J.C. Pereira, João Tomé Saraiva, "Generation expansion planning (GEP) – A long-term approach using system dynamics and genetic algorithms (GAs)", *Energy*, vol. 36, no. 8, August 2011.

- [9] DG. Choi, VM. Thomas, "An electricity generation planning model incorporating demand response", *Energy Policy*, vol. 42, March 2012.

- [10] Manho Joung, Jinho Kim, "Assessing demand response and smart metering impacts on long-term electricity market prices and system reliability", *Applied Energy*, vol. 101, January 2013.

[۱۱] مهدی صمدی، محمد حسین جاویدی، محمد صادق قاضی زاده، "تأثیر پاسخگویی بار بر تعویق توسعه تولید در محیط تجدید ساختار یافته"، *مجله علمی پژوهشی جهاد دانشگاهی (مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران)*، پذیرفته شده در فروردین ۱۳۹۲، در نوبت چاپ.

[۱۲] مهدی صمدی، محمد حسین جاویدی، محمد صادق قاضی زاده، "مدلسازی دینامیک سرمایه گذاری در توسعه تولید با در نظر گرفتن پاسخگویی بار"، *مجله علمی پژوهشی کیفیت و بهره وری در صنعت برق ایران*، سال اول، شماره دوم، ۱۳۹۱.

- [13] Mohsen Assili, M. Hossein Javidi D.B., Reza Ghazi, "An improved mechanism for capacity payment based on system dynamics modeling for investment planning in competitive electricity environment", *Energy Policy*, vol. 36, no.10, October 2008.

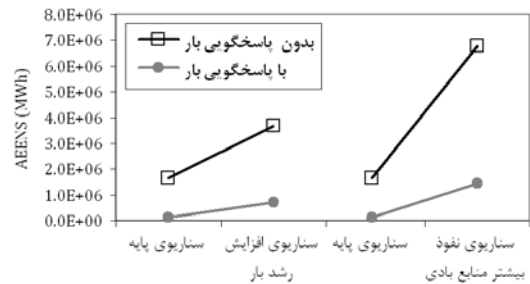
- [14] Fernando Olsina, Francisco Garcés, "Modeling long-term dynamics of electricity markets", *Energy Policy*, vol. 34, no. 12, August 2006.

- [15] L. Goel, Qiuwei Wu; "Nodal price volatility reduction and reliability enhancement of restructured power systems considering demand-price elasticity", *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, 2008.

[۱۶] حامد شکوری، احسان کرمی، "ارائه راهکارها برای بهبود روش‌های برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی ایران"، گزارشات دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو، تابستان ۱۳۸۷.

[۱۷] آمار تفصیلی صنعت برق ایران، ویژه تولید نیروی برق سال ۱۳۹۰.

در شکل ۵، تغییرات شاخص قابلیت اطمینان رسم شده است. عدم پاسخگویی بار باعث افزایش شدید خاموشی (AEENS) بخصوص در سناریوی ۳ (نفوذ بیشتر منابع بادی) شده، در حالی که پاسخگویی بار منجر به وضعیت مطلوبتری شده است. لذا میتوان گفت: پاسخگویی بار موجب استحکام بیشتر سیستم در برابر عدم قطعتهای محتمل در آینده میگردد.



شکل ۵: میزان شاخص بلندمدت قابلیت اطمینان در هر سناریو

نتیجه‌گیری

در این مقاله با مدل‌سازی دینامیک سرمایه‌گذاری تکنولوژیهای مختلف در سیستم قدرت، و همچنین پیاده‌سازی تأثیرات متقابل بین مصرف، قیمت بازار و توسعه تولید، به آنالیز اثرات بلندمدت پاسخگویی بار پرداخته شده است. در این مدل عدم قطعیت تولید واحدهای حرارتی و نیز مولدهای بادی در بلندمدت بخوبی مدل‌سازی گردیده است. شبیه‌سازیها بر روی اطلاعات واقعی سیستم عرضه انرژی الکتریکی در ایران انجام شده است. طبق نتایج بدست آمده؛ پاسخگویی بار، علیرغم کاهش توسعه ظرفیت تولید، باعث بهبود قابلیت اطمینان در سیستم میشود. در حضور پاسخگویی بار میزان قیمت و همچنین نوسانات آن در بلندمدت کاهش مییابد. همچنین در شرایطی که پیشبینی آینده سیستم با عدم قطعیت همراه است نیز، وجود پاسخگویی بار باعث بهبود شرایط فنی و اقتصادی سیستم میشود.

مراجع

- [1] Pelin Yilmaz, M. Hakan Hocaoglu, "A pre-feasibility case study on integrated resource planning including renewables", *Energy Policy*, Volume 36, Issue 3, March 2008, Pages 1223-1232.
- [2] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets", *Electric Power System Research*, vol. 80, no. 4, April 2010.
- [3] SE. Widergren, "Demand or request: Will load behave?", *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, July 2009.
- [4] M.H. Albadi, E.F. El-Saadany "A summary of demand response in electricity markets", *Electric Power Systems Research*, November 2008.