

ارائه رویکرد تسویه بازار توان راکتیو مستقل مبتنی بر شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو

الهه صحرائی^۱، دانشجو کارشناسی ارشد، علیرضا حسن نژاد مرزونی^۲، دانشجو کارشناسی ارشد، علیرضا ذکریازاده^۳، استادیار، مصطفی غلامی^۴، استادیار

۱-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران
E.sahraie@mazust.ac.ir

۲-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران
alireza.hassannejad@mazust.ac.ir

۳-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران
zakaria@mazust.ac.ir

۴-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران
m.gholami@mazust.ac.ir

چکیده: توان راکتیو یکی از مهم‌ترین خدمات جانبی است که کنترل آن در شبکه برای حفظ پایداری ولتاژ و قابلیت اطمینان تأمین بار ضروری است. با این حال بازار مستقل توان راکتیو اغلب با اهداف مرسومی شامل کمینه کردن هزینه‌های نهایی جبران راکتیو شبکه و بیشینه کردن سود مشارکت‌کنندگان در جبران راکتیو تسویه می‌شود. این در حالی است که در تسویه بازار توان راکتیو مستقل علاوه بر لحاظ توابع هدف مرسوم می‌توان جنبه‌های دیگری شامل سوددهی بازار، توزیع سود، تعداد مشارکت‌کنندگان و سطح رقابتی بازار را در نظر گرفت تا تقاضای مشارکت در این بازار افزایش یافته و توان راکتیو موردنیاز شبکه در محیط رقابتی تأمین گردد. از این‌رو تأمین هم‌زمان مقادیر بهینه شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو متناسب با شرایط شبکه یکی از اولویت‌های بهبود شرایط جبران راکتیو در شبکه است. لذا در این مقاله یک رویکرد جدید برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل بهمنظور تأمین هم‌زمان مقادیر بهینه برخی شاخص‌های کیفیت جبران توان راکتیو و اهداف مرسوم پیشنهاد شده است. رویکرد تسویه مبتنی بر شاخص پیشنهادی برای بازار توان راکتیو مستقل، در شبکه ۲۴ شین IEEE RTS با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی بهبود رقابت در جبران توان راکتیو، رشد تمایل به مشارکت بازار توان راکتیو، توزیع سود عادلانه، کاهش هزینه‌های جبران توان راکتیو شبکه و افزایش سطح سود مشارکت‌کنندگان در بازار توان راکتیو را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خدمات جانبی، بازار توان راکتیو مستقل، سطح رقابتی بازار، توزیع عادلانه سود، شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۷/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۱/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مصطفی غلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران- m.gholami@mazust.ac.ir

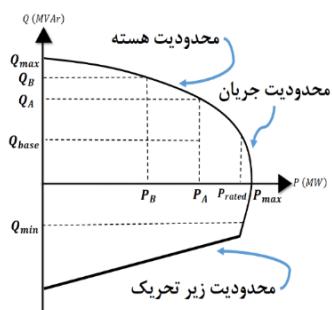
قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه تولید در ناحیه (Q_{base}, Q_A) ، به طور یکسان برای همه واحدها.	$\pi_2^{i,u}$
قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه فرصت از دست رفته در ناحیه (Q_A, Q_B) ، به طور یکسان برای همه واحدها.	$\pi_3^{i,u}$
معادل نقطه‌ای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید توان را کمیو بیش از آن در یک نقطه کار، نیازمند کاهش دادن تولید توان اکتیو است.	Q_A, Q_B

۱- مقدمه

انتخاب توابع هدف مناسب برای تسویه بازار توان را کمیو با توجه به اهمیت کنترل توان را کمیو در حفظ ثبات و پایداری شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نمونه‌هایی از توابع هدف تسویه بازار توان را کمیو به شرح زیر است:

کمینه کردن هزینه‌های رزرو توان اکتیو و راکتیو و به حداقل رساندن انرژی تأمین نشده ناشی از سطوح نامناسب توان را کمیو در شبکه [1]، کمینه کردن هزینه‌های جبران توان را کمیو در بازار [2]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان را کمیو توسط منابع تولید پراکنده^۱ (DGs)، کمینه کردن اختلاف قرارداد معامله توان اکتیو با مقادیر واقعی معامله توان اکتیو بین سیستم توزیع و DGs، کمینه کردن تلفات اکتیو در خطوط شبکه و کمینه کردن شاخص ناهمگنی ولتاژ [3]. کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان را کمیو و هزینه‌های انتقال انرژی به طور هم‌زمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ و ذخیره توان را کمیو [4]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان را کمیو و تلفات شبکه هم‌زمان با افزایش تأمین بار و شاخص پایداری ولتاژ [5]، کمینه کردن هزینه نهایی بازار هم‌زمان توان اکتیو - راکتیو [6]، کمینه کردن هزینه‌های بازار شامل هزینه‌های خریداری انرژی از منابع انرژی پراکنده و شرکت‌های توزیع، هزینه‌های احتمالی مربوط به انتشار آلاینده CO₂، هزینه‌های جبران توان را کمیو از طریق منابع انرژی پراکنده و شرکت‌های توزیع [7]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان را کمیو و کمینه کردن هزینه پرداختی برای در دسترس بودن واحداها [8]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان را کمیو و تلفات مدل شده ناشی از توان را کمیو [9,10]، کمینه کردن هزینه بazar توان را کمیو و رزرو توان را کمیو هم‌زمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ [11]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان اکتیو و راکتیو مستقل و بازار هم‌زمان توان اکتیو-راکتیو با در نظر گرفتن هزینه آلاینده‌های محیطی و پیاده‌سازی بازار منطقه‌ای [12]. با مروری بر توابع هدف تسویه بازار توان را کمیو، می‌توان دریافت که در اکثر مراجع بازار توان را کمیو با هدف کمینه کردن هزینه‌های بازار، کمینه کردن تلفات ناشی از انتقال توان و همین‌طور حفظ محدوده پایداری و امنیت ولتاژ تسویه شده است. این در حالی است که پارامترهای نظیر سوددهی بازار، توزیع سود عادلانه، میزان مشارکت منابع تولیدی، پتانسیل اعمال قدرت بازار، سطح رقابتی بازار و توزیع عادلانه سهم تولید که همگی از پارامترهای

نحوه ارائه	OZ
هزینه فرصت از دست رفته	LOC
قیمت تسویه بازار	MCP
هزینه جبران توان راکتیو	$RPCC$
مازاد خالص	NS
نرخ مشارکت تولیدکنندگان	UPR
نرخ سوددهی بازار	MPR
نرخ تعداد سودکنندگان در بازار	$PPNR$
نرخ توزیع مازاد خالص	$NSDR$
نرخ سهم تولید	GSR
رسک کار در نزدیکی محدوده ظرفیت	$RWCL$
نرخ پرداخت برای تولید برای فرصت از دست رفته در ناحیه فرصت	$CRLO$
تعداد تولیدکنندگان توان در ناحیه فرصت	NGO
شاخص هرفینال-هریشمن	HHI
شاخص شماره شین‌ها	i, j
علاوه و اختصارات	u
شاخص واحدهای تولیدکننده.	NB
تعداد کل شین‌های شبکه.	NU_i
تعداد کل واحدهای تولیدی متصل به شین i .	$Q_{av_{max}}$
حداقل و حداکثر توان را کمیو در دسترس برای یک واحد تولیدی.	$Q_{av_{min}}$
حداقل و حداکثر توان را کمیو ارائه شده توسط یک واحد.	Q_{minG}
تفاضای توان را کمیو در شین i .	Q_{maxG}
تفاضای توان را کمیو در شین i .	Q_{Di}
تفاضای توان را کمیو در شین i .	P_{Di}
نقطه‌ای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید را کمیو تا آن نقطه برای حفظ تجهیزات کمکی صرف شده و جزء خدمات جانبی حساب نمی‌شود.	Q_{base}
پیشنهاد قیمت برای هزینه در دسترس بودن واحد u متصل به شین i [\$.].	$a_0^{i,u}$
پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای جذب را کمیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$ (توضیع واحد u متصل به شین i - h [\$. MVar]).	$M_1^{i,u}$
پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_{base}, Q_A) (توضیع واحد u متصل به شین i - h [\$. MVar]).	$M_2^{i,u}$
پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_A, Q_B) (توضیع واحد u متصل به شین i - h [\$. MVar]).	$M_3^{i,u}$
توان را کمیو تولید یا جذب شده توسط ژنراتور u متصل به شین i [Mvar].	$Q_G^{i,u}$
توان را کمیو جذب شده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه $(Q_{min}, 0)$.	$Q_{1G}^{i,u}$
توان را کمیو تولید شده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_{base}, Q_A) .	$Q_{2G}^{i,u}$
توان را کمیو تولید شده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_A, Q_B) .	$Q_{3G}^{i,u}$
متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i .	$B_P^{i,u}$
متغیر باینری نشان‌دهنده جذب واحد u متصل به شین i .	$B_1^{i,u}$
متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i .	$B_2^{i,u}$
متغیر باینری نشان‌دهنده جذب واحد u متصل به شین i .	$B_3^{i,u}$
نواحی جبران را کمیو شبکه.	$B_P^{i,u}$
ادمیتانس بین شین i و شین j .	$Y_{i,j}$
زاویه ادمیتانس.	θ_{ij}
زاویه ادمیتانس خطوط.	δ
توان منتقل شده توسط خط بین شین i و شین j .	$S_{i,j}$
اندازه و زاویه ولتاژ در شین i .	δ_j, V_j
قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه در دسترس بودن، به طور یکسان برای همه واحدها.	$\pi_0^{i,u}$
قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه جذب توان را کمیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$.	$\pi_1^{i,u}$
به طور یکسان برای همه واحدها.	



شکل (۱): منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون

لذا جبران توان راکتیو در این دو ناحیه به عنوان خدمات جانبی تلقی می‌گردد که واحدهای تولیدی می‌توانند بابت ارائه این خدمات هزینه دریافت کنند [13]. همین‌طور طبق شکل (۱) تولید توان راکتیو در ناحیه $(Q_A - Q_B)$ موجب کاهش تولید توان راکتیو و خارج شدن ژنراتور از نقطه بهینه تولید توان راکتیو می‌شود. از همین رو تولید‌کنندگان برای جبران خسارت‌های تولید راکتیو در نزدیکی مرز حداکثر ظرفیت، توان راکتیو و خسارت‌های تولید راکتیو در این ناحیه موسوم به پیشنهاد قیمت‌های بالاتری برای تولید توان در این ناحیه موسوم به ناحیه فرست^۲ (OZ) ارائه می‌دهند [12]. پیشنهاد قیمت‌های بالا در ناحیه فرست موجب افزایش هزینه تولید راکتیو در این ناحیه موسوم به هزینه فرست ازدست‌رفته^۳ (LOC) می‌شود از این‌رو واحدهای تولیدی قیمت‌های پیشنهادی خود را برای جبران راکتیو در سه ناحیه $(Q_A - 0)$ به عنوان ناحیه شماره ۱، ناحیه $(Q_B - Q_{base})$ به عنوان ناحیه شماره ۲ و ناحیه $(Q_A - Q_B)$ به عنوان ناحیه شماره ۳ در بازار ISO^۴ پیشنهاد می‌دهند [13]. لازم به ذکر است که Q_{base} در شکل (۱) آستانه توان راکتیو موردنیاز برای تجهیزات کمکی ژنراتورهاست و Q_A و Q_B آستانه حداکثر توان راکتیو تولیدی مجاز ژنراتور در نواحی $(Q_{base} - Q_A)$ و $(Q_A - Q_B)$ هستند [9]. قیمت‌های پیشنهادی ارائه شده به بازار ISO از طرف تولید‌کنندگان و مشخصات منحنی قابلیت تولید هر یک از ژنراتورهای تولید‌کننده به عنوان ورودی‌های مسئله تسویه بازار توان راکتیو شناخته می‌شوند. این اطلاعات همراه با توابع هدف تسویه بازار توان راکتیو و قیود تسویه بازار در الگوریتم‌های بهینه‌سازی قرار گرفته و سهم تولید و جذب راکتیو واحدها به همراه قیمت تسویه بازار^۵ (MCP) به ازای نواحی جبران توان راکتیو به عنوان خروجی‌های تسویه بازار توان راکتیو در اختیار مشارکت‌کنندگان قرار می‌گیرند.

بازار توان راکتیو بازاری مستقل از بازار انرژی است که در آن سهم تولید و جذب راکتیو برای واحدهای تولیدی مشخص می‌گردد. جبران توان راکتیو متناسب با منحنی قابلیت تولید ژنراتورها که در شکل (۱) نمایش داده شده انجام می‌شود. توان راکتیو تولید شده در ناحیه $(Q_A - 0)$ صرف تجهیزات کمکی ژنراتور می‌شود [13]. لذا تولید راکتیو در این ناحیه به عنوان خدمات جانبی محسوب نشده و مشمول دریافت هزینه از بازار نمی‌گردد [13]. این در حالی است که جذب راکتیو در ناحیه $(Q_{min} - 0)$ و تولید راکتیو در ناحیه $(Q_{base} - Q_A)$ موجب تحمیل هزینه‌هایی ناشی تلفات می‌شود [13].

مهم و مؤثر در جبران توان راکتیو هستند به‌طور مستقیم مدنظر نبوده‌اند. به‌این‌ترتیب عدم کنترل مستقیم شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو و صرف پرداختن به اهداف مرسوم تسویه این بازار موجب عدم رضایت بازیگران بازار و عدم بهره‌وری مناسب تسویه بازار توان راکتیو به نفع بهبود شرایط شبکه شده است.

لذا در این مقاله با پیشنهاد رویکردی نو در تسویه بازار توان راکتیو که امکان کنترل هم‌زمان چندین شاخص و تابع هدف را فراهم می‌کند، فقدان امکان بهبود همه جانبه شرایط شبکه توسط کنترل کیفیت جبران توان راکتیو شبکه بر طرف گردیده است. رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو دارای نوآوری‌هایی به شرح زیر است.

۱- رویکرد پیشنهادی امکان بهبود شاخص‌های کیفیت جبران توان راکتیو را که شماری از آن‌ها در این مقاله پیشنهاد شده‌اند به‌طور هم‌زمان با اهداف مرسوم تسویه بازار توان راکتیو فراهم می‌کند.

۲- قابلیت کنترل هم‌زمان چندین پارامتر در رویکرد پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند تا با اعمال ضرایب وزنی به هر یک از توابع هدف، تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط شبکه منعطف باشد.

۳- طرح پیشنهادی امکان ارائه مشوق‌های مشارکتی را بدون اختصاص هزینه‌هایی مازاد بر هزینه‌های جبران توان راکتیو فراهم می‌کند.

۴- امکان جایگذاری انواع اهداف و شاخص‌ها در رویکرد پیشنهادی وجود دارد که این امر موجب کارایی طرح پیشنهادی در مواجه با ارائه شاخص‌ها و توابع هدف نو برای تسویه بازار توان راکتیو می‌گردد. ساختار مقاله پیش رو عبارت است از: مکانیزم تسویه بازار توان راکتیو مستقل (۲) رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو (۳) و تحلیل نتایج (۴) و جمع‌بندی (۵) است.

۲- مکانیزم تسویه بازار توان راکتیو مستقل

بازار توان راکتیو بازاری مستقل از بازار انرژی است که در آن سهم تولید و جذب راکتیو برای واحدهای تولیدی مشخص می‌گردد. جبران توان راکتیو متناسب با منحنی قابلیت تولید ژنراتورها که در شکل (۱) نمایش داده شده انجام می‌شود. توان راکتیو تولید شده در ناحیه $(Q_A - 0)$ صرف تجهیزات کمکی ژنراتور می‌شود [13]. لذا تولید راکتیو در این ناحیه به عنوان خدمات جانبی محسوب نشده و مشمول دریافت هزینه از بازار نمی‌گردد [13]. این در حالی است که جذب راکتیو در ناحیه $(Q_{min} - 0)$ و تولید راکتیو در ناحیه $(Q_{base} - Q_A)$ موجب تحمیل هزینه‌هایی ناشی تلفات می‌شود [13].

$$B_p^{i,u} \left(\begin{array}{l} (\pi_0^{i,u} - a_0^{i,u})(Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}}) \\ -B_1^{i,u}(\pi_1^{i,u} - M_1^{i,u})Q_{1G}^{i,u} \\ +B_2^{i,u}(\pi_2^{i,u} - M_2^{i,u})(Q_{2G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ +B_3^{i,u}(\pi_3^{i,u} - M_3^{i,u})(Q_{3G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ +\frac{1}{2}B_3^{i,u}(\pi_3^{i,u} - M_3^{i,u})((Q_{3G}^{i,u})^2 - (Q_{AG}^{i,u})^2) \end{array} \right)$$

۲-۲- قیود جبران توان راکتیو

قیود جبران توان راکتیو در بازار توان راکتیو مستقل طبق روابط (۱۰) تا (۱۶) هستند [12].

$$B_1^{i,u}, B_2^{i,u}, B_3^{i,u} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$B_1^{i,u} + B_2^{i,u} + B_3^{i,u} \leq 1 \quad (11)$$

$$B_p^{i,u} = B_1^{i,u} + B_2^{i,u} + B_3^{i,u} \quad (12)$$

$$Q_G^{i,u} = Q_{1G}^{i,u} + Q_{2G}^{i,u} + Q_{3G}^{i,u} \quad (13)$$

$$B_1^{i,u} Q_{minG}^{i,u} \leq Q_{1G}^{i,u} \leq 0 \quad (14)$$

$$B_2^{i,u} Q_{baseG}^{i,u} \leq Q_{2G}^{i,u} \leq B_2^{i,u} Q_{AG}^{i,u} \quad (15)$$

$$B_3^{i,u} Q_{AG}^{i,u} \leq Q_{3G}^{i,u} \leq B_3^{i,u} Q_{BG}^{i,u} \quad (16)$$

قید (۱۰) ناحیه جبران راکتیو را با ضرایب باینری مشخص می‌کند. طبق قید (۱۱) هر واحد تولیدی در یکزمان (هر باز تسویه بازار)، تنها می‌تواند در یکی از سه ناحیه جذب و عملکرد و فرست باشد. طبق تعریف ارائه شده از ضریب $B_p^{i,u}$ در رابطه (۱۲)، تنها واحدهایی وارد شرایط دریافت هزینه در دسترس بودن است که در یکی از سه ناحیه معرفی شده در شکل (۱)، در جبران توان راکتیو شرکت داده شده باشند. قیود (۱۳)-(۱۶) محدوده‌ی تولید و جذب توان راکتیو هر واحد را در هر ناحیه طبق شکل (۱) نشان می‌دهد.

۳-۲- قیود پخش بار

$$\sum_{u=1}^{NU_i} Q_{Gi}^{i,u} - Q_{Di} = \sum_{i=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (17)$$

$$\sum_{u=1}^{NU_i} P_{Gi}^{i,u} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (18)$$

$$S_{i,j} \leq S_{i,j}^{max} \quad (19)$$

$$V_j^{min} \leq V_j \leq V_j^{max}, \quad \forall j \in loadedbuses \quad (20)$$

روابط (۱۷) و (۱۸) قیود تعادل بار شبکه می‌باشند [12]. روابط (۱۹) و (۲۰) محدودیت‌های جریان خطوط و ولتاژ شین‌ها هستند [12].

۳- رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو

برای ارائه رویکرد تسویه پیشنهادی چندین شاخص سنجش کیفیت جبران توان راکتیو معرفی شده است. شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو مستقل شامل: نرخ مشارکت واحد، نرخ سوددهی بازار، نرخ پخش سود، نرخ سهم از تولید و نرخ تولید و پرداخت برای ناحیه فرست، در بهینه‌سازی تابع هدف این مقاله استفاده شده‌اند. این شاخص‌ها طی روابط (۲۱) تا (۲۸) معرفی شده‌اند.

$$RPCC_i = a_{0,i} + \int_{Q_{min}}^0 M_{1i} dQ_i + \int_{Q_{base}}^{Q_A} M_{2i} dQ_i + \int_{Q_A}^{Q_B} (M_{3i} Q_i) dQ_i \quad (1)$$

نویسنده‌گان مرجع [12]، با اشاره به این موضوع که پرداخت هزینه در دسترس بودن باید متناسب با ظرفیت در دسترس واحدها برای جبران توان راکتیو باشد، رابطه (۱) را به شکل رابطه (۲) ارتقاء پخشیدند.

$$RPCC_i = a_{0,i} (Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}}) + \int_{Q_{min}}^0 M_{1i} dQ_i + \int_{Q_{base}}^{Q_A} M_{2i} dQ_i + \int_{Q_A}^{Q_B} (M_{3i} Q_i) dQ_i \quad (2)$$

در رابطه (۲) ضریب $(Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}})$ به عنوان ظرفیت در دسترس واحدها برای جبران توان راکتیو در محاسبه هزینه در دسترس بودن لحاظ شده است. لذا هزینه در دسترس بودن واحدها در رابطه (۲) به جای $\$/MVar - h$ بر حسب $\$/MVar - h$ تسویه بازار توان راکتیو مستقل با قیودی شامل قیود تسویه، قیود پخش بار و قیود جبران توان راکتیو همراه است. این قیود به شرح زیر به مسئله بهینه‌سازی تسویه بازار توان راکتیو اضافه می‌شوند.

۱-۲- قیود تسویه

قیمت‌های تسویه بازار طبق قیود (۳) تا (۶) با عنوان قیود تسویه یکسان^۷ (UP) قابل محاسبه هستند.

$$B_0^{i,u} a_0^{i,u} \leq \pi_0 \quad (3)$$

$$B_1^{i,u} M_1^{i,u} \leq \pi_1 \quad (4)$$

$$(B_2^{i,u} + B_3^{i,u}) M_2^{i,u} \leq \pi_2 \quad (5)$$

$$B_3^{i,u} M_3^{i,u} \leq \pi_3 \quad (6)$$

در تسویه یکسان بالاترین قیمت پیشنهادشده توسط واحدهای تولیدی، به ازای هر ناحیه جبران توان راکتیو، به عنوان قیمت تسویه بازار به طور برابر برای تمامی بازیگران بازار در نواحی یکسان تعیین می‌گردد [13]. طرح پرداخت یکسان موجب ایجاد انگیزه برای پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی می‌گردد [14].

پس از تسویه بازار و جایگذاری قیمت‌های تسویه به جای قیمت‌های پیشنهادی واحدهای تولیدی در رابطه (۲) هزینه جبران راکتیو شبکه به صورت رابطه (۷) تغییر می‌کند. هزینه فرست از دسترفته به عنوان پخشی از هزینه نهایی جبران راکتیو طبق رابطه (۸) قابل محاسبه است. مازاد خالص^۸ (NS) واحدهای تولیدی به صورت اختلاف درآمد آن‌ها از هزینه‌های حدی تولید توان راکتیو طبق رابطه (۹) قابل محاسبه است.

$$RPCC^{i,u} = B_p^{i,u} \left(\begin{array}{l} \pi_0^{i,u} (Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}}) - B_1^{i,u} \pi_1^{i,u} Q_{1G}^{i,u} \\ + B_2^{i,u} \pi_2^{i,u} (Q_{2G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ + B_3^{i,u} \pi_3^{i,u} (Q_{3G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ + \frac{1}{2} B_3^{i,u} \pi_3^{i,u} ((Q_{3G}^{i,u})^2 - (Q_{AG}^{i,u})^2) \end{array} \right) \quad (7)$$

$$LOC^{i,u} = \frac{1}{2} B_3^{i,u} \pi_3^{i,u} ((Q_{3G}^{i,u})^2 - (Q_{AG}^{i,u})^2) \quad (8)$$

$$NS^{i,u} = \quad (9)$$

هزینه‌های بازار توان راکتیو مستقل می‌گردد. در رویکرد تسویه پیشنهادی بهینه‌سازی مقادیر شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو شبکه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. به این ترتیب در رویکرد پیشنهادی شاخص‌های MAXIND بیشینه و شاخص‌های MININD کمینه خواهد شد.

طبق (۲۹)، MAXIND ماتریسی شامل شاخص‌هایی است که بیشینه شدن آن‌ها مطلوب مسئله است. از سوی دیگر، MININD طبق (۳۰)، ماتریسی شامل شاخص‌هایی است که کمینه شدن آن‌ها طبق تعاریف ارائه شده از شاخص‌های پیشنهادی در بخش گذشته مطلوب مسئله است.

$$MAXIND_{1 \times n} = [UPR, MPR, PPNR] \quad (29)$$

$$MININD_{1 \times k} = [NSDR, GSR, RWCL, CRLO, NGO] \quad (30)$$

تابع هدف پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل طبق رابطه (۳۱) مشکل از دو هدف کمینه کردن MININD و بیشینه کردن MAXIND است. در رابطه (۳۱)، ضرایب وزنی عملکرد تسویه بازار اعمال شده‌اند تا تأثیر هر شاخص در تابع هدف، قابل تنظیم باشد. اعمال ضرایب وزنی به شاخص‌ها، موجب تنظیم نتایج بازار متناسب با ترتیب اولویت ضرایب اعمالی به شاخص‌ها می‌گردد. وزن‌دهی به هریک از شاخص‌ها به عنوان تابع هدف، مطلوب رویکرد پیشنهادی برای انعطاف تابع هدف تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط و اضطرار شبکه است.

$$OF = \begin{bmatrix} \max \left(\sum_{i=1}^n W(i)^{MAXIND} \times MAXIND(i) \right), \\ \min \left(\sum_{i=1}^k W(i)^{MININD} \times MININD(i) \right) \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$W^{MAXIND} = [w_{UPR}, w_{MPR}, w_{PPNR}] \quad (32)$$

$$W^{MININD} = [w_{NSDR}, w_{GSR}, w_{RWCL}, w_{CRLO}, w_{NGO}] \quad (33)$$

وزن اعمالی به شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو هستند. رویکرد تسویه پیشنهادی با سه طرح وزن‌دهی به شاخص‌ها، برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل در نظر گرفته شده است.

۳- وزن‌دهی یکسان

در وزن‌دهی یکسان^{۱۸} (EW) با اعمال مقادیر ضریب وزنی یکسان به هر کدام از درایه‌های ماتریس W^{MAXIND} و W^{MININD} ، همه شاخص‌ها با تأثیر یکسان در پیاده‌سازی رویکرد تسویه پیشنهادی شرکت داده شده‌اند. به عبارتی تأثیر هر کدام از شاخص‌ها در تسویه بازار، با سایر شاخص‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

۱) نرخ مشارکت واحدها^{۱۹} (UPR) طبق رابطه (۲۱)، نسبت مجموع تعداد واحدهای مشارکت‌کننده در جبران توان راکتیو شبکه به تعداد کل واحدهای شبکه است.

$$UPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} NU_i} \times 100 \quad (21)$$

۲) نرخ سوددهی بازار^{۲۰} (MPR) و نرخ واحدهای سودکننده^{۲۱} (PPNR) طبق روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شوند.

$$MPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} NS^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} RPCC^{i,u}} \times 100 \quad (22)$$

$$PPNR = \frac{\text{تعداد واحدهایی که سود دریافت کرده‌اند}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100 \quad (23)$$

MPR نسبت مجموع مازاد خالص واحدهای مشارکت‌کننده در جبران توان راکتیو شبکه به مجموع هزینه‌های نهایی بازار و PPNR نسبت تعداد واحدهای سودکننده به تعداد کل واحدهای جبران‌کننده توان راکتیو در شبکه است.

۳) نرخ پخش سود^{۲۲} (NSDR) طبق رابطه (۲۴) انحراف معیار^{۲۳} (StD) نسبت سود هر واحد به مجموع سود جبران‌کننده‌اند توان راکتیو است. مقدار این شاخص، اختلاف سهم سود هر واحد را از میانگین سهم سود واحدها نشان می‌دهد.

$$NSDR = StD \left(\frac{NS^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} NS^{i,u}} \right) \times 100 \quad (24)$$

۴) نرخ سهم تولید^{۲۴} (GSR) طبق رابطه (۲۵) انحراف معیار نسبت جبران توان راکتیو هر واحد به مجموع توان راکتیو جبران‌شده توسط واحدها است. کنترل شاخص GSR، موجب توزیع سهم جبران توان راکتیو واحدها می‌شود.

$$GSR = StD \left(\frac{|Q_G^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} |Q_G^{i,u}|} \right) \times 100 \quad (25)$$

۵) نرخ ریسک کار در مرز ظرفیت^{۲۵} (RWCL) طبق رابطه (۲۶) محاسبه می‌گردد.

$$RWCL = \frac{\text{تعداد واحدهایی که در ۹۰\% طرفیت بیشینه خود کار کنند}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100 \quad (26)$$

RWCL کنترل شاخص، موجب مدیریت هزینه‌های اضافی ناشی از خسارت‌های فنی و مالی تولید توان راکتیو در مزهای حداکثر ظرفیت می‌شود.

۶) رابطه (۲۷) نرخ پرداخت برای ناحیه فرست^{۱۶} (CRLO) و رابطه (۲۸) نرخ تعداد واحدهای جبران‌کننده توان راکتیو در ناحیه فرست^{۱۷} (NPO) است.

$$CRLO = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u} \times RPCC^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} RPCC^{i,u}} \times 100 \quad (27)$$

$$NPO = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100 \quad (28)$$

CRL0 و NPO موجب کنترل هزینه‌های ناشی از خسارت‌های وارد و احدها در ناحیه فرست و نهایتاً مدیریت

سناریوهای جدول (۲) به منظور اعمال وزن دهی تبعیضی تنظیم شده‌اند. طبق جدول (۲) هر بار NS و RPCC با تأثیر بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها در تأمین MPR_{DW} شرکت داده شده‌اند.

$$MPR_{DW} = \frac{w_{max} \left(\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} (NS^{i,u}) \right)}{w_{min} \left(\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} (RPCC^{i,u}) \right)} \times 100 \quad (۳۴)$$

۴- تحلیل نتایج

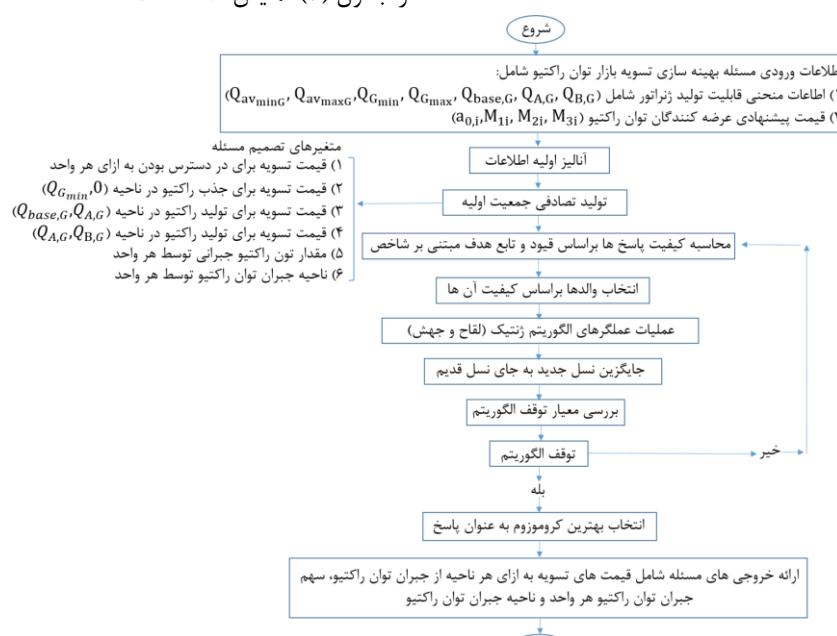
رویکرد تسویه پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه ۲۴ شینه RTS تست شده است. این شبکه شامل ۳۲ واحد تولیدی و یک کنداسور سنکرون متصل به شین ۱۴ است [15]. قابل توجه است که هیچ LOC برای کنداسور سنکرون متصل به گره ۱۴ در نظر گرفته نمی‌شود [12]. به عبارتی برای کنداسور سنکرون متصل به شین ۱۴ $M_3 = 0$ است. بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. روند نمایی مسئله تسویه بازار توسط الگوریتم ژنتیک به شرح شکل (۲) است. شبهه‌سازی‌ها مجموعاً در ۱۱ سناریو طبق جدول (۳) برای سه حالت وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی صورت گرفته است. مقادیر ضرایب وزنی اعمالی به شاخص‌ها در هر سناریو طبق جدول (۱) و جدول (۲) می‌باشند. در ادامه مقادیر شاخص‌های به دست آمده از تسویه بازار راکتیو مستقل، در سناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی به صورت دقیق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر شاخص‌ها در سناریوهای مختلف در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند.

۲-۲- وزن دهی مجزا

در وزن دهی مجزا^{۱۹} (SW)، هر بار یکی از شاخص‌ها با وزن بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها در تسویه بازار، شرکت داده می‌شود. سناریوهای وزن دهی مجزا طبق جدول (۱) پیشنهاد شده‌اند. اعمال وزن بسیار اندک در حد ۱٪ به شاخص‌ها و اجتناب از اعمال وزن ۰٪ در سناریوهای جدول (۱) به منظور تأکید بر رویکرد تأمین همزمان چند شاخص بوده است.

۲-۳- وزن دهی تبعیضی

طبق تعریف ارائه شده از شاخص MPR در رابطه (۲۲)، مقدار این شاخص مستقیماً با هزینه نهایی بازار و مازاد خالص واحدهای تولیدی در ارتباط است. تأمین اهداف معمول تسویه بازار توان راکتیو نظری کمینه کردن هزینه نهایی و تشویق مشارکت کنندگان به تداوم مشارکت MPR از طریق بهبود سوددهی، مستقیماً با وزن دهی به شاخص MPR امکان‌پذیر است. برای وزن دهی به شاخص MPR، ضرایب w_{max} و w_{min} به ترتیب برای کنترل مجموع مازاد خالص واحدها و کنترل مجموع هزینه نهایی بازار طبق رابطه (۳۴) به شاخص MPR اعمال شده‌اند. وزن دهی تبعیضی به شاخص MPR، کنترل مازاد خالص و هزینه‌های نهایی بازار را به صورت مستقیم و به عنوان اهدافی مجزا فراهم می‌کند. این وزن دهی تبعیضی به منظور انعطاف‌رویکرد تسویه پیشنهادی در شرایط مختلف شبکه و بازار پیشنهاد شده است.



شکل (۲): روند نمایه حل مسئله تسویه بازار توان راکتیو با رویکرد تسویه پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک
جدول (۱): سناریوهای وزن دهی مجزا

$[W_{UPR}$	W_{MPR}	W_{PPNR}	$[W_{NSDR}$	W_{GSR}	W_{RWCL}	W_{CRL0}	$W_{NGO}]$	سناریو
[۹۳	۱		[۱]	[۱]	۱	۱	۱	۱]
[۱	۹۳		[۱]	[۱]	۱	۱	۱	۱]

[۱]	۱	۹۳]	[۱]	۱	۱	۱	۱	۱]	۳
[۱]	۱	۱]	[۹۳	۱	۱	۱	۱	۱]	۴
[۱]	۱	۱]	[۱	۹۳	۱	۱	۱	۱]	۵
[۱]	۱	۱]	[۱	۱	۹۳	۱	۱	۱]	۶
[۱]	۱	۱]	[۱	۱	۱	۹۳	۱	۱]	۷
[۱]	۱	۱]	[۱	۱	۱	۱	۱	۹۲]	۸

جدول (۲): سناریوهای وزن‌دهی تبعیضی به MPR

سناریو	$[W_{UPR} \quad W_{MPR_{DW}} \quad W_{PPNR}]$	$[W_{NSDR} \quad W_{GSR} \quad W_{RWCL} \quad W_{CRLO} \quad W_{NGO}]$	$[W_{max} \quad W_{min}]$
۱	[۱ ۹۳ ۱]	[۱ ۱ ۱ ۱ ۱]	[۱۰ ۹۰]
۲	[۱ ۹۳ ۱]	[۱ ۱ ۱ ۱ ۱]	[۹۰ ۱۰]

جهت‌دهی به نتایج تسویه بازار را نشان می‌دهد. سابقه سوددهی بازار از جمله مهم‌ترین عامل‌های مشوق در جلب مشارکت واحدهای تولیدی است؛ بهاین ترتیب که ارائه داده‌های تاریخی از شاخص‌های سوددهی بازار، مشوق خوبی برای ایجاد اطمینان از سودده بودن بازار است. تمرکز رویکرد پیشنهادی بر روی شاخص‌های سوددهی بازار با ایجاد امکان بهینه‌سازی مستقیم به این شاخص‌ها در تابع هدف، زمینه بهبود سوددهی و تشویق به مشارکت در بازار را به خوبی فراهم می‌کند. میانگین MPR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با $W_{MPR} = 1\%$ در حالت وزن‌دهی مجزا، $24/55\%$ است. این مقدار تأثیرگذاری وزن‌دهی به شاخص MPR را حتی در ضریب وزنی‌های اندک تأثیر می‌کند. میانگین PPNR در تمامی سناریوهای وزنی طبق جدول (۳) همواره 100% است که این موضوع، اطمینان از دریافت سود را به عنوان رزومه‌ای مثبت برای بازار تأثیر می‌کند.

شاخص NSDR طبق (۲۴) ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه سود است. با توجه به اعمال ضرایب وزنی به شاخص NSDR، کمترین مقدار این شاخص (مقدار ایده‌آل) در سناریو ۴ از حالت وزن‌دهی مجزا با W_{NSDR} بزرگ‌تر نسبت به سایر ضرایب وزنی به دست آمده است. میانگین NSDR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با $W_{PDR} = 1\%$ در حالت وزن‌دهی مجزا، $3/31\%$ است. این مقدار توزیع عادلانه سود را به نفع کاهش پتانسیل رقابت‌گریزی و انگیزه تبانی بازیگران نشان می‌دهد. بهبود مقدار شاخص ضرایب تغییرات (پراکندگی) (CV) سود موجب بهبود مقدار شاخص ضرایب تغییرات (پراکندگی) (CV) سود می‌شود. CV که نسبت انحراف معیار (StD) به میانگین حسابی (AM) داده‌ها است برای اندازه‌گیری توزیع پراکندگی داده‌های آماری به کار می‌رود.

جدول (۳): مقدار شاخص‌ها در وزن‌دهی‌های یکسان، مجزا و تبعیضی (%)

وزن‌دهی	سناریو	NGO	CRLO	RWCL	GSR	NSDR	PPNR	MPR	UPR
یکسان	۱	.	.	.	۳۰۳۱	۳۰۳۵	۱۰۰	۲۶۰۲۳	۱۰۰
۱	۱	.	.	.	۲۰۹۸	۳۰۱۵	۱۰۰	۲۵۰۱۲	۱۰۰
۲	۲	.	.	.	۳۰۵۶	۳۰۹۴	۱۰۰	۳۱۰۳۵	۷۸,۷۹
۳	۳	.	.	.	۳۰۲۴	۳۰۳۵	۱۰۰	۲۶,۹۷	۱۰۰
۴	۴	.	.	.	۳۰۷۳	۲۰۰۳	۱۰۰	۱۸,۰۴۵	۹۶,۹۷

۱-۴- تحلیل نتایج شاخص مشارکت در بازار

طبق تعریف ارائه شده از شاخص UPR، بهینه‌سازی مستقیم این شاخص در قالب تابع هدف موجب افزایش تعداد بازیگران بازار می‌شود. این امر زمینه توزیع سهم تولید، کاهش تولید در ناحیه فرصت و کاهش پتانسیل قدرت بازار را با افزایش تعداد بازیگران فراهم می‌کند. از طرفی کاهش تولید در ناحیه فرصت که با افزایش تعداد بازیگران بازار میسر است موجب کاهش هزینه‌های اضافی ناشی از پیشنهاد قیمت‌های بالا برای تولید در ناحیه فرصت خواهد شد. به عبارتی بهینه‌سازی مستقیم شاخص مشارکت واحدها از چندین جنبه کیفیت جبران توان راکتیو را بهبود بخشدید است. مقادیر شاخص UPR در تمامی سناریوها در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار این شاخص در سناریو شماره ۱ از وزن‌دهی یکسان و سناریوهای شماره ۱، ۲ و ۸ از وزن‌دهی مجزا بیشترین مقدار است. در سناریو شماره ۱ از وزن‌دهی مجزا این شاخص با اعمال وزن بیشتر از اهمیت بیشتری در تسویه بازار برخوردار شده است که همین امر موجب شده تا این شاخص حداکثر مقدار خود را داشته باشد. از طرفی در سناریوهای ۷ و ۸ از وزن‌دهی مجزا شاخص‌های تولید در ناحیه فرصت وزن بیشتری دارند که موجب افزایش تعداد بازیگران برای کاهش تولید در ناحیه فرصت می‌شود لذا در این سناریوها نیز مقدار این شاخص بیشترین مقدار است.

۲-۴- تحلیل نتایج شاخص‌های سوددهی بازار

طبق انتظار از وزن اعمالی به شاخص MPR در سناریو شماره ۲ از وزن‌دهی مجزا و سناریوهای شماره ۱ و ۲ از وزن‌دهی تبعیضی، در این سناریوها شاخص MPR مقدار بیشتری دارد. بهبود مقادیر شاخص MPR متناسب با مقادیر W_{MPR} به خوبی تأثیر اعمال ضرایب وزنی در

۹۶,۹۷	۲۴,۰۵	۱۰۰	۳۰۰۵	۲,۰۲۷	.	.	.	۵
۱۰۰	۲۲,۱۴	۱۰۰	۲,۰۹۲	۳,۰۳۷	.	.	.	۶
۱۰۰	۲۷,۰۴	۱۰۰	۳,۰۲۷	۳,۰۳۲	.	.	.	۷
۱۰۰	۲۷,۱۱	۱۰۰	۳,۰۴	۳,۰۲۹	.	.	.	۸
۹۲,۹۴	۳۱,۰۴	۱۰۰	۳,۰۷۵	۳,۰۲۴	.	.	.	۱
۷۵,۷۶	۳۱,۸۷	۱۰۰	۳,۰۷۸	۳,۰۶۷	.	.	.	۲

قیمت‌های بالای تولیدکنندگان برای تولید توان راکتیو در این ناحیه رخ می‌دهد، می‌توان تأثیر بهینه‌سازی تولید در ناحیه فرصت را در کنترل هزینه‌های نهایی بازار توجیه نمود. جزئیات مقادیر هزینه نهایی بازار توان راکتیو و LOC در جدول (۵) به خوبی توانایی رویکرد تسویه مبتنی بر ساخت را در بهینه‌سازی هزینه‌های تولید در ناحیه فرصت نشان می‌دهد. مقادیر شاخص‌های CRLO، NGO و RWCL طبق جدول (۳) در تمامی سناریوها٪ به دست آمده است.

۴-۵- تحلیل نتایج وزن‌دهی تبعیضی

سناریوهای تبعیضی برای شاخص MPR برای تسویه بازار توان راکتیو با اهداف مرسومی نظیر کمینه کردن هزینه نهایی بازار و بیشینه کردن سود واحدهای تولیدی در نظر گرفته شده است. طبق نتایج ارائه شده در جدول (۳) بیشترین مقدار شاخص MPR در سناریو شماره ۲ از وزن‌دهی تبعیضی که دارای W_{max} است محقق شده است. بهاین ترتیب در رویکرد تسویه پیشنهادی امکان بهینه‌سازی انواع شاخص‌ها با ضرایب وزنی متفاوت به همراه بهینه‌سازی توابع هدف مجزا فراهم شده است که این امر موجب انعطاف رویکرد تسویه پیشنهادی در پشتیبانی از انواع توابع هدف می‌گردد.

۴-۶- کنترل پتانسیل رقابت‌گریزی

برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار ضمن مطالعه مقادیر شاخص‌هایی نظیر CV_{NS} ، CV_{Q} ، CV_{RPCC} می‌توان از چند شاخص سنجش تمرکز بازار شامل: شاخص سهم بازار و شاخص تمرکز هر فیندال – هریشمن استفاده نمود.

جدول (۴): پراکندگی مازاد خالص، درآمد و سهم جبران توان راکتیو

CV_Q	CV_{NS}	CV_{RPCC}	سناریو	وزن دهی	
۱,۰۰۹۲۳	۱,۰۱۰۶۶	۱,۰۰۴۳۵	۱	یکسان	
۰,۹۸۲۰	۱,۰۰۳۹۸	۰,۹۵۱۶	۱		
۱,۰۱۷۵۳	۱,۰۳۰۰۱	۱,۰۱۹۶۶	۲		
۱,۰۰۷۰۵	۱,۰۱۰۶۶	۱,۰۰۵۷۰	۳		
۱,۰۲۳۰۰	۰,۶۶۸۳	۱,۰۱۵۵۶	۴		
۰,۷۴۸۳	۱,۰۰۰۵۴	۰,۷۷۹۹	۵	مجزا	
۱,۰۱۱۲۹	۰,۹۶۲۰	۱,۰۱۰۶۵	۶		
۱,۰۰۹۶۱	۱,۱۱۱۲۵	۱,۰۰۶۷۶	۷		
۱,۰۰۸۶۲	۱,۱۲۱۲	۰,۹۴۸۶	۸		
۱,۰۰۶۹۲	۱,۰۲۲۷۰	۱,۰۰۸۴۲	۱		
۱,۰۲۱۱۲	۱,۰۲۴۷۹	۱,۰۲۳۹۷	۲	تبعیضی	

جدول (۵): درآمد و سود بازیگران و LOC در سناریوهای متفاوت وزن‌دهی

LOC	وزن دهی	سناریو	هزینه نهایی	مجموع سود
-----	---------	--------	-------------	-----------

روابط (۳۵) تا (۳۷) به ترتیب پراکندگی سود، پراکندگی جبران توان راکتیو تولیدی واحدها و پراکندگی هزینه جبران توان راکتیو هستند.

$$CV_{PP} = \frac{StD(NS^{i,u})}{AM(NS^{i,u})} \quad (35)$$

$$CV_Q = \frac{StD|Q^{i,u}|}{AM|Q^{i,u}|} \quad (36)$$

$$CV_{RPCC} = \frac{StD(RPCC^{i,u})}{AM(RPCC^{i,u})} \quad (37)$$

توجه مستقیم به شاخص NSDR به عنوان هدف پراکندگی سود را کاهش می‌دهد. طبق مقادیر CV_{NS} در جدول (۴)، کمترین مقدار CV_{NS} مربوط به سناریو ۴ در وزن‌دهی مجزا با بیشترین وزن شاخص NSDR در تابع هدف است. کاهش پراکندگی سود با اعمال ضرایب وزنی بزرگ‌تر به شاخص NSDR موجب کاهش پتانسیل رقابت‌گریزی بازیگران و کاهش میل به تبانی می‌گردد.

۴-۳- تحلیل نتایج شاخص GSR

شاخص GSR، ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه سهم جبران توان راکتیو در میان مشارکت‌کنندگان و البته سنجش سطح رقابتی بازار است. توانایی رویکرد تسویه پیشنهادی در پشتیبانی از کنترل سهم جبران توان راکتیو با دسترسی مستقیم به کمینه کردن شاخص GSR، منجر به توزیع سهم جبران توان راکتیو می‌شود؛ به طوری که کمترین مقدار CV_Q در سناریو شماره ۵ از وزن‌دهی مجزا که در آن ضریب شاخص GSR نسبت به سایر شاخص‌ها بیشتر است، رخ داده است. بهینه‌سازی مستقیم شاخص GSR ضمن کنترل مستقیم پراکندگی مقادیر جبران توان راکتیو واحدها (CV_Q)، موجب توزیع پرداخت به تولیدکنندگان یا به عبارتی توزیع درآمد تولیدکنندگان می‌گردد؛ زیرا پرداخت به واحدها کاملاً متناسب با مقدار توان راکتیو جبرانی آن‌ها است. مقدار CV_{RPCC} در سناریو ۵ از وزن‌دهی مجزا طبق جدول (۴) در مقایسه با سایر سناریوهای کمتر است که این امر به خوبی تأثیر بهینه‌سازی مستقیم شاخص GSR را در توزیع عادلانه درآمد واحدها نشان می‌دهد.

۴-۴- تحلیل نتایج شاخص‌های تولید و پرداخت در OZ

مقادیر شاخص‌های CRLO، NGO و RWCL که با تعداد واحدهای تولیدکننده در ناحیه فرصت و پرداخت برای تولید در ناحیه فرصت در ارتباط هستند، ملاک‌های مناسبی برای سنجش توانایی رویکرد تسویه مبتنی بر شاخص پیشنهادی در بهینه‌سازی تولید و پرداخت در ناحیه فرصت هستند. با اشاره مجدد به رابطه افزایش هزینه نهایی بازار مناسب با افزایش تولید در ناحیه فرصت که به علت پیشنهاد

آرمايشی و M تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم، می‌باشد. سایر پارامترهای جدول (۶) طی روابط (۴۱) تا (۴۳) ارائه شده‌اند. طبق رابطه (۴۲)، کمترین مقدار سهم بازار بازیگرانی با سهم بازار معلوم، است. آستانه‌ی ۱/۰ برای شاخص HHI به عنوان عدم تمرکز بازار (محیط رقابتی بازار)، ۰/۰۱ تا ۰/۱۸ حدودی تمرکز و بالاتر از ۰/۱۸ به عنوان بازارهای تمرکز شناخته می‌شوند.

$$S_i = \left(\frac{|Q_G^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} |Q_G^{i,u}|} \right) \quad (39)$$

$$HHI = \sum_{i=1}^M S_i^2 + \Delta \quad (40)$$

$$R = 1 - \sum_{i=1}^M S_i^2 \quad (41)$$

$$S_M = \text{Min}(S_i) \quad 1 \leq i \leq M \quad (42)$$

$$Q = \frac{R}{S_M} \quad (43)$$

با توجه به آستانه معرفی شده برای شاخص HHI برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار، نمونه‌ای از مقدار HHI برای سناریوهای مختلف محاسبه شده و نتایج در شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه مقدار HHI سناریوهای مختلف با آستانه‌ی رقابتی بودن بازار طبق شکل (۴)، حفظ حریم رقابتی بازار را در تمامی سناریوهای تأیید می‌کند. به عبارتی طبق شکل (۴)، در تمامی سناریوهای رویکرد پیشنهادی، بازار در محدوده عدم تمرکز قرار دارد. جزئیات مقدار HHI در جدول (۷) ارائه شده است. طبق انتظار از تأثیر شاخص GSR در توزیع عادلانه سهم تولید که موجب کنترل سطح رقابتی بازار می‌گردد، کمترین مقدار HHI در سناریو شماره ۵ از SW رخ داده است. به طور کلی طبق جدول (۷) تمامی سناریوهای در محدوده مجاز رقابتی هستند. برای درک تأثیر تعدد واحدهایی با سهم بازار معلوم در تعیین مقدار دقیق HHI و درک محدوده تغییر HHI در رویکرد پیشنهادی، مقادیر HHI_{min} ، HHI_{max} و $HHIR$ طبق (۴۴) برای حالت وزن‌دهی یکسان و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلفی برای تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم در جدول (۸) ارائه شده است. برای مثال در سناریو شماره ۱ از جدول (۸)، تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم ۵ واحد و در سناریو ۶، ۳۰ واحد در نظر گرفته شده است. (N) برای تمامی سناریوهای ۳۳ است. HHI_{max} باند پایین HHI است که طبق روابط ارائه شده در جدول (۶) محاسبه شده‌اند. مقادیر ارائه شده در جدول (۸) در شکل (۵) نمایش داده شده است. مطالعه مقادیر دقیق HHI_{min} ، HHI_{max} و $HHIR$ در هر کدام از سناریوهای جدول (۸)، افزایش دقت محاسبه HHI را با افزایش تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم نشان می‌دهد.

همگرایی باندهای HHI در مقداری کمتر از ۱/۰ در شکل (۵) رقابتی بودن بازار با رویکرد تسویه پیشنهادی را در سناریو وزن‌دهی یکسان تأیید می‌کند. با بررسی مقادیر شاخص‌های ارزیابی رقابتی بودن بازار

	واحدهای (\$)	بازار (\$)	
یکسان	۱۸۴۰۴۳۸	۷۰۳۰۱۷۷	۱
	۱۶۹۰۱۵۴	۶۷۳۰۵۱۴	۱
	۱۶۱۰۱۱۳	۵۱۳۰۹۷۴	۲
	۱۸۹۰۶۲۵	۷۰۳۰۰۴۵	۳
	۱۱۸۰۵۸۳	۶۴۲۰۷۸۴	۴
	۱۵۹۰۶۲۱	۶۶۳۰۷۳	۵
	۱۶۸۰۹۲۱	۷۲۹۰۹۳۵	۶
	۱۸۵۰۳۲۹	۶۸۵۰۳۱۸	۷
مجزا	۱۷۵۰۹۲۸	۶۴۸۰۸۸۶	۸
	۱۶۷۰۷۸۷	۵۴۰۰۵۳۵	۱
تبیعی	۱۷۰۰۲۹۳	۵۳۴۰۲۸	۲

جزئیات روابط و مفاهیم شاخص‌های تمرکز بازار به شرح زیر است.

۱) سهم بازار

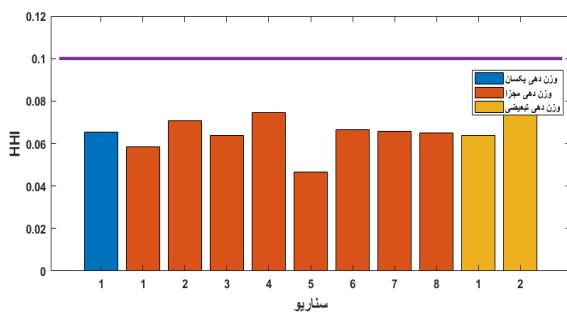
شاخص سهم بازار ^{۲۲} (MS) ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه تولید و سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار است. بر اساس اصول این شاخص، می‌توان نشان داد که سهم بازار نسبت معکوسی از کشش قیمتی تقاضای بازار است [۱۶]. کمیته‌ی قانون‌گذاری امریکا ^{۲۳} حد نهایی سهم بازار را ۲۰ درصد و اتحادیه‌ی اروپا ۲۵ درصد معرفی کرده‌اند. مقادیر استاندارد ارائه شده برای حد نهایی سهم بازار به عنوان معیار اندازه‌گیری آستانه رقابتی بودن بازار شناخته می‌شوند.

$$MS = \left(\frac{|Q_G^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} |Q_G^{i,u}|} \right) \times 100 \quad (38)$$

مقادیر سهم بازار واحدها در سناریو ۵ از وزن‌دهی مجزا، در شکل (۳) نمایش داده شده است. مقادیر سهم بازار طبق شکل (۳) همواره کمتر از ۷٪ و در محدوده مجاز بازار غیرتمرکز (رقابتی) هستند. بر اساس تعریف ارائه شده از GSR در رابطه (۲۵)، بهینه‌سازی مستقیم این شاخص توسط رویکرد تسویه پیشنهادی، موجب توزیع سهم تولید واحدها می‌گردد. لذا طبق مقادیر شاخص GSR در جدول (۳)، CV_Q در جدول (۴) و مقادیر سهم بازار در شکل (۳)، سناریو ۵ از وزن‌دهی در جدول (۴) بهترین سناریوی رقابتی است. به عبارتی رویکرد تسویه پیشنهادی قادر به کنترل سطح رقابتی بازار با کنترل ضربی وزنی شاخص GSR می‌باشد. به عنوان نتیجه، دسترسی مستقیم رویکرد تسویه پیشنهادی به شاخص GSR موجب بهبود مقادیر سهم بازار، توزیع عادلانه تولید و ایجاد محیط رقابتی در بازار شده است.

۲) شاخص تمرکز هرفیندال - هریشمن

یکی دیگر از شاخص‌هایی که در این مقاله برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی بازیگران استفاده شده، شاخص تمرکز هرفیندال - هریشمن ^{۲۴} (HHI) [۱۷] است. بهبودیافته HHI طبق تغییرات اعمال شده توسط نویسنده‌گان مرجع [۱۸]، به صورت رابطه (۴۰) است. طبق (۴۰)، HHI مجموع مربوعات سهم بازار بنگاه‌های فعال به انضمام مقادیر Δ است. مقادیر HHI با لحاظ مقادیر Δ در جدول (۶) ارائه شده‌اند. در رابطه (۴۰)، Δ سهم بازار تولید کننده ۱ ام است که در رابطه (۳۹) ارائه شده است. در جدول (۶)، N تعداد کل واحدهای شبکه

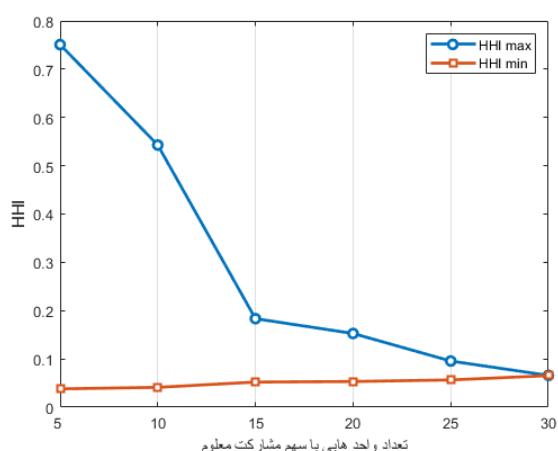


شکل (۴): HHI در سناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی
جدول (۷) مقادیر شاخص HHI

HHI	سناریو	وزن دهی
۰۰۰۶۵۴	۱	یکسان
۰۰۰۵۸۶	۱	
۰۰۰۷۰۹	۲	
۰۰۰۶۴	۳	
۰۰۰۷۴۸	۴	
۰۰۰۴۶۸	۵	مجزا
۰۰۰۶۶۷	۶	
۰۰۰۶۵۶	۷	
۰۰۰۶۵	۸	
۰۰۰۶۳۹	۱	
۰۰۰۷۳۴	۲	تبعیضی

جدول (۸): دامنه تغییرات HHI در سناریو وزن دهی یکسان ($N=33$)

۶	۵	۴	۳	۲	۱	سناریو
۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	M
۰۰۰۶۶	۰۰۰۹۶	۰۰۱۵۳	۰۰۱۸۳	۰۰۰۵۴۳	۰۰۰۷۵۱	HHI_{max}
۰۰۰۶۵	۰۰۰۵۶	۰۰۰۵۳	۰۰۰۵۲	۰۰۰۴۱	۰۰۰۳۸	HHI_{min}
۰۰۰۰۱	۰۰۰۳۹	۰۰۰۹۹	۰۰۱۳۱	۰۰۰۵۰۲	۰۰۰۷۱۲	$HHIR$



شکل (۵): دامنه تغییرات HHI در سناریو وزن دهی یکسان

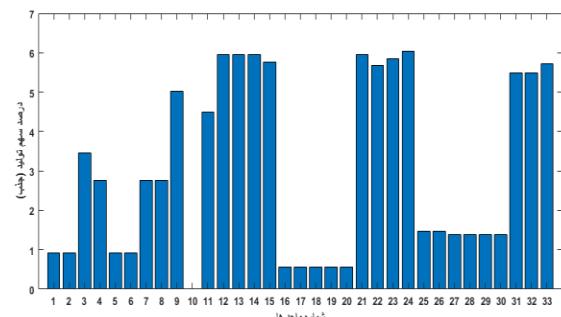
می توان به حفظ محدوده رقابتی بازار در تمام سناریوهای رویکرد تسویه پیشنهادی پی برد.

$$HHIR = HHI_{max} - HHI_{min} \quad (44)$$

به عنوان نتیجه، تأثیر بیشتر شاخص GSR که با اعمال ضریب وزنی بیشتر به این شاخص قابل تحقق است ($W_{GSR} = 93\%$)، موجب بهینه سازی متراکم قدرت بازار و مدیریت فضای رقابتی خواهد شد.

۴-۷-۴- مقایسه نتایج با روش های مرسوم تسویه

برای بررسی کیفیت نتایج رویکرد تسویه پیشنهادی، سناریو شماره ۱ از وزن دهی تبعیضی به عنوان سناریویی با بیشترین نزدیکی به هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار ($W_{min} = 90\%$ ، با نتایج مرجع [12] که تسویه بازار راکتیو مستقل را با هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار انجام داده، مقایسه می شود. نتایج مقایسه در جدول (۹) آرائه شده است. طبق نتایج جدول (۹)، با وجود عدم توجه صدرصدی به هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار در سناریو شماره ۱ از وزن دهی تبعیضی، اختلاف مقادیر شاخص ها در روش پیشنهادی و روش مرجع [12] در مواردی بسیار زیاد است. این اختلاف به خصوص در مورد شاخص های مرتبط با کنترل تولید و پرداخت در ناحیه فرستاد قابل مشاهده است.



شکل (۳): سهم بازار در سناریو شماره ۵ از وزن دهی مجزا

جدول (۶): مقادیر شاخص HHI

نوع باند	روابط محاسبه محدوده باند
Lower	$\sum_{i=1}^M S_i^2 + \frac{(1 - \sum_{i=1}^M S_i)^2}{N - M}$
Upper ($R \leq S_M$)	$\sum_{i=1}^M S_i^2 + \left(1 - \sum_{i=1}^M S_i\right)^2$
Upper ($R > S_M$)	$\sum_{i=1}^M S_i^2 + S_M^2 Q + \left(1 - \sum_{i=1}^M S_i - S_M Q\right)^2$

جدول (۹): مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با نتایج طرح مرجع [12]

UAR	PUPR	MPR	PDR	PSR	RWCL	CRLO	NGO	سناریو	وزن دهی

نشریه علمی - پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران سال هشتم شماره ۱۵ بهار و تابستان ۱۳۹۸

۹۳,۹۴	۳۱,۰۴	۱۰۰	۳,۷۵	۲,۲۴	.	.	.	۱	تبیعیضی
۴۲,۴۲۴	۳۰,۷۷۲	۱۰۰	۶,۳۷۱	۶,۰۴۲	۸۵,۷۱۴	۲۴,۰۵۵	۴۲,۰۸۵۷	-	[12]

- [6] Shamani, Morteza, Hamed Ahmadi, and Mohammadreza Ramezani. "Probabilistic framework of cooperative disperse generation resources scheme for producing required reactive power through simultaneous active and reactive power markets." *CIRED-Open Access Proceedings Journal* 2017.1 (2017): 2837-2841.
- [7] Samimi, Abouzar, Mehdi Nikzad, and Pierluigi Siano. "Scenario-based stochastic framework for coupled active and reactive power market in smart distribution systems with demand response programs." *Renewable Energy* 109 (2017): 22-40.
- [8] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "A stochastic framework for reactive power procurement market, based on nodal price model." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 49 (2013): 104-113.
- [9] Ahmadimanesh, A., and M. Kalantar. "A novel cost reducing reactive power market structure for modifying mandatory generation regions of producers." *Energy Policy* 108 (2017): 702-711.
- [10] Homaei, Omid, and Shahram Javid. "Investigation of synchronous generator in reactive power market—an accurate view." *IET Generation, Transmission & Distribution* 8.11 (2014): 1881-1890.
- [11] Khandani, Ali, and Asghar Akbari Foroud. "Design of reactive power and reactive power reserve market." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11.6 (2017): 1443-1452.
- [12] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "Improvement of the simultaneous active and reactive power markets pricing and structure." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10.1 (2016): 81-92.
- [13] Zhong, Jin, and Kankar Bhattacharya. "Toward a competitive market for reactive power." *IEEE Transactions on Power Systems* 17.4 (2002): 1206-1215.
- [14] D. S. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*: Copyright © 2004 John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [15] Wong, P., Albrecht, P., Allan, R., et al.: 'The IEEE reliability test system-1996', *IEEE Trans. Power Syst.*, 1999, 14, (3), pp. 1010–1020.
- [16] Shapiro, Carl. "The theory of business strategy." *The Rand journal of economics* 20.1 (1989): 125-137.
- [17] Nauenberg, Eric, Kisalaya Basu, and Harish Chand. "Hirschman-Herfindahl index determination under incomplete information." *Applied Economics Letters* 4.10 (1997): 639-642.
- [18] Naldi, Maurizio, and Marta Flamini. "Interval estimation of the Herfindahl-Hirschman index under incomplete market information." *Computer Modelling and Simulation (UKSim)*, 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on. IEEE, 2014.

جمع‌بندی

رویکرد تسویه پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو در بازار شامل: شاخص مشارکت، سوددهی بازار، تولید و پرداخت برای ناحیه فرست و توزیع تولید و سود است. به طور کلی بنابر اصول رویکرد تسویه پیشنهادی، شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو به‌طور مستقیم و در مواردی به‌طور غیرمستقیم و متأثر از سایر عوامل و شاخص‌ها در بازار، قابل کنترل هستند. توانایی اعمال ضرایب وزنی به شاخص‌ها در طرح پیشنهادی موجب پویایی رویکرد تسویه پیشنهادی مناسب با شرایط و الزامات شبکه می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها ضمن تأیید تأمین مقادیر بهینه شاخص‌های سنجش کیفیت عملکرد تسویه بازار توان راکتیو مستقل توسط رویکرد تسویه پیشنهادی، توانایی آن را در کنترل پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت تعداد مشارکت‌کنندگان در بازار توان راکتیو در بهبود سطح رقابتی بازار، طرح پیشنهادی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم موجب افزایش انگیزه مشارکت شده است که این امر موجب بهبود سطح رقابتی بازار توان راکتیو مستقل شده است.

مراجع

- [1] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "Design of joint active and reactive power reserve market: a multi-objective approach using NSGA II." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10.1 (2016): 31-40.
- [2] Amjadi, N., A. Rabiee, and H. A. Shayanfar. "A stochastic framework for clearing of reactive power market", *Energy*, 35.1 (2010), pp. 239-245.
- [3] Rueda-Medina, Augusto C., and Antonio Padilha-Feltrin. "Distributed generators as providers of reactive power support—A market approach." *IEEE Transactions on Power Systems* 28.1 (2013): 490-502.
- [4] Kargarian, A., M. Raofat, and M. Mohammadi. "Reactive power market management considering voltage control area reserve and system security." *Applied energy* 88.11 (2011): 3832-3840.
- [5] Reddy, S. Surender, A. R. Abhyankar, and P. R. Bijwe. "Market clearing of joint energy and reactive power using multi objective optimization considering voltage dependent load models." *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE. IEEE, 2011.

زیرنویس‌ها

- ³ Lost Opportunities Cost
⁴ Independent System Operator
⁵ Market Clearing Price
⁶ Reactive Power Compensation Cost
⁷ Uniform Pricing

- ¹ Distributed Generators
² Opportunity Zone

- ⁸ Net Surplus
- ⁹ Units Participation Rate
- ¹⁰ Market Profitability Rate
- ¹¹ Profitable Player Number Rate
- ¹² Net Surplus Distribution Rate
- ¹³ Standard Deviation
- ¹⁴ Generation Sharing Rate
- ¹⁵ Risk of Work In Capacity Limits
- ¹⁶ Cost Rate for Lost Opportunity
- ¹⁷ Number of Generating Units in Opportunity Zone
- ¹⁸ Equalized Weighting
- ¹⁹ Separate Weighting
- ²⁰ Coefficient of Variation
- ²¹ Arithmetic Mean
- ²² Market Shares
- ²³ Federal Energy Regulatory Commission
- ²⁴ Herfindahl-Hirschman Index