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

الهه صحرائی[1]، دانشجو کارشناسی ارشد، علیرضا حسن نژاد مرزونی[2]، دانشجو کارشناسی ارشد، علیرضا ذکریازاده[3]، استادیار، مصطفی غلامی[4]، 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. بااین‌حال 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 محیطی رقابتی تأمین گردد. ازاین‌رو 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

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

مخففها

OZ	ناحیه فرصت
LOC	هزینه فرصت از دست رفته
MCP	قیمت تسویه بازار
RPCC	هزینه جبران توان راکتیو
NS	مازاد خالص
UPR	نرخ مشارکت تولیدکنندگان
MPR	نرخ سوددهی بازار
PPNR	نرخ تعداد سودکنندگان در بازار
NSDR	نرخ توزیع مازاد خالص
GSR	نرخ سهم تولید
RWCL	ریسک کار در نزدیکی محدوده ظرفیت
CRLO	نرخ پرداخت برای تولید برای فرصت از دست رفته در ناحیه فرصت
NGO	تعداد تولیدکنندگان توان در ناحیه فرصت
HHI	شاخص هرفیندال-هریشمن
i, j	شاخص شماره شین‌ها.

علائم و اختصارات

u	شاخص واحدهای تولیدکننده.
NB	تعداد کل شین‌های شبکه.
NU_i	تعداد کل واحدهای تولیدی متصل به شین i.
$Q_{av_{maxG}}$	حداقل و حداکثر توان راکتیو در دسترس برای یک واحد تولیدی.
$Q_{av_{minG}}$	
Q_{minG}	حداقل و حداکثر توان راکتیو ارائه‌شده توسط یک واحد.
Q_{maxG}	
Q_{Di}	تقاضای توان راکتیو در شین i.
P_{Di}	تقاضای توان اکتیو در شین i.
Q_{base}	نقطه‌ای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید راکتیو تا آن نقطه برای حفظ تجهیزات کمکی صرف شده و جزء خدمات جانبی حساب نمی‌شود.
$a_0^{i,u}$	پیشنهاد قیمت برای هزینه در دسترس بودن واحد u متصل به شین i [$].
$M_1^{i,u}$	پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای جذب راکتیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$توسط واحد u متصل به شین i [$/ MVar − h].
$M_2^{i,u}$	پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_{base}, Q_A) توسط واحد u متصل به شین i [$/ MVar − h].
$M_3^{i,u}$	پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_A, Q_B) توسط واحد u متصل به شین i [2 ^MVar − h)^2]/($.
$Q_G^{i,u}$	توان راکتیو تولید یا جذب‌شده توسط ژنراتور u متصل به شین i [Mvar].
$Q_{1G}^{i,u}$	توان راکتیو جذب‌شده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه $(Q_{min}, 0)$.
$Q_{2G}^{i,u}$	توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_{base}, Q_A).
$Q_{3G}^{i,u}$	توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه(Q_A, Q_B).
$B_P^{i,u}$	متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i.
$B_1^{i,u}$	متغیرهای باینری نشان‌دهنده جذب راکتیو در ناحیه ۱$(Q_{min}, 0)$ تولید در ناحیه
$B_2^{i,u}$,	۲ (Q_{base}, Q_A)، و تولید در ناحیه ۳ (Q_A, Q_B) توسط واحد u متصل به شین i.
$B_3^{i,u}$,	
$B_P^{i,u}$	متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i در یکی از نواحی جبران راکتیو شبکه.
$Y_{i,j}$	ادمیتانس بین شین i و شین j.
θ_{ij}	زاویه ادمیتانس.
δ	زاویه ادمیتانس خطوط.
$S_{i,j}$	توان منتقل‌شده توسط خط بین شین i و شین j.
δ_j, V_j	اندازه و زاویه ولتاژ در شین j.
$\pi_0^{i,u}$	قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه در دسترس بودن، به‌طور یکسان برای همه واحدها.
$\pi_1^{i,u}$	قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه جذب توان راکتیو در ناحیه$(Q_{min}, 0)$ ، به‌طور یکسان برای همه واحدها.
$\pi_2^{i,u}$	قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه تولید در ناحیه (Q_{base}, Q_A) ، به‌طور یکسان برای همه واحدها.
$\pi_3^{i,u}$	قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه فرصت ازدست‌رفته در ناحیه (Q_A, Q_B) ، به‌طور یکسان برای همه واحدها.
Q_A, Q_B	معادل نقطه‌ای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید توان راکتیو بیش از آن در یک نقطه کار، نیازمند کاهش دادن تولید توان اکتیو است.

۱- مقدمه

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

کمینه کردن هزینه‌های رزرو توان اکتیو و راکتیو و به حداقل رساندن انرژی تأمین نشده ناشی از سطوح نامناسب توان راکتیو در شبکه [1]، کمینه کردن هزینه‌های جبران توان راکتیو در بازار [2]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده[1] (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 کمینه‌کردن شاخص ناهمگنی ولتاژ [3]. کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و هزینه‌های انتقال انرژی به‌طور هم‌زمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ و ذخیره توان راکتیو [4]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و تلفات شبکه هم‌زمان با افزایش تأمین بار و شاخص پایداری ولتاژ [5]، کمینه‌کردن هزینه نهایی بازار هم‌زمان توان اکتیو – راکتیو [6]، کمینه‌کردن هزینه‌های بازار شامل هزینه‌های خریداری انرژی از منابع انرژی پراکنده و شرکت‌های توزیع، هزینه‌های احتمالی مربوط به انتشار آلاینده CO_2، هزینه‌های جبران توان راکتیو از طریق منابع انرژی پراکنده و شرکت‌های توزیع [7]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و کمینه کردن هزینه پرداختی برای در دسترس بودن واحدها [8]، کمینه‌کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و تلفات مدل شده ناشی از توان راکتیو [9,10]، کمینه کردن هزینه بازار توان راکتیو و رزرو توان راکتیو هم‌زمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ [11]، کمینه‌کردن هزینه نهایی بازار 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 راکتیو، می‌توان دریافت که در اکثر مراجع بازار توان راکتیو 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 پارامترهایی 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

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

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 همه‌جانبه شرایط شبکه توسط کنترل کیفیت جبران توان راکتیو شبکه برطرف 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.

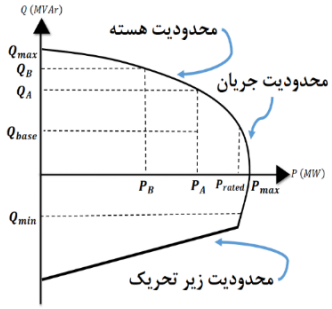
۳- طرح پیشنهادی امکان ارائه مشوق‌های مشارکتی را بدون اختصاص هزینه‌هایی مازاد بر هزینه‌های جبران توان راکتیو فراهم می‌کند.

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$(0 - Q_{base})$ صرف تجهیزات کمکی ژنراتور می‌شود [13]. لذا تولید راکتیو در این ناحیه به‌عنوان 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].



شکل (۱): منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون

لذا جبران توان راکتیو در این دو ناحیه به‌عنوان 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 اکتیو و خارج شدن ژنراتور از نقطه بهینه تولید توان اکتیو می‌شود. از همین رو تولیدکنندگان برای جبران خسارت‌های ناشی از کاهش سطح تولید توان اکتیو و خسارت‌های تولید راکتیو در نزدیکی مرز حداکثر ظرفیت، پیشنهاد قیمت‌های بالاتری برای تولید توان در این ناحیه موسوم به ناحیه فرصت[۲] (OZ) ارائه می‌دهند [12]. پیشنهاد قیمت‌های بالا در ناحیه فرصت موجب افزایش هزینه تولید راکتیو در این ناحیه موسوم به هزینه فرصت ازدست‌رفته[۳] (LOC) می‌شود ازاین‌رو واحدهای تولیدی قیمت‌های پیشنهادی خود را برای جبران راکتیو در سه ناحیه $(Q_{min} - 0)$ به عنوان ناحیه شماره ۱، ناحیه $(Q_{base} - Q_A)$ به‌عنوان ناحیه شماره ۲ و ناحیه $(Q_A - Q_B)$ به‌عنوان ناحیه شماره ۳ به 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 ارائه‌شده به بازار ISO از طرف تولیدکنندگان و مشخصات منحنی قابلیت تولید هر یک از ژنراتورهای تولیدکننده به‌عنوان 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 به‌عنوان خروجی‌های تسویه بازار توان راکتیو در اختیار مشارکت‌کنندگان قرار می‌گیرند.

بازار توان راکتیو عموماً با هدف کاهش هزینه‌های نهایی بازار تسویه می‌شود. هزینه جبران توان راکتیو[۶] (RPCC) طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. طبق رابطه (۱) هزینه جبران توان راکتیو شامل سه بخش: هزینه در دسترس بودن $(a_{0,i})$، هزینه عملکرد $(\int_{Q_{min}}^{0} M_{1i}dQ_i + \int_{Q_{base}}^{Q_A} M_{2i}dQ_i)$ و هزینه فرصت ازدست‌رفته $(\int_{Q_A}^{Q_B}(M_{3i}Q_i)dQ_i)$ است [13].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

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

نویسندگان 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 بخشیدند.

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

در رابطه (۲) ضریب $\left(Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}}\right)$ به‌عنوان 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) به‌جای $ برحسب $/MVar-h خواهد بود. تسویه بازار توان راکتیو مستقل با قیودی شامل قید تسویه، قید پخش بار و قید جبران توان راکتیو همراه است. این قیود به شرح زیر به مسئله بهینه-سازی تسویه بازار توان راکتیو اضافه می‌شوند.

۲-۱- قیود تسویه

قیمت‌های تسویه بازار طبق قید (۳) تا (۶) با عنوان قید تسویه یکسان[۷] (UP) قابل محاسبه هستند.

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

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

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

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

در تسویه یکسان بالاترین قیمت پیشنهادشده توسط واحدهای تولیدی، به ازای هر ناحیه جبران توان راکتیو، به‌عنوان قیمت تسویه بازار به‌طور 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 به‌صورت رابطه (۷) تغییر می‌کند. هزینه فرصت ازدست‌رفته به‌عنوان بخشی از هزینه نهایی جبران راکتیو طبق رابطه (۸) قابل‌محاسبه است. مازاد خالص[۸] (NS) واحدهای تولیدی به‌صورت اختلاف درآمد آن‌ها از هزینه‌های حدی تولید توان راکتیو طبق رابطه (۹) قابل‌محاسبه است.

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

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

$$NS^{i,u} = B_p^{i,u} \begin{pmatrix} (\pi_0^{i,u} - a_0^{i,u})\left(Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}}\right) \\ -B_1^{i,u}(\pi_1^{i,u} - M_1^{i,u})Q_{1G}^{i,u} \\ +B_2^{i,u}(\pi_2^{i,u} - M_2^{i,u})\left(Q_{2G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}\right) \\ +B_3^{i,u}(\pi_2^{i,u} - M_2^{i,u})\left(Q_{3G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}\right) \\ +\frac{1}{2}B_3^{i,u}(\pi_3^{i,u} - M_3^{i,u})\left(\left(Q_{3G}^{i,u}\right)^2 - \left(Q_{AG}^{i,u}\right)^2\right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

۲-۲- قیود جبران توان راکتیو

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

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

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

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

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

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

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

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

قید (۱۰) ناحیه جبران راکتیو را با ضرایب باینری مشخص می‌کند. طبق قید (۱۱) هر واحد تولیدی در یک‌زمان (هر بار تسویه بازار)، تنها می‌تواند در یکی از سه ناحیه جذب و عملکرد و فرصت باشد. طبق تعریف ارائه‌شده از ضریب $B_p^{i,u}$ در رابطه (۱۲)، تنها واحدهایی واجد شرایط دریافت هزینه در دسترس بودن است که در یکی از سه ناحیه معرفی‌شده 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.

۲-۳- قیود پخش بار

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

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

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

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

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 واحدها، نرخ سوددهی بازار، نرخ پخش سود، نرخ سهم از تولید و نرخ تولید و پرداخت برای ناحیه فرصت، در بهینه‌سازی تابع هدف این مقاله استفاده شده‌اند. این شاخص‌ها طی روابط (۲۱) تا (۲۸) معرفی شده‌اند.

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

۱) نرخ مشارکت واحدها[۹] (UPR) طبق رابطه (۲۱)، نسبت مجموع تعداد واحدهای مشارکت‌کننده در جبران توان راکتیو شبکه به تعداد کل واحدهای شبکه است.

$$UPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} B_{\mathrm{p}}^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} NU_i} \times 100 \quad (۲۱)$$

۲) نرخ سوددهی بازار[۱۰] (MPR) و نرخ واحدهای سودکننده[۱۱] (PPNR) طبق روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شوند.

$$MPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} NS^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} RPCC^{i,u}} \times 100 \quad (۲۲)$$

$$PPNR = \frac{\text{تعداد واحدهایی که سود دریافت کرده‌اند}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} B_{\mathrm{p}}^{i,u}} \times 100 \quad (۲۳)$$

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[۱۲] ($NSDR$) طبق رابطه (۲۴) انحراف معیار[۱۳] (StD) نسبت سود هر واحد به مجموع سود جبران‌کنندگان توان راکتیو است. مقدار این شاخص، اختلاف سهم سود هر واحد را از میانگین سهم سود واحدها نشان می‌دهد.

$$NSDR = StD\left(\frac{NS^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} NS^{i,u}}\right) \times 100 \quad (۲۴)$$

۴) نرخ سهم تولید[۱۴] (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.

$$GSR = StD\left(\frac{|{Q_G}^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i}|{Q_G}^{i,u}|}\right) \times 100 \quad (۲۵)$$

۵) نرخ ریسک کار در مرز ظرفیت[۱۵] (RWCL) طبق رابطه (۲۶) محاسبه می‌گردد.

$$RWCL = \frac{\text{تعداد واحدهایی که در } \mathbf{90\%} \text{ ظرفیت بیشینه خود کار کنند}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} B_{\mathrm{p}}^{i,u}} \times 100 \quad (۲۶)$$

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

۶) رابطه (۲۷) نرخ پرداخت برای ناحیه فرصت[۱۶] (CRLO) و رابطه (۲۸) نرخ تعداد واحدهای جبران‌کننده توان راکتیو در ناحیه فرصت[۱۷] (NPO) است.

$$CRLO = \frac{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} B_3^{i,u} \times RPCC^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} RPCC^{i,u}} \times 100 \quad (۲۷)$$

$$NGO = \frac{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} B_3^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i} B_{\mathrm{p}}^{i,u}} \times 100 \quad (۲۸)$$

کنترل شاخص‌های CRLO و NPO موجب کنترل هزینه‌های ناشی از خسارت‌های وارده بر واحدها در ناحیه فرصت و نهایتاً مدیریت هزینه‌های بازار توان راکتیو مستقل می‌گردد. در رویکرد تسویه پیشنهادی بهینه‌سازی مقادیر شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو شبکه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. به‌این‌ترتیب در رویکرد پیشنهادی شاخص‌های MAXIND بیشینه و شاخص‌های MININD کمینه خواهند 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 ارائه‌شده از شاخص‌های پیشنهادی در بخش گذشته مطلوب مسئله است.

$$MAXIND_{1\times n} = [UPR\,, MPR\,, PPNR] \quad (۲۹)$$

$$MININD_{1\times k} = [NSDR\,, GSR\,, RWCL\,, CRLO\,, NGO] \quad (۳۰)$$

تابع هدف پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل طبق رابطه (۳۱) متشکل از دو هدف کمینه کردن MININD و بیشینه کردن MAXIND است. در رابطه (۳۱)، ضرایب وزنی $W(i)^{MAXIND}$ و $W(i)^{MININD}$ به شاخص‌های سنجش کیفیت 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 به‌عنوان توابع هدف، مطلوب رویکرد پیشنهادی برای انعطاف تابع هدف تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط و اضطرار شبکه است.

$$OF = \begin{bmatrix} max\left(\sum_{i=1}^{n} W(i)^{MAXIND} \times MAXIND(i)\right), \\ min\left(\sum_{i=1}^{k} W(i)^{MININD} \times MININD(i)\right) \end{bmatrix} \quad (۳۱)$$

$$W^{MAXIND} = [w_{UPR}\,, w_{MPR}\,, w_{PPNR}] \quad (۳۲)$$

$$W^{MININD} = [w_{NSDR}\,, w_{GSR}\,, w_{RWCL}\,, w_{CRLO}\,, w_{NGO}] \quad (۳۳)$$

$W(i)^{MAXIND}$ و $W(i)^{MININD}$ در (۳۲) و (۳۳) ماتریس ضرایب وزنی 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.

۳-۱- وزن‌دهی یکسان

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

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

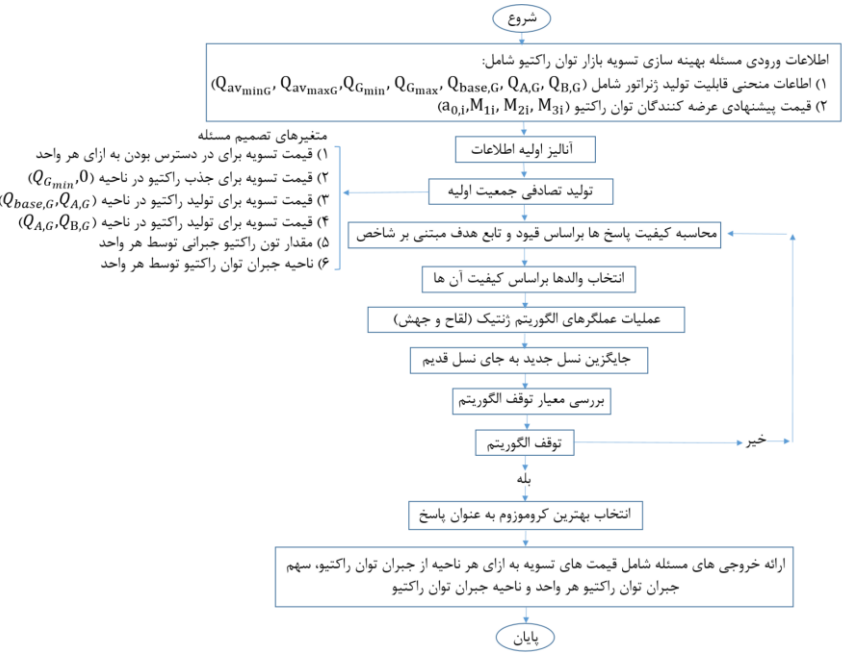
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

۳-۲- وزن‌دهی مجزا

در وزن‌دهی مجزا[19] (SW)، هر بار یکی از شاخص‌ها با وزن بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها در تسویه بازار، شرکت داده می‌شود. سناریوهای وزن‌دهی 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) به‌منظور تأکید بر رویکرد تأمین هم‌زمان چند شاخص بوده است.

۳-۳- وزن‌دهی تبعیضی

طبق تعریف ارائه‌شده 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 نظیر کمینه‌کردن هزینه نهایی و تشویق مشارکت‌کنندگان به تداوم مشارکت از طریق بهبود سوددهی، مستقیماً با وزن‌دهی به شاخص MPR امکان‌پذیر است. برای وزن‌دهی 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. وزن‌دهی تبعیضی به شاخص MPR، کنترل مازاد خالص و هزینه‌های نهایی بازار را به‌صورت مستقیم و به‌عنوان اهدافی مجزا فراهم می‌کند. این وزن‌دهی تبعیضی به‌منظور انعطاف رویکرد 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

سناریو	w_{NGO}	w_{CRLO}	w_{RWCL}	w_{GSR}	w_{NSDR}]	w_{PPNR}	w_{MPR}	w_{UPR}]
۱	۱]	۱	۱	۱	۱]	۱	۱	۹۳]
۲	۱]	۱	۱	۱	۱]	۱	۹۳	۱]

سناریوهای جدول (۲) به‌منظور اعمال وزن‌دهی 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.

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

۴- تحلیل نتایج

رویکرد تسویه پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه ۲۴ شینه IEEE RTS تست شده است. این شبکه شامل ۳۲ واحد تولیدی و یک کندانسور سنکرون متصل به شین ۱۴ است [15]. قابل‌توجه است که هیچ LOC برای کندانسور سنکرون متصل به گره ۱۴ در نظر گرفته نمی‌شود [12]. به عبارتی برای کندانسور سنکرون متصل به شین ۱۴ $M_3 = 0$ است. بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. روند نمای مسئله تسویه بازار توسط الگوریتم ژنتیک به شرح شکل (۲) است. شبیه‌سازی‌ها مجموعاً در ۱۱ سناریو طبق جدول (۳) برای سه حالت وزن‌دهی 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 به‌دست‌آمده از تسویه بازار توان راکتیو مستقل، در سناریوهای وزن‌دهی یکسان، مجزا و تبعیضی به‌صورت دقیق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر شاخص‌ها در سناریوهای مختلف در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند.

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

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

جدول (۲) : سناریوهای وزن‌دهی تبعیضی به MPR

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

۴-۱- تحلیل نتایج شاخص مشارکت در بازار

طبق تعریف ارائه‌شده 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 بخشیده 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، ۷ 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.

۴-۲- 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} به‌خوبی تأثیر اعمال ضرایب وزنی در جهت‌دهی به نتایج تسویه بازار را نشان می‌دهد. سابقه سوددهی بازار ازجمله مهم‌ترین عامل‌های مشوق در جلب مشارکت واحدهای تولیدی است؛ به‌این‌ترتیب 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 به‌خوبی فراهم می‌کند. میانگین MPR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با $w_{MPR} = 1\%$ در حالت وزن‌دهی مجزا، ۲۴/۵۵٪ است. این مقدار تأثیرگذاری وزن‌دهی به شاخص MPR را حتی در ضریب وزنی‌های اندک تائید می‌کند. میانگین PPNR در تمامی سناریوهای وزنی طبق جدول (۳) همواره ۱۰۰٪ است که این موضوع، اطمینان از دریافت سود را به‌عنوان رزومه‌ای مثبت برای بازار تائید 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 به‌دست‌آمده است. میانگین NSDR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با $w_{PDR} = 1\%$ در حالت وزن‌دهی مجزا، ۳/۳۱٪ است. این مقدار توزیع عادلانه سود را به نفع کاهش پتانسیل رقابت‌گریزی و انگیزه تبانی بازیگران نشان می‌دهد. بهبود مقادیر شاخص NSDR، ضمن تضمین توزیع عادلانه سود، موجب بهبود مقدار شاخص ضریب تغییرات (پراکندگی)[۲۰] (CV) سود می‌شود.CV که نسبت انحراف معیار (StD) به میانگین حسابی[۲۱] (AM) داده‌ها است برای اندازه‌گیری توزیع پراکندگی داده‌های آماری به کار می‌رود.

جدول (۳): مقادیر شاخص‌ها در وزن‌دهی‌های یکسان، مجزا و تبعیضی(٪)

وزن دهی	سناریو	NGO	CRLO	RWCL	GSR	NSDR	PPNR	MPR	UPR
یکسان	۱	۰	۰	۰	۳،۳۱	۳،۳۵	۱۰۰	۲۶،۲۳	۱۰۰
مجزا	۱	۰	۰	۰	۲،۹۸	۳،۱۵	۱۰۰	۲۵،۱۲	۱۰۰
	۲	۰	۰	۰	۳،۵۶	۳،۹۴	۱۰۰	۳۱،۳۵	۷۸،۷۹
	۳	۰	۰	۰	۳،۲۴	۳،۳۵	۱۰۰	۲۶،۹۷	۱۰۰
	۴	۰	۰	۰	۳،۷۳	۲،۰۳	۱۰۰	۱۸،۴۵	۹۶،۹۷

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

	۵	۰	۰	۰	۲،۲۷	۳،۰۵	۱۰۰	۲۴،۰۵	۹۶،۹۷
	۶	۰	۰	۰	۳،۳۷	۲،۹۲	۱۰۰	۲۳،۱۴	۱۰۰
	۷	۰	۰	۰	۳،۳۲	۳،۳۷	۱۰۰	۲۷،۰۴	۱۰۰
	۸	۰	۰	۰	۳،۲۹	۳،۴	۱۰۰	۲۷،۱۱	۱۰۰
تبعیضی	۱	۰	۰	۰	۳،۲۴	۳،۷۵	۱۰۰	۳۱،۰۴	۹۳،۹۴
	۲	۰	۰	۰	۳،۶۷	۳،۷۸	۱۰۰	۳۱،۸۷	۷۵،۷۶

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

$$CV_{PP} = \frac{StD(NS^{i,u})}{AM(NS^{i,u})} \quad (۳۵)$$

$$CV_{Q} = \frac{StD|Q^{i,u}|}{AM|Q^{i,u}|} \quad (۳۶)$$

$$CV_{RPCC} = \frac{StD(RPCC^{i,u})}{AM(RPCC^{i,u})} \quad (۳۷)$$

توجه مستقیم به شاخص NSDR به‌عنوان 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؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار CV_Qدر 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 سناریوها کمتر است که این امر به‌خوبی 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 NGO، CRLO 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 متناسب با افزایش تولید در ناحیه فرصت که به علت پیشنهاد 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) به‌خوبی توانایی رویکرد تسویه مبتنی بر شاخص را در بهینه‌سازی هزینه‌های تولید در ناحیه فرصت نشان می‌دهد. مقادیر شاخص‌های NGO، CRLO و RWCL طبق جدول (۳) در تمامی سناریوها ۰٪ به دست آمده است.

۴-۵- تحلیل نتایج وزن‌دهی تبعیضی

سناریوهای تبعیضی برای شاخص MPR برای تسویه بازار توان راکتیو با اهداف مرسومی نظیر کمینه‌کردن 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} بزرگ‌تری است محقق شده است. به‌این‌ترتیب 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_{RPCC}، CV_Q وCV_{NS} می‌توان از چند شاخص سنجش تمرکز بازار شامل: شاخص سهم بازار و شاخص تمرکز هرفیندال – هریشمن استفاده نمود.

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

وزن دهی	سناریو	CV_{RPCC}	CV_{NS}	CV_Q
یکسان	۱	۱،۰۴۳۵	۱،۱۰۶۶	۱،۰۹۲۳
مجزا	۱	۰،۹۵۱۶	۱،۰۳۹۸	۰،۹۸۲۰
	۲	۱،۱۹۶۶	۱،۳۰۰۱	۱،۱۷۵۳
	۳	۱،۰۵۷۰	۱،۱۰۶۶	۱،۰۷۰۵
	۴	۱،۱۵۵۶	۰،۶۶۸۳	۱،۲۳۰۰
	۵	۰،۷۷۹۹	۱،۰۰۵۴	۰،۷۴۸۳
	۶	۱،۱۰۶۵	۰،۹۶۲۰	۱،۱۱۲۹
	۷	۱،۰۶۷۶	۱،۱۱۲۵	۱،۰۹۶۱
	۸	۰،۹۴۸۶	۱،۱۲۱۲	۱،۰۸۶۲
تبعیضی	۱	۱،۰۸۴۲	۱،۲۳۷۰	۱،۰۶۹۲
	۲	۱،۲۳۹۷	۱،۲۴۷۹	۱،۲۱۱۲

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

وزن دهی	سناریو	هزینه نهایی	مجموع سود	LOC

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

		بازار($)	واحدها($)	($)
یکسان	۱	۷۰۳،۱۷۷	۱۸۴،۴۳۸	۰
مجزا	۱	۶۷۳،۵۱۴	۱۶۹،۱۵۴	۰
	۲	۵۱۳،۹۷۴	۱۶۱،۱۱۳	۰
	۳	۷۰۳،۰۴۵	۱۸۹،۶۲۵	۰
	۴	۶۴۲،۷۸۴	۱۱۸،۵۸۳	۰
	۵	۶۶۳،۷۳	۱۵۹،۶۲۱	۰
	۶	۷۲۹،۹۳۵	۱۶۸،۹۲۱	۰
	۷	۶۸۵،۳۱۸	۱۸۵،۳۲۹	۰
	۸	۶۴۸،۸۸۶	۱۷۵،۹۲۸	۰
تبعیضی	۱	۵۴۰،۵۳۵	۱۶۷،۷۸۷	۰
	۲	۵۳۴،۲۸	۱۷۰،۲۹۳	۰

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

۱) سهم بازار

شاخص سهم بازار[۲۲] (MS) (۳۸) 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 [16]. کمیته‌ی قانون‌گذاری انرژی امریکا[۲۳] حد نهایی سهم بازار را ۲۰ درصد و اتحادیه‌ی اروپا ۲۵ درصد معرفی کرده‌اند. مقادیر استاندارد ارائه‌شده برای حد نهایی سهم بازار به‌عنوان معیار اندازه‌گیری آستانه رقابتی بودن بازار شناخته می‌شوند.

$$MS = \left(\frac{\left|{Q_G}^{i,u}\right|}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i}\left|{Q_G}^{i,u}\right|}\right) \times 100 \qquad (۳۸)$$

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 غیرمتمرکز (رقابتی) هستند. بر اساس تعریف ارائه‌شده 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 مجزا به‌عنوان بهترین سناریوی رقابتی است. به عبارتی رویکرد تسویه پیشنهادی قادر به کنترل سطح رقابتی بازار با کنترل ضریب وزنی شاخص GSR می‌باشد. به‌عنوان 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) [17] است. بهبودیافته HHI طبق تغییرات اعمال‌شده توسط نویسندگان مرجع [18]، به‌صورت رابطه (۴۰) است. طبق (۴۰)، HHI مجموع مربعات سهم بازار بنگاه‌های فعال به انضمام مقادیر Δ است. مقادیر HHI با لحاظ مقادیر Δ در جدول (۶) ارائه شده‌اند. در رابطه (۴۰) S_i سهم بازار تولیدکننده i ام است که در رابطه (۳۹) ارائه شده است. در جدول (۶)، N تعداد کل واحدهای شبکه آزمایشی و M تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم، می‌باشد. سایر پارامترهای جدول (۶) طی روابط (۴۱) تا (۴۳) ارائه شده‌اند. S_M طبق رابطه (۴۲)، کمترین مقدار سهم بازار بازیگرانی با سهم بازار معلوم، است. آستانه‌ی ۰/۱ برای شاخص HHI به‌عنوان عدم تمرکز بازار (محیط رقابتی بازار)، ۰/۱ تا ۰/۱۸تا حدودی متمرکز و بالاتر از ۰/۱۸ به‌عنوان بازارهای متمرکز شناخته می‌شوند.

$$S_i = \left(\frac{\left|{Q_G}^{i,u}\right|}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i}\left|{Q_G}^{i,u}\right|}\right) \qquad (۳۹)$$

$$HHI = \sum_{i=1}^{M} S_i^2 + \Delta \qquad (۴۰)$$

$$R = 1 - \sum_{i=1}^{M} S_i^2 \qquad (۴۱)$$

$$S_M = Min(S_i) \quad 1 \le i \le M \qquad (۴۲)$$

$$Q = \frac{R}{S_M} \qquad (۴۳)$$

با توجه به آستانه معرفی‌شده برای شاخص HHI برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار، نمونه‌ای از مقادیر HHI برای سناریوهای مختلف محاسبه شده و نتایج در شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه مقادیر HHI سناریوهای مختلف با آستانه‌ی رقابتی بودن بازار طبق شکل (۴)، حفظ حریم رقابتی بازار را در تمامی سناریوها تائید می‌کند. به‌عبارتی طبق شکل (۴)، در تمامی سناریوهای رویکرد پیشنهادی، بازار در محدوده عدم تمرکز قرار دارد. جزئیات مقادیر 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. به‌طورکلی طبق جدول (۷) تمامی سناریوها 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_{max}، HHI_{min} 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 سناریوها ۳۳ است). HHI_{max}، باند بالای HHI و HHI_{min} باند پایین HHI است که طبق روابط ارائه‌شده در جدول (۶) محاسبه شده‌اند. مقادیر ارائه‌شده در جدول (۸) در شکل (۵) نمایش داده شده است. مطالعه مقادیر دقیق HHI_{min}، HHI_{max} و HHIR در هرکدام 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 ۰/۱ در شکل (۵) رقابتی بودن بازار با رویکرد تسویه پیشنهادی را در سناریو وزن دهی یکسان تائید می‌کند. با بررسی مقادیر شاخص‌های ارزیابی رقابتی بودن بازار

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

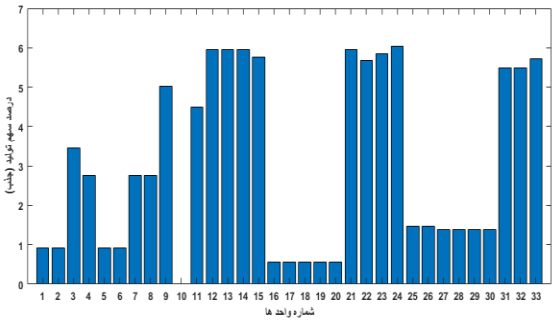
می‌توان به حفظ محدوده رقابتی بازار در تمام سناریوهای رویکرد تسویه پیشنهادی پی برد.

$$HHIR = HHI_{max} - HHI_{min} \qquad (۴۴)$$

به‌عنوان نتیجه، تأثیر بیشتر شاخص GSR که با اعمال ضریب وزنی بیشتر به این شاخص قابل تحقق است ($w_{GSR} = 93\%$)، موجب بهینه‌سازی متمرکزتر قدرت بازار و مدیریت فضای رقابتی خواهد شد.

۴-۷- مقایسه نتایج با روش‌های مرسوم تسویه

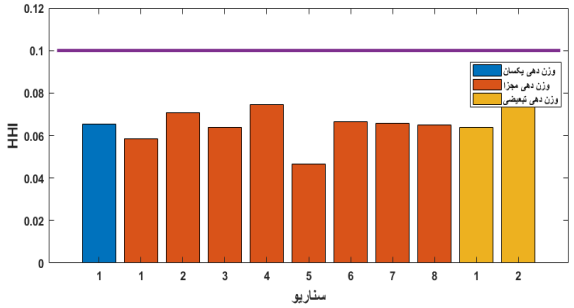
برای بررسی کیفیت نتایج رویکرد تسویه پیشنهادی، سناریو شماره ۱ از وزن‌دهی تبعیضی به‌عنوان سناریویی با بیشترین نزدیکی به هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار ($w_{min} = 90\%$)، با نتایج مرجع [12] که تسویه بازار راکتیو مستقل را با هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار انجام داده، مقایسه می‌شود. نتایج مقایسه در جدول (۹) ارائه شده است. طبق نتایج جدول (۹)، باوجود عدم توجه صددرصدی به هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار در سناریو شماره ۱ از وزن‌دهی تبعیضی ، اختلاف مقادیر شاخص‌ها در روش پیشنهادی و روش مرجع [12] در مواردی بسیار زیاد است. این اختلاف به‌خصوص در مورد شاخص‌های مرتبط با کنترل تولید و پرداخت در ناحیه فرصت قابل‌مشاهده است.



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

جدول (۶): مقادیر شاخص HHI

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



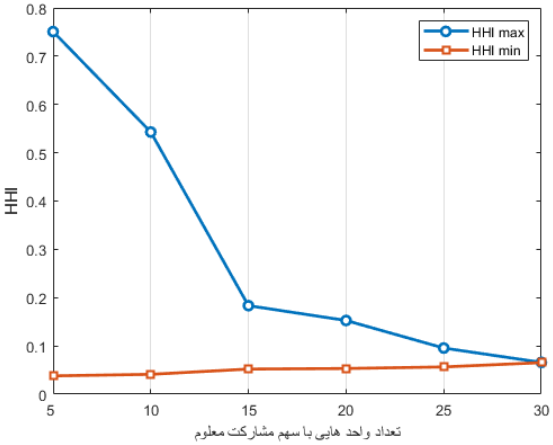
شکل (۴): HHI در سناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی

جدول (۷) مقادیر شاخص HHI

وزن دهی	سناریو	HHI
یکسان	۱	۰٫۰۶۵۴
مجزا	۱	۰٫۰۵۸۶
	۲	۰٫۰۷۰۹
	۳	۰٫۰۶۴
	۴	۰٫۰۷۴۸
	۵	۰٫۰۴۶۸
	۶	۰٫۰۶۶۷
	۷	۰٫۰۶۵۶
	۸	۰٫۰۶۵
تبعیضی	۱	۰٫۰۶۳۹
	۲	۰٫۰۷۳۴

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

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶
M	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
HHI_{max}	۰٫۷۵۱	۰٫۵۴۳	۰٫۱۸۳	۰٫۱۵۳	۰٫۰۹۶	۰٫۰۶۶
HHI_{min}	۰٫۰۳۸	۰٫۰۴۱	۰٫۰۵۲	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۶	۰٫۰۶۵
HHIR	۰٫۷۱۳	۰٫۵۰۲	۰٫۱۳۱	۰٫۰۹۹	۰٫۰۳۹	۰٫۰۰۱



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

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

وزن دهی	سناریو	NGO	CRLO	RWCL	PSR	PDR	MPR	PUPR	UAR

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

تبعیضی	۱	۰	۰	۳،۲۴	۳،۷۵	۱۰۰	۳۱،۰۴	۹۳،۹۴
[12]	-	۴۲،۸۵۷	۲۴،۵۵	۸۵،۷۱۴	۶،۴۲	۶،۳۷۱	۱۰۰	۳۰،۷۷۲	۴۲،۴۲۴

جمع‌بندي

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 فرصت و توزیع تولید و سود است. به‌طورکلی 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، قابل‌کنترل هستند. توانایی اعمال ضرایب وزنی به شاخص‌ها در طرح پیشنهادی موجب پویایی رویکرد تسویه پیشنهادی متناسب با شرایط و الزامات شبکه می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها ضمن تائید 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] Amjady, 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 Systems28.1 (2013): 490-502.

[4] Kargarian, A., M. Raoofat, 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.

[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] Homaee, Omid, and Shahram Jadid. "*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 & Distribution10.1 (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.

زیرنویس‌ها

[1] Distributed Generators
[2] Opportunity Zone
[3] Lost Opportunities Cost
[4] Independent System Operator
[5] Market Clearing Price
[6] Reactive Power Compensation Cost
[7] Uniform Pricing

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]

[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

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.1.2]