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 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 شده است. تایج 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، رنشان می دهد.

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

بهطور ((Q_{base},Q_A) قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه تولید در ناحیه $\pi_2^{i,u}$		مخففها
یکسان برای همه واحدها.	ناحيه فرصت	OZ
، (Q_A,Q_B) قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه فرصت ازدسترفته در ناحیه $\pi_3^{i,u}$	هزينه فرصت از دست رفته	LOC
بهطور یکسان برای همه واحدها. معادل نقطهای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید توان راکتیو بیش از Q_A ,	قیمت تسویه بازار	MCP
معادل نقطه ی در معطی قابلیت رمزانور سنگروی که تولید توان راکتیو بیس از Q_B	هزینه جبران توان راکتیو ایاد شان	RPCC NS
<i>y.</i>	مازاد خالص نرخ مشارکت تولیدکنندگان	UPR
۱ – مقدمه	نرخ سوددهی بازار نرخ سوددهی بازار	MPR
20020 - 1	رے نرخ تعداد سودکنندگان در بازار	PPNR
انتخاب توابع هدف مناسب برای تسویه بازار توان راکتیـو بـا توجـه بـه	نرخ توزیع مازاد خالص	NSDR
اهمیت کنترل توان راکتیو در حفظ ثبات و پایـداری شـبکه از اهمیـت	نرخ سهم تولید	GSR
یردهای برخوردار است. نمونههایی از توابع هدف تسویه بازار توان	ریسک کار در نزدیکی محدوده ظرفیت	RWCL CRLO
	نرخ پرداخت برای تولید برای فرصت از دست رفته در ناحیه فرصت تعداد تولیدکنندگان توان در ناحیه فرصت	NGO
راکتیو به شرح زیر است:	عندان توبید تعند مان توان در عالیه تونست شاخص هرفیندال-هریشمن	ННІ
کمینه کردن هزینههای رزرو توان اکتیو و راکتیو و به حداقل رسـاندن	شاخص شماره شینها.	i, j
انرژی تأمین نشده ناشی از سطوح نامناسب توان راکتیو در شبکه [1]،	نصارات	علائم و اخت
کمینه کردن هزینههای جبران توان راکتیو در بازار [2]، کمینه کردن	شاخص واحدهاى توليدكننده.	u
هزینه نهایی جبران توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده (DGs)،	تعداد کل شینهای شبکه.	NB
کمینه کردن اختلاف قرارداد معامله توان اکتیو با مقادیر واقعی معامله	تعداد کل واحدهای تولیدی متصل به شین i.	NU_i
	حداقل و حداکثر توان راکتیو در دسترس برای یک واحد تولیدی.	$egin{array}{l} Q_{av_{minG}} \ Q_{av_{minG}} \end{array}$
توان اکتیو بین سیستم توزیع و DGs، کمینه کـردن تلفـات اکتیــو در	حداقل و حداکثر توان راکتیو ارائهشده توسط یک واحد.	Q_{minG}
خطوط شبکه و کمینهکردن شاخص ناهمگنی ولتاژ [3]. کمینه کـردن	تقاضای توان راکتیو در شین i .	$egin{array}{c} Q_{maxG} \ Q_{Di} \end{array}$
هزینه نهایی جبران توان راکتیو و هزینههای انتقال انـرژی بـهطـور	تقاضای توان اکتیو در شین <i>آ.</i> تقاضای توان اکتیو در شین <i>آ.</i>	P_{Di}
همزمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ و ذخیره توان راکتیو [4]،	نقطهای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید راکتیو تا آن نقطه برای	Q_{base}
کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و تلفات شبکه هـمزمـان	حفظ تجهیزات کمکی صرف شده و جزء خدمات جانبی حساب نمی شود.	
-	پیشنهاد قیمت برای هزینه در دسترس بودن واحد u متصل به شین i [\$].	$a_0^{i,u}$
با افزایش تأمین بار و شاخص پایداری ولتاژ [5]، کمینـه کـردن هزینـه	پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای جذب راکتیو در ناحیه $(Q_{min},0)$ توسط واحد u متصل به شین $(Q_{min},0)$	$M_1^{i,u}$
نهایی بازار همزمان توان اکتیو – راکتیو [6]، کمینهکردن هزینـههـای	پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_{base},Q_A) توسط پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_{base},Q_A) توسط	$M_2^{i,u}$
بازار شامل هزینههای خریداری انرژی از منابع انرژی پراکنده و	واحد u متصل به شین i (RVar – h).	2
شرکتهای توزیع، هزینههای احتمالی مربوط به انتشار آلاینـده CO _۲ ،	پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_A,Q_B) توسط واحد	$M_3^{i,u}$
هزینههای جبران توان راکتیو از طریق منابع انرژی پراکنده و	متصل به شین u [u (MVar $-$ h)^2].	
شرکتهای توزیع [7]، کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و	توان راکتیو تولید یا جذبشده توسط ژنراتور u متصل به شین i [Mvar].	$Q_G^{i,u}$
	توان راکتیو جذبشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه $(Q_{min},0)$. توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_{base},Q_A) .	$egin{array}{l} Q_{1G}^{i,u} \ Q_{2G}^{i,u} \end{array}$
كمينه كردن هزينه پرداختي بـراي در دسـترس بـودن واحـدها [8]،	Q_{base} , Q_A توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه Q_A .	$Q_{2G}^{i,u}$ $Q_{3G}^{i,u}$
کمینه کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و تلفات مدل شده ناشـی	متغیر باینری نشان دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i .	$B_{P}^{i,u}$
از توان راکتیو [9,10]، کمینه کردن هزینـه بـازار تـوان راکتیــو و رزرو	متغیرهای باینری نشاندهنده جذب راکتیو در ناحیه ۱ $(Q_{min},0)$ تولید در ناحیه	$B_1^{i,u}$
توان راكتيو همزمان با بيشينه كردن حاشيه امنيت ولتاژ [11]،	u توسط واحد u متصل به شین: (Q_A,Q_B) توسط واحد u متصل به شین:	$B_{2}^{i,u}$
کمینه کردن هزینه نهایی بـازار تـوان اکتیـو و راکتیـو مسـتقل و بـازار	متغیر باینری نشاندهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i در یکی از	$B_{1}^{i,u},\ B_{2}^{i,u},\ B_{3}^{i,u},\ B_{P}^{i,u}$
همزمان توان اکتیو-راکتیو با در نظر گرفتن هزینه آلایندههای محیطی	نواحی جبران راکتیو شبکه.	г
	jادمیتانس بین شین i و شین i	$Y_{i,j}$
و پیادهسازی بازار منطقهای [12]. با مروری بر توابع هدف تسویه بــازار	زاویه ادمیتانس.	θ_{ij}
توان راکتیو، میتوان دریافت که در اکثر مراجع بــازار تــوان راکتیــو بــا	زاویه ادمیتانس خطوط.	δ
هدف کمینه کردن هزینههای بازار، کمینه کردن تلفات ناشی از انتقال	jتوان منتقل شده توسط خط بین شین i و شین j	$S_{i,j}$

قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه در دسترس بودن، بهطور یکسان برای همه

، $(Q_{min},0)$ برای هزینه جذب توان راکتیو در ناحیه (MCP) قیمت تسویه بازار

 δ_j, V_j

 $\pi_0^{i,u}$

 $\pi_1^{i,u}$

jاندازه و زاویه ولتاژ در شین

بهطور یکسان برای همه واحدها.

توان و همین طور 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

مهم و مؤثر در جبران توان راکتیو هستند بهطور مستقیم مدنظر نبودهاند. بهاین ترتیب 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 می کند، فقدان امکان بهبود همه جانبه شرایط شبکه توسط کنترل کیفیت جبران توان راکتیو شبکه برطرف گردیده است. رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو دارای نوآوری هایی 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 هـم-زمان با اهداف مرسوم تسویه بازار توان راکتیو فراهم می کند.

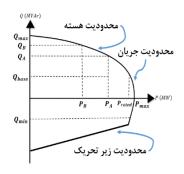
۲- قابلیت کنترل همزمان چندین پارامتر در رویکرد پیشنهادی این امکان را فراهم می کند تا با اعمال ضرایب وزنی به هر یک از توابع هدف، تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط شبکه منعطف باشد.

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

۴- امکان جایگذاری انواع اهداف و شاخصها در رویکرد پیشنهادی و جود دارد که این امر موجب کارایی طرح پیشنهادی در مواجه با ارائه شاخصها و توابع هدف نو برای تسویه بازار توان راکتیو می گردد. 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 می گردد. جبران توان راکتیو متناسب با منحنی قابلیت تولید ژنراتورها که در شکل (۱) نمایش داده شده انجام می شود. توان راکتیو تولید شده در ناحیه $(0-Q_{base})$ صرف تجهیزات کمکی ژنراتور می شود [13]. لذا تولید راکتیو در این ناحیه به عنوان خدمات جانبی محسوب نشده و مشمول دریافت هزینه از بازار نمی گردد [13]. این در حالی است که جنب راکتیو در ناحیه $(0-Q_{min})$ و تولید راکتیو در ناحیه جنب راکتیو در ناحیه ($(0-Q_{min})$) و تولید راکتیو در ناحیه این در حالی است که جنب راکتیو در ناحیه هزینه هایی ناشی تلفات می شود [13].



شكل (١): منحنى قابليت ژنراتور سنكرون

لذا جبران توان راكتيو در اين دو ناحيه بهعنوان خدمات جانبي تلقي می گردد که واحدهای تولیدی می توانند بابت ارائه این خدمات هزینه دريافت كنند [13]. همينطور طبق شكل (١) توليد توان راكتيو در ناحیه $(Q_A - Q_B)$ موجب کاهش تولید تـوان اکتیـو و خـارج شـدن ژنراتـور از نقطـه بهینـه تولیـد تـوان اکتیـو مـیشـود. از همـین 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 ٔ (OZ) ارائه می دهند [12]. پیشنهاد قیمتهای بالا در ناحیه فرصت موجب افزایش هزینه تولید راکتیو در این ناحیه موسوم به هزینه فرصت ازدسـترفتـه ٔ (LOC) مـی شـود ازایـن رو واحـدهای تولیدی قیمتهای پیشنهادی خود را برای جبران راکتیو در سه ناحیه $(Q_{base}-Q_A)$ بـه عنـوان ناحیـه شـماره ۱، ناحیـه $(Q_{min}-0)$ به عنوان ناحیه شماره ۲ و ناحیه (Q_A-Q_B) به عنوان ناحیه شماره ۳ به بازار ISO [†] پیشنهاد می دهند [13]. لازم به ذکر است که Q_{base} در شکل (۱) آستانه توان راکتیو موردنیاز برای تجهیزات کمکی ژنراتورهاست و $\, Q_{B} \, _{0} \, Q_{B} \, _{0} \,$ آستانه حداکثر تـوان راکتیـو تولیـدی مجـاز .[9] و ($Q_A - Q_B$) و ($Q_{\rm base} - Q_A$) هستند

قیمتهای پیشنهادی ارائهشده به بازار ISO از طرف تولیدکنندگان و مشخصات منحنی قابلیت تولید هـر یـک از ژنراتـورهـای تولیدکننـده به معنوان ورودیهای مسئله تسویه بازار توان راکتیو شناخته مـیشـوند. این اطلاعات همراه با توابع هدف تسویه بازار توان راکتیو و قیود تسویه بازار در الگوریتمهای بهینهسازی قـرار گرفتـه و سـهم تولیـد و جـذب راکتیو واحدها به همراه قیمت تسـویه بـازار $^{(4)}$ (MCP) بـه ازای نـواحی جبران توان راکتیو بهعنوان خروجیهای تسویه بـازار تـوان راکتیـو در اختیار مشارکتکنندگان قرار میگیرند.

بازار توان راکتیو عموماً با هدف کاهش هزینههای نهایی بازار تسویه بازار توان راکتیو عموماً با هدف کاهش هزینههای نهایی بازار تسویه می شود. هزینه جبران توان راکتیو $(PPCC)^{\circ}$ می شود. طبق رابطه $(PPCC)^{\circ}$ هزینه جبران توان راکتیو شامل سه بخش: هزینه در دسترس بودن $(P_{Q_{min}}^{0}M_{1i}dQ_{i}+1)$ و هزینه فرصت ازدست و $(P_{Q_{base}}^{Q_{B}}(M_{3i}Q_{i})dQ_{i})$ و هزینه فرصت ازدست و آدای است [13].

$$B_{\mathrm{p}}^{i,u} \begin{pmatrix} (\pi_{0}^{i,u} - \mathbf{a}_{0}^{i,u}) \left(Q_{av_{maxG}} - Q_{av_{minG}} \right) \\ -B_{1}^{i,u} (\pi_{1}^{i,u} - M_{1}^{i,u}) Q_{1G}^{i,u} \\ +B_{2}^{i,u} (\pi_{2}^{i,u} - M_{2}^{i,u}) \left(Q_{2G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u} \right) \\ +B_{3}^{i,u} (\pi_{2}^{i,u} - M_{2}^{i,u}) \left(Q_{3G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u} \right) \\ +\frac{1}{2} B_{3}^{i,u} (\pi_{3}^{i,u} - M_{3}^{i,u}) \left(\left(Q_{3G}^{i,u} \right)^{2} - \left(Q_{AG}^{i,u} \right)^{2} \right) \end{pmatrix}$$

۲-۲- قیود جبران توان راکتیو

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

$$B_1^{i,u}, B_2^{i,u}, B_3^{i,u} \in \{0,1\}$$

$$B_1^{i,u} + B_2^{i,u} + B_3^{i,u} \le 1 \tag{11}$$

$$B_{\rm p}^{i,u} = B_1^{i,u} + B_2^{i,u} + B_3^{i,u} \tag{17}$$

$$Q_G^{i,u} = Q_{1G}^{i,u} + Q_{2G}^{i,u} + Q_{3G}^{i,u} \tag{17}$$

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

$$B_2^{i,u}Q_{baseG}^{i,u} \le Q_{2G}^{i,u} \le B_2^{i,u}Q_{AG}^{i,u} \tag{12}$$

$$B_3^{i,u}Q_{AG}^{i,u} \le Q_{3G}^{i,u} \le B_3^{i,u}Q_{BG}^{i,u} \tag{19}$$

قید (۱۰) ناحیه جبران راکتیو را با ضرایب باینری مشخص می کند. طبق قید (۱۱) هر واحد تولیدی در یکزمان (هر بار تسویه بازار)، تنها می تواند در یکی از سه ناحیه جذب و عملکرد و فرصت باشد. طبق تعریف ارائه شده 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 معرفی شده در شکل (۱)، در جبران توان راکتیو شرکت داده شده باشند. قیود (۱۳)–(۱۶) محدوده ی تولید و جذب توان راکتیو هر واحد را در هر ناحیه طبق شکل (۱) نشان می دهد.

۲-۳- قبود یخش بار

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

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

$$S_{i,j} \le S_{i,j}^{max} \tag{19}$$

 $V_j^{min} \leq V_j \leq V_j^{max}$, $\forall j \in loadedbuses$ (۲۰) و (۱۹) قيود تعادل بار شبکه میباشند [12]. روابط (۱۷) 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.

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

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.

۱-۲ قيود تسويه

قیمتهای تسویه بازار طبق قیود (۳) تـا (۶) بـا عنـوان قیـود تسـویه یکسان ٔ (UP) قابل محاسبه هستند.

$$B_0^{i,u} a_0^{i,u} \le \pi_0 \tag{(7)}$$

$$B_1^{i,u} M_1^{i,u} \le \pi_1 \tag{f}$$

$$(B_2^{i,u} + B_3^{i,u})M_2^{i,u} \le \pi_2 \tag{2}$$

$$B_3^{i,u} M_3^{i,u} \le \pi_3 \tag{6}$$

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 می گردد [13]. طرح پرداخت یکسان موجب ایجاد انگیزه برای پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی می گردد [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 می کند. هزینه فرصت از دست فته به عنوان بخشی از هزینه نهایی جبران راکتیو طبق رابطه (۸) قابل محاسبه است. مازاد خالص (NS) واحدهای تولیدی به صورت اختلاف در آمد آن ها از هزینه های حدی تولید توان راکتیو طبق رابطه (۹) قابل محاسبه است. $RPCC^{i,u}$

$$=B_{\mathrm{p}}^{i,u}\begin{pmatrix} \pi_{0}^{i,u}\left(Q_{av_{maxG}}-Q_{av_{minG}}\right)-B_{1}^{i,u}\pi_{1}^{i,u}Q_{1G}^{i,u}\\ +B_{2}^{i,u}\pi_{2}^{i,u}\left(Q_{2G}^{i,u}-Q_{baseG}^{i,u}\right)\\ +B_{3}^{i,u}\pi_{2}^{i,u}\left(Q_{3G}^{i,u}-Q_{baseG}^{i,u}\right)\\ +B_{3}^{i,u}\pi_{3}^{i,u}\left(Q_{3G}^{i,u}-Q_{baseG}^{i,u}\right)\\ +\frac{1}{2}B_{3}^{i,u}\pi_{3}^{i,u}\left((Q_{3G}^{i,u})^{2}-\left(Q_{AG}^{i,u}\right)^{2}\right) \end{pmatrix} \tag{Y}$$

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

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

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

$$UPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_{\mathbf{p}}^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} NU_i} \times \cdots$$
 (Y1)

۲) نـرخ سـوددهی بـازار (MPR) و نـرخ واحـدهای سـودکننده (PPNR) طبق روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه می شوند.

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

$$PPNR = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100$$
 (۲۳)

MPR نسبت مجموع مازاد خالص واحدهای مشارکت کننده در جبران توان راکتیو شبکه به مجموع هزینههای نهایی بازار و PPNR نسبت تعداد واحدهای سودکننده به تعداد کل واحدهای جبران کننده 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 جبران کنندگان توان راکتیو است. مقدار این شاخص، اختلاف سهم سود هر واحد را از میانگین سهم سود واحدها نشان می دهد.

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

۴) نرخ سهم تولید (GSR) طبق رابطه (۲۵) انحـراف معیـار نسـبت جبران توان راکتیو جبرانشده توسـط واحدها است. کنترل شاخص GSR، موجب توزیع سهم جبران تـوان راکتیو واحدها میشود.

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

۵) نرخ ریسک کار در مرز ظرفیت ۱۵ (RWCL) طبق رابطه (۲۶) محاسبه می گردد.

$$RWCL = rac{ ext{Table plane}}{\sum_{i=1}^{NB}\sum_{u=1}^{NU_i}B_{
m p}^{i,u}} imes 100$$
 (۲۶)

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

۹) رابطه (۲۷) نرخ پرداخت برای ناحیه فرصت (CRLO) و رابطه (۲۷) نرخ تعداد واحدهای جبران کننده توان راکتیو در ناحیه فرصت (۲۸) است.

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

$$NGO = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_3^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100$$
 (YA)

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 می گردد. در رویکرد تسویه پیشنهادی بهینهسازی مقادیر شاخصهای سنجش کیفیت جبران توان راکتیو شبکه بهعنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. بهاین ترتیب 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 ارائه شده از شاخصهای پیشنهادی در بخش گذشته مطلوب مسئله است.

$$MAXIND_{1\times n} = [UPR, MPR, PPNR]$$
 (Y9)

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

تابع هدف پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل طبق رابطه رابطه (۳۱) متشکل از دو هدف کمینه کردن MININD و بیشینه کردن MAXIND است. در رابطه (۳۱)، ضرایب وزنیی $W(i)^{MININD}$ و $W(i)^{MININD}$ و مملکرد 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 می گردد. وزن دهی به هر یک از شاخصها به عنوان توابع هدف، مطلوب رویکرد پیشنهادی برای انعطاف تابع هدف تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط و اضطرار شبکه است.

$$OF = \begin{bmatrix} max \left(\sum_{i=1}^{n} W(i)^{MAXIND} \times MAXIND(i) \right), \\ min \left(\sum_{i=1}^{k} W(i)^{MININD} \times MININD(i) \right) \end{bmatrix}$$
(71)

 $W^{MAXIND} = [w_{UPR}, w_{MPR}, w_{PPNR}] \tag{TT}$

$$W^{MININD} = \left[w_{NSDR} , w_{GSR} , w_{RWCL} , w_{CRLO} , w_{NGO} \right] \tag{\ref{eq:thm:property}}$$

 $W(i)^{MAXIND}$ و $W(i)^{MININD}$ و $W(i)^{MININD}$ و $W(i)^{MAXIND}$ وزنی اعمالی به شاخصهای سنجش کیفیت جبران توان راکتیو هستند. رویکرد تسویه پیشنهادی با سه طرح وزن دهی به شاخصها، برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل در نظر گرفته شده است.

۳-۱- وزندهی یکسان

در وزن دهی یکسان 1 (EW) با اعمال مقادیر ضریب وزنی یکسان به هرکدام از درایههای ماتریس W^{MININD} 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.

۳-۲- وزندهی مجزا

در وزن دهی مجزا^{۱۱} (SW)، هر بار یکی از شاخصها با وزن بیشتری نسبت به سایر شاخصها در تسویه بازار، شرکت داده می شود. سناریوهای وزن دهی مجزا طبق جدول (۱) پیشنهاد شده اند. 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.

۳-۳- 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 نظیر کمینه کردن هزینه نهایی و تشویق مشارکت کنندگان به تداوم مشارکت از طریق بهبود سوددهی، مستقیماً با وزن دهی به شاخص MPR فامکان پذیر است. برای وزن دهی به شاخص MPR، ضرایب به سوری به ترتیب برای کنترل مجموع مازاد خالص واحدها و کنترل مجموع هزینه نهایی بازار طبق رابطه (۳۴) به شاخص MPR اعمال شده اند. وزن دهی تبعیضی به شاخص MPR، کنترل مازاد خالص و هزینههای نهایی بازار را به صورت مستقیم و به عنوان اهدافی مجزا فراهم می کند. این وزن دهی تبعیضی به منظور انعطاف رویکرد تسویه پیشنهادی در شرایط مختلف شبکه و بازار پیشنهاد شده است.

سناریوهای جـدول (۲) بـهمنظـور اعمـال وزندهـی تبعیضی تنظـیم شدهاند. طبق جدول (۲) هر بار NS و RPCC با تأثیر بیشـتری نسـبت به سایر شاخصها در تأمین MPR_{DW} شرکت داده شدهاند.

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

۴- تحلیل نتایج

IEEE ست شده است. ایس شبکه شامل ۳۲ واحد تولیدی و یک RTS ست شده است. ایس شبکه شامل ۳۲ واحد تولیدی و یک کندانسور سنکرون متصل به شین ۱۴ است [15]. قابل توجه است که هیچ LOC برای کندانسور سنکرون متصل به گره ۱۴ در نظر گرفته نمی شود [12]. به عبارتی برای کندانسور سنکرون متصل به شین $M_3 = 0$ است. بهینه سازی تابع هدف پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. روند نمای مسئله تسویه بازار توسط الگوریتم ژنتیک به شرح شکل (۲) است. شبیه سازی ها مجموعاً در ۱۱ سناریو طبق جدول (۳) برای سه حالت وزن دهـی یکسان، مجزا و تبعیضی صورت گرفته است. مقادیر ضرایب وزنی اعمالی به شاخصها در هر سناریو طبق جدول (۱) و جدول (۲) می باشند. در ادامه مقادیر شاخصهای به دست آمـده از تسویه بازار توان راکتیو مستقل، در مناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی به صورت دقیـق مـورد تحلیل و بررسی قرار گرفته اند. مقادیر شاخصها در سناریوهای مختلف در جدول (۳) نمایش داده شدهاند.



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}	$w_{PPNR}]$	$[w_{NSDR}]$	WGSR	W_{RWCL}	W_{CRLO}	w_{NGO}]	سناريو
[9٣	١	١]	[1	١	1	١	١]	١
[1	٩٣	١]	[1	١	١	١	١]	٢

[1	1	٩٣] [١	١	١	1	١]	٣
[1	١	١] [٩٣	1	١	1	١]	۴
[1	١	1] [1	٩٣	١	١	١]	۵
[1	1	1] [1	1	٩٣	1	١]	۶
[1	١	1] [1	١	١	97"	١]	γ
[1	١	1] [1	١	١	١	٩٣]	٨

جدول (۲) : سناریوهای وزندهی تبعیضی به MPR

	$[w_{UPR}]$	$W_{MPR_{DW}}$	W_{PPI}	$_{ m V}R]$	$[w_{NSD}]$	$_R$ W_{GSR}	W_{RWCL}	\mathbf{w}_{CRLO}	w_{NGO}]	$[w_{max} \ w_{min}]$	سناريو
	[1	٩٣	١]	[\	١	١	١	١]	[١٠ ٩٠]	١
-	[]	٩٣	١]	[\	١	١	١	١]	[٩٠ ١٠]	٢

۱-۴- تحلیل نتایج شاخص مشارکت در بازار

طبق تعریف ارائه شده از شاخص UPR، بهینه سازی مستقیم این شاخص در قالب تابع هدف موجب افزایش تعداد بازیگران بازار می شود. این امر زمینه توزیع سهم تولید، کاهش تولید در ناحیه فرصت و كاهش پتانسيل قدرت بازار را با افزايش تعداد بازيگران فراهم ميكند. 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 وزن دهی یکسان و سناریوهای شماره ۱، ۷ و ۸ از وزن دهی مجزا بیشترین مقدار است. در سناریو شماره ۱ از وزن دهی 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 وزن دهی مجزا شاخصهای تولید در ناحیه فرصت وزن بیشتری دارند که موجب افزایش تعداد بازیگران برای کاهش تولید در ناحیه فرصت میشود لـذا 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 تبعیضی، در این 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 می دهد. سابقه سوددهی بازار ازجمله مهم ترین عاملهای مشوق در جلب مشارکت واحدهای تولیدی است؛ به این ترتیب که ارائه داده های تاریخی از شاخص های سوددهی بازار، مشوق خوبی برای ایجاد اطمینان از سوده بودن بازار است. مرکز رویکرد پیشنهادی بر روی شاخصهای سوددهی بازار با ایجاد امکان بهینه سازی مستقیم به این شاخصها در تابع هدف، زمینه بهبود سودهی و تشویق به مشارکت در بازار را به خوبی فراهم می کند. میانگین MPR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با MPR = 1 در حالت وزن دهی مجزا، MPR را حتی در ضریب وزنیهای اندک تائید می-دهی به شاخص MPR را حتی در ضریب وزنیهای اندک تائید می-کند. میانگین PPNR را حتی در ضوع، اطمینان از دریافت سود را به عنوان رزومه ای مثبت برای بازار تائید می کند.

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 ایده آل) در سناریو \mathfrak{P} از حالت وزن دهی مجزا با W_{NSDR} برگ NSDR بررگ تر نسبت به سایر ضرایب وزنی به دست آمده است. میانگین NSDR طبق جدول (\mathfrak{P}) برای سناریوهایی با \mathfrak{P}_{NSDR} در حالت وزن دهی مجزا، \mathfrak{P}_{NSDR} است. این مقدار توزیع عادلانه سود را به نفع کاهش پتانسیل رقابت \mathfrak{P}_{NSDR} است. این مقدار توزیع عادلانه سود را دهد. بهبود مقادیر شاخص \mathfrak{P}_{NSDR} ضمن تضمین توزیع عادلانه سود، موجب بهبود مقدار شاخص ضریب تغییرات (پراکندگی) \mathfrak{P}_{NSDR} می شود. (\mathfrak{P}_{NSDR}) که نسبت انحراف معیار (\mathfrak{P}_{NSDR}) به میانگین حسابی \mathfrak{P}_{NSDR} داده های آماری به کار می رود.

جدول (۳): مقادیر شاخصها در وزن دهی های یکسان، مجزا و تبعیضی (٪)

				0 02					
UPR	MPR	PPNR	NSDR	GSR	RWCL	CRLO	NGO	سناريو	وزن دهی
1	75,77	1	۳,۳۵	٣,٣١	•	•	•	١	يكسان
1	70,17	1	۳,۱۵	۲,9۸	•	•	•	١	
٧٨,٧٩	۳۱,۳۵	1	4,94	٣,۵۶	•	•	•	٢	
1	78,97	1	۳,۳۵	4,74	•	•	•	٣	مجزا
98,97	۱۸,۴۵	١	۲,.۳	٣,٧٣	•	•	•	۴	

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

96,97	74.00	١	٣,٠۵	7,77	•	•	•	۵	
1	74.14	١	7,97	٣,٣٧	•	•	•	۶	
1	77,.4	١	٣,٣٧	٣,٣٢	•	•		Υ	
1	TY,11	1	٣,۴	٣,٢٩	•	•	•	٨	
98,98	٣١,٠۴	1	۳,۷۵	٣,٢۴	٠	•	•	١	
٧۵,٧۶	71, AY	1 • •	٣,٧٨	٣,۶٧	•	•		٢	تبعيصى

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

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

$$CV_Q = \frac{StD|Q^{i,u}|}{AM|Q^{i,u}|} \tag{79}$$

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

توجه مستقیم به شاخص NSDR به عنوان هدف پراکندگی سود را کساهش می دهد. طبق مقسادیر CV_{NS} در جدول (۴)، کمترین مقدار CV_{NS} مربوط به سناریو ۴ در وزن دهی مجزا با بیشترین وزن شاخص NSDR در تابع هدف است. کاهش پراکندگی سود با اعمال ضرایب وزنی بزرگتر به شاخص NSDR موجب کاهش پتانسیل رقابت گریزی بازیگران و کاهش میل به تبانی می گردد.

۳-۴ تحلیل نتایج شاخص GSR

شاخص GSR، ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه سهم جبران توان راکتیو در میان مشارکت کنندگان 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 ، منجر سناریو شماره CV_Q از وزن دهی مجزا که در آن ضریب شاخص GSR نسبت به سایر شاخصها بیشتر است، رخ داده است. بهینه سازی مستقیم شاخص GSR ضمن کنترل مستقیم پراکندگی مقادیر جبران توان راکتیو واحدها (CV_Q) ، موجب توزیع پرداخت به تولید کنندگان یا به عبارتی توزیع درآمد تولید کنندگان می گردد؛ زیرا پرداخت به واحدها کاملاً متناسب با مقدار توان راکتیو جبرانی آنها است. مقدار CV_{RPCC} در سناریو CV_{RPCC} در مناریو CV_{RPCC} در مقایسه با سایر سناریوها کمتر است که این امر به خوبی تأثیر بهینه سازی مستقیم شاخص GSR را در توزیع عادلانه درآمد واحدها نشان می دهد.

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

مقادیر شاخصهای CRLO ،NGO و RWCL که با تعداد واحدهای تولید کننده 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 می دهد، می توان تأثیر بهینه سازی 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 شاخص را در بهینه سازی هزینه های تولید در ناحیه فرصت نشان می دهد. مقادیر شاخصهای CRLO ،NGO و RWCL طبق جدول (۳) در تمامی سناریوها ۰٪ به دست آمده است.

۴-۵- تحلیل نتایج وزن دهی 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 وزن دهی تبعیضی که دارای $w_{\rm max}$ بزرگتری است محقق شده است. به این ترتیب در رویکرد تسویه پیشنهادی امکان بهینه سازی انواع شاخصها با ضرایب وزنی متفاوت به همراه بهینه سازی توابع هدف مجزا فراهم شده است که این امر موجب انعطاف رویکرد تسویه پیشنهادی در پشتیبانی از انواع توابع هدف می گردد.

۴-۶- کنترل پتانسیل رقابت گریزی

برای سنجش پتانسیل رقابت گریزی در بازار ضمن مطالعه مقادیر شاخصهایی نظیر CV_{NS} و CV_{Q} ، CV_{RPCC} می نظیر سنجش تمرکز بازار شامل: شاخص سهم بازار و شاخص تمرکز هرفیندال — هریشمن استفاده نمود.

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

<u> </u>	U 3. 1 PC 3	<u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>	, ,	, U				
CV_Q	CV_{NS}	CV_{RPCC}	سناريو	وزن دهی				
1,.978	1,1.88	1,.480	١	يكسان				
٠,٩٨٢٠	1,.٣٩٨	۰,9۵۱۶	١					
1,1708	1, 1	1,1988	۲					
١٠٠٧٠۵	1,1.88	١,٠۵٧٠	٣					
1,78	٠,۶۶۸٣	1,1008	۴	1				
.,٧۴٨٣	1,۵۴	.,٧٧٩٩	۵	مجزا				
1,1179	.,987.	1,1.80	۶					
1,.981	1,1170	1,.848	٧					
1,	1,1717	٠,٩۴٨۶	٨					
1,.897	1,777.	1,.,44	١					
1,7117	1,7479	1,7897	٢	تبعيضى				
ت وزندهی	جدول (۵): در آمد و سود بازیگران و LOC در سناریوهای متفاوت وزندهی							
LOC	مجموع سود	هزینه نهایی	سناريو	وزن دهی				

		بازار(\$)	واحدها(\$)	(\$)
يكسان	١	7.7,177	۱۸۴,۴۳۸	•
	١	۶۷۳,۵۱۴	189,104	•
	٢	۵۱۳,9۷۴	181,117	•
	٣	٧٠٣،٠۴۵	119,840	•
	۴	54T,VX4	۱۱۸۰۵۸۳	•
مجزا	۵	۶۶۳ , ۷۳	129,871	•
	۶	٧٢٩,٩٣۵	181,971	•
	٧	۶۸۵,۳۱۸	110,479	•
	٨	۶۴۸ , ۸۸۶	170,971	•
	١	۵۴۰,۵۳۵	184,444	•
تبعيصى	٢	۵۳۴,۲۸	14.,49	

آزمایشی و M تعداد واحدهایی با سهم بـازار معلـوم، مـیباشـد. سـایر پارامترهای جدول (8) طبی روابط (8) تا (8) 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.

$$S_{i} = \left(\frac{\left|Q_{G}^{i,u}\right|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_{i}} \left|Q_{G}^{i,u}\right|}\right) \tag{79}$$

$$HHI = \sum_{i=1}^{M} S_i^2 + \Delta \tag{\mathfrak{f}} \cdot)$$

$$R = 1 - \sum_{i=1}^{M} S_i^2 \tag{\mathfrak{f}} \cdot)$$

$$R = 1 - \sum S_i^2 \tag{f1}$$

$$S_M = Min(S_i) \qquad 1 \le i \le M \tag{fr}$$

$$Q = \frac{R}{S_M} \tag{fr}$$

با توجه به آستانه معرفی شده برای شاخص HHI برای سنجش یتانسیل رقابت گریزی 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 می کند. به عبارتی طبق شکل (۴)، در تمامی سناریوهای رویکرد پیشنهادی، بازار در محدوده عـدم تمرکـز قـرار دارد. جزئیـات مقـادیر HHI در جدول (۷) ارائه شده است. طبق انتظار از تأثیر شاخص GSR در توزیع عادلانه سهم تولید که موجب کنترل سطح رقابتی بازار می گردد، کمترین مقدار HHI در سناریو شماره ۵ از SW رخ داده است. به طور کلی 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_{min} ،HHI_{max} و HHIR طبق (۴۴) برای حالت وزن دهی 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 سـهم بــازار N) معلوم α واحد و در سناریو α ، α واحد در نظر گرفته شده است. برای تمامی سناریوها ۳۳ است). HHI_{max}، باند بالای HHI و HHI 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_{max} ،HHI_{min} 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 ۰/۱ در شکل (۵) رقابتی بودن بازار با رویکرد تسویه پیشنهادی را در سناریو وزن دهی یکسان تائید می کند. با بررسی مقادیر شاخصهای ارزیابی رقابتی بودن بازار 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 رقابت گریزی در بازار است. بـر اساس اصـول این شاخص، می توان نشان داد که سهم بازار نسبت معکوسی از کشش قیمتی تقاضای بازار است [16]. کمیتهی قانون گذاری انــرژی امریکــا۲۳ حد نهایی سهم بازار را ۲۰ درصد و اتحادیهی اروپا ۲۵ درصد معرفی کردهاند. مقادیر استاندارد ارائهشده برای حد نهایی سهم بازار بهعنوان معیار اندازه گیری آستانه رقابتی بودن بازار شناخته میشوند.

$$MS = \left(\frac{\left|Q_{G}^{i,u}\right|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_{i}} \left|Q_{G}^{i,u}\right|}\right) \times 100 \tag{7}$$

مقادیر سهم بازار واحدها در سناریو ۵ از وزندهی مجزا، در شکل (۳) نمایش داده شده است. مقادیر سهم بازار طبق شکل (۳) همواره کمتـر 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 CV_0 (۳) در جـ دول GSR واحدها می گردد. لذا طبق مقادیر شاخص در جدول (۴) و مقادیر سهم بازار در شکل (۳)، سناریو ۵ از وزن دهی مجزا بهعنوان بهترین سناریوی رقابتی است. به عبارتی رویکرد تسویه پیشنهادی قادر به کنترل سطح رقابتی بازار با کنترل ضریب وزنی شاخص GSR مىباشد. بهعنوان نتيجه، دسترسى مستقيم رويكرد تسویه پیشنهادی به شاخص GSR موجب بهبود مقادیر سهم بازار، توزیع عادلانه تولید و ایجاد محیط رقابتی در بازار شده است.

٢) شاخص تمركز هرفيندال – هريشمن

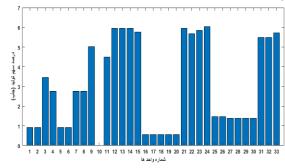
یکی دیگر از شاخصهایی که در این مقاله برای سنجش پتانسیل رقابت گریزی بازیگران استفاده شده، شاخص تمرکز هرفیندال – هريشمن ^{۲۴} (HHI) [17] است. بهبوديافته HHI طبق تغييرات اعمال شده توسط نویسندگان مرجع [18]، به صورت رابطه (۴۰) است. طبق (۴۰)، HHI مجموع مربعات سهم بازار بنگاههای فعال به انضمام مقادیر Δ است. مقادیر HHI با لحاظ مقادیر Δ در جـدول (۶) ارائـه 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

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

$$HHIR = HHI_{max} - HHI_{min} \tag{ff}$$

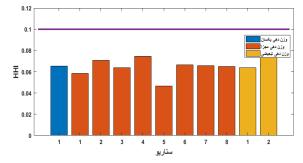
به عنوان نتیجه، تأثیر بیشتر شاخص GSR که با اعمال ضریب وزنی بیشتر به این شاخص قابل تحقق است ($W_{GSR} = 93\%$)، موجب بهینه سازی متمرکزتر قدرت بازار و مدیریت فضای رقابتی خواهد شد.

۴-۷-مقایسه نتایج با روشهای مرسوم تسویه



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 $(R \leq S_M)$	$\sum_{i=1}^{M} S_i^2 + \left(1 - \sum_{i=1}^{M} S_i\right)^2$
Upper $(R > S_M)$	$\sum_{i=1}^{M} S_i^2 + S_M^2 Q + \left(1 - \sum_{i=1}^{M} S_i - S_M Q\right)^2$

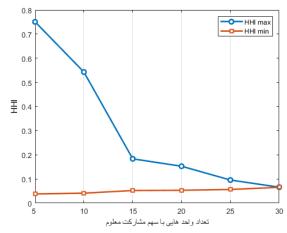


شکل (۴): HHH در سناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی جدول (۷) مقادیر شاخص HHI

<u></u>	<u> </u>	
HHI	سناريو	وزن دهی
.,.504	١	یکسان
٠,٠۵٨۶	1	
.,.٧.٩	٢	
.,.54	٣	
.,. ٧٤٨	۴	
٠,٠۴۶٨	۵	مجزا
•,•۶۶٧	۶	
•,•\$۵\$	Υ	
٠,٠۶۵	٨	
٠,٠۶٣٩	1	
.,. ٧٣۴	٢	تبعيضى

(N=33) در سناريو وزن دهي يکسان (HHI جدول (Λ): دامنه تغييرات

۶	۵	۴	٣	٢	١	سناريو
٣٠	۲۵	۲٠	۱۵	١٠	۵	M
.,.99	۰,۰۹۶	.,127	٠,١٨٣	۰,۵۴۳	٠,٧۵١	HHI _{max}
٠,٠۶۵	٠,٠۵۶	۰,۰۵۳	٠,٠۵٢	٠,٠۴١	٠,٠٣٨	HHI _{min}
٠,٠٠١	٠,٠٣٩	٠,٠٩٩	٠,١٣١	٠,۵٠٢	٠,٧١٣	HHIR



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

جدول (٩): مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با نتایج طرح مرجع

UAR	PUPR	MPR	PDR	PSR	RWCL	CRLO	NGO	سناريو	وزن دهی
-----	------	-----	-----	-----	------	------	-----	--------	---------

94,94	٣١,٠۴	1	۳,۷۵	٣,٢۴	•	•	•	١	تبعيضي
47,474	٣٠,٧٧٢	١	४,९४१	5,47	۸۵,۷۱۴	74,00	47,107	-	[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] 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.
- Naldi, Maurizio, and Marta Flamini. "Interval estimation of the Herfindahl-Hirschman index under incomplete information." Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on. IEEE, 2014.

جمعبندى

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. 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 متناسب با شرایط و الزامات شبکه می گردد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها ضمن تائید تأمین مقادير بهينه شاخصهاي سنجش كيفيت عملكرد تسويه بازار توان راکتیو مستقل توسط رویکرد تسویه پیشنهادی، توانایی آن را در کنترل پتانسیل رقابت گریزی در بازار نشان می دهد. با توجه به اهمیت تعداد مشارکت کنندگان 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 راكتيو مستقل شده است.

زيرنويسها

- [1] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "Design of joint active and reactive power reserve market: a multiobjective 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.
- 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.

- Lost Opportunities Cost
- Independent System Operator
- Market Clearing Price
- Reactive Power Compensation Cost
- **Uniform Pricing**

- **Distributed Generators**
- Opportunity Zone

- ⁸ Net Surplus
- 9 Units Participation Rate
- ¹⁰ Market Profitability Rate
- 11 Profitable Player Number Rate
- Net Surplus Distribution Rate
- 13 Standard Deviation
- Generation Sharing Rate
- 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