

## برنامه ریزی منقطع و کوتاه مدت شرکت های ترکیبی بهره برداری انتقال در بازار روز بعد انرژی با در نظر گرفتن منابع ذخیره ساز

محمد رضا انصاری<sup>۱\*</sup>، مصطفی یقین<sup>۲</sup>، مصطفی کاظمی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸	در این مقاله یک رویکرد منقطع جدید برای بهینه سازی شرکت های ترکیبی بهره برداری انتقال ارائه شده که در آن به حداکثر رساندن درآمد شرکت ترکیبی و همچنین به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی از دید بهره بردار شبکه، مورد توجه قرار گرفته است. رویکرد این شرکت کسب درآمد از طریق بخش انتقال بوده، به صورتیکه از طریق خرید و فروش انرژی در بازار روز بعد و با استفاده از منابع ذخیره ساز درآمد خود را حداکثر می نماید. استفاده از یک برنامه ریزی دوسطحی برای بهینه سازی توابع هدف مسئله به همراه استراتژی پیشنهادی برای به حداکثر رساندن درآمد شرکت، ارائه گردیده است. با استفاده از روش کروش-کان-تاکر مدل دوسطحی پیشنهادی به یک برنامه ریزی تک سطحی تبدیل شده است. همچنین جهت رسیدن به یک درآمد تضمین شده، عدم قطعیت رفتار منابع تولید کننده و مصرف کننده رقیب در نظر گرفته شده و با یک روش تولید سناریو اصلاح شده مدل سازی گردیده است. مدل پیشنهادی ابتدا بر روی یک شبکه استاندارد ۹ شین IEEE و سپس بر روی یک شبکه استاندارد ۵۷ شین IEEE با استفاده از نرم افزار GAMS شبیه سازی شده است. نتایج حاصله، کارایی استراتژی پیشنهادی در به حداکثر رساندن درآمد شرکت ترکیبی را نشان می دهد.
<b>واژگان کلیدی:</b> شرکت های ترکیبی بهره برداری انتقال، منابع ذخیره ساز، برنامه ریزی دو-سطحی، روش کروش-کان-تاکر، عدم قطعیت، روش سناریو اصلاح شده.	

### ۱- مقدمه

حامل های انرژی، مداوم در حال تغییر است، سرمایه گذاری در قسمت های دیگر همچون انتقال نیز مطرح شده است. راهکارهای زیادی برای سرمایه گذاری در سطح انتقال وجود دارد، به عنوان مثال می توان به روش های قیمت گذاری خطوط یا مالکین تجهیزات انتقال و ... اشاره نمود.

امروزه در سیستم تجدید ساختار شده، تقریباً بر روی همه ساختارهای جدید، همانند: مدیریت ازدحام در خطوط انتقال [۲]، پیش بینی بار از سمت مصرف کننده و ISO [۳] و قدرت بازار [۴] مطالعه شده است، اما تعداد بسیار کمی از پژوهش ها خطوط انتقال را موضوعی اصلی بررسی و تحقیقات خود قرار داده اند. منظور از خطوط انتقال صرفاً به محاسبه نوع خطوط و

در صنعت برق جهان، قبل از تجدید ساختار شدن، هدف صرفاً تولید، انتقال و توزیع بود؛ اما زمانی که صنعت برق دچار تجدید ساختار شد، اهداف متعددی گسترش یافتند. در واقع اهدافی نظیر [۱]:

❖ تجزیه واحد تولید و انتقال و توزیع

❖ جداسازی مالکیت انتقال از کنترل انتقال

❖ ایجاد بازار برق رقابتی

در صنعت تجدید ساختار شده به وجود آمده و مورد بررسی قرار می گیرد. در سال های اخیر با توجه به اینکه سرمایه گذاری در بخش تولید، با توجه به تغییرات قیمت

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.r.ansari@shr.ui.ac.ir

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

و سرمایه‌گذاری خود، وضعیت اقتصادی ذخیره‌ساز باتری را ارزیابی و بهتر تصمیم بگیرند. بزرگ‌ترین مانع ذخیره‌ساز در مقیاس بزرگ، هزینه بالای سرمایه‌گذاری است. بنابراین چگونگی استفاده از ذخیره‌سازها برای بهتر شدن هزینه‌ها، مورد اهمیت می‌باشد. در مرجع [۱۳] یک روشی مبتنی بر تحلیل خطر برای ارزیابی اینکه ذخیره‌سازها به چه میزان در بازارهای چندگانه مشارکت دارند مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عدم قطعیت در رابطه با قیمت‌های پیش‌بینی بازار و انحراف معیار پیش‌بینی در این مرجع در نظر گرفته شده است. این مرجع روشی جدید برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری برای شرکت در بازارهای انرژی روز بعد، ذخیره چرخان و کنترل فرکانس به‌طور هم‌زمان ارائه می‌کند. در مرجع [۱۴] هم پیشنهاد شده که از یک اندازه‌گیر تحلیل خطر، مبتنی بر استراتژی بهینه‌سازی مقاوم، برای توسعه مزرعه بادی با ذخیره‌ساز استفاده گردد. از طریق هماهنگ کردن ژنراتورهای بادی متغیر با منابع ذخیره‌ساز می‌توان این تولیدکننده‌ها را به‌عنوان تولیدکننده‌های قابل توزیع انرژی در بازار برق تنظیم شده مورد استفاده قرار داد. در مرجع [۱۵] یک استراتژی بهینه قیمت‌گذاری برای نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای<sup>۳</sup> در یک ساختار مبتنی بر حوضچه استخری در بازار برق معرفی گردیده است. در یک سازمان رقابتی، در مقایسه با تولیدکننده ساده آبی-الکتریکی، سود نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای به‌عنوان تولیدکننده زمانی زیاد است که قیمت تسویه بازار (MCP<sup>۴</sup>) بالا باشد و به‌عنوان مصرف‌کننده یا پمپ کردن زمانی سودمند است که قیمت پایین باشد. در این مرجع بر اساس پیش‌بینی ساعتی MCP، یک الگوریتم حلقه‌ای چرخشی چند سطحی برای بهینه‌سازی سود نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با در نظر گرفتن پیشنهادها رزرو چرخان و رزرو غیر چرخان و برآورده کردن محدودیت‌های عملیاتی و فنی این نیروگاه ایجاد و توسعه یافته شده است. در مقیاس بزرگ نیروگاه‌ها آبی تلمبه-ذخیره‌ای از قدیمی‌ترین نوع فناوری ذخیره انرژی الکتریکی به حساب می‌آید. همچنین می‌توان به نقش منابع ذخیره‌ساز در ریز شبکه اشاره کرد که با توجه به نرخ رشد بالای فناوری ریز شبکه در شبکه اهمیت بسزایی پیدا کرده‌اند [۱۶ و ۱۷]. در [۱۶] هزینه سرمایه‌گذاری سیستم‌های ذخیره‌ساز جهت قابلیت اطمینان شبکه مورد بررسی قرار گرفته است تا هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه کاهش یابد.

رابطه انتقال و منابع ذخیره‌ساز نیز در پژوهش‌های سال‌های اخیر

مسافت و پیشرفت کیفیت دوتایی کردن خطوط یا باندل کردن بر نمی‌گردد، بلکه می‌تواند به نحوه استفاده از خطوط توسط مالکانی که خدماتی درازای این مالکیت بر خطوط ارائه می‌کنند نیز اشاره کرد. در بازار برق شرکت‌هایی که این نوع تملک بر خطوط را دارند، مالکان خدمات انتقال (TFO<sup>۱</sup>) می‌نامند [۵]. به‌عنوان مثال در بازار آلبرتا، TFO ها دیده می‌شود [۶]. TFOها نیز در بازار برق تجدید ساختار شده، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از راه‌کارهای کسب درآمد و افزایش سود این شرکت‌ها به حداقل رساندن هزینه تعمیر و نگهداری و همچنین به حداکثر رساندن سود با استفاده از روش‌های مختلف مثل استفاده از ذخیره‌سازها می‌باشد.

مدیریت شبکه با توجه به رشد روزافزون مشترکان و توسعه صنایع و همچنین جهت پاسخگویی مناسب به دریافت کنندگان خدمات، ناچار به استفاده از ابزارهایی می‌شود که سطح خاموشی را به حداقل ممکن برساند. از جمله ابزارهایی که مدیریت شبکه استفاده می‌کند را می‌توان به برنامه‌ریزی‌های پاسخگویی بار [۷]، ایجاد رزرو شبکه [۸]، بازار تنظیم [۹]، استفاده از منابع ذخیره‌ساز و توسعه شبکه [۱۰ و ۱۱] اشاره نمود. در این زمینه، استفاده از ذخیره‌سازها روز به روز در حال افزایش می‌باشد. به‌طوریکه در آینده ذخیره‌سازهای انرژی، همانند باتری‌ها، به یک بخش ضروری از سیستم قدرت و بازار برق تبدیل خواهند شد و نقش مهمی در چرخه انرژی شبکه را بر عهده خواهند گرفت. از دلایل افزایش استفاده از ذخیره‌سازها می‌توان به نفوذ بالای منابع تجدید پذیر در شبکه اشاره نمود. در مرجع [۱۲] یک استراتژی بهینه برای ذخیره‌ساز باتری در بازار برق مورد بررسی قرار گرفته است. منابع ذخیره‌ساز انرژی می‌توانند با ارائه خدماتی مبتنی بر تنظیم مقررات پاسخگویی سریع تحت عملکردی، سود خود را افزایش دهد. عمر باتری‌ها به دلیل شارژ و دشارژ کردن ناشی از عملکرد مداوم باتری کاهش می‌یابد، اما می‌توان با محدود کردن استراتژی عملیاتی خود به سودمندی رسید و طول عمر باتری را افزایش داد. از این‌رو مدل کردن عمر باتری نیز به مدل‌های قبل از این (به حداکثر رساندن سود باتری)، برای مشخص کردن قیمت‌های بهینه در بازار روز بعد، بازار رزرو و بازار تنظیم<sup>۲</sup>، در مرجع [۱۲] اضافه شده است. سپس یک روش محاسبه تجزیه‌شده آنلاین برای محاسبه طول عمر باتری تحت استراتژی‌های مختلف عملیاتی آورده شده است تا پیچیدگی مدل را کاهش دهد. این مدل پیشنهادی جدید، به سرمایه‌گذار ذخیره‌ساز باتری کمک خواهد کرد که برای برنامه‌های عملیاتی

<sup>3</sup> Pumped-storage

<sup>4</sup> Market Clearing Price(MCP)

<sup>1</sup> Transmission Facility Owner

<sup>2</sup> Regulation Market

نسبت به بازیگران بازار و رقبا داشته باشد و درآمد حاصله خود را تضمین نماید، رفتار همراه با عدم قطعیت رقبا با استفاده از یک روش جدید مبتنی بر سناریو اصلاح شده (MSBM<sup>۴</sup>) مدل سازی گردیده است. در نتیجه می توان نوآوری های مقاله را به صورت زیر خلاصه کرد:

- ارائه یک استراتژی منعطف جدید برای شرکت های HTOC در راستای حداکثر کردن درآمد حاصله هم از بخش انتقال و هم خرید و فروش انرژی در بازار روز بعد، با استفاده از منابع ذخیره ساز
- ارائه یک روش جدید مبتنی بر سناریو اصلاح شده جهت مدل سازی عدم قطعیت های موجود در مسئله

استراتژی منعطف ارائه شده در این مقاله برای HTOC ها، یک ساختار جدید برای این شرکت ها پیشنهاد می نماید که از طریق آن می توانند درآمد خود را بیشینه نمایند. بنا بر اطلاعات نویسندگان مقاله، چنین ساختاری برای HTOC ها در هیچ یک از مراجع مرور شده ارائه نگردیده است. به طور مثال در مرجع [۱۳]، به ارائه روشی برای تعیین آرایش شارژ و دشارژ باتری ها پرداخته شده است؛ به نحوی که باتری بتواند از مشارکت در بازارهای انرژی (آربیتراژ انرژی بین پیک و غیر پیک)، بازار رزرو و بازار کنترل فرکانس کسب سود نماید. در حالی که در این مقاله ساختار کسب سود کاملاً متفاوت بوده و منابع ذخیره به عنوان یکی از عناصر HTOC، با ایجاد تغییرات در شارش خطوط، سود کسب شده توسط HTOC را افزایش خواهد داد. همچنین ساختار بازارهای هدف در مرجع [۱۳] کاملاً متفاوت از بازار هدف این مقاله می باشد.

در ادامه، ابتدا در قسمت بعد مدل پیشنهادی مسئله ارائه شده و در بخش سوم نیز به ارائه نتایج حاصله پرداخته شده است، در انتها نیز بحث و نتیجه گیری ارائه شده است.

## ۲- مدل پیشنهادی مسئله HTOC

همان طور که گفته شد HTOC ها مالکان تجهیزات خطوط هستند که وظیفه بهره برداری از خطوط را بر عهده دارند. هدف اصلی HTOC ها در این مقاله، به حداکثر رساندن درآمد خود با در نظر گرفتن منابع ذخیره ساز است. پس لازم است بر اساس نیاز خود، برای حداکثر رساندن درآمد هم از طریق افزایش شارش خطوط و هم از طریق خرید و فروش انرژی در بازار روز بعد اقدام نماید. در این مقاله نحوه حضور HTOC در بازار روز بعد با استفاده از یک برنامه ریزی دو-سطحی مدل سازی گردیده

بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال در مرجع [۱۸] یک برنامه ریزی بهینه تصادفی برای منابع ذخیره ساز در نظر گرفته شده است که از این منابع به عنوان حذف کننده ازدحام خطوط انتقال در سیستم های دارای منابع تجدیدپذیر استفاده گردیده است. در این مرجع تابع هدف به گونه ای بیان شده است که عدم قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر را در ازای از بین بردن ازدحام خطوط بهینه نماید که با استفاده از به حداقل رساندن توان عبوری از خطوط این امر ممکن می شود. این امر می تواند کاهش تلفات، افزایش حاشیه پایداری، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه حق انتقال فیزیکی (FTR<sup>۱</sup>) را به دنبال داشته باشد. در مرجع [۱۹] نیز تأثیر انتقال انرژی ذخیره شده مبتنی بر باتری توسط شبکه حمل و نقل ریلی بر عملکرد و کنترل شبکه برق مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان می دهد که تحت شرایط خاص، پویایی سیستم ذخیره سازی باتری می تواند موجب کاهش ازدحام خطوط انتقال و هزینه های عملیاتی شود. همچنین در [۲۰] نقش سیستم های ذخیره انرژی (باتری) متصل به شبکه در افزایش امنیت و قابلیت اطمینان سیستم و همچنین ارائه خدمات جانبی در حضور منابع تولید پراکنده بررسی شده است.

در این مقاله یک شرکت ترکیبی خصوصی مورد بررسی قرار گرفته، که وظیفه کلی این شرکت مالکیت تجهیزات، کنترل و بهره برداری از خطوط انتقال همچون TFO ها می باشد. در این مقاله ساختاری برای شرکت پیشنهاد شده است که علاوه بر وظایفی که به آن ها اشاره شد، می توانند در بازار روز بعد انرژی جهت خرید و فروش توان نیز شرکت کنند (به همین خاطر به این شرکت، شرکت ترکیبی HTOC<sup>۲</sup> گفته می شود). این کار را HTOC با استفاده از منابع ذخیره ساز از دو دیدگاه انجام می دهد. در دیدگاه اول از منابع ذخیره ساز جهت افزایش درآمد ناشی از افزایش شارش توان از خطوط تحت کنترل خود استفاده می نماید تا منجر به افزایش قیمت گذاری انتقال شود و در دیدگاه دوم این منابع ذخیره ساز در بازار روز بعد در جهت افزایش بهره وری و سودبخشی ناشی از شارژ و دشارژ شدن، شرکت داده می شوند که در نتیجه این دو دیدگاه افزایش درآمد HTOC حاصل می شود. جهت پیاده سازی این استراتژی و همچنین به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی از دید بهره بردار شبکه، از یک برنامه ریزی دوسطحی استفاده شده است که البته در ادامه با استفاده از روش KKT<sup>۳</sup> به یک برنامه ریزی تک سطحی تبدیل شده است. همچنین جهت اینکه HTOC دیدگاه واقع بینانه تری

<sup>3</sup> Karush-Kuhn-Tucker

<sup>4</sup> Modified Scenario Based Method (MSBM)

<sup>1</sup> Financial Transmission Rights

<sup>2</sup> Hybrid Transmission Operating Company

در این سطح از بهینه‌سازی تابع هدف HTOC قرار دارد که دو هدف را به‌عنوان عامل به حداکثر رساندن درآمد دنبال می‌کند: (۱) به حداکثر رساندن درآمد ناشی از استراتژی پیشنهادی منابع ذخیره‌ساز HTOC (۲) به حداکثر رساندن درآمد حاصله از خطوط انتقال به روش مگاوات-مایلر فرمولاسیون تابع HTOC درآمد به‌وسیله متغیرهای  $\{P_{b,t}^{bg}, P_{b,t}^{bd}, \hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell}, \hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy}, P_{l,t}\}$  حداکثر شده است (معادله ۱). قسمت اول تابع  $\sum_{t \in T} P_{b,t}^{st} \hat{\lambda}_{b,t}^{st}$  مدل‌کننده درآمد منابع ذخیره‌ساز مستقل ( $ISR^1$ ) در مدت زمان  $t$  است که  $P_{b,t}^{st}$  توانایی گرفتن یا مقادیر منفی  $P_{b,t}^{bd}$  و یا مقدار مثبت  $P_{b,t}^{bg}$  جهت خرید یا فروش توان در بازار روز بعد را در هر ساعت دارد. در قسمت دوم تابع هدف انتظار می‌رود که هزینه تمام‌شده خطوط به روش مگاوات-مایلر به بیشترین حد خود برسد. منظور از منابع ذخیره‌ساز مستقل، منابع ذخیره‌سازی است که به‌صورت انحصاری جهت به حداکثر رساندن درآمد HTOCها در بازار روز بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند. قید (۲) محدودیت ظرفیت توان منابع ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد که از (۳) تفاضل  $P_{b,t}^{bg}$  و  $P_{b,t}^{bd}$  حاصل می‌شود.  $\hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy}$  و  $\hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell}$  (۴) قیمت پیشنهادی توسط ذخیره‌سازها برای فروش و خرید توان به ترتیب می‌باشد. همچنین قیدهای (۵) و (۶) محدوده استراتژی توان پیشنهادی منابع ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. در نهایت قید (۷) و (۸) محدودیت انرژی منابع ذخیره‌ساز در سیستم را نشان می‌دهد.

### ۲-۲- مدل پیشنهادی سطح دوم

همان‌طور که در قسمت قبلی هم اشاره شد، در این سطح از بهینه‌سازی، هدف رساندن رفاه اجتماعی به بالاترین سطح حالت ممکن خود است. این بدان معناست که میزان هزینه‌های دریافتی از منابع تولیدکننده و مصرف‌کننده با در نظر گرفتن هم منابع ذخیره‌ساز و هم دیگر منابع رقیب در بازه‌ی زمانی مشخص، باید به صفر میل کند. این بهینه‌سازی توسط ISO صورت می‌گیرد و همان عملیات بستن بازار است. پس داریم:

$$\min_{VISO} \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{b \in B^{sg}} P_{b,t}^{sg} \hat{\lambda}_{b,t}^{sg} - \sum_{b \in B^{sd}} P_{b,t}^{sd} \hat{\lambda}_{b,t}^{sd} + \sum_{b \in B^{bg}} P_{b,t}^{bg} \hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell} - \sum_{b \in B^{bd}} P_{b,t}^{bd} \hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy} \right\} \quad (9)$$

است که در سطح اول بهینه‌سازی، هدف به حداکثر رساندن سود HTOC از طریق به حداکثر رساندن درآمد انتقال خطوط به روش مگاوات-مایلر [۲۱] و همچنین خرید و فروش انرژی بوده و در سطح دوم بهینه‌سازی، هدف به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی از دید ISO می‌باشد. در ابتدا سطح اول بهینه‌سازی که به حداکثر رساندن درآمد HTOC را به دنبال خواهد داشت، مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله بعد به سطح دوم و سپس به تک سطحی کردن مسئله پرداخته شده است.

### ۲-۱- مدل پیشنهادی سطح اول

نحوه عملکرد استراتژی پیشنهادی به‌گونه‌ای است که منابع ذخیره‌ساز تحت کنترل HTOCها به‌صورت مستقل از بقیه منابع در بازار جهت افزایش درآمد شرکت داده می‌شوند. این بدان معناست که در زمانی که HTOC نیاز به دشارژ توان برای به حداکثر رساندن درآمد خود در بازار دارد، منابع ذخیره‌ساز به‌صورت منابع تولیدکننده در شبکه مورد استفاده قرار بگیرند و زمان‌هایی که هم از لحاظ قیمت و هم از لحاظ سطح توان‌های برنده‌شده در بازار موقعیت مناسب باشد، منابع ذخیره‌ساز را به‌صورت منابع مصرفی در شبکه وارد کند تا برای زمان‌هایی که نیاز به تخلیه توان در شبکه دارد، شارژ شوند.

در نتیجه در سطح اول، استراتژی پیشنهادی ذخیره‌ساز برای شرکت در بازار روز بعد ارائه می‌گردد. و قیود ذخیره‌ساز به‌عنوان قیود سطح اول مسئله در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین داریم:

$$\max_{revenue_{HTOC}} = \sum_{t \in T} \left( \sum_{b \in B} P_{b,t}^{st} \hat{\lambda}_{b,t}^{st} + \sum_l (C_l)(Lgh_l)(P_{l,t}) \right) \quad (1)$$

با مجموعه قیود:

$$-p^{st,max} \leq P_{b,t}^{st} \leq p^{st,max} \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (2)$$

$$P_{b,t}^{st} = P_{b,t}^{bg} - P_{b,t}^{bd} \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_{b,t}^{st} = \hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell} - \hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy} \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (4)$$

$$0 \leq P_{b,t}^{ofg} \leq p^{st,max} \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{bg} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{b,t}^{ofd} \leq p^{st,max} \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{bd} \quad (6)$$

$$E_t^{st} = E_{ini} + \sum_{i=1}^t -P_i^{st} \quad \forall t \in T, \forall l \in K \quad (7)$$

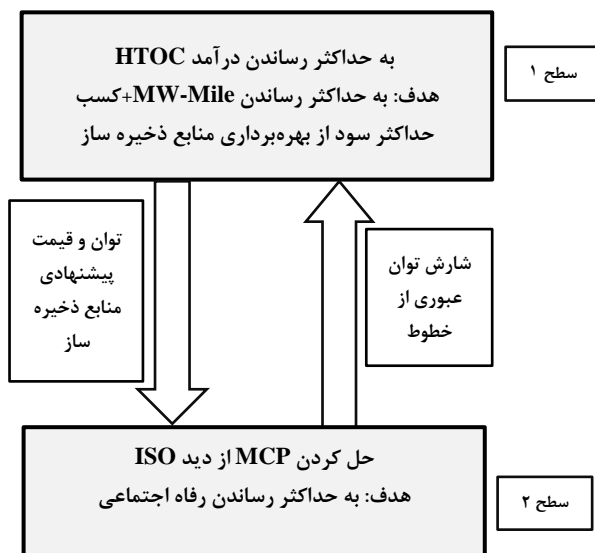
$$E^{min} \leq E_t^{st} \leq E^{max} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

<sup>1</sup> Independent Storage Resources (ISR)

که از طریق پخش بار DC ارائه شده در رابطه (۱۵) به دست می‌آید، حاصل می‌گردد. رعایت کردن نرخ حرارتی خطوط از طریق رابطه (۱۶) به شبکه اعمال می‌شود. همچنین شین شماره ۱ به عنوان شین مرجع در سیستم مورد استفاده قرار گرفته است (۱۷) و محدودیت (۱۸) نیز محدوده زاویه را مشخص می‌نماید. با توجه به اضافه شدن مقادیر  $\{P_{b,t}^{ofg}, P_{b,t}^{ofd}, \lambda_{b,t}^{st,sell}, \lambda_{b,t}^{st,buy}\}$  حاصل از سطح اول بهینه‌سازی به صورت پارامتر به سطح دوم بهینه‌سازی، فرمولاسیون ارائه شده در سطح دوم خطی می‌باشد.

### ۲-۳- معادل‌سازی سطوح بهینه‌سازی

همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، برای به دست آوردن حداکثر درآمد در سطح اول نیاز به مشخص بودن میزان توان عبوری از خطوط است که این متغیر در سطح اول قابل دسترس نیست، مگر آنکه از طریق حل سطح دوم بهینه‌سازی به دست آید و به عنوان پارامتر به سطح اول ارسال شود. از طرفی برای اینکه سطح دوم اجرا شود، نیازمند دانستن مقادیر پیشنهادی توان و قیمت از طرف HTOC برای منابع ذخیره‌سازی می‌باشد، یعنی  $\{P_{b,t}^{ofg}, P_{b,t}^{ofd}, \lambda_{b,t}^{st,sell}, \lambda_{b,t}^{st,buy}\}$  که با اجرای سطح اول بهینه‌سازی به دست می‌آید. این استراتژی پیشنهادی برای مسئله دوسطحی HTOC در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- استراتژی پیشنهادی دوسطحی مسئله HTOC

برای اینکه استراتژی دوسطحی فوق توسط نرم‌افزار تجاری (GAMS) حل شود، نیاز است که این دو سطح بهینه‌سازی به یک سطح تبدیل شوند. روشی که در این مقاله مورد استفاده

با مجموعه قیود:

$$0 \leq P_{b,t}^{sg} \leq \hat{P}_{b,t}^{sg} : \mu_{b,t}^{usg}, \mu_{b,t}^{lsg} \quad \forall b \in B^{sg}, \forall t \in T \quad (10)$$

$$0 \leq P_{b,t}^{sd} \leq \hat{P}_{b,t}^{sd} : \mu_{b,t}^{usd}, \mu_{b,t}^{lzd} \quad \forall b \in B^{sd}, \forall t \in T \quad (11)$$

$$0 \leq P_{b,t}^{bg} \leq P_{b,t}^{ofg} : \mu_{b,t}^{ubg}, \mu_{b,t}^{lbg} \quad \forall b \in B^{bg}, \forall t \in T \quad (12)$$

$$0 \leq P_{b,t}^{bd} \leq P_{b,t}^{ofd} : \mu_{b,t}^{ubd}, \mu_{b,t}^{lbd} \quad \forall b \in B^{bd}, \forall t \in T \quad (13)$$

$$P_{b,t}^{sg} - P_{b,t}^{sd} + P_{b,t}^{bg} - P_{b,t}^{bd} = \sum (l|re(l) = b) P_{l,t} - \sum (l|se(l) = b) P_{l,t} : \pi_{b,t} \quad \forall b \in B, \forall t \in T \quad (14)$$

$$P_{l,t} = BS_l(\theta_{se(l),t} - \theta_{re(l),t}) : \zeta_{l,t} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (15)$$

$$-P_l^{max} \leq P_{l,t} \leq P_l^{max} : \varphi_{l,t}^{up}, \varphi_{l,t}^{lo} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (16)$$

$$\theta_{1,t} = 0 : \vartheta_t \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$-\pi \leq \theta_{b,t} \leq \pi : \xi_{b,t}^{up}, \xi_{b,t}^{lo} \quad \forall b \in B, \forall t \in T \quad (18)$$

همان‌طور که در رابطه (۹) قابل مشاهده است، تابع هدف از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول:

$$\sum_{b \in B^{sg}} P_{b,t}^{sg} \hat{\lambda}_{b,t}^{sg} - \sum_{b \in B^{sd}} P_{b,t}^{sd} \hat{\lambda}_{b,t}^{sd}$$

که مشخص‌کننده حاصل درآمد برنده شدن واحدهای تولیدکننده و واحدهای مصرف‌کننده رقیب در بازار روز بعد است. قسمت دوم تابع هدف نیز:

$$\sum_{b \in B^{bg}} P_{b,t}^{bg} \hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell} - \sum_{b \in B^{bd}} P_{b,t}^{bd} \hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy}$$

مشخص‌کننده حاصل درآمد برنده شدن واحدهای تولیدکننده و واحدهای مصرف‌کننده منابع ذخیره‌سازی در بازار روز بعد است. در روابط (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است که توان برنده شدن هر واحد تولیدی و یا مصرفی رقیب از میزان توان پیشنهادی آن واحدها نمی‌تواند بیشتر باشد. همچنین در قید (۱۲ و ۱۳) عنوان شده است که منابع ذخیره‌سازی نیز نمی‌توانند خارج از محدوده عملیاتی خودشان که از سطح اول مسئله آمده است، توان تولیدی یا توان مصرفی برنده شوند. با توجه به اهمیت شبکه قدرت در این مقاله و اضافه شدن به معادلات، نیاز به کنترل شارش توان عبوری از خطوط اهمیت پیدا می‌کند. به عبارتی تغییرات توان در منابع تولیدکننده و مصرف‌کننده منوط به ارضا کردن قیود شبکه می‌شود. قید (۱۴) توازن توان در هر باس از شبکه را نشان می‌دهد که با توجه به شارش عبوری از خطوط

<sup>1</sup> General Algebraic Modeling System (GAMS)

$$\frac{\partial L}{\partial P_{b,t}^{sg}} = \hat{\lambda}_{b,t}^{sg} + \mu_{b,t}^{usg} - \mu_{b,t}^{lsg} - \pi_{b,t} = 0 \quad (20)$$

$$\forall b \in B^{sg}, \forall t \in T$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{b,t}^{sd}} = -\hat{\lambda}_{b,t}^{sd} - \mu_{b,t}^{usd} - \mu_{b,t}^{lsd} + \pi_{b,t} = 0 \quad (21)$$

$$\forall b \in B^{sd}, \forall t \in T$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{b,t}^{bg}} = \hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell} + \mu_{b,t}^{ubg} - \mu_{b,t}^{lbg} - \pi_{b,t} = 0 \quad (22)$$

$$\forall b \in B^{bg}, \forall t \in T$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{b,t}^{bd}} = -\hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy} + \mu_{b,t}^{ubd} - \mu_{b,t}^{lbd} + \pi_{b,t} = 0 \quad (23)$$

$$\forall b \in B^{bd}, \forall t \in T$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{l,t}} = \zeta_{l,t} + \varphi_{l,t}^{up} - \varphi_{l,t}^{lo} + \pi_{re(l),t} - \pi_{se(l),t} = 0 \quad (24)$$

$$\forall l \in L, \forall t \in T$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{b,t}} = -\sum_{(l|se(l)=b)} \zeta_{l,t} BS_l + \sum_{(l|re(l)=b)} \zeta_{l,t} BS_l + \xi_{b,t}^{up} - \xi_{b,t}^{lo} = 0 \quad (25)$$

$$\forall b \in B, b \neq 1, \forall t \in T$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{1,t}} = -\sum_{(l|se(l)=1)} \zeta_{l,t} BS_l + \sum_{(l|re(l)=1)} \zeta_{l,t} BS_l + \vartheta_t = 0 \quad \forall t \in T \quad (26)$$

**قسمت دوم روابط KKT:**

حال می‌بایستی با استفاده از قیود مکمل قسمت دوم این معادلسازی را انجام داد تا بتوان این مجموعه قیود را در بهینه‌سازی مرحله بعد مورد استفاده قرار داد.

$$0 \leq \mu_{b,t}^{usg} \perp (\hat{P}_{b,t}^{sg} - P_{b,t}^{sg}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{sg} \quad (27)$$

$$0 \leq \mu_{b,t}^{lsg} \perp P_{b,t}^{sg} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{sg} \quad (28)$$

$$0 \leq \mu_{b,t}^{usd} \perp (\hat{P}_{b,t}^{sd} - P_{b,t}^{sd}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{sd} \quad (29)$$

$$0 \leq \mu_{b,t}^{lsd} \perp P_{b,t}^{sd} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{sd} \quad (30)$$

$$0 \leq \mu_{b,t}^{ubg} \perp (P_{b,t}^{ofg} - P_{b,t}^{bg}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{bg} \quad (31)$$

$$0 \leq \mu_{b,t}^{lbg} \perp P_{b,t}^{bg} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{bg} \quad (32)$$

قرار گرفته است، استفاده از شرایط کاروش-کان-تاکر است که با این روش سطح دوم مسئله به صورت قیدهایی معادلسازی می‌شوند که با اضافه شدن به سطح اول، یک مرتبه از مرتبه‌های بهینه‌سازی کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در مراجع [۲۲ و ۲۳] به آن اشاره شده است، برای معادلسازی می‌بایستی با استفاده از تابع لاگرانژ، قسمت اول روابط KKT را برای سطح دوم به دست آورده و سپس با استفاده از روابط مکمل<sup>۱</sup> قسمت دوم روابط KKT را نیز می‌توان به دست آورد.

**قسمت اول روابط KKT:**

$$L \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{t \in T} \left( \sum_{b \in B^{sg}} [P_{b,t}^{sg} (\hat{\lambda}_{b,t}^{sg})] - \sum_{b \in B^{sd}} P_{b,t}^{sd} \hat{\lambda}_{b,t}^{sd} \right. \\ &+ \sum_{b \in B^{bg}} P_{b,t}^{bg} \hat{\lambda}_{b,t}^{st,sell} - \sum_{b \in B^{bd}} P_{b,t}^{bd} \hat{\lambda}_{b,t}^{st,buy} \\ &+ \sum_{b \in B^{sg}} [\mu_{b,t}^{usg} (P_{b,t}^{sg} - \hat{P}_{b,t}^{sg})] \\ &+ \mu_{b,t}^{lsg} (P_{b,t}^{sg}) \sum_{b \in B^{sd}} [\mu_{b,t}^{usd} (P_{b,t}^{sd} - \hat{P}_{b,t}^{sd}) \\ &+ \mu_{b,t}^{lsd} (P_{b,t}^{sd})] \\ &+ \sum_{b \in B^{bg}} [\mu_{b,t}^{ubg} (P_{b,t}^{bg} - P_{b,t}^{ofg}) + \mu_{b,t}^{lbg} (P_{b,t}^{bg})] \\ &+ \sum_{b \in B^{bd}} [\mu_{b,t}^{ubd} (P_{b,t}^{bd} - P_{b,t}^{ofd}) + \mu_{b,t}^{lbd} (P_{b,t}^{bd})] \\ &+ \sum_{b \in B} \pi_{b,t} \left( P_{b,t}^{sg} - P_{b,t}^{sd} + P_{b,t}^{bg} - P_{b,t}^{bd} \right. \\ &- \sum_{(l|re(l)=b)} P_{l,t} + \sum_{(l|se(l)=b)} P_{l,t} \left. \right) \\ &+ \sum_{l \in L} \zeta_{l,t} (P_{l,t} - BS_l (\theta_{se(l),t} - \theta_{re(l),t})) \\ &+ \varphi_{l,t}^{up} (P_{l,t} - P_l^{max}) - \varphi_{l,t}^{lo} (P_{l,t} + P_l^{max}) \\ &+ \sum_{b \in B} \xi_{b,t}^{up} (\theta_{b,t} - \pi) - \xi_{b,t}^{lo} (\pi + \theta_{b,t}) \\ &+ \vartheta_t \theta_{1,t} \left. \right) \end{aligned}$$

با مشتق‌گیری از تابع لاگرانژ (۱۹) نسبت به متغیرهای اصلی و مساوی قرار دادن آن‌ها با صفر، قسمت اول تابع KKT به دست می‌آید.

<sup>1</sup> Complementary Slackness Condition(CSC)

$$\bar{P}_{b,t}^{sg} - \alpha_b^{sg} \bar{P}_{b,t}^{sg} \leq \bar{P}_{b,t}^{sg} \leq \bar{P}_{b,t}^{sg} + \alpha_b^{sg} \bar{P}_{b,t}^{sg} \quad (39)$$

$$\forall b \in B^{sg}, \forall t \in T$$

$$\bar{P}_{b,t}^{sd} - \alpha_b^{sd} \bar{P}_{b,t}^{sd} \leq \bar{P}_{b,t}^{sd} \leq \bar{P}_{b,t}^{sd} + \alpha_b^{sd} \bar{P}_{b,t}^{sd} \quad (40)$$

$$\forall b \in B^{sd}, \quad \forall t \in T$$

$$\tilde{\lambda}_{b,t}^{sg} - \alpha_b^{\lambda sg} \tilde{\lambda}_{b,t}^{sg} \leq \tilde{\lambda}_{b,t}^{sg} \leq \tilde{\lambda}_{b,t}^{sg} + \alpha_b^{\lambda sg} \tilde{\lambda}_{b,t}^{sg} \quad (41)$$

$$\forall b \in B^{sg}, \forall t \in T$$

$$\tilde{\lambda}_{b,t}^{sd} - \alpha_b^{\lambda sd} \tilde{\lambda}_{b,t}^{sd} \leq \tilde{\lambda}_{b,t}^{sd} \leq \tilde{\lambda}_{b,t}^{sd} + \alpha_b^{\lambda sd} \tilde{\lambda}_{b,t}^{sd} \quad (42)$$

$$\forall b \in B^{sd}, \forall t \in T$$

در مجموع قیود (۳۹-۴۲)، یک بازه حول پارامترهای همراه با عدم قطعیت در نظر می‌گیرد که با تغییر در میزان فاصله که توسط  $\alpha$  (خطای پیش‌بینی که عددی بین صفر تا یک است) تعیین می‌گردد، می‌توان این بازه را کنترل نمود.

۲-۴-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت با استفاده از روش مبتنی بر سناریو اصلاح شده

به‌طور معمول بعضی از داده‌هایی که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلیل آنکه حاصل پیش‌بینی می‌باشند، با خطای پیش‌بینی و همراه با عدم قطعیت در مدل‌سازی شرکت می‌نمایند و نمی‌توان مقدار دقیقی را برای آن‌ها در نظر گرفت [۲۵].

در مسائل بهینه‌سازی برای مدل‌سازی داده‌های همراه با عدم قطعیت از روش‌های مختلفی استفاده می‌گردد. که در این بین می‌توان به روش بهینه‌سازی مقاوم (RO<sup>1</sup>) که یک روش مبتنی بر فاصله می‌باشد [۲۶] و همچنین روش مبتنی بر سناریو اشاره نمود [۲۷]. روش‌های مبتنی بر فاصله به دلیل عدم نیاز به تابع توزیع احتمال (PDF<sup>2</sup>)، تضمین سود و همچنین بار محاسباتی کم، جز روش‌های خوب در مدل‌سازی عدم قطعیت هستند ولی اجرای این روش‌ها پیچیده می‌باشد [۲۸]. در مقابل روش‌های مبتنی بر سناریو به تابع PDF نیاز دارند و بار محاسباتی زیادی دارند اما در اجرا ساده و راحت هستند [۲۹].

در این مقاله یک روش جدید که روش سناریو اصلاح شده MSBM نامیده می‌شود برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مسئله تک سطحی HTOC ارائه گردیده است. در این روش نیاز به استفاده از تابع توزیع احتمال برای داده‌های همراه با عدم قطعیت نمی‌باشد. در واقع می‌توان گفت همانند روش RO برای هر پارامتر همراه با عدم قطعیت یک بازه حول مقدار پیش‌بینی مطابق مجموع قیود (۳۹-۴۲) در مسئله HTOC در نظر گرفته

$$0 \leq \mu_{b,t}^{ubd} \perp (P_{b,t}^{ofd} - P_{b,t}^{bd}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{bd} \quad (33)$$

$$0 \leq \mu_{b,t}^{lbd} \perp P_{b,t}^{bd} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B^{bd} \quad (34)$$

$$0 \leq \phi_{l,t}^{up} \perp (P_l^{max} - P_{l,t}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall l \in L \quad (35)$$

$$0 \leq \phi_{l,t}^{lo} \perp (P_l^{max} + P_{l,t}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall l \in L \quad (36)$$

$$0 \leq \xi_{b,t}^{up} \perp (\pi - \theta_{b,t}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (37)$$

$$0 \leq \xi_{b,t}^{lo} \perp (\pi + \theta_{b,t}) \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (38)$$

به‌طور مستقیم، یک محدودیت مکمل (CSC) راهی برای الگوبرداری از یک محدودیت است، برای مثال، شرایط مکمل دلالت بر این دارد که ضرایب لاگرانژ یا طرف‌های نامساوی باید 0 باشد و یا ممکن است هر دو 0 باشد. [۲۴] در واقع زمانی این ضریب لاگرانژ می‌تواند غیر صفر باشد که قید متقابل با آن به کران خود رسیده باشد.

بدین صورت با به دست آمدن روابط قسمت اول و دوم KKT برای سطح دوم و اضافه شدن آن‌ها به سطح اول، مسئله تک سطحی HTOC به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\max \text{revenue}_{HTOC} = \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} P_{b,t}^{st} \hat{\lambda}_{b,t}^{st} + (C_l)(Lgh_l)(P_{l,t})$$

با مجموع قیود:

$$(2) \text{ الی } (8), (10) \text{ الی } (18), (20) \text{ الی } (26) \text{ و } (27) \text{ الی } (38)$$

## ۲-۴-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت در مسئله HTOC

۲-۴-۱- پارامترهای همراه با عدم قطعیت در مسئله HTOC یکی از مشکلاتی که در فرمولاسیون مسئله تک سطحی HTOC در بخش قبل وجود دارد این است که بعضی از داده‌ها بدون در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی و با مقادیر قطعی در سیستم وارد شده‌اند. به‌عنوان مثال پارامترهای  $\{\bar{P}_{b,t}^{sg}, \bar{P}_{b,t}^{sd}, \tilde{\lambda}_{b,t}^{sg}, \tilde{\lambda}_{b,t}^{sd}\}$  که معرف نحوه استراتژی پیشنهادی تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌های رقیب می‌باشند بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم مدل‌سازی شده‌اند.

برای اینکه این داده‌ها با معیار و سنجش بهتری در بازار قرار بگیرند، لازم است که خطای پیش‌بینی این داده‌ها در مسئله لحاظ شوند. پس می‌توان نوشت:

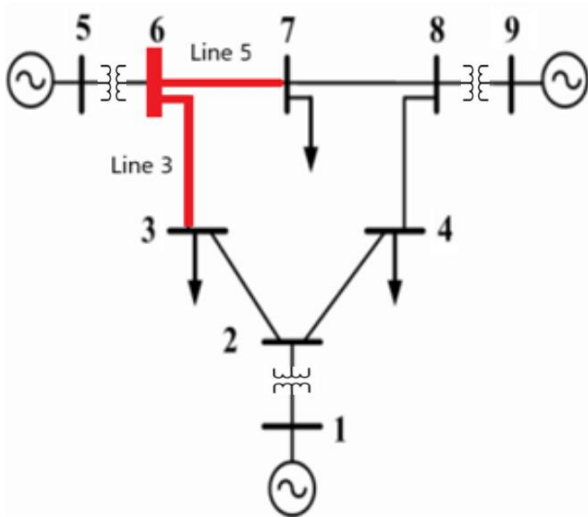
<sup>2</sup> Probability density function

<sup>1</sup> Robust optimization

غیرخطی به کار گرفته می‌شود [۳۱] و یک سیستم رایانه‌ای با مشخصات سخت‌افزاری Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz 2.59GHz استفاده شده است.

### ۲-۳- نتایج سیستم ۹ شین

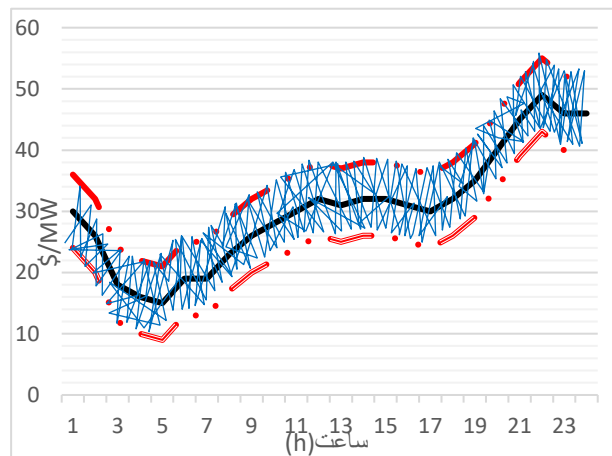
در ابتدا با استفاده از سیستم تست ۹ شین، روش پیشنهادی را جهت بیشینه کردن درآمد HTOC پیاده‌سازی می‌نماییم. سیستم ۹ شین در شکل (۳) مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- شبکه ۹ شین IEEE

این سیستم ۳ واحد نیروگاهی و ۳ واحد مصرفی دارد که واحدهای نیروگاهی بر روی شین‌های ۱-۵-۹ و واحدهای مصرفی بر روی شین ۳-۴-۷ قرار دارند. هرکدام از این واحدهای تولیدی یا مصرفی با توجه به نیازشان در بازار روز بعد شرکت می‌کنند. در واقع بازار را می‌توان یک بازار با ساختار استخری یا حوضچه‌ای<sup>۳</sup> در نظر گرفت که توان و قیمت رقبا در ساختار بازار قرار می‌گیرد و ISO با مدیریت این داده‌ها بازار را اجرا می‌کند. پس یک رقابت برای این واحدها در نظر گرفته می‌شود که همچنین می‌توان با در نظر گرفتن عدم قطعیت رفتار آنها را به‌طور دقیق‌تر مدل‌سازی نمود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، منبع ذخیره‌ساز بر روی شین شماره ۶ قرار گرفته است و به‌واسطه مکان قرار گرفتن منبع ذخیره‌ساز، HTOC می‌تواند به‌طور مستقیم بر خطوط ۳ و ۵ و به‌طور غیرمستقیم بر روی کل شبکه تأثیر خود را اعمال نماید. در این مقاله با توجه به اضافه شدن منابع ذخیره‌ساز، به‌عنوان عاملی در جهت به حداکثر رساندن درآمد HTOC، می‌توان منبع ذخیره‌ساز را همانند یک واحد ترکیبی<sup>۴</sup> در شبکه

می‌شود (شکل ۲) و این بازه تا جای ممکن برای تمامی ساعت‌های استراتژی پیشنهادی آزاد گذاشته می‌شود تا قدرت انتخاب بیشتری با توجه به احتمالات در اختیار پارامترها قرار بگیرد. سپس به‌صورت تصادفی در هر ساعت در بین بازه پیشنهادی، برای پارامترهای همراه با عدم قطعیت مقداری انتخاب می‌گردد و حاصل در فرمولاسیون مسئله تک سطحی HTOC به‌عنوان یک سناریو مورد استفاده قرار می‌گیرد و بهینه‌سازی در این سناریو صورت می‌پذیرد. در نهایت بهینه‌ترین جواب (در اینجا با توجه به بیشینه کردن درآمد در مسئله HTOC، بهینه‌ترین جواب جهت تضمین سود، کمترین جواب می‌باشد) در بین سناریوهای اجرا شده به‌عنوان جواب مسئله HTOC ارائه می‌گردد. در واقع می‌توان گفت ایده روش MSBM از ترکیب بهینه‌سازی مقاوم و بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو حاصل شده است.



شکل ۲- محدوده تعیین‌شده برای پارامترهای دارای عدم قطعیت در MSBM

### ۳- نتایج به دست آمده

#### ۳-۱- سیستم‌های تست

در این بخش برای نشان دادن اهداف مقاله و صحت آن چیزی که در بخش‌های قبل به آن اشاره شده است، ابتدا روش پیشنهادی را بر روی یک شبکه ۹ شین استاندارد<sup>۱</sup> IEEE مدل‌سازی می‌نماییم. سپس روش پیشنهادی را برای سیستم ۵۷ شین<sup>۲</sup> IEEE نیز تکرار کرده تا صحت روش بر روی یک شبکه بزرگ‌تر هم دیده شود. اطلاعات موردنیاز سیستم‌های تست از مرجع [۳۰] انتخاب شده است.

همچنین برای شبیه‌سازی سیستم‌های مورد مطالعه از حل‌کننده‌ی SNOPT نرم‌افزار GAMS که جهت حل مسائل

<sup>۳</sup> Pool Market Structure

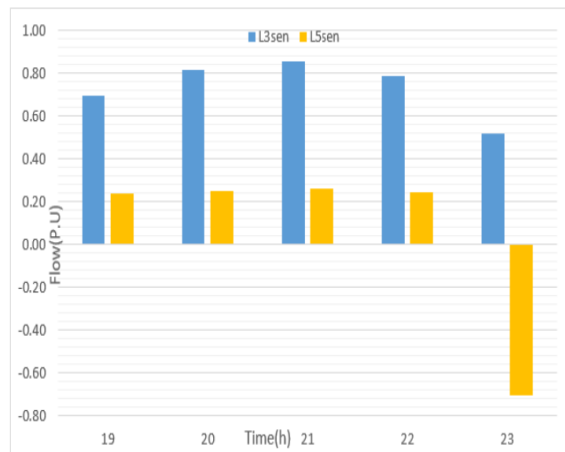
<sup>۴</sup> Hybrid Unit

<sup>۱</sup> IEEE 9-Bus Standard System

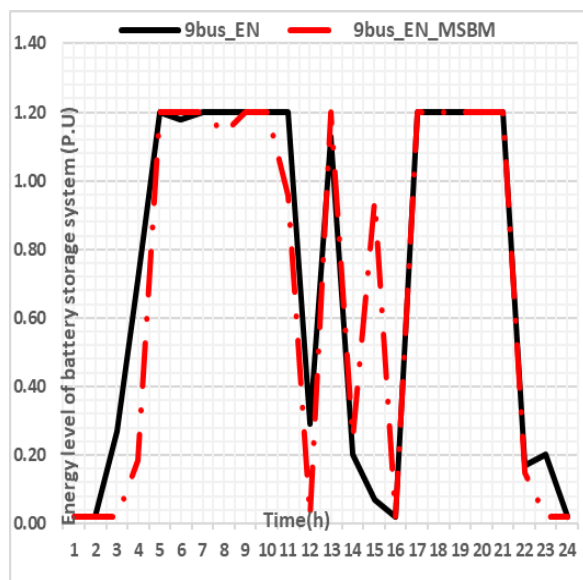
<sup>۲</sup> IEEE 57-Bus Standard System



قطعیت رفتار منابع رقیب با استفاده از روش مبتنی بر سناریو اصلاح شده است. همان‌طور در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و اعمال MSBM شارش توان نسبت به حالت بدون عدم قطعیت تغییر کرده و برای هر دو خط در اکثر ساعات کمتر شده است. این نتیجه را می‌توان در اثر اضافه شدن تحلیل خطر به سیستم دانست، به عبارتی سیستم را خطرپذیر کرده است.



شکل ۵- نمودار شارش توان عبوری از خطوط با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدت زمان  $t$

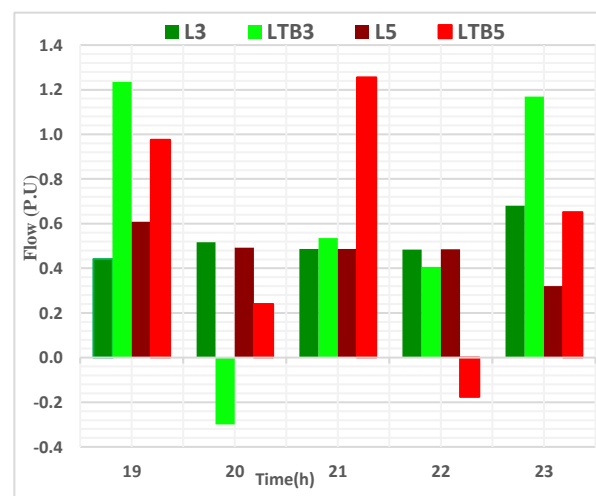


شکل ۶- سطح انرژی ISR در مدت زمان ۲۴ ساعت در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت

در شکل (۶) تغییرات سطح انرژی ISR در حالت بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت و همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت نشان داده شده است. از این شکل می‌توان مشاهده کرد که در

مدل‌سازی نمود. نحوه انتخاب مکان ISR بستگی به آنالیز شبکه و خروجی‌های موردنظر دارد که در این مقاله صرفاً این انتخاب مکان به صورت دستی صورت گرفته شده و به مکان‌یابی پرداخته نشده است.

در ابتدا بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مسئله، سیستم ۹ شین در دو حالت با حضور HTOC و بدون حضور HTOC شبیه‌سازی می‌گردد. در سیستم بدون HTOC منابع ذخیره‌ساز در مسئله وجود ندارد و در نتیجه قسمت‌های مرتبط با آن‌ها از فرمولاسیون مسئله حذف می‌گردد. شکل شماره (۴) میزان تغییرات شارش توان عبوری از خطوط سیستم را در این دو حالت نشان می‌دهد.



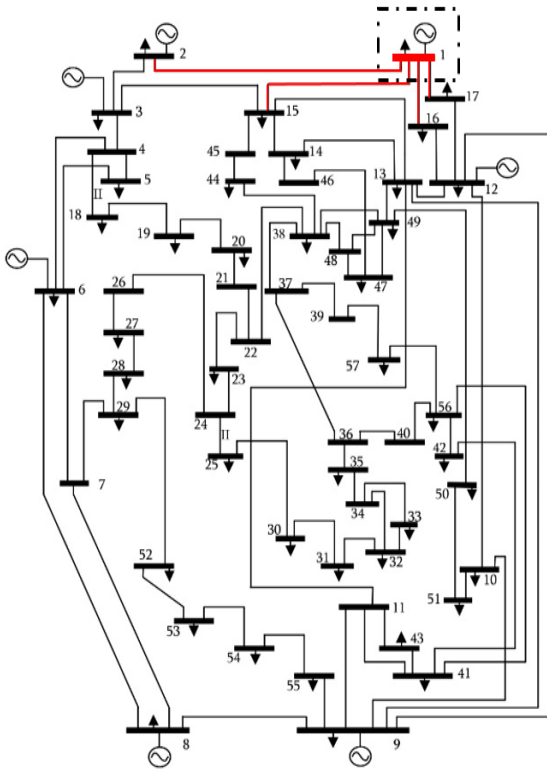
شکل ۴- نمودار شارش توان عبوری از خطوط با حضور یا عدم حضور HTOC در مدت زمان  $t$

در این نمودار L3 و L5 نشان‌دهنده شارش عبوری از خطوط ۳ و ۵ بدون در نظر گرفتن HTOC می‌باشد و LTB3 و LTB5 نیز نشان‌دهنده شارش عبوری از این خطوط با در نظر گرفتن HTOC می‌باشد. شکل (۴) نشان می‌دهد که با اضافه شدن منابع ذخیره‌ساز جهت بهبود درآمد HTOC، نسبت تغییرات شارش عبوری از خطوط ۳ و ۵ نسبت به حالت عدم حضور HTOC متفاوت است. با توجه به این شکل که در ۵ ساعت موردبررسی قرار گرفته است، می‌توان گفت که حضور HTOC‌ها در شبکه و استفاده از منابع ذخیره‌ساز در اکثر ساعات منجر به افزایش شارش عبوری از خطوط گردیده و این تغییرات به‌منظور سوددهی بیشتر مالکین تجهیزات انتقال است. این نکته لازم به ذکر است که این تغییرات را می‌توان ناشی از استراتژی پیشنهادی منابع رقیب و همچنین ISR نیز دانست.

در شکل (۵)، L3sen و L5sen نشان‌دهنده شارش عبوری از خطوط ۳ و ۵ با در نظر گرفتن ISR و همچنین مدل‌سازی عدم

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود این سیستم دارای ۷ واحد تولیدی<sup>۱</sup> است که بر روی شین‌های ۱-۲-۳-۶-۸-۹-۱۲ قرار دارند.

همچنین این شبکه نیز دارای ۴۲ واحد مصرفی می‌باشد و منبع ذخیره‌ساز نیز بر روی شین شماره ۱ قرار می‌گیرد.



شکل ۸ - شبکه ۵۷ شین IEEE

در شکل ۹، شارش توان عبوری از خطوط شماره ۱، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ با حضور منبع ذخیره‌ساز در دو سناریو بدون قطعیت و با در نظر گرفتن قطعیت (مدل شده با روش سناریو اصلاح‌شده) قابل مشاهده است.

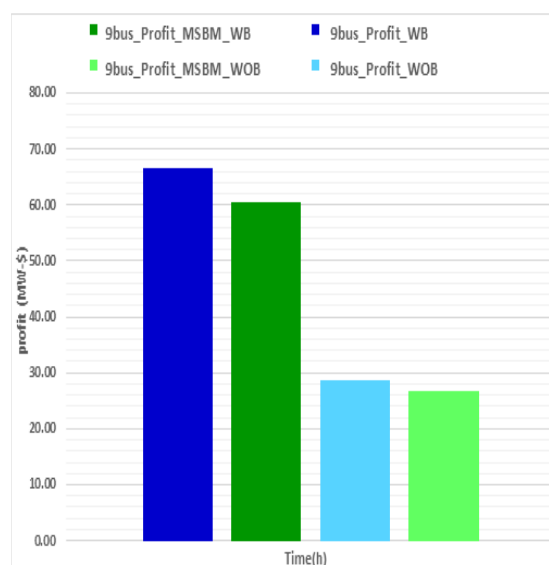
با توجه به شکل (۹) می‌توان گفت که شارش توان عبوری از خطوط مختلف در همه ساعت‌ها در دو سناریو دارای تغییرات جزئی می‌باشد. این تغییرات جزئی و گاهی شبیه به هم در شارش توان عبوری از خطوط در بعضی از ساعت‌ها می‌تواند به دلیل تغییر استراتژی پیشنهادی منابع در بسته شدن بازار روز بعد یا تراکم منابع تولیدکننده و یا حتی حد ازدحام خطوط باشد. به‌عنوان مثال با توجه به ظرفیت خط ۱۷ که ۱ (P.U) می‌باشد، در ساعت ۲۱ که بیشترین شارش توان خطوط را در بین ساعات مختلف دارا می‌باشد، خط شماره ۱۷ دچار ازدحام شده است و در نتیجه در هر دو سناریو به یک جواب یکسان رسیده است. در نتیجه می‌توان چنین بیان نمود که در نظر گرفتن قطعیت

نظر گرفتن عدم قطعیت رفتار رقبا، منجر به استفاده حداکثری از ISR می‌گردد. این تغییرات را می‌توان از نحوه شارژ و دشارژ کردن ذخیره‌ساز متوجه شد.

در شکل ۷ تأثیر ورود و خروج واحدهای ISR بر سود HTOC در دو حالت نمایش داده شده است که در دو حالت نمایش‌دهنده سود شبکه با حضور یا عدم حضور ISR است، به طوری که عدم قطعیت پارامترها دیده نشده است و با مجموعه رنگ آبی قابل رؤیت می‌باشد. 9bus\_Profit\_WB/WOB نشان‌دهنده سود شبکه در حضور یا عدم حضور ISR با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هاست که با مجموعه رنگ سبز قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، حضور منابع ذخیره‌ساز منجر به افزایش سود شبکه در هر دو حالت شده است. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و اعمال MSBM، به دلیل در نظر گرفتن بدترین رخدادهای ممکن، دارای سود کمتری نسبت به حالت بدون عدم قطعیت می‌باشد (هم با حضور و یا عدم حضور ISR) و این ضمانت را برای HTOC ایجاد می‌کند که در بدترین رخداد هم این شرکت این سطح سود را خواهد داشت.

### ۳-۳- نتایج سیستم ۵۷ شین

بعد از اعمال بهینه‌سازی به سیستم ۹ شین می‌توان این روند را برای یک سیستم بزرگ‌تر، همانند سیستم ۵۷ شین IEEE نیز تکرار کرد.

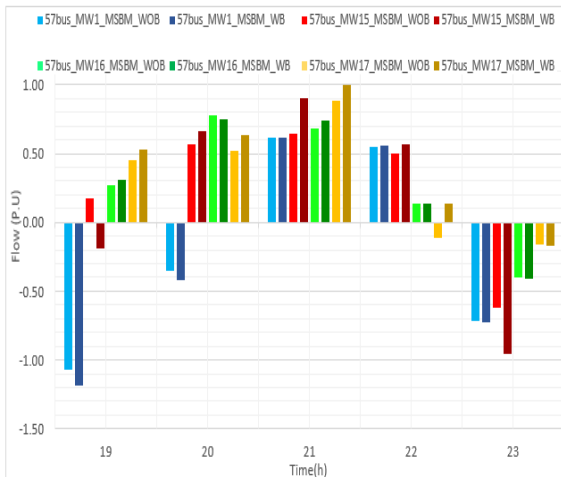


شکل ۷ - تأثیر ورود و خروج ISR بر سود HTOC در مدت زمان ۲۴ ساعت در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن قطعیت

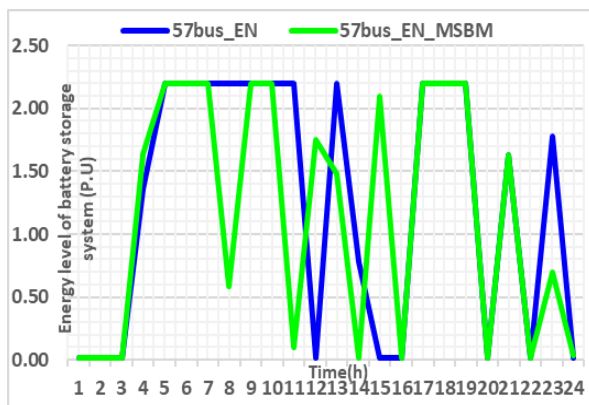
<sup>۱</sup> Unit

عبوری در خطوط تحت کنترل را افزایش دهد و حتی باعث ازدحام در بعضی از خطوط هم گردد.

شکل (۱۱) نشان‌دهنده میزان سطح انرژی در ISR می‌باشد که 57bus\_EN نمایان کننده سطح انرژی ISR بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم و 57bus\_EN\_MSBM نمایان کننده سطح انرژی ISR با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم می‌باشد.



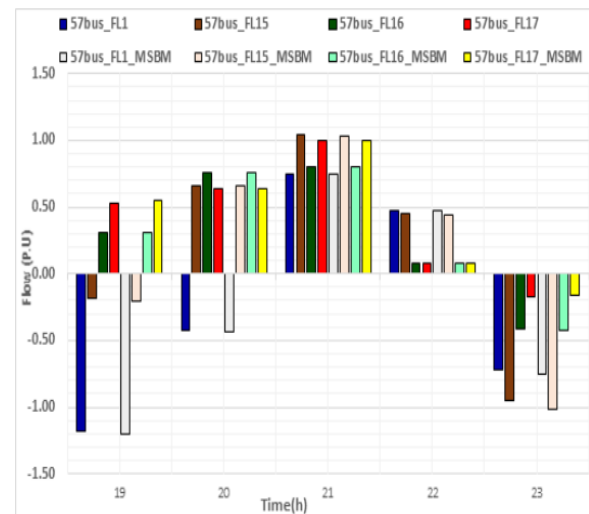
شکل ۱۰ - تأثیر ورود و خروج ISR بر شارش توان عبوری از خطوط تحت کنترل HTOC



شکل ۱۱ - سطح انرژی ISR در مدت زمان ۲۴ ساعت در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت

همچنین شکل ۱۲ نشان‌دهنده سود HTOC در مدت زمان ۲۴ ساعت و با در نظر گرفتن دو سناریو با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت و همچنین اثر حضور یا عدم حضور منابع ISR در شبکه می‌باشد. با توجه به شکل (۱۱) و (۱۲) مشخص است که تغییرات، شارژ و دشارژ شدن بیشتر و به موقع ISR در حضور عدم قطعیت رقبا، منجر به این می‌گردد که سود HTOC که در بدترین رخداد گزارش شده در مقایسه با سود HTOC در حالت بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت، کاهش زیادی نیابد (حدود

پارامترها، الزاماً منجر به تغییر در شارش توان نخواهد شد و بیشتر به تغییر استراتژی پیشنهادی منابع تولیدکننده و مصرف‌کننده در بازار روز بعد که کدام واحدها و در کدام ساعت‌ها و چه میزان توان برنده شوند منجر می‌گردد.



شکل ۹ - نمودار شارش توان عبوری از خطوط در دو حالت بدون عدم قطعیت و با در نظر گرفتن عدم قطعیت

شکل (۱۰) نشان‌دهنده شارش توان عبوری از خطوط تحت کنترل HTOC با در نظر گرفتن عدم قطعیت بوده که WB با حضور و WOB با عدم حضور منابع ISR در سیستم ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل قابل‌ملاحظه است و در سیستم ۹ شین نیز به آن پرداخته شد، انتظار بر این است که حضور ISR در شبکه بر شارش توان عبوری در خطوط تأثیر گذارد و این تأثیر در جهتی باشد که HTOC به بیشینه‌ترین سود خود از استفاده حداکثری از منابع ISR برسد. همان‌طور که در گذشته نیز عنوان شد، این تغییر در شارش توان عبوری، گاهی منجر به تغییر جهت شارش توان نیز می‌گردد که در ساعت‌های ۱۹ و ۲۲ برای خطوط ۱۵ و ۱۷ رخ داده است و شارش توان را در جهت بیشینه کردن سود HTOC تغییر داده است. علاوه بر این، این تغییرات شارش با حضور ISR می‌تواند در قیمت‌گذاری انتقال نیز تأثیر بگذارد. به‌طور مثال طبق شکل شماره (۱۰)، اگر خط شماره ۱۵ در ساعت ۲۱ بدون منابع ISR در شبکه وجود داشته باشد، ۰/۶۴۱۹ بر واحد مبنای توان از خود عبور می‌دهد. حال با اضافه شدن ISR این میزان به ۰/۹۰۲۴ افزایش پیدا کرده است. بر همین اساس با توجه به نتایج حاصله، هزینه انتقال از خط شماره ۱۵ در ساعت ۲۱ از ۰/۳۶۴۷ به ۰/۵۱۲۷ مگاوات-دلار با اضافه شدن ISR افزایش یافته است. این بدان معناست که اصلی‌ترین هدف اضافه شدن ISR به سیستم انجام شده است. درواقع اضافه شدن توان ISR به شبکه ممکن است سهم توان

مجموعه شین‌هایی که واحدهای مصرفی رقیب در آن قرار دارند  $B^{sd}$

مجموعه شین‌هایی که واحدهای مصرفی ذخیره‌ساز در آن قرار دارند  $B^{bg}$

مجموعه شین‌هایی که واحدهای تولیدی ذخیره‌ساز در آن قرار دارند  $B^{bd}$

مجموعه خطوط انتقال  $L$

مجموعه زمان  $T$

مجموعه متغیرهای تصمیم برای سطح دوم بهینه‌سازی  $V^{ISO}$

شاخص شین‌ها  $B, b$

شاخص خطوط انتقال  $L, l$

شاخص مدت‌زمان  $T, t$

شاخص واحدهای تولیدی  $g$

#### پارامترها

سوسپتانس خط  $l$   $BS_l$

ضریب ثابت روش مگاوات-مایل  $C_l$

سطح انرژی اولیه سیستم ذخیره‌ساز برحسب پریونیت  $E_{ini}$

حداکثر سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز برحسب پریونیت  $E_{max}$

کمینه سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز برحسب پریونیت  $E_{min}$

حداکثر ظرفیت خطوط  $l$   $p_l^{max}$

طول خط  $l$  ام برحسب مایل  $Lgh_l$

پارامتر شین‌های ارسالی خط  $l$  ام  $se_l$

پارامتر شین‌های دریافتی خط  $l$  ام  $re_l$

فاصله حول پارامترهای عدم قطعیت  $\alpha$

حداکثر توان تولیدشده سیستم ذخیره‌ساز در زمان  $t$   $P_{b,t}^{st,max}$

حداکثر توان پیشنهادی رقبا برای منابع تولیدی خودشان در شین  $b$  و در زمان  $t$   $\hat{P}_{b,t}^{sg}$

حداکثر توان پیشنهادی رقبا برای منابع مصرفی خودشان در شین  $b$  و در زمان  $t$   $\hat{P}_{b,t}^{sd}$

حداکثر زاویه خطوط  $\theta^{max}$

کمینه زاویه خطوط  $\theta^{min}$

قیمت پیشنهادی رقبا برای منابع تولیدی خودشان در شین  $b$  و در زمان  $t$   $\hat{\lambda}_{b,t}^{sg}$

قیمت پیشنهادی رقبا برای منابع مصرفی خودشان در شین  $b$  و در زمان  $t$   $\hat{\lambda}_{b,t}^{sd}$

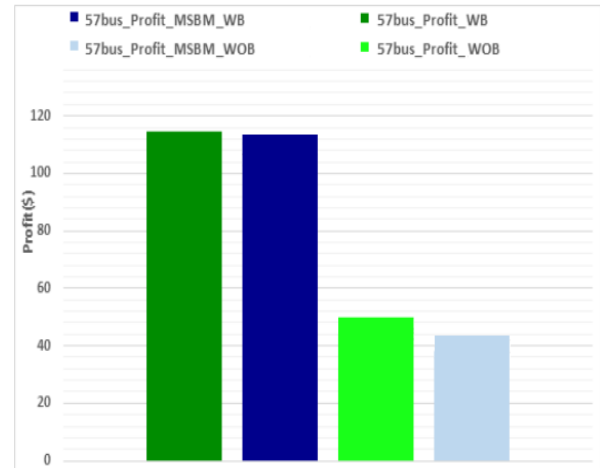
#### متغیرها

شارش توان خطوط  $l$  در زمان  $Pl_{l,t}$

قیمت‌گذاری انتقال به روش مگاوات-مایل  $MwMile_t$

حداکثر درآمد شرکت ترکیبی انتقال  $Profit$

۲/۲ درصد کاهش یافته است). اما در مقابل با خروج ISR اختلاف سود HTOC در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت زیادتر شده است (سود HTOC با در نظر گرفتن عدم قطعیت حدود ۱۲/۵ درصد کاهش یافته است).



شکل ۱۲- تأثیر ورود و خروج ISR بر سود HTOC در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رویکرد منعطف جدید برای حداکثر کردن درآمد شرکت‌های ترکیبی بهره‌برداری انتقال (HTOC) ارائه گردید. جهت رسیدن به یک درآمد تضمین شده از منابع ذخیره‌ساز استفاده شد و همچنین عدم قطعیت دیگر رقبا با استفاده از روش سناریو اصلاح شده مدل‌سازی گردید. نتایج حاصله نشان داد، با اضافه شدن منابع ذخیره‌ساز به ساختار شبکه و به حداکثر رساندن درآمد دریافتی از طریق انتقال توان در خطوط، تغییراتی در ساختار شبکه به وجود آمد که این تغییرات در سطوح مختلف تولید و انتقال قابل مشاهده می‌باشد. علاوه بر این استراتژی پیشنهادی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت، باعث بیشترین بهره‌وری از منابع ذخیره‌ساز در سیستم‌های مورد مطالعه شده است. به نحوی که این استفاده حداکثری منجر به افزایش چشم‌گیر درآمد حاصل از بهره‌برداری می‌شود. همچنین منابع ذخیره‌ساز می‌تواند اثر عدم قطعیت موجود در رفتار بازیگران بازار را نیز تا حدودی تعدیل نماید. به عبارتی حضور این منابع منجر به منعطف پذیرتر شدن سیستم می‌گردد.

#### فهرست علائم و اختصارات

##### مجموعه و شاخص‌ها

مجموعه شین‌هایی که واحدهای تولیدی رقیب در آن قرار دارند  $B^{sg}$

توان برنده شده تولیدی سیستم ذخیره‌ساز در شین $b$ در	$\theta_{b,t}$	زاویه خطوط
$P_{b,t}^{bg}$ مدت زمان $t$	$b$ توان پیشنهادی ذخیره‌ساز برای حالت فروش توان در شین	$P_{b,t}^{ofg}$ و در زمان $t$
توان برنده شده مصرفی سیستم ذخیره‌ساز در شین $b$ در	$P_{b,t}^{ofd}$	توان پیشنهادی ذخیره‌ساز برای حالت خرید توان در شین
$P_{b,t}^{bd}$ مدت زمان $t$	$P_{b,t}^{ofd}$ و در زمان $t$	قیمت پیشنهادی ذخیره‌ساز برای حالت فروش توان در شین
توان برنده شده منابع تولیدی رقیب در قیمت تسویه بازار در شین	$\lambda_{b,t}^{st,sell}$	و در زمان $t$
$P_{b,t}^{sg}$ $b$ در مدت زمان	$b$ قیمت پیشنهادی ذخیره‌ساز برای حالت خرید توان در شین	و در زمان $t$
توان برنده شده منابع مصرفی رقیب در قیمت تسویه بازار در شین	$\lambda_{b,t}^{st,buy}$	و در زمان $t$
$P_{b,t}^{sd}$ $b$ در مدت زمان $t$	$\lambda_{b,t}^{st}$	قیمت توان سیستم ذخیره‌ساز در بازار روز بعد
$\pi, \mu, \zeta, \varphi, \vartheta, \xi$ ضرایب لاگرانژ معادلات		

## ۵- مراجع

- [1] A. Robbins, "How to understand the results of the climate change summit", Conference of Parties21 (COP21) Paris 2015, Vol. 37, Paris, France, May 2016.
- [2] R. Peesapati, A. Yadav, V. K. Yadav, N. Kumar, "GSA-FAPSO-Based Generators Active Power Rescheduling for Transmission Congestion Management", IEEE Systems Journal, Vol. 33, No. 2, 2019, pp. 3266 - 3273.
- [3] C. Feng, M. Sun, J. Zhang, "Reinforced Deterministic and Probabilistic Load Forecasting via Q-Learning Dynamic Model Selection", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 2, 2020, pp. 1377 - 1386.
- [4] H. Guo, Q. Chen, Q. Xia, Ch. Kang, "Market Power Mitigation Clearing Mechanism Based on Constrained Bidding Capacities", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 34, No. 6, 2019, pp. 4817 - 4827.
- [5] J. Liu, M. Kazemi, A. Motamedi, H. Z., J. Rippon, "Security-Constrained Optimal Scheduling of Transmission Outages With Load Curtailment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 1, 2018, pp. 921-931.
- [6] A. E. S. Operator, "About the grid", Available: <https://www.aeso.ca/grid/about-the-grid>, 2016.
- [7] L. Wang, Ch. Hou, B. Ye, X. Wang, Ch. Yin, H. Cong, "Optimal Operation Analysis of Integrated Community Energy System Considering the Uncertainty of Demand Response", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 36, No. 4, 2021, pp. 3681 - 3691.
- [8] Y. Liu, Z. Tang, L. Wu, "On Secured Spinning Reserve Deployment of Energy-Limited Resources Against Contingencies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 37, No. 1, 2022, pp. 518 - 529.
- [9] B. Li, A. Bagherinezhad, R. Khatami, M. Parvania, "Continuous-Time Look-Ahead Optimization of Energy Storage in Real-Time Balancing and Regulation Markets", IEEE Systems Journal, Vol. 15, No. 3, 2021, pp. 3230 - 3237.
- [10] M. Kazemi, M. R. Ansari, "An integrated transmission expansion planning and battery storage systems placement - A security and reliability perspective", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 134, 2022.
- [11] M. R. Ansari, S. Pirouzi, M. Kazemi, A. Naderipour, M. Benbouzid, "Renewable Generation and Transmission Expansion Planning Coordination with Energy Storage System: A Flexibility Point of View", Applied Sciences, Vol. 11, No. 8, pp. 1-12, 2021.
- [12] G. He, Q. Chen, C. Kang, P. Pinson, Q. Xia, "Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 4, 2015, pp. 2359-2367.
- [13] M. Kazemi, H. Zareipour, N. Amjady, W. D. Rosehart, M. Ehsan, "Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 8, No. 2, 2017, pp. 1726-1735.
- [14] A. A. Thatte, L. Xie, D. E. Viassolo, and S. Singh, "Risk measure based robust bidding strategy for arbitrage using a wind farm and energy storage," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, 2013, pp. 2191-2199.
- [15] P. Kanakasabapathy, K.S. Swarup, "Bidding strategy for pumped-storage plant in pool-based electricity market". Energy conversion and Management, Vol. 51, No. 3, 2101, pp. 572-579.

[16] Sh. Bahramirad, H. Daneshi, "Optimal sizing of smart grid storage management system in a microgrid", 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, USA, 2012.

[17] M. R. Aghamohammadi, H. Abdolahinia, "A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 54, No.4, 2014, pp. 325-333.

[18] R. Hemmati, H. Saboori, M. A. Jirdehi, "Stochastic planning and scheduling of energy storage systems for congestion management in electric power systems including renewable energy resources," Energy, Vol. 133, No.1, 2017, pp. 380-387.

[19] Y. Sun, Z. Li, M. Shahidehpour, B. Ai, "Battery-based energy storage transportation for enhancing power system economics and security," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 4, 2015, pp. 2395-2402.

[20] C. Brivio, S. Mandelli, and M. Merlo, "Battery energy storage system for primary control reserve and energy arbitrage," Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 6, No. 4, 2016, pp. 152-165.

[21] M. Shahidehpour, H. Yamin, Zuyi Li, "Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management", Wiley-IEEE Press, 2002.

[22] C. Ruiz, A. J. Conejo, "Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, 2019, pp. 1855-1866.

[23] L. Baringo, A. J. Conejo, "Strategic offering for a wind power producer," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, 2013, pp. 4645-4654.

[24] Manual, A.K.U.s. Complementarity constraints. Available from: [https://www.artelys.com/docs/knitro/2\\_userGuide/complementarity.html](https://www.artelys.com/docs/knitro/2_userGuide/complementarity.html)

[25] A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, A. Nemirovski, "Robust optimization", Vol. 28, Princeton University Press, 2009.

[۲۶] جمشید آقایی، امین رحیمی رضایی، محمدرضا کریمی، "هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، ۱۳۹۷، صفحه ۲۲۰-۲۰۷

[۲۷] نیما امجدی، بهداد وطنی، حسین شریف زاده، "آرایش بهینه تصادفی تولید برای شرکت‌های مولد با در نظر گرفتن بازار انرژی و قراردادهای دوجانبه"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۴، ۱۳۹۰، صفحه ۲۱-۲۸

[28] M. Kazemi, H. Zareipour, M. Ehsan, and W. D. Rosehart, "A robust linear approach for offering strategy of a hybrid electric energy company," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 3, 2017, pp. 1949-1959.

[29] M.R. Ansari, N Amjady, B Vatani, "Stochastic security-constrained hydrothermal unit commitment considering uncertainty of load forecast, inflows to reservoirs and unavailability of units by a new hybrid decomposition strategy", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 8, No. 12, 2014, pp.1900-1915.

[30] Power systems test case archive [resources]. URL <http://www2.ee.washington.edu/research/pstca>

[۳۱] نیما امجدی و محمدرضا انصاری "برنامه‌ریزی کوتاه مدت نیروگاه‌های آبی و حرارتی در سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی سیستم و مسئله پایداری ولتاژ"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲۸، ۱۳۹۱، صفحه ۵۳-۶۷