*پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری*
*دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صص ۹۰-۱۱۸*
*نوع مقاله: پژوهشی*

# تعیین استراتژی استوار پیشنهاددهی در بازار رقابتی برق برای یک نیروگاه حرارتی

**مهرنوش خاجی[۱]، مقصود امیری[۲*]، محمد تقی تقی فرد[۳]**

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۲- استاد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۳- استاد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

## چکیده

در پژوهش حاضر، با هدف مدیریت عدم قطعیت، به توسعه مدلی جهت تعیین استراتژی بهینه پیشنهاددهی از سوی تولیدکننده انرژی الکتریکی جهت شرکت در بازار رقابتی برق به‌منظور بیشینه‌سازی سود پرداخته شده است. این استراتژی شامل قیمت پیشنهادی فروش و مقدار انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار برق می‌باشد. از این رو ابتدا روشی برای تعیین قیمت‌های پیشنهادی ارائه شده و سپس با استفاده از مسئله خودبرنامه‌ریزی، مقدار بهینه تولید انرژی الکتریکی جهت عرضه به بازار، محاسبه خواهد شد. رویکرد پژوهش، مدل‌سازی ریاضی بوده که به‌صورت یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح ارائه شده است و در نرم‌افزار لینگو پیاده‌سازی و مراحل آن جهت بررسی کارایی مدل پیشنهادی بر روی یک مورد مطالعاتی که یک نیروگاه برق حراراتی است انجام گرفته است. این مدل به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد در سطح اطمینان مطلوب و با توجه به میزان ریسک‌پذیری خود، استراتژی پیشنهاددهی بهینه را انتخاب نماید. در این مقاله با استفاده از منطق فازی، رویکردی استوار در برابر عدم قطعیت قیمت تسویه بازار با قابلیت تنظیم سطح استواری، ارائه شده است. اعتبارسنجی مدل ارائه شده به شیوه تحلیل حساسیت بررسی و عملکرد مدل تحت شرایط مختلف عدم قطعیت مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که پاسخ بهینه حاصل از این مدل حتی در مواجهه با نوسانات شدید پارامتر عدم قطعیت قیمت نیز می‌تواند بهینگی خود را حفظ نماید.

**کلیدواژه‌ها:** استراتژی پیشنهاددهی، مسئله خودبرنامه‌ریزی، بازار انرژی الکتریکی، عدم قطعیت، امکان و الزام فازی

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: amiri@atu.ac.ir

## ۱- مقدمه

در بین انواع مختلف انرژی، انرژی الکتریکی به طور ویژه‌ای با زندگی بشر عجین شده است و بدون آن حتی انجام فعالیت‌های ساده روزمره نیز با مشکل مواجه می‌گردد. در این میان مدیریت تولید، توزیع و مصرف انرژی الکتریکی اهمیت بسیار بالایی دارد. مدیریت بهینه تولید و توزیع انرژی الکتریکی در زمره مهم‌ترین مسائل کشورهای در حال توسعه و زمینه ساز ایجاد بستری جهت توسعه پایدار کشورها می‌باشد[۱]. در دهه ۸۰ میلادی در اغلب کشورهای دنیا با هدف معرفی رقابت منصفانه و بهبود کارایی اقتصادی ساختار جدیدی در صنعت برق آغاز شد. با تجدید ساختار در صنعت برق، بازار برق به بازار رقابت کامل تبدیل شد به این نحو که در بازار رقابت کامل، قیمت از طریق تعامل بین عرضه کنندگان و تقاضا کنندگان متعدد تعیین می‌شود و ایجاد بازارهایی به صورت عمده فروشی و خرده فروشی برای داد و ستد آزاد برق بین عرضه کنندگان و مصرف کنندگان، مهم‌ترین مؤلفه این تجدید ساختار به حساب می‌آید. ساز و کار این داد و ستد حراج مبتنی بر مناقصه است که از نظر اقتصادی روش کارایی برای تخصیص تقاضای کالایی به نام برق بین عرضه کنندگان آن محسوب می‌شود. در بازارهای برق شکل‌های مختلفی از حراج قابل اجرا هستند که می‌تواند به صورت حراج پرداخت یکسان و پرداخت بر مبنای پیشنهاد باشد [۲]. در نظام پرداخت بر مبنای پیشنهاد، تسویه حساب با هر شرکت‌کننده در بازار، در صورت پذیرش پیشنهادش، برابر با قیمت پیشنهادی از طرف خود او خواهد بود. در نظام پرداخت یکنواخت، تسویه‌حساب با تمام شرکت‌کنندگان بدون توجه به قیمت پیشنهادی ایشان، تنها بر اساس قیمت تسویه بازار و به‌صورت یکسان انجام می‌شود [۳].

صنعت برق ایران نیز مطابق با روند جهانی تجدید ساختار صنعت برق برای ایجاد فضای سالم رقابتی، اقدام به ایجاد تغییرات ساختاری، کاهش مقررات، تمرکززدایی و نیز خصوصی‌سازی کرده است. اگرچه به دلیل برخی محدودیت‌های سیاسی، اجتماعی، حقوقی و فرهنگی موجود در کشور، هنوز ناکارآمدی‌های گوناگونی در مسیر عملکرد بهینه این صنعت از دیدگاه مدیریتی وجود دارد [۴]. از این رو ضروری است تا به کمک علم مدیریت راهکارهایی جهت بهبود عملکرد این صنعت ارائه شود تا ناکارآمدی‌ها و نواقص آن به بهترین شکل ممکن مرتفع گردد و بستر مناسب‌تری برای فعالیت تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در بازار برق فراهم شود. در این راستا پژوهش حاضر با تمرکز بر نحوه حضور تولیدکننده در بازار برق جهت فروش انرژی الکتریکی خود تهیه و تدوین شده است.

تولیدکنندگان برق باید با بررسی محیط، رقبا و همچنین ارزیابی دقیق از توانمندی‌های رقابتی خود اقدام به برنامه‌ریزی برای شرکت در بازار برق نمایند و با شناختی که از بازار و ویژگی‌های آن دارند برای کلیه ساعات روز بعد، قیمت پیشنهادی فروش انرژی تولیدی خود را ارائه دهند. از این‌رو مهم‌ترین مسئله پیش روی تولیدکنندگان برق تعیین استراتژی قیمت‌دهی بهینه است زیرا در بازار رقابتی برق، پیشنهادهای بیش از اندازه گران‌قیمت منتهی به عدم موفقیت در بازار و پیشنهادهای بیش از اندازه ارزان‌قیمت منجر به سود از دست رفته می‌گردد [۵]. در محیط بازار رقابتی برق تولیدکنندگان برای تعیین یک استراتژی پیشنهاددهی باید علاوه بر سودهی بالا به استواری آن نیز توجه کنند. یک استراتژی استوار می‌تواند از آنها در برابر عدم قطعیت قیمت محافظت کند به نحوی که هرگاه بین مقدار واقعی قیمت و مقدار پیش‌بینی شده آن تفاوت وجود داشت، از مطلوبیت استراتژی انتخابی کاسته نشود. بنابراین مسئله خودبرنامه‌ریزی از این جهت یک مسئله سخت و پیچیده است که هم باید محدودیت‌های فنی واحد تولیدی و هم عواملی که بر قیمت بازار اثرگذار است و منجر به افزایش نوسان آن می‌شود را مد نظر قرار دهد. از این رو تولیدکننده باید روش‌های بهینه‌سازی را اتخاذ کند که این عدم قطعیت را مدنظر قرار دهد [۶].

رویکردهای مورد استفاده در مواجهه با پارامترهای عدم قطعیت در پژوهش‌های صورت گرفته عموما شامل مدل‌سازی تصادفی است. به منظور استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی باید رفتار عامل عدم قطعیت به کمک یک تابع توزیع احتمال تقریب زده شود، اما اطمینان از اینکه داده‌ها دقیقا از رفتار آن تابع احتمال تبعیت کند کار دشواری خواهد بود. همچنین با فرض یافتن تابع توزیع مناسب و برازنده برای مجموعه‌ای از داده‌ها، استفاده از فرمول‌های تابع توزیع در مدل برنامه‌ریزی مسئله می‌تواند فضای جواب یا تابع هدف مسئله را از حالت تحدب خارج کرده و مسئله را به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل کند که این امر امکان دست یافتن به جواب بهینه سراسری را کاهش و زمان حل مسئله را افزایش می‌دهد [۷]. با توجه به مشکلات و کاستی‌های روش‌های بهینه‌سازی تصادفی، در سال‌های اخیر محققان این حوزه به استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی استوار متمایل شده‌اند. بهینه‌سازی استوار روشی برای برخورد با عدم قطعیت پارامترهای غیر قطعی مسائل بهینه‌سازی است. هدف همه رویکردهای بهینه‌سازی استوار، تولید جواب‌هایی است که با تغییر پارامترهای غیرقطعی در مجموعه‌های عدم قطعیت، همچنان بهینه باقی بمانند [۸]. روش‌های قطعی، مقادیر معینی را برای پارامترها در نظر می‌گیرند و پاسخ بهینه‌ای را حاصل می‌کنند و در مقابل روش‌های استوار پاسخی

نزدیک بـه بهینـه را ارائـه مـی‌کننـد، اما پاسـخ به دست آمـده بـا اطمینـان بـالایی قابـل اتکـا و معتبـر اسـت؛ بـه عبـارتی بـا در نظـر گـرفتن تغییرپذیری مقادیر پارامترها روی بازه‌ای از مقـادیر، پاسـخ همچنـان بـا اطمینـان بالایی قابل اتکاست [۹]. علی‌رغم مزایای استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار در مسئله خودبرنامه‌ریزی، پژوهشگران این حوزه عمدتا از روش برتسیماس و سیم بهره برده‌اند و سایر روش‌های استوار مواجهه با عدم قطعیت در این بین مغفول مانده است. از این رو یکی از خلاءهای تحقیقاتی در این حوزه که باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد به کارگیری سایر مفاهیم و روش‌های استوار است. در این راستا، مقاله حاضر با هدف غنی‌سازی پژوهش‌های مرتبط با این مسئله و پرنمودن بخشی از خلاءهای تحقیق ارائه شده است. در این مقاله مسئله خودبرنامه‌ریزی[۱] جهت ارائه استراتژی‌های بهینه تولیدکنندگان برق با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار و با قابلیت تنظیم سطح استواری با تکیه بر تئوری فازی و مفاهیم الزام و امکان، جهت مواجهه با عدم قطعیت پارامتر قیمت مدل‌سازی شده است. منظور از سطح استواری این است که پارامترهای مدل بهینه سازی استوار به گونه‌ای تنظیم شوند که برای تمامی حالات غیر قطعی، در صورت نوسان در محدوده سطح استواری، پاسخ بهینه، همچنان موجه و بهینه باقی بماند [۱۰].

هدف از ارائه این مدل تعیین استراتژی پیشنهاددهی تولیدکننده در نظام پرداخت یکنواخت، شامل قیمت و مقادیر تولید پیشنهادی بوده به گونه‌ای که این تصمیمات از تولیدکننده در برابر عوامل عدم قطعیت محافظت نموده و محیط ایمن‌تری را برای شرکت در بازارهای رقابتی برق فراهم آورد. در ادامه این مقاله شامل بخش‌های مرور ادبیات، تبیین مدل پیشنهادی، حل مثال عددی، بررسی استواری مدل پیشنهادی و بحث و نتیجه‌گیری می‌باشد. در بخش مرور ادبیات ابتدا به بررسی اجزاء مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی پرداخته شده و در ادامه مهمترین فعالیت‌های پژوهشی صورت گرفته مرتبط با مسئله مورد بررسی مرور شده است. بخش تبیین مدل پیشنهادی شامل دو گام بوده که در گام نخست روشی جهت تعیین قیمت پیشنهادی ارائه شده و بر اساس آن در گام دوم مدل خودبرنامه‌ریزی طراحی و تشریح شده است. در بخش مثال عددی، نمونه‌ای از مسئله با استفاده از داده‌های واقعی بازار برق ایران مدل‌سازی شده و با استفاده از نرم‌افزار لینگو[۲] ورژن ۱۸ پیاده‌سازی شده است. در نهایت، تشریح یافته‌های تحقیق و بحث پیرامون آن در بخش بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲- چارچوب نظری و پیشینه تحقیق

مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی شامل مراحل: الف) تخمین قیمت تسویه بازار، ب) مدل‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی، ج) تعیین استراتژی پیشنهاددهی قیمت-مقدار می‌باشد.

### الف) تخمین قیمت تسویه بازار

انرژی الکتریکی به دلیل ویژگی‌هایی مثل غیر قابل ذخیره بودن، ضرورت تعادل لحظه‌ای بین عرضه و تقاضای آن و همچنین وابستگی تقاضای آن به عوامل بسیار زیاد و پویا، کالای بسیار منحصربفردی است و پویایی ویژه‌ای در قیمت بازار آن وجود دارد که با هیچ بازار دیگری مشابهت ندارد [۱۱]. پیش‌بینی قیمت برق از ابزارهای اساسی و حیاتی برای بازیگران بازار برق است که عدم دقت در آن می‌تواند منجر به کاهش سود و افزایش ریسک شود [۱۲]. از این رو سود بازیگران بازار برق در گرو دقت در تخمین قیمت تسویه بازار است [۱۳]. یکی از ویژگی‌های بازار برق، نوسانات شدید قیمت برق است زیرا این قیمت تحت تأثیر عوامل متعدد و گوناگونی است که پیش‌بینی دقیق و نقطه‌ای آن را بسیار پیچیده و دشوار کرده است. در جدول ۱ عوامل اثرگذار بر پیش‌بینی قیمت برق در پنج دسته معرفی‌شده است [۱۴].

**جدول** ۱. عوامل مؤثر بر پیش‌بینی قیمت برق

| |
|---|
| **دسته اول: مشخصات بازار** |
| ۱-پیشینه قیمت در بازار ۲- پیشینه بار سیستم ۳- میزان بار سیستم ۴- ظرفیت انواع فناوری‌های نیروگاهی تولید ۵- میزان صادرات و واردات ۶- ظرفیت مازاد/کسری ۷- پیشینه ذخیره سیستم ۸- فلوی شبکه‌های مرتبط ۹- نرخ راه‌اندازی اجباری ۱۰- محدودیت‌های اجباری سیستم ۱۱- محدودیت‌های خطوط |
| **دسته دوم: عدم قطعیت‌های غیر راهبردی** |
| ۱۲- پیش‌بینی بار ۱۳- پیش‌بینی ذخایر۱۴- پیش‌بینی دما ۱۵- پیش‌بینی آب‌وهوا ۱۶- قیمت نفت ۱۷- قیمت گاز ۱۸- قیمت سوخت |
| **دسته سوم: عدم قطعیت‌های تصادفی** |
| ۱۹- وقفه‌های تولید ۲۰- وضعیت خطوط ۲۱- شاخص تراکم |
| **دسته چهارم: شاخص‌های رفتاری** |
| ۲۲- حساسیت تقاضا ۲۳- راهبردهای پیشنهاددهی ۲۴- شاخص وجود جهش |
| **دسته پنجم: اثرات زمانی** |
| ۲۵- طول دوره ۲۶- نوع روز ۲۷- ماه ۲۸- تعطیلات ۲۹- تغییرات ساعتی ۳۰ - تغییرات فصلی |

تعدد این عوامل و پیچیدگی محاسباتی برخی از این عوامل سبب شده که هرکدام از محققان فقط تعدادی از این عوامل را در مدل پیش‌بینی قیمت خود مورد توجه قرار دهند. از این‌رو پیش‌بینی نقطه‌ای قیمت برق به دلیل محدودیت‌های ذاتی بسیار بی‌ثبات و پر خطا بوده و به همین دلیل در سال‌های اخیر برای کاربردهایی مانند مدیریت ریسک و یا مسئله پیشنهاددهی روش پیش‌بینی بازه‌ای مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است [۱۴]. بسیاری از خطاهای برنامه‌ریزی بر مبنای تخمین نقطه‌ای با روش‌های احتمالی، از نوسانات شدید قیمت واقعی از مقدار تخمین نقطه‌ای ناشی می‌شود. امروزه بسیاری از پژوهشگران به اهمیت پیش بینی بازه‌ای قیمت برق واقفند و اهمیت آن را در قابلیت طرح ریزی استراتژی‌های مختلف برای هر کدام از پیشامدهای ممکن از بازه پیش بینی، امکان ارزیابی عدم قطعیت‌های آینده و همچنین امکان پیشنهاددهی مطلوب تر و با ریسک کمتر می‌دانند [۱۵]. زیرا پیش بینی بازه‌ای می‌تواند در ارزیابی ریسک ناشی از تصمیمات اتخاذ شده توسط بازیگران بازار مورد استفاده قرار گیرد و اطلاعات بیشتری از واقعیاتی که ممکن است در آینده اتفاق بیفتد به آنها ارائه نماید تا خود را برای بهترین و بدترین شرایط ممکن آماده کنند [۱۶].

**ب) مسئله خودبرنامه‌ریزی**

برای شرکت در بازار روز بعد، هر تولیدکننده ابتدا قیمت هر ساعت از روز بعد را پیش‌بینی می‌کند و سپس با در نظرگرفتن سطح معینی از عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها اقدام به خودبرنامه‌ریزی واحدهای تولیدی خود با هدف بیشینه نمودن سود می‌کند. از جمله عواملی که سبب پیچیده شدن مسئله خودبرنامه ریزی می‌شود، محدودیت‌های فنی واحدهای تولیدی اعم از حداکثر و حداقل ظرفیت تولید هر واحد و زمان‌های خاموشی و فعالیت آنها و نرخ افزایش و کاهش تولید در هر ساعت می‌باشد. قیمت بازار و نوسانات آن، عامل بسیار مهم دیگری است که به طور معناداری بر این مسئله اثر گذار است به طوریکه سیگنال‌های قیمت وضعیت روشن و خاموش بودن واحد تولیدی را تعیین می‌کند [۶]. نتایج حاصل از خودبرنامه‌ریزی بهینه سپس توسط تولیدکننده برای تولید استراتژی پیشنهاددهی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین عاملی که باعث پیچیده شدن مسئله خود برنامه‌ریزی می‌شود، وجود عدم قطعیت در داده‌ها به‌ویژه قیمت‌های روز بعد است [۷].

**ج) استراتژی پیشنهاددهی قیمت-مقدار**

در بین مسائل استراتژی پیشنهاددهی روش‌های مختلفی برای تولید قیمت پیشنهادی برای ارائه به بازار برق معرفی شده‌اند. عموماً این روش‌ها متناسب با رویکردی که محقق برای مواجهه

با عدم قطعیت در پیش می‌گیرد انتخاب یا توسعه داده می‌شوند. محققان عموماً از برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت بهره برده‌اند و بسته به اینکه این عدم قطعیت را به‌صورت پیوسته یا گسسته مورد بررسی قرار دهند، از تابع توزیع احتمال برای حالت پیوسته و رویکرد سناریو محور برای حالت گسسته استفاده کرده‌اند. برخی دیگر از پژوهشگران خارج از فضای احتمالات با تخصیص بازه عدم قطعیت به قیمت تسویه، رویکرد استوار را برگزیده‌اند. در فضای هرکدام از این رویکردها بنابر ریسک‌پذیر یا ریسک‌گریز بودن تولیدکننده برق، قیمت‌های پیشنهادی، مقادیر و شکل متفاوتی خواهد داشت. لذا محققین برای تنظیم سطح ریسک مطلوب، روش‌های متفاوتی را مورد استفاده قرار داده‌اند. در ادامه به بررسی مهمترین پژوهش‌های صورت گرفته از سوی محققین که عدم قطعیت قیمت را مورد بررسی قرار داده اند پرداخته شده است.

پرورش و همکاران مسئله استراتژی قیمت‌دهی را با بهینه‌سازی تصادفی و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر سیاه‌چاله مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۷]. اسماعیلی و همکاران با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی و سناریو پردازی به مدل‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده برق جهت شرکت هم‌زمان در بازار روز بعد انرژی الکتریکی و رزرو پرداختند [۱۸]. یزدانی‌نژاد و امجدی در تحقیقی مسئله خودبرنامه‌ریزی را با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی سناریومحور برای تولیدکننده برق جهت شرکت در بازار روز بعد مورد بررسی قرار داده و از معیار ارزش در معرض خطر شرطی[۲] برای اندازه‌گیری ریسک مدل استفاده کرده‌اند [۱۹]. خالویی و همکاران در تحقیقی با رویکرد ترکیبی احتمالی-امکانی و با معیار ارزش در معرض خطر شرطی به حل مسئله خودبرنامه‌ریزی با روش فازی و سناریوپردازی پرداخته‌اند [۲۰]. جیائو[۳] و همکاران به ارائه یک مدل بهینه‌سازی تصادفی با قابلیت تنظیم سطح ریسک با رویکردی ریسک‌گریز پرداختند [۲۱]. گروهی و انصاری برای مسئله خودبرنامه‌ریزی میان‌مدت با بهره‌گیری از روش‌های الگوریتم ژنتیک و تصمیم‌گیری فازی به توسعه مدلی دوهدفه با رویکرد تصادفی پرداخته‌اند که به‌طور هم‌زمان بازار روز بعد و قراردادهای دوجانبه را مدنظر قرار می‌دهد [۲۲].
بهینه‌سازی استوار از رویکردهای جدید مواجهه با عدم قطعیت است که اخیراً در پژوهش‌های حوزه عدم قطعیت مورد توجه و اقبال قرار گرفته است. قابلیت استفاده از بهینه‌سازی استوار در شرایطی که اطلاعات توزیع آماری از عامل عدم قطعیت وجود ندارد از مزیت‌های این روش محسوب می‌شود. بهینه‌سازی استوار همچنین به مدل‌هایی با پیچیدگی محاسباتی کمتر منجر می‌شود که سبب تسهیل دستیابی به جواب بهینه قطعی (در مقابل جواب‌های بهینه محلی)

می‌شود [۷]. وطنی و همکاران با بررسی رویکردهای استوار مسئله خودبرنامه‌ریزی، روش‌های بهینه‌سازی استوار موجود در ادبیات تحقیق شامل روش‌های استوار جعبه‌ای، بیضوی، چندوجهی، جعبه‌ای-بیضوی و جعبه‌ای-چندوجهی را به‌علاوه روش شکاف اطلاعات و برنامه‌ریزی تصادفی بازطراحی کرده و به مقایسه عملکرد آنها پرداختند [۶]. جلیل‌وندنژاد و همکاران یک مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله خود برنامه‌ریزی جهت شرکت در بازار روز بعد انرژی و ارائه پیشنهاد معرفی کردند. آن‌ها با لحاظ همبستگی بین پارامترهای عدم قطعیت به حذف نقاط ناهمبسته از مجموعه عدم قطعیت پرداختند تا بدون کاهش استواری، بهینگی افزایش یابد [۷]. صیاد نوجوان و همکاران مسئله استراتژی پیشنهاددهی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت با رویکرد استوار مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. صیاد نوجوان و کاظم زارع مسئله پیشنهاددهی قیمت در بازار روز بعد را برای خرده‌فروش برق با بهینه‌سازی بازه‌ای دوهدفه و رویکردی استوار مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. تحقیق مازی و همکاران به پیشنهاددهی قیمت-مقدار در بازارهای روز بعد و تعادل بخشی می‌پردازد [۲۵]. جباری و همکاران با روش بهینه‌سازی استوار و رویکردی ریسک‌گریز که دارای قابلیت تنظیم سطح استواری برای مواجهه با عدم قطعیت قیمت است، مسئله خودبرنامه‌ریزی را به‌گونه‌ای طراحی نمودند که عدم قطعیت را به‌صورت بازه‌ای مدنظر قرار می‌دهد [۲۶]. صیاد نوجوان و همکاران مسئله تأمین انرژی الکتریکی خرده‌فروش برق را به‌صورت بازه‌ای با رویکرد بهینه‌سازی استوار برای حالت‌های ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز بررسی کردند [۲۷]. یزدانی نژاد و همکاران مسئله خودبرنامه‌ریزی واحدهای تولیدی مجازی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و با روشی استوار با استفاده از روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعات با دو رویکرد ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز مورد بررسی قرار دادند [۲۸]. نجفی و همکاران با استفاده هم‌زمان از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی و بهینه‌سازی استوار به حل مسئله خودبرنامه‌ریزی پرداختند [۲۹].

## ۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش کمی پیش رو، پژوهشی کاربردی و توسعه‌ای است که به دنبال توسعه مدل‌های بهینه‌سازی استوار پیشنهاددهی در بازار برق است. با توجه به اینکه این پژوهش به دنبال بررسی عدم قطعیت و تشریح و تبیین آن در تصمیم گیری می‌باشد، جزء پژوهش‌های توصیفی – تحلیلی به شمار می‌رود و فاقد جامعه و نمونه آماری می‌باشد. روش‌ها و ابزار گردآوری

اطلاعات در این تحقیق شامل مطالعات کتابخانه‌ای، مراجعه به مقاله‌ها و منابع علمی در حوزه موضوع تحقیق و استفاده از گزارش‌ها و پایگاه‌های داده سازمان‌های ذی‌ربط می‌باشد. رویکرد پژوهش مدل‌سازی ریاضی مسئله تعیین استراتژی پیشنهاددهی تولید کننده برق است که به صورت یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح ارائه می‌شود. ابتدا متغیرها و پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی معرفی و سپس فرموله‌بندی مسئله ارائه می‌شود و در نهایت در نرم‌افزار لینگو پیاده‌سازی و مراحل آن جهت بررسی کارایی مدل پیشنهادی بر روی یک مورد مطالعاتی در یک نیروگاه برق حرارتی، انجام می‌گیرد. مهمترین محدودیت پیش‌روی این پژوهش، دسترسی به داده‌ها و اطلاعات واحدهای تولیدکننده به دلیل رقابتی بودن بازار بوده است.

## ۴- تبیین مدل پیشنهادی

در این بخش به تشریح مدل پیشنهادی برای مسئله پیشنهاددهی تولیدکننده برق پرداخته شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد استراتژی پیشنهاددهی قیمت_مقدار برای تولیدکننده برق برای شرکت در بازار برق شامل دو گام تعیین قیمت فروش انرژی الکتریکی و تعیین مقادیر پیشنهادی انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار می‌باشد. از این‌رو ابتدا باید روشی برای تعیین قیمت پیشنهادی ارائه و سپس مدلی برای مسئله خودبرنامه‌ریزی طراحی شود که مقدار پیشنهادی انرژی الکتریکی قابل عرضه در بازار برق را به‌صورت بهینه تعیین کند.

### ۴-۱- گام اول: تعیین قیمت

مقدار غیرقطعی قیمت تسویه $(\widetilde{\rho_{m_t}})$ به‌صورت یک عدد فازی مثلثی $(\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3)$ تعریف شده به طوریکه مقدار اسمی آن معادل $\sigma_2$ ، حداکثر مقدار ممکن آن معادل $\sigma_3$ و حداقل مقدار آن معادل $\sigma_1$ خواهد بود. برای تخمین قیمت تسویه به صورت عدد فازی از داده های سایت ایرما[۳] استفاده می کنیم به این صورت که از مقدار متوسط قیمت در هر ساعت برای مقدار اسمی و از بالاترین و پایین‌ترین قیمت پذیرفته شده به عنوان مقادیر بالا و پایین عدد فازی استفاده می کنیم.

قیمت پیشنهادی $(\rho_t)$ برای ساعت t، باید به گونه‌ای ارائه شود که از مقدار فازی قیمت تسویه بازار تخمین زده شده در این ساعت $(\widetilde{\rho_{m_t}})$ کوچک‌تر باشد تا پیشنهاد قیمت $\rho_t$ در بازار برق پذیرفته شود. کوچک‌تر بودن قیمت پیشنهادی $(\rho_t)$ از قیمت تسویه فازی تخمینی $(\widetilde{\rho_{m_t}})$ یک رابطه غیر قطعی محسوب می‌شود که با درجات مختلفی از اطمینان می‌تواند محقق شود و برای بیان آن می‌توان از قواعد منطق فازی بهره برد. با فرض اینکه درجه اطمینان تحقق رابطه فازی، برابر مقدار $\pi$ در نظر گرفته شود، رابطه مذکور به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\widetilde{\rho_{m_t}} = (\sigma_۱ \,,\, \sigma_۲ \,,\, \sigma_۳) \qquad (۱)$$

$$\rho_t \;\leq_\pi \widetilde{\rho_{m_t}} \qquad (۲)$$

معیارهای امکان[۴]، الزام[۵] و مؤثر[۶] فازی از جمله قواعدی هستند که برای فازی‌زدایی و قطعی‌سازی روابط فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابر قواعد منطق فازی داریم [۳۰] :

: [۳۰]

$$\text{Measure}\,\{A\} = \Delta\, \text{Possibility}\{A\} + (۱\text{-}\Delta)\, \text{Necessity}\,\{A\} \\ ۰ \leq \Delta \leq ۱ \qquad (۳)$$

با تعریف فوق، درجه اطمینان تحقق نامساوی فازی با معیار مؤثر و در سطح اطمینان π به این شکل تعریف می‌شود:

$$\text{Me}\,\{\, \rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \,\} \geq \pi \\ ۰ \leq \pi \leq ۱ \qquad (۴)$$

$$\text{Me}\,\{\, \rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \,\} = \Delta\, \text{Pos}\,\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} + (۱\text{-}\Delta)\, \text{Nec}\,\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} \qquad (۵)$$

معیارهای امکان و الزام به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Nec\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \begin{cases} ۱ & , if\ \rho_t \leq \sigma_۱ \\ \frac{\sigma_۲ - \rho_t}{\sigma_۲ - \sigma_۱} & , if\ \sigma_۱ \leq \rho_t \leq \sigma_۲ \\ ۰ & , if\ \rho_t \geq \sigma_۲ \end{cases} \qquad (۶)$$

$$Pos\,\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \begin{cases} ۱ & , if\ \rho_t \leq \sigma_۲ \\ \frac{\sigma_۳ - \rho_t}{\sigma_۳ - \sigma_۲} & , if\ \sigma_۲ \leq \rho_t \leq \sigma_۳ \\ ۰ & , if\ \rho_t \geq \sigma_۳ \end{cases} \qquad (۷)$$

بدین ترتیب نامساوی فازی بر اساس معیار مؤثر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Me}\,\{\, \rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \,\} = \Delta \begin{cases} ۱, & if\ \rho_t \leq \sigma_۲ \\ \frac{\sigma_۳ - \rho_t}{\sigma_۳ - \sigma_۲}, & if\ \sigma_۲ \leq \rho_t \leq \sigma_۳ \\ ۰, & if\ \rho_t \geq \sigma_۳ \end{cases} + (۱\text{-}\,\Delta) \begin{cases} ۱, & if\ \rho_t \leq \sigma_۱ \\ \frac{\sigma_۲ - \rho_t}{\sigma_۲ - \sigma_۱}, & if\ \sigma_۱ \leq \rho_t \leq \sigma_۲ \\ ۰, & if\ \rho_t \geq \sigma_۲ \end{cases} \qquad (۸)$$

و در نهایت به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Me}\{\rho_t \le \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \begin{cases} ۱, & if\ \rho_t \le \sigma_۱ \\ \Delta + (۱-\Delta)\left(\frac{\sigma_۲-\rho_t}{\sigma_۲-\sigma_۱}\right), & if\ \sigma_۱ \le \rho_t \le \sigma_۲ \\ \Delta\,\frac{\sigma_۳-\rho_t}{\sigma_۳-\sigma_۲}, & if\ \sigma_۲ \le \rho_t \le \sigma_۳ \\ ۰, & if\ \rho_t \ge \sigma_۳ \end{cases} \quad (۹)$$

بنابر تعاریف فوق برای محاسبه $\rho_t$ مناسب در سطح اطمینان $\pi$ از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Me}\{\widetilde{\rho_{m_t}} \ge \rho_t\} \ge \pi \;\Rightarrow\; \Delta + (۱-\Delta)\left(\frac{\sigma_۲-\rho_t}{\sigma_۲-\sigma_۱}\right) \ge \pi \quad (۱۰)$$

$$\Rightarrow \rho_t \le \frac{(\pi-\Delta)(\sigma_۲-\sigma_۱)+(\Delta-۱)\sigma_۲}{\Delta-۱} \quad (۱۱)$$

به این ترتیب عبارت $\frac{(\pi-\Delta)(\sigma_۲-\sigma_۱)+(\Delta-۱)\sigma_۲}{\Delta-۱}$ را که یک حد بالا برای مقدار $\rho_t$ است، می‌توان به‌عنوان قیمت پیشنهادی به بازار برق در نظر گرفت.

از آن جایی که الزام نسبت به امکان معیار سخت‌گیرانه‌تری است، از این‌رو معیار الزام برای حالت بدبینانه و ریسک‌گریز و معیار امکان برای حالت خوش‌بینانه و ریسک‌پذیر مناسب است. به این ترتیب به منظور پیشنهاددهی قیمت در سطوح اطمینان مختلف و متناسب با میزان ریسک پذیری تولید کننده، می‌توان با تخصیص مقادیر متفاوت $\Delta$ قیمت هایی با ریسک‌های متفاوت پیشنهاد داد. بدین منظور مقادیر کوچک تر $\Delta$ را برای حالت ریسک گریز و مقادیر بالاتر $\Delta$ را برای حالت ریسک پذیر در نظر می‌گیریم. در این صورت قیمت پیشنهادی با ($\Delta=۰$) امکان پذیرش بالایی خواهد داشت ولی سود کمی را عاید تولیدکننده خواهد کرد و قیمت پیشنهادی با ($\Delta=۱$) امکان پذیرش کمی داشته ولی سود زیادی را عاید تولیدکننده خواهد کرد. در مقادیر بین صفر تا یک، با افزایش $\Delta$ به تدریج امکان پذیرش قیمت پیشنهادی کم می‌شود و در عوض سود عایدی افزایش می‌یابد.

$\pi$ سطح اطمینان است که به انتخاب تولیدکننده تعیین می‌شود به طوریکه انتخاب مقادیر بزرگ آن همراه با ریسک کم و انتخاب مقادیر کوچک آن همراه با ریسک زیاد خواهد بود. از این رو با مقادیر متفاوت $\Delta$ و $\pi$ پیشنهادهای قیمت متفاوتی با میزان ریسک پذیری متفاوت خواهیم داشت. پس از تعیین قیمت پیشنهادی، با استفاده از مدل بهینه سازی خودبرنامه‌ریزی، مقدار انرژی الکتریکی بهینه پیشنهادی تعیین می‌شود تا به بهره‌بردار بازار برای شرکت در بازار برق ارائه شود.

## ۴-۲- گام دوم: مدل‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی با روش پرداخت یکنواخت

در بازار با مکانیسم پرداخت یکنواخت، تولیدکننده برق برای شرکت در بازار روز بعد انرژی الکتریکی با تخمین قیمت تسویه بازار برای هر بازه زمانی t ($\widetilde{\rho_{m_t}}$) و تعیین قیمت پیشنهاد با شیوه‌ای که در مرحله قبل بیان شد، باید مقادیر انرژی الکتریکی تولیدی را در یک فرایند بهینه‌سازی مشخص کند. مدل خودبرنامه‌ریزی زیر جهت تعیین مقادیر بهینه انرژی الکتریکی قابل پیشنهاد به بازار ($Q_t$) به ازای قیمت پیشنهادی ($\rho_t$) طرح می‌شود. پارامترهای مدل به‌صورت جدول ۲ تعریف می‌شود:

**جدول۲.** پارامترهای مدل

| | | | |
|---|---|---|---|
| اندیس‌ها | | | |
| T | ساعات شبانه روز | J | زیر بازه‌های منحنی شکسته خطی هزینه تولید |
| پارامترها | | | |
| $u_{\cdot}$ | وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد در ابتدای افق برنامه‌ریزی | $c_t^{SU}$ | هزینه هر بار راه‌اندازی |
| $\rho_t$ | قیمت پیشنهادی به بازار در بازه زمانی t | $c_t^{SD}$ | هزینه هر بار توقف |
| $\rho_{m_t}$ | قیمت تسویه بازار واقعی در بازه زمانی t | $Q^{min}$ | حداقل توان تولیدی که در صورت فعال بودن واحد نیروگاهی باید حتماً تولید شود |
| $\widetilde{\rho_{m_t}}$ | قیمت تسویه بازار تخمینی در بازه زمانی t | $Q^{max}$ | حداکثر توان تولیدی |
| $\rho_{max}$ | سقف قیمت قابل ارائه به بازار | $Qb_j^m$ | حداکثر توان تولیدی در بازه jام از منحنی تولید (مگاوات ساعت) |
| $c_{min}$ | حداقل هزینه تولید | $R^{up}$ | حداکثر نرخ افزایش تولید (مگاوات / ساعت) |
| $c_{\cdot}$ | هزینه ثابت هر ساعت کارکرد واحد | $R^{down}$ | حداکثر نرخ کاهش تولید (مگاوات / ساعت) |
| $c_j$ | هزینه سوخت به ازای تولید در بازه jام از منحنی تولید (ریال/ مگاوات ساعت) | $R^{SU}$ | نرخ افزایش تولید از حالت توقف (مگاوات / ساعت) |
| $cost_t^{SU}$ | کل هزینه راه‌اندازی مجدد در ساعت tام | $R^{SD}$ | نرخ کاهش تولید برای رسیدن به حالت توقف (مگاوات /ساعت) |
| $cost_t^{SD}$ | کل هزینه توقف در ساعت tام | M | عدد خیلی بزرگ |
| متغیرها | | | |
| $C(Q_t)$ | هزینه تولید در بازه زمانی t به ازای تولید $Q_t$ | $b_{jt}$ | متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه در زیر بازه jام از بازه زمانی t تولید انجام شود |
| $Q_t$ | مقدار توان که در بازه زمانی t و به ازای قیمت $\rho_t$ تولید می‌شود | $u_t$ | متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه در بازه زمانی t تولید انجام شود |

| | | | |
|---|---|---|---|
| متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه در بازه زمانی t پیشنهاد فروش داشته باشد | $I_t$ | توان خروجی زیر بازه jام در بازه زمانی t (مگاوات ساعت) | $Qb_{j,t}$ |

در ادامه مدل ریاضی خودبرنامه‌ریزی طراحی شده، ارائه و تشریح شده است.

$$\text{Max} : \tilde{z} = \sum_{t=1}^{N_t}[\widetilde{\rho_{m_t}}.(\sum_{J=1}^{N_J} Qb_{jt} + Q^{min} \times I_t) - C(Q_t)] \quad (۱۲)$$

St:

$$C(Q_t) = c.u_t + \sum_j c_j . Qb_{j,t} + c_۱.Q^{min}.u(t) + cost_t^{SU} + cost_t^{SD} \quad \forall t \quad (۱۳)$$

$$Qb_{j,t} \leq Qb_j^m - Qb_{j-۱}^m \quad \forall t, j=۲, \ldots, N_j \quad (۱۴)$$

$$Qb_{j,t} \geq Qb_j^m - Qb_{j-۱}^m - M.(۱ - b_{j+۱,t}) \quad \forall t, j=۲, \ldots, N_j \quad (۱۵)$$

$$Qb_{۱,t} \leq Qb_۱^m - Q^{min} \quad \forall t \quad (۱۶)$$

$$Qb_{۱,t} \geq Qb_۱^m - Q^{min} - M.(۱ - b_{۲,t}) \quad \forall t \quad (۱۷)$$

$$\varepsilon.Qb_{j,t} \leq b_{j,t} \leq M.Qb_{j,t} \quad \forall t, j \quad (۱۸)$$

$$Q_t = \sum_j Qb_{j,t} + Q^{min}.u_t \quad \forall t, j \quad (۱۹)$$

$$cost_t^{SU} \geq c^{SU}(u_t - u_{t-۱}) \quad t=۲, \ldots, N_T \quad (۲۰)$$

$$cost_t^{SD} \geq c^{SD}(u_{t-۱} - u_t) \quad t=۲, \ldots, N_T \quad (۲۱)$$

$$cost_۱^{SU} \geq c^{SU}(u_۱ - u^۰) \quad (۲۲)$$

$$cost_۱^{SD} \geq c^{SD}(u^۰ - u_۱) \quad (۲۳)$$

$$q_{t+۱} - q_t \leq R^{UP} u_t + R^{SU}(۱ - u_t) \quad t=۱, \ldots, N_T - ۱ \quad (۲۴)$$

$$q_t - q_{t+۱} \leq R^{down} u_{t+۱} + R^{SD}(۱ - u_{t+۱}) \quad t=۱, \ldots, N_T - ۱ \quad (۲۵)$$

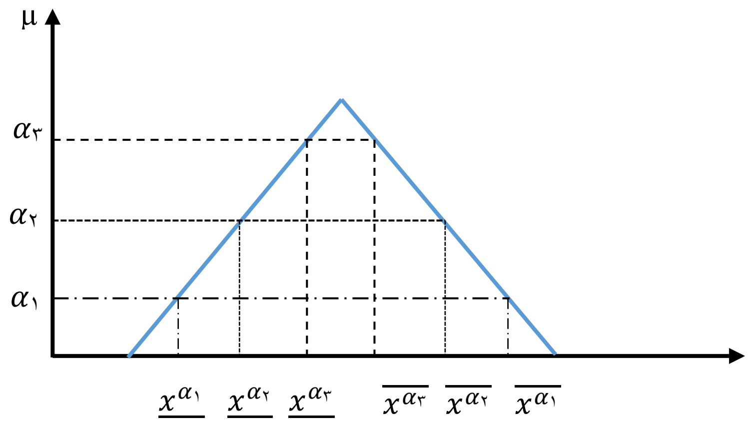
$$u(t) \geq I(t) \quad \forall t \quad (۲۶)$$

$$I(t), u(t), b_{jt} \in \{۰,۱\} \quad \forall t, j \quad (۲۷)$$

$$I_t(\widetilde{\rho_{m_t}}, \rho_t) = \begin{cases} ۱ & c_{min} \leq \rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \\ ۰ & \widetilde{\rho_{m_t}} \leq \rho_t \leq \rho_{max} \end{cases} \quad \forall t \quad (۲۸)$$

تابع هدف فوق بیانگر سود تولیدکننده در صورت ارائه پیشنهاد به بازار برق و پیشنهاددهی برای ۲۴ ساعت روز بعد است و از دو عبارت درآمد و هزینه تولید تشکیل می‌شود. درآمدها فقط در ساعاتی محقق می‌شوند که پیشنهاد قیمت در آن ساعت در بازار برق پذیرفته شده باشد ($I_t = ۱$). از آنجایی که تابع هزینه تولید تابعی غیرخطی از مقدار تولید است، برای

جلوگیری از غیرخطی شدن آن، از یک تابع شکسته خطی استفاده شده به این نحو که هر بازه t به $N_j$ زیر بازه تقسیم می‌شود و نرخ هزینه سوخت برای هر زیر بازه j به ازای هر مگاوات تولید برابر با $c_j$ می‌باشد که با ضرب آن در مقدار تولیدی در هر زیر بازه $(Qb_{j,t})$ هزینه تولید در آن زیر بازه محاسبه می‌شود. رابطه ۱۳ بیانگر تابع هزینه تولید به ازای تولید مقدار $Q_t$ واحد انرژی الکتریکی است. مقدار $Q^{min}$ حداقل مقداری است که در صورت روشن بودن نیروگاه در بازه زمانی t باید تولید شود. روابط ۱۴ تا ۱۸ میزان تولید در هر زیر بازه را تعیین می‌کنند و همچنین تضمین می‌کنند که به هر زیر بازه تنها زمانی مقداری تخصیص داده می‌شود که زیر بازه قبلی به‌طور کامل مورد استفاده قرار گرفته باشد. رابطه ۱۹ خروجی کل واحد را نشان می‌دهد. روابط ۲۰ تا ۲۳ برای محاسبه هزینه‌های توقف و راه‌اندازی مجدد واحد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روابط ۲۴ و ۲۵ نرخ کاهش و افزایش خروجی و نرخ توقف و راه‌اندازی واحد را نشان می‌دهد. رابطه ۲۶ بیانگر این است که فعال بودن واحد نیروگاهی در بازه زمانی t لزوماً به معنای داشتن فروش در آن بازه زمانی نیست و به تعبیر دیگر ممکن است در بازه زمانی t نیروگاه در مدار تولید باشد (u(t)=۱) ولی فروش نداشته باشد (I(t)=۰). رابطه ۲۸ بیان می‌کند در صورتی که قیمت پیشنهادی به بازار از قیمت تسویه بازار تخمینی کمتر باشد، مدل پیشنهاد فروش را پذیرفته شده فرض نموده و متغیر I مقدار یک می‌گیرد و در غیر این صورت مدل پیشنهاد فروش را رد شده فرض نموده و متغیر I مقدار صفر می‌گیرد. این رابطه را به گونه‌ای مدل‌سازی کرده‌ایم که معادل احتمال پذیرش پله پیشنهادی مطابق تابع چگالی احتمال در برنامه‌ریزی تصادفی باشد. یکی از روش‌های مواجهه با اعداد فازی در تبدیل مدل غیرقطعی به مدل قطعی استفاده از اعداد بازه‌ای است، زیرا کار با اعداد بازه‌ای به مراتب ساده‌تر از اعداد فازی است. بدین منظور با ایجاد برش‌هایی روی عدد فازی آن را به بازه‌هایی با درجه قطعیت متفاوت تبدیل می‌کنیم. در شکل ۱ نحوه تبدیل یک عدد فازی مثلثی با سه برش آلفا به بازه‌های متناظر نشان داده شده است.




**شکل ۱.** برش‌های آلفای یک عدد فازی

با برش‌های آلفا در سطوح اطمینان مختلف α می‌توان عدم قطعیت فازی $\widetilde{\rho_{m_t}}$ را به عدم قطعیت بازه‌ای $\left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right]$ تبدیل کرد. به این ترتیب روابط ۱۲ و ۲۸ به این شکل بازنویسی می‌شوند:

$$\text{Max} : \tilde{z} = \sum_{t=1}^{N_t}[\left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right].(\sum_{J=1}^{N_J} Qb_{jt} + Q^{min} \times I_t) - C(Q_t)] \quad (۲۹)$$

$$I_t\left(\left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right], \rho_t\right) = \begin{cases} ۱ & c_{min} \leq \rho_t \leq \left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right] \\ ۰ & \left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right] \leq \rho_t \leq \rho_{max} \end{cases} \quad \forall t \quad (۳۰)$$

رابطه ۳۰ معادل است با:

$$\text{If } (\rho_t \leq \left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right]) : I_t\left(\left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right], \rho_t\right) = ۱ \quad (۳۱)$$
$$\text{Else} : I_t\left(\left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right], \rho_t\right) = ۰$$

وجود روابط نامساوی بازه‌ای در مدل موجب غیرقطعی شدن آن می‌شود که باید به شیوه‌ای این عدم قطعیت را برطرف نمود. کوچک‌تر بودن یک عدد قطعی از یک بازه، مفهومی است که با سطوح مختلفی از ریسک می‌تواند محقق شود.

$$\rho_t \ \widetilde{\leq}_{\lambda} \left[\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}, \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right] \quad (۳۲)$$

رابطه ۳۲ بیان می‌کند که میخواهیم با میزان ریسک λ (۱ ≥ λ ≥ ۰) این نامساوی غیر قطعی محقق شود. با افزایش مقدار $\lambda$ ریسک عدم تحقق رابطه نامساوی فوق افزایش پیدا می‌کند و این رابطه غیر قطعی در سطح اطمینان پایین تری قابلیت تحقق پیدا می‌کند. با استفاده از مفاهیم بازه‌ای می‌توان رابطه ۳۲ را با درجه ریسک $\lambda$ از حالت غیرقطعی خارج و با رابطه ۳۳ به حالت قطعی تبدیل کرد:

$$\rho_t \leq \lambda.\overline{\rho_{m_t}^{\alpha}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho_{m_t}^{\alpha}} \qquad (۳۳)$$

طبق رابطه ۳۳ در صورتیکه قیمت پیشنهادی $\rho_t$ از عبارت $\lambda.\overline{\rho_{m_t}^{\alpha}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho_{m_t}^{\alpha}}$ کوچکتر باشد پیشنهاد $\rho_t$ را با درجه ریسک $\lambda$ پذیرفته شده فرض میکنیم. از این رو به ازای هر تحققی از قیمت واقعی در بازه $\left[\underline{\rho_{m_t}^{\alpha}}, \overline{\rho_{m_t}^{\alpha}}\right]$ که بیش از مقدار $\lambda.\overline{\rho_{m_t}^{\alpha}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho_{m_t}^{\alpha}}$ باشد مدل استوار خواهد بود.

با توجه به آنچه بیان شد رابطه ۳۱ را می‌توان به صورت زیر مدل کرد (M عددی بزرگ):

$$\text{M}.I_t + \rho_t \geq \lambda.\overline{\rho_{m_t}^{\alpha}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho_{m_t}^{\alpha}} \qquad (۳۴)$$

$$\rho_t - \text{M}.(۱\text{-}I_t) \leq \lambda.\overline{\rho_{m_t}^{\alpha}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho_{m_t}^{\alpha}} \qquad (۳۵)$$

در حالتی که قیمت پیشنهادی تولیدکننده از قیمت تسویه تخمینی کمتر باشد پیشنهاد احتمالاً پذیرفته خواهد شد، در این حالت متغیر $I_t$ باید مقدار یک بگیرد تا روابط ۳۴ و ۳۵ برقرار باشد. در حالتی که قیمت پیشنهادی تولیدکننده بیشتر از قیمت تسویه تخمینی باشد، پیشنهاد احتمالاً رد خواهد شد در این حالت متغیر $I_t$ باید مقدار صفر بگیرد تا روابط فوق برقرار باشد.

با قرار دادن $\lambda = ۱$ بالاترین مقدار سود در تابع هدف همراه با بالاترین میزان ریسک محقق می‌شود و با قرار دادن $\lambda = ۰$ پایین‌ترین مقدار سود در تابع هدف همراه با پایین‌ترین میزان ریسک محقق می‌شود. در فاصله بین ۰ و ۱ نیز سود متغیر و متناسب با میزان ریسک (درجه λ) در نظر گرفته شده محقق می‌شود. از این رو حد بالا، حد پایین و حالت بینابینی مدل فوق با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

برای حد بالا داریم:

$$\text{Max}: \overline{z^{\alpha_k}} = \sum_{t=1}^{N_t}\left[\overline{\rho_{m_t}^{\alpha_k}}.\left(\sum_{J=1}^{N_J} Qb_{jt} + Q^{min} \times I_t\right) - C(Q_t)\right] \qquad (۳۶)$$

St:

$$\rho_t - \text{M}(۱ - I_t) \leq \overline{\rho_{m_t}^{\alpha}} \qquad \forall t \qquad (۳۷)$$

$\rho_t + \mathrm{M}\,(I_t) \geq \overline{\rho^{\alpha}_{m_t}}$ $\quad \forall\, t \quad$ (۳۸)

Other constraints.

برای حد پایین داریم:

$$\text{Max} : \underline{z^{\alpha_k}} = \sum_{t=1}^{N_t}[\underline{\rho^{\alpha_k}_{m_t}} + .\,(\sum_{J=1}^{N_J} Qb_{jt} + Q^{min} \times I_t) - C(\,Q_t)] \quad (۳۹)$$

St:

$\rho_t - \mathrm{M}\,(۱ - I_t) \leq \underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}$ $\quad \forall\, t \quad$ (۴۰)

$\rho_t + \mathrm{M}\,(I_t) \geq \underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}$ $\quad \forall\, t \quad$ (۴۱)

Other constraints.

برای حالت بینابینی داریم:

$$\text{Max} : z^{\alpha_k} = \sum_{t=۱}^{N_t}[\left[\lambda.\overline{\rho^{\alpha}_{m_t}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}\right].(\sum_{J=۱}^{N_J} Qb_{jt} + Q^{min} \times I_t) - C(\,Q_t)] \quad (۴۲)$$

St:

$\rho_t - \mathrm{M}\,(۱ - I_t) \leq \lambda.\overline{\rho^{\alpha}_{m_t}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}$ $\quad \forall\, t \quad$ (۴۳)

$\rho_t + \mathrm{M}\,(I_t) \geq \lambda.\overline{\rho^{\alpha}_{m_t}} + (۱ - \lambda).\underline{\rho^{\alpha}_{m_t}}$ $\quad \forall\, t \quad$ (۴۴)

Other constraints.

خواهیم داشت:

$$\underline{z^{\alpha_k}}^{*} \leq z^{\alpha_k *} \leq \overline{z^{\alpha_k}}^{*} \quad (۴۵)$$

بنابرقاعده تجزیه :

$$\tilde{z}^{*} = \cup_{\alpha_k \epsilon [0,1]} \alpha_k\, \widetilde{z^{\alpha_k}}^{*} = \cup_{\alpha_k \epsilon [0,1]} \alpha_k\, [\underline{z^{\alpha_k}}^{*}, \overline{z^{\alpha_k}}^{*}] \quad (۴۶)$$

بنابر این با استفاده از سطح‌های برش $\alpha_۱$ و ... و $\alpha_t$ عدد فازی ذوزنقه‌ای تکه‌ای خطی $\tilde{Z}^{*}$ به-صورت زیر به دست می‌آید [۳۱]:

$$\mu_{\tilde{z}^*} \approx \begin{cases} 0 & x \le \underline{z}^{\alpha_0 *} \\ \frac{\alpha_1-\alpha_0}{\underline{z}^{\alpha_1 *}-\underline{z}^{\alpha_0 *}}\left(x-\underline{z}^{\alpha_0 *}\right)+\alpha_0 & \underline{z}^{\alpha_0 *} \le x \le \underline{z}^{\alpha_1 *} \\ \frac{\alpha_2-\alpha_1}{\underline{z}^{\alpha_2 *}-\underline{z}^{\alpha_1 *}}\left(x-\underline{z}^{\alpha_1 *}\right)+\alpha_1 & \underline{z}^{\alpha_1 *} \le x \le \underline{z}^{\alpha_2 *} \\ \vdots & \\ \alpha_t & \underline{z}^{\alpha_t *} \le x \le \overline{z^{\alpha_t}}^{*} \\ \vdots & \\ \frac{\alpha_1-\alpha_0}{\overline{z^{\alpha_1}}^{*}-\overline{z^{\alpha_0}}^{*}}\left(x-\overline{z^{\alpha_0}}^{*}\right)+\alpha_0 & \overline{z^{\alpha_1}}^{*} \le x \le \overline{z^{\alpha_0}}^{*} \\ 0 & \overline{z^{\alpha_0}}^{*} \le x \end{cases} \quad (۴۷)$$

شایان ذکر است که اعتبار مدل پیشنهادی با تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل مورد سنجش قرار گرفت. در ازای افزایش یا کاهش در یک پارامتر به شرط ثابت ماندن بقیه پارامترها، در صورتیکه تغییرات در رفتارمتغیرهای خروجی بر اساس ادبیات پژوهش و یا نظر افراد خبره مورد تأیید قرار گیرد اعتبار مدل مورد تأیید است. با توجه به اینکه با تغییر در مقدار پارامترهایی مانند هزینه تولید، حداقل و حداکثر توان تولید، هزینه هر بار روشن و خاموش شدن، وضعیت روشن یا خاموش بودن اولیه نیروگاه، قیمت‌های تسویه و قیمت‌های پیشنهادی فروش، خروجی‌های مدل رفتار منطقی از خود نشان دادند، اعتبار مدل مورد تأیید قرار گرفت.

## ۵- مثال عددی

پژوهش حاضر در دو بخش مدل‌سازی شده است، بدین صورت که در گام اول روشی برای تعیین قیمت‌های پیشنهاد و در گام دوم روشی برای تعیین مقادیر انرژی الکتریکی متناسب با هر قیمت پیشنهادی را مورد بررسی قرار دادیم.

### ۵-۱- محاسبات مربوط به بخش پیشنهاد قیمت

در جدول ۳ با استفاده از روش ارائه شده فوق، با در نظر گرفتن مقدار $\Delta = ۰/۲$ برای بازیگر ریسک گریز و $\Delta = ۰/۸$ برای بازیگر ریسک پذیر، برای ساعات مختلف شبانه روز مقادیر متفاوتی از قیمت جهت پیشنهاد به بازار برق محاسبه شده است که با تخصیص مقادیر متفاوت از $\pi$ می‌توان قیمت‌های مختلفی را در سطوح متفاوتی از ریسک پذیری محاسبه کرد که به

ترتیب به ازای $\pi = ۱$ کمترین مقدار قیمت و کمترین میزان ریسک و به ازای $\pi = ۰/۱$ بیشترین مقدار قیمت با بیشترین میزان ریسک را خواهیم داشت. همان طور که مشاهده می‌شود قیمت در بین این دو مقدار به صورت پلکانی افزایش می‌یابد که تحت عنوان پله‌های قیمتی ۱ تا ۱۰ نام گذاری شده است.

**جدول ۳**. قیمت‌های پیشنهادی در سطوح اطمینان مختلف π در ساعت ۱ – هزار ریال–

| پله ۱ | پله ۲ | پله ۳ | پله ۴ | پله ۵ | پله ۶ | پله ۷ | پله ۸ | پله ۹ | پله ۱۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\pi = ۱$ | $\pi = ۰/۹$ | $\pi = ۰/۸$ | $\pi = ۰/۷$ | $\pi = ۰/۶$ | $\pi = ۰/۵$ | $\pi = ۰/۴$ | $\pi = ۰/۳$ | $\pi = ۰/۲$ | $\pi = ۰/۱$ |
| ریسک‌گریز ($\Delta = ۰/۲$) | | | | | | | | | |
| ۳۸۷/۵ | ۳/۸۱۲۵ | ۴۰/۱۲۵ | ۴/۴۳۷۵ | ۴۱۲/۷۵ | ۴/۰۶۲۵ | ۴۲/۳۷۵ | ۴/۶۸۷۵ | ۴۳۸ | ۴/۳۱۲۵ |
| ریسک‌پذیر ($\Delta = ۰/۸$) | | | | | | | | | |
| ۳۸۷/۵ | ۴۱۲/۷۵ | ۴۳۸ | ۴۶۳/۲۵ | ۴۸۸/۵ | ۵۱۳/۷۵ | ۵۳۹ | ۵۶۴/۲۵ | ۵۸۹/۵ | ۶۱۴/۷۵ |

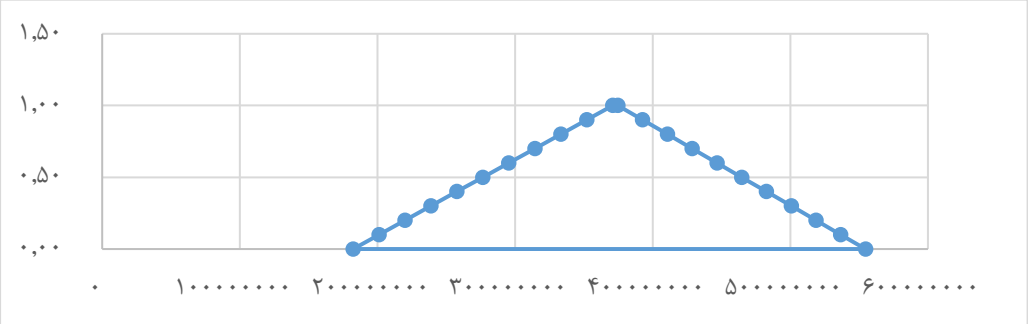
## ۵-۲- محاسبات مربوط به بخش خودبرنامه‌ریزی

مسئله طرح‌شده در این مقاله بر اساس ویژگی‌های یک نیروگاه‌های حرارتی ارائه شده و مورد مطالعه یک نیروگاه گازی دارای توربین‌های زیمنس V۹۴٫۲ می‌باشد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار لینگو در ادامه تشریح می‌شود. مطابق با روابط ۳۶ تا ۴۱ حدود بالا و پایین تابع هدف سود به ازای آلفاکات‌های مختلف در جدول ۴ نمایش داده شده است.

**جدول ۴**. حدود بالا و پایین تابع هدف مسئله

| حدود پایین (هزار ریال) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| α | ۰ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۳ | ۰/۴ | ۰/۵ |
| سود | ۱۸۲۳۵۰ | ۲۰۱۲۰۸ | ۲۲۰۰۶۷ | ۲۳۸۹۲۶ | ۲۵۷۷۸۵ | ۲۷۶۶۴۳ |
| α | ۰/۶ | ۰/۷ | ۰/۸ | ۰/۹ | ۱ | |
| سود | ۲۹۵۵۰۲ | ۳۱۴۳۶۱ | ۳۳۳۲۲۰ | ۳۵۲۰۷۸ | ۳۷۰۹۳۷ | |
| حدود بالا (هزار ریال) | | | | | | |
| α | ۰ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۳ | ۰/۴ | ۰/۵ |
| سود | ۵۵۴۶۵۰ | ۵۳۶۶۵۷ | ۵۱۸۶۶۵ | ۵۰۰۶۷۲ | ۴۸۲۶۸۰ | ۴۶۴۶۸۷ |
| α | ۰/۶ | ۰/۷ | ۰/۸ | ۰/۹ | ۱ | |
| سود | ۴۴۶۶۹۵ | ۴۲۸۷۰۲ | ۴۱۰۷۱۰ | ۳۹۲۷۱۷ | ۳۷۴۷۲۵ | |

نمودار ذوزنقه‌ای متناظر با رابطه ۴۷ پس از محاسبه کلیه حدود بالا و پایین به‌صورت نمودار شکل ۲ ترسیم می‌شود.




**شکل۲**. نمودار ذوزنقه‌ای با آلفاکات‌های مختلف

به‌منظور تصمیم‌گیری مناسب و مدیریت ریسک تصمیم‌گیری، مدل در حالت بینابینی و مطابق روابط ۴۲ تا ۴۴ به ازای هر سطح از ریسک (مقادیر مختلف $\lambda$) به‌طور جداگانه اجرا شده است.

**جدول ۵**. مقادیر به ازای آلفا کات ۰/۱ و پله سوم قیمت در حالت ریسک‌پذیر-مگاوات-

| | $\lambda$ =۰/۲ | | | $\lambda$ =۰/۵ | | | $\lambda$ =۰/۸ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ساعت | Q(t) | I(t) | U(t) | Q(t) | I(t) | U(t) | Q(t) | I(t) | U(t) |
| ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| ۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۷۰ | ۰ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| ۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۷۰ | ۰ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| ۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| . . . | | | | | | | | | |
| ۲۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۷۰ | ۰ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| ۲۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| ۲۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ | ۱۵۰ | ۱ | ۱ |
| سود | ۰ | | | -۱۱۹۵۷۸ | | | ۴۶۹۵۶۷ | | |

**جدول۶.** مقادیر به ازای آلفا کات ۰/۱ و همه پله‌های قیمت در ساعت ۱ در حالت ریسک‌پذیر-مگاوات

| آلفا کات ۰/۱ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| پله سوم قیمت | | | پله دوم قیمت | | | پله اول قیمت | | |
| $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۲$ |
| Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) |
| ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ |
| پله ششم قیمت تا پله دهم | | | پله پنجم قیمت | | | پله چهارم قیمت | | |
| $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۲$ |
| Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) | Q(t) |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۰ | ۰ | ۱۵۰ | ۰ | ۰ |

**جدول۷.** مقادیر تابع هدف سود برای بازیگر ریسک‌پذیر به ازای آلفاها و لانداهای مختلف ( هزار ریال)

| آلفا کات | $\alpha=۰/۵$ | | | $\alpha=۰/۳$ | | | $\alpha=۰/۱$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سطح ریسک | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۸$ |
| پله ۱ | ۳۱۴۲۵۲ | ۳۷۰۶۶۵ | ۴۲۷۰۷۸ | ۲۹۱۲۷۵ | ۳۶۹۷۹۹ | ۴۴۸۳۲۳ | ۲۸۲۹۰ | ۳۶۸۹۳۳ | ۴۶۹۵۶۷ |
| پله ۲ | ۳۱۴۲۵۲ | ۳۷۰۶۶۵ | ۴۲۷۰۷۸ | ۲۵۴۱۴۲ | ۳۶۹۷۹۹ | ۴۴۸۳۲۳ | -۴۵۳۱۱۰ | ۳۶۸۹۳۳ | ۴۶۹۵۶۷ |
| پله ۳ | ۰ | -۱۲۲۴۸۰ | ۴۲۷۰۷۸ | ۳۶۹۷۹۹ | ۳۶۹۷۹۹ | ۴۴۸۳۲۳ | ۰ | -۱۱۹۵۷۸ | ۴۶۹۵۶۷ |
| پله ۴ | ۰ | ۰ | -۴۸۶۵۹ | ۰ | -۳۲۱۱۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۹۶۳۸ |
| پله ۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | -۴۰۴۱۳۲ |
| آلفا کات | $\alpha=۰/۹$ | | | $\alpha=۰/۸$ | | | $\alpha=۰/۷$ | | |
| سطح ریسک | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۸$ | $\lambda=۰/۲$ | $\lambda=۰/۵$ | $\lambda=۰/۸$ |
| پله ۱ | ۳۶۰۲۰۶ | ۳۷۲۳۹۸ | ۳۸۴۵۸۹ | ۳۴۸۷۱۸ | ۳۷۱۹۶۵ | ۳۹۵۲۱۲ | ۳۳۷۲۲۹ | ۳۷۱۵۳۱ | ۴۰۵۸۳۴ |
| پله ۲ | ۳۶۰۲۰۶ | ۳۷۲۳۹۸ | ۳۸۴۵۸۹ | ۳۴۸۷۱۸ | ۳۷۱۹۶۵ | ۳۹۵۲۱۲ | ۳۳۷۲۲۹ | ۳۷۱۵۳۱ | ۴۰۵۸۳۴ |
| پله ۳ | ۰ | -۱۲۵۳۸۳ | ۳۸۴۵۸۹ | ۰ | -۱۲۴۶۵۷ | ۳۹۵۲۱۲ | ۰ | -۱۲۳۹۳۱ | ۴۰۵۸۳۴ |
| پله ۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| پله ۵ | ۰ | ۰ | ۰ | | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |

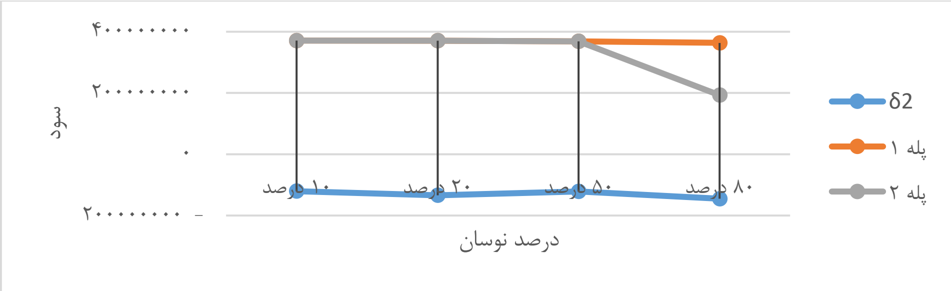
جدول ۷ مقادیر سود روزانه حاصل از پیشنهاددهی پله‌های مختلف قیمت را به ازای مقادیر مختلف $\lambda$ و $\alpha$ نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشخص است به‌ازای مقادیر بالاتر $\lambda$، سود بالاتری عاید تولید کننده می‌شود اما ریسک بالاتری متوجه تولیدکننده خواهد بود زیرا احتمال پذیرش قیمت‌های پیشنهادی با افزایش $\lambda$، کمتر خواهد شد. سود منفی در جدول ۷

بیانگر این است که در برخی ساعات پیشنهاد قیمت پذیرفته نخواهد شد و با توجه به محدودیت‌های فنی، نیروگاه باید در آن ساعات روشن باقی بماند و با حداقل ظرفیت تولید کند زیرا هزینه خاموش و روشن شدن مجدد نیروگاه بسیار بیشتر از هزینه تولید حداقل است.

## ۶- بررسی استواری مدل پیشنهادی

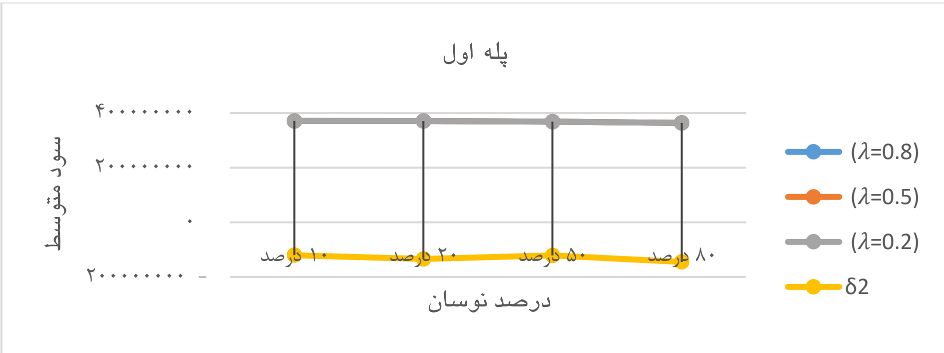
تنظیم سطح استواری برای پارامترهای غیر قطعی بدین معنی است که پارامترهای مدل بهینه‌سازی استوار به گونه‌ای تنظیم شوند که برای تمامی حالات غیر قطعی، در صورت نوسان در محدوده سطح استواری، پاسخ بهینه همچنان موجه و بهینه باقی بماند. بنابراین در سطح استواری هر آلفاکات، پاسخ بهینه با توجه به این واقعیت بدست آمده که مقادیر پارامترهای غیر قطعی می‌توانند در بازه آلفاکات مورد نظر (مثلا ده درصد نوسان از مقدار اسمی پارامتر مورد نظر) نوسان داشته باشد، بدون اینکه تابع هدف بهینگی خود را از دست بدهد. از این رو برای بررسی استواری مدل پیشنهادی یک بار مسئله در حالت قطعی و با قراردادن مقدار اسمی متغیرهای عدم قطعیت و بار دیگر در سطوح مختلف نوسان از مقدار اسمی و با مدل استوار پیشنهادی حل شده و نتایج مقایسه می‌شوند. از این‌رو، جهت سنجش استواری مدل پیشنهادی در شرایط واقعی، از شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی به معنای محقق‌سازی وقوع پارامترهای غیر قطعی است که به منظور ارزیابی کیفیت جواب‌ها در بهینه‌سازی استوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب که با تولید تعداد زیاد مقادیر تصادفی در بازه (مقدار اسمی * درصد نوسان ± مقدار اسمی) با نوسانات ۱۰درصد، ۲۰ درصد، ۵۰ درصد و ۸۰ درصد مدل به دفعات اجرا شد و متوسط نتایج محاسبه شده است.

بدون لحاظ کردن محدودیت‌های استواری (محدودیت‌های ۳۴ و ۳۵) و فقط بر اساس مقادیر پله‌های ۱ و ۲ در حالت ریسک‌پذیر، نتایج در مقایسه با حالت قطعی (با مقدار اسمی) به صورت نمودار شکل ۳ است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در صورت پیشنهاد مقادیر اسمی قیمت تسویه بازار در هر ساعت به‌ازای هر میزان نوسان، سود منفی خواهد بود ولی در صورت پیشنهاد قیمت‌های پیشنهادی تحقیق در پله اول و دوم، متوسط سود به ازای نوسانات مختلف مثبت است.

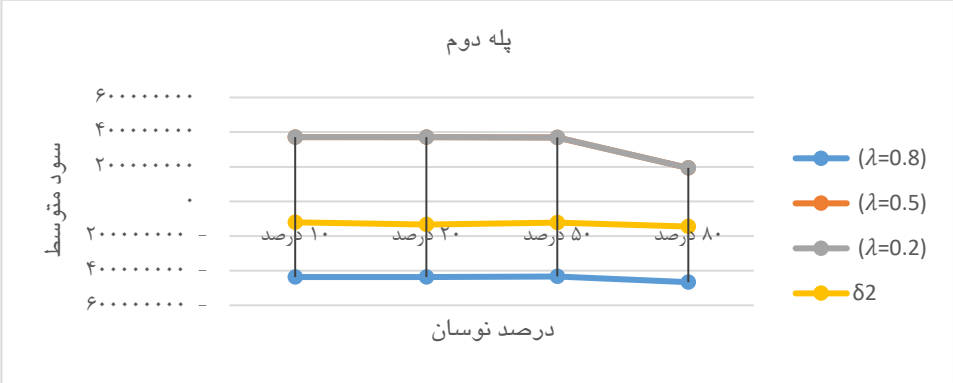



**شکل ۳.** میزان نوسان متوسط سود بر اساس درصد نوسانات پارامتر غیرقطعی

با لحاظ نمودن محدودیت‌های استواری در سطوح مختلف استواری نتایج به‌صورت نمودارهای شکل ۴ و ۵ خواهد شد. طبق نتایج به‌دست آمده، متوسط سود در پله اول به‌ازای تمام سطوح استواری مثبت است اما در پله دوم متوسط سود به‌ازای سطوح بالاتر اطمینان منفی و به‌ازای سطوح پایین‌تر مثبت است و بدین معناست که اگر تولیدکننده به دنبال سطح اطمینان بالاست نباید در پله دوم قیمت پیشنهادی به بازار ارائه کند زیرا ریسک پذیرش آن در بازار زیاد است.

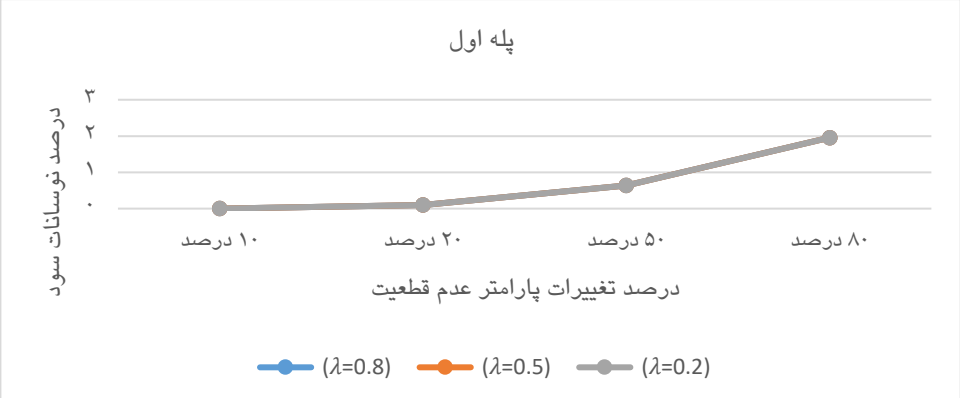



**شکل ۴.** سود متوسط پله اول قیمت در سطوح مختلف اطمینان بر اساس درصد نوسان پارامتر عدم قطعیت

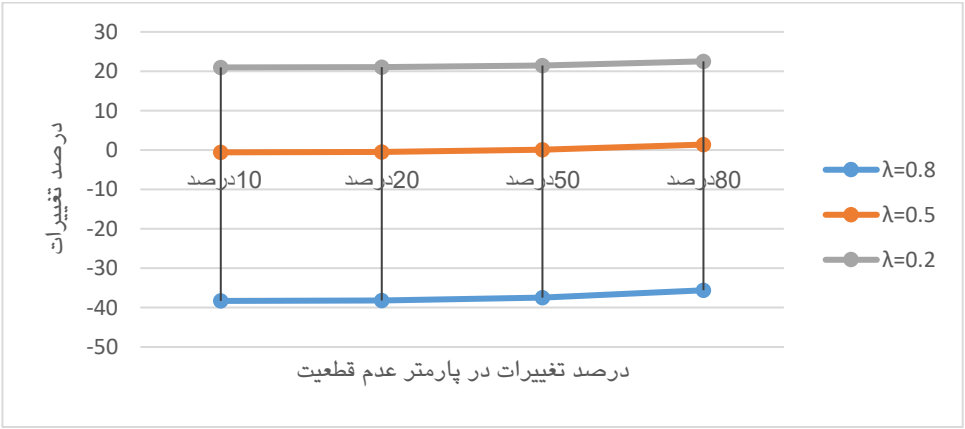



**شکل ۵.** سود متوسط پله دوم قیمت در سطوح مختلف اطمینان بر اساس درصد نوسان پارامتر عدم قطعیت

نتایج نشان می‌دهد که مقدار متوسط سود در حالت قطعی توان مقاومت در برابر نوسانات قیمت را نداشته و مقداری منفی به خود می‌گیرد. اما در مدل استوار پیشنهادی، مقدار متوسط سود درصورت وقوع هر نوسانی در پارامتر عدم‌قطعیت، استواری خود را حفظ می‌کند و تنها در برابر نوسان‌های شدید در پله‌های بالاتر حساسیت از خود نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال با افزایش میزان نوسان در پارامتر عدم قطعیت از ۱۰ درصد به ۸۰ درصد، میزان نوسان در متوسط سود در پله اول حداکثر ۲ درصد خواهد بود که در شکل ۶ نشان داده شده است.




**شکل ۶.** میزان نوسان متوسط سود در پله اول به ازای میزان نوسان پارامتر غیرقطعی

مهرنوش خاجی و همکاران ـــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــ



**شکل ۷.** درصد تغییرات سود پیش‌بینی شده مدل نسبت به متوسط سود حاصل از شبیه‌سازی

## ۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی جهت ارائه به بازار انرژی الکتریکی (بازار روز بعد) با رویکردی استوار و در دو گام مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اتخاذ استراتژی پیشنهاددهی قیمت-مقدار، ابتدا در گام یک روشی برای تعیین قیمت‌های پیشنهاد ارائه شده که به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد که قیمت‌هایشان را متناسب با میزان ریسک‌پذیری خود در سطوح مختلفی از اطمینان ارزیابی کرده و به بازار برق ارائه دهند. سپس در گام دو یک مدل بهینه‌سازی ریاضی برای مسئله خودبرنامه‌ریزی طراحی گردیده که مقادیر بهینه انرژی الکتریکی تولیدی را با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی نیروگاه، تعیین خواهد نمود.

در گام دوم و در طراحی مسئله خودبرنامه‌ریزی، برای مواجهه با عدم اطمینان حاصل از پارامتر غیرقطعی قیمت تسویه بازار، با استفاده از مفاهیم قطعی‌کننده عدم قطعیت بازه‌ای که در رابطه ۳۳ بیان شد، مدلی استوار با قابلیت تنظیم سطح استواری به‌گونه‌ای ارائه شده است که بتواند متناسب با میزان ریسک‌پذیری یا ریسک‌گریزی تولیدکننده برق و در سطح اطمینان مورد نظر وی استراتژی بهینه استوار پیشنهاددهی مطلوب را تعیین کند. تولیدکننده ریسک‌گریز با تعیین سطوح اطمینان بالاتر ($\lambda$ کوچک‌تر) به سود کمتر که امکان تحقق بیشتری دارد رضایت می‌دهد و در مقابل تولیدکننده ریسک‌پذیر با تعیین سطوح پایین‌تر اطمینان ($\lambda$ بزرگ‌تر) شانس دستیابی به سود بیشتر را برای خود محفوظ می‌دارد. اعتبارسنجی عملکرد مدل از طریق رویکرد تحلیل حساسیت انجام شده است. در این راستا، با در نظر گرفتن نوسانات مختلف در قیمت تسویه و با در نظر گرفتن سطوح مختلف استواری مختلف، عملکرد مدل از نظر استوار بهینگی نیز تحت شرایط مختلف عدم قطعیت مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که پاسخ بهینه حاصل از این مدل حتی در مواجهه با نوسانات شدید قیمت تسویه نیز می‌تواند بهینگی خود را حفظ کند.

یافته‌های تحقیق حاصل از به‌کارگیری روش شبیه سازی، نشان داد که اگر تولید کننده بخواهد مسئله پیشنهاددهی را به‌صورت قطعی و بر اساس مقدار اسمی قیمت‌های تسویه حل کند با ایجاد هر میزان نوسان در قیمت‌ها قطعاً ضرر خواهد کرد. اما با استفاده از مدل استوار پیشنهادی، مقدار متوسط سود درصورت وقوع هر نوسانی در پارامتر عدم‌قطعیت، استواری خود را حفظ می‌کند و تنها در برابر نوسان‌های شدید آن هم در پله‌های بالاتر قیمت از خود حساسیت کمی (در حدود ۲درصد) نشان می‌دهد. همچنین یافته‌های تحقیق نشان داد که میزان سود متوسط حاصل از شبیه‌سازی نسبت به سود تخمین زده شده توسط مدل استوار تحت تأثیر نوسانات قیمت قرار ندارد و تنها به سطح اطمینان انتخابی (مقدار $\lambda$ ) وابسته است که این موضوع بیانگر استوار بودن مدل نسبت به تغییرات پارامتر عدم قطعیت است.

در این پژوهش صرفاً به تصمیم‌گیری برای شرکت در بازار روز بعد انرژی الکتریکی پرداخته شده است. علاوه بر بازار روز بعد انرژی الکتریکی، تولیدکنندگان می‌توانند انرژی الکتریکی تولیدی خود را هم‌زمان با بازار روز بعد در بازار رزرو انرژی الکتریکی و یا بورس انرژی نیز به فروش برسانند و یا از طریق قراردادهای دوجانبه بلند مدت با مشتریان وارد معامله شوند که هر یک از این مبادلات ملاحظات و قوانین خاصی دارد که باید در مدل‌سازی مورد ملاحظه قرار گیرد تا در قالب یک مدل واحد کلیه تصمیمات حوزه‌های مختلف به صورت یک جا اتخاذ

گردد. لذا پژوهشگران علاقه‌مند می‌توانند برای تحقیقات آتی، جهت توسعه تحقیق حاضر، قراردادهای دوجانبه و بورس انرژی و یا بازار رزرو انرژی را نیز در کنار بازار روز بعد مورد بررسی قرار دهند. همچنین در این تحقیق مکانیسم پرداخت یکسان مورد بررسی قرار گرفت لذا علاقه‌مندان می‌توانند در تحقیقات آتی مکانیسم پرداخت بر اساس پیشنهاد را در مورد بررسی قرار دهند.

## ۸- پی‌نوشت‌ها

[۱] Self-scheduling
[۲] Lingo
[۳] IREMA
[٤] Possibility
[٥] Necessity
[٦] Measure

## ۹- منابع

[۱] Haddad, H., Taghizadeh Yazdi, M., Zandieh, M., Heydari Dehui, J., Razavi Haji Agha, H. (۲۰۲۱). Presenting a Bi-Level programming approach for Unit commitment in Iran with minimization of greenhouse gas emission. *Modern Research in Decision Making*, ٦(٤), ٥٥-٧٤.

[۲] Mardani, M., Fatemi Ardestani, S.F., Ghazizadeh, M.S., (۲۰۱۸), Essays In Iranian Wholesale Electricity Market, the Ph.D. degree Graduate Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)

[۳] Shamsini Ghiasvand, F., Afsha, K., Bigdeli, N., (۲۰۱٥), *optimal bidding strategy of power producers in pay-as-bid markets, , Imam Khomeini International University, the Degree of Master Graduate Ggazvin, Iran. (In Persian)*

[٤] Marzban, E., Mohammadi, M. (۲۰۲۱). Future Scenarios for power Management in Iran. *Management Research in Iran*, ۲۰(۳), ۱۷۷-۲۰٤.

[٥] Aien, M., Rashidinejad, M., Fotuhi-Firuzabad, M., (۲۰۱٥), GENCO's Decision Making Considering Power Market Uncertainties, the Ph.D. degree Graduate University of Advanced Technology, Energy Department, kerman, Iran. (In Persian)

[٦] Vatani, B., Chowdhury, B., Dehghan, S., & Amjady, N. (۲۰۱۸). A critical review of robust self-scheduling for generation companies under electricity price uncertainty. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 97*, ٤۲۸–٤۳۹.

[۷] *Jalilvand Nejad, A., Shafaei, R., (2016), Developing a Robust Model to Manage Power Selling in The Competitive Market, the Ph.D. degree Graduate, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)*

[٨] Hamta, N., Ehsanifar, M., Moghaddasi, A. (٢٠١٨). An Investigation of Iranian Entrepreneurs' Decision Making Logic Based On Effectuation Theory. *Modern Research in Decision Making*, ٢(٤), ٢٥٥-٢٧٣.

[٩] Valipour Khatir, M., Azar, A., Amini, M. (٢٠٢١). Developing Performance Based Budgeting Model: Organizational Excellence Approach. *Management Research in Iran*, ٢١(٢), ١٧٩-١٩٨.

[١٠] Kayedpour, F., Amiri, M., olfat, L., Pishvaee, M. (٢٠٢١). Supply chain configuration based on dynamic pricing and robust optimization. *Modern Research in Decision Making*, ٦(٣), ١٥٦-١٨٧.

[١١] Weron, R. (٢٠١٤). Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. *International Journal of Forecasting, 30(4)*, ١٠٣٠–١٠٨١.

[١٢] Itaba, S., & Mori, H. (٢٠١٧). A Fuzzy-Preconditioned GRBFN Model for Electricity Price Forecasting. *Procedia Computer Science*, ١١٤, ٤٤١–٤٤٨.

[١٣] Sheikh-el-eslami, M. K., & Seifi, H. (٢٠٠٦). Short-term electricity price forecasting using a fuzzy stochastic predictor. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, ١–٥.

[١٤] Nazari Farsani, V., Sheikh-El-Eslami, M.K., (٢٠١٩), A New Approach for Interval Forecasting of Electricity Price based on Deep Learning, the Degree of Master Graduate Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)

[١٥] Nowotarski, J., & Weron, R. (٢٠١٤). Merging quantile regression with forecast averaging to obtain more accurate interval forecasts of Nord Pool spot prices. *International Conference on the European Energy Market, EEM*, ١, ٠–٤.

[١٦] Nowotarski, J., & Weron, R. (٢٠١٥). Computing electricity spot price prediction intervals using quantile regression and forecast averaging. *Computational Statistics, ٣٠(٣)*, ٧٩١–٨٠٣.

[١٧] Parvaresh, M., Mohtavi Pour, S.S., (٢٠١٧), Anew optimal bidding Strategy for Generation compahies (GENCOS), the Degree of Master University Of Guilan, Guilan, Iran. (In Persian)

[١٨] Esmaeily, A., Ahmadi, A., Raeisi, F., Ahmadi, M. R., Esmaeel Nezhad, A., & Janghorbani, M. (٢٠١٧). Evaluating the effectiveness of mixed-integer linear programming for day-ahead hydro-thermal self-scheduling considering price uncertainty and forced outage rate. *Energy, 122*, ١٨٢–١٩٣.

[١٩] Yazdaninejad, M., & Amjady, N. (٢٠١٧). Risk-minimizing stochastic self-scheduling model for microgrid in day-ahead electricity market. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 27(5)*. ١-١٨.

[٢٠] Khaloie, H., Abdollahi, A., Rashidinejad, M., & Siano, P. (٢٠١٩). Risk-based probabilistic-possibilistic self-scheduling considering high-impact low-probability events uncertainty. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 110*, ٥٩٨–٦١٢.

[۲۱] Jiao, P. H., Chen, J. J., Qi, B. X., Zhao, Y. L., & Peng, K. (۲۰۱۹). Electricity price driven active distribution network planning considering uncertain wind power and electricity price. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 107,* ٤۲۲–٤۳۷.

[۲۲] Goroohi Sardou, I., & Ansari, M. (۲۰۲۰). Risk-constrained self-scheduling of a generation company considering natural gas flexibilities for wind energy integration. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, 12*. ۱-۱٤

[۲۳] Nojavan, S., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (۲۰۱۷). Robust bidding and offering strategies of electricity retailer under multi-tariff pricing. *Energy Economics*, ٦٨, ۳٥۹–۳۷۲.

[۲٤] Nojavan, S., & Zare, K. (۲۰۱۸). Interval optimization based performance of photovoltaic/wind/FC/electrolyzer/electric vehicles in energy price determination for customers by electricity retailer. *Solar Energy, 171,* ٥٨۰–٥۹۲.

[۲٥] Mazzi, N., Kazempour, J., & Pinson, P. (۲۰۱۸). Price-Taker Offering Strategy in Electricity Pay-as-Bid Markets. *IEEE Transactions on Power Systems, 33(2),* ۲۱۷٥–۲۱٨۳.

[۲٦] Jabari, F., Mohammadi-ivatloo, B., & Mohammadpourfard, M. (۲۰۱۹). Robust optimal self-scheduling of potable water and power producers under uncertain electricity prices. *Applied Thermal Engineering, 162.* ۱-۱۳

[۲۷] Nojavan, S., Nourollahi, R., Pashaei-Didani, H., & Zare, K. (۲۰۱۹). Uncertainty-based electricity procurement by retailer using robust optimization approach in the presence of demand response exchange. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 105(January 2018)*, ۲۳۷–۲٤٨.

[۲٨] Yazdaninejad, M., Amjady, N., & Dehghan, S. (۲۰۲۰). VPP Self-Scheduling Strategy Using Multi-Horizon IGDT, Enhanced Normalized Normal Constraint, and Bi-Directional Decision-Making Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid, 11(4),* ۳٦۳۲–۳٦٤٥.

[۲۹] Najafi, A., Pourakbari-Kasmaei, M., Jasinski, M., Lehtonen, M., & Leonowicz, Z. (۲۰۲۲). A medium-term hybrid IGDT-Robust optimization model for optimal self scheduling of multi-carrier energy systems. *Energy, 238*. ۱-۱٥

[۳۰] Dehghan, E., Shafiei, M., Amiri, M., & Jabbarzadeh, A. (۲۰۱٨). Hybrid robust , stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering 123*, ۲۲۰–۲۳۱.

[۳۱] Farhadi, H., Zangiabadi, M., Mansouri, H., (۲۰۱٤), Methods For Solving Fuzzy Two-Level Programming Problems, *the Degree of Master Graduate* Shahrood University, Shahrood, Iran. (In Persian)