



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Co-Optimized Bidding Strategy of an Integrated Wind-Thermal System in Electricity Day Ahead and Reserve Market Under Uncertainties

Mehrnoosh Khaji <sup>a,\*</sup>, Maghsoud Amiri<sup>b</sup>, Mohammad Taghi Taghavifard<sup>c</sup>

<sup>a</sup> PhD student, management faculty, Allameh Tabatabaee University, Tehran, Iran.

<sup>b</sup> Professor, Industrial Management Department, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabatabaee University, Tehran, Iran

<sup>c</sup> Associate Professor, Department of Management and Accounting, Allameh Tabatabaee University, Tehran, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 14 December 2022

Revised: 20 March 2023

Accepted: 06 June 2023

### Keywords:

Coordinated bidding strategy, electricity market, wind farm, uncertainty, fuzzy random variable, possibility theory.

## ABSTRACT

Nowadays renewable energy sources, such as wind and solar, whether independently or integrated with other resources, are considered in power system, specifically self-scheduling, bidding and offering strategy problems. However, the uncertain nature of these sources has turned out the greatest challenge for their owners, which makes the bidding and offering in the restructured electricity market more complicated because wind energy generation may cause penalty fees for its generation mismatches. Hence, the primary objective of this paper is to suggest a novel bidding strategy framework based on fuzzy random variable for a wind-thermal system in the electricity market for the first time. The uncertainties associated with day ahead energy, spinning reserve market prices and imbalance prices, are characterized by random fuzzy variables and the uncertainties associated with wind power outputs are modeled as a LR fuzzy numbers. The proposed self-scheduling model maximizes the expected profits while it controls the risk by providing different possibility and probability levels for decision makers.

A mathematical modeling approach is applied in this research by using a mixed-integer non-linear programming model which is implemented in Lingo software in a case study of thermal generation unit to investigate the efficiency of the proposed model. A sensitivity analysis is applied to validate the performance of the proposed model. Numerical results reveal that taking advantage of wind power generation alongside with thermal generation will substantially increase the profitability of the integrated generation company

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.29307.2376>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author:

E-mail address: [amiri@atu.ac.ir](mailto:amiri@atu.ac.ir)

## How to cite this article:

Khaji, M., amiri, M., & Taghavifard, M. T. (2023). Co-optimized bidding strategy of an integrated wind-thermal system in electricity day ahead and reserve market under uncertainties. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 29-51. doi: 10.22075/jme.2023.29307.2376

## پیشنهاددهی انرژی الکتریکی در بازار توأم انرژی و رزرو برای تولیدکننده برق با واحدهای حرارتی و بادی

مهرنوش خاجی<sup>۱\*</sup>، مقصود امیری<sup>۲</sup>، محمد تقی تقوی فرد<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳	<p>امروزه با گسترش استفاده از انرژی باد در تولید برق بزرگ‌ترین چالش پیش روی مالکان واحدهای بادی برنامه‌ریزی نحوه مشارکت و ارائه استراتژی پیشنهاددهی در بازار برق است. از آنجاییکه توان تولیدی مزرعه بادی دارای عدم قطعیت و ریسک بالایی است، این واحدهای تولیدی به دلیل عدم تعادل بین توان برنامه‌ریزی شده برای عرضه به بازار و توان واقعی تولیدی‌شان ملزم به پرداخت جریمه خواهند شد. در این پژوهش به منظور کاهش ریسک عدم تعادل واحد بادی از مشارکت هماهنگ واحدهای حرارتی و بادی برای شرکت در بازار روز بعد و رزرو استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش ارائه مدلی برای تعیین استراتژی پیشنهاددهی بر مبنای متغیر تصادفی فازی است که برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفته است. عدم قطعیت موجود در قیمت‌های بازارهای روز بعد، رزرو و لحظه‌ای به صورت متغیر تصادفی فازی و عدم قطعیت موجود در میزان تولید بادی به صورت عدد فازی LR در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی به‌دنبال بیشینه‌سازی سود مورد انتظار با قابلیت تنظیم ریسک می‌باشد که با تنظیم سطح امکان و احتمال مدل بر اساس میزان ریسک‌پذیری مورد نظر تصمیم‌گیرنده انجام می‌شود. رویکرد پژوهش، مدل‌سازی ریاضی است که به صورت یک برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح ارائه شده و بر روی یک نیروگاه برق حرارتی پیاده سازی شده است. اعتبار مدل ارائه شده با رویکرد تحلیل حساسیت مورد تأیید قرار گرفت و یافته‌های تحقیق نشان داد که هم‌افزایی حاصل از هماهنگ‌سازی واحد بادی و حرارتی سبب افزایش سود نسبت به حالت فعالیت مستقل آنها می‌شود.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶	
<p><b>واژگان کلیدی:</b>            استراتژی پیشنهاددهی            هماهنگ،            بازار برق،            مزرعه بادی،            عدم قطعیت،            متغیر تصادفی فازی،            نظریه امکان.</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.29307.2376>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### ۱- مقدمه

با عدم قطعیت پارامتر قیمت تسویه بازار مدل‌سازی شده است. در محیط بازار رقابتی، فروشندگان برق برای تعیین یک استراتژی پیشنهاددهی باید علاوه بر سوددهی بالا به استواری آن نیز توجه کنند. ارائه یک استراتژی استوار از

در این پژوهش مسئله خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده برق جهت تعیین استراتژی بهینه و استوار برای شرکت در بازارهای برق با تکیه بر تئوری امکان فازی جهت مواجهه

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

۲. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

۳. دانشیار، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبائی تهران ایران

استناد به این مقاله:

خاجی، مهرنوش، امیری، مقصود، و تقوی فرد، محمد تقی تقوی فرد. (۱۴۰۲). پیشنهاددهی انرژی الکتریکی در بازار توأم انرژی و رزرو برای تولیدکننده برق با واحدهای حرارتی و بادی. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۲۹-۵۱. doi: 10.22075/jme.2023.29307.2376

الکتریکی مورد نظر برای عرضه انرژی الکتریکی، ب) تخمین قیمت تسویه بازار، ج) مدل سازی مسئله خودبرنامه ریزی و استراتژی پیشنهاددهی، می باشد .

هر تولیدکننده برق برای شرکت در بازار برق باید با انتخاب سطح معینی از عدم اطمینان در پیش بینی هایش اقدام به خودبرنامه ریزی واحدهای تولیدی خود با هدف بیشینه سازی سود کند. با حل مسئله خودبرنامه ریزی، استراتژی پیشنهاددهی بهینه اتخاذ می شود. یکی از عوامل اصلی پیچیده شدن مسئله خود برنامه ریزی، وجود عدم اطمینان در داده ها به خصوص داده های مربوط به قیمت است. [2]

## ۲-۲ - تخمین قیمت تسویه بازار

در بازار برق پیش بینی قیمت برق از ابزارهای حیاتی و اساسی برای بازیگران بازار است و عدم دقت کافی در آن منجر به کاهش سود و افزایش ریسک خواهد شد [۳]. نوسانات شدید قیمت برق از ویژگی های خاص این بازار است. دلیل این نوسانات شدید این است که قیمت برق تحت تأثیر عوامل زیاد و گوناگونی قرار دارد که سبب می شود پیش بینی دقیق و نقطه ای آن بسیار دشوار و پیچیده باشد. از این رو به دلیل نقایص ذاتی پیش بینی نقطه ای قیمت برق، این پیش بینی بسیار پرخطا و بی ثبات است و به همین علت بسیاری از پژوهشگران برای کاربردهایی مانند مسئله پیشنهاددهی و مدیریت ریسک از روش پیش بینی بازه ای استفاده کرده اند. این نوع پیش بینی در ارزیابی ریسک تصمیمات اتخاذ شده توسط بازیگران بازار موثرتر بوده و امکان پیشنهاددهی مطلوب تر و با ریسک کم تر را برای آنان فراهم می کند. در جدول ۱ عوامل اثرگذار بر پیش بینی قیمت برق در پنج دسته معرفی شده است [۴].

تعدد این عوامل، در دسترس نبودن، ابهام و پیچیدگی محاسباتی برخی از این عوامل منجر به ناکارآمدی روش های احتمالی در تخمین قیمت تسویه بازار می شود.

بسیاری از خطاهای برنامه ریزی بر مبنای تخمین نقطه ای با روش های احتمالی، از نوسانات شدید قیمت واقعی از مقدار تخمین نقطه ای ناشی می شود. امروزه بسیاری از پژوهشگران به اهمیت پیش بینی بازه ای قیمت برق واقف اند و اهمیت آن را در قابلیت طرح ریزی استراتژی های مختلف برای هر کدام از پیشامدهای ممکن از بازه پیش بینی، امکان ارزیابی عدم قطعیت های آینده و همچنین امکان پیشنهاددهی مطلوب تر و با ریسک کم تر می دانند [۵]. زیرا پیش بینی بازه ای می تواند در ارزیابی ریسک ناشی از

آنها در برابر عدم قطعیت ها محافظت می کند بدین صورت که اگر مقدار واقعی متغیر عدم قطعیت متفاوت با مقدار پیش بینی شده آن محقق شود، استراتژی انتخابی همچنان مطلوب باقی بماند. از این رو در این پژوهش به دنبال ارائه روشی هستیم که بتواند در جهت بهبود رفتار تولیدکنندگان و افزایش کارایی بازار رقابتی برق راهگشا باشد. هدف از ارائه این مدل تعیین استراتژی پیشنهاددهی تولیدکننده در بازار انرژی و رزرو است که شامل ارائه قیمت و برنامه ریزی تولید بهینه می باشد به گونه ای که این استراتژی از تولیدکننده در برابر عدم قطعیت های قیمت برق و تولید بادی محافظت نموده و محیط ایمن تری را برای شرکت در بازارهای رقابتی برق فراهم آورد.

در ادامه این مقاله شامل بخش های مرور ادبیات، تبیین مدل پیشنهادی، حل مثال عددی، بحث و نتیجه گیری می باشد. در بخش مرور ادبیات ابتدا به بررسی ابعاد مختلف مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی در بازار انرژی و رزرو پرداخته شده و در ادامه مهمترین فعالیت های پژوهشی صورت گرفته مرتبط با مسئله مورد بررسی، مرور شده است. سپس در بخش تبیین به تشریح مدل پیشنهادی پرداخته شده که شامل ارائه مدلی برای حل مسأله خودبرنامه ریزی جهت محاسبه مقادیر بهینه تولید انرژی الکتریکی در هر ساعت برای ارائه به بازارهای انرژی و رزرو می باشد و در بخش مثال عددی، نمونه ای از مسئله با استفاده از داده های واقعی بازار برق ایران مدل سازی شده و با استفاده از نرم افزار لینگو ورژن ۱۸ پیاده سازی شده است. در نهایت، تشریح یافته های تحقیق و بحث پیرامون آن در بخش بحث و نتیجه گیری ارائه شده است.

## ۲ - چارچوب نظری پژوهش

در این بخش ابتدا با مرور ادبیات به معرفی مفاهیم اصلی در حوزه پژوهش پرداخته و سپس با مرور پیشینه پژوهش در ادبیات تحقیق به معرفی و تشریح تحقیقات مرتبط پرداخته می شود .

مهم ترین مسئله پیش روی تولیدکنندگان برق تعیین استراتژی پیشنهاددهی بهینه است زیرا در این بازار رقابتی، پیشنهاددهی گران قیمت موجب عدم موفقیت در حراج و پیشنهاددهی ارزان قیمت منجر به کاهش سود می گردد. [1]

## ۲-۱ - مدل سازی مسئله پیشنهاددهی

مدل سازی مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی شامل مراحل: الف) انتخاب بازارهای انرژی

میانمدت با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و تصمیم‌گیری فازی و با رویکردی تصادفی، به مدل‌سازی یک مسأله دوهفته پرداخته‌اند که هم‌زمان بازار روز بعد و قراردادهای دوجانبه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و توان تولید بادی مورد توجه قرار می‌دهد [۹]. جیائو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹) به ارائه یک مدل بهینه‌سازی تصادفی با قابلیت تنظیم میزان ریسک‌گریزی در مواجهه با عدم قطعیت‌های قیمت و توان تولید بادی به منظور شرکت در بازار روز بعد پرداختند [۱۰]. نجفی و همکاران (۲۰۲۲) با بهره‌مندی از بهینه‌سازی استوار و تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی (IGDT)، به حل مسئله خودبرنامه‌ریزی با لحاظ نمودن عدم قطعیت قیمت و توان تولید بادی پرداختند [۱۱]. رجبی مشهدی و خراسانی (۲۰۱۳) برای مسأله پیشنهاددهی توأم انرژی و رزرو در بازار برق با رویکرد تصادفی، از تابع چگالی احتمال توأم قیمت‌های انرژی و رزرو استفاده کرده‌اند [۱۲]. یزدان‌نژاد و همکاران (۲۰۱۹) به حل مسأله خودبرنامه‌ریزی واحدهای تولیدی مجازی با روشی استوار و با استفاده از روش تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعات پرداخته و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و تولید توان بادی با دو رویکرد ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز برای ترسیم مرز پارتو استفاده کرده‌اند [۱۳].

در [۱۴] به مسأله پیشنهاددهی هم‌زمان مزرعه بادی در بازار روز بعد و بازار لحظه‌ای پرداخته شده به این نحو که جهت حداکثرسازی سود، بخشی از تولید مزرعه بادی در بازار روز بعد و مازاد یا کمبود تولید نسبت به مقدار پیشنهاد شده در بازار روز بعد در بازار لحظه‌ای مبادله می‌شود. لذا با توجه به عدم قطعیت تولید مزرعه بادی در مدل‌سازی مسأله پیشنهاددهی جریمه‌هایی برای کمبود یا مازاد تولید باید در نظر گرفته شود. از برنامه‌ریزی احتمالی برای مواجهه با عدم قطعیت توان بادی و قیمت بازار استفاده شده است. در [۱۵] مسأله پیشنهاددهی مزرعه بادی در بازار روز بعد و لحظه‌ای بررسی شده است که از روش برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت توان بادی و قیمت بازار استفاده شده و برای کنترل میزان ریسک از ارزش در معرض خطر استفاده شده است. در [۱۶] با در نظر گرفتن

تصمیمات اخذ 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 [۶]. یکی از روش‌های پیش‌بینی بازه‌ای، روش فازی است که با رویکرد امکانی، عدم قطعیت موجود در مسئله را مورد بررسی قرار می‌دهد.

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 ذخایر ۱۴- پیش‌بینی دما ۱۵- پیش‌بینی آب و هوا 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

## ۲-۳- پیشینه تجربی پژوهش

یزدانی‌نژاد و امجدی (۲۰۱۷) مسأله خودبرنامه‌ریزی را با روش بهینه‌سازی تصادفی سناریو محور با عدم قطعیت‌های قیمت و تولید توان بادی برای تولیدکننده برق به منظور شرکت در بازار روز بعد، مدل‌سازی کرده و از معیار ارزش در معرض خطر شرطی<sup>۲</sup> برای کنترل ریسک مسأله استفاده کرده‌اند [۷]. خالویی و همکاران (۲۰۱۹) به مدل‌سازی مسأله خودبرنامه‌ریزی با رویکرد ترکیبی احتمالی-امکانی با روش‌های فازی و سناریو پردازی پرداخته و از معیار ارزش در معرض خطر شرطی برای کنترل ریسک ناشی از عدم قطعیت‌هایی مثل قیمت، توان تولید بادی، امکان خروج اضطراری و فراخوانی برای رزرو استفاده کرده‌اند [۸]. گروهی و انصاری (۲۰۲۰) در مسأله خودبرنامه‌ریزی

<sup>3</sup> jiao

<sup>2</sup> CVaR

و رزرو می‌پردازد. در مدل‌سازی مسأله خود برنامه‌ریزی از برنامه ریزی تصادفی سناریو محور برای مواجهه با عدم قطعیت های قیمت و توان تولیدی انرژی باد و همچنین عدم قطعیت مربوط به رفتار مالکان خودروهای برقی که سبب پیچیده شدن بیشتر مسأله می‌شود، استفاده می‌کند. در [۲۲] به مسأله همراهی سیستم ذخیره هوای فشرده با مزرعه بادی می‌پردازد. با ارائه یک مدل خودبرنامه ریزی استوار تنظیم پذیر مسأله شرکت در بازار روز بعد را مدل‌سازی کرده است. بازه های عدم قطعیت توان تولیدی باد و قیمت بازار به صورت یک مجموعه عدم قطعیت چندوجهی مورد توجه قرار گرفته به شکلی که استواری مدل با بودجه عدم قطعیت قابل کنترل است. در [۲۳] به مسأله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی برای شرکت در بازارهای روز بعد، میان روزی و تنظیم پرداخته و از برنامه ریزی تصادفی سناریو محور برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده شده است. در این پژوهش یک مزرعه بادی و یک سیستم ذخیره ساز با هدف بیشینه سازی سود در دو حالت همکارانه و غیر همکارانه مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که حالت همکارانه سود بیشتری عاید مجموعه می‌کند.

### ۳- نظریه امکان

با شکل‌گیری منطق فازی نظریه‌های زیادی برای شناسایی و درک جنبه های عدم اطمینان در فضای تصمیم و پیشامدهای مبهم و امکان‌پذیر آن توسعه یافته است. از بین این نظریه‌ها، نظریه امکان منسجم‌ترین و مناسب‌ترین نظریه در تحلیل عدم اطمینان محیط تصمیم به شمار می‌آید. محتوی کلی این نظریه بیان می‌دارد که در تحلیل شرایط و پیشامدهای محیطی نباید تنها به دنبال وقوع پدیده های محتمل باشیم بلکه باید به دنبال یافتن تمامی پدیده‌های امکان‌پذیری باشیم که با درجه امکان خود این پدیده‌ها و درجه امکان پدیده‌های متناقض آنها معرفی می‌شوند. در این نگرش پیشامدها و نقیض آنها مانند نظریه احتمال رو در روی هم قرار نمی‌گیرند. در نظریه احتمال شاخص احتمال یک رخداد به احتمال عدم وقوع نقیض آن رخداد تعبیر می‌شود در حالیکه در نظریه جامع‌تر امکان عدم قطعیت هر رخدادی توسط دو شاخص درجه امکان و درجه لزوم (درجه امکان رخداد نقیض - ۱ = درجه لزوم) آن بیان می‌شود که الزاما درجه امکان و درجه الزام یک رخداد برابر نیستند [۲۴].

عدم قطعیت باد به صورت مجموعه از سناریوها و همچنین در لحاظ کردن جریمه عدم تعادل به بررسی عملکرد چند مزرعه بادی بر اساس مشارکت یا عدم مشارکت پرداخته شده است. در یک حالت مزارع بادی به صورت مستقل و مجزا در بازار شرکت می‌کنند، در حالت دوم در عین اینکه به صورت مجزا در بازار شرکت می‌کنند با این وجود تعاملاتی با یکدیگر دارند تا عدم تعادل یکدیگر را جبران کنند. و در حالت سوم همه مزارع به صورت تجمیع شده در بازار شرکت می‌کنند و طبق یافته های این پژوهش سودبخشی این حالت از حالت های قبلی بیشتر است. در [۱۷] نحوه مشارکت مزرعه بادی در دو بازار انرژی و رزرو مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش با دو استراتژی نسبی و ثابت به مسأله عدم تعادل پرداخته شده است. در استراتژی نسبی در صورت تخطی از مقدار پیش بینی شده توان نسبت به مقدار تعهد شده میزان عرضه به هر دو بازار را متناسب با مقدار پیشنهادی تغییر می‌دهند ولی در استراتژی ثابت باید ابتدا میزان توان تعهد شده به بازار رزرو تعلق گیرد و سپس میزان باقیمانده به بازار انرژی عرضه شود. در [۱۸] یک مسأله خودبرنامه ریزی برای نیروگاه بادی در کنار یک ذخیره ساز مورد بررسی قرار گرفته است و از طریق یک مسأله بهینه سازی محدودیت شانس فرمول بندی شده و سپس با تبدیل به یک مدل قطعی خطی حل شده است. در این تحقیق افق زمانی خودبرنامه ریزی بر سود ترکیب نیروگاه بادی و ذخیره ساز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۹] یک مسأله خودبرنامه ریزی برای یک نیروگاه مجازی شامل مزرعه بادی و ذخیره ساز برای شرکت در بازار انرژی و رزرو مدل‌سازی شده است. عدم قطعیت توان بادی و فراخوانی برای تأمین رزرو به صورت بازه ای و عدم قطعیت قیمت به صورت سناریو مدل‌سازی شده است. مدل در قالب مسأله بهینه سازی استوار تنظیم پذیر تصادفی طرح و به وسیله الگوریتم تولید متغیر و محدودیت حل شده است. این مدل بهینه سازی استوار تصادفی از طریق یک برنامه ریزی سه مرحله ای فرمول بندی شده است. در [۲۰] مسأله برنامه ریزی تولید در یک ریزشکه با مزرعه بادی برای صنایع انرژی بر، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق برای مقابله با عدم قطعیت باد از بهینه سازی استوار استفاده شده است. در [۲۱] به یک نیروگاه مجازی که شامل نیروگاه بادی و پارکینگ خودروهای برقی با قابلیت شارژ و دشارژ خودروها می‌باشد برای شرکت در بازار انرژی

جدول ۲- مقایسه پژوهش حاضر با سایر پژوهش ها

رویکرد مواجهه با عدم قطعیت	روش کنترل ریسک	بازار لحظه ای	بازار رزرو	بازار روز بعد	عدم قطعیت باد	عدم قطعیت قیمت	مرجع
	ارزش در معرض خطر			✓	سناریو	سناریو	۱۶
احتمالی- امکانی	ارزش در معرض خطر		✓	✓	سناریو	سناریو	۱۷
تصادفی- فازی	ارزش در معرض خطر		✓	✓	تصادفی	سناریو	۱۸
احتمالی	ریسک گریز		✓	✓	تصادفی	تصادفی	۱۹
IGDT استوار-	ریسک گریز		✓	✓	بازه ای	بازه ای	۲۰
احتمالی	-		✓	✓	-	تصادفی	۲۱
IGDT استوار-	بودجه عدم قطعیت		✓	✓	-	بازه ای	۲۲
احتمالی	واریانس خطا	✓	✓	✓	تصادفی	تصادفی	۲۳
احتمالی	ارزش در معرض خطر	✓	✓	✓	سناریو	تصادفی	۲۴
احتمالی	ارزش در معرض خطر				سناریو	سناریو	۲۵
احتمالی	-	✓	✓	✓	تصادفی	ثابت	۲۶
احتمالی	محدودیت شانس		✓	✓	تصادفی	-	۲۷
استوار- احتمالی	-		✓	✓	بازه ای	سناریو	۲۸
استوار	-		✓	✓	سناریو	سناریو	۲۹
احتمالی	ارزش در معرض خطر		✓	✓	سناریو	سناریو	۳۰
استوار	بودجه عدم قطعیت		✓	✓	بازه ای	بازه ای	۳۱
احتمالی	-	✓			سناریو	سناریو	۳۲
امکانی- احتمالی	تنظیم سطوح امکان و احتمال	✓	✓	✓	فازی	تصادفی فازی	مقاله حاضر

وجود دارد که بیانگر ضرورت ترکیب نظریه احتمال و نظریه فازی در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی می‌باشد.

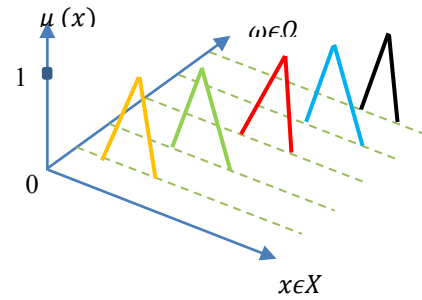
متغیر تصادفی فازی مفهوم بسط یافته از متغیر تصادفی است که برای هر پیشامد ممکن از یک آزمایش تصادفی، یک مجموعه فازی تخصیص می‌دهد. دیدگاه‌های متفاوتی درباره متغیر تصادفی فازی وجود دارد اما در همه آنها تصادفی بودن و فازی بودن با هم به نوعی ترکیب شده است. به بیانی می‌توان گفت متغیرهای تصادفی فازی نوعی از متغیرهای تصادفی هستند که بجای مقادیر دقیق و قطعی مقادیر فازی اختیار می‌کنند. برای تعریف ریاضی متغیر تصادفی فازی ابتدا فرض می‌کنیم  $(\Omega, B, P)$  یک فضای احتمال و  $F(\mathbb{R})$  مجموعه اعداد فازی با محمل فشرده است.  $X$  نگاشت اندازه‌پذیر از  $\Omega$  به  $F(\mathbb{R})$  را یک متغیر تصادفی فازی گوئیم اگر و تنها اگر به ازای هر  $\omega \in \Omega$ ،  $X_\alpha(\omega)$  (به ازای هر  $\alpha \in (0, 1]$ ) یک بازه تصادفی باشد به طوریکه  $X_\alpha(\omega)$  یک مجموعه  $\alpha$ -سطح از مجموعه فازی  $X(\omega)$  باشد. با وجود اینکه در تعاریف متغیرهای تصادفی فازی تفاوت‌های جزئی وجود دارد اما می‌توان گفت به طور کلی متغیر تصادفی فازی یک متغیر تصادفی است که مقادیر مشاهده شده آن به صورت مجموعه‌های فازی نمایش داده

اندازه احتمال به جنبه تصادفی یک پدیده یا متغیر می‌پردازد در حالیکه اندازه امکان به جنبه امکانی آن ارتباط دارد. مفهوم احتمال دربرگیرنده مفاهیمی مثل فراوانی نسبی، تکرار، تصادف و شانس می‌باشد و کاربرد آن در مواقعی است که عدم اطمینان یک متغیر یا رخداد ناشی از تصادفی بودن آن باشد. اما مفهوم امکان در برگیرنده مفاهیمی مثل میزان تطابق و سازگاری می‌باشد و کاربرد آن در مواردی است که عدم اطمینان یک متغیر یا رخداد ناشی از نادقیق بودن و ابهام آن یا درک مبهم ما از آن رخداد باشد [۲۵].

#### ۴- متغیرهای تصادفی فازی

نظریه احتمال به عدم قطعیت آماری و نظریه مجموعه‌های فازی به عدم قطعیت امکانی شامل عدم قطعیت‌های ناشی از قضاوت، عقیده و تشخیص انسانی می‌باشد. این دو نظریه در عین حال که تناقضی با یکدیگر ندارند، ذاتی متفاوت با هم داشته در دنیای واقعی جمع‌آوری اطلاعات دقیق در بسیاری از حوزه‌های عملی به سختی امکان‌پذیر است که این امر به دلیل نامعلوم بودن تعدادی از عوامل دخیل در مسئله می‌باشد. در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری، عوامل تصادفی و اطلاعات فازی همزمان در ذات مسئله

می‌شود [۲۶]. شکل (۱) نمونه ای از مجموعه حالات تحقق یک متغیر تصادفی فازی است [۲۷].



شکل ۱ - نمودار متغیر تصادفی فازی

### ۵- بهینه‌سازی با ضرایب متغیر تصادفی فازی

در مسائل بهینه‌سازی همراه با عدم اطمینان ضرایب متغیرهای مسأله پارامترهای عدم قطعیت است. این عدم قطعیت‌ها می‌تواند به صورت پارامترهای تصادفی و فازی ظاهر شود. گاهی هم تصادفی بودن و فازی بودن همزمان در ذات پارامترها وجود دارد که در رابطه ۱ نمونه ای از چنین مسأله‌ای نمایش داده شده است. علائم خط تیره بالا و مد به ترتیب نشانه تصادفی بودن و فازی بودن همزمان است.

$$\text{Max } z(x_1, x_2) = \bar{C}_1 x_1 + \bar{C}_2 x_2 = \bar{C} X \quad (۱)$$

st : S

ضرایب  $\bar{C}_i$  متغیرهای تصادفی فازی هستند که به شکل تابع عضویت رابطه ۲ نمایش داده می‌شوند که به فرم اعداد فازی  $LR$  مطابق روابط ۲ تا ۸ تعریف می‌شوند. توابع  $\lambda(t)$  و  $\rho(t)$  توابع کاهشی یکنواخت می‌باشند به طوریکه  $\rho(0) = 1$  و  $\lambda(0) = 1$  می‌باشد. در این پژوهش این توابع به صورت روابط ۷ و ۸ تعریف می‌شود.

$$\mu_{\bar{C}_i}(\tau) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{d}_i - \tau}{\bar{\beta}_i}\right), & \text{if } \tau \leq \bar{d}_i \\ R\left(\frac{\tau - \bar{d}_i}{\bar{\alpha}_i}\right), & \text{if } \tau \geq \bar{d}_i \end{cases} \quad (۲)$$

$$L : [0, \infty) \rightarrow [0, 1] \quad (۳)$$

$$R : [0, \infty) \rightarrow [0, 1] \quad (۴)$$

$$L(t) = \max \{ 0, \lambda(t) \} \quad (۵)$$

$$R(t) = \max \{ 0, \rho(t) \} \quad (۶)$$

$$\lambda(x) = 1 - x \quad (۷)$$

$$\rho(x) = 1 - x \quad (۸)$$

با توجه به روابط ۷ و ۸ رابطه ۲ به صورت روابط ۹ تا ۱۱

تعریف می‌شود.

$$L\left(\frac{\bar{d}_i - \tau}{\bar{\beta}_i}\right) = 1 - \frac{\bar{d}_i - \tau}{\bar{\beta}_i} = \frac{\bar{\beta}_i - \bar{d}_i + \tau}{\bar{\beta}_i} \quad (۹)$$

$$R\left(\frac{\tau - \bar{d}_i}{\bar{\alpha}_i}\right) = 1 - \frac{\tau - \bar{d}_i}{\bar{\alpha}_i} = \frac{\bar{\alpha}_i - \tau + \bar{d}_i}{\bar{\alpha}_i} \quad (۱۰)$$

$$\mu_{\bar{C}_i}(\tau) = \begin{cases} \frac{\bar{\beta}_i - \bar{d}_i + \tau}{\bar{\beta}_i} & \tau \leq \bar{d}_i \\ \frac{\bar{\alpha}_i - \tau + \bar{d}_i}{\bar{\alpha}_i} & \tau \geq \bar{d}_i \end{cases} \quad (۱۱)$$

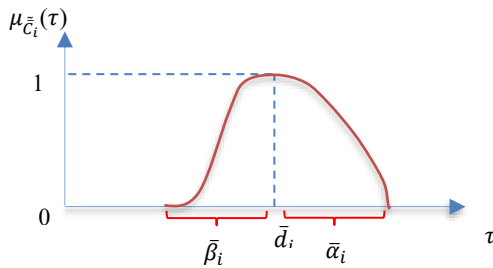
پارامترهای  $\bar{d}_i$  و  $\bar{\beta}_i$  و  $\bar{\alpha}_i$  به ترتیب مقدار میانی، مقدار انحراف چپ و مقدار انحراف راست  $\bar{C}_i$  می‌باشد. این پارامترها متغیرهای تصادفی هستند که به شکل روابط ۱۲ تا ۱۴ با استفاده از متغیر تصمیم  $\bar{t}$  با امید ریاضی  $m$  تعریف می‌شوند.

$$\bar{d}_i = d_i^1 + \bar{t} \cdot d_i^2 \quad (۱۲)$$

$$\bar{\beta}_i = \beta_i^1 + \bar{t} \cdot \beta_i^2 \quad (۱۳)$$

$$\bar{\alpha}_i = \alpha_i^1 + \bar{t} \cdot \alpha_i^2 \quad (۱۴)$$

نمای کلی یک متغیر تصادفی فازی به صورت شکل (۲) می‌باشد.

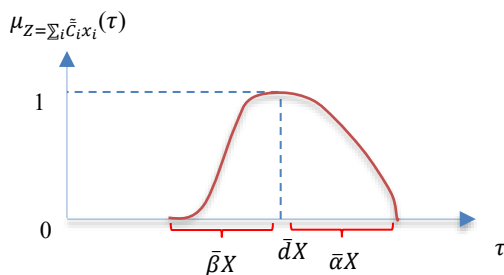


شکل ۲- نمودار متغیر تصادفی فازی

تابع عضویت عبارت  $\bar{C}_i x_i$  به صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود.

$$\mu_{\bar{C}_i x_i}(\tau) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{d}_i x_i - \tau}{\bar{\beta}_i x_i}\right), & \text{if } \tau \leq \bar{d}_i x_i \\ R\left(\frac{\tau - \bar{d}_i x_i}{\bar{\alpha}_i x_i}\right), & \text{if } \tau \geq \bar{d}_i x_i \end{cases} \quad (۱۵)$$

و به همین ترتیب برای  $Z = \sum_i \bar{C}_i x_i$  تابع عضویت به صورت رابطه ۱۶ تعریف و مطابق شکل (۳) ترسیم می‌شود.

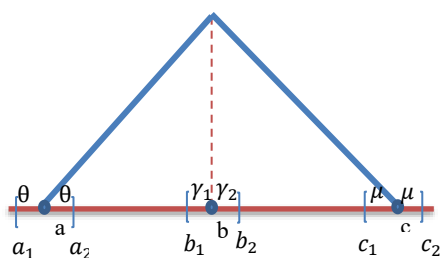


شکل ۳- نمودار تابع هدف به صورت تصادفی فازی

قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار استفاده شده و بدین ترتیب بازه عدم قطعیت مورد نظر شکل گرفته است. قیمت تسویه بازار در ساعت  $t$  به صورت یک متغیر تصادفی فازی با نماد  $\overline{\lambda^E}(t)$  تعریف می‌شود به طوری که مقدار تخمینی قیمت برق معادل یک عدد فازی LR با مقادیری تصادفی است که در روابط ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

$$\overline{\lambda^E}(t) = (\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}) \quad (17)$$

$$\bar{a} \in [a_1, a_2], \bar{b} \in [b_1, b_2], \bar{c} \in [c_1, c_2] \quad (18)$$



شکل ۴- نمودار قیمت به صورت عدد تصادفی فازی

سه تایی  $(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c})$  نماد یک عدد تصادفی فازی است به طوری که مقدار تصادفی  $\bar{b}$  که در بازه  $[b_1, b_2]$  مقدار می‌گیرد نقطه میانی، مقدار تصادفی  $\bar{a}$  که در بازه  $[a_1, a_2]$  مقدار می‌گیرد، حد پایین و مقدار تصادفی  $\bar{c}$  که در بازه  $[c_1, c_2]$  مقدار می‌گیرد حد بالای عدد فازی مثلثی می‌باشد. به منظور استفاده از فرم تابع عضویت فازی LR از رابطه ۱۹ استفاده می‌کنیم به این صورت که مقادیر سه تایی  $(d, \alpha, \beta)$  به ترتیب از چپ به راست بیانگر حد وسط، انحراف راست و انحراف چپ از مقدار میانی است.

$$(d, \alpha, \beta) = (\bar{b}, \bar{c} - \bar{b}, \bar{b} - \bar{a}) \quad (19)$$

از آنجاکه در این پژوهش تمرکز بر پیش‌بینی قیمت نیست به منظور تعریف متغیر قیمت تسویه بازار به صورت عدد تصادفی فازی بر اساس داده‌های واقعی قیمت موجود در سایت ایرما، متوسط قیمت در هر ساعت و بیشترین و کمترین قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار به عنوان مقادیر سه تایی  $(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c})$  در نظر گرفته شده و سپس برای تبدیل آن به فرم متغیر تصادفی فازی با استفاده از نظرات خبرگان از روابط ۲۰ تا ۲۲ استفاده شده است.

$$\gamma_1 = 0.2 (b-a) \quad (20)$$

$$\gamma_2 = 0.2 (c-b) \quad (21)$$

$$\theta = 0.2 (b-a) \quad (22)$$

$$\mu_{\sum_i \bar{c}_i x_i}(\tau) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{d}X - \tau}{\bar{\beta}X}\right) = \frac{\bar{\beta}X - \bar{d}X + \tau}{\bar{\beta}X} & \tau \leq \bar{d}X \\ R\left(\frac{\tau - \bar{d}X}{\bar{\alpha}X}\right) = \frac{\bar{\alpha}X - \tau + \bar{d}X}{\bar{\alpha}X} & \tau \geq \bar{d}X \end{cases} \quad (16)$$

$$\bar{d}X = \sum_i \bar{d}_i x_i$$

$$\bar{\beta}X = \sum_i \bar{\beta}_i x_i$$

$$\bar{\alpha}X = \sum_i \bar{\alpha}_i x_i$$

## ۶- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش کمی پیش رو، پژوهشی کاربردی و توسعه‌ای است که به دنبال توسعه مدل‌های بهینه‌سازی استوار پیشنهاددهی در بازار برق است که در مواجهه با عدم قطعیت رویکردی فازی دارد. با توجه به اینکه این پژوهش به دنبال بررسی عدم قطعیت و تشریح و تبیین آن در تصمیم‌گیری 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 تولیدکننده برق است که به صورت یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح ارائه می‌شود. به منظور مواجهه با عدم قطعیت پارامترهای غیر قطعی از رویکرد همزمان فازی و تصادفی استفاده 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.

## ۷- تبیین مدل پیشنهادی

در این بخش به تشریح مدل پیشنهادی برای مسئله پیشنهاددهی یک تولیدکننده قیمت‌پذیر برق در بازار روز بعد انرژی الکتریکی و به طور همزمان بازار رزرو چرخان پرداخته شده است. از این رو می‌بایست تخمینی از قیمت بازار روز بعد و قیمت بازارهای رزرو و لحظه‌ای در دسترس باشد. پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته و به شیوه‌های متنوعی به پیش‌بینی قیمت برق پرداخته شده است. از آنجاکه در پژوهش حاضر تمرکز بر پیش‌بینی قیمت نیست از داده‌های قیمت سایت بازار برق ایران (ایرما) که شامل متوسط قیمت در هر ساعت و بیشترین و کمترین



در بازار برق در صورتیکه تولیدکننده قادر به ارائه مقدار انرژی برنامه‌ریزی شده که در روند تسویه بازار متعهد به ارائه آن شده بود نباشد باید در بازار لحظه‌ای مورد جریمه واقع شود. به دلیل اینکه توان تولیدی مزارع بادی ماهیت تصادفی دارد وابستگی بیشتری به بازار لحظه‌ای برای تعادل بخشی به کمبود یا مازاد تولید آنها وجود دارد. از این رو مدیریت صحیح عدم قطعیت تولید واحدهای بادی در یک بازار لحظه‌ای قابل اجراست. و بازار لحظه‌ای تضمین کننده ایجاد تعادل بین تولید و مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد. در بازارهای برق وجود انحراف از مقادیر برنامه ریزی شده کاملاً طبیعی می‌باشد. این انحراف و عدم تعادل می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. در عدم تعادل مثبت تولید بیشتر از مقدار برنامه ریزی شده و در عدم تعادل منفی تولید کمتر از مقدار برنامه ریزی شده است. تولیدکنندگانی که با عدم تعادل در مقدار انرژی برنامه ریزی شده شان مواجه می‌شوند باید از طریق خرید یا فروش در بازار لحظه‌ای آنرا جبران کنند. در بازار لحظه‌ای برای انحرافات مثبت  $\Delta^+$  (مازاد تولید) قیمت  $\lambda^+$  و برای انحرافات منفی  $\Delta^-$  (کمبود تولید) قیمت  $\lambda^-$  لحاظ می‌شود. با فرض اینکه قیمت بازار روز بعد با نماد  $\lambda^D$  تعریف شود مقادیر  $r^+$  و  $r^-$  به صورت روابط ۳۳ و ۳۴ تعریف می‌شود.

$$r^+ = \frac{\lambda^+}{\lambda^D}, \quad r^+ \leq 1 \quad (33)$$

$$r^- = \frac{\lambda^-}{\lambda^D}, \quad r^- \geq 1 \quad (34)$$

بنابر این در بازار لحظه‌ای درآمد عدم تعادل مثبت و هزینه عدم تعادل منفی برابر روابط ۳۵ و ۳۶ خواهد بود.

$$r^+ \cdot \lambda^D \cdot \Delta^+ \quad (35)$$

$$r^- \cdot \lambda^D \cdot \Delta^- \quad (36)$$

در مسأله خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده برق، تابع هدف در مدل هماهنگ واحدهای بادی-حرارتی معادل سود حاصل از درآمدهای بازار روز بعد، بازار رزرو و هزینه‌های تولید و راه اندازی واحد حرارتی و همچنین درآمدها یا هزینه‌های بازار لحظه‌ای می‌باشد. در ادامه ابتدا به معرفی پارامترها و متغیرهای مسأله و سپس به معرفی مدل بهینه‌سازی پیشنهادی پرداخته می‌شود.

$$\mu = 0.2(c-b) \quad (23)$$

$$a_1 = a - \theta \quad (24)$$

$$a_2 = a + \theta \quad (25)$$

$$b_1 = b - \gamma_1 \quad (26)$$

$$b_2 = b + \gamma_2 \quad (27)$$

$$c_1 = c - \mu \quad (28)$$

$$c_2 = c + \mu \quad (29)$$

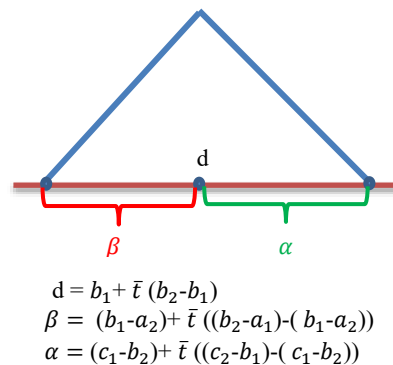
$$d = b_1 + \bar{t}(b_2 - b_1) \quad (30)$$

$$\alpha = (c_1 - b_2) + \bar{t}((c_2 - b_1) - (c_1 - b_2)) \quad (31)$$

$$\beta = (b_1 - a_2) + \bar{t}((b_2 - a_1) - (b_1 - a_2)) \quad (32)$$

مقادیر سه تایی  $(d, \alpha, \beta)$  مطابق روابط ۳۰ تا ۳۲ محاسبه شده است. به این شکل که مقدار  $d$  که در واقع مقداری تصادفی در بازه  $[b_1, b_2]$  است، معادل حاصل جمع مقدار حد پایین بازه  $(b_1)$  و مقدار حاصل ضرب  $\bar{t}$  (مقدار تصادفی در بازه  $[0, 1]$  با توزیع نرمال استاندارد) در تفاضل حد بالای بازه و حد پایین بازه  $(b_2 - b_1)$  می‌باشد.

مقدار تصادفی  $\alpha$  معادل حاصل جمع حد پایین با حاصل ضرب مقدار تصادفی  $\bar{t}$  در تفاضل حد بالا و حد پایین بازه  $(\bar{c} - \bar{b})$  که حد پایین آن برابر  $(c_1 - b_2)$  و حد بالای آن برابر  $(c_2 - b_1)$  می‌باشد. مقدار تصادفی  $\beta$  هم به همین ترتیب محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که  $\alpha$  مقداری تصادفی در بازه  $[(c_1 - b_2), (c_2 - b_1)]$  و  $\beta$  مقداری تصادفی در بازه  $[(b_1 - a_2), (b_2 - a_1)]$  است. در نهایت متغیر تصادفی فازی به صورت نمودار شکل (۵) ترسیم می‌شود.



شکل ۵- متغیر تصادفی فازی

جدول ۳ - اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها

اندیس‌ها			
T	ساعات شبانه روز	n	تعداد بلوک های منحنی تولید
پارامترها			
STUC	هزینه هر بار روشن شدن نیروگاه حرارتی	MUT	مینیمم زمانی که نیروگاه حرارتی پس از روشن شدن باید روشن بماند
STU(t)	هزینه روشن شدن نیروگاه حرارتی در ساعت t	MDT	مینیمم زمانی که نیروگاه حرارتی پس از خاموش شدن باید خاموش بماند
$q_n^{max}$	حداکثر توان تولید شده در بلاک n ام از منحنی تولید	$C_n$	هزینه تولید در n امین بلاک از منحنی هزینه تولید تکه ای خطی
STURL	نرخ افزایش تولید از حالت توقف (مگاوات / ساعت)	STDRL	نرخ کاهش تولید برای رسیدن به حالت توقف (مگاوات / ساعت)
RDR	نرخ کاهش توان نیروگاه حرارتی (مگاوات در ساعت) حداکثر نرخ کاهش تولید (مگاوات / ساعت)	RUR	نرخ افزایش توان واحد حرارتی (مگاوات در ساعت) حداکثر نرخ افزایش تولید (مگاوات / ساعت)
متغیرهای تصمیم			
$p^{th,S}(t)$	مقدار پیشنهادی برای بازار رزرو که توسط نیروگاه حرارتی تولید می‌شود	$p^{th,Ac}(t)$	تولید واقعی واحد حرارتی در ساعت t
$p^{th,E}(t)$	مقدار پیشنهادی برای بازار روز بعد که توسط نیروگاه حرارتی تولید می‌شود	$P^W(t)$	مقدار پیشنهادی برای بازار روز بعد که توسط نیروگاه بادی تولید می‌شود
$EG(b,t)$	توان تولید شده واحد حرارتی در n امین بلاک از منحنی هزینه تولید تکه ای خطی در ساعت t	$P^C(t)$	مجموع کل انرژی پیشنهاد شده به بازار روز بعد توسط واحد حرارتی و بادی در ساعت t
$Y(t)$	متغیر باینری که وضعیت خاموش شدن نیروگاه حرارتی را در ساعت t نشان می‌دهد	$X(t)$	متغیر باینری که وضعیت روشن شدن نیروگاه حرارتی را در ساعت t نشان می‌دهد
$U(t)$	متغیر باینری که وضعیت پذیرش در بازار روز بعد را در ساعت t نشان می‌دهد	$ES(t)$	توان پیشنهاد شده به بازار رزرو توسط نیروگاه حرارتی
$\Delta^+(t)$	عدم تعادل مثبت	$ET(t)$	مجموع توان پیشنهاد شده توسط نیروگاه حرارتی به بازار روز بعد و رزرو
$\Delta^-(t)$	عدم تعادل منفی		
متغیرها			
$\widehat{\lambda^E}(t)$	قیمت بازار روز بعد در ساعت t	$\widehat{\lambda^S}(t)$	قیمت بازار رزرو در ساعت t
$\widehat{P^{W,F}}(t)$	مقدار محقق شده توان بادی		

مدل‌سازی مسأله خودبرنامه‌ریزی پیشنهادی برای مشارکت هماهنگ دو واحد حرارتی و بادی در بازارهای روز بعد و رزرو به صورت روابط ۳۷ تا ۶۵ تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \text{Max} Z = & \sum_{t=1}^T [\widehat{\lambda^E}(t) \cdot P^{th,E}(t) + \widehat{\lambda^E}(t) \cdot P^W(t) + \widehat{\lambda^S}(t) \cdot P^{th,S}(t) + \\
 & \widehat{\lambda^E}(t) \cdot r^+(t) \cdot j(t) \cdot \Delta^+(t) + \widehat{\lambda^E}(t) \cdot r^-(t) \cdot (1-j(t)) \cdot \Delta^-(t)] - \left[ \sum_{t=1}^T [c_0 u_t + \right. \\
 & \left. \sum_{b=1}^{N_b} c_b \cdot EG(b,t) + STU(t) \right]
 \end{aligned} \quad (37)$$

$$0 \leq ES(t) \leq PS^{max} u(t) \quad \forall t \quad (38)$$

$$P^{min} u(t) \leq ET(t) \leq P^{max} u(t) \quad \forall t \quad (39)$$

$$ES(t) = P^{th,S}(t) \quad \forall t \quad (40)$$

$$ET(t) = \sum_{n=1}^{N_n} EG(n, t) + ES(t) \quad \forall t \quad (41)$$

$$0 \leq P^W(t) \leq P^{W,max}(t) \quad \forall t \quad (42)$$

$$P^C(t) = P^{th,E}(t) + P^W(t) \quad \forall t \quad (43)$$

$$0 \leq \Delta^+(t) \leq \widehat{P^{W,F}}(t) + P^{th,AC}(t) \quad \forall t \quad (44)$$

$$0 \leq \Delta^-(t) \leq P^{W,max}(t) + P^{max} \cdot u(t) \quad \forall t \quad (45)$$

$$\Delta(t) = \widehat{P^{W,F}}(t) + P^{th,Ac}(t) - P^{th,E}(t) - P^W(t) \quad \forall t \quad (46)$$

$$\Delta(t) = \Delta^+(t) - \Delta^-(t) \quad \forall t \quad (47)$$

$$\Delta^+(t) \leq MB * J(t) \quad \forall t \quad (48)$$

$$\Delta^-(t) \leq MB * (1 - J(t)) \quad \forall t \quad (49)$$

$$\Delta^+(t) = \widehat{P^{W,F}}(t) + P^{th,Ac}(t) - P^{th,E}(t) - P^W(t) \quad \forall t \quad (50)$$

$$\Delta^-(t) = P^{th,E}(t) + P^W(t) - P^{th,Ac}(t) - \widehat{P^{W,F}}(t) \quad \forall t \quad (51)$$

$$\sum_{n=1}^{N_n} EG(n, t) = P^{th,AC}(t) \quad \forall t \quad (52)$$

$$P^{th,E}(t) \leq \sum_{b=1}^{N_b} EG(n, t) \quad \forall t, n \quad (53)$$

$$0 \leq STU(t) \geq STUC \cdot X(t) \quad \forall t \quad (54)$$

$$\sum_{i=t-MUT+1}^{i=t} x(i) \leq u(t) \quad \forall t \quad (55)$$

$$U(t) + \sum_{i=t-MDT+1}^{i=t} Y(i) \leq 1 \quad \forall t \quad (56)$$

$$U(t-1) - U(t) + X(t) - Y(t) = 0 \quad \forall t > 1 \quad (57)$$

$$-U(1) + X(1) - Y(1) = 0 \quad (58)$$

$$\sum_{b=1}^{N_b} EG(n, t) \leq \sum_{b=1}^{N_b} EG(n, t-1) + RUR.U(t-1) + STURL.X(t) \quad \forall t > 1, n \quad (59)$$

$$\sum_{b=1}^{N_b} EG(n, t-1) \leq \sum_{b=1}^{N_b} EG(n, t) + RDR.U(t) + STDRL.Y(t) \quad \forall t > 1, n \quad (60)$$

$$EG(n, t) \geq q_n^{max} - q_{n-1}^{max} - MB.(1 - e(n, t)) \quad \forall t, n \quad (61)$$

$$EG(1, t) \geq q_1^{max} - MB.(1 - e(1, t)) \quad \forall t, n \quad (62)$$

$$0 \leq EG(n, t) \leq q_n^{max} . e(n, t) \quad \forall t, n \quad (63)$$

$$e(n, t) \leq MB . EG(n, t) \quad \forall t, n \quad (64)$$

$$ep . EG(n, t) \leq e(n, t) \quad \forall t, n \quad (65)$$

روابط ۵۷ و ۵۸ مربوط به متغیرهای روشن و خاموش شدن نیروگاه است. روابط ۵۹ تا ۶۵ هم مرتبط با میزان تولید نیروگاه حرارتی در هر یک از زیر بازه‌های منحنی تولید می‌باشد. هزینه تولید واحد حرارتی به ازای مقدار تولید به صورت منحنی درجه دو می‌باشد که برای جلوگیری از غیرخطی شدن مدل در بسیاری از پژوهش‌ها از منحنی شکسته خطی به جای منحنی درجه دو استفاده می‌شود که شامل چند زیربازه می‌باشد. در هر یک از این زیربازه های تولید، هزینه تولید به صورت خطی ضریبی از مقدار تولید انرژی است.

میزان توان تولید بادی یکی دیگر از متغیرهای عدم قطعیت است که در این پژوهش به صورت عدد فازی به شکل رابطه ۶۶ تعریف می‌شود.

$$\overline{P^{W,F}}(t) = (p_1^w, p_2^w, p_3^w) \quad (66)$$

وجود یک عدد فازی در معادلات (مساوی یا نامساوی) سبب غیر قطعی شدن روابط می‌شود. در مدل بهینه‌سازی فوق نیز وجود متغیر غیر قطعی توان بادی سبب غیر قطعی شدن برخی روابط می‌شود. روابط ۸ تا ۱۰ و ۱۴ تا ۱۷ روابطی غیر قطعی تلقی می‌شوند که می‌تواند در سطوح اطمینان مختلفی محقق شود. با استفاده از قواعد منطق فازی و با

رابطه ۳۷ بیانگر تابع هدف سود می‌باشد که شامل درآمدهای حاصل از فروش انرژی الکتریکی واحد حرارتی و واحد بادی در بازار روز بعد و بازار رزرو بعلاوه هزینه تولید توان الکتریکی در نیروگاه حرارتی بعلاوه درآمد یا هزینه مربوط به عدم تعادل که در بازار لحظه‌ای اتفاق می‌افتد. متغیر  $J$  مشخص می‌کند که از عدم تعادل مثبت و منفی فقط یکی می‌تواند اتفاق بیفتد.

رابطه ۳۸ تا ۴۱ حدود و معادلات مربوط به توان پیشنهاد شده به بازارهای روز بعد و رزرو توسط نیروگاه حرارتی را نشان می‌دهد. رابطه ۴۲ حدود مقدار توان پیشنهاد شده به بازار روز بعد توسط واحد بادی را مشخص می‌کند. رابطه ۴۳ بیانگر کل توان پذیرفته شده در بازار روز بعد است. روابط ۴۴ تا ۵۱ بیانگر معادلات مربوط به عدم تعادل مثبت و منفی است. روابط ۴۸ و ۴۹ به کمک متغیر کمکی صفر و یک  $J$  بیان می‌دارد که از بین تعادل مثبت و منفی فقط یکی می‌تواند مقدار بگیرد. روابط ۵۲ و ۵۳ مربوط به کل تولید واحد حرارتی و مقدار پیشنهاد شده این واحد به بازار روز بعد است. رابطه ۵۴ مربوط به هزینه روشن شدن نیروگاه حرارتی است. روابط ۵۵ و ۵۶ معادلات مربوط به حداقل زمان روشن ماندن نیروگاه بعد از روشن شدن و حداقل زمان خاموش ماندن بعد از خاموش شدن نیروگاه است.

$$B \leq_{\pi} \tilde{A} \cong \text{pos} \{ B \leq \tilde{A} \} \geq \pi \cong \quad (۶۸)$$

$$\frac{\sigma_3 - B}{\sigma_3 - \sigma_2} \geq \pi \cong B \leq \pi \cdot \sigma_2 + (1 - \pi) \cdot \sigma_3$$

$$(0 \leq \pi \leq 1)$$

بنابراین با استفاده از معیار امکان، روابط فازی به شکل روابط ۷۱ تا ۷۴ بازنویسی می شوند.

فرض اینکه بخواهیم این روابط غیر قطعی در سطح اطمینان  $\pi$  تحقق یابند از معیار امکان فازی استفاده می کنیم. معیار امکان<sup>۱</sup> فازی از جمله قواعدیست که برای فازی زدایی و قطعی سازی روابط فازی مورد استفاده قرار می گیرد. بنابر قواعد منطق فازی، معیار امکان و درجه تحقق رابطه فازی با معیار امکان در سطح اطمینان  $\pi$  به شکل روابط ۶۷ و ۶۸ تعریف می شود [۲۸].

$$\text{Pos} \{ B \leq \tilde{A} \} = \begin{cases} 1 & , \text{if } B \leq \sigma_2 \\ \frac{\sigma_3 - B}{\sigma_3 - \sigma_2} & , \text{if } \sigma_2 \leq B \leq \sigma_3 \\ 0 & , \text{if } B \geq \sigma_3 \end{cases} \quad (۶۷)$$

$$\Delta(t) - P^{th,Ac}(t) + P^C(t) = P^{\widetilde{W,F}}(t) \Rightarrow \quad (۷۱)$$

$$\Delta(t) - P^{th,Ac}(t) + P^C(t) \leq \pi^* \cdot p_2^w + (1 - \pi^*) p_3^w$$

$$\Delta(t) - P^{th,Ac}(t) + P^C(t) \geq \pi^* \cdot p_2^w + (1 - \pi^*) p_1^w$$

$$\Delta^+(t) - P^{th,Ac}(t) + P^{th,E}(t) + P^W(t) = P^{\widetilde{W,F}}(t) \Rightarrow \quad (۷۲)$$

$$\Delta^+(t) - P^{th,Ac}(t) + P^{th,E}(t) + P^W(t) \leq \pi^* \cdot p_2^w + (1 - \pi^*) p_3^w$$

$$\Delta^+(t) - P^{th,Ac}(t) + P^{th,E}(t) + P^W(t) \geq \pi^* \cdot p_2^w + (1 - \pi^*) p_1^w$$

$$P^{th,E}(t) + P^W(t) - P^{th,Ac}(t) - \Delta^-(t) = P^{\widetilde{W,F}}(t) \Rightarrow \quad (۷۳)$$

$$P^{th,E}(t) + P^W(t) - P^{th,Ac}(t) - \Delta^-(t) \leq \pi^* \cdot p_2^w + (1 - \pi^*) p_3^w$$

$$P^{th,E}(t) + P^W(t) - P^{th,Ac}(t) - \Delta^-(t) \geq \pi^* \cdot p_2^w + (1 - \pi^*) p_1^w$$

$$\Delta^+(t) - P^{th,Ac}(t) \leq_{\pi} P^{\widetilde{W,F}}(t) \quad (۷۴)$$

$$\Delta^+(t) - P^{th,Ac}(t) \leq \pi \cdot p_2^w + (1 - \pi) p_3^w$$

$$\mathbf{Max} \mathbf{Z} = \sum_{t=1}^T [\lambda^E(t) P^{th,E}(t) + \quad (۷۵)$$

$$\lambda^E(t) P^W(t) + k \cdot \lambda^E(t) P^{th,S}(t) +$$

$$j(t) \cdot \lambda^E(t) \cdot r^+(t) (P^{\widetilde{W,F}}(t) + P^{th,Ac}(t) - P^{th,E}(t) - P^W(t)) -$$

$$(1 - j(t)) \cdot \lambda^E(t) \cdot r^-(t) (P^{th,E}(t) + P^W(t) - P^{\widetilde{W,F}}(t) - P^{th,Ac}(t))] -$$

$$[\sum_{t=1}^T [c_0 u_t + \sum_{b=1}^{N_b} c_b \cdot EG(b, t) + STU(t)]]$$

به منظور خطی کردن مدل غیر خطی از تغییر متغیرهای روابط ۷۶ تا ۸۱ استفاده می کنیم [۲۹]. (M عددی بسیار بزرگ)

در رابطه ۳۷ که تعریف کننده تابع هدف مسأله است ضرب متغیر  $j(t)$  در  $\Delta^+(t)$  و عبارت  $(1 - j(t))$  در  $\Delta^-(t)$  سبب غیر خطی شدن مدل می شود. از آنجا که متغیرهای  $\Delta^+(t)$  و  $\Delta^-(t)$  حاوی متغیرهای تصمیم و پارامتر فازی می باشد باید با جایگذاری این متغیرها طبق تعریف روابط ۵۰ و ۵۱ تابع هدف را به فرم رابطه ۷۵ بازنویسی کنیم و همانطور که در این رابطه مشخص است در تابع هدف با ضرب و جمع مقادیر فازی مواجه خواهیم شد. برای سادگی کار قیمت بازار رزرو را ضریبی (k) از قیمت بازار روز بعد در نظر میگیریم.

<sup>1</sup> possibility

$$y_1(t) \leq P^{th,E}(t) \quad (76)$$

$$\begin{aligned} J(t). P^{th,E}(t) = y_1(t) \Rightarrow & y_1(t) \leq M \cdot J(t) \\ & y_1(t) \geq P^{th,E}(t) - M \cdot (1-J(t)) \end{aligned}$$

$$y_2(t) \leq P^W(t) \quad (77)$$

$$\begin{aligned} J(t). P^W(t) = y_2(t) \Rightarrow & y_2(t) \leq M \cdot J(t) \\ & y_2(t) \geq P^W(t) - M \cdot (1-J(t)) \end{aligned}$$

$$y_3(t) \leq P^{th,Ac}(t) \quad (78)$$

$$\begin{aligned} J(t). P^{th,Ac}(t) = y_3(t) \Rightarrow & y_3(t) \leq M \cdot J(t) \\ & y_3(t) \geq P^{th,Ac}(t) - M \cdot (1-J(t)) \end{aligned}$$

$$g_1(t) \leq P^{th,E}(t) \quad (79)$$

$$\begin{aligned} (1-J(t)). P^{th,E}(t) = g_1(t) \Rightarrow & g_1(t) \leq M \cdot (1-J(t)) \\ & g_1(t) \geq P^{th,E}(t) - M \cdot J(t) \end{aligned}$$

$$g_2(t) \leq P^W(t) \quad (80)$$

$$\begin{aligned} (1-J(t)). P^W(t) = g_2(t) \Rightarrow & g_2(t) \leq M \cdot (1-J(t)) \\ & g_2(t) \geq P^W(t) - M \cdot J(t) \end{aligned}$$

$$g_3(t) \leq P^{th,Ac}(t) \quad (81)$$

$$\begin{aligned} (1-J(t)). P^{th,Ac}(t) = g_3(t) \Rightarrow & g_3(t) \leq M \cdot (1-J(t)) \\ & g_3(t) \geq P^{th,Ac}(t) - M \cdot J(t) \end{aligned}$$

تعریف شده است به ترتیب شامل جمع و تفریق دو عدد فازی  $LR$ ، جمع اسکالر با عدد فازی  $LR$ ، ضرب اسکالر در عدد فازی  $LR$  و حاصل ضرب دو عدد فازی  $LR$  می‌باشد.

برای محاسبه عبارات مربوط به ضرب و جمع اعداد فازی موجود در تابع هدف ابتدا به تعریف جمع و ضرب اعداد فازی  $LR$  می‌پردازیم. این عملیات که در روابط ۸۲ تا ۸۶

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} + (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m+n, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR} \quad (82)$$

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} - (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m-n, \alpha-\delta, \beta-\gamma)_{LR} \quad (83)$$

$$\lambda + (m, \alpha, \beta)_{LR} = (\lambda+m, \alpha, \beta)_{LR} \quad (84)$$

$$\lambda \cdot (m, \alpha, \beta)_{LR} = \begin{cases} (\lambda m, \lambda \alpha, \lambda \beta)_{LR} & \lambda \geq 0 \\ (\lambda m, -\lambda \beta, -\lambda \alpha)_{LR} & \lambda < 0 \end{cases} \quad (85)$$

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \cdot (n, \gamma, \delta)_{LR} = \begin{cases} (mn, m\gamma + n\alpha, m\delta + n\beta)_{LR} & m, n > 0 \\ (mn, n\alpha - m\delta, n\beta - m\gamma)_{LR} & n < 0, m > 0 \\ (mn, -n\beta - m\delta, -n\alpha - m\gamma)_{LR} & n, m < 0 \end{cases} \quad (86)$$

را به صورت  $(p, \gamma, \delta)_{LR}$  نمایش دهیم، حاصلضرب این دو عدد فازی  $LR$  به صورت رابطه ۸۸ تعریف می‌شود.

$$(d, \alpha, \beta)_{LR} \tag{۸۷}$$

$$d = b_1 + \bar{t} (b_2 - b_1)$$

$$\alpha = (c_1 - b_2) + \bar{t} ((c_2 - b_1) - (c_1 - b_2))$$

$$\beta = (b_1 - a_2) + \bar{t} ((b_2 - a_1) - (b_1 - a_2))$$

$$(q, \varphi, \theta)_{LR} = (d, \alpha, \beta)_{LR} \cdot (p, \gamma, \delta)_{LR} = (dp, d\gamma + p\alpha, d\delta + p\beta)_{LR} = \tag{۸۸}$$

$$([b_1 + \bar{t} (b_2 - b_1)]p,$$

$$[b_1 + \bar{t} (b_2 - b_1)]\gamma + p [(c_1 - b_2) + \bar{t} ((c_2 - b_1) - (c_1 - b_2))],$$

$$[b_1 + \bar{t} (b_2 - b_1)]\delta + p [(b_1 - a_2) + \bar{t} ((b_2 - a_1) - (b_1 - a_2))])$$

$$q = [b_1 + \bar{t} (b_2 - b_1)]p \tag{۸۹}$$

$$q = q_1 + \bar{t} \cdot q_2$$

$$q_1 = p \cdot b_1$$

$$q_2 = p(b_2 - b_1)$$

$$\varphi = [\gamma b_1 + p (c_1 - b_2)] + \bar{t} [\gamma (b_2 - b_1) + p ((c_2 - b_1) - (c_1 - b_2))] \tag{۹۰}$$

$$\varphi = \varphi_1 + \bar{t} \cdot \varphi_2$$

$$\varphi_1 = [\gamma b_1 + p (c_1 - b_2)]$$

$$\varphi_2 = [\gamma (b_2 - b_1) + p ((c_2 - b_1) - (c_1 - b_2))]$$

$$\theta = [\delta b_1 + p (b_1 - a_2)] + \bar{t} [\delta (b_2 - b_1) + p ((b_2 - a_1) - (b_1 - a_2))] \tag{۹۱}$$

$$\theta = \theta_1 + \bar{t} \cdot \theta_2$$

$$\theta_1 = [\delta b_1 + p (b_1 - a_2)]$$

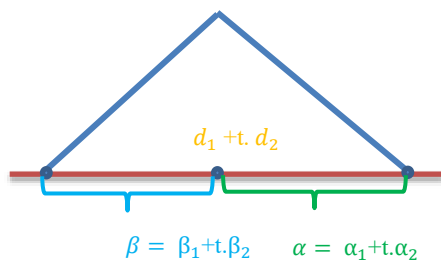
$$\theta_2 = [\delta (b_2 - b_1) + p ((b_2 - a_1) - (b_1 - a_2))]$$

$$\widetilde{\lambda^E(t)} = (\bar{d}, \bar{\alpha}, \bar{\beta})_{LR} = \tag{۹۳}$$

$$(d_1(t) + \bar{t} * d_2(t),$$

$$\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t),$$

$$\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t))_{LR}$$



شکل ۶- قیمت تسویه به فرم متغیر تصافی فازی

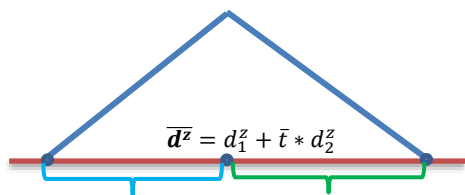
با فرض اینکه متغیر تصادفی فازی قیمت تسویه را به صورت  $(d, \alpha, \beta)_{LR}$  با تعریف رابطه ۸۷ و متغیر فازی توان بادی

به این ترتیب حاصلضرب متغیر تصادفی فازی و متغیر فازی فوق الذکر به فرم سه تایی رابطه ۹۲ تبدیل می‌شود.

$$(q, \varphi, \theta)_{LR} = (d, \alpha, \beta)_{LR} \cdot (p, \gamma, \delta)_{LR} = (q_1 + \bar{t} \cdot q_2, \varphi_1 + \bar{t} \cdot \varphi_2, \theta_1 + \bar{t} \cdot \theta_2)_{LR} \tag{۹۲}$$

با فرض اینکه قیمت تسویه بازار به صورت متغیر تصادفی فازی  $\widetilde{\lambda^E(t)}$  به صورت رابطه ۹۳ و شکل (۶) تعریف شود و با فرض اینکه مقدار پیش بینی شده باد با پارامتر متغیر فازی  $P^{W,F}(t)$  و به صورت رابطه ۹۴ تعریف شود، آنگاه تابع هدف مسأله به صورت متغیر تصادفی فازی به صورت رابطه ۹۵ و شکل (۷) نمایش داده می‌شود.

فازی تابع هدف رابطه ۹۵ به ترتیب با پارامترهای  $\bar{\alpha}^z$  و  $\bar{d}^z$  و  $\bar{\beta}^z$  نمایش داده شده است.



$$\bar{\beta}^z = \beta_1^z + \bar{t} * \beta_2^z \quad \bar{\alpha}^z = \alpha_1^z + \bar{t} * \alpha_2^z$$

شکل ۷- تابع هدف به فرم تصافی فازی

$$P^{W,F}(t) = (\mathbf{b}, \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\delta})_{LR} \quad (94)$$

$$\tilde{z} = (\bar{d}^z, \bar{\alpha}^z, \bar{\beta}^z) = \quad (95)$$

$$(d_1^z + \bar{t} * d_2^z,$$

$$\alpha_1^z + \bar{t} * \alpha_2^z,$$

$$\beta_1^z + \bar{t} * \beta_2^z)$$

بدین ترتیب مولفه های تابع هدف فازی بر اساس رابطه ۹۵ به صورت روابط ۹۶ تا ۱۰۴ محاسبه می شود. از این رو مولفه های مقدار میانی، انحراف راست و انحراف چپ فرم

$$\begin{aligned} \bar{d}^z = (d_1^z + \bar{t} * d_2^z) = \sum_t [ & (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)). P^{th,E}(t) + (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)). P^W(t) + (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)). P^{th,S}(t) * k + \\ & (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t))b(t) * r^+ * j(t) + (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t))y_3 * r^+ \\ & - (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)) * y_1 * r^+ - (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)) * y_2 * r^+ + (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t))b(t) * r^- * \\ & (1 - j(t)) + (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)) * g_3 * r^- - (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)) * g_1 * r^- - (d_1(t) + \bar{t} * d_2(t)) * \\ & g_2 * r^- - c_0 * u(t) - c_1 * EG(1, t) - c_2 * EG(2, t) - c_3 * EG(3, t) - STU(t)] \end{aligned} \quad (96)$$

$$\begin{aligned} d_1^z = \sum_t [ & d_1(t). P^{th,E}(t) + d_1(t). P^W(t) + d_1(t). P^{th,S}(t) * k + d_1(t)b(t) * r^+ * j(t) + d_1(t)y_3 * \\ & r^+ - d_1(t) * y_1 * r^+ - d_1(t) * y_2 * r^+ + d_1(t)b(t) * r^- * (1 - j(t)) + d_1(t) * g_3 * r^- - d_1(t) * \\ & g_1 * r^- - d_1(t) * g_2 * r^- - c_0 * u(t) - c_1 * EG(1, t) - c_2 * EG(2, t) - c_3 * EG(3, t) - STU(t)] \end{aligned} \quad (97)$$

$$\begin{aligned} d_2^z = \sum_t [ & d_2(t). P^{th,E}(t) + d_2(t). P^W(t) + d_2(t). P^{th,S}(t) * k + d_2(t)b(t) * r^+ * j(t) + d_2(t)y_3 * r^+ \\ & - d_2(t) * y_1 * r^+ - d_2(t) * y_2 * r^+ + d_2(t)b(t) * r^- * (1 - j(t)) + d_2(t) * g_3 * r^- - d_2(t) * g_1 * \\ & r^- - d_2(t) * g_2 * r^- - c_0 * u(t) - c_1 * EG(1, t) - c_2 * EG(2, t) - c_3 * EG(3, t) - STU(t)] \end{aligned} \quad (98)$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}^z = (\alpha_1^z + \bar{t} * \alpha_2^z) = \sum_t [ & (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)). P^{th,E}(t) + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)). P^W(t) + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \\ & \alpha_2(t)). P^{th,S}(t) * k + ((d_1(t) + \bar{t} * d_2(t))\gamma(t) + b(t) (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t))) * r^+ * j(t) + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \\ & \alpha_2(t)) * y_3 * r^+ + (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)) * y_1 * r^+ + (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)) * y_2 * r^+ + ((d_1(t) + \bar{t} * \\ & d_2(t))\gamma(t) + b(t) (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t))) * r^- * (1 - j(t)) + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)) * g_3 * r^- \\ & + (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)) * g_1 * r^- + (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)) * g_2 * r^- ] \end{aligned} \quad (99)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1^z = \sum_t [ & \alpha_1(t). P^{th,E}(t) + \alpha_1(t). P^W(t) + \alpha_1(t). P^{th,S}(t) * k + (d_1(t)\gamma(t) + b(t) \alpha_1(t)) * r^+ * j(t) \\ & + \alpha_1(t) * y_3 * r^+ + \beta_1(t) * y_1 * r^+ + \beta_1(t) * y_2 * r^+ + (d_1(t)\gamma(t) + b(t) \alpha_1(t)) * r^- * (1 - j(t)) + \\ & \alpha_1(t) * g_3 * r^- + \beta_1(t) * g_1 * RD + \beta_1(t) * g_2 * r^- ] \end{aligned} \quad (100)$$

$$\begin{aligned} \alpha_2^z = \sum_t [ & \alpha_2(t). P^{th,E}(t) + \alpha_2(t). P^W(t) + \alpha_2(t). P^{th,S}(t) * k + (d_2(t)\gamma(t) + b(t) \alpha_2(t)) * r^+ * j(t) \\ & + \alpha_2(t) * y_3 * r^+ + \beta_2(t) * y_1 * r^+ + \beta_2(t) * y_2 * r^+ + (d_2(t)\gamma(t) + b(t) \alpha_2(t)) * r^- * (1 - j(t)) \\ & + \alpha_2(t) * g_3 * r^- + \beta_2(t) * g_1 * r^- + \beta_2(t) * g_2 * r^- ] \end{aligned} \quad (101)$$

$$\begin{aligned} \bar{\beta}^z = (\beta_1^z + \bar{t} * \beta_2^z) = \sum_t [ & (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)). P^{th,E}(t) + (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)). P^W(t) + (\beta_1(t) + \bar{t} * \\ & \beta_2(t)). P^{th,S}(t) * k + ((d_1(t) + \bar{t} * d_2(t))\delta(t) + b(t) (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t))) * r^+ * j(t) + (\beta_1(t) + \bar{t} * \\ & \beta_2(t)) * y_3 * r^+ + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)) * y_1 * r^+ + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)) * y_2 * r^+ + ((d_1(t) + \bar{t} * \\ & d_2(t))\delta(t) + b(t) (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t))) * r^- * (1 - j(t)) + (\beta_1(t) + \bar{t} * \beta_2(t)) * g_3 * r^- \\ & + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)) * g_1 * r^- + (\alpha_1(t) + \bar{t} * \alpha_2(t)) * g_2 * r^- ] \end{aligned} \quad (102)$$

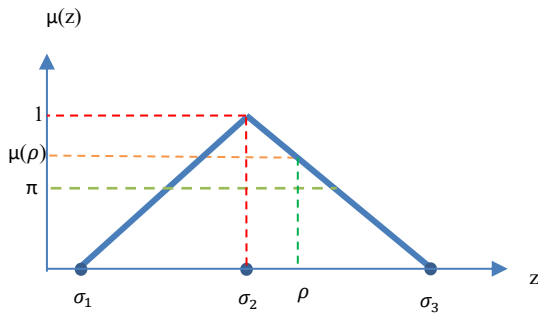


$$\beta_1^z = \sum_t [\beta_1(t). P^{th,E}(t) + \beta_1(t). P^W(t) + \beta_1(t). P^{th,S}(t) * k + (d_1(t)\delta(t) + b(t) \beta_1(t)) * r^+ * j(t) + \beta_1(t) * y_3 * r^+ + \alpha_1(t) * y_1 * r^+ + \alpha_1(t) * y_2 * r^+ + (d_1(t)\delta(t) + b(t) \beta_1(t)) * r^- * (1 - j(t)) + \beta_1(t) * g_3 * r^- + \alpha_1(t) * g_1 * r^- + \alpha_1(t) * g_2 * r^- ] \quad (103)$$

$$\beta_2^z = \sum_t [\beta_2(t). P^{th,E}(t) + \beta_2(t). P^W(t) + \beta_2(t). P^{th,S}(t) * k + (d_2(t)\delta(t) + b(t) \beta_2(t)) * r^+ * j(t) + \beta_2(t) * y_3 * r^+ + \alpha_2(t) * y_1 * r^+ + \alpha_2(t) * y_2 * r^+ + (d_2(t)\delta(t) + b(t) \beta_2(t)) * r^- * (1 - j(t)) + \beta_2(t) * g_3 * r^- + \alpha_2(t) * g_1 * r^- + \alpha_2(t) * g_2 * r^- ] \quad (104)$$

$$Pr \left( \frac{\bar{\alpha}^z + \bar{d}^z - \rho}{\bar{\alpha}^z} > \pi \right) > h \quad (108)$$

با توجه به اینکه عبارت  $\bar{\alpha}^z$  که در مخرج قرار دارد قطعاً بزرگتر از صفر است رابطه ۱۰۸ به شکل روابط ۱۰۹ تا ۱۱۷ بازنویسی می شود.



شکل ۸- تابع عضویت امکان تابع هدف

طبق رابطه ۹۵ تابع عضویت تابع هدف فازی سود به شکل رابطه ۱۰۵ خواهد بود.

$$\mu_{\sum_t CX}(\tau) = \begin{cases} \frac{\beta^z - \bar{d}^z + \tau}{\beta^z} & \tau \leq \bar{d}^z \\ \frac{\bar{\alpha}^z + \bar{d}^z - \tau}{\bar{\alpha}^z} & \tau \geq \bar{d}^z \end{cases} \quad (105)$$

به دنبال ماکزیمم سود با مقداری مانند  $\rho$  هستیم با فرض اینکه امکان تحقق آن یعنی  $\mu(\rho)$  از مقدار  $\pi$  بزرگتر باشد. پس مطابق شکل (۸) با استفاده از تابع R رابطه ۱۰۶ برقرار است.

$$\mu(\rho) = R \left( \frac{\rho - \bar{d}^z}{\bar{\alpha}^z} \right) = \frac{\bar{\alpha}^z + \bar{d}^z - \rho}{\bar{\alpha}^z} \quad (106)$$

حال بر اساس رابطه ۱۰۶ تابع هدف مسأله را به فرم روابط ۱۰۷ و ۱۰۸ بازنویسی می کنیم.

$$Max \rho \quad (107)$$

$$Pr \left( \frac{\bar{\alpha}^z + \bar{d}^z - \rho}{\bar{\alpha}^z} > \pi \right) > h \quad (109)$$

$$Pr \left( (\alpha_1^z + \bar{t} * \alpha_2^z) + (d_1^z + \bar{t} * d_2^z) - \rho > \pi. (\alpha_1^z + \bar{t} * \alpha_2^z) \right) > h \quad (110)$$

$$Pr \left( \bar{t} * (d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z) > \rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z \right) > h \quad (111)$$

$$Pr \left( \bar{t} > \frac{\rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z}{d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z} \right) > h \quad (112)$$

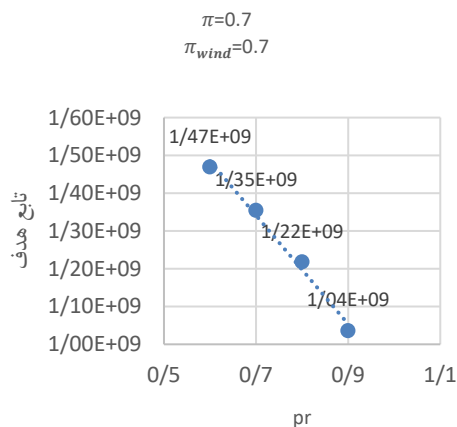
$$1 - Pr \left( \bar{t} < \frac{\rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z}{d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z} \right) > h \quad (113)$$

$$1 - T \left( \frac{\rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z}{d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z} \right) > h \quad (114)$$

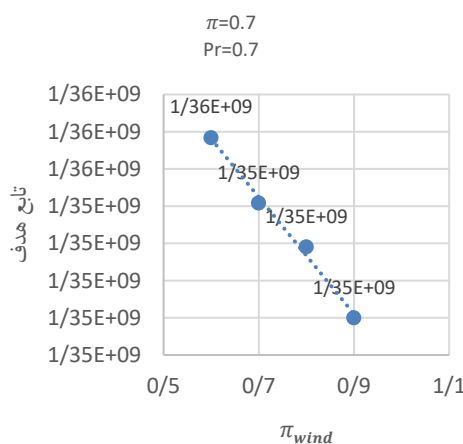
$$1 - h > T \left( \frac{\rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z}{d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z} \right) \quad (115)$$

$$T^*(1-h) > \left( \frac{\rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z}{d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z} \right) \quad (116)$$

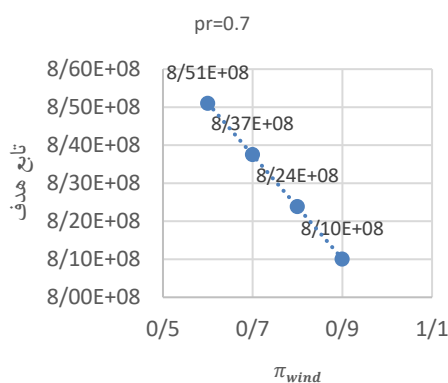
$$T^*(1-h). (d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z) > \rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z \quad (117)$$



شکل ۱۰- مقادیر تابع هدف بر اساس مقادیر متفاوت pr



شکل ۱۱- مقادیر تابع هدف بر اساس مقادیر متفاوت pi\_wind



شکل ۱۲- مقادیر تابع هدف در مدل مستقل واحد بادی بر اساس مقادیر متفاوت pi\_wind

و در نهایت فرم نهایی تابع هدف به روش شبه امکان به صورت رابطه ۱۱۸ تبدیل می‌شود. با این شیوه متغیر تصادفی  $\bar{t}$  از تابع هدف حذف شده و مدل بر اساس احتمال  $h$  که به انتخاب تصمیم گیرنده تعیین شده است حل می‌شود. تابع  $T$  تابع توزیع احتمال و  $T^*$  تابع شبه وارون تابع توزیع احتمال می‌باشد.

$$\text{Max } \rho \quad (118)$$

St.

$$T^*(1-h). (d_2^z + \alpha_2^z - \pi. \alpha_2^z) > \rho + \pi. \alpha_1^z - d_1^z - \alpha_1^z$$

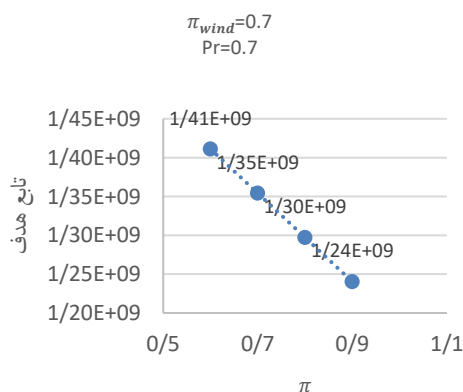
$$\rho < d_1^z + \bar{t}. d_2^z + \alpha_1^z + \bar{t}. \alpha_2^z < d_1^z + d_2^z + \alpha_1^z + \alpha_2^z$$

### ۸- مثال عددی

مورد مطالعه مسئله مدل شده در این مقاله بر اساس ویژگی‌های یک نیروگاه گازی دارای توربین‌های زیمنس V94.2 می‌باشد.

این توربین‌ها از توربین‌های پر کاربرد در ایران می‌باشد.

اعتبار مدل 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 رفتار متغیرهای 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 واحدهای حرارتی و بادی، هزینه هر بار روشن و خاموش شدن، وضعیت روشن یا خاموش بودن اولیه نیروگاه، متغیرهای قیمت تسویه بازار روز بعد، بازار رزرو و بازار لحظه‌ای و متغیرهای توان بادی، خروجی‌های مدل رفتار منطقی از خود نشان دادند، اعتبار مدل مورد تأیید قرار گرفت.

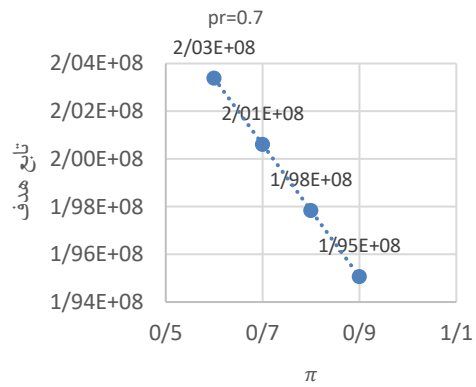


شکل ۹- مقادیر تابع هدف بر اساس مقادیر متفاوت pi

همانطور که در جداول ۲ تا ۵ مشاهده می‌شود تغییر در سطح اطمینان ( $\pi$ ) سبب تغییر در مقادیر اتخاذ شده برای پیشنهادهای ارائه شده به بازار از طرف واحد حرارتی و بادی خواهد شد.

جدول ۵- متغیرهای خروجی مدل به ازای  $\pi = 0.7$ 

$\pi = 0.7$ $\pi_{wind} = 0.7$ $pr = 0.7$			
ساعت	$p^{th,E}(t)$	$P^W(t)$	$p^{th,S}(t)$
۱	۱۰۰	۵۷/۹۴۲	۵۰
۲	۱۳۳/۳۲	۶۹/۸۶	۵۰
۳	۱۵۰	۶۰/۱۱۶	۵۰
۴	۱۵۰	۶۰/۸۹۲	۵۰
۵	۸۲/۱۶۸	۸۰/۶۸	۵۰
۶	۸۱/۸۴۲	۷۹/۶۱	۵۰
۷	۸۲/۶۰۹	۷۹/۳۴	۵۰
۸	۱۳۱/۸۰۵	۷۵/۷	۵۰
۹	۸۳/۱۹۵	۶۹/۳۹	۵۰
۱۰	۸۳/۰۰۶	۷۳/۴۹	۵۰
۱۱	۸۳/۱۲	۷۳/۷۶	۵۰
۱۲	۱۳۳/۰۶۶	۷۹/۴۱	۵۰
۱۳	۱۳۲/۳۶۳	۷۸/۶۵	۵۰
۱۴	۱۰۰	۶۱/۳۵۷	۵۰
۱۵	۱۵۰	۴۶/۸۴۳	۵۰
۱۶	۱۵۰	۴۷/۶۱۵	۵۰
۱۷	۱۰۰	۴۰/۸۱۲	۵۰
۱۸	۱۳۴/۶۷۴	۶۰/۴۳	۵۰
۱۹	۱۳۴/۰۹۴	۶۰/۸۵	۵۰
۲۰	۱۵۰	۴۵/۱۸۳	۵۰
۲۱	۱۳۳/۷۳۷	۶۰/۰۲	۵۰
۲۲	۱۳۵/۰۳۸	۵۹/۸۹	۵۰
۲۳	۱۳۴/۱۶۵	۶۸/۶۵	۵۰
۲۴	۸۴/۸۰۷	۶۲/۰۱	۵۰
تابع هدف	۱۳۵۴۱۶۰۰۰		



شکل ۱۳- مقادیر تابع هدف در مدل مستقل واحد حرارتی بر اساس مقادیر متفاوت  $\pi$

جدول ۴- متغیرهای خروجی مدل به ازای  $\pi = 0.6$ 

$\pi = 0.6$ $\pi_{wind} = 0.7$ $pr = 0.7$			
ساعت	$p^{th,E}(t)$	$P^W(t)$	$p^{th,S}(t)$
۱	۸۳/۴۴۲	۷۴/۵	۵۰
۲	۱۳۳/۳۲	۶۹/۸۶	۵۰
۳	۱۳۲/۲۱۶	۷۷/۹	۵۰
۴	۱۳۲/۱۵۲	۷۸/۷۴	۵۰
۵	۱۰۰	۶۲/۸۴۸	۵۰
۶	۸۱/۸۴۲	۷۹/۶۱	۵۰
۷	۱۰۰	۶۱/۹۴۹	۵۰
۸	۱۳۱/۸۰۵	۷۵/۷	۵۰
۹	۸۳/۱۹۵	۶۹/۳۹	۵۰
۱۰	۸۳/۰۰۶	۷۳/۴۹	۵۰
۱۱	۸۳/۱۲	۷۳/۷۶	۵۰
۱۲	۱۵۰	۶۲/۴۷۶	۵۰
۱۳	۱۳۲/۳۶۳	۷۸/۶۵	۵۰
۱۴	۱۰۰	۶۱/۳۵۷	۵۰
۱۵	۱۳۲/۶۷۳	۶۴/۱۷	۵۰
۱۶	۱۳۳/۴۲۵	۶۴/۱۹	۵۰
۱۷	۱۰۰	۴۰/۸۱۲	۵۰
۱۸	۱۳۴/۶۷۴	۶۰/۴۳	۵۰
۱۹	۱۳۴/۰۹۴	۶۰/۸۵	۵۰
۲۰	۱۵۰	۴۵/۱۸۳	۵۰
۲۱	۱۵۰	۴۳/۷۵۷	۵۰
۲۲	۱۵۰	۴۴/۹۲۸	۵۰
۲۳	۱۳۴/۱۶۵	۶۸/۶۵	۵۰
۲۴	۸۴/۸۰۷	۶۲/۰۱	۵۰
تابع هدف	۱۴۱۱۰۹۶۰۰۰		

جدول ۷- متغیرهای خروجی مدل به ازای  $\pi = 0/9$

$\pi=0/9$ $\pi_{wind}=0/7$ $pr=0/7$			
ساعت	$P^{th,E}(t)$	$P^W(t)$	$P^{th,S}(t)$
۱	۸۳/۴۴۲	۷۴/۵	۵۰
۲	۱۵۰	۵۳/۱۸	۵۰
۳	۱۳۲/۲۱۶	۷۷/۹	۵۰
۴	۱۳۲/۱۵۲	۷۸/۷۴	۵۰
۵	۸۲/۱۶۸	۸۰/۱۶۸	۵۰
۶	۸۱/۸۴۲	۷۹/۶۱	۵۰
۷	۸۲/۶۰۹	۷۹/۳۴	۵۰
۸	۱۳۱/۸۰۵	۷۵/۷	۵۰
۹	۸۳/۱۹۵	۶۹/۳۹	۵۰
۱۰	۸۳/۰۰۶	۷۳/۴۹	۵۰
۱۱	۸۳/۱۲	۷۳/۷۶	۵۰
۱۲	۱۳۳/۰۶۶	۷۹/۴۱	۵۰
۱۳	۱۵۰	۶۱/۰۱۳	۵۰
۱۴	۸۳/۰۱۷	۷۸/۳۴	۵۰
۱۵	۱۵۰	۴۶/۸۴۳	۵۰
۱۶	۱۳۳/۴۲۵	۶۴/۱۹	۵۰
۱۷	۱۰۰	۴۰/۸۱۲	۵۰
۱۸	۱۳۴/۶۷۴	۶۰/۴۳	۵۰
۱۹	۱۳۴/۰۹۴	۶۰/۸۵	۵۰
۲۰	۱۳۴/۷۱۳	۶۰/۴۷	۵۰
۲۱	۱۳۳/۷۳۷	۶۰/۰۲	۵۰
۲۲	۱۳۵/۰۳۸	۵۹/۸۹	۵۰
۲۳	۱۳۴/۱۶۵	۶۸/۶۵	۵۰
۲۴	۸۴/۸۰۷	۶۲/۰۱	۵۰
تابع هدف	۱۲۴۰۲۸۹۰۰۰		

جدول ۶- متغیرهای خروجی مدل به ازای  $\pi = 0/8$

$\pi=0/8$ $\pi_{wind}=0/7$ $pr=0/7$			
ساعت	$P^{th,E}(t)$	$P^W(t)$	$P^{th,S}(t)$
۱	۸۳/۴۴۲	۷۴/۵	۵۰
۲	۱۳۳/۳۲	۶۹/۸۶	۵۰
۳	۱۳۲/۲۱۶	۷۷/۹	۵۰
۴	۱۳۲/۱۵۲	۷۸/۷۴	۵۰
۵	۸۲/۱۶۸	۸۰/۱۶۸	۵۰
۶	۱۰۰	۶۱/۴۵۲	۵۰
۷	۱۰۰	۶۱/۹۴۹	۵۰
۸	۱۵۰	۵۷/۵۰۵	۵۰
۹	۸۳/۱۹۵	۶۹/۳۹	۵۰
۱۰	۱۰۰	۵۶/۴۹۶	۵۰
۱۱	۸۳/۱۲	۷۳/۷۶	۵۰
۱۲	۱۵۰	۶۲/۴۷۶	۵۰
۱۳	۱۵۰	۶۱/۰۱۳	۵۰
۱۴	۱۰۰	۶۱/۳۵۷	۵۰
۱۵	۱۳۲/۶۷۳	۶۴/۱۷	۵۰
۱۶	۱۳۳/۴۲۵	۶۴/۱۹	۵۰
۱۷	۸۳/۴۳۲	۵۷/۳۸	۵۰
۱۸	۱۳۴/۶۷۴	۶۰/۴۳	۵۰
۱۹	۱۳۴/۰۹۴	۶۰/۸۵	۵۰
۲۰	۱۳۴/۷۱۳	۶۰/۴۷	۵۰
۲۱	۱۵۰	۴۳/۷۵۷	۵۰
۲۲	۱۳۵/۰۳۸	۵۹/۸۹	۵۰
۲۳	۱۳۴/۱۶۵	۶۸/۶۵	۵۰
۲۴	۱۰۰	۴۶/۸۱۷	۵۰
تابع هدف	۱۲۹۷۲۲۵۰۰۰		

در ایجاد تغییرات ساعتی در تولید توان بادی، سبب می‌شود در هماهنگی دو نیروگاه ترکیب این ویژگی‌ها باعث افزایش سود و کاهش ریسک آنها گردد.

هدف این پژوهش ارائه مدلی استوار برای مشارکت بهینه واحد بادی و حرارتی برای مشارکت در بازار برق می‌باشد. مالک این نیروگاه‌ها با توجه به میزان ریسک پذیری خود با انتخاب سطح اطمینان دلخواه خود پیشنهادات عرضه خود را به بازارهای روز بعد و رزرو ارائه می‌دهد. متناسب با سطوح امکان و احتمال انتخابی مالک واحدهای تولیدی، تصمیمات عرضه به هر یک از بازارهای روز بعد و رزرو متفاوت خواهد بود. که این امر در جداول ۴ تا ۷ مشخص است.

همانطور که نتایج این پژوهش نشان داد با هماهنگ سازی واحد بادی با واحد حرارتی تحت هم افزایی حاصل شده سود مشترک این دو واحد نسبت به مجموع سود مستقل آنها افزایش می‌یابد. همچنین یافته‌های تحقیق نشان داد که با افزایش سطح اطمینان، مقدار تابع هدف که معادل سود تولید کننده است کاهش می‌یابد. از این رو تولیدکننده ریسک‌پذیر با انتخاب سطوح اطمینان پایین‌تر به سود بالاتر دست می‌یابد و تولیدکننده ریسک‌گریز با انتخاب سطوح اطمینان بالاتر به سود پایین‌تر ولی با امکان و احتمال تحقق بیشتر دست می‌یابد.

در این پژوهش صرفاً به بازارهای روز بعد و رزرو و لحظه‌ای پرداخته شده است. پژوهشگران علاقه‌مند می‌توانند بازارهای تنظیم و اصلاحی برق و یا معاملات دوجانبه برق را هم در مدلسازی وارد نمایند. احتمال فراخوانده شدن برای تولید رزرو هم در این پژوهش بررسی نشده است لذا علاقه‌مندان می‌توانند احتمال فراخوانی برای رزرو را وارد مدلسازی مسأله کنند. همچنین در این پژوهش بازار با مکانیسم پرداخت یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته لذا پیشنهاد می‌شود بازار با مکانیسم پرداخت بر اساس پیشنهاد هم مورد بررسی قرار گیرد.

همانطور که در شکل‌های (۹) تا (۱۳) مشاهده می‌شود با افزایش سطح اطمینان و سطح احتمال، تابع هدف کاهش می‌یابد که بدین معنی است که با افزایش استواری، بهینگی کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) و (۱۳) رفتار مدل را در حالت فعالیت مستقل واحد بادی و واحد حرارتی نشان می‌دهد. همانطور که نتایج در جدول ۸ بیان می‌کند در حالت مشارکت هماهنگ این دو واحد هم افزایی حاصل شده سبب افزایش تابع هدف نسبت به مجموع توابع هدف در حالت فعالیت مستقل خواهد بود.

جدول ۸- مقایسه تابع هدف در حالت فعالیت مستقل و هماهنگ واحد حرارتی و بادی

مشارکت مستقل واحد بادی در بازار	مشارکت مستقل واحد حرارتی در بازار	مشارکت هماهنگ واحد بادی و حرارتی در بازار
۸۳۷،۴۹۵،۲۰۰	۲۰۰،۶۰۴،۳۰۰	۱،۳۵۴،۱۶۰،۰۰۰

$$۸۳۷،۴۹۵،۲۰۰ + ۲۰۰،۶۰۴،۳۰۰ =$$

$$۱،۰۳۸،۰۹۹،۵۰۰ < ۱،۳۵۴،۱۶۰،۰۰۰$$

## ۹- بحث و نتیجه‌گیری و تحلیل

با افزایش میزان استفاده از انرژی باد، ارائه راهکارهایی برای به کارگیری بهینه مزارع بادی در بازار برق از اهمیت به سزایی برخوردار است. یکی از مسائل تولیدکنندگان برق برای شرکت در بازار برق مشارکت کم ریسک در این بازار است. به خصوص واحدهای تولیدی که تولیدات غیر قطعی دارند باید علاوه بر توجه به عدم قطعیت در قیمت‌های بازار به عدم قطعیت تولید خود نیز توجه کنند. در این پژوهش مدلی جهت مشارکت هماهنگ یک مزرعه بادی و یک نیروگاه حرارتی ارائه شده است. هماهنگ سازی نیروگاه حرارتی با مزرعه بادی توان رقابتی آن را برای شرکت در بازار برق افزایش می‌دهد و سبب تأثیر مثبت بر سود مورد انتظار آنها می‌شود. زیرا واحد حرارتی نقایص مربوط به عدم قطعیت تولید مزرعه بادی را تا حدی جبران می‌کند. هزینه ناچیز تولید واحد بادی و انعطاف پذیری بالای واحد حرارتی

## مراجع

- [۱] آیین، مرتضی. "تصمیم‌گیری تولیدکنندگان انرژی در حضور عدم قطعیت بازارهای برق. پایان نامه دکتری". دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته. (۱۳۹۳)
- [۲] جلیوند نژاد، امیر. "ارائه مدلی استوار برای مدیریت فروش برق در بازار رقابتی". پایان نامه دکتری. دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی. (۱۳۹۵)

[3] Itaba, Satoshi, and Hiroyuki Mori. "A Fuzzy-Preconditioned GRBFN Model for Electricity Price Forecasting." *Procedia Computer Science* 114 (2017): 441-48.

- [۴] نظری فارسانی، وحید. "ارائه یک روش جدید پیش بینی بازه ای قیمت برق مبتنی بر یادگیری عمیق". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس. (۱۳۹۸)
- [5] Jakub Nowotarski and Rafal Weron, "Merging Quantile Regression with Forecast Averaging to Obtain More Accurate Interval Forecasts of Nord Pool Spot Prices," *RePEc: Research Papers in Economics*, (2014):0-4.
- [6] Nowotarski, Jakub, and Rafał Weron. "Computing Electricity Spot Price Prediction Intervals Using Quantile Regression and Forecast Averaging." *Computational Statistics* 30, no. 3 (2015): 791-803.
- [7] Yazdaninejad, Mohsen, and Nima Amjady. "Risk-Minimizing Stochastic Self-Scheduling Model for Microgrid in Day-Ahead Electricity Market." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 27, no. 5 (2017): 1-18.
- [8] Khaloie, Hooman, Amir Abdollahi, Masoud Rashidinejad, and Pierluigi Siano. "Risk-Based Probabilistic-Possibilistic Self-Scheduling Considering High-Impact Low-Probability Events Uncertainty." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 110 (2019): 598-612.
- [9] Goroohi Sardou, Iman, and Mostafa Ansari. "Risk-Constrained Self-Scheduling of a Generation Company Considering Natural Gas Flexibilities for Wind Energy Integration." *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 12, no. 1 (2020): 1-14.
- [10] Jiao, P.H, J.J Chen, B.X Qi, Yanlei Zhao, and Ke Peng. "Electricity Price Driven Active Distribution Network Planning Considering Uncertain Wind Power and Electricity Price." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 107 (2019): 422-437.
- [11] Najafi, Arsalan, Mahdi Pourakbari-Kasmaei, Michal Jasinski, Matti Lehtonen, and Zbigniew Leonowicz. "A Medium-Term Hybrid IGDT-Robust Optimization Model for Optimal Self Scheduling of Multi-Carrier Energy Systems." *Energy* 238 (2022): 1-15.
- [12] Javid Khorasani, Ehsan Monabbati, and Habib Rajabi Mashhadi. "Designing an Optimal Linear Bid Function in a Pay-As-Bid Electricity Market." *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization* 1, no. 2 (2018): 133-142.
- [13] Yazdaninejad, Mohsen, Nima Amjady, and Shahab Dehghan. "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), (2019): 3632-3645.
- [14] Lee, Duehee, Hunyoung Shin, and Ross Baldick. "Bivariate Probabilistic Wind Power and Real-Time Price Forecasting and Their Applications to Wind Power Bidding Strategy Development." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 6 (2018): 6087-6097.
- [15] Dai, Ting, and Wei Qiao. "Optimal Bidding Strategy of a Strategic Wind Power Producer in the Short-Term Market." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 6, no. 3 (2015): 707-719.
- [16] Guerrero-Mestre, Victoria, Agustin A Sanchez, Javier Contreras, and Joao. "Optimal Bidding of a Group of Wind Farms in Day-Ahead Markets through an External Agent" 31, no. 4 (2016): 2688-2700.
- [17] Soares, Tiago, Pierre Pinson, T Jensen, and Hugo Morais. "Optimal Offering Strategies for Wind Power in Energy and Primary Reserve Markets." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 7, no. 3 (2016): 1036-1045.
- [18] Li, Yaowang, Shihong Miao, Binxin Yin, Junyao Liu, Weichen Yang, and Songyan Zhang. "Research on Optimal Self-Scheduling Horizon for the Wind Power and Large-Scale CAES Combined System." *IET Generation, Transmission & Distribution* 13, no. 22 (2019): 5197-5206.
- [19] Baringo, Ana, Luis Baringo, and José M. Arroyo. "Day-Ahead Self-Scheduling of a Virtual Power Plant in Energy and Reserve Electricity Markets under Uncertainty." *IEEE Transactions on Power Systems* 34, no. 3 (2019): 1881-1894.
- [20] Zhou, Yuzhou, Qiaozhu Zhai, Meiyu Zhou, and Xuan Li. "Generation Scheduling of Self-Generation Power Plant in Enterprise Microgrid with Wind Power and Gateway Power Bound Limits." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 11, no. 2 (2020): 758-770.
- [21] Alahyari, Arman, Mehdi Ehsan, and MirSaeed Mousavizadeh. "A Hybrid Storage-Wind Virtual Power Plant (VPP) Participation in the Electricity Markets: A Self-Scheduling Optimization Considering Price, Renewable Generation, and Electric Vehicles Uncertainties." *Journal of Energy Storage* 25 (2019): 100812.

[22] Attarha, Ahmad, Nima Amjady, Shahab Dehghan, and Behdad Vatani. "Adaptive Robust Self-Scheduling for a Wind Producer with Compressed Air Energy Storage." IEEE Transactions on Sustainable Energy 9, no. 4 (2018): 1659–1671.

[23] Jamali, Ali, Jamshid Aghaei, Masoud Esmaili, Ahmad Nikoobakht, Taher Niknam, Miadreza Shafie-khah, and João P. S. Catalão. "Self-Scheduling Approach to Coordinating Wind Power Producers with Energy Storage and Demand Response." IEEE Transactions on Sustainable Energy 11, no. 3 (July 1, 2020): 1210–1219.

[۲۴] کوچکی نژاد، حسن، و فاطمه کیاده. "تحلیلی بر متغیر تصادفی فازی و متغیر تصادفی غیر فازی در محاسبات". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان. (۱۳۹۷)

[۲۵] محمدی لشگان، سارا. "شبیه سازی متغیر تصادفی فازی و برخی از کاربردها در محاسبات". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان. (۱۳۹۷)

[۲۶] فرهادی، هاجر. "روش هایی برای حل مسائل برنامه ریزی دو سطحی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد. (۱۳۹۳)

[۲۷] باقری، منصور، محمود میری، و ناصر شایختی. محاسبه شاخص قابلیت اعتماد فازی سازه ها با استفاده از تکنیک بهینه سازی آلفا برشها. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست ۴۳، ۴ (۱۳۹۲): ۱۲-۱.

[۲۸] دهقان، احسان. "ارائه یک مدل ریاضی در برنامه ریزی تولید و مسیریابی حمل و نقل یکپارچه در زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت". پایان نامه دکتری. دانشگاه سمنان. (۱۳۹۹)

[۲۹] توکلی مقدم، رضا، مهدی علینقیان، و علیرضا سلامت بخش. "مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای با پنجره زمانی در حالت رقابتی با روش شبیه‌سازی تبرید بهبود یافته". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۵، ۴ (۱۳۹۳): ۴۴۹-۴۷۰.