

معرفی یک مدل جدید خودبرنامه‌ریزی استوار برای تولیدکنندگان قیمت‌پذیر

برق

امیر جلیلودنژاد، دانشجوی دکتری، رسول شفائی، دانشیار، حمید شهریاری، دانشیار

دانشکده مهندسی صنایع - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

ajalilvandnejad@mail.kntu.ac.ir

shafaei@kntu.ac.ir

hshahriari@kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک مدل خودبرنامه‌ریزی استوار برای مشارکت تولیدکننده قیمت‌پذیر برق در بازار روز بعد ارائه شده است. برای توسعه این مدل استوار، ابتدا یک مجموعه عدم‌قطعیت جدید روی ضرایب غیرقطعی مدل تعریف شده است که در شرایط وجود همبستگی بین ضرایب غیرقطعی، می‌تواند با نادیده گرفتن مقادیر غیرهمبسته برای ضرایب غیرقطعی، از کاهش بی‌دلیل سود تولیدکننده در جواب استوار نهایی جلوگیری کند. سپس مدل همتای استوار متناظر با این مجموعه برای مساله خودبرنامه‌ریزی توسعه داده شده است. نتایج آزمایش و شبیه‌سازی این مدل برای تولیدکننده‌ای که با بهره‌گیری از واحدهای حرارتی، قصد شرکت در بازار روز بعد ایران را دارد، کارایی بهتر آن را در قیاس با مدل‌های استوار رایج نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خودبرنامه‌ریزی، بازار روز بعد، قیمت‌پذیر، بهینه‌سازی استوار، مجموعه عدم‌قطعیت چندوجهی همبسته

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: رسول شفائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان پردیس، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

فهرست علائم و نشانه ها

پارامترها

λ_t	: قیمت تسویه بازار در ساعت t ام [Rials/MWh]
$\hat{\lambda}_t, \tilde{\lambda}_t$: به ترتیب مقادیر واقعی و تخمینی قیمت بازار [Rials/MWh]
δ_t	: حداکثر اختلال نسبت به قیمت تخمینی [Rials /MWh]
c_t^F	: هزینه سوخت به ازای هر مگاوات در بازه t ام [Rials /MWh]
c_0^F	: هزینه سوخت واحد به ازای مینیمم خروجی [Rials/h]
c^{SU}	: هزینه هر بار راه اندازی واحد [Rials]
c^{SD}	: هزینه هر بار توقف واحد [Rials]
p^{min}	: حداقل تولید واحد [MW/h]
Pb_t^{min}	: سقف تولیدی واحد در بازه t ام [MW/h]
u^0	: آخرین وضعیت واحد پیش از شروع برنامه ریزی [۰ یا ۱]
R^{up}	: نرخ افزایش توان خروجی [MW/h]
R^{down}	: نرخ کاهش توان خروجی [MW/h]
R^{SU}	: نرخ افزایش توان خروجی برای راه اندازی [MW/h]
R^{SD}	: نرخ کاهش توان خروجی برای توقف [MW/h]
ut^{min}	: حداقل زمانی که واحد باید پس از توقف راه اندازی نشود [h]
dt^{min}	: حداقل زمانی که واحد باید پس از راه اندازی متوقف نشود
ut^0	: تعداد ساعات فعالیت واحد پیش از شروع برنامه ریزی
dt^0	: تعداد ساعات خاموشی واحد پیش از شروع برنامه ریزی
ut	: حداقل تعداد ساعات لازم فعالیت واحد در ابتدای برنامه ریزی
dt	: حداقل تعداد ساعات لازم خاموشی واحد در ابتدای برنامه ریزی
Γ	: بودجه عدم قطعیت
ρ_{tk}	: همبستگی بین قیمت ساعتهای t ام و k ام

متغیرها

P_t	: خروجی واحد در ساعت t ام [MW]
$C(P_t)$: هزینه کل واحد در ساعت t ام [Rials]
$Pb_{t,t}$: خروجی واحد در بازه t ام در ساعت t ام [MW]
$b_{t,t}$: متغیر وضعیت واحد در بازه t ام: برابر با یک در صورتی که واحد در ساعت t از بازه t ام تولید استفاده کند.
u_t	: وضعیت واحد در ساعت t ام [۰ یا ۱]
$cost_t^{SU}$: هزینه راه اندازی متحمل شده در ساعت t ام [Rials]
$cost_t^{SD}$: هزینه توقف متحمل شده در ساعت t ام [Rials]
ζ_t	: اختلال ضرب غیرقطعی t ام در جواب بهینه استوار

۱- مقدمه

یکی از متداول ترین بازارهای تجدید ساختار یافته انرژی الکتریکی، بازار روز بعد^۱ است. تولیدکنندگان برق برای شرکت در این بازار باید با پیش بینی قیمت در ساعات مختلف روز بعد، پیشنهادهای فروش خود را برای ۲۴ بازه یک ساعته روز بعد تدوین کنند و به بهره بردار بازار ارائه دهند. بهره بردار بازار پس از بررسی تمام پیشنهادهای رسیده و با استفاده از رویه ای مشخص، پیشنهادهای برگزیده را برای تزریق برق به

شبکه انتخاب می کند و بالاترین قیمت پذیرفته شده هر ساعت را به عنوان قیمت تسویه بازار اعلام می کند.

در این مقاله مساله خودبرنامه ریزی^۲ یک تولیدکننده قیمت پذیر - تولیدکننده ای که پیشنهادش در بازار روز بعد تأثیری بر قیمت تسویه نمی گذارد- مورد بررسی قرار گرفته است. هر تولیدکننده ای برای شرکت در بازار روز بعد لازم است اقدام به پیش بینی قیمت برای هر ساعت از روز بعد نماید و سپس با در نظر گرفتن سطح معینی از عدم قطعیت در پیش بینی ها اقدام به خودبرنامه ریزی واحدهای خود با هدف بیشینه کردن سود نماید. این خودبرنامه ریزی بهینه سپس توسط تولیدکننده برای تولید استراتژی پیشنهاددهی^۳ بهینه مورد استفاده قرار می گیرد [۲]. این استراتژی به گونه ای طراحی می شود که منجر به پذیرش خودبرنامه ریزی بهینه گردد [۳].

از اولین مطالعاتی که در حوزه خودبرنامه ریزی تولیدکنندگان برق صورت گرفته می توان به مراجع [۴، ۵] اشاره کرد. مهمترین علتی که مساله خودبرنامه ریزی را تبدیل به مساله ای پیچیده می کند، وجود عدم قطعیت در داده ها به ویژه قیمت های روز بعد است. از این دیدگاه، پژوهشگران این حوزه از رویکردهای متنوعی همچون برنامه ریزی تصادفی، برنامه ریزی فازی و بهینه سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت موجود بهره برده اند.

برنامه ریزی تصادفی مبتنی بر ریسک بیشترین اقبال را در بین پژوهشگران داشته است. مرجع [۲] با تخمین تابع چگالی احتمال قیمت ها در روز بعد، چارچوبی برای خودبرنامه ریزی بهینه و سپس تولید استراتژی پیشنهاددهی بهینه، ارائه می کند. مرجع [۶] با گنجاندن انحراف معیار سود در مدل به عنوان یک معیار ارزیابی ریسک، روشی مبتنی بر ریسک برای خودبرنامه ریزی تولیدکننده ارائه کردند. علاوه بر انحراف معیار، معیارهای دیگری از ریسک مانند VaR [۷، ۸] و یا CVaR [۹] نیز برای ارزیابی ریسک ناشی از عدم قطعیت در مدل های غیرقطعی خودبرنامه ریزی مورد استفاده قرار گرفته اند.

برنامه ریزی فازی از دیگر روشهای مواجهه با عدم قطعیت در بهینه سازی محسوب می شود. مرجع [۱۰] رویکرد برنامه ریزی فازی را برای مواجهه با عدم قطعیت موجود در پیش بینی قیمت ها برگزیده است و مدلی برای شرکت در بازار انرژی الکتریکی و ذخیره ارائه کرده است.

بهینه سازی استوار رویکردی جدید در مواجهه با عدم قطعیت محسوب می شود که در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از مزایای استفاده از بهینه سازی استوار، قابلیت استفاده از آن در شرایط فقدان اطلاعات توزیع آماری عامل عدم قطعیت است. همچنین استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار منجر به مدلهایی با پیچیدگی محاسباتی کمتر می شود که دستیابی به جواب بهینه قطعی را (در مقابل جوابهای بهینه محلی) تسهیل می کند.

آنچنان که در بخش ۳ توضیح داده خواهد شد رویکرد بهینه سازی استوار بر پایه تعریف مجموعه های عدم قطعیت شکل می گیرد. مراجع [۱۱-۱۳] مدل های استواری مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت بیضوی

بر این اساس بخش‌های بعدی این مقاله به این شرح می‌باشند: در بخش ۲ مدل غیرقطعی خودبرنامه‌ریزی برای تولیدکننده قیمت‌پذیر ارائه می‌شود. در بخش ۳ ابتدا مجموعه‌های عدم‌قطعیت رایج و سپس مجموعه عدم‌قطعیت پیشنهادی نویسندگان معرفی می‌شوند که با معرفی هم‌تای استوار مساله خودبرنامه‌ریزی در بخش ۴ تکمیل می‌شود. در بخش ۵ نتایج آزمایش مدل پیشنهادی گزارش می‌شود. در نهایت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مطالعه انجام شده در بخش ۶ ارائه می‌شود.

۲- مدل خودبرنامه‌ریزی غیرقطعی

برای یک تولیدکننده قیمت‌پذیر، خودبرنامه‌ریزی یک واحد مستقل از خودبرنامه‌ریزی سایر واحدها است [۶]. بر این اساس در این بخش مدل برنامه‌ریزی غیرقطعی برای یک واحد مجزا به شرح زیر ارائه می‌شود.

$$\max \sum_{t=1}^{N_T} (\lambda_t P_t - C(P_t)) \quad (1)$$

$$C(P_t) = c_0^F u_t + \sum_l c_l^F \cdot P_{b_{l,t}} + cost_t^{SU} + cost_t^{SD} \quad \forall t \quad (2)$$

$$P_t = \sum_l P_{b_{l,t}} + P^{min} \cdot u_t \quad \forall t \quad (3)$$

$$P_{b_{1,t}} \leq P_{b_1^m} - p^{min} \quad \forall t \quad (4)$$

$$P_{b_{l,t}} \leq P_{b_l^m} - P_{b_{l-1}^m} \quad \forall t, l = 2, \dots, N_l \quad (5)$$

$$P^{min} \cdot u_t \leq P_t \leq P^{max} \cdot u_t \quad \forall t \quad (6)$$

$$\varepsilon \cdot P_{b_{l,t}} \leq b_{l,t} \leq M \cdot P_{b_{l,t}} \quad \forall t, l \quad (7)$$

$$cost_t^{SU} \geq c^{SU} (u_t - u_{t-1}) \quad t = 2, \dots, N_T \quad (8)$$

$$cost_t^{SD} \geq c^{SD} (u_{t-1} - u_t) \quad t = 2, \dots, N_T \quad (9)$$

$$cost_1^{SU} \geq c^{SU} (u_1 - u^0) \quad (10)$$

$$cost_1^{SD} \geq c^{SD} (u^0 - u_1) \quad (11)$$

$$P_{t+1} - P_t \leq R^{up} u_t + R^{SU} (1 - u_t) \quad t = 1, \dots, N_T - 1 \quad (12)$$

$$P_t - P_{t+1} \leq R^{down} u_{t+1} + R^{SD} (1 - u_{t+1}) \quad t = 1, \dots, N_T - 1 \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^{ut} (1 - u_t) = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{k=t}^{t+ut^{min}-1} u_k \geq ut^{min} (u_t - u_{t-1}) \quad \forall t = ut + 1, \dots, N_T - ut^{min} + 1 \quad (15)$$

$$\sum_{k=t}^{N_T} u_k \geq (N_T - t)(u_t - u_{t-1}) \quad \forall t = N_T - ut^{min} + 2, \dots, N_T \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^{dt} u_t = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{k=t}^{t+dt^{min}-1} (1 - u_k) \geq dt^{min} (u_{t-1} - u_t) \quad \forall t = dt + 1, \dots, N_T - dt^{min} + 1 \quad (18)$$

$$\sum_{k=t}^{N_T} (1 - u_k) \geq (N_T - t)(u_{t-1} - u_t) \quad \forall t = N_T - dt^{min} + 2, \dots, N_T \quad (19)$$

$$ut = \max\{0, \min\{N_T, (ut^{min} - ut^0)u^0\}\} \quad (20)$$

$$dt = \max\{0, \min\{N_T, (dt^{min} - dt^0)(1 - u^0)\}\} \quad (21)$$

$$b, u \in \{0,1\} \quad (22)$$

برای مساله خودبرنامه‌ریزی ارائه کردند. مرجع [۱۴] یک مدل استوار بدترین حالت^۴ برای شرایط وجود عدم‌قطعیت در قیمت‌های پیش‌بینی شده بازار ارائه داد. مرجع [۱۵] اولین گزارش مربوط به استفاده از مدل استوار مبتنی بر مجموعه عدم‌قطعیت چندوجهی برای یک مساله خودبرنامه‌ریزی است. کانبجو و همکاران در این پژوهش الگوریتمی برای تولید پله‌های پیشنهادی تولیدکننده برای شرکت در بازار روز بعد را نیز ارائه کردند. با این حال این الگوریتم به گونه‌ای طراحی شده که تنها به ازای بالاترین سطح استواری، پله‌های پیشنهادی را تولید می‌کند.

مرجع [۱۷، ۱۶] مدل‌های خودبرنامه‌ریزی استوار برای مزارع بادی همراه با ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد داده‌اند. در این مدل‌ها عوامل عدم‌قطعیت، قیمت بازار و توان خروجی مولدها می‌باشد. مرجع [۱۸] مدل استواری برای واحدهای آبی-حرارتی ارائه کرده است. مرجع [۱۹] از مدل مینیماکس پیشیمانی برای مدل‌سازی استوار برنامه‌ریزی واحدهای حرارتی استفاده کرده است.

مرجع [۱] مدلی استوار برای خودبرنامه‌ریزی و استراتژی پیشنهاددهی واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای ارائه کرده است. در این مطالعه از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۵] برای تولید پله‌های پیشنهاد استفاده شده است. مرجع [۲۰] مدل استواری برای نیروگاه‌های حرارتی ارائه کرد که کمینه کردن آلاینده‌گی CO₂ را نیز در اهداف خود گنجانده است. مرجع [۲۱] مدل استواری برای خودبرنامه‌ریزی هفتگی همراه با در نظر گرفتن قراردادهای سلف^۵ ارائه کرده است.

یکی از پرطرفدارترین مجموعه‌های عدم‌قطعیت، مجموعه عدم‌قطعیت چندوجهی است که در [۲۲] معرفی شده است. مزیت این مجموعه عدم‌قطعیت، قابلیت تنظیم سطح استواری به همراه دستیابی به مدل نهایی خطی است. مراجعی مثل [۱۵، ۱۸، ۲۱] از این مجموعه برای تشکیل مدل استوار بهره برده‌اند. با این وجود در تعریف این مجموعه عدم‌قطعیت، همبستگی بین ضرایب غیرقطعی مساله نادیده گرفته می‌شود. بررسی قیمت‌های تسویه بازار برق نشان از وجود همبستگی قوی بین این قیمت‌ها دارد. توجه نکردن به همبستگی بین قیمت‌ها در ۲۴ ساعت روز، منجر به ارائه جواب استوار حتی در برابر سناریوهای قیمتی غیرهمبسته می‌شود که نتیجه آن کاهش مقدار تابع هدف (سود تولیدکننده) خواهد بود.

در این مقاله ابتدا یک مجموعه عدم‌قطعیت چندوجهی جدید معرفی می‌گردد که تابعی از همبستگی بین ضرایب غیرقطعی است. سپس با توجه به وجود همبستگی قوی بین قیمت‌ها در بازار روز بعد، یک مدل خودبرنامه‌ریزی استوار مبتنی بر این مجموعه عدم‌قطعیت برای تولیدکننده قیمت‌پذیر توسعه داده می‌شود. ویژگی مدل استوار جدید آن است که در تولید جواب بهینه، با بررسی همبستگی بین قیمت‌ها، از کاهش بی‌مورد سود تولیدکننده در برابر سناریوهای قیمتی غیرهمبسته جلوگیری می‌کند.

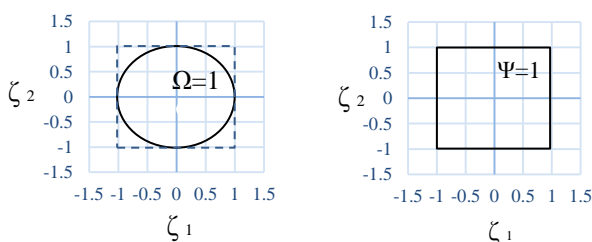
$$U^A = \{ \tilde{a}_j = \hat{a}_j + \zeta_j \delta_j \mid \sum \zeta_j^2 \leq \Omega^2 \} \quad (26)$$

جواب حاصل از مدل استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت بیضوی در برابر رخداد همزمان اختلالات بزرگ استوار نیست ولی با نادیده گرفتن چنین اختلالهایی که احتمال وقوع آن اندک است می توان مقدار تابع هدف را تا حد زیادی بهبود داد.

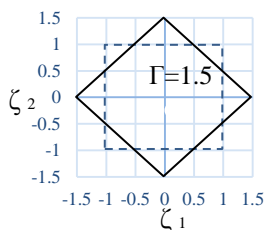
برتسیماس و سیم [۲۲] ضعف مجموعه عدم قطعیت بیضوی را غیرخطی بودن مدل استوار حاصل از آن نامیدند و مجموعه عدم قطعیت چندوجهی را ارایه کردند که هم از مزایای مجموعه قبلی در خصوص کاهش سطح محافظه کاری برخوردار است و هم مدل استوار حاصل از آن خطی باقی می ماند:

$$U^A = \{ \tilde{a}_j = \hat{a}_j + \zeta_j \delta_j \mid |\zeta_j| \leq \Gamma \} \quad (27)$$

در مجموعه عدم قطعیت (۲۷) Γ بودجه عدم قطعیت نامیده می شود که هر چه مقدار بیشتری به آن اختصاص داده شود، جواب نهایی مدل استوارتر خواهد بود. مجموعه های عدم قطعیت معرفی شده برای مدلی با دو ضریب غیرخطی در شکل (۱) نمایش داده شده است. همچنین استفاده از ترکیب مجموعه های فوق نیز برای تشکیل مدل همتای استوار یک مساله بهینه سازی غیرخطی امکان پذیر است [۲۵].



الف) مجموعه عدم قطعیت جعبه ای (ب) مجموعه عدم قطعیت بیضوی



ج) مجموعه عدم قطعیت چندوجهی

شکل (۱): مجموعه های عدم قطعیت در فضای دو بعدی

۳-۲- مطالعه همبستگی در مجموعه عدم قطعیت

از میان مجموعه های عدم قطعیت معرفی شده در بخش قبل، مجموعه چندوجهی از این جهت حائز اهمیت است که هم سطح استواری جواب با تنظیم پارامتر Γ و هم بر خلاف مجموعه عدم قطعیت بیضوی منجر به مدل غیرخطی نمی شود. با این حال در شرایط وجود همبستگی بین ضرایب غیرخطی، عدم بررسی آن در مجموعه عدم قطعیت، موجب می شود مدل بهینه سازی استوار حاصل، جوابی استوار نسبت به مجموعه اختلالات غیرهمبسته نیز تولید کند، حال آنکه وقوع چنین اختلالهایی با توجه به ماتریس همبستگی بین ضرایب می تواند غیر-

معادله (۱) سود تولیدکننده را به عنوان تابع هدف مساله نشان می دهد. معادله (۲) هزینه تولیدکننده در هر ساعت را محاسبه می کند که مشتمل بر هزینه سوخت و هزینه توقف و راه اندازی مجدد می باشد. لازم به ذکر است به منظور اجتناب از غیرخطی شدن مدل، در این مقاله از یک تابع شکسته خطی با N_I بازه تولیدی، به جای تابع غیرخطی هزینه سوخت استفاده شده است. محدودیتهای (۳) تا (۷) خروجی واحد را بر حسب میزان تولید در هر بازه تولیدی نشان می دهند. محدودیتهای (۸) - (۱۱) برای محاسبه هزینه توقف و راه اندازی در هر ساعت وضع شده اند. محدودیتهای (۱۲) و (۱۳) امکان تنظیم نرخ کاهش یا افزایش خروجی را مهیا می کنند. محدودیتهای (۱۴) تا (۱۹) تضمین می کنند که با توجه به محدودیتهای فنی، پس از راه اندازی یا توقف واحد، تغییر وضعیت در آن بلافاصله ایجاد نشود. معادلات (۲۰) و (۲۱) هم کمینه زمانی که واحد باید در ابتدای دوره روشن و یا خاموش بماند را مشخص می کنند.

۳- مجموعه های عدم قطعیت

در یک مساله بهینه سازی استوار فرض می گردد مقدار واقعی یک ضریب غیرخطی مثل a_j در بازه همچون بازه زیر قرار داشته باشد:

$$\tilde{a}_j \in [\hat{a}_j - \delta_j, \hat{a}_j + \delta_j] \quad (23)$$

که \tilde{a}_j مقدار واقعی ضریب a_j ، \hat{a}_j مقدار اسمی و δ_j حداکثر اختلال ممکن نسبت به مقدار اسمی نامیده می شوند. بر این اساس می توان مقدار واقعی ضریب a_j را به شکل زیر نیز تعریف کرد:

$$\tilde{a}_j = \hat{a}_j + \zeta_j \delta_j \quad -1 \leq \zeta_j \leq 1 \quad (24)$$

که در معادله فوق ζ_j اختلال^۶ ضریب \hat{a}_j نامیده می شود. فضای حاصل از اشتراک اختلال های تمام ضرایب غیرخطی مساله، فضای عدم قطعیت مساله را ایجاد می کند. طراحی هر مدل بهینه سازی استوار، مستلزم انتخاب زیرمجموعه ای از این فضا با عنوان مجموعه عدم قطعیت است که جواب های حاصل از حل مدل در برابر اختلال های موجود در این مجموعه استوار باقی خواهد ماند.

۳-۱- رایج ترین مجموعه های عدم قطعیت

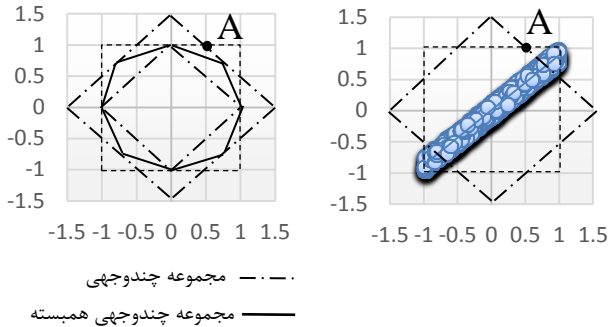
ضرورت آنکه جواب نهایی به ازای هر اختلال مستقل ζ_j در بازه $[-\Psi, \Psi]$ ، $(0 < \Psi \leq 1)$ ، استوار باشد، ایجاب می نماید که مجموعه n اختلال ζ_j ، یک مکعب n بعدی را تشکیل می دهند. این مجموعه را به واسطه شکل هندسی آن، مجموعه عدم قطعیت جعبه ای^۷ می نامند و می توان آنرا به شکل زیر فرمول بندی کرد:

$$U^A = \{ \tilde{a}_j = \hat{a}_j + \zeta_j \delta_j \mid |\zeta_j| \leq \Psi \} \quad (25)$$

سویستر [۲۳] اولین مدل بهینه سازی استوار را مبتنی بر این مجموعه عدم قطعیت با فرض $\Psi = 1$ ارایه کرد. این مدل در برابر تمام اختلال های ممکن استوار و کاملاً محافظه کارانه است.

مرج [۲۴] با انتقاد از رویکرد بیش محافظه کارانه سویستر مجموعه عدم قطعیت بیضوی^۸ را به شکل زیر ارایه کردند:

است، افزایش همبستگی بین ضرایب منجر به کاهش اثر اختلال $|\zeta_k|$ در حاصل جمع اختلال‌ها خواهد شد. در نتیجه مجموعه محدودیت‌های تعریف شده در مجموعه (۲۸) اجازه می‌دهند در صورت اختلال توأم در همه ضرایب، مجموع این اختلال‌ها مقدار بیشتری بگیرد و این به معنی پوشش بهتر حول قطر است.



شکل (۲): نمایش نحوه پوشش داده‌های همبسته توسط مجموعه عدم قطعیت چندوجهی

شکل (۳): مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته

لم زیر نشان می‌دهد که به ازای همبستگی کامل بین ضرایب مجموعه رابطه (۲۸) تمام فضای حول قطر فضای غیرقطعی را پوشش می‌دهد.

لم ۱: مجموعه عدم قطعیت (۲۸) به ازای $|\rho_{jk}| = 1 \ (\forall j, k \neq j)$ تمام قطرهای فضای عدم قطعیت را پوشش می‌دهد. اثبات: هرگاه $|\rho_{jk}| = 1$ ، مرزهای مجموعه عدم قطعیت (۲۸) توسط دسته معادلات زیر تعریف می‌شود:

$$|\zeta_j| + \sum_{k \neq j} \left[\left(1 - \left(\frac{n-\Gamma}{n-1} \right) \right) |\zeta_k| \right] = \Gamma \quad j = 1, \dots, n \quad (29)$$

که معادل است با:

$$|\zeta_j| + \left(\frac{\Gamma-1}{n-1} \right) \sum_{k \neq j} |\zeta_k| = \Gamma \quad j = 1, \dots, n \quad (30)$$

به ازای هر مقداری از Γ ، تمام بردارهای $Z = \begin{pmatrix} \pm 1 \\ \pm 1 \\ \vdots \\ \pm 1 \end{pmatrix}_{n \times 1}$ دستگاه معادلات (۳۰) هستند. بنابراین تمام طول بردارهای Z که اقطار فضای عدم قطعیت را تشکیل می‌دهند عضو مجموعه عدم قطعیت (۲۸) رابطه می‌باشند.

۴- مدل همتای استوار خودبرنامه‌ریزی مبتنی بر

مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته

مدل خودبرنامه‌ریزی ارائه شده در بخش ۲ را به شکل زیر خلاصه می‌کنیم:

محتمل باشد. این محافظه‌کاری بیش از حد منجر به کاهش کیفیت تابع هدف می‌شود.

بنابر اطلاعات نویسندگان در دو تحقیق همبستگی بین ضرایب در تشکیل مجموعه عدم قطعیت دخالت داده شده است. برتسیماس و سیم [۲۲] وجود همبستگی بین ضرایب غیرقطعی را در شرایطی بررسی کردند که عوامل ایجاد عدم قطعیت در ضرایب و مکانیزم تاثیر آنها، شناخته شده باشند. از آنجاکه در بسیاری موارد این شرایط مهیا نیست، مدل معرفی شده توسط آنها تنها در شرایط بسیار خاص قابل استفاده است. به عنوان مثال در بازار برق استفاده از این رویکرد میسر نیست. همچنین مرجع [۲۶] در تعریف مجموعه عدم قطعیت چندوجهی ماتریس کواریانس ضرایب غیرقطعی را وارد کرده است تا از استواری جواب در برابر سناریوهای غیرهمبسته جلوگیری کند. مدل استوار پیشنهادی مذکور به‌طور محدود در برخی حوزه‌ها از جمله خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده برق مثل [۱۷، ۱۶] استفاده شده است. با این حال این مدل محدودیتی روی میزان اختلال هر ضریب به صورت مجزا اعمال نمی‌کند و در نتیجه جواب بهینه ممکن است استوار به ازای اختلال‌هایی خارج از حدود تعریف شده در رابطه (۲۳) گردد و خود منجر به استواری بی‌دلیل جواب در برابر سناریوهای غیر محتمل یا غیرممکن گردد.

۳-۳- مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته

وجود همبستگی موجب تجمع اختلال‌ها حول قطر فضای عدم قطعیت می‌شود. شکل (۲) نحوه پراکندگی اختلال‌ها را در حضور همبستگی قوی بین دو اختلال ζ_1 و ζ_2 نشان می‌دهد. استفاده از مجموعه عدم قطعیت چندوجهی مبتنی بر تعریف مرجع [۲۲] منجر به پوشش فضای تهی بزرگی می‌شود که به معنی استواری جواب بهینه در برابر هر اختلال ناممکن در این فضای تهی (مثل نقطه A) و در نتیجه افت کیفیت تابع هدف است. ایده مجموعه عدم قطعیت جدید، شکستن مرزهای مجموعه به گونه‌ای است که پوشش بیشتر حول قطر و پوشش کمتر در نواحی تهی ایجاد کند. این امر در شکل (۳) نشان داده شده است. به‌علاوه همبستگی قوی‌تر بین ضرایب باید منجر به انحنای بیشتر مرزها گردد.

بر این اساس "مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته" برای پوشش بهتر اختلال‌های همبسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U^A = \left\{ \bar{a}_j = \bar{a}_j + \zeta_j \delta_j \mid |\zeta_j| + \sum_{k \neq j} \left[\left(1 - \left(\frac{n-\Gamma}{n-1} \right) |\rho_{jk}| \right) |\zeta_k| \right] \leq \Gamma, \forall j \right\} \quad (28)$$

لازم به ذکر است به ازای همه مقادیر j و k ، $\rho_{jk} = 0$ مجموعه معرفی شده در (۲۸) معادل مجموعه عدم قطعیت چندوجهی متداول موجود در رابطه (۲۷) خواهد بود. به‌علاوه، از آنجاکه عبارت $\left(1 - \left(\frac{n-\Gamma}{n-1} \right) |\rho_{jk}| \right)$ در رابطه (۲۸) تابعی یکنوا و نزولی از $|\rho_{jk}|$

$$\begin{aligned} \min \sum_t z_t \Gamma + \sum_t w_t \\ z_t + \sum_{k \neq t} \left(1 - \left(\frac{N_T - \Gamma}{N_T - 1} \right) |\rho_{tk}| \right) z_k \geq \delta_t P_t \quad \forall t \quad (41) \\ w_t \geq 0 \quad \forall t \\ z_t \geq 0 \quad \forall t \end{aligned}$$

مساله (۳۵) شدنی و محدود است، بنابراین طبق قضیه قوی دوگان مساله ثانویه آن هم شدنی و محدود و با جواب بهینه برابر مساله اولیه است. بنابراین به ازای جواب بهینه P^* می توان تابع هدف مدل (۴۱) را جایگزین تابع محافظت موجود در مدل (۳۵) کرد و محدودیت های مدل (۴۱) را نیز به محدودیت های (۳۵) اضافه کرد. همچنین از آنجا که تابع هدف مساله اصلی از نوع بیشینه سازی است، جواب بهینه آن، کمینه بودن تابع هدف مدل (۴۱) را تضمین می کند و نیازی به قید عبارت \min در عملیات جایگزینی نخواهد بود و نتیجه مدل حاصل مدل خطی (۳۶) خواهد بود.

۵- مثال عددی

در این بخش به منظور ارزیابی کارایی مدل استوار پیشنهادی در بخش قبل که مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته ارایه شده است، برای خودبرنامه ریزی یک واحد حرارتی استفاده می شود و نتایج عددی ارایه می شود. سپس یک فرآیند شبیه سازی نتیجه استفاده از مدل پیشنهادی را در دراز مدت در قیاس با مدل استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت چندوجهی غیرهمبسته که به عنوان نمونه در مراجع [۲۲، ۱۵] مورد استفاده قرار گرفته است، نشان خواهد داد. مشخصات فنی تولیدکننده در جدول (۱) خلاصه شده است. این اطلاعات از طریق مصاحبه با متخصصین واحدهای بهره بردار نیروگاههای حرارتی ایران به دست آمده است.

جدول (۱): مقادیر مفروض برای پارامترهای مساله

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$pmin$	۷۰	C_2^F	۳۹۴۸۷۵	RSU	۷۸۰
Pb_1^m	۸۵	C_3^F	۴۰۱۷۵۰	RSD	۷۸۰
Pb_2^m	۱۰۰	C_4^F	۴۱۷۲۵۰	ut^{min}	۱
Pb_3^m	۱۱۰	C_5^F	۴۱۲۲۰۰	dt^{min}	۱
Pb_4^m	۱۲۰	C^{SU}	۲۶۳۶۳۰۰۰	u^0	۱
Pb_5^m	۱۲۸	C^{SD}	۲۶۳۶۳۰۰۰	ut^0	۲
C_0^F	۲۶۲۶۷۵۰۰	R^{up}	۷۸۰	dt^0	۰
C_1^F	۳۸۶۶۲۵	R^{down}	۷۸۰		

در جدول (۱)، ضرایب C_i^F با فرض تابع هزینه غیر خطی زیر برای واحد و تبدیل آن به تابع خطی شکسته با ۵ قطعه محاسبه شده اند:

$$cost^{Fuel}(P_t) = 840000 + 344000P_t + 275P_t^2 \quad (42)$$

$$\max \sum_{t=1}^{N_T} (\tilde{\lambda}_t P_t - C(P_t)) \quad (32)$$

$$P \in S^P \quad (33)$$

در قید (۳۳) مجموعه شدنی مساله را با توجه به قیود فنی (۲۲)-(۲) نشان می دهد. با فرض آنکه قیمت تسویه واقعی در هر ساعت از بازار روز بعد در بازه $[\hat{\lambda}_t - \delta_t, \hat{\lambda}_t + \delta_t]$ قرار داشته باشد، رابطه زیر را برای آن می توان تعریف کرد:

$$\tilde{\lambda}_t = \hat{\lambda}_t + \zeta_t \delta_t \quad (34)$$

از آنجا که مقدار واقعی هر ضریب متشکل از دو عبارت مقدار اسمی و اختلال (یعنی $\hat{\lambda}_t$ و $\zeta_t \delta_t$) می باشد، با فرض وجود اختلالهای ζ_t ، تابع هدف مدل استوار نیز متشکل از دو بخش مقدار اسمی و اختلال خواهد بود. بنابراین مدل استوار مساله (۳۲-۳۳) را باید به شکل بیشینه کردن مقدار تابع هدف همراه با بیشینه اختلال ممکن تحت مجموعه عدم قطعیت موردنظر تعریف کرد. بر این اساس مدل همتای استوار غیرخطی زیر برای آن پیشنهاد می شود:

$$\begin{aligned} \max \sum_{t=1}^{N_T} (\tilde{\lambda}_t P_t - C(P_t)) \\ - \sum_t |\zeta_t| \delta_t P_t \quad \left\{ \zeta_t \mid |\zeta_t| + \sum_{k \neq t} \left[\left(1 - \left(\frac{n-1}{n-1} \right) |\rho_{tk}| \right) |\zeta_t| \right] \leq \Gamma \right\} \\ P \in S^P \quad (35) \end{aligned}$$

قضیه: مدل همتای استوار غیرخطی (۳۵) معادل با مدل خطی زیر است:

$$\begin{aligned} \max \sum_{t=1}^{N_T} (\tilde{\lambda}_t P_t - C(P_t)) - \sum_t z_t \Gamma - \sum_t w_t \\ z_t + \sum_{k \neq t} \left(1 - \left(\frac{N_T - \Gamma}{N_T - 1} \right) |\rho_{tk}| \right) z_k + w_t \geq \delta_t P_t \quad \forall t \quad (36) \\ w_t \geq 0 \quad \forall t \\ z_t \geq 0 \quad \forall t \\ P \in S^P \end{aligned}$$

اثبات: فرض کنید جواب بهینه مدل (۳۵) را با بردار P^* نشان دهیم. در این صورت می توان تابع محافظت زیر را تعریف کرد:

$$\beta(P^*, \Gamma) = \max_{\{\zeta_t \mid |\zeta_t| + \sum_{k \neq t} \left[\left(1 - \left(\frac{n-1}{n-1} \right) |\rho_{tk}| \right) |\zeta_t| \right] \leq \Gamma\}} \sum_t |\zeta_t| \delta_t P_t^* \quad (37)$$

و آنرا به شکل مدل برنامه ریزی خطی زیر فرموله کرد:

$$\beta(P^*, \Gamma) = \max \sum_t |\zeta_t| \delta_t |P_t^*| \quad (38)$$

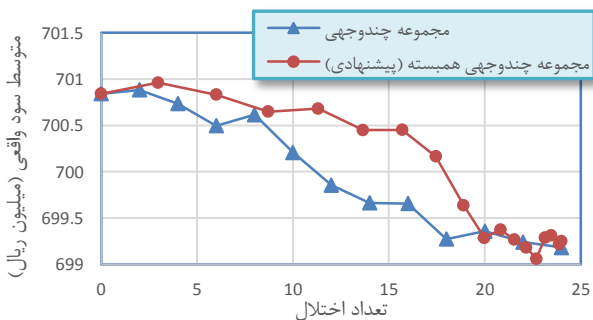
$$|\zeta_t| + \sum_{k \neq t} \left[\left(1 - \left(\frac{n-1}{n-1} \right) |\rho_{tk}| \right) |\zeta_t| \right] \leq \Gamma \quad \forall j \quad (39)$$

$$0 \leq |\zeta_t| \leq 1 \quad \forall j \quad (40)$$

اگر w_t و z_t را به ترتیب به عنوان متغیرهای دوگان محدودیت های (۳۹) و (۴۰) تعریف کنیم، آنگاه مساله دوگان مدل (۳۸-۴۰) به شکل زیر می باشد:

مجموعه ۶ واحد اختلال را بین تمام ساعات روز توزیع کند. ستون سوم و ششم جدول (۳) توزیع ۶ واحد نوسان را در صورت استفاده از مدل استوار مرجع [۱۵] که مبتنی بر مجموعه چندوجهی غیرهمبسته توسعه یافته است، نشان می‌دهد. از آنجا که در این مدل همبستگی بین قیمت‌ها بررسی نمی‌شود، بدترین توزیع ۶ واحد اختلال (توزیعی که بیشترین اثر منفی را در تابع هدف دارد) حالتی را شامل می‌شود که برای بعضی ساعات اختلال کامل رخ داده و برای برخی ساعات دیگر هیچ اختلالی وجود ندارد. به عنوان مثال جواب نهایی در برابر سناریویی که در آن قیمت در ساعت ۲۰ با اختلال کامل همراه است و در ساعت ۲۱ هیچ اختلالی رخ نمی‌دهد استوار است. واضح است که با توجه به همبستگی بین قیمت‌ها وقوع چنین سناریویی قیمتی تقریباً غیرممکن است و مدل استوار غیرهمبسته با استوار کردن جواب در برابر چنین سناریویی کاهش بی‌مورد در تابع هدف را موجب می‌شود. این در حالی است که مدل پیشنهادی با بررسی ماتریس همبستگی و حذف چنین سناریوهای غیرممکنی، می‌تواند از کاهش بی‌دلیل مقدار هدف جلوگیری کند.

برای ارزیابی کارایی هر یک از روش‌ها در دستیابی به سود واقعی لازم است جواب‌های هر دو روش در یک فرآیند شبیه‌سازی مورد آزمون قرار گیرند. برای این منظور از ۱۰۰۰۰ بار شبیه‌سازی مونت کارلوی جواب‌های دو روش که به ازای سطوح مختلف استواری به دست آمده‌اند، استفاده شده است. طی این شبیه‌سازی، قیمت‌های تسویه به طور تصادفی و با توجه به ماتریس همبستگی مفروض در مساله تولید شده‌اند. شکل (۴) متوسط سود واقعی تولیدکننده را به ازای سطوح مختلف استواری نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، به ازای تعداد اختلال کمتر از ۲۰، مدل پیشنهادی در بلندمدت سود بیشتری را عاید تولیدکننده می‌کند. به ازای سطوح استواری بالا (تعداد اختلال بیشتر از ۲۰) هر دو مدل کارایی نسبتاً یکسانی دارند که این موضوع ناشی از شکل مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته است که با بزرگ شدن مقدار Γ به مجموعه چندوجهی غیرهمبسته نزدیک می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت تنها برای تولیدکننده‌های بسیار محافظه‌کار تفاوت چندانی بین استفاده از دو مدل وجود ندارد. این در حالیست که برای تولیدکننده‌های ریسک‌پذیر، مدل پیشنهادی سود بیشتری به همراه دارد.



شکل (۴): متوسط سود واقعی در برابر اختلال

همچنین فرض شده است این تولیدکننده قصد شرکت در بازار روز بعد ایران را دارد. بر این اساس تولیدکننده قیمت‌های جدول (۲) را برای روز بعد پیش‌بینی کرده است. همچنین با استفاده از قیمت‌های تسویه بازار روز بعد ایران که برای چهارماهه اول سال ۱۳۹۳ جمع‌آوری شده، ماتریس همبستگی قیمت در ساعات مختلف روز محاسبه شد.

جدول (۲): قیمت‌های پیش‌بینی شده برای روز بعد

λ_t	t	λ_t	t	λ_t	t	λ_t	t
۴۱۳۷۳۸	۱۹	۴۱۷۱۶۶	۱۳	۳۷۸۸۹۴	۷	۴۰۱۳۸۴	۱
۴۱۶۰۹۲	۲۰	۴۱۶۱۷۴	۱۴	۳۹۰۲۵۵	۸	۳۹۳۳۹۸	۲
۴۱۹۴۹۵	۲۱	۴۱۶۱۶۰	۱۵	۴۰۳۲۵۰	۹	۳۸۶۰۸۴	۳
۴۱۸۵۹۶	۲۲	۴۱۵۰۱۱	۱۶	۴۱۰۸۷۶	۱۰	۳۸۱۷۶۳	۴
۴۱۲۹۷۹	۲۳	۴۱۴۱۸۹	۱۷	۴۱۴۶۰۰	۱۱	۳۸۱۵۰۷	۵
۴۱۰۲۰۳	۲۴	۴۱۴۲۲۰	۱۸	۴۱۶۵۵۶	۱۲	۳۸۰۲۳۴	۶

با تنظیم مقادیر مختلف Γ در مدل (۴۱)، سطوح مختلف استواری برای مساله مورد بررسی مورد آزمون قرار گرفت. به عنوان مثال $\Gamma = 0.23$ منجر به جواب استواری می‌گردد که در برابر اختلال‌های نمایش داده شده در ستون دوم و پنجم جدول (۳) استوار باشد. مجموع اختلال‌ها در این دو ستون جدول معادل ۶ است و این یعنی جواب مدل (۴۱) در برابر حداکثر ۶ واحد اختلال استوار است و در عین حال مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته بیشترین اثر منفی این ۶ واحد اختلال را در سود، زمانی می‌داند که با ترکیب جدول (۳) توزیع شده باشند و در نتیجه جواب استواری در برابر چنین اختلالی ایجاد می‌کند.

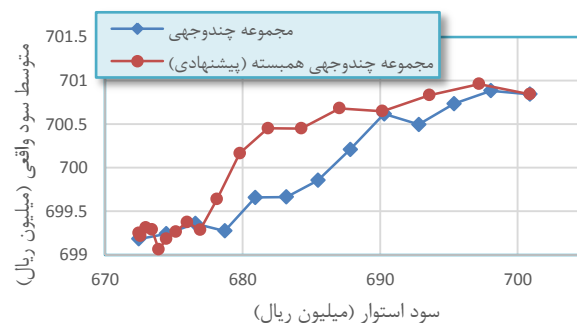
جدول (۳): میزان اختلال قیمت‌های هر ساعت در جواب بهینه حاصل از دو روش با فرض استواری جواب در برابر مجموعاً ۶ واحد اختلال

ζ_t حاصل از مدل پیشنهادی	ζ_t حاصل از مدل غیرهمبسته	t	ζ_t حاصل از مدل پیشنهادی	ζ_t حاصل از مدل غیرهمبسته	t
۰.۲۲۷۳	۰.۱۰۹۷	۱۳	۰.۲۲۹۵۴	۰.۲۹۵۴	۱
۰.۲۱۵۳	۰	۱۴	۰.۲۸۸۵	۰	۲
۰.۱۵۱۵	۰	۱۵	۰.۲۹۲۵	۰	۳
۰.۱۳۴۲	۰.۱۱۵۵	۱۶	۰.۳۰۲۵	۰	۴
۰.۱۱۱۲	۰.۱۰۱۰	۱۷	۰.۳۱۵۵	۰	۵
۰.۰۸۶۳	۰.۰۱۵۵	۱۸	۰.۳۱۶۶	۰.۶۹۹۷	۶
۰.۱۷۹۲	۰	۱۹	۰.۲۸۰۲	۰.۸۳۴۲	۷
۰.۲۰۲۹	۰.۶۳۰۷	۲۰	۰.۲۵۰۵	۱	۸
۰.۲۸۰۵	۱	۲۱	۰.۲۸۲۷	۰	۹
۰.۲۹۲۵	۰.۵۲۶۲	۲۲	۰.۲۵۶۷	۰	۱۰
۰.۳۰۹۴	۰.۴۶۴۰	۲۳	۰.۳۱۹۸	۰	۱۱
۰.۳۰۶۶	۰	۲۴	۰.۳۰۴۲	۰.۵۰۳۵	۱۲
مجموع			۶.۰۰۲	۶.۰۰۰	

همانطور که در جدول (۳) دیده می‌شود وجود همبستگی قوی بین قیمت‌ها در ساعات مختلف سبب شده است تا مدل پیشنهادی

- [4] Arroyo, J.M., Conejo, A.J. "Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market". IEEE Transactions on Power Systems, 15(3): p. 1098-1104, 2000.
- [5] de la Torre, S., et al., "Price maker self-scheduling in a pool-based electricity market: a mixed-integer LP approach". IEEE Transactions on Power Systems, 17(4): p. 1037-104, 2002.
- [6] Yamin, H.Y., Shahidehpour, S.M., "Risk and profit in self-scheduling for GenCos". IEEE Transactions on Power Systems, 19(4): p. 2104-2106, 2004.
- [7] Dahlgren, R., C.-C. Liu, Lawarree, J., "Risk assessment in energy trading". IEEE Transactions on Power Systems, 18(2): p. 503-511, 2003.
- [8] Dahlgren, R., C. Liu, Lawarree, J., "Volatility in the California power market: source, methodology and recommendations. in Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-. 2001. IET.
- [9] Vatani, B., N. Amjady, and H. Zareipour, "Stochastic self-scheduling of generation companies in day-ahead multi-auction electricity markets considering uncertainty of units and electricity market prices". IET Generation, Transmission & Distribution, 7(7): p. 735-744, 2013.
- [10] Yamin, H.Y., "Fuzzy self-scheduling for GenCos". IEEE Transactions on Power Systems, 20(1): p. 503-505, 2005.
- [11] Jabr, R., "Self-scheduling under ellipsoidal price uncertainty: conic-optimisation approach". IET Generation, Transmission & Distribution, 1(1): p. 23-29, 2007.
- [12] Landry, J.C., A Robust Optimization Approach to the Self-scheduling Problem Using Semidefinite Programming. Thesis, University of Waterloo, 2010.
- [13] Luo, X., et al., "Robust optimization-based generation self-scheduling under uncertain price". Mathematical Problems in Engineering, 2011.
- [14] Jabr, R.A., Worst-case robust profit in generation self-scheduling. IEEE Transactions on Power Systems, 24(1): p. 492-493, 2009.
- [15] Baringo, L. and A.J. Conejo, "Offering strategy via robust optimization". IEEE Transactions on Power Systems, 26(3): p. 1418-1425, 2011.
- [16] Thatte, A.A., D.E. Viassolo, and L. Xie. "Robust bidding strategy for wind power plants and energy storage in electricity markets", General Meeting in Power and Energy Society, IEEE, 2012.
- [17] Thatte, A.A., et al., "Risk measure based robust bidding strategy for arbitrage using a wind farm and energy storage". 2013.
- [18] Soroudi, A., "Robust optimization based self scheduling of hydro-thermal Genco in smart grids". Energy, 61: p. 262-271, 2013.
- [19] Fan, L., et al., "Min-Max Regret Bidding Strategy for Thermal Generator Considering Price Uncertainty", IEEE Transactions on Power Systems, 29(5), 2014.
- [20] Bai, M. and Z. Yang, "Distributionally Robust Self-Scheduling Optimization with CO₂ Emissions Constraints under Uncertainty of Prices". Journal of Applied Mathematics, 2014.
- [21] Lima, R.M., A.Q. Novais, and A.J. Conejo, "Weekly self-scheduling, forward contracting, and pool involvement for an electricity producer. An adaptive robust optimization approach". European Journal of Operational Research, 240(2): p. 457-475, 2015.
- [22] Bertsimas, D. and M. Sim, "The price of robustness", Operations research, 52(1): p. 35-53, 2004.
- [23] Soyster, A.L., "convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear

شکل (۵) متوسط سود واقعی را در قیاس با سود استوار (سودی که مدل استوار با توجه به بودجه عدم قطعیت وقوع آنرا تضمین می‌کند)، برای جوابهای مختلف هر دو مدل نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در این نمودار متوسط سود واقعی روش پیشنهادی بیشتر از مدل مبتنی بر مجموعه غیرهمبسته است. این به آن معنی است که به ازای دو جواب از دو روش که سودهای یکسانی را تضمین می‌کنند، مدل پیشنهادی سود واقعی بالاتری را عاید تولیدکننده می‌کند.



شکل (۵): متوسط سود واقعی در برابر سود تضمین شده

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا برای یک مدل بهینه‌سازی که شامل ضرایب غیرقطعی در تابع هدف است، یک مجموعه عدم قطعیت جدید با نام مجموعه عدم قطعیت چندوجهی همبسته ارائه شد. این مجموعه عدم قطعیت در شرایط وجود همبستگی بین ضرایب غیرقطعی مدل، با حفظ شکل خطی مدل همتای استوار، می‌تواند پوشش بهتری روی مناطق مستعد بروز عدم قطعیت همبسته ایجاد نماید و به این طریق از تشکیل فضاهای خالی داخل مجموعه عدم قطعیت و استواری جواب در برابر اختلال‌های نامحتمل، جلوگیری کند. سپس یک مدل خودبرنامه‌ریزی استوار برای تولیدکننده قیمت‌پذیر بر مبنای این مجموعه عدم قطعیت توسعه داده شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی بهتر مدل پیشنهادی می‌باشد.

بنابر آنچه در مقدمه گفته شد، یک تولیدکننده قیمت‌پذیر برای ارائه پیشنهاد در بازار روز بعد لازم است استراتژی پیشنهاددهی مناسب را بر مبنای مدل خودبرنامه‌ریزی تهیه کند. بنابراین مدل ارائه شده در این مقاله می‌تواند مبنای مطالعات بعدی برای ارائه استراتژی پیشنهاددهی بهینه قرار گیرد.

مراجع

- [۱] پریزوند، ی.، وحیدی نسب، و.، کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ۳، شماره ۵، ۲۷-۳۷، ۱۳۹۳.
- [2] Conejo, A.J., et al, "Price-taker bidding strategy under price uncertainty", IEEE Transactions on Power Systems, 17(4): p. 1081-1088, 2002
- [3] Conejo, A.J., et al., "Risk-constrained self-scheduling of a thermal power producer". IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 19(3): p. 1569-1574, 2004.

- programming*". Operations research, 21(5): p. 1154-1157, 1973.
- [24] Ben-Tal, A. and A. Nemirovski, "Robust convex optimization. Mathematics of Operations Research, 23(4): p. 769-805, 1998.
- [25] Li, Z., et al "A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: I. Robust linear optimization and robust mixed integer linear optimization. Industrial & engineering chemistry research, 50(18): p. 10567-10603, 2011.
- [26] Pachamanova, D.A., *A robust optimization approach to finance*, Thesis, Massachusetts Institute of Technology. 2002.

زیرنویس

- ¹ Day-Ahead Market
- ² Self-Scheduling
- ³ Bidding Strategy
- ⁴ Worst-case Robust Optimization
- ⁵ Forward Contracts
- ⁶ Perturbation
- ⁷ Box Uncertainty Set
- ⁸ Ellipsoidal Uncertainty Set