به‌کارگیری بهینه‌سازی استوار جهت مقابله با عدم قطعیت نیروگاه‌های بادی در برنامه‌ریزی توسعه تولید

محمدرضا کریمی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ جمشید آقائی[۲]، دانشیار؛ امین رحیمی رضایی[۳]، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - mohammadrezakarimi225@yahoo.com
۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - aghaei@sutech.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - rezae_amin@yahoo.com

چکیده: هدف از مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP)[۱] یافتن فنّاوری مطلوب، زمان و مکان نصب نیروگاه‌های جدید در یک افق زمانی مشخص می‌باشد به‌طوری که تضمین می‌کند ظرفیت نصب‌شده رشد تقاضای بار را در سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان برآورده خواهد کرد. در این مقاله یکی از رویکردهای مهم موسوم به بهینه‌سازی استوار (RO)[۲] که برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هایی از قبیل تقاضای بار پیش‌بینی‌شده، توان تولیدی باد، هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری مورد استفاده واقع می‌شود، بررسی می‌شوند. برنامه‌ریزی توسعه تولید بهینه به دست آمده از روش پیشنهادی RO در برابر بدترین برنامه‌ریزی عدم قطعیت‌ها با در نظر گرفتن درجه محافظه‌کاری برای هر مجموعه عدم قطعیت مصون می‌شود. برای حل مسئله استوار GEP از روش تجزیه بندرز کمک گرفته می‌شود. برای کاهش هزینه‌ها در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار از نیروگاه بادی استفاده می‌شود. بنابراین، متغیرهای غیرقطعی توان تولیدی باد و هزینه سرمایه‌گذاری احداث آن با روش استوار برتسیماس و سیم مدل می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه تولید، بهینه‌سازی استوار، مجموعه عدم قطعیت، نیروگاه بادی.

Implementing Robust Optimization to Cope with the Uncertainty of Wind Power Generation in the Generation Expansion Planning

M.R. Karimi[1], MSc Student, J. Aghaei[2], Associate Professor, A. Rahimi Rezaei[3], MSc Student

1- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: mohammadrezakarimi225@yahoo.com
2- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: aghaei@sutech.ac.ir
3- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: rezae_amin@yahoo.com

Abstract: The aim of the generation expansion planning (GEP) is finding suitable technology, time and installation location of new plants in a specified time period such that the installed capacity will satisfy the load demand growth with acceptable level of reliability. In this paper, we investigate one of the important approaches known as robust optimization (RO) to consider uncertainties such as forecasted electricity load demand, wind power generation, as well as investment and operation costs. The optimal generation expansion plan obtained from the proposed RO approach is immunized against worst-case planning uncertainties considering the adopted degree of conservatism for each uncertainty set. A decomposition algorithm technique has been implemented to solve the robust counterpart of the original GEP problem in terms of cutting planes. To reduce the utility cost, the wind power plant has been utiled in robust generation expansion planning. Accordingly, the uncertaint parameters (including wind power genaration uncertainty and investment cost) have been modeled based the metod of Bertsymas and Sim.

Keywords: Generation expansion planning (GEP), robust optimization (RO), uncertainty set, wind power.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲ و ۱۳۹۵/۰۴/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰
نام نویسنده مسئول: جمشید آقایی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

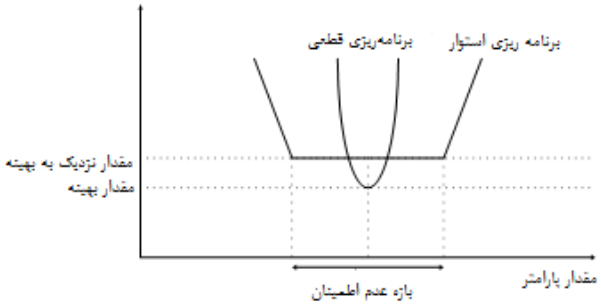
زمانی که در یک شبکه، سیستم تولید موجود کفایت لازم برای تأمین مطمئن تقاضای بار مصرف‌کنندگان را نداشته باشد، لازم است که واحدهای تولیدی جدید به آن اضافه گردند. برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) درواقع پاسخ به این سؤال است که در یک افق زمانی بلندمدت، چه نوع نیروگاه‌هایی، با چه ظرفیت‌هایی، در کجا باید احداث گردند و در چه زمانی به شبکه وارد شوند تا ضمن اعاده کفایت شبکه در تأمین تقاضای بار پیش‌بینی‌شده با کم‌ترین هزینه، سایر اهداف و قیود مورد نظر نیز برآورده گردند. این مسئله یک مسئله برنامه‌ریزی استراتژیکی برای هر کشوری به شمار می‌آید. چون بار و یا تقاضای انرژی در بسیاری از موارد در حال افزایش است، خطای بسیار کوچک در انتخاب نادرست امکانات تولیدی با هزینه‌های فرض‌شده ممکن است منجر به از دست رفتن میلیون‌ها دلار سرمایه نه‌تنها در ارتباط با هزینه‌های اجتماعی، بلکه در اشاره به انرژی تأمین‌نشده، شود.

مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید به دلایل مختلفی همواره دچار چالش بوده است. مهم‌ترین مسئله وجود نامعینی در پارامترها و داده‌های ورودی به علت طبیعت بلندمدت مسئله است. در این میان می‌توان به نامعینی در تقاضای بار پیش‌بینی‌شده، هزینه سرمایه‌گذاری، مشخصه‌های فنی و اقتصادی فناوری‌های جدید تولید انرژی الکتریکی، مدت‌زمان ساخت تأسیسات و قوانین و مقررات زیست‌محیطی، هزینه بهره‌برداری اشاره کرد. GEP یکی از مسائلی است که اخیراً بسیاری از تحقیقات کاربردی و عملیاتی به آن پرداخته‌اند. تاکنون چندین روش برای حل این مسئله پیشنهاد گردیده است. روش‌های مختلف بهینه‌سازی ازجمله MILP، MINLP، برنامه‌ریزی پویا، روش‌های هوشمند، روش‌های تکاملی، روش‌های ترکیبی و ...[۱].

برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار دومرحله‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و بار الکتریکی در مرجع [۲] بررسی شده است. در مراجع [۵-۳] نیز عدم قطعیت انرژی تجدیدپذیر باد در موضوعات مختلف با استفاده از روش استوار مدل شده است. همچنین مرجع [۶] به برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال پرداخته است و نامعینی‌های انرژی تجدیدپذیر و بار الکتریکی را با روش استوار مدل کرده است. همچنین در مقاله [۷] چهارچوبی جدید به‌منظور مطالعه تأثیر مشوق‌های سرمایه‌گذاری بر توسعه ظرفیت تولید برق در سیستم‌های قدرت تجدید ساختاریافته و در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌شود.

در این مقاله عدم قطعیت‌های مسئله GEP توأم با انرژی تجدیدپذیر باد که اخیراً مطالعاتی روی آن انجام نشده است با رویکرد بهینه‌سازی استوار که یکی از رویکردهای اساسی جهت در نظر گرفتن نامعینی می‌باشد، مدل می‌شود. البته در کارهای پیشین، انرژی‌های تجدیدپذیر باد در مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در مقاله [۸] آمده است.

در حقیقت اگر مدل‌ها استوار باشند، خطر به‌کارگیری اشتباه یا استفاده غلط آن بسیار کم‌تر خواهد شد و استواری به این مفهوم است که خروجی مدل نباید خیلی نسبت به مقادیر دقیق پارامترها و ورودی‌های مدل حساس باشد. به‌طورکلی می‌توان مفهوم و مزایای برنامه‌ریزی استوار را در حالت عمومی در شکل ۱ ملاحظه کرد. این شکل نشان می‌دهد که روش‌های قطعی (غیراستوار) مقادیر معینی را برای پارامترها در نظر می‌گیرند و جواب بهینه‌ای را حاصل می‌کنند، در مقابل روش‌های استوار جوابی را نزدیک به بهینه ارائه می‌کنند و هزینه را بالاتر نشان می‌دهند، اما جواب به دست آمده با اطمینان بالایی قابل اتکا و معتبر است. به عبارتی به لحاظ تغییرپذیری مقادیر پارامترها روی یک طیفی (بازه‌ای) از مقادیر، جواب همچنان با اطمینان بالایی قابل اتکا می‌باشند [۹].



شکل ۱: مقایسه مدل قطعی و استوار

روش RO بدترین حالت حل بهینه را ارائه می‌دهد که در برابر همه یا جزئی از متغیرهای نامعین مصون می‌شوند عدم قطعیت‌ها از طریق یک پارامتر از پیش تعیین‌شده به نام بودجه عدم قطعیت کنترل می‌شوند که درجه محافظه‌کاری حل بهینه را نشان می‌دهد [۹]. برای مدل کردن نامعینی‌ها از روش برتسیماس و سیم بهره گرفته شده است و برای حل مسئله از روش ریاضی الگوریتم تجزیه بندرز که یک تکنیک معروف بهینه‌سازی برای حل مسائل عدد صحیح مختلط (MIP)[۳] در مقیاس بزرگ است، استفاده شده است. مطالعات عددی با استفاده از موتور حل CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS انجام شده است [۱۰]. نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر است:

- مدل کردن عدم قطعیت‌های هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای کاندیدا، هزینه بهره‌برداری و بار الکتریکی با ترکیبی از نامعینی‌های هزینه سرمایه‌گذاری و توان تولیدی انرژی تجدیدپذیر باد در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با استفاده از روش استوار برتسیماس و سیم.
- حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار توأم با انرژی تجدیدپذیر باد با استفاده از روش ریاضی الگوریتم تجزیه بندرز که یک تکنیک معروف بهینه‌سازی برای مسائل MIP در مقیاس بزرگ می‌باشد.
- در نظر گرفتن انرژی تجدیدپذیر باد به همراه نامعینی‌های هزینه سرمایه‌گذاری و توان تولیدی آن در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار.

در ادامه مقاله، برنامه‌ریزی توسعه تولید قطعی در بخش دوم ارائه می‌شود. در بخش سوم برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار برتسیماس و سیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم مدل‌سازی انرژی تجدیدپذیر باد برای کاهش هزینه کل با رویکرد استوار مطرح می‌شود. در بخش پنجم نتایج عددی موارد مطالعاتی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ششم نتایج به دست آمده مورد ارزیابی واقع می‌شود.

۲- برنامه‌ریزی توسعه تولید قطعی

هدف مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید قطعی[۴] (DGEP) به دست آوردن برنامه توسعه تولید با ارضای تقاضای بار الکتریکی به مقدار مناسب و حرکت به سمت قابلیت اطمینان معین و قطعی و مینیمم کردن هزینه‌ها، شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای تولید و هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای تولید کاندیدا و موجود در سراسر دوره مطالعه است که تابع هدف و قیود آن به شکل زیر می‌باشد [۱۱].

$$Min\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}\frac{IC_i.(x_{it}-x_{i(t-1)})}{(1+DR)^{(t-1)}}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}\frac{DT_{bt}.OC_{ibt}.p_{ibt}}{(1+DR)^{(t-1)}}$$
$$+\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}\frac{DT_{bt}.OC_{jbt}.p_{jbt}}{(1+DR)^{(t-1)}}+\sum_{w=1}^{NW}F_{wbt}_wind \qquad (۱)$$

$$\sum_{i=1}^{GC}p_{ibt}+\sum_{j=1}^{GE}p_{jbt}+\sum_{w=1}^{NW}p_{wbt}_wind\geq D_{bt}\forall b,\forall t \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{GC}P_i^{max}.x_{it}+\sum_{j=1}^{GE}P_j^{max}\geq(1+RM).D_{b*t}\ \ \forall t \qquad (۳)$$

$$\sum_{b=1}^{B}DT_{bt}.p_{ibt}\leq CF_i\ .\ 8760\ .\ P_i^{max}.x_{it}\ \ \forall i\ ,\forall t \qquad (۴)$$

$$\sum_{b=1}^{B}DT_{bt}.p_{jbt}\leq CF_j\ .\ 8760\ .\ P_j^{max}\ \ \forall j\ ,\forall t \qquad (۵)$$

$$0\leq p_{ibt}\leq P_i^{max}.x_{it}\ \ \forall i\ ,\forall b\ ,\forall t \qquad (۶)$$

$$0\leq p_{jbt}\leq P_j^{max}\ \forall j\ ,\forall b\ ,\forall t \qquad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{GC}\left(IC_i.\left(x_{it}-x_{i(t-1)}\right)\right)\leq IB_t\ \ \forall t \qquad (۸)$$

$$x_{it}=0\ \ \text{if}\ \ t<IT_i\ \ \forall i \qquad (۹)$$

$$x_{i(t-1)}\leq x_{it}\ \ \forall i\ ,\forall t;$$
$$x_{it}\in\{0,1\}\ \forall i\ ,\forall t \qquad (۱۰)$$

تابع هدف (۱) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری واحدهای کاندیدا و موجود را حداقل می‌کند. قید (۲) توازن توان اکتیو برای هر بلوک بار برای هرسال از دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. به عبارتی مجموع تولید واحدهای موجود، کاندیدا و واحدهای بادی مقدار بار را تأمین می‌کنند. ضمناً قید (۳) نشان می‌دهد که مجموع ظرفیت نصب‌شده موجود و کاندیدا بیش‌تر از مقدار پیک بار به‌علاوه یک حاشیه ذخیره برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها است. قیود (۴) و (۵) مجموع انرژی سالیانه واحدهای کاندیدا و موجود را محدود می‌کند. قیود (۶) و (۷) محدوده تولید واحدهای کاندیدا و موجود را مشخص می‌کنند. قید (۸) محدودیت‌هایی را برای مجموع بودجه سرمایه‌گذاری در هرسال وضع می‌کند. قید (۹) محدودیتی را برای زمان مورد نیاز برای ساخت واحدهای تولیدی کاندیدا مختلف ایجاد می‌کند. قید (۱۰) نشان می‌دهد که متغیر x_{it} یک متغیر باینری است. اطلاعات بیش‌تر در خصوص معادلات (۱) تا (۱۰) در مرجع [۱۱] آمده است.

۳- مدل استوار مسئله بهینه‌سازی خطی

۳-۱- عدم قطعیت داده‌ها در مسئله بهینه‌سازی خطی

مسئله بهینه‌سازی خطی زیر را در نظر بگیرید.

$$Max\ \ c'x$$
$$s.t$$
$$Ax\leq b$$
$$l\leq x\leq u.$$

در مسئله فوق فرض می‌شود که عدم قطعیت داده‌ها فقط در ماتریس A می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که C در تابع هدف عدم قطعیت ندارد. از آنجایی که می‌توان از حداکثرسازی تابع هدف Z استفاده کرد، محدودیت $Z-c'x\leq 0$ به محدودیت‌های مسئله اضافه می‌شود. برای دریافت توضیحات تکمیلی و اثبات گزاره‌ها یا قضایای مربوط به مرجع [۱۲] مراجعه شود.

۳-۲- رویکرد استوار جدید (مدل برتسیماس و سیم)[۵]

در این روش یک رویکرد استوار خطی ارائه می‌شود [۱۲]. این مدل توانایی ایستادگی در مقابل پارامترهای با عدم قطعیت تحت مدل عدم قطعیت u را دارد. این مدل را می‌توان به مسائل بهینه‌سازی گسسته نیز گسترش داد. اگر محدودیت iام مسئله اسمی به صورت $a'_i x\leq b_i$ در نظر گرفته شود. J_i مجموعه ضرایب $j\in J_i$ و a_{ij} است که دارای عدم قطعیت می‌باشد. $j\in J_i$ و $\tilde{a}_{ij}$ بر اساس یک توزیع همگن با میانگین برابر با a_{ij} مقدار می‌گیرد. $\tilde{a}_{ij}$ برای هر i در بازه $\left[a_{ij}-\hat{a}_{ij},a_{ij}+\hat{a}_{ij}\right]$ مقدار می‌گیرد. در اینجا متغیر Γ_i معرفی می‌شود. این متغیر لازم نیست مقدار عدد صحیح بگیرد، این متغیر در بازه $\left[0,|J_i|\right]$ مقدار می‌گیرد. نقش متغیر Γ_i تعدیل استواری مدل ارائه‌شده در مقابل سطح محافظه‌کاری جواب می‌باشد. هدف این است که مدل را در مقابل تمام حالاتی که بیش‌تر از $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ تغییر می‌کنند، محافظت شود و یک ضریب به صورت $\left(\Gamma_i-\lfloor\Gamma_i\rfloor\right)\hat{a}_{it}$ تغییر کند. به‌عبارت دیگر زیرمجموعه‌ای از ضرایب تغییر می‌کنند و بر جواب تأثیر می‌گذارند. در این رویکرد، اگر تغییرات در حد $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ باشد، جواب حتماً شدنی خواهد بود و اگر بیش‌تر از $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ تغییر کند با احتمال قوی جواب همچنان شدنی خواهد بود. مدل غیرخطی زیر را در نظر بگیرید.

$$\max\ \ c'x$$
$$s.t$$
$$\sum_j a_{ij}x_j+\max_{\{S_i\cup\{t_i\}|S_i\subset J_i,|S_i|=\lfloor\Gamma_i\rfloor,t_i\in J_i\setminus S_i\}}\left\{\begin{array}{l}\sum_{j\in S_i}\hat{a}_{ij}y_j\\+\left(\Gamma_i-\lfloor\Gamma_i\rfloor\right)\hat{a}_{it_i}y_t\end{array}\right\}\leq b_i\ \ \forall i$$
$$-y_j\leq x_j\leq y_j\ \ \forall j\ \ \text{and}\ \ \ y\geq 0 \qquad (۱۱)$$

اگر $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ به صورت عدد صحیح انتخاب شود محدودیت iام به‌وسیله فرمول زیر محافظت می‌شود:

$$\beta_i(x,\Gamma_i)=\max_{\{S_i|S_i\subset J_i,|S_i|=\Gamma_i\}}\left\{\sum_{j\varepsilon S_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j\right|\right\} \quad (۱۲)$$

زمانی که $\beta_i(x,\Gamma_i)=0$ و $\Gamma_i=0$ محدودیت همان محدودیت مسئله اسمی می‌شود. بنابراین با تغییر $\Gamma_i\in[0,|J_i|]$ یک تعدیل منعطف از استواری به دست می‌آید.

برای نوشتن مجدد فرمول (۱۱) به صورت یک مدل بهینه‌سازی خطی به موارد زیر لازم داریم:

گزاره ۱: بردار x را در نظر بگیرید، تابع محافظت محدودیت iام

$$\beta_i\left(X^*,\Gamma_i\right)=$$

$$\max_{\{S_i\cup\{t_i\}|S_i\subset J_i,|S_i|=\lfloor\Gamma_i\rfloor,t_i\varepsilon J_i\setminus S_i\}}\left\{\sum_{j\varepsilon S_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|+\left(\Gamma_i-\lfloor\Gamma_i\rfloor\right)\hat{a}_{it_i}\left|x_j^*\right|\right\}\forall i$$

برابر با تابع هدف مدل بهینه‌سازی خطی زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}&\beta_i\left(X^*,\Gamma_i\right)=\max\sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|z_{ij}\\&s.t.\quad\sum_{j\in J_i}z_{ij}\le\Gamma_i:p_{ij}\qquad 0\le z_{ij}\le 1\ \forall i\ ,j\in J_i:\Upsilon_i\end{aligned} \quad (۱۳)$$

واضح است که جواب بهینه مسئله شامل یک متغیر Γ_i و یک متغیر در $\left(\Gamma_i-\lfloor\Gamma_i\rfloor\right)$ می‌باشد. این برابر است با انتخاب زیرمجموعه $\{S_i\cup\{t_i\}|\ S_i\subset J_i,|S_i|=\lfloor\Gamma_i\rfloor,t_i\epsilon J_i\setminus S_i\}$ با در نظر گرفتن تابع هدف $\sum_{j\varepsilon S_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|+\left(\Gamma_i-\lfloor\Gamma_i\rfloor\right)\hat{a}_{it_i}\left|x_j^*\right|$.

دوگان مسئله (۱۳) به شکل معادله زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned}&\min\sum_{j\in J_i}p_{ij}+\Upsilon_i\Gamma_i\\&s.t.\quad p_{ij}+\Upsilon_i\ge\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|\forall i\ ,j\in J_i\\&\qquad p_{ij}\ge 0\ \forall i\ ,j\in J_i;\Upsilon_i\ge 0\ \forall i\end{aligned} \quad (۱۴)$$

در ادامه مدل (۱۱) به صورت یک مدل خطی زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned}&\max\ c^{'}x\\&s.t.\quad\sum_j a_{ij}x_j+\Upsilon_i\Gamma_i+\sum_{j\in J_i}p_{ij}\le b_i\ \forall i\\&\Upsilon_i+p_{ij}\ge\hat{a}_{ij}y_j\quad\forall i\ ,j\in J_i\\&-y_j\le x_j\le y_j\quad\forall j\\&l_j\le x_j\le u_j\quad\forall j\\&p_{ij}\ge 0\ \forall i\ ,j\in J_i\ ;\Upsilon_i\ge 0\ \ \forall i\ ;y_j\ge 0\ \ \forall j\end{aligned} \quad (۱۵)$$

معادله (۱۵) شکل استوار مسئله‌ای که دارای نامعینی در قیود است را نشان می‌دهد. اگر تابع هدف به صورت $\min_{x,y}\ c^Tx+b^Ty$ که شامل متغیرهای باینری و عدم قطعیت در تابع هدف و قیود هستند فرض شود، در روش استوار تابع هدف جدید به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۳]:

$$\min_x(c^Tx+\max_{d\in UI}\min_{y\in\Omega(x,d)}b^Ty) \quad (۱۶)$$

تابع هدف به صورت یک تابع بیشینه-کمینه است که بیشینه آن روی متغیرهای عدم قطعیت (هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای گرمایی و باد، هزینه بهره‌برداری، بار الکتریکی و توان تولیدی باد) و کمینه آن روی متغیرهای بهینه‌سازی مسئله بسته شده است به همراه قید اصلی مدل برتسیماس (که متغیرهای عدم قطعیت را نشان می‌دهد) به شکل زیر که استواری حل بهینه با استفاده از پارامتر Γ_i که بودجه عدم قطعیت می‌باشد، کنترل می‌شود.

$$\left\{\tilde{a}_{ij}\in\left[\bar{a}_{ij}-\hat{a}_{ij},\bar{a}_{ij}+\hat{a}_{ij}\right]\forall i,j,\sum_{(i,j)\in J}\left|\frac{\tilde{a}_{ij}-\bar{a}_{ij}}{\hat{a}_{ij}}\right|\le\Gamma\right\} \quad (۱۷)$$

معادلات (۱۶) و (۱۷) دو رابطه پایه روش استوار برای مدل کردن مسائل با عدم قطعیت می‌باشند.

۴- انرژی تجدیدپذیر باد در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار

در این مقاله برای تأمین تقاضای هرچه بهتر بار الکتریکی و کاهش هزینه‌ها، توربین‌های بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار اضافه می‌شوند و تأثیر کاهش هزینه‌های کلی آن با تغییرات بار الکتریکی در دوره‌های مختلف و همچنین برای مقادیر مختلفی از بودجه‌های عدم قطعیت که استواری حل بهینه را تنظیم می‌کنند، مشاهده می‌شود. عدم قطعیت‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید با روش استوار برتسیماس و سیم مدل شده است و برای حل مسئله از روش ریاضی تجزیه بندرز استفاده شده است. تجزیه بندرز یک تکنیک معروف بهینه‌سازی است که در ابتدا توسط آقای J.F. Benders برای حل مسائل MIP در مقیاس بزرگ معرفی شد. ایده اصلی جدا کردن متغیرهای عدد صحیح از متغیرهای حقیقی در مسائل بزرگ با روش تجزیه برای سرعت بخشیدن به روند حل مسئله است. الگوریتم تجزیه بندرز مسئله اولیه را به دو مسئله اصلی و چندین زیر مسئله بر پایه تئوری دوگان برنامه‌ریزی خطی تجزیه می‌کند [۱۴].

۴-۱- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار با افزودن واحدهای بادی

با اضافه کردن توربین‌های بادی مسئله اصلی اولیه[۶] ($MP1$) به شکل (۱۸) نوشته می‌شود که $\tilde{F}_{wbt}_wind$ در آن هزینه احداث توربین بادی می‌باشد که می‌تواند با عدم قطعیت نیز روبرو شود $\left(\tilde{F}_{wbt}\in\left[\bar{F}_{wbt}-\hat{F}_{wbt},\bar{F}_{wbt}+\hat{F}_{wbt}\right]\ \forall w\ \forall b\ ,\forall t\right)$ که برای سادگی مسئله عدم قطعیت به توان تولیدی آن اختصاص داده می‌شود. قید (۱۷) در هر دو مسئله اصلی و زیر مسئله وجود خواهد داشت با این تفاوت که متغیرهای غیرقطعی مسئله اصلی ما در اینجا هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای گرمایی و باد می‌باشند ولی متغیرهای نامعین زیرمسئله هزینه بهره‌برداری، بار الکتریکی و توان تولیدی باد هستند.

$$\min_{\forall x_{it}\in\Omega_{MP}}\left\{\max_{\forall i\tilde{c}_i,\tilde{F}_{wbt}\in US_I}\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}\frac{i\tilde{c}_i\cdot\left(x_{it}-x_{i(t-1)}\right)}{\left(1+DR\right)^{(t-1)}}+\sum_{w=1}^{NW}\tilde{F}_{wbt}-wind\right)\right\}$$

$$\Omega_{MP}=\left\{ (8)-(10),(17);\ x_{it}\in\{0,1\}\ \forall i,\forall t\right\} \qquad (۱۸)$$

با استفاده از تئوری دوگان، مسئله بیشینه داخلی به کمینه داخلی تبدیل‌شده و تابع هدف مسئله اصلی به شکل زیر به یک تابع کمینه‌سازی تبدیل خواهد شد:

$$\min_{zlower}$$

$$zlower\geq\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}\frac{I\bar{C}_i.\left(x_{it}-x_{i(t-1)}\right)}{(1+DR)^{(t-1)}}+\sum_{w=1}^{NW}\tilde{F}_{wbt}_wind\\ +\Gamma_I.m+\sum_{i=1}^{GC}n_i\end{array}\right\} \qquad (۱۹)$$

که در آن متغیرهای n و n_i دوگان متغیرهای $MP1$ هستند و Γ_I بودجه عدم قطعیت مسئله اصلی می‌باشد که در بازه صفر تا حداکثر متغیرهای غیرقطعی MP مقدار می‌گیرد $\{[0,|J_I|]\}$.

همچنین زیرمسئله اولیه[۷] $(SP1)$ به شکل زیر است:

$$\max_{\forall\tilde{d}_{bt},\ \forall o\tilde{c}_{ibt},\ \forall o\tilde{c}_{jbt}\in US_{II}}\left\{\min_{\forall p_{ibt},\forall p_{jbt},\forall f_{bt}\in\Omega_{SP}}\left(\begin{array}{l}PC.\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}f_{bt}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}\frac{DT_{bt}.o\tilde{c}_{ibt}.p_{ibt}}{(1+DR)^{(t-1)}}\\ +\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}\frac{DT_{bt}.o\tilde{c}_{jbt}.p_{jbt}}{(1+DR)^{(t-1)}}\end{array}\right)\right\}$$

$$s.t$$

$$\Omega_{SP}=\sum_{i=1}^{GC}p_{ibt}+\sum_{j=1}^{GE}p_{jbt}+\sum_{w=1}^{NW}\tilde{p}_{wbt}_wind+f_{bt}\geq\tilde{d}_{bt}\ \ \forall b,\forall t$$

$$,(5)-(7),(17); \qquad (۲۰)$$

در قید بالا تغییرات واحد بادی به شکل زیر است:

$$\tilde{p}_{wbt}_wind=\bar{p}_{wbt}_wind+\left(z_{wbt}^{p^{fr}}+z_{wbt}^{p^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right).\hat{p}_{wbt}_wind$$

که داریم:

$$z_{wbt}^{p^{fr}}+z_{wbt}^{p^{tr}}\leq 1\quad\forall w,\forall b,\forall t$$

با استفاده از تئوری دوگان برای جمله کمینه داخلی زیرمسئله اولیه، تابع هدف (۲۰) به صورت مسئله بیشینه زیر به همراه قیود آن معرفی می‌شود. زیر مسئله ثانویه $(SP2)$ با جایگزینی روابط بالا به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\max\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\left(\bar{D}_{bt}.\lambda_{bt}+\hat{D}_{bt}.\left(\lambda_{bt}^{D^{fr}}+\lambda_{bt}^{D^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\right)\\ -\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{w=1}^{NW}\left(\begin{array}{l}\bar{p}_{wbt}_wind.\lambda_{bt}\\ +\hat{p}_{wbt}_wind.\left(\lambda_{Wbt}^{P^{fr}}+\lambda_{Wbt}^{P^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\end{array}\right)\\ -\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}CF_i\ .\ 8760\ .\ P_i^{max}\ .x_{it}^{\beta}\ .\pi_{it}\\ -\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{GE}CF_j\ .\ 8760\ .\ P_j^{max}\ .x_{jt}^{\beta}\ .\pi_{jt}\\ -\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}P_i^{max}.x_{it}^{\beta}.v_{ibt}-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}P_j^{max}.v_{jbt}\end{array}\right\}$$

$$s.t.\qquad\lambda_{bt}\leq PC\quad\forall b,\forall t$$

$$\lambda_{bt}-DT_{bt}.\pi_{it}-v_{ibt}\leq\frac{DT_{bt}.O\bar{C}_{ibt}}{(1+DR)^{(t-1)}}$$

$$+\frac{DT_{bt}.O\hat{C}_{ibt}}{(1+DR)^{(t-1)}}.\left(z_{ibt}^{OC^{fr}}+z_{ibt}^{OC^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\ \forall i,\forall b,\forall t$$

$$\lambda_{bt}-DT_{bt}.\pi_{jt}-v_{ibt}\leq\frac{DT_{bt}.O\bar{C}_{jbt}}{(1+DR)^{(t-1)}}$$

$$+\frac{DT_{bt}.O\hat{C}_{jbt}}{(1+DR)^{(t-1)}}.\left(z_{jbt}^{OC^{fr}}+z_{jbt}^{OC^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\ \forall j,\forall b,\forall t$$

$$\lambda_{bt}\geq 0\ \forall b,\forall t;\pi_{it}\geq 0\ \forall i,\forall t;\pi_{jt}\geq 0\ \forall j,\forall t;$$

$$v_{ibt}\geq 0\ \forall i,\forall b,\forall t;\ v_{jbt}\geq 0\ \forall j,\forall b,\forall t$$

$$z_{bt}^{D^{fr}}+z_{bt}^{D^{tr}}\leq 1\quad,z_{bt}^{D^{fr}},z_{bt}^{D^{tr}}\in\{0,1\}\ \forall b,\forall t$$

$$z_{ibt}^{OC^{fr}}+z_{ibt}^{OC^{tr}}\leq 1,\ z_{ibt}^{OC^{fr}},z_{ibt}^{OC^{tr}}\in\{0,1\}\ \forall i,\forall b,\forall t$$

$$z_{wbt}^{p^{fr}}+z_{wbt}^{p^{tr}}\leq 1\quad\forall w,\forall b,\forall t$$

$$\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\left[z_{bt}^{D^{fr}}+z_{bt}^{D^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right]\\ +\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}\left[z_{ibt}^{OC^{fr}}+z_{ibt}^{OC^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right]\\ +\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}\left[z_{jbt}^{OC^{fr}}+z_{jbt}^{OC^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right]\\ +\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{w=1}^{NW}\left[z_{wbt}^{p^{fr}}+z_{wbt}^{p^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right]\end{array}\right\}\leq\Gamma_{II} \qquad (۲۱)$$

در روابط بالا متغیرهای λ_{bt}، π_{it}، π_{jt}، v_{ibt} و v_{jbt} دوگان متغیرهای جمله کمینه داخلی زیرمسئله اولیه تابع هدف (۲۰) می‌باشند. هنگامی که Γ_{II} مقادیر عدد صحیح را اختیار می‌کند همه متغیرهای غیرقطعی مجموعه عدم قطعیت مقادیر نامی $\left(\bar{p}_{wbt}\right)$ خود یا بالاترین مقدار تغییرات خود را $\left(\bar{p}_{wbt}+p_{wbt}\right)$ را به خود می‌گیرد. زمانی که Γ_{II} مقدار واقعی غیر از عدد صحیح را اختیار کند فقط یکی از متغیرهای نامعین یک مقدار بین مقدار نامی $\left(\bar{p}_{wbt}\right)$ و تخمین بالا را اختیار می‌کند در حالی که باقی‌مانده متغیرهای غیرقطعی یکی از مقادیر $\left(\bar{p}_{wbt}\right)$ یا $\left(\bar{p}_{wbt}+p_{wbt}\right)$ را به خود می‌گیرد. بنابراین هر متغیر غیرقطعی مجموعه عدم قطعیت یکی از سه حالت مختلف (مقدار نامی، مقدار حد بالا و مقدار بین این دو) را برمی‌گزینند. برای مثال زمانی که هر $\tilde{p}_{wbt}$ مقدار نامی $\left(\bar{p}_{wbt}\right)$ خود را می‌گیرند، مجموعه $z_{wbt}^{p^{fr}}$ و $z_{wbt}^{p^{tr}}$ مقدار صفر را اختیار می‌کنند. زمانی که $\tilde{p}_{wbt}$ مقدار تخمین بالا $\left(\bar{p}_{wbt}+p_{wbt}\right)$ را برمی‌گزینند، مجموعه $z_{wbt}^{p^{tr}}$ مقدار صفر و $z_{wbt}^{p^{fr}}$ مقدار یک را اختیار می‌کند. و هنگامی که مقدار میانی را اختیار می‌کند، مجموعه $z_{wbt}^{p^{tr}}$ مقدار یک و $z_{wbt}^{p^{fr}}$ مقدار صفر را برمی‌گزینند. هدف مسئله $SP2$ کمینه کردن هزینه بهره برداری می‌باشد در حالی که با استفاده از Γ_{II} می‌توانیم درجه محافظه‌کاری را تنظیم کنیم و بدترین مقدار عدم قطعیت و هزینه را به دست بیاوریم.

۵- عملکرد الگوریتم تجزیه بندرز[۱۰]

عملکرد الگوریتم تجزیه بـرای حـل مسـئله در گـام‌هـای زیـر خلاصـه می‌شود.

گـام ۱: مسـئله را حـل کـرده و مقـادیر z_{lower} و x_{it} در تـابع کمینه‌سـازی (۱۹) بـه دسـت مـی‌آینـد. اگـر $MP1$ در مسـئله (۱۸) امکان‌پذیر نباشد که در این صورت تابع هـدف نشـدنی اسـت و جـواب ندارد. اگر $MP1$ بی‌کران باشـد، مجموعـه $z_{lower}=-\infty$ گرفتـه و یـک مقدار دلخواه برای x_{it} اختیار کرده و به گام ۲ می‌رویم.

گام ۲: مسئله $SP2$ را حل می‌کنیم. بعد از حل $SP2$ مقادیر u_i^{β} (متغیرهای زیرمسئله $SP2$) را به دست آورده و با داشتن x_{it} از گـام ۱ مقدار $\hat{z}_{upper}$ در معادله (۲۲) را محاسبه می‌کنیم که در این قسـمت سه حالت پیش می‌آید که به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

الف) اگـر $\left|\hat{z}_{upper}-\hat{z}_{lower}\right|\le\varepsilon$ باشـد در ایـن حالـت پروسـه حـل مسئله کامل شده و به جواب بهینه می‌رسیم. در غیر ایـن صـورت قیـد جدیدی به نام برش‌شدنی که در رابطه (۲۳) آمده است را بـه مسـئله $MP1$ اضافه کرده با مسئله جدید $MP2$ به گام ۳ می‌رویم.

ب) اگر $SP2$ بی‌کران باشـد، مسـئله $SP1$ نشـدنی اسـت و بـرای ادامه حل مسئله، برش جدیدی به نام برش‌ناشدنی که به صـورت قیـد (۲۴) بیان می‌شود را به $MP2$ اضافه می‌کنیم و به گام ۳ می‌رویم.

ج) اگر $SP2$ جواب نداشته باشد و نشـدنی شـود، در ایـن حالـت مسئله اولیه ما جواب بهینه نداشته یا بی‌کران خواهد بود.

گام ۳: مسئله $MP2$ با در نظر گرفتن برش‌هـا حـل کـرده کـه از حل آن z_{lower} و x_{it} به دست می‌آید.

کران بالایی ($\hat{z}_{upper}$)، قید برش‌شدنی مسئله که جواب را به سمت همگرایی سوق مـی‌دهـد و همچنـین برشـی کـه جـواب را بـه سـمت کران‌داری حرکت می‌دهد با معادلات زیر بیان می‌شوند:

کران بالایی ($\hat{z}_{upper}$)

$$\hat{z}_{upper}=\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}\frac{I\bar{C}_i.\left(x_{it}-x_{i(t-1)}\right)}{\left(1+DR\right)^{(t-1)}}+\sum_{w=1}^{NW}\tilde{F}_{wbt}_wind\\+\Gamma_I.m+\sum_{i=1}^{GC}n_i\end{array}\right\}$$
$$+\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\left(\bar{D}_{bt}.\lambda_{bt}^{\beta}+\hat{D}_{bt}.\left(\lambda_{bt}^{\beta D^{fr}}+\lambda_{bt}^{\beta D^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\right)\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}CF_i\ .\ 8760\ .\ P_i^{max}\ .x_{it}^{\beta}\ .\pi_{it}^{\beta}\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{GE}CF_j\ .\ 8760\ .\ P_j^{max}\ .x_{jt}^{\beta}\ .\pi_{jt}^{\beta}\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}P_i^{max}.x_{it}^{\beta}v_{ibt}^{\beta}-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}P_j^{max}v_{jbt}^{\beta}\end{array}\right\}\qquad(۲۲)$$

در روابـط بـالا متغیرهـای λ_{bt}^{β}، $\lambda_{bt}^{\beta D^{fr}}$، $\lambda_{bt}^{\beta D^{tr}}$، π_{it}^{β}، π_{jt}^{β}، v_{ibt}^{β} و v_{jbt}^{β} دوگان متغیرهای زیرمسئله ($SP1$) در تکرار β می‌باشند.

قید برش‌شدنی مسئله[۸]

$$z_{lower}\ge\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}\frac{I\bar{C}_i.\left(x_{it}-x_{i(t-1)}\right)}{\left(1+DR\right)^{(t-1)}}+\sum_{w=1}^{NW}\tilde{F}_{wbt}_wind\\+\Gamma_I.m+\sum_{i=1}^{GC}n_i\end{array}\right\}$$
$$+\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\left(\bar{D}_{bt}.\lambda_{bt}^{\beta}+\hat{D}_{bt}.\left(\lambda_{bt}^{\beta D^{fr}}+\lambda_{bt}^{\beta D^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\right)\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}CF_i\ .\ 8760\ .\ P_i^{max}\ .x_{it}^{\beta}\ .\pi_{it}^{\beta}\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{GE}CF_j\ .\ 8760\ .\ P_j^{max}\ .x_{jt}^{\beta}\ .\pi_{jt}^{\beta}\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}P_i^{max}.x_{it}^{\beta}v_{ibt}^{\beta}-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}P_j^{max}v_{jbt}^{\beta}\end{array}\right\}\qquad(۲۳)$$

قید برش‌ناشدنی مسئله[۹]

$$\left\{\begin{array}{l}\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\left(\bar{D}_{bt}.\lambda_{bt}^{\beta}+\hat{D}_{bt}.\left(\lambda_{bt}^{\beta D^{fr}}+\lambda_{bt}^{\beta D^{tr}}.\left(\Gamma_{II}-\lfloor\Gamma_{II}\rfloor\right)\right)\right)\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{GC}CF_i\ .\ 8760\ .\ P_i^{max}\ .x_{it}^{\beta}\ .\pi_{it}^{\beta}\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{GE}CF_j\ .\ 8760\ .\ P_j^{max}\ .x_{jt}^{\beta}\ .\pi_{jt}^{\beta}\\-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{GC}P_i^{max}.x_{it}^{\beta}v_{ibt}^{\beta}-\sum_{t=1}^{T}\sum_{b=1}^{B}\sum_{j=1}^{GE}P_j^{max}v_{jbt}^{\beta}\end{array}\right\}\le 0\qquad(۲۴)$$

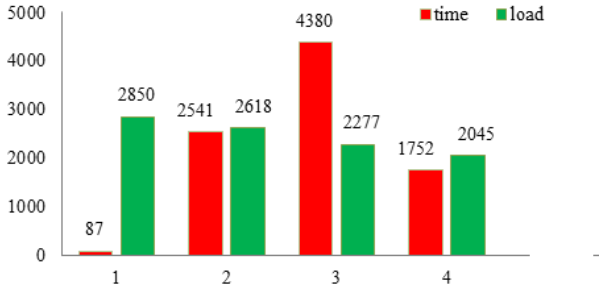
۶- نتایج عددی

در این بخش از مقاله ابتدا به بررسی عملکرد روش پیشنهادی بـر روی سیستم $IEEE-RTS$، که برای سادگی از واحدهای حرارتـی تشـکیل شده است، پرداخته می‌شود و سپس با افزودن نیروگاه بادی به مسـئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار، با وجود عدم قطعیت‌های تقاضـای بـار الکتریکی، هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای کاندیدا، هزینـه بهـره‌بـرداری واحدهای کاندیدا و موجود و عدم قطعیت واحدهای بادی، نتـایج مـورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات عددی با استفاده از موتور حـل CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS انجام شده است.

۶-۱- مشخصات سیستم قدرت مورد مطالعه

مجموع ظرفیت نصب‌شده و پیک بار سالیانه IEEE-RTS به ترتیب ۳۴۰۵ مگاوات و ۲۸۵۰ مگاوات می‌باشد [۱۵]. ۳۲ واحد تولید این سیستم تست از چهار واحد تولیدی شامل نیروگاه‌های گازی سیکل ترکیبی، توربین احتراق، هسته‌ای و بخار تشکیل شده که در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ مشخصات واحدهای تولید کاندیدا را نشان می‌دهد [۲].

فرض بر این است که $M=PC=۱۰^{۶}$ و $M\$=۳۴۵$ IB_t. برای سادگی محاسبات چهار بلوک بار برای سال اول در نظر گرفته شده است [۱۶]. مقدار و مدت‌زمان بلوک‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است و همچنین نرخ رشد بار سالیانه ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: بلوک‌های بار در سال اول

همان‌طور که بیان شد متغیرهای غیرقطعی مسئله، هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای کاندیدا و هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای کاندیدا و موجود و مهم‌تر از همه عدم قطعیت بار می‌باشد. که در اینجا محدوده مختلف متغیرهای غیرقطعی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری واحدها برابر انحراف معیار هزینه‌های آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. که این مقادیر در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است $(\sigma_{OC}(\$/MWh), \sigma_{IC}(\$/MWh))$. فرض بر این است که برآوردهای اسمی متغیر غیرقطعی با مقدار متوسط توزیع‌های احتمالی آن‌ها برابر است. که مقدار نامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری $\left(\mu_{IC}\left(\frac{\$}{MWh}\right), \mu_{OC}(\$/MWh)\right)$ در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ رشد بار سالیانه با نرخ ۵ درصد برای پنج سال برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. محدوده مقدار عدم قطعیت بار $\left(\hat{d}_{bt} \in \left[\bar{D}_{bt} - \hat{D}_{bt}, \bar{D}_{bt} + \hat{D}_{bt}\right] \forall b, \forall t\right)$ برابر انحراف معیار مقدار بار در سال‌های برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود $\left(\hat{D}_{bt} = \sigma D_{bt}\right)$ و با افزایش و کاهش این مقدار روی هزینه‌های آن بحث می‌شود.

جدول ۱: مشخصات واحدهای موجود برای IEEE-RT

Type	P^{max} (MW)	CF (%)	μ_{OC} (\$/MWh)	σ_{OC} (\$/MWh)
CCGT	۲×۱۲	۶۰	۲۲	۰/۸۸
	۲×۲۰	۶۵		
	۳×۵۰	۷۰		
	۱×۷۶	۷۰		
	۱×۱۰۰	۶۵		
	۱×۱۵۰	۶۵		
CT/Oil	۲×۲۰	۳۴	۳۸	۱/۵۲
	۳×۵۰	۳۲		
ST/Coal	۳×۷۶	۸۵	۱۴	۰/۵۶
	۳×۱۵۵	۸۰		
	۱×۳۵۰	۷۸		
ST/ Oil	۳×۱۲	۵۰	۳۸	۱/۵۲
	۲×۱۰۰	۴۵		
	۳×۱۹۷	۴۰		
NC	۲×۴۰۰	۹۵	۲	۰/۰۸

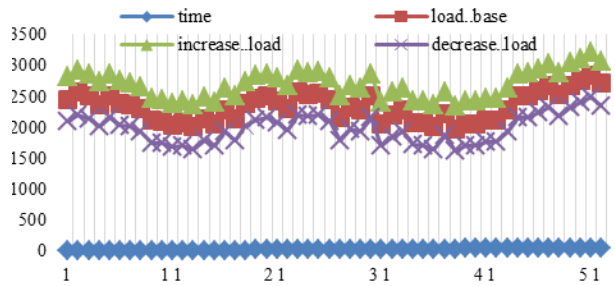
جدول ۲: مشخصات واحدهای تولیدی کاندیدا برای IEEE-RTS

Type	P^{max} (MW)	μ_{OC} (\$/MWh)	σ_{OC} (\$/MWh)	μ_{IC} (M\$)	σ_{IC} (M\$)	IT
CCGT	۳×۲۰	۲۲	۰/۸۸	۲۲	۰/۶۶	۱
	۳×۷۶			۸۲	۲/۴۶	۲
	۳×۷۶			۱۶۶	۴/۹۸	۱
CT/Oil	۳×۲۰	۳۸	۱/۵۲	۱۶	۰/۴۸	۱
	۳×۵۰			۴۰	۱/۲	۱
	۳×۱۰۰			۸۲	۲/۴۶	۱
ST/Coal	۳×۷۶	۱۴	۰/۵۶	۱۷۶	۵/۲۸	۳
	۳×۱۵۵			۳۵۸	۱۰/۷۴	۴
	۳×۳۵۰			۸۰۸	۲۴/۲۴	۴
ST/ Oil	۳×۱۲	۳۸	۱/۵۲	۱۰	۰/۳	۳
	۳×۱۰۰			۸۲	۲/۴۶	۴
	۳×۱۹۷			۱۶۲	۴/۸۶	۴
NC	۳×۴۰۰	۲	۰/۰۸	۱۶۹۴	۵۰/۸۲	۶

جدول ۳: رشد بار سالیانه با نرخ ۵ درصد

بلوک	سال ۱	۲	۳	۴	۵
۱	۲۸۵۰	۲۹۹۲/۵	۳۱۴۲/۱۲	۳۲۹۹/۲	۳۴۶۴/۱۹
۲	۲۶۱۸	۲۷۴۸/۹	۲۸۸۶/۳۴	۳۰۳۰/۶۶	۳۱۸۲/۱۹
۳	۲۲۷۷	۲۳۹۰/۸۵	۲۵۱۰/۳۹	۲۶۳۵/۹۱	۲۷۶۷/۷
۴	۲۰۴۵	۲۱۴۷/۲۵	۲۲۵۴/۶۱	۲۳۶۷/۳۴	۲۴۸۵/۷۱

شکل ۳ نامعینی بار اسمی را نشان می‌دهد که حول مقدار نامی خود دارای تغییرات است $\left(\left[\bar{D}_{bt} - \hat{D}_{bt}, \bar{D}_{bt} + \hat{D}_{bt}\right]\right)$. مجموع تعداد واحدهای تولید کاندیدا برابر با ۳۹ می‌باشد و Γ_I و Γ_{II} به ترتیب مقادیر مختلفی را در بازه‌های Γ_I =[۰ و ۳۹] و Γ_{II} =[۰ و ۱۴۴۰] اختیار می‌کند. در اینجا بیش‌تر روی عدم قطعیت بار تمرکز می‌شود. جدول ۴ محدوده تغییرات بار را برای $\hat{D}_{bt} = \sigma D_{bt}$ نشان می‌دهد.



شکل ۳: عدم قطعیت بار حول بار پایه

هزینه بهینه برنامه‌ریزی توسعه تولید بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت 1.432×10^9 دلار می‌باشد. در این قسمت با افزایش دادن پله‌ای محدوده نسبی متغیر غیرقطعی بار الکتریکی برای هر سال از

برنامه‌ریزی $\left(\hat{D}_{bt}=1\sigma D_{bt}\ ,2\sigma D_{bt}\ ,3\sigma D_{bt}\ \forall b\ ,\forall t\right)$ و ثابت بودن محدوده نسبی متغیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در مقدار $\left(\sigma_{OC}\left(\$/MWh\right),\sigma_{IC}\left(\$/MWh\right)\right)$ هزینه کل برای حداکثر بودجه عدم قطعیت در جدول ۵ مشاهده می‌شود. افزایش محدوده نسبی متغیرهای غیرقطعی، هزینه‌های مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی استوار را افزایش می‌دهد.

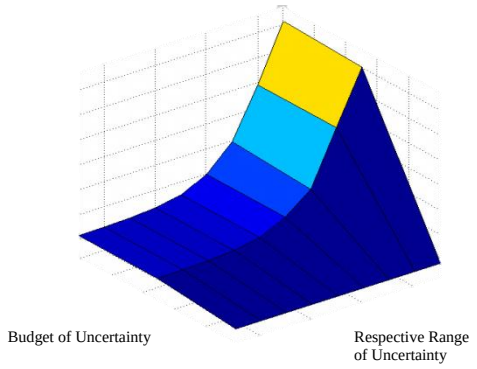
شکل ۴ نتایج عددی به دست آمده توسط روش استوار را با در نظر گرفتن محدوده‌های مختلف متغیرهای غیرقطعی $\left(\hat{D}_{bt}=1\sigma D_{bt}\ ,2\sigma D_{bt}\ ,3\sigma D_{bt}\ ,\ldots\forall b\ ,\forall t\right)$ زمانی که Γ_{I} و Γ_{II} درصدی از $\Gamma_{\mathrm{I}}^{max}$ و $\Gamma_{\mathrm{II}}^{max}$ را اختیار می‌کند، نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم که با وارد شدن نامعینی‌ها به مسئله GEP و با افزایش محدوده نسبی عدم قطعیت و همچنین با افزایش بودجه عدم قطعیت هزینه کل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. روش‌های قطعی (غیراستوار) مقادیر معینی را برای پارامترها در نظر می‌گیرند و جواب بهینه‌ای را حاصل می‌کنند، در مقابل روش استوار جوابی را نزدیک به بهینه ارائه می‌کنند و هزینه را بالاتر نشان می‌دهند، اما جواب به دست آمده با اطمینان بالایی قابل اتکا و معتبر است.

جدول ۴: محدوده نسبی متغیر غیرقطعی بار الکتریکی $\left(\hat{D}_{bt}=\sigma D_{bt}\right)$

بلوک	سال				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۳۵۶/۹	۳۷۴/۷	۳۹۳/۴	۴۱۳/۱	۴۳۳/۸
۲	۳۵۶/۹	۳۷۴/۷	۳۹۳/۴	۴۱۳/۱	۴۳۳/۸
۳	۳۵۶/۹	۳۷۴/۷	۳۹۳/۴	۴۱۳/۱	۴۳۳/۸
۴	۳۵۶/۹	۳۷۴/۷	۳۹۳/۴	۴۱۳/۱	۴۳۳/۸

جدول ۵: هزینه بهینه به دست آمده برای سناریوهای مختلف عدم قطعیت بار الکتریکی در $\frac{\Gamma}{\Gamma^{Max}}=1$

سناریوهای مختلف تغییرات بار الکتریکی	هزینه کل $\times 10^{9}(\$)$
$\hat{D}_{bt}=\frac{1}{64}\sigma D_{bt}$	۲/۳۰
$\hat{D}_{bt}=\frac{1}{32}D_{bt}$	۲/۳۳
$\hat{D}_{bt}=0.625D_{bt}$	۲/۴۰
$\hat{D}_{bt}=0.125D_{bt}$	۲/۵۵
$\hat{D}_{bt}=0.25\sigma D_{bt}$	۲/۹۴
$\hat{D}_{bt}=0.5D_{bt}$	۳/۹۳
$\hat{D}_{bt}=1\sigma D_{bt}$	۵/۸۹
$\hat{D}_{bt}=2D_{bt}$	۹/۸۳
$\hat{D}_{bt}=3\sigma D_{bt}$	۱۴/۲۷



شکل ۴: هزینه بهینه (هزینه کل $\times 10^{9}(\$)$) مدل استوار برای سناریوهای تغییرات بار الکتریکی و بودجه‌های مختلف عدم قطعیت

۶-۲- مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار در حضور نیروگاه بادی

- **سناریو اول**

در این قسمت، واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار وارد می‌شوند و در سناریو اول ۲۰ درصد از مقدار پیک بار به توربین‌های بادی اختصاص داده می‌شود و ۶۰۰ مگاوات از ظرفیت تولید با ۱۵۰ واحد توربین بادی ۴ مگاواتی برای هر سال از برنامه‌ریزی تأمین می‌شود. محدوده نسبی متغیر غیرقطعی باد $\left(\tilde{p}_{wbt}\in\left[\bar{p}_{wbt}-\hat{p}_{wbt}\ ,\bar{p}_{wbt}+\hat{p}_{wbt}\right]\ \forall w\ ,\forall b\ ,\forall t\right)$ را برابر یک مگاوات در نظر گرفته و با تغییر محدوده نسبی متغیر غیرقطعی بار الکتریکی هزینه‌ها بررسی می‌شوند. مجموع تعداد واحدهای تولید کاندیدا برابر با ۳۹ می‌باشد و Γ_{I} و Γ_{II} به ترتیب مقادیر مختلفی را در بازه‌های [۳۹ و ۰]=Γ_{I} و [۱۴۴۰ و ۰]=Γ_{II} اختیار می‌کنند. هزینه بهینه برنامه‌ریزی توسعه تولید بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ۱۰^۹ × ۰/۸۰۳ دلار می‌باشد. هزینه بهینه به دست آمده از حل مسئله استوار با وجود واحدهای بادی برای سناریوهای مختلف بار الکتریکی با بیش‌ترین محافظه‌کاری که در جدول ۶ آمده است بررسی می‌شود.

همان‌طور که جدول ۶ نشان می‌دهد هزینه کل با اضافه کردن واحدهای بادی به مدل استوار به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، گرچه مقدار هزینه‌ها نسبت به حالت قطعی خود افزایش چشم‌گیری داشته است. شکل ۵ هزینه بهینه مدل استوار برای سناریوهای تغییرات بار الکتریکی و بودجه‌های مختلف عدم قطعیت با وجود واحدهای بادی را نشان می‌دهد. مطابق شکل هرچه مقدار محافظه‌کاری و سناریوهای تغییرات بار افزایش پیدا می‌کند هزینه کل نیز زیاد می‌شود. مشاهده می‌شود که ماکزیمم هزینه آن در مقایسه با زمانی که واحدهای تجدیدپذیر بادی در برنامه‌ریزی حضور نداشتند، کاهش چشم‌گیری داشته است. با افزودن واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید هزینه کل در هر سناریو عدم قطعیت بار الکتریکی نسبت به حالت قطعی و مدل استوار بدون انرژی تجدیدپذیر باد به طرز چشم‌گیری کاهش یافته است. ترکیب توأم نامعینی‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید با واحدهای بادی نتایج با هزینه پایین‌تری را

ارائه می‌دهد. شکل ۶ مقایسه‌ای کلی بین حالات قطعی و مدل استوار با وجود و عدم وجود نیروگاه بادی را نشان می‌دهد. در اینجا مقدار عدم قطعیت باد برابر ۱ مگاوات فرض شده است و محدوده نسبی متغیر غیرقطعی هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری واحدها برابر مقدار انحراف معیار آن‌ها فرض می‌شوند و سپس با تغییر عدم قطعیت بار هزینه کل در چهار حالت و با بیش‌ترین محافظه‌کاری $\left(\frac{\Gamma}{\Gamma^{Max}}=1\right)$ بررسی می‌شوند. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزودن واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید هزینه کل در هر سناریو عدم قطعیت بار الکتریکی نسبت به حالت قطعی و مدل استوار بدون انرژی تجدیدپذیر باد به طرز چشمگیری کاهش یافته است و همچنین با مقایسه مدل استوار با واحد بادی و مدل قطعی مسئله مشاهده می‌شود که هزینه کل مسئله در سناریو ششم عدم قطعیت بار الکتریکی با هم برابر است و بعد از آن نسبت به مدل قطعی خود افزایش هزینه داشته است که این هم به دلیل وارد کردن نامعینی و افزایش تغییرات بار الکتریکی به مسئله می‌باشد. پس می‌توانیم با افزودن واحد بادی و با وجود نامعینی انرژی تجدید پذیر باد در حالت استوار هزینه‌ای برابر با مدل قطعی در سناریو ششم تغییرات بار الکتریکی داشته باشیم. دلیل کاهش هزینه کل با وجود واحد بادی در حالت استوار نسبت به مدل قطعی قبل از سناریو ششم نیز کم بودن محدوده نسبی عدم قطعیت بار الکتریکی می‌باشد. بنابراین در سناریو ششم به دلیل انرژی تجدیدپذیر با وجود نامعینی‌های متعدد در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید هزینه‌ای برابر با مدل قطعی داریم.

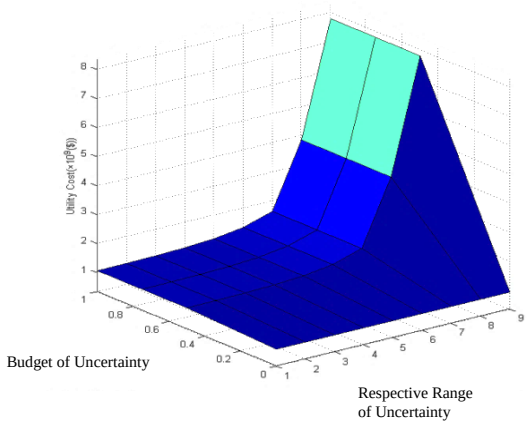
- **سناریو دوم**

در این قسمت واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار وارد می‌شوند ولی در این مرحله ۱۰ درصد از مقدار پیک بار به توربین‌های بادی اختصاص داده می‌شود و ۳۰۰ مگاوات از ظرفیت تولید با ۷۵ واحد توربین بادی ۴ مگاواتی برای هر سال از برنامه‌ریزی تأمین می‌شود. محدوده نسبی متغیر غیرقطعی باد $\left(\tilde{p}_{wbt} \in [\bar{p}_{wbt}-\hat{p}_{wbt}\ ,\bar{p}_{wbt}+\hat{p}_{wbt}]\ \forall w\ ,\forall b\ ,\forall t\right)$ را برابر یک مگاوات در نظر گرفته و با تغییر محدوده نسبی متغیر غیرقطعی بار الکتریکی هزینه‌ها بررسی می‌شوند. مجموع تعداد واحدهای تولید کاندیدا برابر با ۳۹ می‌باشد و Γ_{I} و Γ_{II} به ترتیب مقادیر مختلفی را در بازه‌های ۳۹ و ۰=Γ_{I} و [۰ و ۱۴۴۰]=Γ_{II} اختیار می‌کنند.

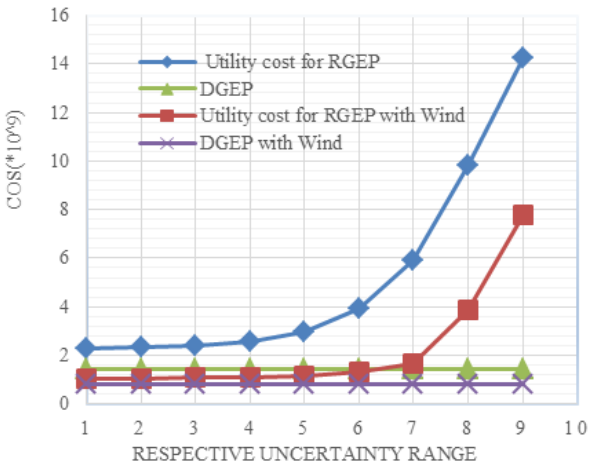
شکل ۷ مقایسه‌ای کلی بین حالات قطعی و مدل استوار با وجود و عدم وجود نیروگاه بادی را نشان می‌دهد. در اینجا مقدار عدم قطعیت باد برابر ۱مگاوات فرض شده است و محدوده نسبی متغیر غیرقطعی هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری واحدها برابر مقدار انحراف معیار آن‌ها فرض می‌شود و سپس با تغییر عدم قطعیت بار هزینه کل در چهار حالت و با بیش‌ترین محافظه‌کاری $\left(\frac{\Gamma}{\Gamma^{Max}}=1\right)$ بررسی می‌شود.

جدول ۶: هزینه بهینه به دست آمده برای سناریوهای مختلف تغییرات بار الکتریکی با وجود واحدهای بادی در $\frac{\Gamma}{\Gamma^{Max}}=1$

سناریوهای مختلف تغییرات بار الکتریکی	هزینه کل ×10^{9}($)
$\hat{D}_{bt}=\frac{1}{64}\sigma D_{bt}$	۱/۰۵
$\hat{D}_{bt}=\frac{1}{32}D_{bt}$	۱/۰۶
$\hat{D}_{bt}=0.625D_{bt}$	۱/۰۷
$\hat{D}_{bt}=0.125D_{bt}$	۱/۱۱۲
$\hat{D}_{bt}=0.25\sigma D_{bt}$	۱/۱۷۴
$\hat{D}_{bt}=0.5D_{bt}$	۱/۳۲۱
$\hat{D}_{bt}=1\sigma D_{bt}$	۱/۶۲۹
$\hat{D}_{bt}=2D_{bt}$	۳/۸۵
$\hat{D}_{bt}=3\sigma D_{bt}$	۷/۷۸۱

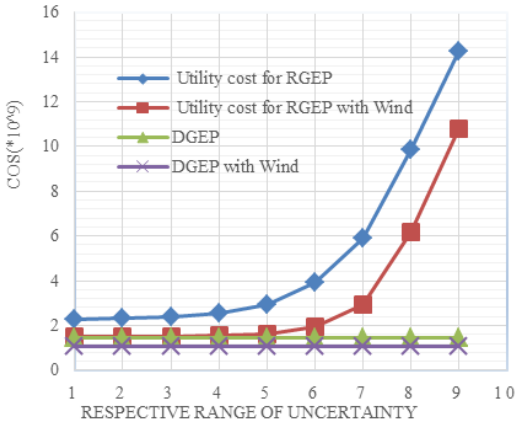


شکل ۵: هزینه بهینه ($۱۰^{۹}$ دلار × هزینه کل) مدل استوار برای سناریوهای تغییرات بار الکتریکی و بودجه‌های مختلف عدم قطعیت در حضور نیروگاه بادی



شکل ۶: مقایسه‌ای جامع بین حالات قطعی و مدل استوار با وجود و عدم وجود نیروگاه بادی برای سناریو اول

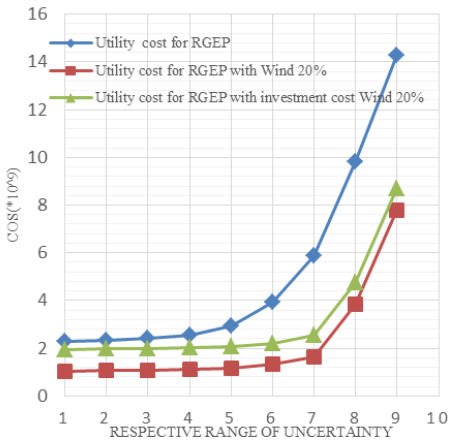
با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزودن واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید هزینه کل در هر سناریو عدم قطعیت بار الکتریکی نسبت به حالت قطعی و مدل استوار بدون انرژی تجدیدپذیر باد به طرز چشمگیری کاهش یافته است و همچنین با مقایسه مدل استوار با واحد بادی و مدل قطعی مسئله مشاهده می‌شود که هزینه کل مسئله تا سناریو پنجم عدم قطعیت بار الکتریکی با هم برابر است و بعد از آن نسبت به مدل قطعی خود افزایش هزینه داشته است که این هم به دلیل وارد کردن نامعینی و افزایش تغییرات بار الکتریکی به مسئله می‌باشد. پس می‌توانیم با افزودن واحد بادی و با وجود نامعینی انرژی تجدیدپذیر باد در حالت استوار هزینه‌ای برابر با مدل قطعی تا سناریو پنجم تغییرات بار الکتریکی داشته باشیم.



شکل ۷: مقایسه‌ای جامع بین حالات قطعی و مدل استوار با وجود و عدم وجود نیروگاه بادی برای سناریو دوم

- **سناریو سوم**

در این سناریو هزینه احداث نیروگاه بادی به مسئله وارد می‌شود. هزینه احداث نیروگاه بادی برای یک توربین ۲ مگاواتی بین ۳ تا ۴ میلیون‌دلار متغیر است [۱۷]. ۲۰ درصد از مقدار پیک بار به توربین‌های بادی اختصاص داده می‌شود و ۶۰۰ مگاوات از ظرفیت تولید با ۱۵۰ واحد توربین بادی ۴ مگاواتی برای هر سال از برنامه‌ریزی تأمین می‌شود. که در اینجا توربین‌های ۴ مگاواتی مسئله ما هزینه‌ای به‌اندازه ۶ میلیون دلار خواهند داشت. عدم قطعیت‌های مسئله استوار ما در اینجا بار الکتریکی است که برای محدوده‌های مختلف بررسی می‌شود همچنین هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری واحدهای گرمایی و توان توربین بادی ما نیز با عدم قطعیت مواجه هستند که شکل ۸ مقایسه‌ای بین این هزینه‌ها در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزودن واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید هزینه کل در هر سناریو عدم قطعیت بار الکتریکی نسبت به حالت قطعی و مدل استوار بدون انرژی تجدیدپذیر باد به طرز چشم‌گیری کاهش یافته است. با توجه به اینکه هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه بادی نیز به مسئله وارد شده است، هزینه کل به‌طور قابل توجهی نسبت به حالت اولیه کاهش داشته است.



شکل ۸: مقایسه‌ای جامع بین حالات مختلف برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار برای سناریو دوم نیروگاه بادی با وجود عدم قطعیت چندسطحی و هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه بادی

در جدول‌های ۷ و ۸، سناریوهای انرژی تجدیدپذیر باد و درصد تغییرات سناریوها نسبت به هم و حالت پایه (هزینه مدل استوار برنامه‌ریزی توسعه تولید با بودجه عدم قطعیت حداکثر بدون نیروگاه بادی) در بارگذاری‌های مختلف (بر اساس جدول ۵) نشان داده شده است. که بار الکتریکی مسئله دارای ۹ سناریو عدم قطعیت با Γ ماکزیمم می‌باشد. در حالت بار پایه، مدل استوار برنامه‌ریزی توسعه تولید بدون انرژی تجدیدپذیر باد حل شده است و در سناریوهای اول، دوم و سوم، توان تولیدی به همراه هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه بادی به مسئله وارد شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود به‌طور نمونه در سناریو اول که نیروگاه بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید اضافه شده است، هزینه مدل استوار مسئله به‌طور چشم‌گیری با مقدار متوسط ۵۸/۵۰ درصد کاهش داشته است که بیش‌ترین کاهش مربوط به سناریو هفتم بار الکتریکی می‌باشد. همچنین میانگین درصد کاهش هزینه سناریو اول نسبت به سناریو دوم که ۱۰ درصد از مقدار پیک بار به توربین‌های بادی اختصاص داده شده است ۳۵/۸۴ درصد می‌باشد. توضیحات کامل این جداول در سناریوهای بخش ۶-۲ ارائه شده است.

جدول ۷: مقدار تابع هدف سناریوهای مختلف و حالت پایه

سناریو سوم	سناریو دوم	سناریو اول	تابع هدف پایه	سناریو تغییرات بار الکتریکی
۲	۱/۴۶۲	۱/۰۵	۲/۳۰	۱
۲	۱/۴۷۲	۱/۰۶	۲/۳۳	۲
۲/۰۱	۱/۴۹۱	۱/۰۷	۲/۴۰	۳
۲/۰۲	۱/۵۲۹	۱/۱۱۲	۲/۵۵	۴
۲/۰۳	۱/۶۰۴	۱/۱۷۴	۲/۹۴	۵
۲/۰۸۸	۱/۸۲۶	۱/۳۲۱	۳/۹۳	۶
۲/۲۳۷	۲/۸۱۳	۱/۶۲۹	۵/۸۹	۷
۴/۵۱۲	۶/۶۴۴	۳/۸۵	۹/۸۳	۸
۸/۳۵۷	۱۰/۰۵۷	۷/۷۸۱	۱۴/۲۷	۹

جدول ۸: درصد تغییرات سناریوها نسبت به هم و حالت پایه

سناریو تغییرات بار الکتریکی	درصد کاهش هزینه سناریو اول نسبت به حالت پایه	درصد کاهش هزینه سناریو اول نسبت به سناریو دوم	درصد کاهش هزینه سناریو اول نسبت به سناریو سوم	درصد کاهش هزینه سناریو دوم نسبت به حالت پایه
۱	۵۴/۳۴	۲۸/۱۸	۴۷/۵۰	۳۶/۴۳
۲	۵۴/۵۰	۲۸/۹۸	۴۷/۵۰	۳۶/۸۲
۳	۵۵/۴۱	۳۹/۳۴	۴۶/۷۶	۳۷/۸۷
۴	۵۶/۳۹	۳۷/۵۰	۴۴/۹۵	۴۰/۳
۵	۶۰/۰۰	۳۶/۶۲	۴۲/۱۶	۵۴/۵۵
۶	۶۶/۳۸	۳۸/۲۲	۳۶/۷۳	۵۳/۵۳
۷	۷۲/۳۴	۷۲/۶۸	۲۷/۱۷	۵۲/۲۴
۸	۶۰/۸۳	۷۲/۵۷	۶۷/۱۴	۳۲/۴۱
۹	۴۵/۴۷	۲۸/۵۱	۹/۲	۲۹/۹۲

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله عدم قطعیت‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید از قبیل نامعینی تقاضای بار الکتریکی، توان تولیدی باد، عدم قطعیت هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای کاندیدا، هزینه سرمایه‌گذاری و احداث نیروگاه بادی و نامعینی‌های هزینه بهره‌برداری واحدهای کاندیدا و موجود با استفاده از رویکرد استوار برتسیماس و سیم روی سیستم قدرت $IEEE-RTS$ پیاده شده است. همچنین برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار که یک مسئله عدد صحیح مختلط می‌باشد، از الگوریتم تجزیه بندرز کمک گرفته شده است. برای کاهش هزینه، نیروگاه بادی با وجود نامعینی در آن در برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار افزوده می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استوار برای سناریوهای تغییرات بار الکتریکی و بودجه‌های مختلف عدم قطعیت در حضور نیروگاه بادی انجام شده است و در سه سناریو و با افزایش مقدار توان تولیدی نیروگاه بادی که با عدم قطعیت نیز مواجه است و همچنین با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه بادی مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با وجود عدم قطعیت چندسطحی با حالت قطعی خود مقایسه شده است. بنابراین با افزودن واحدهای بادی به مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، هزینه کل در هر سناریو عدم قطعیت بار الکتریکی نسبت به حالت قطعی و مدل استوار بدون انرژی تجدیدپذیر باد به طرز چشم‌گیری کاهش یافته است.

علائم

$\tilde{a}_{ij}$ پارامتر نامعین مسئله که دارای عدم قطعیت می‌باشد.

$\hat{a}_{ij}$ محدوده نسبی $\tilde{a}_{ij}$.

$|J_i|$ تعداد کل متغیرهای غیرقطعی مسئله.

IC_i هزینه قطعی سرمایه‌گذاری واحد تولید کاندیدا i ($)

D_{bt} تقاضای بار الکتریکی قطعی بلوک بار b در سال t (MW)

DT_{bt} محدوده زمانی بلوک بار b در سال t (h)

OC_{ibt} هزینه قطعی بهره‌برداری واحد تولید کاندیدا i برای بلوک بار b در سال t ($\$/MWh$)

p_{ibt} توان اکتیو تولیدی واحد تولید کاندیدا i برای بلوک بار b در سال t (MW)

OC_{jbt} هزینه قطعی بهره‌برداری واحد تولید کاندیدا j برای بلوک بار b در سال t ($\$/MWh$)

p_{jbt} توان اکتیو تولیدی واحد تولید کاندیدا j برای بلوک بار b در سال t (MW)

DR نرخ تورم (%)

T مجموع تعداد سال‌های برنامه‌ریزی

IT_i زمان لازم برای نصب واحد تولیدی کاندیدا i (yr)

P_i^{max} ماکزیمم ظرفیت واحد تولید کاندیدا (MW)

GC تعداد واحدهای تولید کاندیدا

P_j^{max} ماکزیمم ظرفیت واحد تولید موجود (MW)

IB_t بودجه سرمایه‌گذاری مجاز در سال t ($M\$$)

GE تعداد واحدهای تولید موجود.

NW تعداد واحدهای تولید نیروگاه بادی

CF_i ضریب ظرفیت واحد تولید کاندیدا i

B تعداد بلوک‌های بار

$i\tilde{c}_i$ هزینه سرمایه‌گذاری نامعین واحد تولید کاندیدا i ($)

$I\hat{C}_i$ محدوده نسبی $i\tilde{c}_i$ ($)

$\tilde{d}_{bt}$ تقاضای بار الکتریکی نامعین بلوک بار b در سال t (MW)

$\hat{D}_{bt}$ محدوده نسبی $\tilde{d}_{bt}$ (MW)

$o\tilde{c}_{ibt}$ هزینه بهره‌برداری نامعین واحد تولید کاندید i برای بلوک بار b در سال t ($\$/MWh$)

$O\hat{C}_{ibt}$ محدوده نسبی $o\tilde{c}_{ibt}$ ($\$/MWh$)

$o\tilde{c}_{jbt}$ هزینه بهره‌برداری نامعین واحد تولید موجود j بلوک بار b در سال t ($\$/MWh$)

$O\hat{C}_{jbt}$ محدوده نسبی $o\tilde{c}_{jbt}$ ($\$/MWh$)

$\lfloor \Gamma_I \rfloor$ پارامتر عدد صحیح Γ_I

$\lfloor \Gamma_{II} \rfloor$ پارامتر عدد صحیح Γ_{II}

Γ_I بودجه عدم قطعیت مسئله اصلی (MP)

Γ_{II} بودجه عدم قطعیت زیرمسئله (SP)

Ω_{MP} ناحیه‌شدنی مسئله اصلی

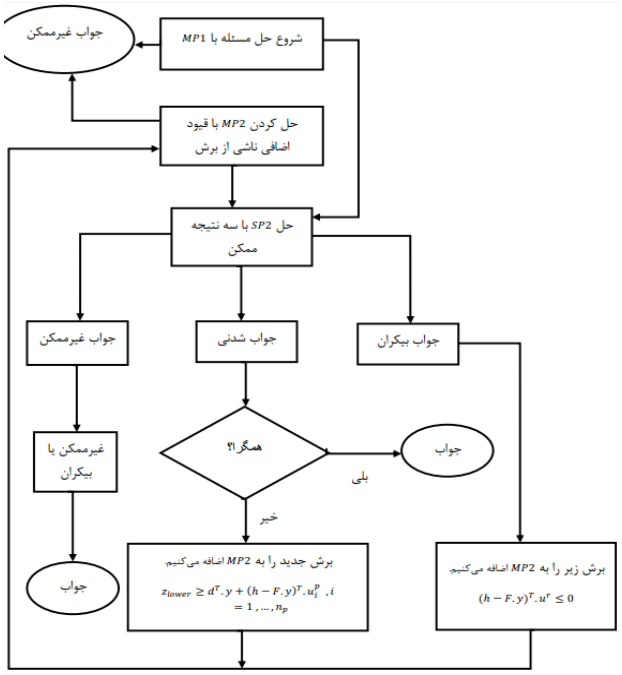
Ω_{SP} ناحیه‌شدنی زیر مسئله

f_{bt} توان اکتیو موهومی برای بلوک b در سال t (MW)

z_{wbt} متغیر باینری $z_{wbt} \in \{0,1\}$

پیوست

شکل زیر الگوریتم تجزیه بندرز را به صورت فلوچارت نشان می‌دهد:



شکل ۹: فلوچارت الگوریتم تجزیه بندرز

مراجع

[1] S. Kannan, S. M. R. Slochanal and N. P. Padhy, "Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, 2005.

[2] S. Dehghan, N. Amjady and A. Kazemi, "Two-stage robust generation expansion planning: a mixed integer linear programming model," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 584-597, 2014.

[3] R. Jiang, J. Wang and Y. Guan, "Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 800–810, 2012.

[4] C. Zhao, J. Wang, J. P. Watson and Y. Guan, "Multi-stage robust unit commitment considering wind and demand response uncertainties," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2708–2717, 2013.

[5] B. Hu, L. Wu and M. Marwali, "On the robust solution to scuc with load and wind uncertainty correlations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2952–2964, 2014.

[6] R. A. Jabr, "Robust transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4558–4567, 2013.

[۷] جابر ولی‌نژاد و تقی بارفروشی، «ارزیابی تأثیر مشوق‌های سرمایه‌گذاری تحت شرایط عدم قطعیت روی برنامه‌ریزی توسعه تولید در بازارهای رقابتی برق»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۳۵۷-۳۶۸، ۱۳۹۵.

[۸] حسین شکری و سجاد نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحات ۲۹-۴۲، ۱۳۹۴.

[9] D. Bertsimas, D. B. Brown and C. Caramanis, "Theory and applications of robust optimization," *SIAM Rev.*, vol. 53, no. 3, pp. 464–501، 2011.

[10] The Solver Manuals. GAMS/CPLEX, 2011. [Online] Available: http://www.gams.com.

[11] S. Majumdar and D. Chattopadhyay, "A model for integrated analysis of generation capacity expansion and financial planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 466–471, 1999.

[12] D. Bertsimas and M. Sim, "The Price of Robustness," *Oper. Res.*, vol. 52, no. 1, pp. 35–53, 2004.

[13] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao, and T. Zheng, "Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 52–63, 2013.

[14] A. J. Conejo, E. Costillo, R. Minguez and R. Garica-Bertrand, *Decomposition Techniques in Mathematical Programming*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[15] P. M. Subcommittee, "IEEE reliability test system," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2047–2054, 1979.

[16] A. Khodaei, M. Shahidehpour, S. Kamalinia, "Transmission switching in expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, pp.1722-1733, 2010.

[17] C. Mone, A. Smith, B. Maples and M. Hand, "2013 cost of wind energy review," *National Renewable Energy Laboratory*, 2015.

زیرنویس‌ها

[1] Generation Expansion Planning (GEP)

[2] Robust Optimization (RO)

[3] Mixed Integer Programming (MIP)

[4] Deterministic Generation Expansion Planning (DGEP)

[5] Bertsimas and Sim

[6] Master Problem (MP)

[7] Sub Problem (SP)

[8] Feasibility Cut

[9] Infeasibility Cut

[10] Benders Decomposition Algorithm