

## آرایش بهینه تصادفی تولید برای شرکت‌های مولد با در نظر گرفتن بازار انرژی و قراردادهای دوجانبه

نیما امجدی<sup>۱</sup>، بهداد وطنی<sup>۲\*</sup>، حسین شریف‌زاده<sup>۳</sup>

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله، برای تعیین رویکرد بهینه پیشنهاد قیمت شرکت‌های تولید کننده در حضور عدم قطعیت در قیمت بازار، مدلی تصادفی ارائه شده است. بدین منظور از یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای استفاده شده است که در آن قیمت‌های انرژی به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن شرایط واقعی، به تولید کننده‌ها این امکان داده می‌شود که تولیدشان را هم از طریق قراردادهای دوجانبه و هم از طریق شرکت در حراج‌های انرژی به فروش برسانند. ریسک اقتصادی تولید کننده نیز با استفاده از معیار شناخته شده CVaR ارزیابی شده و مورد بحث قرار می‌گیرد. مدل ارائه شده روی یک سیستم آزمایشی پیاده سازی شده و نتایج آن تحلیل می‌گردد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده قادر به شناسایی و شبیه سازی مناسب رفتار بازار بوده و رویکرد بهینه تولید کننده را برای پیشنهاد قیمت و انتخاب بازار مناسب با هدف کسب بیشینه سود، در اختیار وی قرار می‌دهد.</p>	<p><b>واژگان کلیدی:</b> بازار انرژی، قراردادهای دوجانبه، آرایش تولید تصادفی، ریسک اقتصادی، شرکت‌های تولید کننده.</p>

### فهرست علائم و اختصارات

$P_{G_{k,u,t,q}}$ : توان تولید شده از طریق بلوک  $k$  ام واحد  $u$  در زمان  $t$  و سناریو  $q$  (مگاوات).  
 $SU_u$ : هزینه راه‌اندازی واحد  $u$  در زمان  $t$  (دلار).  
 $SD_u$ : هزینه خاموش شدن واحد  $u$  در زمان  $t$  (دلار)  
 $\Phi$ : ارزش در ریسک<sup>۳</sup>  
 $\theta_q$ : متغیر کمکی برای محاسبه CVaR.  
 $Z_{u,t}$ : متغیر باینری، اگر واحد  $u$  در زمان  $t$  روشن باشد برابر ۱ می‌شود و در غیر این صورت، صفر می‌شود.

**متغیرها:**  
 $P_{bc}$ : توان فروخته شده از طریق بلوک  $b$  قرارداد دوجانبه<sup>۱</sup>  
 $c$  (مگاوات).  
 $P_{E_{k,u,t,q}}$ : توان فروخته شده در حوضچه توان<sup>۲</sup> از طریق بلوک  $k$  ام واحد  $u$  در زمان  $t$  و سناریو  $q$  (مگاوات).

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: behdadvatani@gmail.com

۱. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲ دانشجوی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

<sup>۱</sup> Bilateral contract

<sup>۲</sup> Pool

<sup>۳</sup> Value-at-risk

## متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده:

## ۱- مقدمه

آرایش تولید<sup>۲</sup> بهینه و کارآ یک ابزار کلیدی و مهم برای بقا و موفقیت شرکت‌های تولید کننده<sup>۳</sup> در محیط بازار برق است. در واقع هر شرکت تولید کننده با انجام برنامه‌ریزی برای تولید و فروش بهینه، می‌تواند شانس موفقیت در تولید و عرضه خدمات خود را بالا برده و بر سود خود بیافزاید. هرچند مدل‌سازی ریاضی و حل مسئله آرایش تولید بهینه در عمل بسیار پیچیده است ولی به دلیل حساسیت بسیار زیاد سود تولید کننده‌ها به آن، تحقیقات وسیعی برای مدل‌سازی و حل این مسئله به بهینه‌ترین صورت ممکن در سراسر جهان در حال انجام است.

در [۳-۱]، از روش‌های فرامکاشف‌های<sup>۴</sup> برای مسئله ارائه پیشنهاد، استفاده شده است. مشکل این روش‌ها زمان‌بر بودن آنها نسبت به روش‌های تحلیلی، مانند روش برنامه‌ریزی تصادفی<sup>۵</sup> متکی بر گرادیان است. به همین دلیل در عمل از این روش‌ها در حل این مسئله استفاده نمی‌گردد. در بعضی تحقیقات برای مدل‌سازی و حل مسئله مذکور، تنها بازار انرژی در مدل حوضچه توان در نظر گرفته شده است [۶-۴]. در [۷]، روشی برای حل مسئله آرایش تولید مبتنی بر قیمت<sup>۶</sup> برای یک شرکت تولید کننده با واحدهای حرارتی، سیکل ترکیبی، آبی و تلمبه ذخیره‌ای ارائه شده است. در [۸] به آرایش تولید مبتنی بر ریسک برای یک تولید کننده، در بازار روز پیش پرداخته شده است. در [۹]، رویکرد بهینه پیشنهاد قیمت در بازارهای قراردادهای دوجانبه و انرژی مطالعه شده است ولی به منظور ساده‌سازی مدل، دوره زمانی یک روز، به سه بازه تولید کم، متوسط و اوج تقسیم شده است که این امر سبب دوری از نقطه بهینه واقعی و همگرایی جواب مسئله به یک نقطه شبه‌بهینه می‌شود.

$\zeta_{t,q}^{MCP}$ : قیمت تصفیه بازار برای انرژی در ساعت  $t$  و سناریو  $q$  (دلار در هر مگاوات ساعت).

## ثابت‌ها

$C_u$ : هزینه ثابت تولید واحد  $u$  (دلار در ساعت)  
 $C_{k,u}$ : هزینه افزایشی تولید بلوک  $k$  واحد  $u$  (دلار در هر مگاوات ساعت)  
 $C_u^{SU}$ : هزینه راه‌اندازی واحد  $u$  (دلار)  
 $C_u^{SD}$ : هزینه خاموش شدن واحد  $u$  (دلار)  
 $P_{bc}^{max}$ : بیشینه توانی که از طریق بلوک  $b$  قرارداد  $c$  می‌تواند فروخته شود (مگاوات)  
 $P_u^{max}$ : ظرفیت واحد  $u$  (مگاوات)  
 $P_u^{min}$ : کمینه توان خروجی واحد  $u$  (مگاوات)  
 $P_{k,u}^{max}$ : ظرفیت بلوک  $b$  واحد  $u$  (مگاوات)  
 $RD_u$ : نرخ شیب کاهش واحد  $u$  (مگاوات در هر ساعت)  
 $RU_u$ : نرخ شیب افزایشی واحد  $u$  (مگاوات در هر ساعت)  
 $\Pi$ : سطح اطمینان در هر واحد<sup>۱</sup>  
 $\gamma$ : فاکتور وزنی مثبت برای رسیدن به یک تعادل بین سود و ریسک  
 $\zeta_{bc}$ : قیمت انرژی بلوک  $b$  قرارداد دوجانبه  $c$  (دلار در هر مگاوات ساعت)  
 $Pi_q$ : احتمال وقوع سناریو  $q$

## اندیس‌ها، اعداد و مجموعه‌ها

$B$ : تعداد بلوک‌های هر قرارداد دوجانبه  
 $C$ : تعداد قراردادهای دوجانبه  
 $U$ : تعداد واحدهای تولیدی  
 $T$ : تعداد بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده  
 $K$ : تعداد بلوک‌های منحنی هزینه تولید برای هر واحد تولیدی

<sup>۱</sup> Per Unit Confidence Level

<sup>۲</sup> Unit Commitment

<sup>۳</sup> Generation Companies (GENCOs)

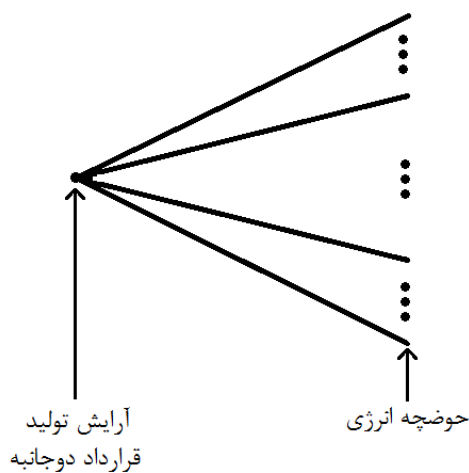
<sup>۴</sup> Meta-heuristic

<sup>۵</sup> Stochastic Programming

<sup>۶</sup> Price Based Unit Commitment

تصفیه دیگر بازارها تعیین می‌شود. به همین منظور در اولین مرحله تعیین می‌شود.

۲- در مرحله بعد، که شامل برنامه‌ریزی برای ۱۶۸ ساعت طول یک هفته می‌باشد، بازار انرژی حوضچه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بازار این مرحله وابسته به بازار قرارداد دوجانبه است. یعنی ابتدا بازار قرارداد دوجانبه به صورت مستقل تعیین می‌شود، تا از این طریق متغیرهای تصادفی مشخص گردد، سپس بازار انرژی تصفیه می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- درخت سناریو دو مرحله‌ای

در این مقاله، برای ایجاد سناریوها به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت از روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱۰]. از این روش برای ایجاد سناریوهای متغیرهای تصادفی قیمت انرژی در بازار حوضچه توان بهره گرفته شده است. هر متغیر تصادفی در مرحله دوم، شامل قیمت برای بازارهای انرژی در هر ساعت است. بنابراین بعد هر متغیر مرحله دوم ۱۶۸ (۷×۲۴) است.

در این تحقیق، ابتدا تعداد ۳۰۰ سناریوی مختلف ایجاد گردید. این تعداد سناریو به پیچیدگی بیش از حد مسئله انجامیده و حل آن را ناممکن می‌سازد. برای حل این مشکل، از روش‌های کاهش سناریو استفاده می‌شود که

در حال حاضر در هیچیک از تحقیقات منتشر شده در جهان، مدل کاملی که شامل بازارهای قرارداد دوجانبه و انرژی به صورت هم‌زمان باشد، مطالعه نشده است. در این مقاله، ارائه پیشنهاد برای بازارهای قرارداد دوجانبه و حوضچه انرژی به صورت هم‌زمان بررسی می‌شود.

در این تحقیق، با استفاده از روش کاهش سناریو، از پیچیدگی مطالعه ساعت به ساعت بازارها در طول بازه یک هفته کاسته شده و با کاهش مؤثر بُعد مسئله بدون از دست دادن اطلاعات با ارزش، رویکرد بهینه پیشنهاد قیمت تعیین می‌گردد. علاوه بر این، در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته، ریسک اقتصادی تولیدکننده‌ها در فرایند تعیین رویکرد بهینه پیشنهاد قیمت، که یک شاخص بسیار مهم در مسئله آرایش تولید است، در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق، ضمن ارائه یک مدل کامل برای برنامه‌ریزی تولید بهینه برای تولیدکننده‌ها، ریسک اقتصادی ناشی از این برنامه‌ریزی نیز در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه، ابتدا چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی پیشنهادی شرح داده می‌شود. سپس نحوه مدل‌سازی مسئله مذکور بحث می‌گردد. در بخش بعد، روش مدل‌سازی و حل پیشنهادی روی یک سیستم نمونه مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در انتها، بحث و نتیجه‌گیری انجام می‌گیرد.

## ۲- چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی

در این مقاله، رویکرد بهینه پیشنهاد قیمت در بازار هفتگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازارهای مدل‌شده که در فرایند تعیین رویکرد بهینه پیشنهاد قیمت، به ترتیب در مدل مسئله حل می‌گردند عبارتند از:

۱- در مرحله اول، که ابتدای هفته می‌باشد، آرایش تولید واحدها در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین بازار قرارداد دوجانبه در این مرحله قرار می‌گیرد. دلیل این امر این است که تعیین قرارداد دوجانبه قبل از انجام مرحله

<sup>۱</sup> Monte Carlo Simulation (MCS)

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \sum_{c=1}^C \sum_{b=1}^B \zeta_{bc} P_{bc} - \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T (SU_{u,t} + SD_{u,t}) \\ & + \sum_{\varrho=1}^{\rho} P_{i\varrho} \cdot \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T (\zeta_{t,\varrho}^{MCP} \cdot P_{E_{k,u,t,\varrho}} - (C_{u,t} \cdot z_{u,t} + C_{k,u} \cdot P_{G_{k,u,t,\varrho}})) \right] \\ & + \gamma \cdot \left[ \varphi - \frac{1}{1-\pi} \sum_{\varrho=1}^{\rho} P_{i\varrho} \cdot \theta_{\varrho} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، خط اول رابطه، مربوط به قراردادهای دوجانبه و هزینه‌های راه‌اندازی و خاموش شدن واحدها می‌باشد. خط دوم از رابطه (۱)، مرحله دوم مسئله را نشان می‌دهد. در بخش اول خط دوم، بازار انرژی فرمول‌بندی شده است و بخش دوم، هزینه تولید ناشی از مجموع توانی که تولید کننده در هر بازار تولید می‌کند را نشان می‌دهد. خط انتهایی رابطه (۱)، ریسک اقتصادی تولید کننده را در تابع هدف مدل می‌کند.

قیود این مسئله عبارتند از:

$$0 \leq P_{bc} \leq P_{bc}^{max}, \quad \forall b, \forall c \quad (2)$$

$$0 \leq SU_{u,t} \geq C_u^{SU} \cdot (z_{u,t} - z_{u,t-1}), \quad \forall u, \forall t \quad (3)$$

$$0 \leq SD_{u,t} \geq C_u^{SD} \cdot (z_{u,t-1} - z_{u,t}), \quad \forall u, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{b=1}^B P_{bc} + \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U P_{E_{k,u,t,\varrho}} = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U P_{G_{k,u,t,\varrho}}, \quad \forall t, \forall \varrho \quad (5)$$

$$P_u^{min} \cdot z_{u,t} \leq \sum_{k=1}^K P_{G_{k,u,t,\varrho}} \leq P_u^{max} \cdot z_{u,t}, \quad \forall u, \forall t, \forall \varrho \quad (6)$$

$$0 \leq P_{G_{k,u,t,\varrho}} \leq P_{k,u}^{max}, \quad \forall k, \forall u, \forall t, \forall \varrho \quad (7)$$

$$0 \leq P_{E_{k,u,t,\varrho}} \leq P_{k,u}^{max}, \quad \forall k, \forall u, \forall t, \forall \varrho \quad (8)$$

$$P_{G_{k,u,t,\varrho}} \leq P_{G_{k,u,t-1,\varrho}} + RU_u, \quad \forall k, \forall u, \forall t, \forall \varrho \quad (9)$$

$$P_{G_{k,u,t,\varrho}} \geq P_{G_{k,u,t-1,\varrho}} - RD_u, \quad \forall k, \forall u, \forall t, \forall \varrho \quad (10)$$

$$\theta_{\varrho} \geq - \sum_{c=1}^C \sum_{b=1}^B \zeta_{bc} P_{bc} + \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T (SU_{u,t} + SD_{u,t}) - \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T (\zeta_{t,\varrho}^{MCP} \cdot P_{E_{k,u,t,\varrho}} - (C_{u,t} \cdot z_{u,t} + C_{k,u} \cdot P_{G_{k,u,t,\varrho}})) + \varphi \quad (11)$$

$$\theta_{\varrho} \geq 0, \quad \forall \varrho \quad (12)$$

قید (۲)، کران بالا و پایین توان فروخته شده از طریق بازار قرارداد دوجانبه را نشان می‌دهد. قیدهای (۳) و (۴) هزینه‌های راه‌اندازی و خاموش شدن واحدها را مدل می‌کنند. قید (۵)، تساوی توان تولیدی با توان فروخته شده در بازارهای قرارداد دوجانبه و حوضچه توان را در

ضمن کاهش تعداد سناریوها، اطلاعات تصادفی سناریوهای ابتدایی را نیز تا حد امکان حفظ می‌کنند. روش کاهش سناریو استفاده شده در این مقاله روش Backward در ابزار نیرومند و جدید SCENRED در نرم‌افزار GAMS<sup>۱</sup> است [۱۱]. برای تعیین میزان همگرایی این روش، از یک فاصله احتمالی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در این روش، فاصله احتمالی سناریوهای جدید با سناریوهای ابتدایی مقایسه می‌شود و تلاش می‌شود که سناریوهای جدید، کمترین فاصله احتمالاتی را از سناریوهای ابتدایی داشته باشند. بعد از استفاده از این ابزار، تعداد سناریوها به ۱۷ سناریو با فاصله احتمالی صفر کاهش می‌یابد.

معیارهای ریسک نقش بسیار مهمی در بهینه‌سازی همراه با عدم قطعیت ایفا می‌کنند. در این تحقیق، برای مدل‌سازی ریسک اقتصادی، از شاخص شناخته شده CVaR استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این شاخص که باعث شده است بسیار مورد توجه قرار گیرد، این است که معیار CVaR برخلاف معیار VaR، خسارت‌هایی که بیشتر از میزان تعیین شده هستند را نیز بررسی می‌کند، که این امر باعث می‌شود هیچ اطلاعاتی از دست نرود [۱۲]. همچنین محدب<sup>۳</sup> بودن شاخص ذکر شده، یکی از مزیت‌های آن است [۱۳].

### ۳- تعریف مسئله

بیشینه کردن سود، مهم‌ترین هدف تولید کننده از یک آرایش تولید بهینه است [۱۴]. به همین دلیل، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر نوشته می‌شود:

<sup>1</sup> Generalized Algebraic Modeling System

<sup>2</sup> Probability Distance

<sup>3</sup> Convex

۹ شب تا ۱۱ شب)، قرارداد دوجانبه نوع B، دوره‌های اوج<sup>۲</sup> (۸ صبح تا ۸ شب) را پوشش می‌دهد و قرارداد نوع C همه دوره‌ها را تحت پوشش می‌گیرد.

جدول ۱- اطلاعات فنی واحدهای تولیدی

واحد	$P_u^{min}$ (MW)	$P_u^{max}$ (MW)	$P_{k,u}^{max}$ (MW)	$RU_u$ (MW/h)	$RD_u$ (MW/h)
واحد ۱ ذغال سنگ Coal1	۷۵	۱۴۰	[۳۲.۷۵/۳۲.۵/۵]	۶۵	۶۵
واحد ۲ ذغال سنگ Coal2	۱۵۰	۳۵۰	[۱۵۰.۱۰۰.۱۰۰]	۲۰۰	۲۰۰
واحد ۳ ذغال سنگ Coal3	۲۵۰	۵۰۰	[۲۵۰.۱۲۵.۱۲۵]	۲۵۰	۲۵۰
واحد ۱ سیکل ترکیبی CCGT1	۱۶۰	۳۸۰	[۱۶۰.۱۱۰.۱۱۰]	۲۲۰	۲۲۰
واحد ۲ سیکل ترکیبی CCGT2	۱۸۰	۳۹۰	[۱۰۵.۱۰۵.۱۸۰]	۲۱۰	۲۱۰
واحد ۱ گازی Oil1	۲۰۰	۳۰۰	[۲۰۰.۵۰.۵۰]	۱۰۰	۱۰۰
واحد ۲ گازی Oil2	۲۵	۵۰	[۲۵.۱۲/۵.۱۲/۵]	۲۵	۲۵

#### ۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

مدل ارائه شده به کمک CPLEX 12 [۱۶] تحت نرم‌افزار GAMS [۱۱] و با استفاده از رایانه‌ای با مشخصات Core RAM 4G و 2.3GHz، i5 تحلیل شده است.

جدول ۲- توان ابتدایی خروجی واحدهای تولیدی

واحد	Coal1	Coal2	Coal3	CCGT1
$P_0$ (MW)	۱۳۰	۳۳۵	۰	۰
واحد	CCGT2	Oil1	Oil2	-
$P_0$ (MW)	۲۰۵	۲۲۰	۲۵	-

جدول ۳- اطلاعات هزینه برای واحدهای تولیدی

نظر می‌گیرد. قیدهای (۶)، (۷) و (۸) کران‌های بالا و پایین توان تولیدی واحدها را نشان می‌دهند. این توان تولیدی از مجموع توان‌های فروخته شده در قراردادهای دوجانبه و بازار انرژی تشکیل می‌شود. قیدهای (۹) و (۱۰) حدود نرخ شیب واحدها را مدل می‌کنند. در انتها، از دو قید (۱۱) و (۱۲) برای تشکیل معیار ریسک CVaR استفاده شده است [۱۳]. در این مدل که مربوط به شرکت‌های تولید کننده می‌باشد، تلفات انتقال در نظر گرفته نشده است.

#### ۴- نتایج عددی

##### ۴-۱- اطلاعات سیستم

سیستم مورد مطالعه، یک تولید کننده واقعی است که شامل سه واحد با سوخت ذغال سنگ، دو واحد سیکل ترکیبی و دو واحد گازی است [۹]. اطلاعات مربوط به قیمت تصفیه بازار انرژی از بازار اسپانیا اقتباس شده است [۱۵].

اطلاعات واحدها در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول برای هر واحد، ظرفیت و کمینه توان خروجی، اندازه هر بلوک تولید توان، نرخ افزایشی شیب و نرخ کاهشی شیب نشان داده شده است. توان خروجی واحدهای تولیدی در ساعت پیش از شروع دوره برنامه‌ریزی، در جدول ۲ آورده شده است. جدول ۳ اطلاعات هزینه واحدهای تولیدی را بیان می‌کند. در این جدول، هزینه راه‌اندازی، هزینه خاموش شدن و بلوک‌های افزایشی هزینه مرزی که مطابق با بلوک‌های تولید هستند، ارائه شده است. اطلاعات مربوط به سه نوع قرارداد دوجانبه در جدول ۴ ارائه شده است. قرارداد دو جانبه نوع A، دوره‌های غیراوج<sup>۱</sup> (از نیمه شب تا ۷ صبح و

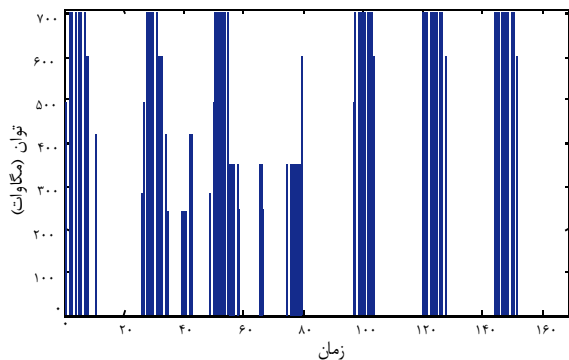
<sup>2</sup> Peak

<sup>1</sup> Off peak

حالت، کل ۱۷ سناریو در نظر گرفته شده است. شکل ۲ میزان قراردادهای دوجانبه را برای دوره مطالعه، یعنی یک هفته، بدون در نظر گرفتن ریسک نشان می‌دهد.

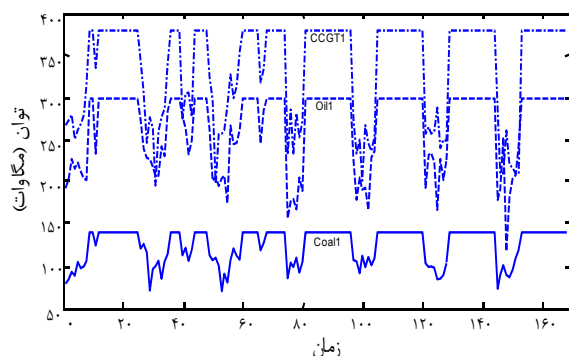
جدول ۵- میزان سود و توان‌های تولید شده برای قیمت‌های مختلف قرارداد دوجانبه برای دوره مطالعاتی یک هفته

قرارداد دوجانبه (مگاوات)	توان تولید شده (مگاوات)	میزان سود (میلیون دلار)	قیمت قرارداد دوجانبه
۰	۳۵۴۰۷۰	۱۴/۸۱۸۲	$0.15 * \zeta_{bc}$
۱۱۶۵۵	۳۴۲۴۱۵	۱۴/۸۲۱۹	$0.175 * \zeta_{bc}$
۴۵۸۴۵	۳۰۸۲۲۵	۱۵/۱۲۱۸	$\zeta_{bc}$
۱۰۳۲۷۰	۲۵۰۸۰۰	۱۶/۲۶۱۷	$1.25 * \zeta_{bc}$
۱۰۵۲۵۰	۲۴۸۸۲۰	۱۷/۸۴۸۹	$1.5 * \zeta_{bc}$



شکل ۲- مقدار قراردادهای دوجانبه برای  $\gamma=0$  برای دوره مطالعاتی یک هفته

در شکل‌های ۳ و ۴ مقدار توانی که برای شرکت در بازار انرژی تولید شده است، نشان داده می‌شود.



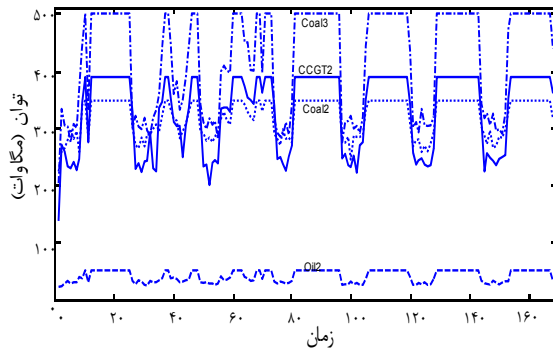
شکل ۳- توان فروخته شده در بازار انرژی برای  $\gamma=0$  برای دوره مطالعاتی یک هفته (واحدهای Coal1, Oil1 و CCGT1)

واحد	$C_u^{SU}$ (\$)	$C_u^{SD}$ (\$)	$C_{k,u}$ (\$/MWh)	$C_u$ (\$/h)
Coal1	۳۰۰۰	۳۰۰	[۹/۸۱،۱۰/۸۱،۱۱/۸۱]	۱۲۶
Coal2	۶۲۰۰	۶۲۰	[۱۳/۴۰،۱۴/۴۰،۱۵/۴۰]	۷۰۸/۸
Coal3	۶۰۰۰	۶۰۰	[۱۹/۳۷،۲۰/۳۷،۲۱/۳۷]	۵۷۵
CCGT1	۷۰۰۰	۷۰۰	[۱۵/۱۷،۱۶/۱۷،۱۷/۱۷]	۱۰۹۷/۲
CCGT2	۶۵۰۰	۶۵۰	[۱۵/۵۱،۱۶/۵۱،۱۷/۵۱]	۹۹۲/۸
Oil1	۷۲۰۰	۷۲۰	[۲۳/۹۱،۲۴/۹۱،۲۵/۹۱]	۱۸۰۰
Oil2	۲۰۰۰	۲۰۰	[۲۷/۹۱،۲۸/۹۱،۲۹/۹۱]	۹۱/۵

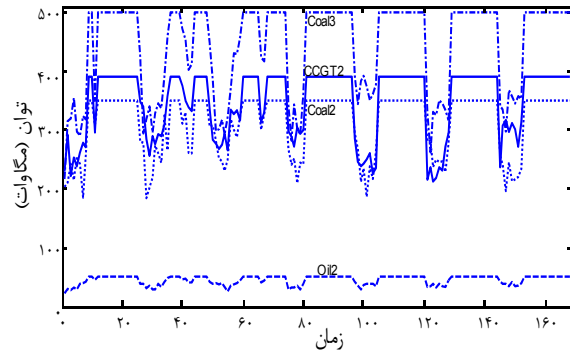
جدول ۴- اطلاعات قرارداد دوجانبه

نوع قرارداد	$P_{bc}^{max}$ (MW)	$\zeta_{bc}$ (\$/MWh)
A	۱۴۰	۱۹/۳۵
	۱۰۵	۱۸/۹۶
	۱۰۵	۱۸/۳۸
B	۱۰۰	۲۲/۶۶
	۷۵	۲۲/۲۰
	۷۵	۲۱/۵۳
C	۱۴۰	۱۹/۸۴
	۱۰۵	۱۹/۴۴
	۱۰۵	۱۸/۸۴

در این بخش، ابتدا تحلیل حساسیت روی قیمت بازار قرارداد دوجانبه انجام می‌شود. سپس اثر ریسک روی میزان تولید بازارها بررسی و اثرات آن مطالعه می‌شود. برای تحلیل، قیمت‌ها درصدی از قیمت ارائه شده در جدول ۴ در نظر گرفته می‌شود. در این تحلیل، فرض شده که  $\gamma=10$  است. نتایج به دست آمده از این تحلیل در جدول ۵ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با در نظر گرفتن ریسک، به ازای درصد کمی افزایش در قیمت قرارداد دوجانبه، تولید کننده برای افزایش سود خود، به بازار قرارداد دو جانبه روی می‌آورد. با ملاحظه جدول ۵ مشاهده می‌شود که  $0.15 * \zeta_{bc}$ ، در بیشترین حالت قیمت، ۳۴ دلار می‌شود و این در حالی است که کمینه قیمت تصفیه بازار در نظر گرفته شده ۴۱/۲۰ دلار است. برای بررسی اثر ریسک، نتایج شبیه‌سازی، بدون در نظر گرفتن ریسک  $\gamma=0$  و حالتی که  $\gamma=10$  بررسی می‌شود و در هر دو حالت، میزان شرکت تولید کننده در هر دو بازار نشان داده می‌شود. در هر دو



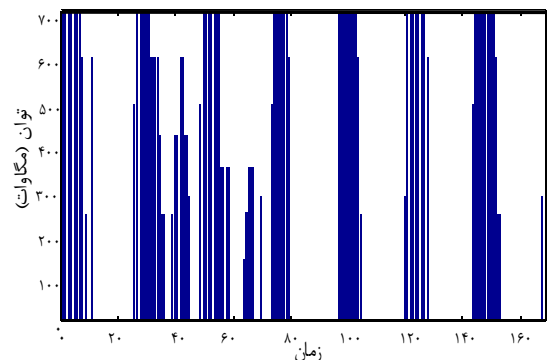
شکل ۷- توان فروخته شده در بازار انرژی برای  $\gamma=10$  برای دوره مطالعاتی یک هفته (واحدهای Coal3, CCGT2, Coal2, Oil2 و Oil2)



شکل ۴- توان فروخته شده در بازار انرژی برای  $\gamma=0$  برای دوره مطالعاتی یک هفته (واحدهای Coal3, CCGT2, Coal2, Oil2 و Coal2)

با مقایسه شکل‌های دو حالت بدون ریسک و با در نظر گرفتن ریسک و همچنین جدول ۶، می‌توان دریافت که هرچه ریسک بیشتر شود تمایل به شرکت در بازار قرارداد دوجانبه نسبت به بازار انرژی بیشتر می‌شود. تمایل به بازار قرارداد دوجانبه در بازه زمانی ساعات غیراوج، که نیاز مصرف و در نتیجه قیمت کمتری دارند، بیشتر ظاهر می‌گردد. با افزایش ریسک، تولید کننده برای افزایش سود خود در بازاری شرکت می‌کند که ریسک کمترین اثر را روی آن داشته باشد و این بازار، قرارداد دوجانبه است.

در ادامه، ریسک به ازای  $\gamma=10$  بررسی می‌شود. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب قرارداد دوجانبه و توان فروخته شده در حوضچه توان نشان داده شده است.

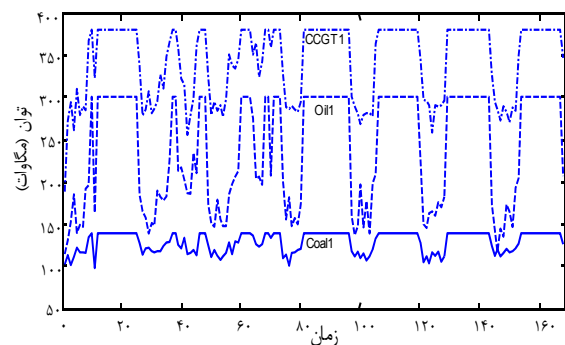


شکل ۵- مقدار قراردادهای دوجانبه برای  $\gamma=10$  برای دوره مطالعاتی یک هفته

جدول ۶- میزان سود و توان‌های تولید شده

در ضرایب ریسک مختلف برای دوره مطالعاتی یک هفته

$\gamma$	میزان سود (میلیون دلار)	توان تولید شده (مگاوات)	قرارداد دوجانبه (مگاوات)
$\gamma=0$	۱۵/۱۳۰۱	۳۱۵۰۶۰	۳۹۰۱۰
$\gamma=0.1$	۱۵/۱۲۹۹	۳۱۴۷۱۰	۳۹۳۶۰
$\gamma=1$	۱۵/۱۲۷۶	۳۱۱۹۰۵	۴۲۱۶۵
$\gamma=5$	۱۵/۱۲۳۲	۳۰۸۹۲۵	۴۵۱۴۵
$\gamma=10$	۱۵/۱۲۱۸	۳۰۸۲۲۵	۴۵۸۴۵
$\gamma=25$	۱۵/۱۲۰۴	۳۰۷۵۲۵	۴۶۵۴۵
$\gamma=100$	۱۵/۱۱۹۷	۳۰۷۲۴۵	۴۶۸۲۵



شکل ۶- توان فروخته شده در بازار انرژی برای  $\gamma=10$  برای دوره مطالعاتی یک هفته (واحدهای Coal1, CCGT1, Oil1 و Oil1)

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ایجاد یک آرایش تولید بهینه با در نظر گرفتن بازارهای قرارداد دوجانبه و حوضچه توان بررسی

شد. با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی، یک مدل کامل از آرایش تولید یک تولید کننده ارائه شد. همچنین اثر ریسک در برنامه‌ریزی تولید کننده برای شرکت در بازارهای مختلف بررسی گردید. ملاحظه گردید که با افزایش ریسک، تمایل به شرکت در بازار قرارداد دوجانبه افزایش می‌یابد و برعکس، تمایل به شرکت در بازار انرژی کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Richter, C.W., Sheble, G.B. (2000), "A profit-based unit commitment GA for the competitive environment". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 15, No. 2, pp. 715-721.
- [2] Bajpai, P., Singh, S.N. (2007), "Fuzzy adaptive particle swarm optimization for bidding strategy in uniform price spot market". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 4, pp. 2152-2160.
- [3] Boonchuay, C., Ongsakul, W. (2011), "Optimal risky bidding strategy for a generating company by self-organizing hierarchical particle swarm optimization". Energy Conversion and Manage. Vol. 52, pp. 1047-1053.
- [4] Zhang, D., Wang, Y., Luh, P.B. (2000), "Optimization based bidding strategies in the deregulated market". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 15, No. 3, pp. 981-986.
- [5] X. Guan, X., Ho, Y.C., Lai, F. (2001), "An ordinal optimization based bidding strategy for electric power suppliers in the daily energy market". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 16, No. 4, pp. 788-797.
- [6] De la Torre, S., Arroyo, J.M., Conejo, A.J., Contreras, J. (2002), "Price maker self-scheduling in a pool based electricity market: A mixed-integer LP approach". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 17, No. 4, pp. 1037-1042.
- [7] Li, T., Shahidehpour, M. (2005), "Price-based unit commitment: A case of Lagrangian relaxation versus mixed integer programming". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 4, pp. 2015-2025.
- [8] Yamin, H.Y., Shahidehpour, S.M. (2004), "Risk and profit in self-scheduling for GenCos". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 4, pp. 2104-2106.
- [9] Garces, L.P., Conejo, A.J. (2010), "Weekly self-scheduling, forward contracting, and offering strategy for a producer". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 25, No. 2, pp. 657-666.
- [10] Baslis, C.G., Papadakis, E., Bakirtzis, A.G. (2009) "Simulation of optimal medium-term hydro-thermal system operation by grid computing". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 3, pp. 1208-1217.
- [11] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., Rosenthal, R.E. (2008), GAMS, a User's Guide. GAMS Development Corporation, Washington, DC.
- [12] Jabr, R.A. (2005), "Robust self-scheduling under price uncertainty using conditional value-at-risk". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 4, pp. 1852-1858.
- [13] Krokhmal, P., Palmquist, J., Uryasev, S. (2001), "Portfolio optimization with conditional value-at-risk objective and constraints". The J. Risk, Vol. 4, No. 2, pp. 11-27.
- [14] Shahidehpour, M., Yamin, H., Li, Z. (2002), "Market Operations in Electric Power Systems, Forecasting, Scheduling and Risk Management", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [15] Market Operator of the Electricity Market of the Iberian Peninsula, OMEL, (2011). [Online]. Available: <http://www.omel.es>.
- [16] The ILOG CPLEX, (2009). [Online]. Available: <http://www.ilog.com/products/cplex/>.



## OPTIMUM STOCHASTIC SELF-SCHEDULING FOR GENCOs CONSIDERING POOL AUCTION AND BILATERAL CONTRACTS

N. Amjady<sup>1</sup>, B. Vatani<sup>2,\*</sup>, H. Sharifzadeh<sup>3</sup>

1. Professor, Power Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2. M.Sc. Student, Power Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3. PhD Student, Power Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

\*Corresponding Author: behdadvatani@gmail.com

---

### ARTICLE INFO

Keywords:

Energy Market,  
Bilateral Contracts,  
Stochastic Self-  
Scheduling,  
Financial Risk,  
Generation  
Companies.

---

### ABSTRACT

In this paper, in order to determine optimal bidding strategy of GENCOs, considering uncertainty of market price, a stochastic model is presented. For this purpose, a two-stage stochastic model is proposed in which energy prices are considered as uncertain parameters. Furthermore, for taking into account the practical conditions, the producers have been granted the opportunity to sell their productions both through bilateral contracts and participating in energy auctions. The producer's financial risk is also evaluated using the well-known CVaR criterion. The proposed model is implemented on a test system and the obtained results are analyzed. The simulation results show that the proposed model can simulate market behavior effectively, obtain optimal bidding strategy and propose proper market selection with the aim of profit maximization.

---