

# مدل سازی تأمین انرژی شرکت های توزیع با در نظر گرفتن بارهای قابل قطع، تولیدهای پراکنده و عدم قطعیت ها

میثم امیراحمدی<sup>۱</sup>، اصغر اکبری فرود<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲- استادیار مهندسی برق، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

\*سمنان، صندوق پستی ۳۶۳-۳۵۱۹۵

aakbari@semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۸)

**چکیده** - در بازار های رقابت عمده فروشی، هر شرکت توزیع به عنوان یکی از بازیگران بازار، به دنبال حداکثر کردن سود، با به کارگیری تمامی امکانات خود است. بنابراین تعیین راهکار بهینه تأمین انرژی هر شرکت توزیع برای نیل به این هدف، امری ضروری است؛ اما مشکل اصلی در تعیین این راهکار، پیش بینی رفتار دیگر رقیبان و شرکت های تولیدی حاضر در بازار بوده و اطلاعات ناقص مربوط به آنها باید به شکل عدم قطعیت در مسأله ملحوظ شود. در این مقاله، نوعی مدل تأمین انرژی برای شرکت های توزیع با در نظر گرفتن تولیدهای پراکنده و بارهای قابل قطع متعلق به این شرکت و با ملحوظ کردن عدم قطعیت ها در بازار برق روز-پیش پیشنهاد شده است. در روش ارائه شده، ابتدا مدل تأمین انرژی به صورت نوعی مسأله بهینه سازی چندهدفه دوسطحی که با استفاده از روش متمم غیرخطی و L-P متریک قابل حل است، پیشنهاد شده و سپس نامعینی های موجود در اطلاعات، با استفاده از روش مونت کارلو، به مدل اعمال می شود. یک سیستم ۸ شینه برای تأیید اعتبار الگوریتم و مدل پیشنهادی، مورد استفاده قرار گرفته است.

**کلید واژگان:** عدم قطعیت ها، شرکت توزیع، تولیدهای پراکنده، بارهای قابل قطع، روش متمم غیرخطی، روش مونت کارلو.

## ۱- مقدمه

در روند تجدید ساختار<sup>۱</sup> سیستم های قدرت، چهار مدل پیشنهاد می شود که تکامل تدریجی صنعت برق را از شکل انحصاری تا رقابت کامل توصیف می کند. این مدل ها شامل مدل انحصاری<sup>۲</sup>، بنگاه خرید<sup>۳</sup>، رقابت عمده فروشی<sup>۴</sup> و رقابت

خرده فروشی<sup>۵</sup> است [۱]. در مدل رقابت عمده فروشی، به عنوان یکی از مدل های رقابت ناقص، رقابت فقط در سطح عمده فروشی توان انجام می شود؛ به این معنا که شرکت های توزیع<sup>۶</sup> در بازار عمده فروشی، توان را از شرکت های تولیدکننده خریداری کرده و سپس به مشتریانی می فروشند

4. Wholesale Competition  
5. Retail Competition  
6. Distribution Company (Disco)

1. Restructuring  
2. Monopoly  
3. Purchasing Agency

تخمین بزنند. این اطلاعات را معمولاً پیش‌بینی می‌کنند؛ اما این پیش‌بینی‌ها نیز با توجه به ساختار بازار برق به راحتی قابل انجام نبوده و دقیق نیستند و فقط اطلاعات ناقصی در دسترس قرار دارد. قطعی فرض کردن این اطلاعات موجب می‌شود که مدلی قطعی و در نتیجه راهکاری قطعی برای تأمین انرژی شرکت توزیع به دست آید؛ که این با توجه به ناقص بودن اطلاعات، غیرمنطقی است. بنابراین به نظر می‌رسد که ملحوظ کردن نامعینی‌های<sup>۱</sup> موجود در این اطلاعات، در مدل تأمین انرژی، به منظور حصول راهکاری منطقی و بهینه برای تأمین انرژی، امری الزامی است.

روش مونت‌کارلو<sup>۲</sup> یکی از راهکارهایی است که می‌تواند برای مدلسازی عدم قطعیت‌ها به کار رود.

در مدل ارائه شده در این مقاله، هدف شرکت توزیع، حداکثر کردن سود خود با تعیین مقدار بار قابل قطع، برنامه‌ریزی برای DGهای خود و تعیین مقدار خرید انرژی از بازار برق روز - پیش<sup>۳</sup>، با در نظر گرفتن راهکارهای دیگر شرکت‌های توزیع است؛ ضمن آن‌که عدم قطعیت‌های موجود، که شامل عدم قطعیت در قیمت‌های پیشنهادی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به بازار و همچنین عدم قطعیت در مقدار بار دیگر مصرف‌کنندگان است، در مسأله ملحوظ می‌شوند. عدم قطعیت‌ها به صورت توابع چگالی احتمال<sup>۴</sup> (PDF) نرمال مدل سازی شده و سپس با نمونه‌برداری تصادفی از این توابع و با استفاده از روش مونت‌کارلو، مدل ارائه شده که نوعی مسأله بهینه‌سازی چندهدفه دوسطحی<sup>۵</sup> است، برای تعداد زیادی تکرار حل شده و راهکار تأمین انرژی شرکت توزیع مشخص می‌شود.

در ادامه مقاله در بخش<sup>۲</sup>، رویه ارائه پیشنهاد در بازار برق و در بخش<sup>۳</sup>، مدل تأمین انرژی شرکت توزیع بدون

که انرژی را فقط از این شرکت‌ها می‌توانند تأمین کنند. در این محیط رقابتی، هر یک از شرکت‌کنندگان در بازار، به دنبال حداکثر کردن سود خود است. در این زمینه در میان مقالات موجود، توجه بسیاری به حداکثر کردن سود شرکت‌های تولیدکننده شده و شرکت‌های توزیع کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲، ۳، ۴، ۵ و ۶].

با توسعه بیشتر بازار برق، تحقیقات مرتبط با سیستم توزیع به تدریج افزایش یافته و همچنین مشخص شده است که به کارگیری برنامه‌های پاسخ تقاضا، می‌تواند بهبود قابلیت پاسخگویی شرکت‌های توزیع به نیازهای بازار را در پی داشته و نیز موجب حداکثر شدن سود این شرکت‌ها شود. در این زمینه، DGها و بارهای قابل قطع، دو نمونه از برنامه‌های پاسخ تقاضا است که امروز بسیار مورد توجه شرکت‌های توزیع قرار گرفته‌اند. در [۷]، روشی برای حداکثر کردن سود شرکت توزیعی که دارای تعدادی DG است، ارائه شده؛ در این مقاله، بازار عمده‌فروشی توان در نظر گرفته نشده است. در [۸]، شرکت توزیع برای تأمین انرژی، از بازار عمده‌فروشی توان، DGهای متعلق به مالکان شخصی و DGهای در تملک خود شرکت استفاده کرده و ضمن استفاده از بارهای قابل قطع، هزینه‌های خود را حداقل می‌سازد. در این مقاله نیز، اثر راهکارهای دیگر شرکت‌های توزیع موجود در سیستم، در مسأله ملحوظ نشده است. در [۹]، شرکت توزیع مورد بررسی، با در نظر گرفتن DGهای متعلق به خود، بارهای قابل قطع و اثر دیگر شرکت‌های توزیع بر برنامه‌ریزی‌های خود، به حداکثر کردن سود خود پرداخته و راهکار تأمین انرژی خود را مشخص سازد.

با وجود این تعیین راهکار بهینه تأمین انرژی شرکت توزیع، مستلزم آن است که این شرکت بتواند اطلاعات مربوط به هزینه و پیشنهاد قیمت دیگر شرکت‌های توزیع و شرکت‌های تولیدی حاضر در بازار عمده‌فروشی را که توابعی از ساعت، روز هفته و تعطیلات است به‌طور دقیق

1. Uncertainties
2. Monte Carlo Method
3. Day-ahead Electricity Market
4. Probability Density Function
5. Bi-level Multi-objective Optimization Problem

- هر شرکت توزیع، حداکثر تقاضای بارها  $(P_{d,i}^*)$ ، حداقل و حداکثر مقدار قطع بار  $(P_{IL,i}^{\min}, P_{IL,i}^{\max})$  و قیمت پیشنهادی برای قطع بار را برای دوره خاص  $(C_{IL,i})$  به بازار ارائه می دهد.

- بهره بردار مستقل سیستم پس از اجرای پخش بار بهینه، مقدار انرژی تولیدی توسط هر ژنراتور  $(P_{g,i})$ ، مقدار باری که هر یک از مصرف کنندگان باید قطع کنند  $(P_{IL,i})$  و LMP هر یک از شین ها را مشخص می سازد.

با مشخص شدن LMPها بر روی شین ها، تمامی مصرف کنندگان، انرژی را در LMP شین مربوط به بارشان خریداری کرده و همه تولیدکنندگان نیز در LMP شین مربوط به ژنراتور خود، انرژی را به فروش می رسانند. هنگامی که قیمت های حاشیه ای بالا هستند، شرکت های توزیع ممکن است از تولیدهای پراکنده یا بارهای قابل قطع خود استفاده کنند. در زمان بالا بودن LMPها، برای ایجاد انگیزه کافی برای قطع بار در مشتریان، بارهای قطع شده، با توجه به LMP روی شین مربوط به آنها، جبران می شوند. شرکت توزیع برای بهینه سازی راهکار خود، نیاز به اطلاعات هزینه به شرح زیر دارد.

هزینه تولید هر یک از ژنراتورها که به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۱۰]:

$$C(P_{g,i}) = C_{g,i} \cdot P_{g,i}, \quad i \in Ng \quad (1)$$

هزینه قطع هر یک از بارها:

$$C(P_{IL,i}) = C_{IL,i} \cdot P_{IL,i}, \quad i \in Nil \quad (2)$$

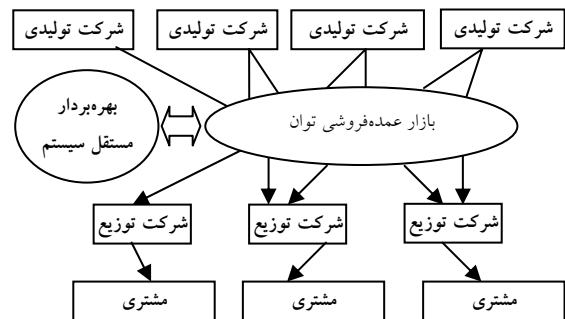
تابع هزینه تولید هر یک از DGها که به صورت تابع درجه دوم زیر در نظر گرفته می شود:

$$C(P_{dg,i}) = a_{dg,i} \cdot P_{dg,i}^2 + b_{dg,i} \cdot P_{dg,i}, \quad i \in Ndg \quad (3)$$

ملحوظ کردن عدم قطعیت ها ارائه می شود. در بخش ۴، الگوریتم پیشنهادی برای حل مدل به دست آمده، با ملحوظ کردن نامعینی ها ارائه می شود. در بخش ۵، الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه نمونه ۸ شینه مورد آزمایش و نتایج تحلیل شده و در بخش ۶ جمع بندی مقاله ارائه شده است.

## ۲- رویه ارائه پیشنهاد در بازار برق

در مدل رقابت عمده فروشی نشان داده شده در شکل (۱)، شرکت های تولیدی و توزیع، در بازار رقابتی شرکت کرده و شرکت های توزیع، انرژی مورد نیاز برای مصرف کنندگان انحصاری خود را به طور مستقیم از تولیدکنندگان خریداری می کنند. در این مدل رقابتی، بهره بردار مستقل سیستم، از نوعی پخش بار اقتصادی با قید ایمنی شبکه، برای بهره برداری از سیستم استفاده می کند. رویه ارائه پیشنهاد برای دوره بهره برداری خاص، به صورت زیر است.



شکل ۱ ساختار سیستم قدرت در بازار رقابت عمده فروشی

- هر تولیدکننده، حداقل و حداکثر توان قابل تحویل به شبکه  $(P_{g,i}^{\min}, P_{g,i}^{\max})$  و قیمت پیشنهادی برای فروش یک مگاوات توان الکتریکی را برای دوره خاص  $(C_{g,i})$ ، به بازار ارائه می دهد.

هر یک از مصرف‌کنندگان را نشان می‌دهد. رابطه (۴-۵)، قید تعادل بار در شین‌های سیستم و قید (۴-۶) که بر اساس معادلات پخش بار dc نوشته شده است، بدان معنا است که مجموع ولتاژ شاخه‌های هر حلقه مستقل، باید برابر صفر باشد. همچنین بر طبق تعریف LMP، قیمت حاشیه‌ای هر شین، ضریب لاگرانژی قید (۴-۵) متناظر با همان شین است.

### ۳-۲- مدل سازی سود شرکت توزیع

در این مقاله، فرض بر آن است که هر شرکت توزیع، DGهای خود را در بازار برق روز - پیش ارائه نمی‌کند و فقط بر اساس قیمت‌های حاشیه‌ای تخمین زده شده، آنها را برنامه‌ریزی می‌کند. همچنین فرض می‌شود که هر شرکت توزیع از نرخ خرده‌فروشی ثابت  $(\lambda_i)$ ، برای فروش انرژی به مشتریان خود استفاده می‌کند. بنابراین، سود هر شرکت توزیع، برابر است با اختلاف بین «درآمد حاصل از فروش انرژی با قیمت ثابت به مشتریان» و «هزینه خرید انرژی از بازار روز - پیش و هزینه تولید انرژی، توسط DGهای متعلق به همان شرکت توزیع».

هزینه خرید انرژی از بازار برای هر شرکت توزیع با توجه به قیمت‌های حاشیه‌ای محلی شین‌ها برابر است با:

$$C(P_{d,i}) = \lambda_i \cdot P_{d,i}, \quad i \in Sn(m) \quad (5)$$

که  $P_{d,i}$  انرژی خریداری شده از بازار برای شین  $i$  توسط شرکت توزیع بوده و برابر است با:

$$P_{d,i} = P'_{d,i} - P_{IL,i} - P_{dg,i} \quad (6)$$

بنابراین بر اساس روابط (۳، ۵ و ۶) سود شرکت توزیع در زیر مسأله بالایی به صورت زیر نوشته می‌شود:

### ۳- مدل تأمین انرژی شرکت توزیع بدون ملحوظ کردن عدم قطعیت‌ها

#### ۳-۱ مدل تسویه بازار

همانگونه که در مقدمه اشاره شد، مدل تأمین انرژی شرکت توزیع، نوعی مسأله بهینه‌سازی چندهدفه دوسطحی است. در زیر مسأله پایینی از دیدگاه بهره‌بردار مستقل سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته و با استفاده از نوعی مدل پخش بار اقتصادی با قيود ایمنی شبکه، بازار را تسویه می‌کند [۱۰]. هدف بهره‌بردار مستقل سیستم در این سطح، حداقل کردن هزینه‌های تولید و هزینه‌های جبران بارهای قطع شده، ضمن ارضای قيود بهره‌برداری شبکه است (روابط (۴-۱) تا (۴-۶)):

$$\min \left( \sum_{i \in Ng} C_{g,i} \cdot P_{g,i} + \sum_{i \in Nil} C_{IL,i} \cdot P_{IL,i} \right) \quad (1-4)$$

Subject to:

$$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max}, \quad i \in Ng \quad (2-4)$$

$$-P_{ij}^{\max} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max}, \quad ij \in Nil \quad (3-4)$$

$$P_{IL,i}^{\min} \leq P_{IL,i} \leq P_{IL,i}^{\max}, \quad i \in Nil \quad (4-4)$$

$$(P'_{d,i} - P_{IL,i} - P_{dg,i}) - P_{g,i} + \sum_{j \in n(i)} P_{ij} = 0, \quad i \in n \quad (5-4)$$

$$\sum_{ij \in Nil(l)} P_{ij} \cdot x_{ij} = 0, \quad l \in Nilp \quad (6-4)$$

جمله اول تابع هدف، در رابطه (۴-۱)، هزینه‌های تولید و جمله دوم، هزینه‌های جبران بارهای قابل قطع را نشان می‌دهد. همچنین قيود (۴-۲) تا (۴-۴) به ترتیب قيود ظرفیت تولید هر یک از ژنراتورها، حدود فلوی توان خطوط انتقال و حدود مقدار بار قابل قطع

(۷)

(۳-۸) (روابط (۱-۴) تا (۶-۴))

$$R_m = \sum_{i \in \text{Sh}(m)} [\lambda_i (P_{d,i} - P_{IL,i}) - C(P_{dg,i}) - \lambda_i (P_{d,i} - P_{IL,i} - P_{dg,i})]$$

$, m \in \text{ndco}$

متغیرهای تصمیم‌گیری در این مدل، مقادیر تولید DGها  $(P_{dg,i})$ ، مقدار قطع بار هر یک از مصرف‌کنندگان  $(P_{IL,i})$  و مقدار انرژی تولیدی هر یک از ژنراتورها  $(P_{g,i})$  است. راهکار تأمین انرژی شرکت توزیع با حل این مسئله بهینه‌سازی، ضمن ملحوظ کردن عدم قطعیت‌ها مشخص خواهد شد.

### ۳-۳- مدل تأمین انرژی شرکت توزیع

هدف شرکت توزیع، حداکثر کردن سود خود است. اما در این راستا، راهکارهای خرید انرژی دیگر شرکت‌های توزیع از بازار و قیود مربوط به DG آنها نیز در هدف مورد نظر، مؤثر است. ضمن اینکه مسئله ارضای قیود بهره‌برداری شبکه و مسئله تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم نیز باید در این مدل مدنظر قرار گیرد. این بدان معنا است که شرکت توزیع در زیرمسئله بالایی، باید راهکارهای بهینه دیگر شرکت‌ها را نیز در نظر گرفته و به بیان دیگر، باید همراستا با حداکثر کردن سود خود، سود دیگر شرکت‌ها را نیز حداکثر کند، تا بتواند به راهکاری بهینه و منطقی برای خود نایل شود. این موجب می‌شود که مدل تأمین انرژی شرکت توزیع در زیرمسئله بالایی، به نوعی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل شود که در آن سود تمامی شرکت‌های توزیع به طور همزمان حداکثر می‌شود. از طرفی مسئله تسویه بازار به عنوان زیرمسئله پایینی و به منظور ارضای قیود بهره‌برداری و حفظ ایمنی شبکه، در مدل فوق وارد می‌شود. با توجه به آنچه گفته شد، مدل مورد نظر به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \max R \\ \max R_i \\ : \\ : \\ \max R_{ndco} \end{cases} \quad (1-8)$$

Subject to:

(۲-۸)

$$P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{\max}, \quad i \in \text{Ndg}(m), m \in \text{ndco}$$

### ۴- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی برای حل مدل ارائه شده در بخش (۳)، مشتمل بر دو بخش است. در بخش اول، مدل مورد نظر بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها حل شده و در بخش دوم نامعینی‌ها در مسئله ملحوظ می‌شود.

#### ۴-۱- حل مدل تأمین انرژی بدون ملحوظ کردن

##### عدم قطعیت‌ها

در این بخش، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه دو سطحی فوق را به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۱</sup> مرسوم، تبدیل کرده و سپس مدل حاصل، با استفاده از نرم‌افزارهای موجود حل می‌شود. به منظور استفاده از این راهکار، از روش متمم غیرخطی<sup>۲</sup> (NCM) [۱۱] که در ضمیمه (الف) تشریح شده، استفاده شده و با به‌کارگیری شرایط بهینگی<sup>۳</sup> KKT و روش متمم غیرخطی، مدل ارائه شده به نوعی مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل می‌شود.

#### ۴-۱-۱- مدل تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم

##### به صورت مجموعه معادلات غیرخطی

مدل تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم (روابط (۱-۴) تا (۶-۴)) را در حالت کلی به صورت زیر می‌توان نوشت.

1. Nonlinear Programming
2. Nonlinear Complementarity Method
3. Karush-Kahn-Tucker

$$\begin{array}{ll}
 A.x = b & (2-11) \\
 \varphi(\mu_{xl}, x - xl) = 0 & (3-11) \\
 \varphi(\mu_{xu}, xu - x) = 0 & (4-11)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ll}
 \min Cost(x) & (1-9) \\
 S.t. & \\
 A.x = b & (2-9) \\
 xl \leq x \leq xu & (3-9)
 \end{array}$$

هر یک از معادلات (1-11) تا (4-11)، به صورت تفکیک شده، در ضمیمه (ب) تشریح شده است.

#### 4-1-2 تشکیل مدل بهینه‌سازی معمولی

با جایگذاری روابط (1-11) تا (4-11) در رابطه (3-8)، مدل تأمین انرژی شرکت توزیع که نوعی مسأله بهینه‌سازی چندهدفه دو سطحی می‌باشد، به یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه معمولی، با قیود غیرخطی تبدیل می‌شود و داریم:

$$\begin{cases}
 \max R_1 \\
 \max R_2 \\
 : \\
 : \\
 \max R_{ndco}
 \end{cases}
 \quad (1-12)$$

Subject to:

$$\begin{array}{ll}
 P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{\max}, & i \in Ndg(m), m \in ndco \\
 \text{روابط (1-11) تا (4-11)} & (3-12)
 \end{array}
 \quad (2-12)$$

برای تبدیل یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه به یک‌هدفه، راهکارهای مختلفی وجود دارد. راهکارهای ارائه شده، با توجه به میزان مطلوبیت یا ارجحیت اهداف موجود در مسأله چندهدفه از نظر تصمیم‌گیرنده<sup>1</sup>، با یکدیگر تفاوت دارند. در مدل ارائه شده در این مقاله، به دلیل آن‌که شرکت توزیع به دنبال یافتن راهکاری منطقی و بهینه برای خود است، اهداف

$x$  نشان‌دهنده تمامی متغیرها در روابط (1-4) تا (6-4) و شامل  $P_{ij}$  و  $P_{L,i}$ ،  $P_{g,i}$  است.  $xu, xl$  حدود بالا و پایین این متغیرها است.  $A.x = b$  نشان‌دهنده تمامی قیود مساوی و  $Cost(x)$  بیان‌کننده تابع هدف در رابطه (1-4) در مدل تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم است. با اعمال شرایط KKT به روابط (1-9) تا (3-9) داریم:

$$\begin{array}{ll}
 \nabla L_x = 0 & (1-10) \\
 A.x = b & (2-10) \\
 \mu_{xl} \geq 0, x - xl \geq 0, \mu_{xl} \cdot (x - xl) = 0 & (3-10) \\
 \mu_{xu} \geq 0, xu - x \geq 0, \mu_{xu} \cdot (xu - x) = 0 & (4-10)
 \end{array}$$

در معادلات (1-10) تا (4-10)،  $L$  تابع لاگرانژ روابط (1-9) تا (3-9) بوده و  $\nabla L_x$  مشتقات جزئی تابع لاگرانژ نسبت به متغیرهای بیان شده است.  $\mu_{xl}, \mu_{xu}$  متغیرهای دوگان متناظر با  $xl, xu$  را نشان می‌دهد.

شرایط (3-10) و (4-10)، نشان‌دهنده شرایط متمم بوده که می‌توانند با استفاده از NCM به معادلات متمم غیرخطی تبدیل شوند. بنابراین با اعمال شرایط KKT (مطابق روابط (1-10) تا (4-10)) و با استفاده از شرایط NCM، مدل تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم (روابط (1-4) تا (6-4))، به مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی تبدیل می‌شود.

$$\nabla L_x = 0 \quad (1-11)$$

روابط (۱-۱۳) تا (۳-۱۳) مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی با یک تابع هدف و قیود غیرخطی است که با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری موجود قابل حل است.

#### ۴-۲- ملحوظ کردن عدم قطعیت‌ها

در بخش ۴-۱، به منظور ارائه راهکار مناسب برای حل مدل تأمین انرژی، تمامی پارامترهای پیش‌بینی شده به صورت مقادیر معین و قطعی ملحوظ شده است. با وجود این، در سیستم قدرت واقعی، از دیدگاه شرکت توزیع، برخی پارامترها به سختی قابل پیش‌بینی هستند، به ویژه زمانی که شرکت‌کنندگان زیادی در بازار حاضر باشند. از این رو، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای زیر باید در مسأله ملحوظ شوند.

- قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان برای فروش انرژی الکتریکی ( $C_{g,i}$ ),

- قیمت پیشنهادی تمامی شرکت‌های توزیع برای قطع بارهای مصرف‌کنندگان ( $C_{IL,i}$ ), (زیرا در صورت انعطاف‌پذیر فرض کردن، این قیمت‌ها پس از تسویه بازار مشخص شده و بنابراین قبل از تسویه بازار، قیمت‌های پیشنهادی بارهای متعلق به شرکت توزیع مدنظر نیز نامعین هستند)،

- مقدار پیشنهاد بار دیگر مصرف‌کنندگان به بازار روز - پیش ( $P_{d,i}^0$ ), (مسأله از دیدگاه شرکت توزیع مطرح می‌شود، لذا مقدار بار پیشنهادی شرکت توزیع مدنظر، پارامتری معین است)

فرض بر آن است که این پارامترهای غیرقطعی را بر اساس اطلاعات گذشته می‌توان پیش‌بینی کرد. مقادیر حداقل و حداکثر و محدوده محتمل‌ترین مقادیر پارامترهای فوق، برای دوره و روز خاص، با استفاده از اطلاعات تاریخی قابل تعیین است. در این مقاله، از

مسأله برای او ارجحیت یکسانی دارند و بنابراین می‌توان از یکی از روشهای L-P متریک استفاده کرد [۱۲]. در این مجموعه روش‌ها، انحراف توابع هدف موجود در مدل بهینه‌سازی چندهدفه، نسبت به پاسخ ایدئال، حداقل می‌شود. اما وجود چنین پاسخی، به علت تعارضهای موجود در بین اهداف مختلف، غیرمعمول است. بنابراین مسأله بهینه‌سازی چندهدفه را برای هر یک از اهداف آن به صورت مجزا اجرا می‌کنیم تا مقادیر بهینه مجزای<sup>۱</sup> هر یک از آنها به دست آید. سپس به جای حداکثر کردن چند تابع به صورت همزمان، مجموع اختلاف‌های این توابع با مقدار حداکثر مجزای آنها، حداقل می‌شود. اما لزوماً تمامی توابع، به یک اندازه به مقدار بهینه مجزای خود نزدیک نمی‌شوند. با به کارگیری این روند، تمامی توابع به سمت مقدار حداکثر خود میل کرده و بنابراین می‌توان به جای مسأله بهینه‌سازی چند هدفه، یک مسأله بهینه‌سازی معمولی را حل کرد. زیرا روش L-P متریک، می‌تواند تحت تأثیر مقیاس کمی اهداف موجود واقع شود. به منظور برطرف کردن این مشکل، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

(۱-۱۳)

$$\min \left[ \left( \frac{R_1^{\max} - R_1}{R_1^{\max} - R_1^{\min}} \right) + \dots + \left( \frac{R_{ndco}^{\max} - R_{ndco}}{R_{ndco}^{\max} - R_{ndco}^{\min}} \right) \right]$$

Subject to:

(۲-۱۳)

$$P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{\max}, \quad i \in Ndg(m), m \in ndco$$

روابط (۱-۱۱) تا (۴-۱۱) (۳-۱۳)

1. Individual Optimum values

مصرف‌کنندگان، مقدار تولید هر یک از DGها، فلوی توان هر یک از خطوط و LMP هر یک از شین‌ها مشخص و ذخیره‌سازی می‌شوند. همان‌طور که گفته شد، این مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی، با نرم‌افزارهای موجود قابل حل است.

۴. مراحل ۲ و ۳ به دفعات تکرار می‌شوند.

۵. پس از حل مسأله بهینه‌سازی برای تعداد کافی نمونه‌ها (نقاط بهره‌برداری)، برای هر یک از متغیرهای خروجی نیز نمونه‌هایی کافی در دست خواهیم داشت. سپس برای هر یک از این خروجی‌ها، یک تابع چگالی احتمال تخمین زده شده و تحلیل‌های لازم بر روی آنها انجام می‌شود.

#### ۴-۳- خروجی‌های مطلوب

در این مقاله، هدف، تعیین محتمل‌ترین راهکارهای بهینه برای هر یک از شرکت‌های توزیع برای دوره زمانی خاص در روز بعدی، با ملحوظ کردن بارهای قابل قطع و DGها است. همان‌طور که گفته شد، معیار تصمیم‌گیری هر شرکت توزیع، محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود آن شرکت است. با اعمال روند ارائه شده در این بخش، توابع چگالی احتمال سودهای شرکت‌های توزیع به دست می‌آید. با تحلیل این توابع حول محتمل‌ترین مقادیر آنها، محتمل‌ترین مقادیر قطع بار و تولیدهای پراکنده هر یک از شرکت‌های توزیع، با ملحوظ کردن عدم قطعیت‌ها، برای هر دوره زمانی خاص به دست آمده و راهکار خرید انرژی شرکت توزیع از بازار برق روز - پیش نیز به دنبال آن مشخص خواهد شد. بنابراین خروجی‌های موردنظر در این مدل، مقادیر حداکثر سود شرکت‌های توزیع، قطع بار و DGهای هر یک از شرکت‌های توزیع خواهد بود.

تابع چگالی احتمال نرمال برای نمایش هر یک از پارامترهای نامعین استفاده کرده و میانگین<sup>۱</sup> و انحراف معیار<sup>۲</sup> هر یک از پارامترها را بر اساس اطلاعات تاریخی موجود تعیین می‌کنیم.

بنابراین با ملحوظ کردن پارامترهای نامعین به شکل توابع چگالی احتمال نرمال در روابط (۱-۱۳) تا (۳-۱۳) و با به‌کارگیری روش مونت کارلو، شرکت توزیع می‌تواند از بین راهکارهای بهینه موجود، محتمل‌ترین آنها را برای دوره خاص در روز بعدی به‌کار گیرد. محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود، می‌تواند به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری شرکت توزیع ملحوظ شده و بر اساس آن، برای بارهای قابل قطع و مقدار تولید DGهای خود، برنامه‌ریزی‌های لازم را انجام دهد.

#### ۴-۲-۱- مراحل اجرای روش مونت کارلو

در این مقاله از شبیه‌سازی مونت کارلو برای ساخت توابع چگالی احتمال خروجی‌های موردنظر استفاده می‌شود. رویه محاسبه توابع چگالی احتمال خروجی‌های مورد نظر به روش مونت کارلو، به‌قرار زیر است:

۱. برای هر یک از پارامترهای ورودی فوق که دارای عدم قطعیت باشند، تابع چگالی احتمال نرمال تعریف می‌شود.

۲. از توابع چگالی احتمال هر یک از ورودی‌ها، نمونه‌ای به‌طور تصادفی برداشت می‌شود.

۳. با اجرای مرحله قبل و با نمونه‌برداری از توابع چگالی احتمال، وضعیت شبکه و نقطه بهره‌برداری سیستم، مشخص می‌شود. روابط (۱-۱۳) تا (۳-۱۳) برای این وضعیت و نقطه بهره‌برداری خاص شبکه، حل می‌شود. خروجی‌های مسأله بهینه‌سازی، شامل توان تولیدی هر یک از ژنراتورها، مقدار قطع بار هر یک از

1. Mean

2. Standard Deviation



### ۵- نتایج عددی

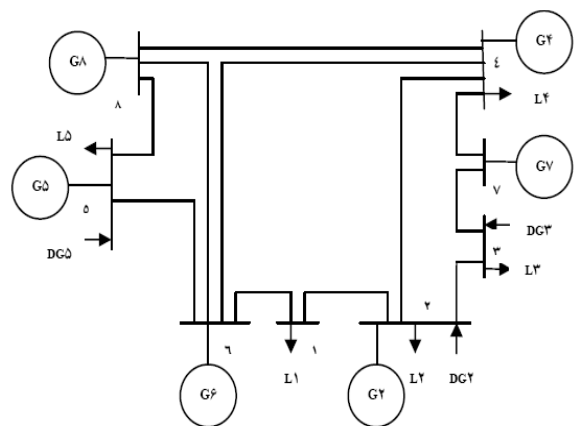
یک سیستم ۸ شینه نمونه‌ای که در شکل (۲) نشان داده شده، برای تشریح مدل پیشنهادی و الگوریتم حل آن، به کار رفته است. این سیستم، شامل ۳ شرکت توزیع است که با هم رقابت می‌کنند. اطلاعات مربوط به شرکت‌های توزیع، شرکت‌های تولیدی، بارها و خطوط انتقال در جداول (۱) تا (۴) آورده شده است. همچنین در این مطالعه، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- مسأله از دید شرکت توزیع ۱ بررسی می‌شود.
- حداکثر مقدار قطع بار، یک‌دهم پیک آن بار است.
- نرخ خرده‌فروشی شرکت‌های توزیع برای فروش انرژی به مشتریان برابر  $\lambda_c = 80 \text{ \$/MWh}$  است.
- فرض بر آن است که مطالعه در ساعت پیک بارها انجام می‌شود.
- همه DGها با مشخصات یکسان (به شرح زیر) فرض شده‌اند:

$$a_{dg} = 0.09 \text{ \$/MWh} ,$$

$$b_{dg} = 38 \text{ \$/MWh} ,$$

$$P_{dg}^{\min} = 0 \text{ MW} , \quad P_{dg}^{\max} = 8 \text{ MW}$$



شکل ۲ دیاگرام تک خطی سیستم ۸ شینه

جدول ۱ اطلاعات شرکت‌های توزیع

Disco	Load	DG
Disco۱	L۱, L۲	DG۱
Disco۲	L۳, L۴	DG۳
Disco۳	L۵	DG۵

جدول ۲ اطلاعات تولید شبکه ۸ شینه

شماره ژنراتور	نام	شماره شین	حداقل تولید (MW)	حداکثر تولید (MW)	قیمت پیشنهادی تولید (\$/MWh)
۱	G2	۲	۰	۴۰	$N \sim (52, 2)^*$
۲	G4	۴	۰	۵۸	$N \sim (45, 1/6)$
۳	G5	۵	۰	۴۰	$N \sim (24, 2/25)$
۴	G6	۶	۰	۵۰	$N \sim (25, 1/2)$
۵	G7	۷	۰	۲۴	$N \sim (38, 2/5)$
۶	G8	۸	۰	۶۰	$N \sim (23/5, 1)$

\*توزیع نرمال با میانگین ۵۲ و انحراف معیار ۲

#### حالت ۱- بدون در نظر گرفتن محدودیت توان خطوط

در این حالت، قیود حدود توان خطوط انتقال، یعنی قید (۳-۴) در مسأله تسویه بازار بهره‌بردار مستقیم سیستم، ملحوظ نشده و با به‌کارگیری الگوریتم ارائه شده در بخش ۴، توابع چگالی احتمال حداکثر سود، تولید DGها و بارهای قابل قطع هر یک از شرکت‌های توزیع، مطابق شکل‌های (۳-الف) تا (۳-ذ) به دست آمده است. در این حالت به دلیل حذف قید حدود توان خطوط انتقال، تراکم برای هیچ یک از خطوط ایجاد نمی‌شود.

جدول ۳ اطلاعات بارهای شبکه ۸ شینه

شماره بار	نام	شماره شین	بار (MW)	بید بارهای قابل قطع (\$/MWh)
۱	G۲	۱	۳۰	$N \sim (60, 2)$
۲	G۴	۲	۲۲	$N \sim (69, 1/5)$
۳	G۵	۳	$N \sim (30, 2/5)$	$N \sim (75, 2/5)$
۴	G۶	۴	$N \sim (30, 2)$	$N \sim (80/5, 2/25)$
۵	G۷	۵	$N \sim (30, 1/75)$	$N \sim (85, 3)$

جدول ۴ پارامترهای خطوط انتقال شبکه ۸ شینه

شماره خط	شین ابتدای خط	شین انتهای خط	راکتانس خط (pu)	ظرفیت (MW)
۱	۱	۲	۰/۰۱۱	۲۰
۲	۳	۲	۰/۰۱۸	۳۰
۳	۲	۴	۰/۰۰۳	۲۰
۴	۷	۳	۰/۰۲۲	۴۰
۵	۷	۴	۰/۰۱۵	۳۸
۶	۶	۴	۰/۰۰۳	۳۰
۷	۴	۸	۰/۰۰۳	۴۰
۸	۶	۸	۰/۰۰۶۵	۴۰
۹	۸	۵	۰/۰۰۲	۲۰
۱۰	۵	۶	۰/۰۰۲۵	۳۸
۱۱	۶	۱	۰/۰۰۳	۱۴/۲

۲. با تحلیل توابع چگالی احتمال حداکثر سودها حول محتمل‌ترین مقادیر آنها و با توجه به توابع چگالی احتمال (۳-ت) تا (۳-ح)، محتمل‌ترین مقادیر بارهای قابل قطع برای دستیابی به محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود در ساعت موردنظر برای شرکت توزیع ۱ برابر  $P_{IL,1} = P_{IL,2} = 0$ ، برای شرکت توزیع ۲ برابر  $P_{IL,3} = P_{IL,4} = 0$  و برای شرکت توزیع ۳ برابر  $P_{IL,5} = 0$  خواهد بود. در این حالت به دلیل پایین بودن نسبی LMPها نسبت به قیمت‌های پیشنهادی قطع بارها با توجه به جدول (۳)، هیچ یک از شرکت‌های توزیع تمایلی به قطع بارهای خود ندارند.

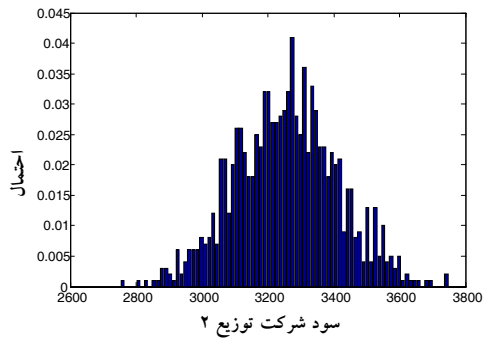
۳. با توجه به توابع چگالی احتمال (۳-خ) تا (۳-ذ)، محتمل‌ترین مقادیر تولید DGها برای دستیابی به محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود برای شرکت توزیع ۱ برابر  $P_{dg,2} = 0 MW$ ، برای شرکت توزیع ۲ برابر  $P_{dg,3} = 0 MW$  و برای شرکت توزیع ۳ برابر  $P_{dg,5} = 0 MW$  است. این بدان معناست که در ساعت مورد بحث، به دلیل بالاتر بودن هزینه DGها نسبت به هزینه خرید انرژی از بازار روز - پیش، شرکت‌های توزیع، DGهای خود را به کار نمی‌گیرند.

۴. به دلیل آن‌که مسأله از دیدگاه شرکت توزیع ۱ بررسی شده، مقدار بار پیشنهادی از طرف این شرکت معلوم بوده و بنابراین می‌توان مقدار خرید انرژی این شرکت توزیع از بازار روز - پیش را برای دستیابی به محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود تعیین کرد؛ درحالی‌که این کار برای شرکت‌های توزیع ۲ و ۳ به دلیل نامعین بودن این مقدار، از این دیدگاه میسر نیست. با اجرای مسأله از دیدگاه دو شرکت دیگر با روند مشابه، می‌توان به راهکار تأمین انرژی آن دو نیز دست یافت.

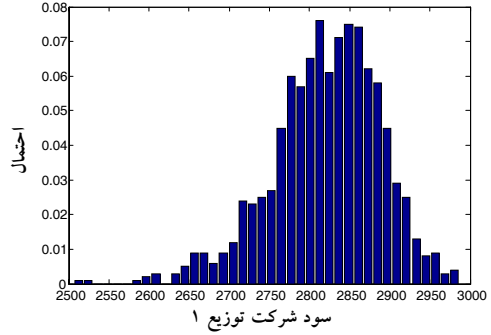
۵. مقدار خرید انرژی شرکت ۲ از بازار روز - پیش، برابر ۵۲ مگاوات خواهد بود.

بنابراین شبکه به صورت سیستمی کاملاً یکپارچه عمل کرده و قیمت‌های حاشیه‌ای محلی برای تمامی شین‌ها یکسان بوده و برابر با قیمت پیشنهادی ژنراتور مرزی است. با توجه به نامعینی‌های ملحوظ شده در مسأله، LMPهای به دست آمده برای شین‌ها، به صورت توابع چگالی احتمال نرمال یکسان بوده و برابر  $N \sim (25/7, 1/3)$  است. این بدان معناست که با ملحوظ کردن عدم قطعیت‌های یاد شده، محتمل‌ترین مقدار LMP تمامی شین‌ها برابر ۲۵/۷ دلار/مگاوات - ساعت است. با به کارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو بر طبق الگوریتم ارائه شده در بخش ۴، در این حالت نتایج زیر قابل حصول است:

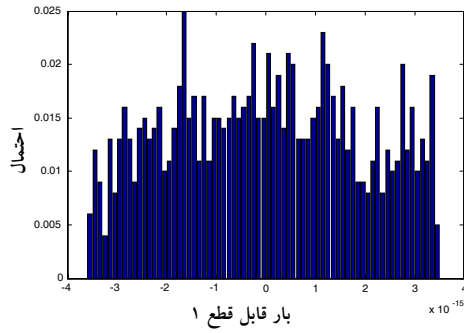
۱. با میانگین‌گیری از توابع چگالی احتمال به دست آمده در شکل‌های (۳-الف) تا (۳-پ)، محتمل‌ترین مقادیر سود شرکت‌های توزیع در ساعت موردنظر به ترتیب برابر ۲۸۲۰/۴، ۳۲۵۶/۳ و ۱۶۲۷/۶ دلار است.



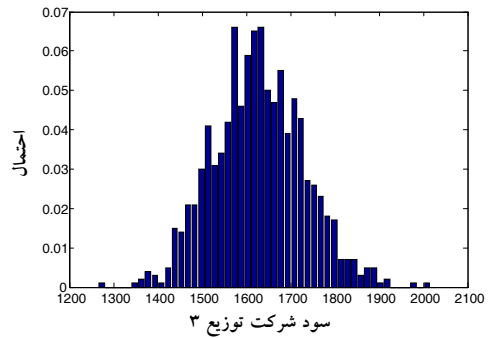
شکل (۳-ب) سود شرکت توزیع ۲



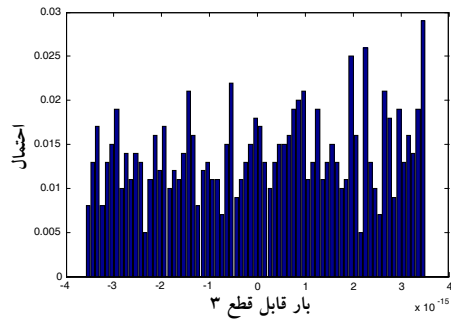
شکل (۳-الف) سود شرکت توزیع ۱



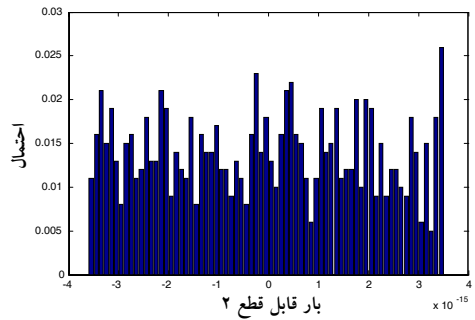
شکل (۳-ت) مقدار قطعی بار ۱



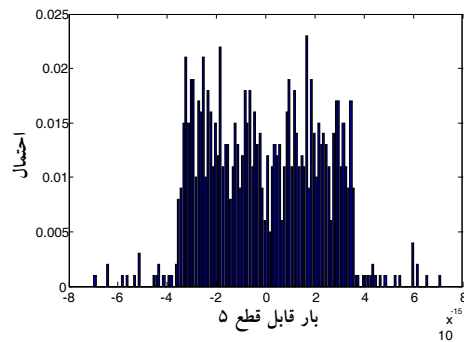
شکل (۳-پ) سود شرکت توزیع ۳



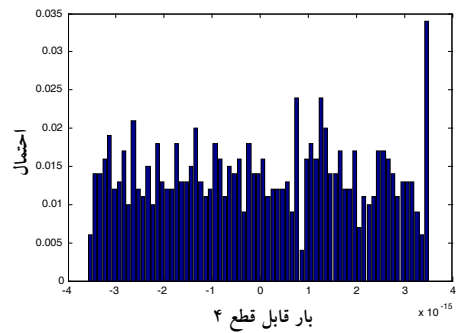
شکل (۳-ج) مقدار قطع بار ۳



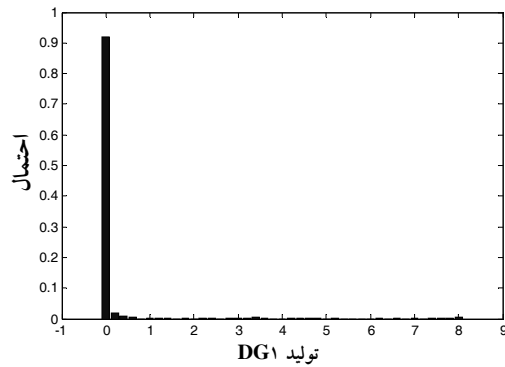
شکل (۳-ث) مقدار قطع بار ۲



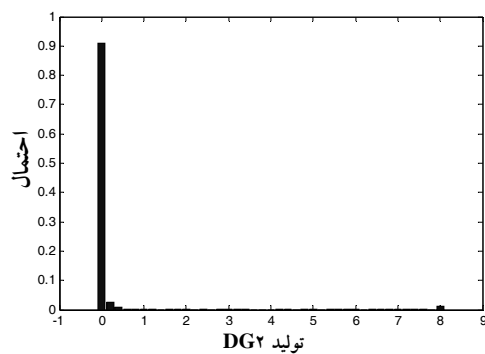
شکل (۳-ح) مقدار قطع بار ۵



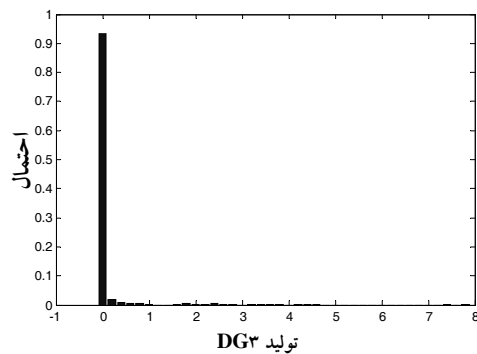
شکل (۳-چ) مقدار قطع بار ۴



شکل (۳-خ) مقدار تولید DG شرکت توزیع ۱



شکل (۳-د) مقدار تولید DG شرکت توزیع ۲



شکل (۳-ذ) مقدار تولید DG شرکت توزیع ۳

به دلیل ملحوظ کردن حدود خطوط انتقال، برخی از خطوط دچار تراکم شده و بنابراین قیمت‌های حاشیه‌ای محلی بر روی شین‌ها متفاوت بوده و چندین ژنراتور مرزی خواهیم داشت. میانگین قیمت‌های حاشیه‌ای محلی با توجه به توابع چگالی احتمال به‌دست آمده برای آنها، در جدول (۵) آورده شده است.

حالت ۲- با در نظر گرفتن حدود توان روی خطوط انتقال در این حالت با ملحوظ کردن قید (۴-۳) در مسأله تسویه بازار و با ملحوظ کردن عدم قطعیت‌ها، راهکار تأمین انرژی شرکت توزیع ۱ مشخص خواهد شد. توابع چگالی احتمال خروجی‌های مورد نظر در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-ذ) نشان داده شده است. در این حالت

راهکار تولید، به دلیل پایین بودن هزینه DGها نسبت به خرید انرژی از بازار روز - پیش، با توجه LMPهای مشخص شده بر روی شین‌ها مناسب تر است.

۵. سود شرکت توزیع ۳ در این حالت نسبت به حالت ۱، افزایش نسبی داشته است. با توجه به جدول (۵)، تراکم خطوط انتقال باعث کاهش نسبی LMP شین متعلق به این شرکت، یعنی شین ۳ شده و بنابراین افزایش نسبی سود این شرکت را در پی داشته است. در این حالت، به دلیل پایین بودن قیمت حاشیه‌ای محلی نسبت به قیمت پیشنهادی قطع بار، محتمل‌ترین مقدار قطع بار شرکت توزیع ۳، با توجه به تابع چگالی احتمال شکل (۴-ح)، برابر صفر خواهد بود. ضمن آن‌که به دلیل افزایش سود و کاهش LMP بر روی شین وابسته به این شرکت، نیازی به بهره‌برداری از DG وجود ندارد.

۶. از آن‌جا که مسأله از دیدگاه شرکت توزیع ۱ اجرا می‌شود، این شرکت می‌تواند راهکار خرید انرژی خود را معین کند. با توجه به جدول (۳)، مقدار پیشنهادی بار این شرکت برابر ۵۲ مگاوات می‌باشد. با توجه به محتمل‌ترین مقادیر قطع بار و DGها، برای دستیابی به محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود، میزان خرید انرژی این شرکت از بازار روز - پیش ۴۱ مگاوات، مقدار تولید پراکنده آن ۸ مگاوات و مقدار قطعی بار آن ۳ مگاوات خواهد بود. برای تعیین راهکار تأمین انرژی شرکت‌های توزیع ۲ و ۳، مسأله فوق از دیدگاه این دو شرکت نیز به صورت مشابه قابل اجراست.

جدول ۵ قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در حالت (۲)

	شین ۱	$N \sim (62/56, 3/37)$
	شین ۲	$N \sim (53/15, 2/48)$
	شین ۳	$N \sim (47/72, 2/01)$
LMP (\$/MWh)	شین ۴	$N \sim (37/56, 1/28)$
	شین ۵	$N \sim (23/92, 1/54)$
	شین ۶	$N \sim (22/64, 1/55)$
	شین ۷	$N \sim (41/09, 1/51)$
	شین ۸	$N \sim (24/84, 1/4)$

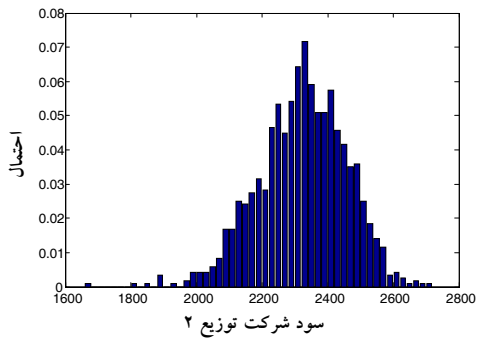
با به‌کارگیری الگوریتم ارائه شده، نتایج ذیل قابل حصول است:

۱. با میانگین‌گیری از توابع چگالی احتمال حداکثر سود شرکت‌های توزیع، در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-پ)، محتمل‌ترین مقادیر حداکثر سود برای شرکت‌های توزیع به ترتیب برابر ۱۱۷۵/۷، ۲۳۲۳/۱ و ۱۶۴۵/۲ دلار خواهد بود که در مقایسه با حالت ۱، سود شرکت توزیع ۳ افزایش یافته، در حالی که سود دو شرکت دیگر به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

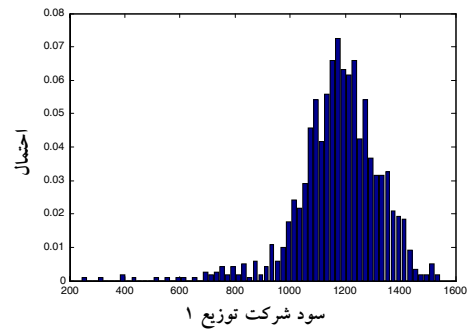
۲. تراکم ایجاد شده بر روی خطوط، موجب بالا رفتن قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در شین‌های وابسته به شرکت‌های ۱ و ۲، یعنی شین‌های ۱ تا ۴ (مطابق جدول (۵)) شده و سود این دو شرکت را به میزان قابل توجهی کاهش داده است.

۳. با توجه به تابع چگالی احتمال به دست آمده برای مقدار قطع بار ۱ در شکل (۴-ت)، در شین ۱ به دلیل بالا بودن نسبی LMP نسبت به قیمت پیشنهادی قطع بار ۱، محتمل‌ترین مقدار قطع این بار، ۳ مگاوات خواهد بود. مقدار قطع بار ۲ نیز، به دلیل پایین بودن LMP شین ۲ نسبت به قیمت پیشنهادی قطع این بار، با توجه به تابع چگالی احتمال به دست آمده در شکل (۴-ث) برابر صفر است. همچنین محتمل‌ترین مقدار تولید DG شرکت توزیع ۱، با توجه به تابع چگالی احتمال به دست آمده در شکل (۴-خ)، برابر ۸ مگاوات خواهد بود. در این حالت، با توجه به کاهش قابل توجه سود نسبت به حالت قبل، شرکت توزیع با به‌کارگیری همه امکانات، به دنبال افزایش دادن سود خود خواهد بود.

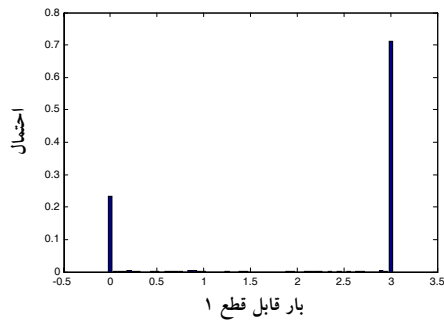
۴. در شین‌های ۳ و ۴ که متعلق به شرکت توزیع ۲ است، به دلیل پایین بودن نسبی LMPها نسبت به قیمت پیشنهادی قطع بارهای ۳ و ۴، مقدار قطع بار، با توجه به توابع چگالی احتمال (۴-ج) و (۴-چ) برابر صفر است؛ اما محتمل‌ترین مقدار تولید DG این شرکت برای دستیابی به محتمل‌ترین مقدار حداکثر سود، با توجه به تابع چگالی احتمال شکل (۴-د)، برابر ۸ مگاوات خواهد بود. این



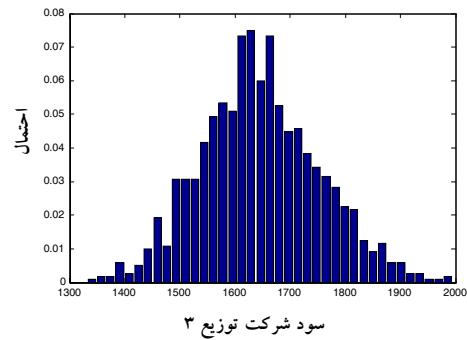
شکل (ب-۴) سود شرکت توزیع ۲



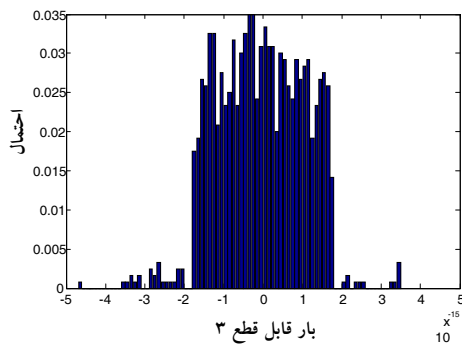
شکل (الف-۴) سود شرکت توزیع ۱



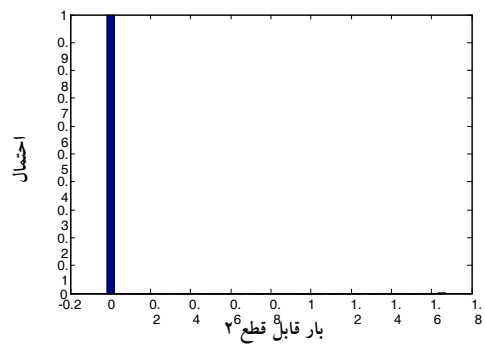
شکل (ت-۴) مقدار قطع بار ۱



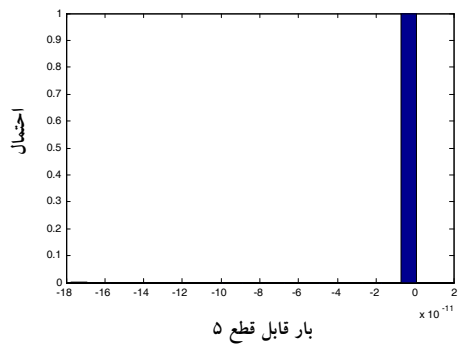
شکل (پ-۴) سود شرکت توزیع ۳



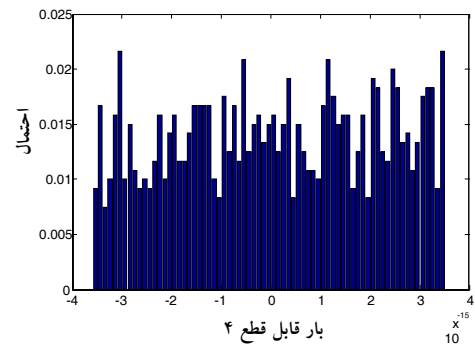
شکل (ج-۴) مقدار قطع بار ۳



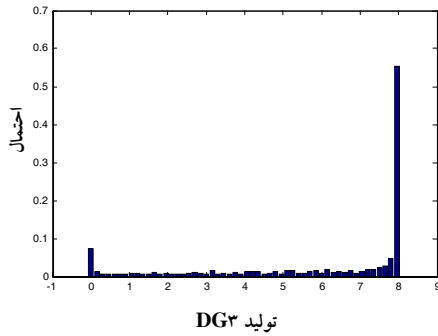
شکل (ث-۴) مقدار قطع بار ۲



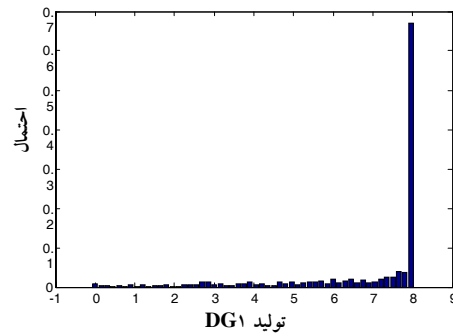
شکل (ح-۴) مقدار قطع بار ۵



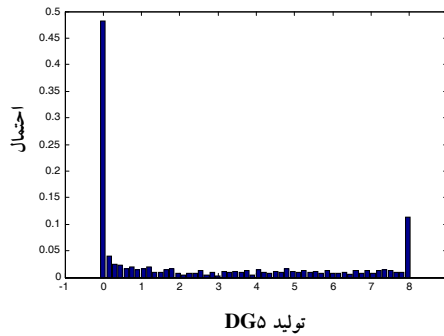
شکل (چ-۴) مقدار قطع بار ۴



شکل (۴-د) مقدار تولید DG شرکت توزیع ۲



شکل (۴-خ) مقدار تولید DG شرکت توزیع ۱



شکل (۴-ذ) مقدار تولید DG شرکت توزیع ۳

تابع هدف در این مدل، تعیین محتمل ترین مقدار حداکثر سود هر شرکت است که با توجه به توابع چگالی احتمال به دست آمده، تعیین می شود. بدین ترتیب، محتمل ترین مقادیر قطع بار و تولید DG های هر شرکت توزیع، در هر ساعت خاص مشخص شده و بنابراین مقدار خرید انرژی شرکت توزیع از بازار روز - پیش نیز معین خواهد شد. الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم ۸ شینه نمونه آزمایش شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است.

در این مقاله قید نرخ افزایش یا کاهش<sup>۱</sup> تولید ژنراتورها در مسأله تسویه بازار بهره بردار مستقل سیستم وارد نشده و می تواند به عنوان موضوعی برای تحقیق آینده در نظر گرفته شود.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله نوعی راهکار تأمین انرژی برای شرکت توزیع، با ملحوظ کردن بارهای قابل قطع، DG ها و نامعینی های پارامترها ارائه شده است. در ابتدا راهکار تأمین انرژی شرکت توزیع با معیار حداکثر سود هر شرکت، بدون ملحوظ کردن نامعینی ها، به صورت نوعی مسأله بهینه سازی چندهدفه دوسطحی مدل سازی شده و پس از تبدیل به نوعی مسأله برنامه ریزی غیرخطی مرسوم، با استفاده از نرم افزارهای موجود حل می شود. سپس نامعینی های پارامترها با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو در مسأله وارد شده و محتمل ترین راهکار بهینه تأمین انرژی شرکت توزیع مشخص می شود.

1. Ramp Rate (RR)

## ۷- فهرست علائم و اختصارها

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

NI	مجموعه تمامی شاخه‌ها
NI(l)	مجموعه تمامی شاخه‌ها در حلقه مستقل l
Ndco	مجموعه تمامی شرکت‌های توزیع
Sn(m)	مجموعه تمامی شین‌های شرکت توزیع m
Ndg	مجموعه تمامی تولیدهای پراکنده <sup>۱</sup> (DG)
Nil	مجموعه تمامی بارهای قابل قطع <sup>۲</sup> (IL)
Nlp	مجموعه تمامی حلقه‌های مستقل
n	مجموعه تمامی شین‌ها
n(i)	مجموعه تمامی شین‌های متصل به شین i
i, j	شماره شین‌ها
m	شماره شرکت‌های توزیع
Ng	مجموعه تمامی ژنراتورها

## حدود پارامترها

$P_{d,i}^0$	تقاضای بار شرکت توزیع
$P_{g,i}^{\min}, P_{g,i}^{\max}$	حدود توان تولیدی ژنراتور
$P_{dg,i}^{\min}, P_{dg,i}^{\max}$	حدود بالا و پایین تولید DG
$P_{ij}^{\min}, P_{ij}^{\max}$	حدود فلوی توان روی خط i-j
$P_{IL,i}^{\min}, P_{IL,i}^{\max}$	حدود بار قابل قطع هر یک از مصرف‌کنندگان
$x_{ij}$	راکتانس خط i-j
$C_{g,i}$	قیمت پیشنهادی توان تولیدی ژنراتور برای دوره خاص
$C_{IL,i}$	قیمت پیشنهادی هر یک از مصرف‌کنندگان برای قطع بار، برای دوره خاص

## نواع

$C(P_{IL,i})$	تابع هزینه قطع بار هر یک از مصرف‌کنندگان
$C(P_{dg,i})$	تابع هزینه تولید DG

1 Distributed Generation  
2. Interruptible Load

## پارامترها

$a_{dg,i}, b_{dg,i}$	ضرایب تابع هزینه تولید DG
$C(P_{g,i})$	تابع هزینه تولید ژنراتور
$P_{g,i}$	توان تولیدی مقرر شده برای ژنراتور
$P_{ij}$	فلوی توان روی خط i-j
$P_{IL,i}$	باری که هر یک از مصرف‌کنندگان باید قطع کند
$P_{d,i}$	بار برآورده شده برای شرکت توزیع
$P_{dg,i}$	مقدار توانی که برای DG تولید می‌کند
$\lambda_i$	قیمت حاشیه‌ای محلی <sup>۳</sup> (LMP) هر یک از شین‌ها

## ۸- منابع

- [1] D. Kirschen and G. Strbac, Fundamentals of Power System Economics, University of Manchester Institute of Science & Technology (UMIST), UK. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [2] C. W. Richter Jr. and G. B. Sheble, "A Profit Based Unit Commitment GA for the Competitive Environment", IEEE Trans. Power Sys., Vol. 15, No. pp. 715-721, May 2000.
- [3] P. Attaviriyanupap, H. Kita, E. Tanaka and J. Hasegawa, "A Fuzzy-Optimization Approach to Dynamic Economic Dispatch Considering Uncertainties." IEEE Trans Power Syst., Vol. 19, No. 3, pp.1299-1306, AUG. 2004.

3. Local Marginal Price



- Generation and Load Curtailment Options", IEEE Trans. on Power Syst, vol 20, pp 1718-1727. No. 4, Nov 2005.
- [9] H. Li, Y. Li, and Z. Li. "A Multiperiod Energy Acquisition Model for a Distribution Company With Distributed Generation and Interruptible Load", IEEE Trans. on Power Syst, vol. 22, pp 588-596 No. 2, MAY 2007.
- [10] M. O. Buygi, "Transmission Expansion Planning in Deregulated Power Systems", Ph.D. thesis, Electrical Power Systems Institute of Darmstadt University of Technology, 2004.
- [11] W. Xian, L. Yuzeng, and Zhang Shaohua, "Oligopolistic Equilibrium Analysis for Electricity Markets: A Nonlinear Complementarity Approach", IEEE Trans. on Power Syst, Vol 19, pp 1348-1355, No. 3, Aug 2004.
- [12] دکتر محمدجواد اصغرپور، تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، آبان ۱۳۷۷.
- ۹- ضمیمه‌ها**
- ضمیمه (الف) - روش متمم غیرخطی با استفاده از روش متمم غیرخطی (NCF)، برای شرط متمم به صورت  $a \geq 0, b \geq 0, ab = 0$  می‌توان تابع متمم غیرخطی<sup>۱</sup> را به صورت  $\varphi(a, b)$  تعریف کرد، به طوری که:
- [4] X. Yin, J. Zhao, T. K. Saha and Z. Y. Dong, "Developing GENCO's Strategic Bidding in an Electricity Market with Incomplete Information", IEEE, Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, pp 1-7, June 2007.
- [5] D. Berzal, J. I. de la Fuente and T. Gomez, "Building Generation Supply Curves under Uncertainty in Residual Demand Curves for the Day-Ahead Electricity Market", Paper accepted for presentation at PPT, IEEE Porto Power Tech Conference 10th -13th Sept, Porto, Portugal, 2001.
- [6] L. Zhang, J. Zhao, X. Han and L. Niu, "Day-ahead Generation Scheduling with Demand Response", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, pp. 1-4, 2005
- [7] M. Ilic, J. W. Black and M. Prica, "Distributed Electric Power Systems of the Future: Institutional and Technological Drivers for Near-Optimal Performance", ScienceDirect, Electric Power Systems Research 77, pp.1160-1177, 2007.
- [8] R. Palma-Behnke, J. Luis Cerda A., L. S. Vargas and A. Jofré, "A Distribution Company Energy Acquisition Market Model With Integration of Distributed

1. Nonlinear Complementary Function (NCF)

بسط رابطه  $\nabla L_x = 0$ :

$$\frac{\partial L}{\partial P_{g,i}} = C_{g,i} - \lambda_i - \mu_{xl,gi} + \mu_{xu,gi} = 0 \quad (3-ب)$$

$$\left. \begin{array}{l} , i \in Ng \\ \frac{\partial L}{\partial P_{IL,i}} = C_{IL,i} - \lambda_i - \mu_{xl,ILi} + \mu_{xu,ILi} = 0 \end{array} \right\} (4-ب)$$

$$\left. \begin{array}{l} , i \in Nil \\ \frac{\partial L}{\partial P_{ij}} = \lambda_i - \lambda_j + \gamma^T \left[ \frac{\partial (\sum P_{ij} \cdot x_{ij})}{\partial P_{ij}} \right] \\ - \mu_{xl,ij} + \mu_{xu,ij} = 0, \quad ij \in Nil \end{array} \right\} (5-ب)$$

بسط روابط  $\varphi(\mu_{xu}, xu - x) = 0$  و  $\varphi(\mu_{xl}, x - xl) = 0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{xl} + (x - x^{\min}) - \\ \sqrt{\mu_{xl}^2 + (x - x^{\min})^2} = 0 \end{array} \right. \quad (6-ب)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{xu} + (x^{\max} - x) - \\ \sqrt{\mu_{xu}^2 + (x^{\max} - x)^2} = 0 \end{array} \right. \quad (7-ب)$$

$$\varphi(a, b) = 0 \Leftrightarrow a \geq 0, b \geq 0, ab = 0 \quad (الف-1)$$

معادله (الف-1) بدین معنا است که اگر  $a$  و  $b$  معادله متمم غیرخطی  $\varphi(a, b)$  را ارضا کنند، شرط متمم  $a \geq 0, b \geq 0, ab = 0$  نیز خود به خود ارضا خواهد شد.

بدین ترتیب، روش جایگزینی شرط متمم با فقط یک معادله متمم غیرخطی، NCM نامیده می‌شود. اهمیت این روش، در تبدیل مسائل متمم (در اغلب موارد کاربرد شرایط KKT این شرط را به وجود می‌آورد)، به مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی است.

مسئله اصلی در کاربرد روش متمم غیرخطی، یافتن NCF مناسب است. در این مقاله از تابعی به شکل زیر استفاده شده است:

$$\varphi(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (الف-2)$$

ضمیمه (ب)- بسط معادلات تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم هر یک از معادلات (1-11) تا (11-11)، در مسئله تسویه بازار بهره‌بردار مستقل سیستم، به صورت زیر بسط داده می‌شوند.

بسط رابطه  $A \cdot x = b$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda_i, \forall i \in n) \rightarrow (P_{d,i} - P_{L,i} - P_{dg,i}) \\ - P_{g,i} + \sum_{j \in n(i)} P_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad (1-ب)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\gamma_l, \forall l \in Nilp) \rightarrow \sum_{ij \in Nil(l)} P_{ij} \cdot x_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad (2-ب)$$