

برنامه ریزی توسعه تولید یک شرکت برق در محیط تجدید ساختار با اعمال محدودیتهای قابلیت اطمینان

رضا قاضی
استاد گروه برق

حبیب رجیبی مشهدی
استادیار گروه برق

سعید رضا گلدانی
دانشجوی دکتری برق

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

r_ghazi@ferdowsi.um.ac.ir

h_mashhadi@ferdowsi.um.ac.ir

sa_go29@stu-mail.um.ac.ir

چکیده - مسئله برنامه ریزی توسعه تولید یکی از فعالیتهای مهم برنامه ریزی در شرکتهای برق منطقه ای است. با تجدید ساختار در بازارهای برق و انحصارزدایی از بخش تولید انرژی الکتریکی، امکان پیدایش تولیدکنندگان مستقل بوجود آمد. در این مقاله مسئله برنامه ریزی توسعه تولید از دیدگاه یک شرکت برق منطقه ای مورد بررسی قرار گرفته است و یک روش بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به پاسخ بهینه این مسئله در محیط تجدید ساختار ارائه شده است. تحت این شرایط مسئله بشکل جدیدی فرمولبندی گردیده، بگونه ای که ضمن حداقل سازی هزینه ها، کلیه محدودیتهای الکتریکی، محدودیتهای مربوط به قابلیت اطمینان سیستم و غیره بطور همزمان برآورده گردد.

کلید واژه - الگوریتم ژنتیک، برنامه ریزی توسعه تولید، تولیدکنندگان مستقل، قابلیت اطمینان در شبکه های برق

۱- مقدمه

در سالهای اخیر روشهای جدیدی بر پایه هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک (GA)^۳، شبیه سازی سرد شدن (SA)^۴ و کلونی مورچه ها (AC)^۵ برای حل مسئله GEP در محیط سنتی مطرح شده اند [۵-۲]. روشهای هوشمند بویژه الگوریتم ژنتیک که بر پایه پردازش جمعیتی از پاسخهای ممکن مسئله طراحی گردیده، از مزایای متعددی مانند انعطاف پذیری در مدلسازی قیود پیچیده، عدم نیاز به گرادیان و غیره برخوردارند.

در مرجع [۹] مسئله GEP در شرایط جدید ناشی از تجدید ساختار فرمولبندی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روشی برای دستیابی به پاسخ مسئله ارائه گردیده است. در این مرجع محدودیتهای مربوط به قابلیت اطمینان شبکه کلاً در برنامه ریزی در نظر گرفته نشده است. در مراجع [۱۰ و ۱۱] نیز مسئله GEP در محیط تجدید ساختار فرمولبندی شده و به کمک روش برنامه ریزی دینامیکی

مسئله برنامه ریزی توسعه واحدهای تولیدی (GEP)^۱ در یک افق بلند مدت یک مسئله مهم برنامه ریزی برای شرکتهای برق منطقه ای است. اینکه چه نوع واحدهایی و با چه ظرفیتی باید راه اندازی شوند، از اهداف اصلی مسئله GEP است. برای این منظور شرکتهای برق منطقه ای باید برنامه ریزی توسعه تولید را در یک افق بلند مدت با هدف حداقل سازی هزینه ها اجرا نمایند.

مسئله GEP یک مسئله برنامه ریزی غیرخطی با متغیرهای صحیح و محدودیتهای پیچیده است که تاکنون توسط روشهای مختلفی در محیط سنتی (با ساختار ادغام شده عمودی^۲) مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. به دلیل طبیعت مسئله GEP بررسی این مسئله توسط روشهای سنتی بسیار پیچیده بوده و در پاره ای موارد امکان عدم همگرایی و یا توقف در یک نقطه بهینه محلی زیاد است.

³ Genetic Algorithm

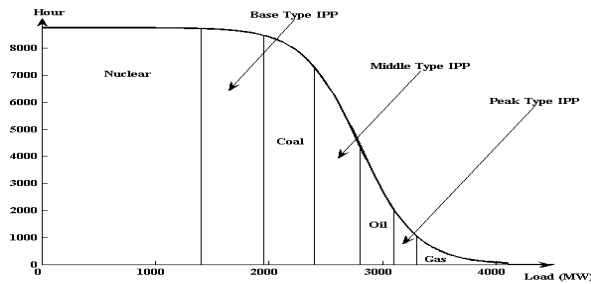
⁴ Simulated Annealing

⁵ Ant Colony

¹ Generation Expansion Planning

² Vertical Integrated

بکار رفته در آنها به چهار دسته نیروگاه با سوخت اتمی، زغال سنگی، مازوت و گازی تقسیم‌بندی شده‌اند. در شکل ۱ منحنی بار سالانه (LDC) در سال هدف نشان داده شده است. برای کاهش هزینه‌ها، واحدهای مختلف بر اساس مقدار هزینه متغیرشان از کمترین به بیشترین روی این منحنی مرتب می‌شوند [۹-۱۱].



شکل ۱: منحنی بار سالانه

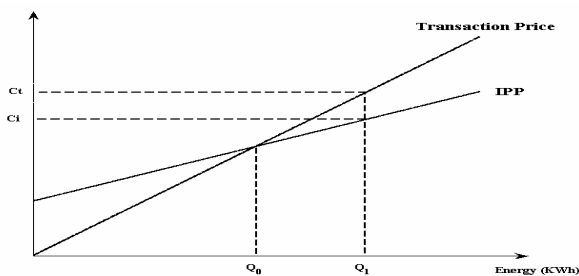
با وارد شدن تولیدکنندگان مستقل آنها عملاً بخشی از بار واحدهای تولیدی مشابه خود در شرکت برق منطقه‌ای را تولید خواهند نمود. چنانچه فرض نماییم هزینه‌های متغیر تولیدکنندگان مستقل از واحدهای مشابه آنها در شرکت برق منطقه‌ای کمتر است، آنگاه ترتیب قرار گرفتن واحدهای مختلف شرکت و تولیدکنندگان مستقل روی منحنی بار بگونه‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده است، خواهد بود.

در شکل ۲ منحنی هزینه‌های یک IPP (رابطه (۱))، به همراه منحنی مبلغ پرداخت شده به IPP بابت خرید انرژی با یک قیمت ثابت (رابطه (۲))، نشان داده شده است.

$$C_{ij} = a_j x_j + b_j Q_j \quad j = 1, \dots, 3 \quad (1)$$

$$C_{tj} = P_j Q_j \quad j = 1, \dots, 3 \quad (2)$$

که در آن داریم: a_j و b_j : هزینه ثابت و متغیر IPP j ام، x_j : ظرفیت IPP j ام، Q_j : انرژی سالانه خریداری شده از IPP j ام و P_j : قیمت خرید انرژی از IPP j ام



شکل ۲: تأثیر قیمت خرید انرژی روی سود یک IPP

پاسخ مسئله محاسبه گردیده است. در روش ارائه شده در این مراجع ابتدا پاسخهای مسئله GEP بدون در نظر گرفتن محدودیتهای قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود، سپس چنانچه این پاسخ، محدودیتهای مربوط به قابلیت اطمینان شبکه را برآورده ننماید، یک یا چند واحد گازی جهت برآورده شدن این محدودیتهای به شبکه اضافه می‌گردد. بدیهی است این روش برای در نظر گرفتن محدودیتهای قابلیت اطمینان چندان مناسب نیست و هیچ تضمینی برای دستیابی به نقطه بهینه سراسری مسئله وجود ندارد.

به منظور رفع این نقیصه در این مقاله هدف اعمال محدودیتهای قابلیت اطمینان شبکه در حین اجرای فرایند بهینه‌سازی است. در این راستا یک فرمولبندی جدید برای مسئله GEP در محیط تجدید ساختار ارائه گردیده است.

۲- برنامه‌ریزی توسعه تولید در شرایط جدید ناشی از تجدید ساختار

در سالهای اخیر تجدید ساختار در بازارهای برق شرایط و مکانیزم‌های معاملاتی جدیدی را در راستای افزایش رقابت در عرصه‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی پیش روی شرکت‌کنندگان در این بازار قرار داده است [۸-۶]. تحت شرایط جدید بوجود آمده در بازار برق و با رقابتی شدن بخش تولید، تعداد روزافزونی تولیدکننده مستقل (IPP)^۱ وارد بازار تولید برق شده و با شرکت‌های برق منطقه‌ای به رقابت می‌پردازند. در این شرایط شرکت‌های برق منطقه‌ای می‌توانند بر اساس هزینه کل شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و همچنین هزینه خرید انرژی از تولیدکنندگان مستقل، تصمیم‌گیری نمایند که آیا کلاً طرح‌های نیروگاهی جدید را خودشان بسازند و یا اینکه بخشی از انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده‌های خود را از سایر شرکت‌ها و یا تولیدکنندگان مستقل با عقد قراردادهای بلند مدت خریداری نمایند؟

در این مقاله مسئله GEP از دیدگاه یک شرکت برق منطقه‌ای که شامل انواع مختلفی از واحدهای تولیدی است، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل سه نوع تولیدکننده مستقل پایه، میانی و پیک نیز در نظر گرفته شده است. در این بررسی نیروگاهها از نظر نوع تکنولوژی

² Annual Load Duration Curve

¹ Independent Power Producer

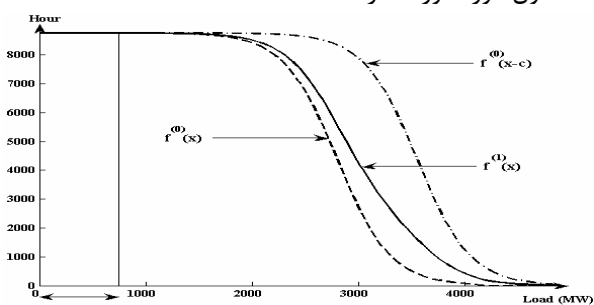
LOLP و EENS از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌گردد.

$$f^{(i)}(x) = (1 - q_i) f^{(i-1)}(x) + q_i f^{(i-1)}(x - C_i) \quad (۴)$$

$$LOLP = f^{(n)}(C_T) \quad (۵)$$

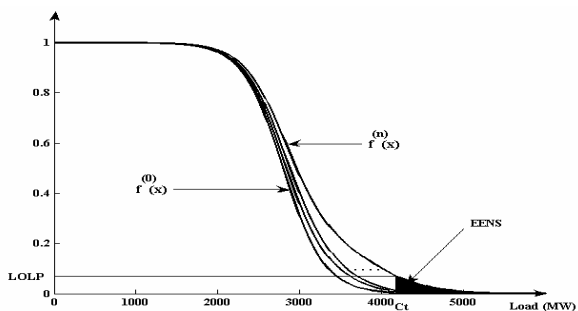
$$EENS = T \int_{C_T}^{C_T + P_D} f^{(n)}(x) dx \quad (۶)$$

که در آن داریم: P_D : حداکثر بار سیستم در سال هدف
 n : تعداد کل واحدهای شرکت و تولیدکنندگان مستقل
 C_T : کل ظرفیت واحدهای شرکت و تولیدکنندگان مستقل
 T : طول دوره مورد نظر



شکل ۳: منحنی بار معادل با اعمال احتمال خروج اضطراری واحد یک

در شکل ۴ منحنی بار معادل نهایی سیستم به همراه پارامترهای LOLP و EENS نشان داده شده است.



شکل ۴: منحنی بار معادل نهایی و پارامترهای قابلیت اطمینان

تحت این شرایط انرژی تأمین شده توسط واحد i ام (بر اساس لیست حق تقدم) از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$Q_i = T(1 - q_i) \int_{X_{i-1}}^{X_{i-1} + X_i} f^{(i-1)}(x) dx \quad i = 1, \dots, n \quad (۷)$$

$$X_i = X_{i-1} + x_i \quad i = 1, \dots, n, \quad X_0 = 0 \quad (۸)$$

که در آن داریم: x_i : ظرفیت اضافه شده واحد نوع i ام شرکت و یا تولیدکننده مستقل، X_i : ظرفیت تجمعی واحدهای ۱ تا i ، Q_i : انرژی سالیانه تولید شده توسط واحد نوع i ام شرکت و یا تولیدکننده مستقل

همانگونه که مشاهده می‌شود در صورتی که مقدار خرید انرژی از یک IPP کمتر از Q_0 باشد هزینه‌های IPP بیش از درآمد آن از فروش انرژی به شرکت برق بوده و در نتیجه فروش این مقدار انرژی برای IPP مقرون به صرفه نخواهد بود. بنابراین حداقل مقدار انرژی قابل خریداری از یک IPP برابر Q_0 است. در صورتی که مقدار انرژی خریداری شده از IPP برابر Q_1 باشد، آنگاه سود حاصل از فروش انرژی برای این IPP برابر $C_T - C_i$ خواهد بود. با افزایش انرژی خریداری شده توسط شرکت، سود IPP از این معامله افزایش می‌یابد. به این ترتیب مشخص می‌شود که شرکت برق می‌تواند در صورت خرید مقادیر بیشتر انرژی، قیمت پایین‌تری را به تولیدکنندگان مستقل پیشنهاد نماید. در این مقاله با بررسی چند حالت مختلف تأثیر قیمت خرید انرژی از هر IPP در نتایج مسئله GEP نشان داده شده است.

۳- قیود قابلیت اطمینان و منحنی بار معادل

در این مقاله دو معیار احتمال از دست دادن بار (LOLP)^۱ و مقدار باری که پیش‌بینی از دست دادن آن می‌رود (EENS)^۲ به عنوان دو شاخص تعیین قابلیت اطمینان سیستم در فرایند بهینه‌سازی مسئله GEP در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. برای هر یک از واحدهای شرکت و یا تولیدکنندگان مستقل یک احتمال خروج اضطراری در نظر گرفته می‌شود. حال چنانچه اولین واحد تأمین‌کننده بار دارای ظرفیت C و احتمال خروج اضطراری q باشد، منحنی بار معادل شبکه را با لحاظ نمودن احتمال خروج اضطراری این واحد می‌توان به کمک رابطه (۳) محاسبه نمود.

$$f^{(1)}(x) = (1 - q) f^{(0)}(x) + q f^{(0)}(x - C) \quad (۳)$$

که در آن $f^{(0)}(x)$ منحنی بار اولیه و $f^{(1)}(x)$ منحنی بار معادل سیستم است.

در شکل ۳ منحنی بار اولیه شبکه و همچنین منحنی بار معادل با در نظر گرفتن احتمال خروج اضطراری واحد یک نشان داده شده است. به همین ترتیب می‌توان احتمال خروج اضطراری سایر واحدها را نیز به منحنی بار اعمال نموده و منحنی بار معادل نهایی سیستم را با استفاده از رابطه (۴) محاسبه نمود. با محاسبه این منحنی پارامترهای

¹ Loss Of Load Probability

² Expected Energy Not Supplied

۴- تابع هدف مسئله GEP

تابع هدف مسئله GEP را در شرایط جدید ناشی از وارد شدن تولیدکنندگان مستقل می‌توان بصورت یک تابع شامل هزینه‌های ثابت و متغیر کلیه واحدهای تولیدی شرکت به همراه هزینه خرید انرژی بصورت زیر فرمولبندی نمود:

$$\text{Min}_{x_k, x_j} f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k x_k + b_k Q_k) + \sum_{j=1}^3 P_j Q_j \quad (9)$$

که در آن داریم: m : تعداد انواع واحدهای تولیدی شرکت
 a_k و b_k : هزینه ثابت و متغیر واحد نوع k ام شرکت
 Q_k : انرژی سالیانه خریداری شده از واحد k ام شرکت
 P_j و Q_j : قیمت خرید انرژی و انرژی سالیانه خریداری شده از IPP j ام (که داریم: $Q_j = f(x_j)$)

۵- محدودیتهای مسئله GEP

• محدودیت تعادل بار: مقدار کل ظرفیت واحدهای تولیدی در شبکه باید بیشتر از مقدار تقاضای مصرف بعلاوه رزرو مورد نیاز شبکه باشد:

$$\sum_{k=1}^m x_k + \sum_{j=1}^3 x_j \geq P_D + P_{res} \quad (10)$$

• محدودیت ظرفیت واحدهای تولیدی جدید: ظرفیت واحدهای جدید باید در محدوده‌های مجاز صدق نماید:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad i = 1, \dots, n \quad (11)$$

• محدودیت انرژی خریداری شده از واحدهای تولیدی: میزان انرژی خریداری شده از هر IPP با توجه به ظرفیت شبکه و قیمت خرید باید در محدوده مجاز صدق نماید:

$$Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max} \quad j = 1, \dots, 3 \quad (12)$$

که در آن حداقل مقدار انرژی خریداری شده از هر IPP از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$Q_j^{\min} = \frac{a_j x_j}{P_j - b_j} \quad j = 1, \dots, 3 \quad (13)$$

• محدودیتهای قابلیت اطمینان شبکه: شاخصهای قابلیت اطمینان باید در محدوده‌های مجاز صدق نمایند:

$$LOLP \leq LOLP^{\max} \quad (14)$$

$$EENS \leq EENS^{\max} \quad (15)$$

• محدودیت انتشار گاز Co2 در محیط: میزان انتشار گاز Co2 توسط واحدهای تولیدی شرکت و تولیدکنندگان مستقل باید در محدوده مجاز صدق نماید:

$$\sum_{i=1}^n Co2_i \leq L_{Co2} \quad (16)$$

که در آن داریم: $Co2_i$: مقدار گاز Co2 منتشر شده توسط واحد نوع i ام شرکت و یا تولیدکننده مستقل
 L_{Co2} : حداکثر مقدار مجاز انتشار گاز Co2 در محیط

۶- حل مسئله GEP به کمک الگوریتم ژنتیک

آلگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی کارآمد بر اساس اصول اولیه تئوری تکامل است. استفاده از این آلگوریتم برای حل مسئله GEP دارای سودمندیهای زیادی است. بطور طبیعی این آلگوریتم براحتی قادر به بکار بردن متغیرهای صحیح است بعلاوه اینکه ابعاد مختلف محدودیتها و اهداف مسئله GEP را به خوبی می‌توان در قالب این آلگوریتم مدلسازی کرد. با استفاده از این الگوریتم می‌توان نقطه بهینه سراسری را محاسبه نمود و یا اینکه در یک زمان محدود به یک نقطه بهینه نسبی دست یافت. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله GEP استفاده شده است. برای این منظور کروموزومهایی به صورت نشان داده شده در شکل ۵ مورد استفاده قرار گرفته است. هر ژن در این رشته کروموزوم نشان دهنده ظرفیت یک نوع از واحدهای شرکت و یا یک تولیدکننده مستقل است.

x1	x2	...	xm	xm+1	xm+2	xm+3
----	----	-----	----	------	------	------

شکل ۵: رشته کروموزوم بکار برده شده در روش پیشنهادی
محدودیتهای مسئله نیز توسط ضریب جریمه در تابع هدف منظور شده‌اند، بطوری که در هر تکرار آلگوریتم ژنتیک و برای هر کروموزوم کلیه محدودیتها کنترل شده و در صورت عدم رعایت، یک ضریب جریمه که بصورت تجربی تعیین می‌شود به تابع هدف اضافه می‌گردد. در فرمولبندی جدیدی که برای حل مسئله GEP در این مقاله مطرح شده است در هر تکرار مسئله توسط GA و برای هر یک از کروموزومها، منحنی بار معادل محاسبه شده، سپس دو معیار LOLP و EENS بگونه‌ای که در روابط (۵) و (۶) آمده است، محاسبه می‌گردد. انرژی تولید شده توسط هر یک از واحدهای شرکت و تولیدکنندگان مستقل نیز برای هر کروموزوم از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

۷- اعمال روش پیشنهادی به یک شبکه نمونه

در این قسمت روش پیشنهادی در این مقاله به یک شبکه نمونه اعمال گردیده است. حداکثر بار در سال هدف برابر ۴۱۰۰ و مقدار رزرو برابر ۶۰ مگاوات فرض شده است. منحنی بار در سال هدف مشابه منحنی نشان داده شده در شکل ۱ است. اطلاعات مربوط به انواع مختلف واحدهای تولیدی شرکت در جدول ۱ داده شده و در جدول ۲ نیز اطلاعات مربوط به سه نوع تولیدکننده مستقل آمده است. در این بررسی کلاً پنج حالت مختلف برای قیمت خرید انرژی از تولیدکنندگان مستقل و محدودیتهای قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۳).

جدول ۱: اطلاعات انواع واحدهای تولیدی شرکت

نوع واحد شرکت	هزینه ثابت (\$/KW)	هزینه متغیر (\$/KWh)	ظرفیت قابل نصب (MW)	احتمال خروج اضطراری
اتمی	۳۶۰	۰/۰۱۰	۱۵۰۰	۰/۰۴۰
زغال سنگی	۲۵۰	۰/۰۲۴	۸۰۰	۰/۰۳۵
مازوت	۱۵۵	۰/۰۴۷	۱۰۰۰	۰/۰۲۵
گازی	۱۱۵	۰/۰۶۰	۳۰۰	۰/۰۲۰

جدول ۲: اطلاعات انواع تولیدکنندگان مستقل موجود در بازار

نوع IPP	هزینه ثابت (\$/KW)	هزینه متغیر (\$/KWh)	ظرفیت قابل نصب (MW)	احتمال خروج اضطراری
پایه	۲۴۰	۰/۰۱۵	۷۰۰	۰/۰۴۰
میانی	۱۹۳/۳	۰/۰۲۴	۵۰۰	۰/۰۳۵
پیک	۱۳۳/۳	۰/۰۵۲	۲۶۰	۰/۰۳۰

جدول ۳: قیمت‌های مختلف پرداخت شده به تولیدکنندگان مستقل و مقادیر حدی شاخصهای قابلیت اطمینان

	قیمت خرید از IPP پایه	قیمت خرید از IPP میانی	قیمت خرید از IPP پیک	LOLP	EENS
حالت ۱	۰/۰۴۸	۰/۰۶۸	۰/۱۰۰	۰/۰۸	۱/۱۶۰
حالت ۲	۰/۰۴۸	۰/۰۶۸	۰/۱۰۰	۰/۰۷	۱/۲۹
حالت ۳	۰/۰۴۸	۰/۰۶۸	۰/۱۱۰	۰/۰۷	۱/۲۹
حالت ۴	۰/۰۴۸	۰/۰۷۴	۰/۱۰۰	۰/۰۷	۱/۲۹
حالت ۵	۰/۰۵۵	۰/۰۶۸	۰/۱۰۰	۰/۰۷	۱/۲۹

در حالت اول مقادیر حدی LOLP و EENS بقدری بزرگ انتخاب شده‌اند که عملاً محدودیتی در برنامه‌ریزی ایجاد نمی‌نمایند. در حالت‌های دوم تا پنجم این مقادیر تا اندازه‌ای کاهش یافته‌اند. در حالت‌های سوم تا پنجم در هر مرحله

قیمت خرید انرژی از یک نوع IPP به میزان حدود ۱۰٪ افزایش داده شده تا تأثیر تغییرات قیمت روی نتایج مسئله نشان داده شود. در جدول ۴ نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در پنج حالت مختلف آمده است. در جدول ۵ نتایج انرژی خریداری شده از هر یک از واحدها نشان داده شده و در جدول ۶ مجموع هزینه‌های شرکت، سود هر IPP به همراه دو معیار قابلیت اطمینان شبکه آمده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود با ورود محدودیتهای قابلیت اطمینان در حالت دو، پاسخهای مسئله GEP کلاً به سمتی پیش می‌رود که واحدهای با قابلیت اطمینان بالا، بیشتر در برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در این حالت ظرفیت کل و مجموع هزینه‌های شرکت افزایش می‌یابد. در هر یک از حالت‌های سه تا پنج با افزایش قیمت خرید انرژی از یک IPP سود آن بطور قابل توجهی زیاد می‌شود ولی متقابلاً برنامه‌ریزی به سمتی پیش می‌رود که مقدار انرژی خریداری شده از این IPP کاهش یابد. با مقایسه نتایج بدست آمده در حالت‌های دو و چهار می‌توان نتیجه گرفت که این امر الزاماً به معنی افزایش هزینه‌های شرکت نیست. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات قیمت خرید انرژی از تولیدکنندگان مستقل تأثیر بسزائی روی نتایج مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید دارد.

۸- نتیجه گیری

با بررسی نتایج بدست آمده از اعمال روش پیشنهادی مشاهده می‌شود این روش قادر است بطور کاملاً مؤثری محدودیتهای مربوط به قابلیت اطمینان را در برنامه‌ریزی توسعه تولید لحاظ نماید. در این روش برخلاف تکنیکهای قبلی (مراجع [۱۱ و ۱۰]) تأمین قابلیت اطمینان شبکه تنها با افزودن به واحدهای گازی شرکت تحقق نمی‌یابد. با افزایش وزن نسبی محدودیتهای مربوط به قابلیت اطمینان سیستم برنامه‌ریزی به سمت استفاده بیشتر از واحدهای با قابلیت اطمینان بالا پیش می‌رود، هرچند اینکار هزینه‌های شرکت را نیز افزایش می‌دهد.

افزایش قیمت خرید انرژی از یک تولیدکننده مستقل سبب افزایش سود این تولیدکننده و در مقابل کاهش خرید انرژی از آن می‌شود (معمولاً تأثیر افزایش قیمت در این قسمت از کاهش خرید انرژی بیشتر است). این امر در پاره‌ای موارد

جدول ۴: نتایج بدست آمده برای ظرفیت واحدهای شرکت و تولیدکنندگان مستقل

کل ظرفیت مورد نیاز (KW)	X ₇ (KW)	X ₆ (KW)	X ₅ (KW)	X ₄ (KW)	X ₃ (KW)	X ₂ (KW)	X ₁ (KW)	
۴۱۶۰۰۰۰	۲۳۰۷۵۳	۵۲۵۷	۶۳۶۳۴۸	۲۰۶۷۳۱	۹۱۷۲۰۱	۶۶۳۷۱۰	۱۵۰۰۰۰۰	حالت ۱
۴۲۵۷۱۲۰	۲۵۹۸۰۶	۱۵۶۹۲۳	۶۲۴۵۷۷	۲۹۹۴۶۶	۸۱۲۳۳۹	۶۰۴۰۱۲	۱۵۰۰۰۰۰	حالت ۲
۴۲۶۱۲۲۰	۲۳۷۹۲۰	۱۶۰۴۲۹	۶۷۲۲۵۹	۳۰۰۰۰۰	۸۳۶۲۱۶	۵۵۴۳۹۹	۱۵۰۰۰۰۰	حالت ۳
۴۲۷۲۷۴۰	۲۳۹۸۴۰	۴۸۸۱۲	۷۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۷۴۴۴۵۸	۷۳۹۶۳۰	۱۵۰۰۰۰۰	حالت ۴
۴۲۵۶۸۶۰	۲۵۹۸۶۹	۱۵۶۸۵۷	۶۱۶۴۵۴	۳۰۰۰۰۰	۸۱۱۵۲۳	۶۱۲۱۵۸	۱۵۰۰۰۰۰	حالت ۵

جدول ۵: نتایج انرژی خریداری شده از هر یک از واحدهای شرکت و تولیدکنندگان مستقل

Q ₇ (GWh)	Q ₆ (GWh)	Q ₅ (GWh)	Q ₄ (GWh)	Q ₃ (GWh)	Q ₂ (GWh)	Q ₁ (GWh)	
۶۴۳/۷۸۶	۲۹/۸۸۷	۵۲۶۳/۴۲۲	۴۳۳/۹۴۳	۳۶۲۸/۵۶۶	۴۷۵۱/۷۱۴	۱۲۶۰۶/۳۷۳	حالت ۱
۷۲۳/۳۰۷	۸۹۲/۱۵۷	۵۱۶۸/۶۸۴	۴۹۰/۷۱۸	۳۱۰۷/۸۷۶	۴۴۲۴/۸۹۹	۱۲۶۰۶/۳۷۳	حالت ۲
۶۶۰/۱۶۶	۹۱۲/۲۸۰	۵۵۵۱/۲۳۲	۴۸۴/۳۹۲	۳۱۷۵/۶۸۱	۴۰۲۷/۹۷۶	۱۲۶۰۶/۳۷۳	حالت ۳
۶۶۶/۳۶۶	۲۳۵/۹۰۵	۵۷۷۲/۲۰۴	۴۵۴/۰۹۳	۲۶۹۵/۹۰۰	۴۹۸۴/۰۸۳	۱۲۶۰۶/۳۷۳	حالت ۴
۷۲۳/۵۹۶	۸۹۱/۷۸۰	۵۱۰۳/۱۹۷	۴۹۲/۶۸۳	۳۱۰۵/۴۰۰	۴۴۹۰/۹۳۹	۱۲۶۰۶/۳۷۳	حالت ۵

جدول ۶: نتایج بدست آمده برای مجموع هزینه‌های شرکت، سود هر یک از تولیدکنندگان مستقل و شاخصهای قابلیت اطمینان

EENS	LOLP	سود IPP پیک (\$۱۰۰۰)	سود IPP میانی (\$۱۰۰۰)	سود IPP پایه (\$۱۰۰۰)	هزینه کل (\$۱۰۰۰)	
٪۱/۵۲۵	۰/۰۷۵	۱۴۲/۲۹۴	۰/۰۱۵	۲۰۹۷۰	۱۶۲۷۶۱۰	حالت ۱
٪۱/۲۷۴	۰/۰۷	۸۶/۵۴۲	۰/۱۳۸	۲۰۶۶۸	۱۶۴۰۲۲۰	حالت ۲
٪۱/۲۶۸	۰/۰۷	۶۵۷۵	۶/۵۷۷	۲۱۸۴۹	۱۶۴۴۸۸۰	حالت ۳
٪۱/۲۹۰	۰/۰۷	۱۴/۸۵۱	۰/۹۱۲	۲۲۴۸۳	۱۶۳۵۵۹۰	حالت ۴
٪۱/۲۷۴	۰/۰۷	۹۲/۰۷۵	۰/۱۲۶	۵۶۱۷۹	۱۶۷۶۳۶۰	حالت ۵

- می تواند حتی سبب کاهش هزینه‌های شرکت گردد.
- در عمل تولیدکنندگان مستقل می توانند با پیشنهاد قیمت مناسب ضمن رقابت با دیگر تولیدکنندگان، سود خود را در بازار تولید انرژی حداکثر نمایند. به هر حال قیمت خرید انرژی نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی توسعه تولید در محیط تجدید ساختار دارد.
- نتایج بدست آمده از روش ارائه شده در این مقاله می تواند پیشنهادات مناسبی را به شرکتهای برق منطقه‌ای در راستای برنامه‌ریزی مناسب توسعه تولید ارائه دهد. منطقی است در گامهای بعدی این پژوهش به بررسی آثار عدم قطعیت‌های مختلف بویژه قیمت‌های بازار بر پاسخ مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید پرداخته شود.
- مراجع**
- [1] J. Zhu and M. Y. Chow, "A review of emerging techniques on generation expansion planning", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, no. 4, November 1997, pp. 1722-1728.
 - [2] S. Kannan, S. M. R. Slochanal and N.P. Padhy, "Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning problem", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 20, no. 1, February 2005, pp. 466-475.
 - [3] H. T. Firmo and L. F. L. Legey, "Generation expansion planning : an iterative genetic algorithm approach", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no. 3, August 2002, pp. 901-906.
 - [4] A. S. Chuang, F. Wu and P. Varaiya, "A game-theoretic model for generation expansion planning : problem formulation and numerical comparisons", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 16, no. 4, November 2001, pp. 885-891.
 - [5] J. B. Park, Y. M. Park, J. R. Won and K. Y. Lee, "An improved genetic algorithm for generation expansion planning", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, no. 3, August 2000, pp. 916-922.
 - [6] N. I. Voropai and E. Y. Ivanova, "Hierarchical game theoretical problem of electric power system expansion planning", IEEE Power Tech. Conference, June 2003.
 - [7] E. Centeno, J. Reneses, R. Garcia and J. J. Sanchez, "Long-term market equilibrium modeling for generation expansion planning", IEEE Inter. Conf. on Power Tech., June 2003.
 - [8] A. G. Kagiannas, D. T. Askounis and J. Psarras, "Power generation planning : a survey from monopoly to competition", Inter. Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 26, July 2004, pp. 413-421.
 - [9] W. M. Lin, T. S. Zhan, M. T. Tsay and W. C. Hung, "The generation expansion planning of the utility in a deregulated environment", IEEE Inter. Conf. on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Tech., vol. 2, April 2004, pp. 702-707.
 - [10] N. X. Jia, R. Yokoyama and Y. C. Zhou, "Advanced dp based method for power expansion planning in the deregulated market", IEEE Power Tech. Conference, vol. 1, September 2001.
 - [11] W. M. Lin, T. S. Zhan, M. T. Tsay and W. C. Hung, "An effective dp solution for optimal generation expansion planning under new environment", IEEE Inter. Conf. on Power System Tech., vol. 1, December 2000, pp. 37-42.
 - [12] X. Wang and J. R. McDonald, "Modern Power System Planning", McGraw-Hill Book Company, 1990.