تأثیر پاسخگویی بار بر توسعه تولید در محیط تجدید ساختار یافته

مهدی صمدی، محمدحسین جاویدی و محمدصادق قاضی‌زاده

چکیده: امروزه برنامه‌های پاسخگویی بار مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند. با گسترش این برنامه‌ها، مشتریان می‌توانند مشابه سمت تولید، در بهره‌برداری سیستم مشارکت کنند و بر این اساس نیاز به بازبینی مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم قدرت احساس می‌شود. در این مقاله به مدل‌سازی اثرات پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی توسعه تولید پرداخته شده و تأثیرات، از دو دیدگاه مشتریان و شرکت‌های تولید بررسی شده است. مدل به کار رفته در این مقاله منطبق با ساختار غیر متمرکز بازارهای برق کنونی می‌باشد. در این راستا تأثیر پاسخگویی بار، بر تصمیم به سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی جدید مورد بررسی قرار گرفته و کاهش نیاز به ظرفیت‌های جدید یا تعویق آن با ارائه یک شاخص جدید ارزیابی شده است. همچنین تغییرات در هزینه سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی جدید و نیز تغییرات هزینه‌های پرداختی توسط مشتریان، در نتیجه پاسخگویی بار، تجزیه و تحلیل شده است. روش پیشنهادی روی شبکه ۳۰ باسه استاندارد IEEE آزمایش شده و نتایج به دست آمده ارائه و تحلیل شده‌اند.

***کلید واژه:* بار کشسان، برنامه‌ریزی توسعه تولید، پاسخگویی بار.**

فهرست علائم و اختصارات

d: نرخ تنزیل.
i: اندیس واحدهای تولیدی (NI: تعداد واحدهای تولیدی).
i': اندیس واحدهای تولیدی نصب‌شده جدید.
j: اندیس شین‌ها (NJ: تعداد کل شین‌ها).
k: اندیس شرکت‌های تولید (NK: تعداد کل شرکت‌های تولید).
l: اندیس خطوط.
t: اندیس سال‌ها (T: تعداد کل سال‌های افق برنامه‌ریزی).
Bid_{it}: قیمت پیشنهادی واحد i ام در سال t ام ($/MWh).
C_{it}: هزینه بهره‌برداری واحد i ام در سال t ام ($/MWh).
CP_{it}: بهای آمادگی پرداختی به واحد i ام در سال t ام.
D_{jt}: کل بار تغذیه‌شده در شین j ام در سال t ام.
$D_{jt}^{\max}$: پیک بار پیش‌بینی شده برای شین j ام در سال t ام.
De_{jt}: میزان بار کشسان تغذیه‌شده شین j ام در سال t ام.
$De_{jt}^{\max}$: حداکثر میزان بار کشسان شین j ام در سال t ام.
Du_{jt}: میزان بار غیر کشسان تغذیه‌شده شین j ام در سال t ام.
DDI: شاخص پیشنهادی برای ارزیابی کاهش و تعویق توسعه.
I_{it}: هزینه سرمایه‌گذاری واحد i ام در سال t ام.
LMP_{it}: قیمت حاشیه‌ای محلی متناظر واحد i ام در سال t ام.
m_j: ضریب پاسخگویی بار در شین j ام.
MC_{it}: هزینه حدی تولید واحد i ام در سال t ام.
Nc_k: تعداد واحدهای نامزد برای توسعه شرکت تولید k ام.
Ne_k: تعداد واحدهای موجود شرکت تولید k ام.
Ni_k: تعداد کل واحدهای شرکت تولید k ام.
Obj_k: تابع هدف شرکت تولید k ام.
P_{jt}: تمایل به پرداخت بار کشسان j ام در سال t ام.
PG_{it}: توان تولیدی واحد i ام در سال t ام.
$PG_i^{\max}$: حداکثر ظرفیت واحد i ام.
PL_{lt}: توان عبوری از خط l ام در سال t ام.
$PL_l^{\max}$: ظرفیت خط l ام.
TCP: کل بهای آمادگی پرداخت‌شده به واحدهای تولیدی.
TIC: کل هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای تولیدی جدید.
TPC: کل پول پرداختی توسط مشتریان.
TPG: کل پول پرداختی به واحدهای تولیدی.
UP_t: بار تغذیه‌نشده (خاموشی) در سال t ام (MW).
$VOLL_t$: ارزش بار از دست رفته در سال t ام ($/MWh).
x_{mn}: راکتانس خط mn.
X_{it}: وضعیت واحد (یک: موجود و صفر: نامزد توسعه).
α_i: ضریب قیمت‌دهی واحد i ام.
γ_{jt}: درصد بار کشسان نسبت به کل بار شین j ام در سال t ام.
θ: زاویه شین.
A: ماتریس تلاقی واحدها و شین‌ها.
B: ماتریس تلاقی بارها و شین‌ها.
K: ماتریس تلاقی خطوط و شین‌ها.
PG: بردار توان حقیقی شین‌ها.
PD: بردار بار مصرفی.
PL: بردار توان عبوری از خطوط.
Λ: مجموعه واحدهای تولیدی نصب‌شده جدید.
$*$: نشان‌دهنده متغیرهای معلوم.

۱- مقدمه

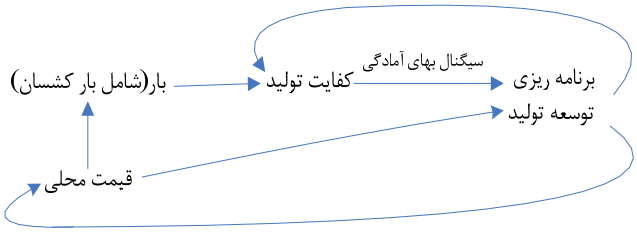
افزایش قیمت‌های سوخت و نیز نگرانی‌های زیست‌محیطی در سال‌های اخیر، باعث توجه بیشتر به برنامه‌های پاسخگویی بار (DR)[1] شده است [۱] و [۲]. کمیته تنظیم انرژی آمریکا، پاسخگویی بار را چنین تعریف می‌کند: "تغییرات در الگوی مصرف عادی مشتریان نهایی برق، در پاسخ به تغییرات قیمت برق، یا در پاسخ به پرداخت‌های تشویقی طراحی‌شده برای کاهش مصرف در مواقعی که قیمت‌های بازار عمده‌فروشی بالاست، یا زمانی که قابلیت اطمینان سیستم به خطر می‌افتد" [۳]. کاهش قیمت لحظه‌ای و نوسانات آن، افزایش کارایی بازار برق، بهبود امنیت و قابلیت اطمینان سیستم و کاهش یا تعویق نیاز به توسعه ظرفیت‌های تولید در

1. Demand Response

این مقاله در تاریخ ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۸ خرداد ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

مهدی صمدی، گروه برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد (email: mahdi.samadi@stu-mail.um.ac.ir).
محمدحسین جاویدی، گروه برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (email: h-javidi@um.ac.ir).
محمدصادق قاضی‌زاده، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران (email: ghazizadeh@pwut.ac.ir).

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱: دیاگرام علّی تأثیرات بار کشسان بر برنامه‌ریزی توسعه تولید.

سیستم از مهم‌ترین نتایج به کارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار می‌باشد [۴]. با گسترش بیشتر برنامه‌های پاسخگویی بار، مشتریان می‌توانند در بهره‌برداری سیستم مشارکت کنند. با افزایش مشارکت مشتریان، طبیعتاً مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم قدرت، نیاز به بازبینی و اصلاح دارند [۵].

برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP)[1] یکی از مهم‌ترین اجزای برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت است که در آن، برنامه‌ریزان نوع، میزان ظرفیت، زمان و محل واحدهای تولیدی جدیدی که در طول افق برنامه‌ریزی باید به سیستم اضافه شوند را تعیین می‌کنند [۶]. چون توسعه برنامه‌های پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی توسعه تولید مؤثر است، بنابراین بازبینی مدل‌های ارائه‌شده برای برنامه‌ریزی توسعه تولید ضروری به نظر می‌رسد. ارزیابی تأثیرات پاسخگویی بار بر تصمیمات سرمایه‌گذاری در بخش تولید برای قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران بسیار مهم قلمداد می‌شود [۵].

اگرچه در تعدادی از تحقیقات [۱]، [۴]، [۷] و [۸] پاسخگویی بار در موضوعات بهره‌برداری و افق کوتاه‌مدت مطالعه شده است، اما در مورد تأثیرات این برنامه‌ها بر برنامه‌ریزی سیستم در افق بلندمدت، مطالعات کمی به چشم می‌خورد.

در [۲] یک چارچوب تحلیلی برای ارزیابی استراتژی‌های سرمایه‌گذاری در منابع سمت تولید و نیز بازیگران جدید سمت مصرف پیشنهاد شده است. این بازیگران عهده‌دار متمرکز و هماهنگ‌کردن بارهای منفرد مجموعه‌ای از مشتریان و ارائه کاهش بار به بازار برق هستند. این روش برای تحلیل گزینه‌های سمت مصرف به خوبی و به اندازه گزینه‌های سمت تولید مفید است.

در [۹] یک برنامه پاسخگویی بار قیمت‌محور در مسئله توسعه شبکه انتقال در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به دست آمده، تعویق نیاز به توسعه انتقال از مهم‌ترین نتایج پاسخگویی بار عنوان شده است.

در [۱۰] مدلی برای تعیین سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های تولید با هدف حداقل‌کردن هزینه ارائه شده است. در این مدل، اثر پاسخگویی بار و چند سناریوی سیاست‌گذاری مختلف در تغییر گزینه‌های توسعه تولید بررسی شده است.

مرجع [۱۱] مدلی برای مطالعه اثرات متقابل تراکم خطوط انتقال بر توسعه تولید را ارائه نموده که در آن بارها به صورت حساس به قیمت در نظر گرفته شده‌اند، ولی تمرکز اصلی این مقاله بر بررسی اثر تراکم خطوط بر برنامه‌ریزی توسعه تولید می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین نتایج پاسخگویی بار کاهش نیاز به نصب واحدهای تولیدی جدید است [۴] و [۱۲] که غالباً منجر به لغو یا تعویق توسعه انتقال و توزیع نیز می‌گردد [۱۳]. در هیچ یک از مراجع ذکرشده، کاهش در نیاز به ظرفیت‌های جدید تولید به صورت کمی مطالعه نشده است. در این مقاله به مدل‌سازی و تحلیل تأثیرات پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی توسعه تولید در یک محیط تجدید ساختار یافته پرداخته شده است. در این راستا جلوگیری یا تعویق نیاز به ظرفیت‌های جدید تولید، به طور جامع بررسی شده و به کمک یک شاخص جدید ارزیابی شده است. همچنین تغییرات در هزینه سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی جدید و نیز تغییرات هزینه‌های پرداختی توسط مشتریان، در نتیجه پاسخگویی بار، تجزیه و تحلیل شده است. در این مقاله تغییر در بار کشسان در نتیجه تغییر در قیمت برق به عنوان پاسخگویی بار در نظر گرفته شده است.

در اینجا یک سئوال مهم مطرح می‌شود: آیا در نظر گرفتن پاسخگویی بار تغییرات جدی در برنامه‌ریزی توسعه تولید ایجاد می‌کند؟ در پاسخ به این سؤال می‌توان گفت یکی از ورودی‌های مهم و تأثیرگذار در هر برنامه توسعه تولیدی، بار مورد تقاضا می‌باشد [۱۴]. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، اگر کشش قیمتی قابل توجه باشد، قیمت بر بار تأثیر می‌گذارد. همچنین تغییر در بار آینده، بر نیاز به نصب واحدهای تولیدی جدید اثرگذار است. از طرف دیگر نصب واحدهای جدید، قیمت‌های حاشیه‌ای محلی (LMP)[2] آینده را تغییر می‌دهد. این به معنی وجود یک حلقه بسته میان برنامه‌ریزی توسعه تولید و قیمت می‌باشد.

بنابراین ارائه یک چارچوب جامع برای تحلیل رفتار سرمایه‌گذاران در توسعه تولید در سیستم‌های دارای بار حساس به قیمت ضروری به نظر می‌رسد. این چارچوب باید قادر باشد روابط علّی بین بار، قیمت و طرح‌های توسعه را به درستی در نظر بگیرد. در این مقاله این مفهوم به صورتی مناسب و منطقی مدل‌سازی شده است.

برنامه‌ریزی توسعه تولید در محیط تجدید ساختار یافته اغلب به صورت غیر متمرکز انجام می‌شود. در چنین محیطی سرمایه‌گذاری شرکت‌های تولید (GENCOs)[3]، تنها با هدف کسب حداکثر سود صورت می‌گیرد و این شرکت‌ها دغدغه بهبود وضعیت سیستم را ندارند. بنابراین نیاز به نوعی هماهنگی با ISO وجود دارد تا بهره‌بردار از تأمین بار آینده به صورتی اقتصادی و ایمن، مطمئن باشد [۱۵]. ساختار کلی مدل GEP پیشنهادی در این مقاله بر پایه ساختاری است که هیونگ و شاهیده‌پور در [۱۶] پیشنهاد داده‌اند. البته بر خلاف مرجع مذکور که بار را غیر کشسان در نظر گرفته است، در این مقاله بخشی از بار، کشسان فرض شده است. در نظر گرفتن کشسانی بار، تغییرات اساسی در مسئله ایجاد می‌کند و بنابراین اجزای مدل پیشنهادی و روند پیاده‌سازی و اجرای آن نیز تفاوت‌های اساسی با مدل مرجع فوق‌الذکر دارد.

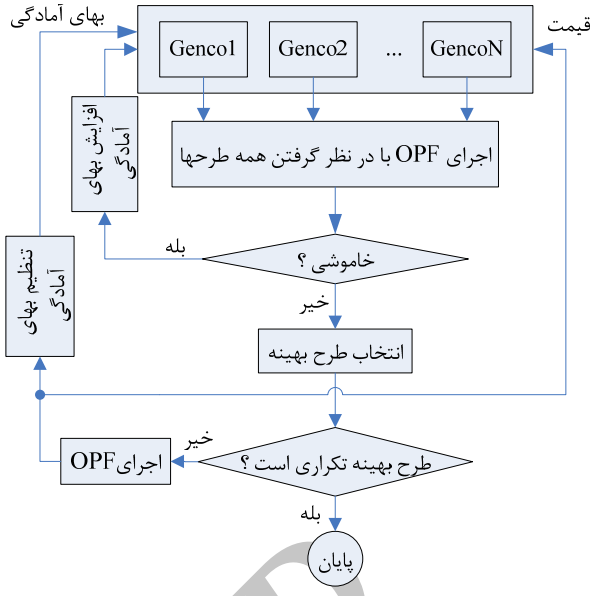
در بخش دوم مقاله، روش پیشنهادی مفصلاً معرفی می‌شود. در چارچوب به کار رفته، طبیعت غیر متمرکز برنامه‌ریزی و رقابت بین شرکت‌های تولید (GENCOs) در محیط تجدید ساختار یافته و همچنین تعامل آنها با ISO (به عنوان تأییدکننده نهایی طرح) به خوبی رعایت می‌شود. در این ساختار، GENCO ها بر اساس سیگنال‌های LMP و بهای آمادگی تصمیم به سرمایه‌گذاری می‌گیرند. در بخش سوم، روابط مسئله و فرمول‌بندی بیان شده است. معرفی سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم آمده است و در نهایت در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- توصیف مدل

این بخش به توصیف چارچوب مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید می‌پردازد. در این ساختار هر شرکت تولید، طرح پیشنهادی

1. Generation Expansion Planning
2. Locational Marginal Price
3. Generation Companies

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲: روندنمای روش پیشنهادی.

خود برای توسعه واحدهایش را به بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO)[1] که می‌تواند در نقش یک هماهنگ‌کننده باشد، ارائه می‌کند. ISO با در نظر گرفتن تمامی طرح‌های ارائه‌شده، قیود ضروری سیستم را چک می‌کند و در صورت ارضای قیود، طرحی که کمترین پول پرداختی به شرکت‌های تولید را دارد، به عنوان طرح بهینه در این مرحله انتخاب می‌شود. سپس سیگنال‌های قیمت و بهای آمادگی محلی محاسبه و به شرکت‌های تولید اعلام می‌شود. شرکت‌های تولید، طرح‌هایشان را بر اساس این سیگنال‌ها بازبینی می‌کنند و طرح جدید خود را به ISO پیشنهاد می‌دهند. این روند تکراری و دینامیکی تا زمانی که دو طرح بهینه متوالی با هم برابر شوند، ادامه می‌یابد. طرح‌های پیشنهادی اولیه بر اساس قیمت‌های تخمینی تهیه می‌شوند و در اولین تکرار بهای آمادگی برابر صفر فرض می‌شود. در روش پیشنهادی بخشی از بارها حساس به قیمت در نظر گرفته شده‌اند که بر قیمت‌های حاشیه‌ای محلی و در نتیجه بر طرح‌های توسعه تأثیر می‌گذارند. در شکل ۲ روندنمای روش پیشنهادی نشان داده شده است.

روند اجرای الگوریتم پیشنهادی مطابق مراحل زیر می‌باشد:

۱) شرکت‌های تولید، طرح‌های توسعه خود را مستقلاً و بر اساس سیگنال‌های دریافتی از قیمت و بهای آمادگی، تهیه و به ISO اعلام می‌کنند (قیمت‌های اولیه، تخمینی است و بهای آمادگی اولیه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود).

۲) ISO طرح‌های ارسالی از طرف شرکت‌های تولید را تجمیع کرده و برنامه پخش بار بهینه را اجرا می‌نماید. اگر قیود ضروری سیستم رعایت شوند و هیچ خاموشی در هیچ سالی نباشد، الگوریتم از مرحله چهارم ادامه می‌یابد و در غیر این صورت به مرحله سوم می‌رود.

۳) مقدار بار کاهش‌یافته در هر سال محاسبه و با احتساب ارزش بار از دست رفته (هزینه خاموشی)، بهای آمادگی پرداختی به واحدهای تولیدی نامزد برای توسعه تعیین می‌شود $(CP_{it} \propto VOLL_t \times UP_t)$. مقدار بهای آمادگی در این مرحله برای تمامی نامزدهای توسعه، یکسان در نظر گرفته شده و سپس الگوریتم از مرحله اول تکرار می‌شود (اگر پس از یک تکرار قیود ارضا نشدند، در تکرارهای بعد میزان بهای آمادگی پرداختی افزایش می‌یابد).

۴) در این مرحله، طرح‌ها قیود ضروری سیستم را ارضا می‌کنند و طرحی که کمترین پرداختی به شرکت‌های تولید را دارد، به عنوان طرح بهینه انتخاب می‌گردد. اگر در دو تکرار متوالی، طرح‌های بهینه یکسانی حاصل شوند، الگوریتم متوقف می‌شود و در غیر این صورت الگوریتم از مرحله پنجم دنبال می‌شود.

۵) با اجرای برنامه پخش بار بهینه (برای شبکه شامل طرح بهینه) قیمت‌های حاشیه‌ای محلی محاسبه و به شرکت‌های تولید اعلام می‌شود.

۶) بهای آمادگی نهایی بر مبنای میزان ظرفیت واحدهای جدید و همچنین قیمت محلی متناظر با آنها به دست خواهد آمد $(CP_{it} \propto PG_{it}^{\max} \times LMP_{it} \times X_{it})$. در مواردی که بهای آمادگی معین‌شده در این مرحله کافی نباشد، مقدار آن افزایش یافته و سپس الگوریتم با انجام مرحله اول ادامه می‌یابد.

اضافه‌شدن واحد تولیدی جدید به یک شین، قیمت محلی و در نتیجه درآمد شرکت تولید در آن شین را کاهش می‌دهد. بنابراین اختصاص بهای آمادگی برای جبران این کاهش درآمد ضروری است. در مواردی که چنین مکانیسم تشویقی نباشد، ممکن است شرکت‌ها از سرمایه‌گذاری منصرف شوند، لذا در مدل پیشنهادی در این مقاله قبل از ارضای قیود لازم، بهای آمادگی بر اساس هزینه بار از دست رفته در هر شین تعیین می‌شود. ولی پس از ارضای قیود و مشخص‌شدن طرح توسعه تولید بهینه، بهای آمادگی فقط بر اساس ظرفیت واحدهای جدید و قیمت محلی متناظرشان اختصاص داده می‌شود. مکانیسم بهای آمادگی علاوه بر نقش سیگنال تشویقی برای شرکت‌های سرمایه‌گذار در توسعه تولید، ابزاری برای قانون‌گذار جهت کنترل و حفظ قیمت‌های بازار برق در سطحی قابل قبول نیز می‌باشد. لذا در روش پیشنهادی، تصمیم به سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی جدید، بر اساس سیگنال قیمت و بهای آمادگی انجام می‌شود. در این مقاله مشابه [۱۶]، برنامه‌ریزی برای توسعه با رعایت قید کفایت تولید در طول افق مورد مطالعه انجام می‌شود و تأثیر پاسخگویی بار بر شاخص‌های قابلیت اطمینان و در نتیجه بر برنامه‌ریزی توسعه تولید در پژوهش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- فرمول‌بندی مسئله

مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید را می‌توان به دو زیرمسئله تقسیم کرد:

- مسئله برنامه‌ریزی شرکت‌های تولید
- مسئله بهره‌بردار مستقل سیستم

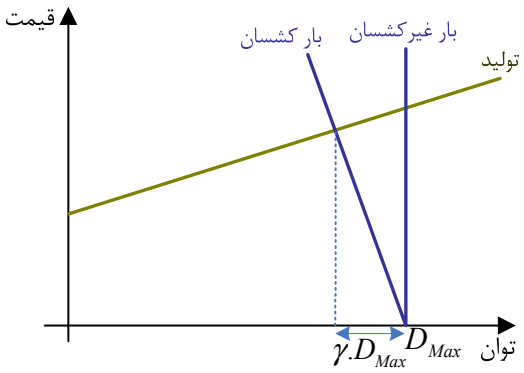
هر شرکت تولیدی بر اساس سود حاصل تصمیم به سرمایه‌گذاری می‌گیرد و از طرف دیگر بهره‌بردار مستقل سیستم مسئول تأمین بار به اقتصادی‌ترین روش ممکن و در عین حال حفظ امنیت سیستم قدرت می‌باشد. بنابراین هدف بهره‌بردار، حداقل‌کردن هزینه تأمین بار به صورتی است که قیود امنیتی ضروری سیستم نقض نشوند. به این منظور ISO بر اساس قیمت‌های پیشنهادی شرکت‌های تولید، بار پیش‌بینی شده و همچنین اطلاعات شبکه، مسئله بهینه‌سازی پخش بار بهینه را تشکیل می‌دهد که با اجرای آن سیگنال‌های قیمتی تعیین می‌شوند. واضح است که شرکت‌های تولید به تمامی اطلاعات فوق دسترسی ندارند.

۳-۱ مسئله برنامه‌ریزی شرکت‌های تولید

در روش پیشنهادی فرض شده است هر شرکت تولید، مالکیت چند واحد تولیدی موجود و همچنین تعدادی واحد تولیدی جدید به عنوان نامزد

1. Independent System Operator

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳: بار کشسان و غیر کشسان.

برای سرمایه‌گذاری را دارد. تابع هدف یک شرکت تولید دلخواه ($Genco_k$) برای مسئله سرمایه‌گذاری در توسعه تولید به صورت زیر خواهد بود

$$\max\ Obj_k = \sum_{i}^{Ni_k}\sum_{t=1}^{T} 8760\times\frac{LMP_{it}\times PG_{it}-C_{it}}{(1+d)^{t-1}} + \sum_{i=1}^{Nc_k}\sum_{t=1}^{T}\frac{8760\times CP_{it}\times X_{it}-I_{it}\times X_{it}}{(1+d)^{t-1}},\ k=1,2,\ldots,NK \quad (1)$$

قیود مسئله

$$0\le PG_{it}\le PG_{it}^{\max}\quad \forall t\ ,\ i=1,2,\ldots,Ne_k \quad (2)$$

$$0\le PG_{it}\le PG_{it}^{\max}\times X_{it}\quad \forall t\ ,\ i=1,2,\ldots,Nc_k \quad (3)$$

که در آن

$$C_{it}=\frac{1}{2}a_{it}\times(PG_{it})^2+b_{it}\times PG_{it}\quad \forall i,t \quad (4)$$

با استفاده از نرخ تنزیل، ارزش فعلی خالص درآمد و هزینه‌ها در طول افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. برای سادگی، نرخ تنزیل به کار رفته برای همه شرکت‌های تولید، یکسان فرض شده است. در فرمول‌بندی (۱)، جملات اول تا چهارم به ترتیب، درآمد حاصل از فروش انرژی، هزینه‌های تولید، درآمد به دست آمده از بهای آمادگی و هزینه سرمایه‌گذاری در واحدهای جدید را نشان می‌دهند. برای هزینه تولید، تابعی درجه دو مطابق (۴) در نظر گرفته شده است. قیود دیگری مانند محدودیت در مکان، نوع یا تعداد واحدهای تولیدی نیز می‌توانند از طرف شرکت‌های تولید، در این مسئله برنامه‌ریزی لحاظ شوند. این روابط، تشکیل یک مسئله بهینه‌سازی مقید، غیر خطی و آمیخته با عدد صحیح را می‌دهند. تعداد این مسئله‌های متمایز برابر تعداد شرکت‌های تولید است و با توجه به این که در این ساختار هر شرکت تولید به صورت مستقل سود خود را حداکثر می‌کند، طبیعت غیر متمرکز برنامه‌ریزی در محیط تجدید ساختار یافته به خوبی رعایت می‌شود.

۳-۲ مسئله بهره‌بردار مستقل سیستم

برای فرمول‌بندی این مسئله، ابتدا رفتار بارهای پاسخگو به قیمت تبیین می‌شود.

۳-۲-۱ روابط بارهای پاسخگو

همان طور که در بخش دوم بیان شد، فرض شده بخشی از بار، کشسان و پاسخگو به قیمت است. در این مقاله، بار کشسان با نماد De و بار غیر کشسان با نماد Du به کار رفته است. کل بار تأمین‌شده از مجموع این دو نوع بار به دست می‌آید

$$D_{jt}=De_{jt}+Du_{jt}\quad \forall j,t \quad (5)$$

اگر درصد بار کشسان نسبت به کل بار در شین j در سال t با γ_{jt} نشان داده شود، آن گاه می‌توان نوشت

$$De_{jt}^{\max}=\gamma_{jt}\times D_{jt}^{\max}\quad \forall j,t \quad (6)$$

$$Du_{jt}=(1-\gamma_{jt})\times D_{jt}^{\max}\quad \forall j,t \quad (7)$$

در شکل ۳، بارهای کشسان و غیر کشسان نشان داده شده‌اند.

بار کشسان با قیمت نسبت عکس دارد. با فرض خطی‌بودن، رابطه بار کشسان نسبت به قیمت می‌تواند به صورت زیر نوشته شود ($m_j>0$)

$$De_{jt}-De_{jt}^{\max}=-m_j\times(P_{jt}-P_{\cdot})$$

$$\Rightarrow P_{jt}=-\frac{1}{m_j}\times De_{jt}+(P_{\cdot}+\frac{De_{jt}^{\max}}{m_j})\quad \forall j,t \quad (8)$$

هرچه m بزرگ‌تر باشد، بار کشسان‌تر بوده و با افزایش قیمت کاهش بیشتری می‌یابد. با تعریف a_{jt} و b_{jt} مطابق (۹)، (۱۰) نتیجه می‌شود

$$a_{jt}\equiv\frac{1}{m_j}$$

$$b_{jt}\equiv P_{\cdot}+\frac{De_{jt}^{\max}}{m_j} \quad (9)$$

$$P_{jt}=-a_{jt}\times De_{jt}+b_{jt}\quad \forall j,t \quad (10)$$

۳-۲-۲ مسئله پخش بار بهینه

پس از مشخص‌شدن طرح‌های ارسالی شرکت‌های تولید، بهره‌بردار مستقل سیستم برنامه پخش بار بهینه را برای هر سال از افق برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن تمامی طرح‌های پیشنهادی برای توسعه اجرا می‌کند. فرض شده هر شرکت تولید، یک پیشنهاد قیمت به صورت تابعی خطی از تولیدش به ISO می‌فرستد که پیشنهاد قیمت هر واحد تولیدی به صورت حاصل‌ضرب یک ضریب قیمت‌دهی در هزینه مرزی تولید در نظر گرفته شده است (مشابه [۱۶]). هزینه مرزی تولید با مشتق‌گیری از (۴) به دست می‌آید

$$Bid_{it}=\alpha_i\times MC_{it}=\alpha_i\times(a_{it}.PG_{it}+b_{it})\quad \forall i \quad (11)$$

هدف ISO حداکثرنمودن رفاه اجتماعی می‌باشد. رفاه اجتماعی از تفاضل منفعت مشتریان از مصرف برق و پول پرداختی بابت هزینه‌های تولید به دست می‌آید. بنابراین مسئله پخش بار بهینه از دیدگاه ISO به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود [۱۷]

$$\max\{\sum_{j=1}^{NJ}(-\frac{1}{2}a_{jt}\times De_{jt}^2+b_{jt}\times De_{jt}) - \sum_{i=1}^{NI}\alpha_i\times(\frac{1}{2}a_{it}\times PG_{it}^2+b_{it}\times PG_{it})\} \quad (12)$$

$$,\quad t=1,2,\ldots,T$$

قیود مسئله

$$K\times PL=A\times PG-B\times PD:LMP \quad (13)$$

$$PL_{lt}=\frac{\theta_{mt}-\theta_{nt}}{x_{mn}}\quad \forall l \quad (14)$$

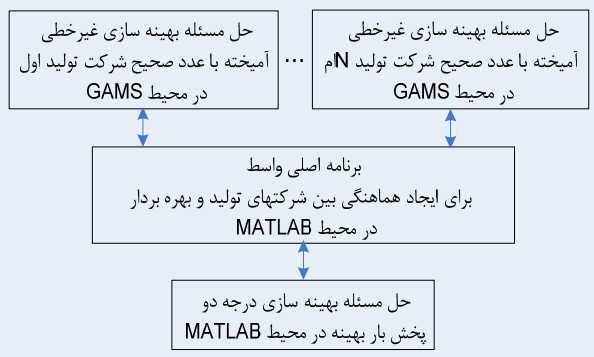
$$\theta_{ref}=0 \quad (15)$$

$$0\le PG_{it}\le PG_{it}^{\max}\quad \forall i \quad (16)$$

$$0\le De_{jt}\le De_{jt}^{\max}\quad \forall j \quad (17)$$

$$\left|PL_{lt}\right|\le PL_{l}^{\max}\quad \forall l \quad (18)$$

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴: اجزای نرم‌افزار طراحی‌شده برای حل مسئله.

جدول ۱: طرح توسعه پیشنهادی (به ازای $\gamma = ۰/۱۵$ و $m = ۱$).

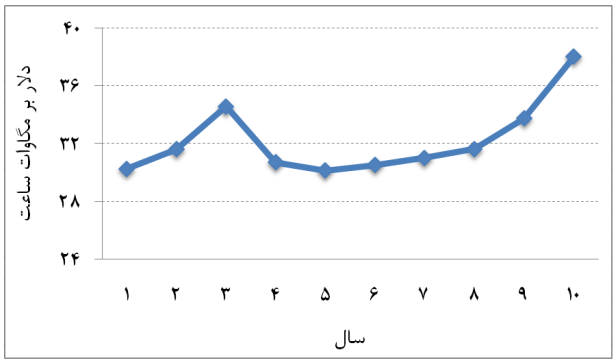
واحدهای جدیدالاحداث	سال احداث
U۱۷ (۳۰۰ MW)	۴
U۸ (۳۰۰ MW)	۵

روابط (۱۳) و (۱۴) قیود پخش بار مستقیم را نشان می‌دهند. با توجه به تعریف LMP، ضرایب لاگرانژ متناظر قیود (۱۳) همان قیمت‌های حاشیه‌ای محلی هستند. در این فرایند بهینه‌سازی، LMP ها بر اساس قیمت‌های پیشنهادی سمت تولید و نیز "تمایل به پرداخت" بارهای کشسان تعیین می‌شوند. قید (۱۶) محدودیت‌های تولید واحدها و قید (۱۷) حداکثر مصرف بارهای کشسان را نشان می‌دهد. نامساوی (۱۸)، محدودیت توان جاری در خطوط را بیان می‌کند. با حل این مسئله، توان تولیدی همه واحدها (اعم از موجود و نصب‌شده جدید)، مقدار بار کشسان تأمین‌شده در هر شین، LMP در همه شین‌ها و توان جاری در خطوط مشخص خواهد شد. همچنین مقدار خاموشی در هر شین و در هر سال از افق برنامه‌ریزی، در صورت وجود معین می‌شود. از اطلاعات به دست آمده در این بخش برای تولید سیگنال بهای آمادگی استفاده می‌گردد. همان طور که در بخش دوم مقاله بیان شد، ISO بهترین طرح را بر اساس کمترین پرداختی به شرکت‌های تولید انتخاب می‌نماید. مقدار کل پرداختی به شرکت‌های تولید از رابطه زیر تعیین می‌شود

$$TPG = ۸۷۶۰ \times \left(\sum_{i=۱}^{NI}\sum_{t=۱}^{T}\frac{LMP_{it}^{*}\times PG_{it}^{*}}{(۱+d)^{t-۱}} + \sum_{i'\in\Lambda}\sum_{t=۱}^{T}\frac{CP_{i't}^{*}\times X_{i't}^{*}}{(۱+d)^{t-۱}}\right) \qquad (۱۹)$$

٤- نتایج شبیه‌سازی

تحلیل‌های مقاله روی سیستم ۳۰ باسه IEEE انجام گرفته است که این سیستم شامل ۷ واحد تولیدی موجود و ۲۲ واحد نامزد برای اضافه‌شدن به شبکه می‌باشد و ۵ شرکت تولید، مالک این واحدها در شین‌های مختلف هستند. این شبکه شامل ۴۴ خط با حداکثر ظرفیت ۲۵۰ مگاوات است و اطلاعات کامل بارها و واحدهای تولیدی در پیوست ارائه شده است. برنامه‌ریزی برای افقی ده ساله انجام می‌گردد. اگر چه بسیاری از مدل‌های پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در مقالات، برای بار پیش‌بینی شده چند زیربازه در نظر می‌گیرند، ولی بعضی مراجع نیز فقط پیک سالانه بار را مد نظر قرار داده‌اند (برای مثال [۶]، [۱۸] و [۱۹]). در اینجا هم برای پرهیز از پیچیدگی غیر ضروری و بهتر نشان دادن هدف اصلی مقاله، برنامه‌ریزی بر مبنای پیک سالانه انجام می‌شود. نرخ تنزیل برابر ۵٪ فرض شده است. برای سادگی مقدار m_j در تمام شین‌ها، برابر فرض شده است. همچنین برای γ_j در شین‌های مختلف نیز مقدار



شکل ۵: میانگین LMP شین‌های شبکه در طول افق برنامه‌ریزی.

یکسانی در نظر گرفته شده است. لذا از این به بعد، این دو پارامتر به ترتیب با m و γ نمایش داده می‌شوند.

مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی است که از چند زیرمسئله بهینه‌سازی مقید غیر خطی آمیخته با عدد صحیح[1] و یک زیرمسئله بهینه‌سازی مقید درجه دو[2] تشکیل شده است. برای حل این مسئله از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB استفاده شده است. شکل ۴ چگونگی ارتباط بین این دو نرم‌افزار از طریق برنامه واسط طراحی‌شده میان آنها را نشان می‌دهد.

٤-۱ نتایج شبیه‌سازی به ازای $\gamma = ۰/۱۵$ و $m = ۱$

در ابتدا و به عنوان نمونه، نتایج به دست آمده از اجرای مدل پیشنهادی روی سیستم مورد مطالعه به ازای $\gamma = ۰/۱۵$ و $m = ۱$ نشان داده شده است. مقدار m در طول افق برنامه‌ریزی یکسان فرض شده است (همچنان که در [۱۰] مقدار ثابتی برای کشش قیمتی در بلندمدت در نظر گرفته شده است). جدول ۱ واحدهای پیشنهادی طرح توسعه نهایی و سال احداث آنها را نشان می‌دهد. در شکل ۵ میانگین LMP شین‌های شبکه در طول افق برنامه‌ریزی رسم شده است.

با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود قیمت‌ها از سال اول تا سوم روندی صعودی دارند که این به خاطر افزایش سالانه بار مصرفی و عدم نصب واحد تولیدی جدید در این سال‌ها می‌باشد. از طرفی به علت نصب واحدهای جدید در سال چهارم و پنجم، قیمت‌ها مقداری کاهش را تجربه می‌کنند. از سال ششم به بعد روند صعودی مجدداً تکرار می‌شود.

همان طور که در بخش دوم بیان شد، نصب واحدهای جدید غالباً منجر به کاهش LMP می‌گردد. این مسئله باعث کاهش انگیزه برای سرمایه‌گذاری در سال‌های بعد می‌شود که باید با پرداخت بهای آمادگی جبران شود. در جدول ۲، مقدار بهای آمادگی اختصاص‌یافته به واحدهای جدید نشان داده شده است. بهای آمادگی از سال احداث تا انتهای افق برنامه‌ریزی و فقط به واحدهای جدید پرداخت می‌شود.

٤-۲ بررسی تأثیر پاسخگویی بار

برای تحلیل اثر پاسخگویی بار کشسان بر برنامه‌ریزی توسعه تولید، شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای مقادیر مختلف ضریب پاسخگویی انجام گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد به ازای $m = ۰/۰۰۱$، تقریباً حداکثر بار تأمین می‌شود $(\sum_t\sum_j De_{jt} \cong \sum_t\sum_j De_{jt}^{\max})$. این به معنی آن است که برای این مقدار از m، بار تقریباً غیر کشسان است و کران بالای ضریب پاسخگویی برابر ۳ در نظر گرفته شده است.

1. Mixed Integer Nonlinear Programming
2. Quadratic Programming

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲: بهای آمادگی پرداختی به واحدهای جدید (بر حسب میلیون دلار).

سال	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
U۱۷	۰	۰	۰	۴۵٫۶	۴۵٫۶	۴۵٫۶	۴۵٫۶	۴۵٫۶	۴۵٫۶	۴۵٫۶
U۸	۰	۰	۰	۰	۴۴٫۵	۴۴٫۵	۴۴٫۵	۴۴٫۵	۴۴٫۵	۴۴٫۵

جدول ۳: مقادیر پارامتر m در شبیه‌سازی‌ها.

m	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۱	۰٫۳	۱	۳
$\log(m)$	−۳	−۲٫۵	−۲	−۱٫۵	−۱	−۰٫۵	۰	۰٫۵

جدول ۴: واحدهای جدید و سال احداث طرح‌های توسعه پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف m.

m	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۱	۰٫۳	۱	۳
سال ۱								
سال ۲	U۹	U۱۲	U۹	U۱۲	U۱۷			
سال ۳	U۱۷ ،U۸	U۱۷ ،U۸	U۱۷ ،U۸	U۱۷	U۸	U۱۷ ،U۸		
سال ۴		U۴		U۸			U۱۷	U۱۲
سال ۵	U۷						U۸	U۸
سال ۶			U۴	U۴				
سال ۷	U۴							
سال ۸								
سال ۹					U۴			
سال ۱۰								

جدول ۵: مقادیر شاخص پیشنهادی.

m	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۱	۰٫۳	۱	۳
DDI	۴۳۲	۴۲۵	۴۰۰	۳۷۵	۲۸۳	۲۰۰	۱۳۵	۱۳۵

۶ مقدار در یک مقیاس نیمه‌لگاریتمی بین این دو کران در نظر گرفته شده که در جدول ۳ این مقادیر نشان داده شده‌اند.

در جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف m آمده است. این جدول نشان می‌دهد افزایش پاسخگویی بار باعث تعویق نیاز به توسعه واحدهای جدید و/یا کاهش ظرفیت نصبی می‌گردد. برای کمی‌سازی این کاهش و تعویق در توسعه، یک شاخص ساده به نام DDI [1] پیشنهاد شده است. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود

$$DDI = \sum_{i' \in \Lambda} \frac{PG_{i'}^{\max}}{year_{i'}} \qquad (۲۰)$$

در (۲۰) $year_{i'}$ نشانگر سال احداث واحد جدید با اندیس i' می‌باشد. به عنوان مثال برای طرح پیشنهادی جدول ۱، مقدار شاخص پیشنهادی به صورت $DDI = ۳۰۰/۴ + ۳۰۰/۵ = ۱۳۵$ محاسبه می‌شود.

در واقع با توجه به امکان تغییر و تعویق گزینه‌های توسعه در نتیجه پاسخگویی بار، برای مقایسه نتایج در حالات مختلف (و نشان‌دادن توأمان این کاهش و تعویق)، چنین شاخصی پیشنهاد شده است. جدول ۵ مقدار شاخص DDI متناظر طرح‌های جدول ۴ را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت، پاسخگویی بیشتر بار موجب کاهش در شاخص DDI شده است که مقادیر کمتر این شاخص نمایانگر نیاز به ظرفیت‌های کمتر در نصب واحدهای تولید یا تعویق احداث آنها می‌باشد.

برای بررسی جنبه‌های اقتصادی مسئله، مقدار هزینه‌ای که شرکت‌های تولید برای توسعه متحمل شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. هزینه کل سرمایه‌گذاری در توسعه تولید (TIC) را می‌توان از (۲۱) محاسبه نمود

$$TIC = \sum_{i' \in \Lambda} \sum_{t=1}^{T} \frac{I_{i't}}{(1+d)^{t-1}} \qquad (۲۱)$$

در شکل ۶ تغییرات هزینه سرمایه‌گذاری کل و همچنین کل بار تأمین‌شده در افق برنامه‌ریزی ($\sum_t \sum_j D_{jt}$) به صورت نرمالیزه در کنار هم رسم شده است. مقدار مبنای در نظر گرفته شده برای نرمال‌سازی این دو پارامتر به ترتیب برابر ۱۷۴۰ میلیون دلار و ۲۶۰۲۵ مگاوات بوده است.

همچنان که در شکل ۶ پیداست، TIC با افزایش پاسخگویی بار، کاهش چشمگیری را تجربه می‌کند. برای مثال وقتی ضریب پاسخگویی از ۰٫۰۰۱ به ۰٫۱ افزایش می‌یابد، هزینه سرمایه‌گذاری کل تا ۵۵٪ مقدار اولیه‌اش کاهش می‌یابد.

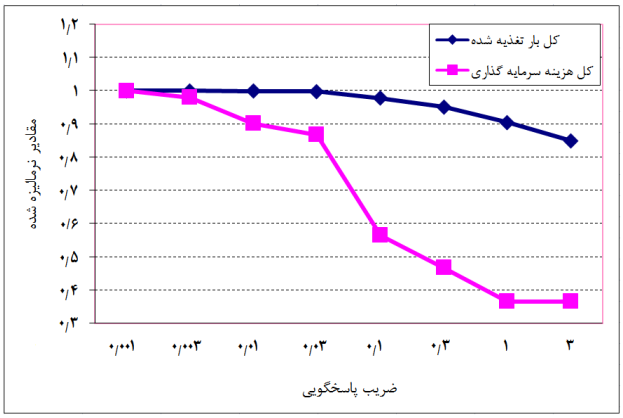
۴-۳ بررسی تأثیر سطح مشارکت مشتریان

درصد بار پاسخگو به قیمت نسبت به کل بار (γ) می‌تواند به عنوان سطح مشارکت مشتریان در پاسخگویی بار قلمداد شود. این پارامتر می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر تصمیم به سرمایه‌گذاری در توسعه تولید بگذارد. برای تحلیل این موضوع، سه مقدار مختلف از سطح مشارکت مشتریان مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های این بخش برای چهار مقدار از m انجام شده است. بعد از مشخص‌شدن طرح‌های پیشنهادی در هر حالت، شاخص DDI متناظر هر یک محاسبه شده که نتایج در شکل ۷ به نمایش درآمده است. همان طور که در شکل ۷ مشخص است، افزایش میزان مشارکت مشتریان باعث کاهش شاخص می‌شود و لذا می‌توان نتیجه گرفت هر چه سطح مشارکت مشتریان در

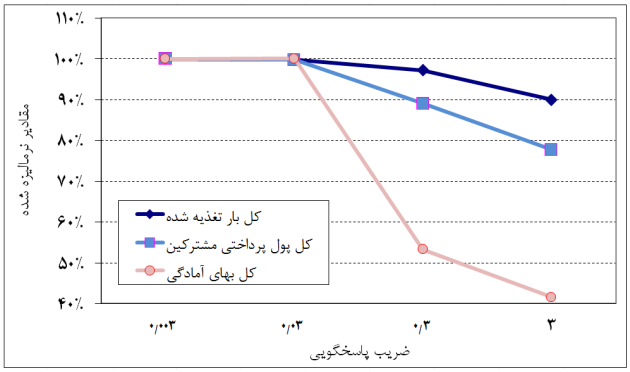
1. Decrement and Deferment Index

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۶: هزینه سرمایه‌گذاری کل و بار تأمین‌شده (به ازای $\gamma = ۰/۱۵$).



شکل ۸: تغییرات *TCP*، *TPC* و کل بار تغذیه‌شده نسبت به ضریب پاسخگویی.

پاسخگویی بار و حساسیتشان به قیمت بیشتر باشد، نیاز به توسعه تولید کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین مقدار *TIC* برای ۱۲ حالت فوق محاسبه شده که جدول ۶ مقادیر آن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود کاهش در هزینه سرمایه‌گذاری برای $m \geq ۰/۳$ شدیدتر است.

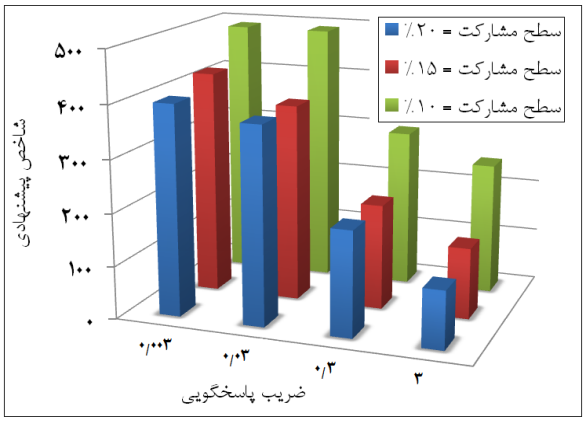
٤-٤ تأثیرات پاسخگویی بار بر هزینه‌های مشتریان

معمولاً هر گونه مخارج و هزینه‌ای در سمت تولید، به صورت غیر مستقیم به مشتریان تحمیل می‌شود و لذا بهای آمادگی پرداختی به شرکت‌های تولیدی نیز توسط مشتریان تأمین می‌گردد. البته بحث در مورد چگونگی تخصیص این مبلغ به مشتریان، خارج از موضوع این مقاله است. طبق نتایج این بخش، ملاحظه می‌شود که افزایش ضریب پاسخگویی منجر به کاهش قابل توجهی در کل بهای آمادگی (*TCP*) و نیز پرداختی کل مشتریان (*TPC*) می‌گردد. مقدار این دو پارامتر از روابط زیر تعیین می‌شود

$$TCP = ۸۷۶۰ \times \sum_{i' \in \Lambda} \sum_{t=۱}^{T} \frac{CP^*_{i't} \times X^*_{i't}}{(۱+d)^{t-۱}} \qquad (۲۲)$$

$$TPC = ۸۷۶۰ \times \left(\sum_{j=۱}^{NJ} \sum_{t=۱}^{T} \frac{LMP^*_{jt} \times D^*_{jt}}{(۱+d)^{t-۱}} + \sum_{i' \in \Lambda} \sum_{t=۱}^{T} \frac{CP^*_{i't} \times X^*_{i't}}{(۱+d)^{t-۱}} \right) \qquad (۲۳)$$

طبق (۲۳)، پرداختی کل مشتریان برابر مجموع پرداخت بابت هزینه‌های انرژی و نیز بهای آمادگی می‌باشد. پارامترهای *TCP* و *TPC* برای کمترین سطح مشارکت مشتریان (یعنی $\gamma = ۰/۱$) و به ازای مقادیر مختلف m محاسبه شده‌اند. همچنین کل بار تغذیه‌شده در طول افق برنامه‌ریزی نیز محاسبه گردیده است. این سه پارامتر (یعنی *TCP*، *TPC* و کل بار تغذیه‌شده) نسبت به حداکثر مقدارشان نرمالیزه شده و در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷: مقدار شاخص *DDI* (به ازای $\gamma = ۰/۱$، ۰/۱۵، ۰/۲).

جدول ۶: هزینه سرمایه‌گذاری کل (بر حسب میلیون دلار).

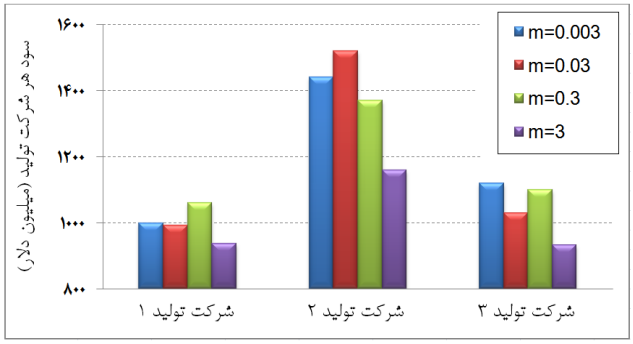
m	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۳	۳
$\gamma = ۰/۱$	۲۰۳۰	۲۰۳۰	۱۲۲۰	۱۱۰۰
$\gamma = ۰/۱۵$	۱۷۰۰	۱۵۱۰	۸۱۳	۶۳۶
$\gamma = ۰/۲$	۱۵۷۰	۱۵۱۰	۸۱۳	۵۲۴

مطابق شکل ۸، افزایش ضریب پاسخگویی از ۰/۰۳ به ۰/۳ باعث ۳٪ کاهش در کل بار تأمین‌شده می‌شود و این کاهش منجر به حدوداً ۴۷٪ کاهش در *TCP* می‌گردد، با وجود این کل پرداختی مشتریان (*TPC*) فقط ۱۰٪ کاهش می‌یابد. این نتیجه قابل توجه دلالت بر این دارد؛ پاسخگویی به قیمت حتی در کمترین سطح مشارکت مشتریان (۱۰٪) باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های آنها می‌شود. به عبارت دیگر اگر مشتریان مصرف خود را (در پاسخ به قیمت) فقط ۳٪ کاهش دهند، با کاهش ۱۰٪ هزینه‌ها، منفعت اقتصادی مناسبی کسب خواهند کرد. شایان ذکر است منافع به دست آمده برای همه مشتریان (اعم از پاسخگو و غیر پاسخگو به قیمت) خواهد بود. حداکثر کاهش هزینه‌های مشتریان، به ازای $m = ۳$ و حدود ۲۲٪ می‌باشد.

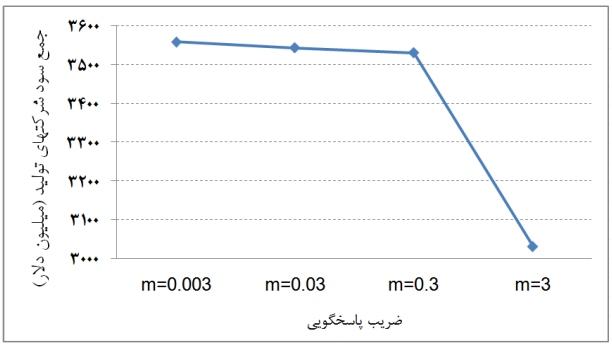
٤-٥ تأثیرات پاسخگویی بار بر سود شرکت‌های تولید

مهم‌ترین هدف هر شرکت تولید، حداکثرنمودن سود خود می‌باشد. در اینجا نیز برای بررسی مسئله از دیدگاه شرکت‌های تولید، سود آنان مورد بررسی قرار گرفته است. انتظار می‌رود هر چه کشسانی بار بیشتر باشد، سود شرکت‌های تولید کمتر شود [۷]. سود یک شرکت تولید دلخواه (Genco_k) به این صورت محاسبه می‌شود که مجموع هزینه تولید شرکت و هزینه سرمایه‌گذاری شرکت را از کل پول پرداختی به شرکت کم می‌کنیم. یادآوری می‌شود تمام جملات این رابطه در فرم ارزش فعلی خالص هستند (نرخ تنزیل در نظر گرفته شده است). شکل ۹ سود هر یک از شرکت‌های تولید و شکل ۱۰ مجموع سود کل شرکت‌های تولید را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این بخش، شرکت‌های تولید با اندیس ۴ و ۵، سهمی در تأمین بار نداشته‌اند و لذا در شکل ۹ نشان داده نشده‌اند. با دقت در شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود سود هر یک از شرکت‌های تولید با افزایش ضریب پاسخگویی روند خاصی را دنبال نمی‌کند (گاهی افزایش و گاهی کاهش می‌یابد)، اما مجموع سود آنها با پاسخگویی بیشتر بار کاهش می‌یابد. این موضوع به خاطر تعویق یا کاهش میزان توسعه واحدهای تولیدی جدید می‌باشد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۹: سود هر یک از شرکت‌های تولید به ازای ضرایب مختلف پاسخگویی بار (m).



شکل ۱۰: کل سود شرکت‌های تولید به ازای ضرایب مختلف پاسخگویی بار (m).

جدول پ-۱: پیک بار پیش‌بینی شده برای هر سال.

سال	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
پیک بار (مگاوات)	۱۹۵۰	۲۱۳۰	۲۲۵۰	۲۴۰۰	۲۵۵۰	۲۶۸۰	۲۸۱۵	۲۹۵۰	۳۱۰۰	۳۲۰۰

جدول پ-۲: توزیع بار.

شین	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
توزیع بار	۰	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۵	۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۰	۰/۰۵	۰	۰/۰۶	۰	۰/۰۴	۰/۰۴
شین	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
توزیع بار	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰	۰/۰۷	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۳

۵- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار در بهره‌برداری سیستم قدرت مورد توجه فراوان واقع شده است. با افزایش مشارکت مشتریان در بهره‌برداری، نیاز به بازبینی مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم قدرت احساس می‌شود.

در این مقاله مدلی برای تحلیل تأثیرات پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی غیر متمرکز توسعه تولید ارائه شده است. در این راستا اثرات پاسخگویی بار بر کاهش نیاز به توسعه واحدهای تولید مفصلاً مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با معرفی یک شاخص ساده جدید، تعویق و/یا کاهش توسعه تولید به صورت عددی ارزیابی شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۰ باسه IEEE آزمایش شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مقادیر مختلف ضریب پاسخگویی و نیز سطوح مختلف مشارکت مشتریان در پاسخگویی بار، مورد مطالعه قرار گرفته است و همچنین تغییرات هزینه‌های سرمایه‌گذاری در توسعه تولید، کل بهای آمادگی پرداختی و نیز کل پرداختی مشتریان در حالت‌های مختلف تجزیه و تحلیل شده است. نتایج به دست آمده نقش قابل توجه پاسخگویی بار در تعویق و/یا کاهش نیاز به توسعه تولید را تأیید می‌کنند. طبق نتایج، فقط ۳٪ کاهش در مصرف برق (در اثر کشش قیمتی) می‌تواند منجر به منفعت اقتصادی در حدود ۱۰٪ برای کل مشتریان بشود.

با استفاده از مدل پیشنهادی این مقاله، قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران می‌توانند تأثیرات پاسخگویی بار بر تصمیم به سرمایه‌گذاری شرکت‌های تولید و همچنین هزینه‌های متحمل‌شده توسط مشتریان را بررسی نمایند. البته بررسی کامل و جامع اثرات پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی توسعه تولید، نیاز به تحقیقات تکمیلی بیشتری دارد. پیشنهاد می‌شود در ادامه این پژوهش، تأثیر پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی توسعه تولید از دیدگاه قابلیت اطمینان نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

پیوست

جدول پ-۱ پیک بار پیش‌بینی شده برای ۱۰ سال و جدول پ-۲ توزیع بار شین‌های سیستم را نشان می‌دهد. مشخصات واحدهای تولیدی نیز در جدول پ-۳ ارائه شده است. مشابه [۱۶]، این اطلاعات از آدرس motor.ece.iit.edu/data/planing30.pdf استخراج شده و البته برای این که امکان به کار گیری از این سیستم تست در مقاله فراهم شود، اصلاحاتی جزیی صورت گرفته است.

مراجع

[1] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs," *Applied Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 243-250, Jan. 2010.

[2] A. S. Kowli and G. Gross, "Incorporation of demand response resources in resource investment analysis," in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, 5 pp., Bucharest, Romania, Jan. 2009.

[3] D. Wight, *National Assessment of Demand Response*, Federal Energy Regulatory Commission, Washington, Jan. 2009.

[4] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," *Electric Power System Research*, vol. 80, no. 4, pp. 426-435, Apr. 2010.

[5] S. E. Widergren, "Demand or request: will load behave?" in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 5 pp., Jul. 2009.

[6] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "Application of NSGA-II algorithm to single - objective transmission constrained generation expansion planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 1790-1797, Nov. 2009.

[7] S. Chua - Liang and D. Kirschen, "Quantifying the effect of demand response on electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1199-1207, Aug. 2009.

[8] M. Tanaka, "Real - time pricing with ramping costs: a new approach to managing a steep change in electricity demand," *Energy Policy*, vol. 34, no. 18, pp. 3634-3643, Dec. 2006.

[9] A. K. Kazerooni and J. Mutale, "Transmission network planning under a price based demand response program," in *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition,* 7 pp., Jan. 2010.

[10] D. G. Choi and V. M. Thomas, "An electricity generation planning model incorporating demand response," *Energy Policy*, vol. 42, pp. 429-441, Mar. 2012.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول پ-۳: مشخصات واحدهای تولیدی سیستم.

شرکت تولید	واحد	وضعیت	ظرفیت (مگاوات)	شماره شین	هزینه تولید		هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار بر سال)
					a ($/MW^{2}h)	b ($/MWh)	
۱	U۱	۱	۴۰۰	۱	۰٫۰۲	۱۸٫۶۷	۰
	U۲	۱	۲۰۰	۲	۰٫۰۲	۲۴٫۲۶	۰
	U۳	۱	۳۵۰	۵	۰٫۰۲	۱۹٫۳۶	۰
	U۴	۰	۳۰۰	۴	۰٫۰۲	۲۰٫۶۹	۸۰
۲	U۵	۱	۴۰۰	۸	۰٫۰۲	۱۸٫۴۳	۰
	U۶	۱	۳۰۰	۱۱	۰٫۰۲	۲۰٫۲۳	۰
	U۷	۰	۲۰۰	۱۲	۰٫۰۲	۲۰٫۶۹	۵۳٫۲
	U۸	۰	۳۰۰	۱۶	۰٫۰۲	۱۹٫۶۶	۶۶
	U۹	۰	۳۰۰	۱۷	۰٫۰۲	۱۹٫۶۶	۶۶
	U۱۰	۰	۲۰۰	۲۰	۰٫۰۲	۲۲٫۱۶	۶۰
	U۱۱	۰	۲۰۰	۲۰	۰٫۰۲	۲۲٫۱۶	۶۶
	U۱۲	۰	۳۰۰	۲۰	۰٫۰۲	۱۹٫۶۶	۶۶
۳	U۱۳	۱	۴۰۰	۱۳	۰٫۰۲	۱۸٫۱۶	۰
	U۱۴	۱	۳۰۰	۱۹	۰٫۰۲	۲۰٫۳۸	۰
	U۱۵	۰	۲۰۰	۱۸	۰٫۰۲	۲۲٫۱۶	۷۲
	U۱۶	۰	۲۰۰	۱۸	۰٫۰۲	۲۲٫۱۶	۶۰
	U۱۷	۰	۳۰۰	۱۸	۰٫۰۲	۱۹٫۶۶	۶۶
۴	U۱۸	۰	۱۰۰	۲۳	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۲
	U۱۹	۰	۱۰۰	۲۳	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۲
	U۲۰	۰	۲۰۰	۲۳	۰٫۰۲	۲۴٫۱۶	۶۰
	U۲۱	۰	۱۰۰	۲۴	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۵٫۲
	U۲۲	۰	۱۰۰	۲۴	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۵٫۲
	U۲۳	۰	۲۰۰	۲۴	۰٫۰۲	۲۴٫۱۶	۶۰
	U۲۴	۰	۱۰۰	۲۵	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۸٫۴
	U۲۵	۰	۱۰۰	۲۵	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۸٫۴
	U۲۶	۰	۲۰۰	۲۵	۰٫۰۲	۲۴٫۱۶	۶۰
۵	U۲۷	۰	۱۰۰	۲۷	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۲
	U۲۸	۰	۱۰۰	۲۷	۰٫۰۲	۲۶٫۸۸	۳۲
	U۲۹	۰	۲۰۰	۲۷	۰٫۰۲	۲۲٫۱۶	۶۰

Archive of SID

[11] P. Kaymaz, J. Valenzuela, and C. S. Park, "Transmission congestion and competition on power generation expansion," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 156-163, Feb. 2007.

[12] L. A. Greening, "Demand response resources: who is responsible for implementation in a deregulated market?" *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1518-1525, Apr. 2010.

[13] M. H. Albadi and E. F. El - Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 11, pp. 1989-1996, Nov. 2008.

[14] X. Wang and J. R. McDonald, *Modern Power System Planning*, New York: McGraw - Hill, 1994.

[15] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Y. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*, New York: Wiley, 2002.

[16] R. J. Hyung, M. Shahidehpour, and F. Yong, "Security - constrained resource planning in electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 812-820, May 2007.

[17] W. Xian, L. Yuzeng, and Z. Shaohua, "Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1348-1355, Aug. 2004.

[18] 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, pp. 466-475, Feb. 2005.

[19] S. Kannan and P. Murugan, "Solutions to transmission constrained generation expansion planning using differential evolution," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 19, no. 8, pp. 1033-1039, Jul. 2008.

www.SID.ir

مهدی صمدی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه شاهد تهران و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲ از دانشگاه فردوسی مشهد به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه حکیم سبزواری می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت و بازار برق.

محمدحسین جاویدی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۵۹ از دانشگاه تهران و ۱۳۶۴ از دانشگاه ناگویای ژاپن هر دو در رشته مهندسی برق دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۷۳ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مک گیل کانادا گردید و هم‌اکنون استاد تمام دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل مطالعات سیستم و تجدید ساختار، انرژی‌های نو و شبکه‌های هوشمند است.

محمدصادق قاضی‌زاده مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۶۱ از دانشگاه صنعتی شریف، مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکترای خود در رشته مهندسی برق قدرت را در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه یومیست انگلستان دریافت کرده‌است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده برق دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) تهران می‌باشد. دکتر قاضی‌زاده از بهمن سال ۱۳۹۱، ریاست پژوهشگاه نیرو را بر عهده دارد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل سیستم‌های تجدیدساختار یافته و بازارهای برق، شبکه‌های الکتریکی هوشمند و بهره‌برداری از شبکه الکتریکی می‌باشد.