

برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری در برنامه‌های افزایش بازدهی انرژی

احمد قادری شمیم^۱، دانشجو، محسن پارسا مقدم^۲، استاد، محمد کاظم شیخ‌الاسلامی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران

- آدرس پست الکترونیکی: a.ghaderi@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران

- آدرس پست الکترونیکی: parsa@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران

- آدرس پست الکترونیکی: aleslam@modares.ac.ir

چکیده: افزایش بازدهی انرژی از جنبه‌های مختلف شامل افزایش امنیت انرژی، کاهش رشد مصرف انرژی و کاهش انتشار آلودگی دارای اهمیت بسزایی است. این امر موجب شده است تا ارتقاء بازدهی انرژی از نظر سیاست‌گذاران انرژی مورد توجه قرار گیرد و به عنوان یک گزینه در کنار منابع تولیدی در نظر گرفته شود. در این مقاله برنامه‌های افزایش بازدهی انرژی به صورت یک نیروگاه مجازی تحت عنوان نیروگاه بازدهی (EPP) مدل شده‌اند. همچنین یک چارچوب تصمیم‌گیری جهت مدل‌سازی رفتار سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی در برنامه‌ریزی توسعه تولید ارائه شده است. سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی با کمک این چارچوب، عملکرد شرکت برق را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و استراتژی بهینه برای سرمایه‌گذاری در برنامه‌های بازدهی انرژی را تعیین می‌کند. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید به صورت متمرکز در نظر گرفته شده و با روش برنامه‌ریزی دینامیکی (DP) حل شده است. هر مرحله‌ی زمانی برنامه-ریزی دینامیکی که به عنوان یک دوره بهره‌برداری میان مدت در نظر گرفته شده، به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی مدل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با توجه به پتانسیل بالای صرفه‌جویی انرژی در سمت مصرف، سرمایه‌گذاری در برنامه-های بازدهی انرژی توسعه ظرفیت نیروگاهی را در بلند مدت تحت تاثیر قرار می‌دهد و موجب تاخیر و کاهش نصب نیروگاه‌ها و همچنین کاهش انتشار آلودگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه تولید، برنامه‌های بازدهی انرژی، نیروگاه بازدهی، مسئله بهینه‌سازی دو سطحی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: محسن پارسا مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

اجرای برنامه، ارزیابی سیاست‌های مختلف در راستای عملیاتی کردن برنامه‌ها و ارائه راهکارهای مناسب در جهت حذف موانع موجود برای اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی پرداخته‌اند [۷-۸]. در واقع تاکنون یک مدل اقتصادی برای ارزیابی تاثیر این برنامه ارائه نشده است. بنابراین یک خلاء در ارتباط با مدل‌سازی برنامه‌های بازدهی انرژی و بررسی تاثیر این برنامه‌ها بر سیستم قدرت وجود دارد.

برنامه‌ریزی یکپارچه منابع (IRP) یکی از روش‌های موجود جهت مدل‌سازی برنامه‌های مدیریت مصرف در برنامه‌ریزی توسعه تولید در سیستم قدرت سنتی است. در این روش توسعه منابع سمت عرضه و تقاضا به صورت یکپارچه با هدف کمینه کردن هزینه انجام می‌شود [۹]. در سیستم قدرتی که خصوصی‌سازی انجام شده است، برای توسعه منابع از روش IRP نمی‌توان استفاده نمود. در مرجع [۱۰] چارچوبی تحت عنوان برنامه‌ریزی استراتژیک یکپارچه منابع (IRSP) ارائه شده است که می‌توان با این روش از دید نهاد حاکمیتی برای توسعه منابع سمت عرضه و تقاضا در سیستم قدرتی که خصوصی‌سازی انجام شده استفاده کرد. در این روش، نهاد حاکمیتی با بهره‌گیری از قدرت تنظیم و تاثیرگذاری در سمت عرضه و تقاضا، با هدف افزایش رفاه اجتماعی و در نظر گرفتن مسایل زیست محیطی جهت توسعه منابع سمت عرضه و تقاضا در سطح کلان برنامه‌ریزی می‌کند. در این مرجع تمامی برنامه‌های ارتقاء بازدهی را که موجب کاهش مصرف می‌گردد، به صورت یک نیروگاه مجازی تحت عنوان نیروگاه‌های بازدهی (EPPs) در نظر گرفته شده است. همانطور که اشاره شد در روش IRSP توسعه تولید از دیدگاه نهاد حاکمیتی انجام می‌شود و نمی‌توان برنامه‌های بازدهی انرژی را در مسئله توسعه تولید از دیدگاه یک سرمایه‌گذار خصوصی مدل‌سازی کرد.

در این مقاله هدف اصلی مدل‌سازی برنامه‌های بازدهی انرژی از دید یک سرمایه‌گذار در برنامه‌ریزی توسعه تولید است. در این راستا یک چارچوب تصمیم‌گیری ارائه شده که سرمایه‌گذار برنامه‌های بازدهی انرژی ضمن ارزیابی عملکرد شرکت برق در برنامه‌ریزی میان مدت از بازار برق در شرایط عدم قطعیت، سرمایه‌گذاری بهینه در اجرای برنامه‌های بازدهی را مورد ارزیابی قرار بدهد. این مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی مدل‌سازی شده است. در مسئله پایه که سرمایه‌گذار برای اجرای برنامه‌های بازدهی تصمیم‌گیری می‌کند، هدف ماکزیم کردن سود است و در مسئله پیرو که مدل‌سازی عملکرد شرکت برق در بهره‌برداری میان مدت از بازار برق مد نظر است، هدف ماکزیم کردن رفاه اجتماعی و دریافت سیگنال قیمت جهت تصمیم‌گیری بهینه است.

۳- برنامه‌های بازدهی انرژی

در این مقاله برنامه‌های بازدهی انرژی به آن دسته از برنامه‌های مدیریت مصرف اطلاق می‌شود که با بهبود بازدهی تجهیزات الکتریکی موجود بدون اینکه از رفاه و خدمات ارائه شده به مشترکان کاسته شود میزان

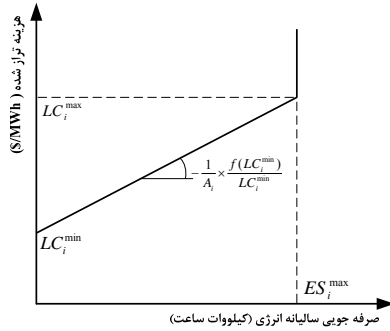
محدودیت منابع انرژی و مسائل زیست محیطی از مهمترین نگرانی‌های سیاست‌گذاران در بخش انرژی است. بنابراین سیاست‌های مختلفی در جهت افزایش امنیت انرژی و کاهش آلودگی زیست محیطی اتخاذ شده است. از جمله این سیاست‌ها می‌توان به طرح‌های حمایتی از منابع تجدیدپذیر و برنامه‌های بازدهی انرژی اشاره کرد. اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۷ طرح ۲۰/۲۰/۲۰ را به تصویب رساند که در این طرح مقرر گردید تا سال ۲۰۲۰ به میزان ۲۰ درصد از کل انرژی مصرفی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تامین شود، بازدهی انرژی به میزان ۲۰ درصد افزایش یابد و همچنین ۲۰ درصد از انتشار آلودگی کاسته شود [۱]. در حال حاضر بازدهی انرژی به صورت یک منبع انرژی تحت عنوان "سوخت ششم" بعد از سوخت زغال سنگ، نفت، گاز، انرژی هسته‌ای و انرژی تجدیدپذیر معرفی شده است [۲]. در این مقاله تاثیر سرمایه‌گذاری برای اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه تولید سیستم قدرت بررسی شده است.

ساختار مقاله به اینصورت است که ابتدا در بخش ۲ مرور ادبیات کلی در ارتباط با پیشینه موضوع انجام می‌شود و سپس در این بخش اهداف مقاله نیز بیان می‌گردد. در بخش ۳ یک مدل اقتصادی برای مدل‌سازی برنامه‌های بازدهی انرژی ارائه می‌گردد. در بخش ۴ چارچوب پیشنهادی برای سرمایه‌گذاری برنامه‌های بازدهی انرژی در برنامه‌ریزی توسعه تولید ارائه می‌شود. در بخش ۵ فرمول‌بندی ریاضی چارچوب پیشنهادی ارائه می‌گردد. در بخش ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش پایانی مقاله به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مرور ادبیات و اهداف مقاله

برنامه‌های مدیریت مصرف از نظر نوع تاثیرگذاری بر منحنی بار به دو دسته برنامه‌های پاسخگویی بار و برنامه‌های بازدهی انرژی تقسیم می‌شوند. برنامه‌های پاسخگویی بار عمدتاً شکل منحنی بار را تغییر می‌دهند و بیشتر به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش قیمت برق اجراء می‌شوند [۳]. برنامه‌های بازدهی انرژی میزان سطح منحنی بار را کاهش می‌دهند و با اهداف کاهش مصرف انرژی، افزایش امنیت انرژی و کاهش انتشار آلودگی اجراء می‌شوند. تاثیرگذاری زمانی برنامه‌های مدیریت مصرف عامل دیگری است که منجر به تمایز برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی در مطالعات سیستم قدرت می‌شوند. تاثیر برنامه‌های پاسخگویی بار در مطالعات بهره‌برداری ساعتی و یا روزانه سیستم قدرت ارزیابی می‌شوند در حالیکه تاثیر برنامه‌های بازدهی انرژی در مطالعات برنامه‌ریزی میان مدت و بلند مدت سیستم قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرند [۴].

مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی و بررسی تاثیر برنامه‌های پاسخگویی بار بر سیستم قدرت انجام شده است [۵-۶] ولی مقالاتی که در ارتباط با برنامه‌های بازدهی انرژی هستند به بررسی هزینه/فایده



شکل (۱): منحنی عرضه نیروگاه بازدهی نام

در رابطه (۵) تغییرات مصرف سالیانه انرژی ارائه شده که بیانگر میزان صرفه جویی سالیانه انرژی (ES_i) حاصل از اجرای برنامه نوع نام است.

$$ES_i = -(f(LC_i) - f(LC_i^{\min})), \quad i = 1, \dots, k \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه (۴) و (۵) در رابطه (۳) نتیجه می شود:

$$ES_i = -A_i \times \frac{f(LC_i^{\min})}{LC_i^{\min}} \times (LC_i - LC_i^{\min}), \quad i = 1, \dots, k \quad (6)$$

این رابطه میزان متوسط صرفه جویی سالیانه انرژی حاصل از برنامه نام را به صورت تابعی از هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی نشان می دهد. با در نظر گرفتن صرفه جویی انرژی به عنوان تولید نیروگاه بازدهی، معکوس رابطه (۶) بیانگر منحنی عرضه نیروگاه بازدهی است که در شکل (۱) و رابطه (۷) ارائه شده است.

$$LC_i = -\frac{1}{A_i} \times \frac{LC_i^{\min}}{f(LC_i^{\min})} \times ES_i + LC_i^{\min}, \quad i = 1, \dots, k \quad (7)$$

شکل (۱) منحنی هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی حاصل از برنامه نام را نمایش می دهد. حداکثر پتانسیل قابل حصول واقع بینانه (RAP) است که با اجرای برنامه نام می توان به این میزان صرفه جویی انرژی دست یافت. شیب این منحنی، معکوس الاستیسیته انرژی نسبت به هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی است. LC_i^{\min} و LC_i^{\max} به ترتیب کمترین و بیشترین هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی در برنامه نام هستند.

۳-۲- سرمایه گذار برنامه های بازدهی انرژی

اجرای برنامه های بازدهی انرژی مستلزم سرمایه گذاری اولیه از قبیل هزینه خرید و نصب تجهیزات پربازده و یا هزینه بهبود و ارتقاء بازدهی فرآیند موجود است. این سرمایه گذاری می تواند توسط خود مشترکان و یا یک سرمایه گذار دیگر مانند شرکت های خدمات انرژی (ESCO) انجام شود. این شرکت ها در کلیه بخش های مصرف کننده انرژی، طرح های مرتبط با بهبود بازدهی انرژی را ممیزی، طراحی، تأمین مالی و اجرا می کنند [۱۲]. این شرکت ها در اجرای برنامه های بازدهی انرژی سرمایه گذاری می کنند و درآمد خود را از محل صرفه جویی انرژی در

مصرف انرژی و هزینه انرژی مشترکان کاهش یابد. برنامه های مختلف ارتقاء بازدهی انرژی در بخش های مختلف مصرف انرژی از نظر اثر بخشی هزینه و پتانسیل صرفه جویی انرژی متنوع هستند. به طور نمونه بهبود بازدهی سیستم روشنایی، سیستم سرمایشی، یخچال- فریزرها در بخش مصرف کنندگان از دو جنبه اثر بخشی هزینه و پتانسیل صرفه جویی متفاوت هستند.

۳-۱- مدل سازی برنامه های بازدهی انرژی

در این مقاله برای مدل سازی تاثیر برنامه های بازدهی انرژی بر میزان مصرف انرژی برق از رابطه (۱) استفاده شده است. این رابطه مفهومی مشابه تابع تولید در اقتصاد را دارد و تاثیر هزینه تراز شده صرفه جویی هر واحد انرژی را بر مصرف انرژی بیان می کند.

$$E_i = f(LC_1, LC_2, \dots, LC_i, \dots, LC_k) \quad (1)$$

که در آن E_i میزان مصرف انرژی برق در سال t و f تابعی است که رابطه بین مصرف انرژی برق و هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی را در برنامه های بازدهی انرژی به صورت یک تابع بیان می کند. هزینه تراز شده (LC_i) صرفه جویی هر واحد انرژی در برنامه های مختلف با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است [۱۱].

$$LC_i = \frac{IC_i \cdot CRF}{AES_i} \quad (2)$$

که در آن IC_i هزینه مورد نیاز برای اجرای برنامه نام، CRF ضریب بازگشت سرمایه و AES_i صرفه جویی انرژی سالیانه حاصل از اجرای برنامه نام هستند.

در رابطه (۳) این تابع با استفاده از بسط تیلور خطی شده است. بنابراین در صورت وجود k نوع برنامه بهبود بازدهی، k تابع خطی شده خواهیم داشت که بیانگر رابطه بین مصرف انرژی و هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی در برنامه مورد نظر هستند.

$$f(LC_i) = f(LC_i^{\min}) + \frac{df(LC_i^{\min})}{dLC} \times (LC_i - LC_i^{\min}) \quad (3)$$

که در آن i اندیس برنامه بازدهی انرژی، LC_i^{\min} کمترین هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی در برنامه نام و جمله دیفرانسیلی تغییرات مصرف سالیانه انرژی نسبت به هزینه تراز شده صرفه جویی انرژی در برنامه نام است. الاستیسیته A_i که در رابطه (۴) نشان داده شده در برنامه های مختلف یکسان نیست. این تفاوت به عوامل مختلفی از قبیل هزینه اولیه هر برنامه، پتانسیل صرفه جویی انرژی موجود حاصل از اجرای هر برنامه، پذیرش اجرای برنامه از سمت مصرف کنندگان و ... بستگی دارد.

$$A_i = \frac{LC_i^{\min}}{f(LC_i^{\min})} \times \frac{df(LC_i^{\min})}{dLC}, \quad i = 1, \dots, k \quad (4)$$

قالب قرارداد از مشترکان دریافت می‌کنند. در این مقاله نیز مکانیزم عملکرد سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی مشابه شرکت‌های خدمات انرژی در نظر گرفته شده است.

۴- چارچوب پیشنهادی سرمایه‌گذاری در نیروگاه بازدهی

در این بخش چارچوب تصمیم‌گیری جهت مدل‌سازی تعامل سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی با دیگر نیروگاه‌های معمولی در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید ارائه شده است.

۴-۱- مسئله تصمیم‌گیری بهینه سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی

با توجه به اینکه اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی تاخیر زمانی زیادی ندارند، سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی می‌تواند در دوره بهره‌برداری میان مدت سیستم برای اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی تصمیم‌گیری نماید. بنابراین در چارچوب پیشنهادی، سرمایه‌گذار در یک دوره بهره‌برداری میان مدت بازار برق، عملکرد شرکت برق را مد نظر قرار می‌دهد و برای اجرای بهینه برنامه‌های بازدهی انرژی تصمیم‌گیری می‌کند و سپس تاثیر آن بر برنامه‌ریزی توسعه تولید اعمال می‌شود.

نیروگاه بازدهی از محل تسویه بازار برق درآمدی کسب نمی‌کند و درآمد آن از محل کاهش هزینه انرژی مشترکان است. بنابراین سیگنال قیمت برق بر رفتار سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی تاثیرگذار خواهد بود و بطور متقابل کاهش مصرف انرژی حاصل از اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی بر قیمت برق تاثیرگذار است. از اینرو این مسئله یک بهینه‌سازی دو سطحی است که در مسئله پایه هدف ماکزیمم کردن سود سرمایه‌گذار است که میزان انرژی صرفه‌جویی شده سالیانه تعیین می‌شود و در مسئله پیرو مدل‌سازی عملکرد شرکت برق در دوره بهره‌برداری از بازار برق است. هدف مسئله پیرو ماکزیمم کردن رفاه اجتماعی است که در نتیجه قیمت بازار در دوره بهره‌برداری تعیین می‌شود. در مسئله‌های دو سطحی مسئله پیرو به عنوان یکی از قیدهای مسئله پایه در نظر گرفته می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۳].

۴-۲- مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید

در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید نیروگاه‌ها به صورت ساده با تصمیم‌گیری متمرکز در نظر گرفته شده است و سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی با توجه به سیگنال قیمت برق در دوره بهره‌برداری، تصمیم بهینه برای سرمایه‌گذاری را اتخاذ می‌کند. هدف مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید متمرکز تعیین زمان نصب نیروگاه جدید و نوع تکنولوژی با کمترین هزینه در طول دوره برنامه‌ریزی است. از آنجا که مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در طول دوره برنامه‌ریزی یک مسئله تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای است که در هر مرحله چندین حالت دارد، از روش



شکل (۲): ساختار مسئله دو سطحی تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار

برنامه‌ریزی دینامیکی برای حل این مسئله استفاده شده است [۱۴-۱۵].

با توجه به اینکه مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید متمرکز با هدف کمترین هزینه به روش برنامه‌ریزی دینامیکی حل می‌شود، در هر مرحله و حالت برنامه‌ریزی دینامیکی هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها موجود و نصب نیروگاه جدید بایستی کمینه شود. بنابراین در هر مرحله، از دید نهاد تصمیم‌گیر متمرکز هزینه نصب نیروگاه‌های جدید و هزینه بهره‌برداری از نیروگاه‌های موجود کمینه می‌شود و از دید سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی مطابق با مسئله بهینه‌سازی دو سطحی تصمیم بهینه برای اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی با هدف ماکزیمم کردن سودش گرفته می‌شود. همچنین میزان انتظاری از دست رفتن بار (LOLE^s) به عنوان شاخص قابلیت اطمینان در برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته شده است.

۵- فرمول‌بندی ریاضی

در این بخش به فرمول‌بندی مسئله سرمایه‌گذاری پرداخته شده است.

۵-۱- سرمایه‌گذاری در نیروگاه بازدهی

در مسئله بهینه‌سازی دو سطحی، مسئله پایه مربوط به تصمیم‌گیری بهینه برای اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی از دید یک سرمایه‌گذار است. هدف مسئله پایه ماکزیمم کردن سود سرمایه‌گذار است که در رابطه (۸) ارائه شده است. بخش اول تابع هدف شامل درآمد سرمایه‌گذار است که از محل کاهش هزینه انرژی مصرف‌کننده و فروش گواهی کاهش انتشار آلودگی بدست می‌آید. بخش دوم تابع هدف مربوط به هزینه اجرای برنامه‌های بازدهی است که از منحنی هزینه صرفه‌جویی انرژی هر برنامه محاسبه می‌شود. $EE_{i,t}$ متغیرهای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار است که بیانگر میزان بهینه صرفه‌جویی انرژی حاصل از برنامه t ام برحسب مگاوات‌ساعت در سال t است. همانطور که مشاهده می‌شود تابع هدف یک تابع غیر خطی است.

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^k EE_{i,t} \cdot \begin{bmatrix} (SC_i \cdot \pi_i^{ave} + Em_{CO_2} \cdot CP) \\ -(LC_i^{\min} - EE_{i,t} / 2A_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن N_t تعداد واحدهای موجود در سال t است. میزان صرفه جویی انرژی حاصل از اجرای برنامه های بازدهی انرژی که به عنوان متغیرهای تصمیم مسئله پایه هستند با توجه به رابطه (۱۵) بر بار مبنای پیش-بینی شده تاثیر می گذارد.

$$D_{base,tsl}^m = D_{base,tsl}^f - LR_{tsl} \quad (15)$$

که در آن $D_{base,tsl}^f$ مقدار بار مبنای پیش بینی شده در دوره زمانی tsl است و $D_{base,tsl}^m$ مقدار بار مبنای در دوره زمانی tsl است که توسط مقدار کاهش سطح بار حاصل از اجرای برنامه بازدهی انرژی (LR_{tsl}) اصلاح شده است. کاهش سطح بار حاصل از اجرای برنامه های بازدهی انرژی با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه شده است. در این رابطه ضریب سهم $B_{i,tsl}$ کاهش سطح بار حاصل از اجرای برنامه نام در دوره زمانی d_{sl} است.

$$LR_{tsl} = \frac{\sum_{i=1}^k B_{i,tsl} \cdot EE_{i,t}}{d_{sl}} \quad (16)$$

در رابطه (۱۲) ضرایب آلفا و بتا در هر سطح بار با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) تعیین می شود [۱۴].

$$\beta_{tsl} = dc \cdot D_{base,tsl}^{mod} \quad (17)$$

$$\alpha_{tsl} = \frac{\beta_{tsl}}{pc \cdot \pi_{base,tsl}} \quad (18)$$

که در آن dc و pc به ترتیب ضریب بار و ضریب قیمت در تابع تقاضا هستند. $\pi_{base,tsl}$ که قیمت مبنای پیش بینی شده بازار است با روش حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها بر اساس لیست حق تقدم از واحدها محاسبه شده است.

در این مقاله برای حل مسئله بهینه سازی دو سطحی از روش مبتنی بر تکرار بنام قطری سازی^۶ استفاده شده است [۱۶]. به اینصورت که خروجی مسئله پایه به عنوان ورودی مسئله پیرو است و خروجی مسئله پیرو به عنوان ورودی مسئله پایه در نظر گرفته می شود و این روند تا زمانی تکرار می شود تا اینکه قید همگرایی برآورده شود. همانطور که اشاره شد، هر دو مسئله بهینه سازی پایه و پیرو هر غیر خطی هستند؛ برای حل این مسئله های بهینه سازی غیر خطی از solver بهینه سازی غیر خطی Baron نرم افزار GAMS استفاده شده است و برای ایجاد حلقه تکرار این نرم افزار با MATLAB لینک شده است. از حل مسئله بهره برداری، کل هزینه بهره برداری واحدهای موجود مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می شود و در هر مرحله از برنامه ریزی دینامیکی به عنوان ورودی مسئله برنامه ریزی توسعه تولید اعمال می شود.

$$C_{ope,t} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{N_j} d_{sl} \cdot P_{j,tsl} \cdot PC_j(F_{i,j}, EM_j) \quad (19)$$

در این تابع t اندیس سال، i اندیس برنامه بهبود بازدهی انرژی، SC_i درصد سهم سرمایه گذار از محل کاهش هزینه انرژی مصرف کننده در برنامه نام، Em_{co2} میزان کاهش انتشار کربن به ازای هر واحد صرفه جویی انرژی، CP قیمت هر برگه بهادار گواهی کاهش انتشار بر حسب دلار بر هر تن است. قیود این تابع بهینه سازی محدودیت پتانسیل صرفه جویی انرژی هر برنامه است ($ES_{i,t}^{max}$) که در رابطه (۹) نشان داده شده است.

$$0 \leq EE_{i,t} \leq ES_{i,t}^{max}, \quad \forall i \quad (9)$$

یکی دیگر از قیدهای مسئله پایه، مسئله پیرو است. قیمت برق یکی از متغیرهای مسئله پیرو است و متوسط آن در طول دوره بهره برداری (π_t^{ave}) از حل مسئله پیرو بدست می آید و به عنوان یک پارامتر تاثیرگذار در مسئله پایه است. مسئله پیرو در روابط (۱۰) تا (۱۴) ارائه شده است که برای دریافت سیگنال قیمت برق، عملکرد شرکت برق را مدل می کند. ماکزیمم کردن رفاه اجتماعی به عنوان تابع هدف مسئله پیرو است که در رابطه (۱۰) ارائه شده است.

$$Maximize \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_l} d_{sl} \left(\begin{array}{l} D_{tsl} \cdot \pi_{tsl} \\ - \sum_{j=1}^{N_j} P_{j,tsl} \cdot PC_j(F_{i,j}, EM_j) \end{array} \right) \quad (10)$$

که در آن s, l, j و z به ترتیب اندیس سطح بار، فصل و واحدهای تولیدی هستند. پارامترهای N_s و N_l به ترتیب بیانگر تعداد فصل و سطح بار هستند. d_{sl} طول دوره زمانی هر سطح بار در هر فصل بر حسب ساعت است و PC_j هزینه تولید واحد z ام بر حسب دلار بر مگاوات ساعت است که تابعی از قیمت سوخت و میزان انتشار آلودگی واحد است. π_{tsl}, D_{tsl} و $P_{j,tsl}$ متغیرهای مسئله پیرو هستند که به ترتیب میزان بار، قیمت برق و میزان تولید واحد z ام در دوره زمانی tsl هستند. رابطه (۱۱) قید توازن بار و تولید در دوره زمانی tsl را در مسئله پیرو اعمال می کند.

$$D_{tsl} = \sum_{j=1}^{N_j} P_{j,tsl} \quad (11)$$

رابطه (۱۲) الاستیک بودن تابع تقاضا را در مسئله مدل می کند. این قید باعث غیر خطی شدن مسئله پیرو می شود.

$$D_{tsl} = -\alpha_{tsl} \cdot \pi_{tsl} + \beta_{tsl} \quad (12)$$

که در آن ضرایب آلفا و بتا ثابت های تابع تقاضا هستند که در هر سطح بار متفاوت هستند. رابطه (۱۳) قید محدودیت انرژی در واحدهای آبی را در مسئله بهینه سازی اعمال می کند.

$$\sum_{l=1}^{N_l} d_{sl} \cdot P_{j,tsl} \leq E_s^{hy}, \quad \forall j = 1, \dots, N_{hy} \quad (13)$$

که در آن E_s^{hy} و N_{hy} به ترتیب میزان انرژی واحد آبی در هر فصل و تعداد واحدهای آبی موجود است. رابطه (۱۴) قید محدودیت حداکثر و حداقل تولید توان نیروگاه های موجود را بیان می کند.

$$P_j^{min} \leq P_{j,tsl} \leq P_j^{max} \quad \forall j = 1, \dots, N_t \quad (14)$$

۵-۲- برنامه‌ریزی توسعه تولید

در رابطه (۲۰) تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت نیروگاه با هدف کمترین هزینه و در روابط (۲۱) تا (۲۴) قیود حاکم بر این مسئله ارائه شده‌اند.

$$J_0(.) = \text{Min}_{\omega_{L,t}, \omega_{F,t}} E \left\{ \sum_{t=0}^T [(1+r)^{-t} \cdot TC_t(X_t, L_t, F_t, U_t, \omega_{L,t}, \omega_{F,t})] \right\} \quad (20)$$

در این رابطه هزینه کل (TC_t) شامل هزینه بهره‌برداری از نیروگاه-های موجود و هزینه نصب ظرفیت جدید در مرحله زمانی t است که به صورت تابعی از بردار ظرفیت نیروگاه‌های موجود (X_t)، ماتریس بار (L_t)، قیمت سوخت (F_t)، بردار ظرفیت تولید جدید در آن مرحله زمانی (U_t)، تغییرات تصادفی در بار ($\omega_{L,t}$) و تغییرات تصادفی در قیمت سوخت ($\omega_{F,t}$) است. $J_0(.)$ هزینه کل تنزیل شده انتظاری در طول دوره برنامه‌ریزی است. رابطه (۲۱) بردار ظرفیت نیروگاه را در هر مرحله زمانی به صورت تابعی از ظرفیت مرحله قبل و بردار ظرفیت تولید جدید نشان می‌دهد.

$$X_{t+1} = X_t + U_{t+1-l_t} \quad (21)$$

در این رابطه l_t زمان تاخیر مربوط ساخت نیروگاه جدید را اعمال می‌کند. روابط (۲۲) و (۲۳) به ترتیب بار پیش‌بینی شده و قیمت سوخت را در هر مرحله زمانی به صورت تابعی از مقدار مرحله قبل و مقدار تغییرات احتمالی آن نشان می‌دهند.

$$L_{t+1} = L_t + \omega_{L,t} - ALR_t \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) تاثیر میزان کاهش سطح بار حاصل از اجرای برنامه-های بازدهی انرژی بر رشد بار سال بعد اعمال می‌شود. ماتریس بار شامل درایه‌های $D_{base,tst}^f$ و ماتریس کاهش سطح بار (ALR_t) شامل درایه‌های LR_{tst} هستند.

$$F_{t+1} = F_t + \omega_{F,t} \quad (23)$$

قید شاخص قابلیت اطمینان حاکم بر مسئله برنامه‌ریزی به صورت رابطه (۲۴) اعمال می‌شود:

$$LOLE_t \leq M \quad (24)$$

که در آن M بالاترین مقدار شاخص قابلیت اطمینان است. برای حل این مسئله بهینه‌سازی توسعه تولید از روش برنامه‌ریزی دینامیکی پیشرو استفاده می‌شود [۱۴]. رابطه بازگشتی برای محاسبه هزینه کل در هر مرحله به صورت رابطه (۲۵) بیان می‌شود.

$$J_{t+1}(\cdot) = \text{Min} \left\{ TC_{t+1}(\cdot) \times (1+r)^{-1} + \frac{E}{\omega_{L,t}, \omega_{F,t}} \left[J_t(f(X_t, L_t, F_t, U_t, \omega_{L,t}, \omega_{F,t})) \right] \right\} \quad (25)$$

همانطور که در رابطه (۲۶) ارائه شده است، در هر مرحله هزینه کل از دو مولفه تشکیل می‌شود. عبارت اول هزینه بهره‌برداری از واحدهای موجود است و عبارت دوم سرمایه‌گذاری برای نصب را نشان می‌دهد.

$$TC_t(\cdot) = C_{ope,t}(X_t, L_t, F_t) + \sum_n C_{inv,t,n}(U_{t,n}) \quad (26)$$

۶- مطالعات عددی

در بخش مطالعات عددی از اطلاعات گزارش سازمان بهره‌وری انرژی (سابا) برای مدل‌سازی برنامه‌های بازدهی انرژی استفاده شده است [۱۷] و از اطلاعات واحدهای تولیدی شبکه تست IEEE برای شبیه-سازی برنامه‌ریزی توسعه تولید بهره‌گیری شده است.

۶-۱- برنامه‌های بازدهی انرژی

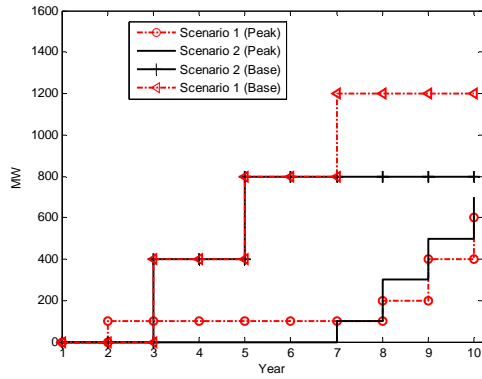
هزینه تراز شده صرفه‌جویی انرژی حاصل از اجرای برنامه‌های بهبود بازدهی در ۵ بخش مختلف مصرف در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به اینکه در هر نوع مصرف، برنامه‌های بهبود بازدهی انرژی مختلفی وجود دارد، با استفاده از رابطه (۲) هزینه تراز شده صرفه‌جویی انرژی در برنامه‌های مختلف محاسبه شده است. در ستون دوم و سوم جدول (۱) کمترین و بیشترین مقدار هزینه تراز شده صرفه‌جویی انرژی در هر نوع مصرف تعیین شده است. به طور مثال کمترین و بیشترین هزینه تراز شده صرفه‌جویی انرژی در مصرف روشنایی به ترتیب برابر ۷ و ۵۳ دلار بر مگاوات‌ساعت است که کمترین مقدار مربوط به جایگزین کردن لامپ رشته‌ای با لامپ‌های CFL در بخش خانگی و بیشترین مقدار مربوط به جایگزین کردن لامپ‌های بخار جیوه با لامپ‌های متال هالید در بخش مصرف‌کنندگان صنعتی است. در ستون چهارم جدول (۱) پتانسیل صرفه‌جویی انرژی سالانه در هر نوع مصرف به صورت درصدی از کل انرژی مصرفی سالانه سیستم ارائه شده است.

۶-۲- معرفی شبکه تست و فرضیات مسئله

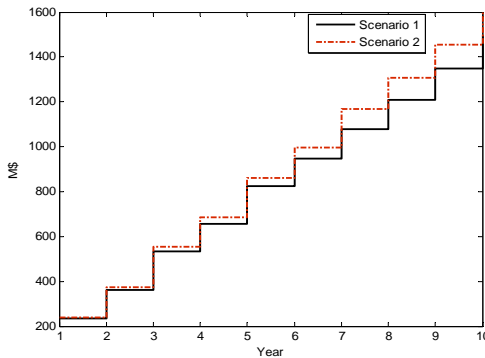
در سال شروع برنامه‌ریزی ظرفیت نصب شده و پیک بار سیستم به ترتیب ۳۴۰۵ و ۲۸۵۰ مگاوات است. در شبکه تست انواع مختلف نیروگاه از نظر نوع تکنولوژی و نوع سوخت موجود است که اطلاعات مربوط به تعداد، ظرفیت، هزینه تولید و احتمال خروج هر یک در جدول (۲) ارائه شده است [۱۸].

جدول (۱): مدل برنامه‌های بازدهی انرژی

ES _{ij} ^{max} (%)	LC _{ij} ^{max} (\$/MWh/yr)	LC _{ij} ^{min} (\$/MWh/yr)	نوع مصرف
۰/۸۲۹	۵۳	۷	روشنایی
۰/۴۱۷	۸۳	۴۱	سرمایشی
۰/۵۶۵	۳۷۲	۶۵	یخچال-فریزر
۰/۵۸	۴۹	۳	الکتروموتورهای صنعتی
۰/۳۶	۶۸	۳	الکترومپ‌های کشاورزی



شکل (۳): توسعه ظرفیت نیروگاه پایه و پیک



شکل (۴): هزینه کل تنزیل شده شرکت تولیدی در دو سناریو

توسعه ظرفیت در شکل (۳) نشان شده است. با مقایسه نتایج سناریوی اول و دوم مشاهده می شود که با سرمایه گذاری در برنامه های بازدهی انرژی، ۳۰۰ مگاوات از میزان توسعه ظرفیت در افق برنامه ریزی ۱۰ ساله در مقایسه با سناریوی اول کاهش یافته است. برنامه های بازدهی انرژی موجب کاهش سطح بار می شوند و به صورت نیروگاه های پایه عمل می کنند؛ این امر موجب می شود تا در برنامه ریزی توسعه تولید، نیروگاه بازدهی جایگزین نیروگاه پایه شود. در شکل (۴) هزینه کل تنزیل شده انتظاری $J_i(t)$ در هر مرحله برنامه ریزی دینامیکی در سناریوی اول و دوم نشان داده شده است. اجرای برنامه ها موجب کاهش ۶/۴۷ درصد هزینه کل سیستم شده است. این کاهش هزینه از محل کاهش هزینه بهره برداری و همچنین نصب ظرفیت جدید است.

نتایج شبیه سازی در جدول (۴) ارائه شده است. با اجرای برنامه ها در کل ۲۹۸ مگاوات از پیک بار در مقایسه با سناریوی اول کاهش یافته است. این امر موجب شده در طول ۱۰ سال ۷/۵۹ درصد از میزان افزایش مصرف انرژی و در نتیجه از انتشار کربن کاسته شود. کل هزینه تنزیل شده سرمایه گذار در دوره برنامه ریزی برابر ۵۶ میلیون دلار است. از آنجا که میزان کاهش پیک بار ۲۹۸ مگاوات بوده و طول دوره قرارداد سرمایه گذار برنامه های بازدهی انرژی با مشترکان به مدت ۳ سال در نظر گرفته شده، به طور متوسط هزینه سالیانه شده نصب هر مگاوات نیروگاه بازدهی ۶۴/۳ هزار دلار است که به طور متوسط از هزینه نصب سالیانه شده نیروگاه های پایه و پیک که در جدول (۳) ارائه شده بیشتر است. با توجه هزینه و درآمد نیروگاه بازدهی در طول دوره برنامه ریزی

جدول (۲): مشخصات نیروگاه های موجود در شبکه تست

نوع	تعداد	ظرفیت (مگاوات)	هزینه بهره برداری (دلار بر مگاوات ساعت)	احتمال خروج
A	۵	۱۲	۳۵	۰/۰۲
B	۴	۲۰	۶۰	۰/۱۰
C	۶	۵۰	۰	۰/۰۱
D	۴	۷۶	۱۸	۰/۰۲
E	۳	۱۰۰	۳۰	۰/۰۴
F	۴	۱۵۵	۱۵	۰/۰۴
G	۳	۱۹۷	۲۸	۰/۰۵
H	۱	۳۵۰	۱۴	۰/۰۸
I	۲	۴۰۰	۸	۰/۱۲

در این مقاله دوره برنامه ریزی ۱۰ سال و دوره بهره برداری ۱ سال در نظر گرفته شده است. هر دوره بهره برداری به ۴ فصل مختلف و هر فصل به ۳ دوره زمانی با سطح بار کم، متوسط و زیاد تقسیم بندی شده است. ضرایب بار در فصل های مختلف به ترتیب ۱، ۱/۲، ۱/۲ و ۰/۹ و همچنین ضرایب بار در هر فصل برای سه دوره مختلف به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۲/۵ در نظر گرفته شده است [۱۴]. قیمت گواهی کاهش کربن (CER) نیز ۵ دلار بر تن و ضریب کاهش انتشار کربن نیز ۰/۶۳۵ تن به ازای هر مگاوات ساعت صرفه جویی انرژی در نظر گرفته شده است.

محدودیت انرژی هر واحد آبی در هر سال ۲۰۰ گیگاوات ساعت است که به ترتیب در فصول مختلف به میزان ۰/۳۵، ۰/۳۵، ۰/۱۰ و ۰/۲۰ قابل دسترس است. عدم قطعیت میزان رشد بار و قیمت سوخت با استفاده از زنجیره مارکوف در نظر گرفته شده است. باند پائین و بالا برای رشد بار به ترتیب ۰/۴ و ۰/۶ و برای سوخت باند پائین و بالا به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ با احتمال برابر در نظر گرفته شده است. مقادیر pc و dc نیز به ترتیب ۲ و ۱/۸ و نرخ تنزیل در شبیه سازی ۰/۵ در نظر گرفته شده است. فرض شده که در برنامه ریزی توسعه تولید فقط دو نوع تکنولوژی پیک و پایه که اطلاعات آنها در جدول (۳) ارائه شده است به عنوان واحدهای کاندیدا برای توسعه هستند [۱۴].

۳-۶ نتایج شبیه سازی

دو سناریوی مختلف برای شبیه سازی توسعه ظرفیت در طول دوره برنامه ریزی در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول توسعه ظرفیت بدون در نظر گرفتن برنامه های بازدهی انرژی انجام شده و در سناریوی دوم با در نظر گرفتن سرمایه گذار نیروگاه بازدهی انجام شده است. نتایج

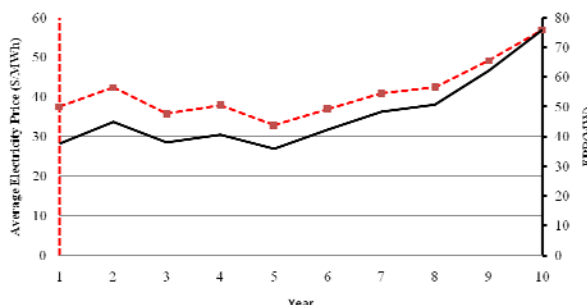
جدول (۳): مشخصات نیروگاه های کاندیدا برای توسعه

ظرفیت		
تکنولوژی پیک	تکنولوژی پایه	
۱۰۰	۴۰۰	ظرفیت
۲۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	هزینه نصب (\$/MW/yr)
۴۰	۱۴	هزینه بهره برداری (\$/MWh)
۱	۳	مدت زمان ساخت (سال)

که اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی به میزان ۷/۵۹ درصد از رشد مصرف انرژی در طول ۱۰ سال برنامه‌ریزی در مقایسه با سناریوی مبنا کاسته است. از نظر سرمایه‌گذار با توجه به درآمدی که از محل کاهش هزینه انرژی و فروش گواهی کاهش کربن بدست می‌آورد این میزان سرمایه‌گذاری توجیه اقتصادی دارد. بنابراین برای افزایش میزان صرفه‌جویی انرژی به بیش از این مقدار، سرمایه‌گذار بایستی از سمت رگولاتور حمایت شود. از طرف دیگر ارزیابی تاثیر اجرای این برنامه‌ها در برنامه‌ریزی توسعه تولید در طول دوره برنامه‌ریزی نشان داد که در مقایسه با سناریوی مبنا هزینه‌های نصب و بهره‌برداری سیستم به میزان ۶/۴۷ درصد کاهش یافته است. با اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی در طول دوره برنامه‌ریزی به میزان ۲۹۸ مگاوات از پیک بار در مقایسه با سناریوی مبنا کاسته شده است که این امر موجب کاهش ۳۰۰ مگاوات کاهش توسعه ظرفیت نیروگاهی شده است.

جدول (۴): نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی

هزینه کل تنزیل شده سرمایه‌گذار EPP (M\$)	۵۶
نرخ بازگشت داخلی (%)	۲۰
کاهش انتشار کربن (%)	۷/۵۹
میزان کاهش پیک بار (%)	۲۹۸
هزینه نصب (اجراء) (\$/MW/yr)	۶۴۳۰۰



شکل (۵): تاثیر متوسط قیمت برق بر میزان نیروگاه بازدهی

نرخ بازگشت داخلی سرمایه‌گذاری برابر ۳۲ درصد شده است و در صورتی که نرخ بهره کمتر از این مقدار باشد، سرمایه‌گذاری در این برنامه‌ها برای سرمایه‌گذار توجیه اقتصادی خواهد داشت. روند کلی تغییرات متوسط قیمت برق در طول ۱۰ سال به علت افزایش بودن قیمت سوخت صعودی است ولی همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است به علت پائین بودن هزینه بهره‌برداری نیروگاه پایه با نصب واحد ۴۰۰ مگاواتی از این نوع نیروگاه در سال سوم و پنجم موجب کاهش متوسط قیمت شده است. با توجه به اینکه یکی از عوامل موثر بر اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی قیمت برق است، شکل (۵) تاثیر تغییرات قیمت برق را بر میزان نیروگاه بازدهی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده، سینگال قیمت بازار به طور مستقیم بر میزان سرمایه‌گذاری برای اجرای برنامه‌های بازدهی انرژی تاثیر می‌گذارد.

۷- نتیجه

از آنجا که برنامه‌های بهبود بازدهی انرژی موجب کاهش سطح بار می‌شوند، در این مقاله به صورت یک نیروگاه مجازی تحت عنوان نیروگاه بازدهی (EPP) در نظر گرفته شد. در ادامه یک چارچوب تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی ارائه شد. در این چارچوب مسئله تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی مدل شد که در مسئله پایه هدف ماکزیمم کردن سود سرمایه‌گذار نیروگاه بازدهی است و مسئله پیرو که عملکرد شرکت برق مدل شده هدف ماکزیمم کردن رفاه اجتماعی و دریافت سینگال قیمت است. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی حل شده است. در برنامه‌ریزی توسعه تولید عدم قطعیت بلند مدت قیمت سوخت و رشد بار با استفاده از روش زنجیره مارکوف به صورت احتمالاتی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد

مراجع

- [1] Stankeviciute, L. and Criqui P., "Energy and climate policies to 2020: the impacts of the European "20/20/20" approach," *International journal of energy sector management*, vol. 2, pp. 252-273, 2008.
- [2] Y. Çengel, "Energy efficiency as an inexhaustible energy resource with perspectives from the US and Turkey," *International Journal of Energy Research*, vol. 35, pp. 153-161, 2011.
- [3] C. Goldman, "Coordination of energy efficiency and demand response," *National Action Plan for Energy Efficiency* (Lawrence Berkeley National Laboratory), 2010.
- [4] Federal Energy Regulatory Commission Staff, "Assessment of Demand Response and Advanced Metering", Federal Energy Regulatory Commission, FERC, Aug 2006 to 2009.
- [5] S. Chua-Liang and D. Kirschen, "Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1199-1207, 2009.
- [6] H. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. Yousefi, "Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 243-250, 2011.
- [7] C. Blumstein, C. Goldman, and G. Barbose, "Who should administer energy-efficiency programs?," *Energy Policy*, vol. 33, pp. 1053-1067, 2005.
- [8] F. Alvarez and H. Rudnick, "Impact of energy efficiency incentives on electricity distribution companies," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1865-1872, 2010.
- [9] E. Hirst and C. Goldman, "Creating the future: Integrated resource planning," *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 16, pp. 91-121, 1991.
- [10] Z. Hu, Q. Wen, J. Wang, X. Tan, H. Nezhad, B. Shan, et al., "Integrated resource strategic planning in China," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 4635-4642, 2010.
- [11] C. W. Gellings, G. Wikler, and D. Ghosh, "Assessment of U.S. Electric End-Use Energy Efficiency Potential," *The Electricity Journal*, vol. 19, pp. 55-69, 2006.

- [12] J. Ellis, *Energy service companies (ESCOs) in developing countries*, International Institute for Sustainable Development, 2010.
- [13] Garces, x, L. P. s, A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand, and R. Romero, "A Bilevel Approach to Transmission Expansion Planning Within a Market Environment," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1513-1522, 2009.
- [14] T. Barforoushi, M. P. Moghaddam, M. Javidi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Evaluation of regulatory impacts on dynamic behavior of investments in electricity markets: a new hybrid DP/GAME framework," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1978-1986, 2010.
- [15] A. Botterud, M. D. Ilic, and I. Wangensteen, "Optimal investments in power generation under centralized and decentralized decision making," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 254-263, 2005.
- [16] X. Hu and D. Ralph, "Using EPECs to model bilevel games in restructured electricity markets with locational prices," *Operations research*, vol. 55, pp. 809-827, 2007.
- [۱۷] محسن پارسا مقدم، بررسی تبعات و محرک‌های زیست محیطی مدیریت مصرف برق در بلند مدت، سازمان بهره‌وری انرژی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۱۳۹۱.
- [18] P. Subcommittee, "IEEE reliability test system," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 2047-2054, 1979.

زیر نویس ها

- ¹ Efficiency Power Plants (EPPs)
- ² Levelized Cost (LC)
- ³ Realistic Achievable Potential (RAP)
- ⁴ Energy Service Company (ESCO)
- ⁵ Loss of Load Expectation (LOLE)
- ⁶ Diagonalization