

برنامه ریزی برای گسترش ظرفیت تولید برق در ایران به کمک روش برنامه‌ریزی احتمالی

علیرضا تقی پور رضوان^۱؛ عباس سیفی^۲

چکیده

در این مقاله، یک الگوی برنامه‌ریزی خطی احتمالی با متغیرهای عدد صحیح ارائه شده است که مجموع هزینه های تولید را با توجه به فن‌آوری‌های مختلف تولید برق در طول بازه زمانی مورد مطالعه، حداقل می‌سازد. در این الگو، میزان تقاضا غیر قطعی است و سه حالت برای تقاضا در قالب برنامه‌ریزی احتمالی در نظر گرفته شده است. در این الگو کل کشور به مناطقی تقسیم شده که تصمیمات گسترش ظرفیت برای هر یک از مناطق در یک الگوی یکپارچه گرفته می‌شود. همچنین در این الگو، ساز و کاری در نظر گرفته شده است تا کاهش هزینه‌های سرمایه گذاری، با بومی شدن فن‌آوری و افزایش یادگیری نیز در الگو منظور شوند. در انتها نیز به منظور تحلیل نتایج خروجی الگوی بهینه سازی، الگوی پویایی سیستمها ایجاد شده است تا تاثیر برنامه ارائه شده روی شاخصهایی از صنعت برق نظیر هزینه و سود تحت هر یک از حالت‌های تقاضا مورد مطالعه قرار گیرد. برنامه بهینه گسترش ظرفیت پیشنهاد شده توسط الگو، شامل فن‌آوری‌های مختلف تولید برق است که نیروگاه گازی بیشترین سهم از گسترش ظرفیت را داراست. نیروگاه‌های برق آبی، سیکل ترکیبی، هسته‌ای، زمین گرمایی و بادی نیز در طرح بهینه وجود دارند.

کلمات کلیدی

برنامه ریزی گسترش ظرفیت، صنعت برق، تولید برق، برنامه ریزی احتمالی، پویایی سیستمها

A Stochastic Programming Model for Power Generation Expansion Planning in Iran

A. Taghipoor Rezvan , A. Seifi

ABSTRACT

In this paper, by developing a mixed integer stochastic programming model, total cost of construction of new power generation capacity using various technologies and the cost of generating electricity during a planning horizon is minimized. The demand is considered uncertain in this model and is assumed to follow three possible scenarios. In this study, the country is divided to several regions and the investment decisions are taken for each region in an integrated model. Furthermore, a learning mechanism of technologies is considered in the model, so the cost of investment in technologies will decrease as installed capacity of each technology is increasing. Finally, in order to analyze the output of optimization model, by developing a system dynamic model, the impacts of the proposed plan on some power industry indicators such as cost and profit is shown with respect to each demand scenario.

The resulting capacity expansion plan consists of various power generation technologies among which gas turbine power plant constitutes the biggest part of the expansion plan. Other technologies such as hydro, combined cycle, nuclear, geothermal and wind power plants exist in the expansion plan.

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر : Email: alirezatag@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Email: aseifi@aut.ac.ir



KEYWORDS

Capacity Expansion Planning, Power Industry, Power Generation, Stochastic Programming, System Dynamics

به طور واقعی مد نظر باشد استفاده از چنین الگویی مناسب‌تر خواهد بود.

برنامه ریزی چند هدفه برای تصمیم‌گیری با وجود چند تابع هدف متناقض از طریق تبدیل آن به مسئله‌ای با یک تابع هدف انجام می‌شود. اهداف مختلف در یک مسئله گسترش سیستم قدرت می‌تواند کمینه‌سازی هزینه، کمینه‌سازی آلودگی محیطی و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم باشد [۴].

برنامه ریزی پویا مسئله بهینه‌سازی چند مرحله‌ای را به یک سری مسایل ساده تبدیل می‌کند و از طریق روش بازگشتی مسئله را در جهت بهینه‌سازی تابع هدف حل می‌کند. برنامه ریزی پویا و تلفیق آن با برنامه‌های شبیه‌سازی هزینه تولید در بسته‌های نرم‌افزاری معروف مانند WASP استفاده شده است [۵]. در سالهای اخیر از کاربرد الگوریتم ژنتیک، به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری در سیستمهای قدرت نتایج خوبی به ویژه در برخورد با مسایل با ابعاد بزرگ بدست آمده است [۶].

عدم قطعیت، یکی از موضوعاتی است که صنعت برق در سالهای گذشته با آن روبرو بوده است. پارامترها و فاکتورهایی نظیر رشد بار، قیمت سوخت، هزینه سرمایه، و قوانین تاثیر زیادی روی بازدهی سرمایه‌گذاری در صنعت برق دارند که این پارامترها نیز خود تحت تاثیر شرایط غیر قطعی هستند. برنامه ریزی احتمالی یک روش مطالعه تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت در طول زمان می‌باشد. عدم قطعیت می‌تواند در پارامترهای الگو و یا در خود الگو باشد. عدم قطعیت در طول زمان توسط حالتی که تقریبی از آینده هستند الگو می‌شود. روش برنامه ریزی احتمالی جوابی را که در مقابل عدم قطعیت‌های آینده استوار است تعیین می‌کند. مقالات [۷]، [۸] به بررسی مسئله گسترش ظرفیتهای تولید برق با رویکرد برنامه ریزی احتمالی پرداخته‌اند. مقاله [۹] مسئله گسترش ظرفیتهای تولید برق را در حالتی که قیمتهای سوخت برای آینده غیر قطعی هستند مطالعه کرده است. در مقاله [۱۰] نیز یک الگوی برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای برای گسترش ظرفیتهای تولید برق حرارتی ارائه شده است که در این الگو قابلیت دسترسی به واحدهای حرارتی در آینده غیر قطعی است. یک الگوی ساده شده برنامه ریزی احتمالی دو مرحله‌ای را می‌توان مطابق با رابطه (۱) نوشت که این رابطه به نام شکل گسترده^۲ الگوی برنامه ریزی احتمالی معروف است.

۱- مقدمه

گسترش سیستم قدرت^۱ بخشی از برنامه ریزی انرژی است و بیشتر براساس سیاستهای خاص توسعه در جهت منابع ملی هر کشور انجام می‌شود. در این مسئله هزینه اقتصادی طرح گسترش و محدودیت منابع انرژی نقش عمده‌ای در سیاستگذاری دارد. هدف از برنامه ریزی انرژی بررسی جامع منابع انرژی و ایجاد هماهنگی بین این منابع (فن‌آوریهای تولید برق) است. علاوه بر سیاستهای مبتنی بر منافع ملی، گسترش سیستم قدرت هماهنگ با میزان افزایش تقاضای انرژی در آینده صورت می‌گیرد.

هدف از برنامه ریزی گسترش ظرفیت تولید جستجو برای انتخاب اقتصادی‌ترین طرح گسترش با دست‌یابی به یک سطح خاص قابلیت اعتماد و مطابق با پیش‌بینی افزایش تقاضا در یک دوره زمانی خاص است.

در این طرح، پرسشهایی که باید پاسخ داده شوند عبارتند از:
۱- نوع نیروگاه‌های تولید قدرت که باید به سیستم اضافه شوند چیست؟

۲- هزینه سوخت و منابع انرژی مورد نیاز در طرح کدامند؟
۳- زمان ساخت و بهره‌برداری از این واحدها چه وقت است؟
۴- مکان استقرار این واحدهای تولیدی در کجاست؟

۲- مرور بر تاریخچه گسترش ظرفیت تولید برق

در سالهای اخیر، روش‌های گوناگونی برای بررسی و حل مسئله گسترش ظرفیت تولید برق مطرح شده‌اند و الگوهای تجاری گوناگونی در این زمینه ایجاد شده‌اند.

۱-۲- روشهای الگو نمودن مسئله گسترش ظرفیت تولید برق

الگوهای برنامه ریزی خطی از سی سال پیش تا کنون کاربردهای موفقی را در حل مسئله گسترش ظرفیت تولید برق داشته‌اند. برتری برنامه ریزی خطی، قابلیت الگو نمودن مسائل بزرگ و پیچیده و همچنین اجرای ساده آن به کمک الگوریتم‌های موجود است [۳].

در برنامه ریزی خطی با متغیرهای عدد صحیح، ظرفیت واحدهای نیروگاهی در اندازه‌های مشخصی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه واحدهای تولید نیروگاهی در اندازه‌های استاندارد موجود هستند، در مسائلی که انتخاب پروژه‌ها

$$\min z = c^T x + \sum_{k=1}^K p_k q_k^T y_k \quad (1)$$

$$s.t. Ax = b$$

$$T_k x + W y_k = h_k \quad k = 1, \dots, K$$

$$x \geq 0, y_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, K$$

در این رابطه فرض شده است که حالت‌های ممکن یک مجموعه K عنصری باشد که p_k احتمال وقوع هریک از حالتها است. این رابطه نشان‌دهنده یک الگوی خطی احتمالی دومرحله‌ای معمول است. از آن جهت به این الگو دو مرحله‌ای گفته می‌شود که متغیرهای تصمیم طی دو مرحله بدست می‌آیند. تصمیمات مرحله اول با بردار x نشان داده شده است. در مرحله دوم مقدار متغیر غیر قطعی مطابق با هر حالت ممکن مشخص می‌شود و با مشخص شدن آن، بردارهای q, h و T معلوم مشخص می‌شوند. سپس تصمیمات مرحله دوم y برای هر حالت تعیین می‌شود.

۲-۲- الگوهای تجاری موجود برای گسترش بخش انرژی

با توجه مهم بودن مسئله و همچنین ارزش اقتصادی ساخت نیروگاه‌های مناسب، الگوهای بسیار زیادی در این زمینه ایجاد شده اند که هر یک به گونه‌ای به گسترش ظرفیتهای بخش انرژی مربوط می‌شوند. در این قسمت بعضی از این الگوها مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه می‌شوند [۱].

الگوی مارکال^۲ که توسط آژانس بین المللی انرژی طراحی شده است، مجموعه‌ای از الگوهای سیستمی انرژی با رویکرد تحلیلی پایین به بالا است. این الگوها، هر دو بخش عرضه و تقاضای انرژی را در برمی‌گیرند. مارکال قادر است برای برنامه‌ریزان و سیاستگذاران بخش‌های خصوصی و دولتی، توضیحات و جزئیات وسیعی از فن‌آوری‌های تولید و مصرف انرژی را فراهم آورد. همچنین می‌تواند ارتباط بین اقتصاد کلان و مصرف انرژی را به شکلی قابل فهم، تفسیر و توجیه نماید. الگوی مارکال کل بخشهای انرژی را شامل می‌شود.

مسیح^۳ (الگوی آلترناتیوهای سیستم‌های عرضه انرژی و اثرات کلی زیست محیطی آنها) یک الگوی بهینه‌یابی است که برای برنامه‌ریزی‌های میان‌مدت و بلندمدت انرژی، تحلیل سیاست‌های انرژی و توسعه حالتها به کار می‌رود. ریشه‌های توسعه آن به برنامه سیستم‌های انرژی IASA^۴ در دهه ۷۰ برمی‌گردد. این الگو نیز مانند مارکال برای برنامه ریزی همه بخشهای انرژی قابل استفاده است.

الگوی WASP^۱ که توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی ایجاد شده است عمومی ترین و مشهورترین نرم افزار در این

زمینه می‌باشد که توسط کشورهای زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. این الگو فقط گسترش بخش های نیروگاهی را مد نظر قرار می‌دهد. این الگو به صورت ملی و منطقه ای قابل استفاده است. در نهایت این الگو تعیین می‌کند که چه نوع نیروگاه‌هایی باید به سیستم اضافه شوند تا سیستم در سطحی از قابلیت اعتماد پاسخگوی تقاضا بوده و مجموع هزینه‌ها را مینیمم کند ولی مکانی که باید نیروگاه در آنجا ساخته شود را تعیین نمی‌کند.

نمزه^۵ سیستم الگو نمودن انرژی ملی آمریکا؛ برای بازه زمانی تا سال ۲۰۲۵ میلادی طراحی شده است. سیاستگذاری در تولید، تبدیل، مصرف و قیمت انرژی بر اساس این الگو برای دوره زمانی مورد مطالعه طراحی می‌شود. طراحی سیاست‌های انرژی در سیستم به هم پیوسته اقتصاد و انرژی انجام شده و تاثیر سیاست‌های انرژی بر تعامل سیستم اقتصاد و انرژی در موضوعات و زمینه‌های مختلفی مانند مسائل مالی و اقتصاد کلان، بازار جهانی انرژی، هزینه‌ها و نحوه دسترسی به منابع انرژی، معیارهای انتخاب فن‌آوری‌های تولید و مصرف انرژی، ویژگی‌های عملکردی و هزینه فن‌آوری‌های انرژی و متغیرهای جمعیتی مورد بررسی قرار گرفته است. این الگو شامل بسته‌های نرم‌افزاری بسیار زیادی است که در بخش تقاضا از روش پویایی سیستمها برای برآورد تقاضا استفاده شده است ولی در بخش عرضه انرژی از روشهای بهینه سازی به منظور الگو نمودن و تصمیم سازی استفاده شده است [۱۱].

۳- الگو و اجرای برنامه ریزی گسترش ظرفیت

مسئله گسترش ظرفیت تولید برق شامل تغییرات موجودی سرمایه صنعت برق در بازه برنامه ریزی از طریق سرمایه گذاری است. این مسئله به این پرسش پاسخ می‌دهد که چگونه صنعت برق، قابلیت‌های تولید خود را در اثر تغییر تقاضا و یا مقررات عمومی تغییر می‌دهد. این الگو شامل تصمیمات سرمایه گذاری در ظرفیتهای جدید می‌شود. همچنین محدودیتهای آلودگی های محیطی توسط واحدهای تولیدی نیز در این الگو لحاظ خواهند شد.

نیروگاه‌ها را می‌توان به سه دسته واحدهای بار پایه، میانی، و قله تقسیم بندی کرد. واحدهای بار پایه واحدهایی هستند که هزینه سرمایه گذاری آنها بالا ولی هزینه عملیاتی آنها پایین است. این نوع واحدها در طول کل زمانهای برنامه ریزی قابل بارگیری هستند. در صورتی که کار دائم تولید برق مورد انتظار باشد (بار پایه)، فن‌آوری با هزینه‌ای زیاد سرمایه‌ای و هزینه

کم اجرا انتخاب مناسبی برای استفاده در افزایش ظرفیت تولید خواهد بود. در مقابل واحدهای قله واحدهایی هستند که هزینه سرمایه گذاری کم و عملیاتی زیادی دارند و در طول ساعات قله بار گیری می‌شوند. در صورتی که برآورده کردن حداکثر نیاز مصرف انرژی (قله بار) مورد نظر باشد، واحدهای قله گزینه مناسب‌تری برای گسترش ظرفیت خواهند بود. واحدهای میانی نیز واحدهایی هستند که در بین این دو حالت قرار دارند الگوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت به دنبال انتخاب مناسبی بین انواع نیروگاه‌های پایه، میانی و پیک با توجه به رشد تقاضا است.

ظرفیت تولید نیز به تفکیک شرکتهای برق منطقه‌ای موجود الگو شده‌اند. صنعت برق شامل ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای در سطح کشور است که ظرفیت تولید به تفکیک این مناطق در نظر گرفته شده و ظرفیت انتقال برق نیز برای سادگی فقط شامل ظرفیت انتقال بین هر یک از مناطق فرض شده است.

این الگو از روش برنامه‌ریزی خطی احتمالی با متغیرهای عدد صحیح برای حل مسئله گسترش ظرفیتها استفاده می‌کند. در این الگو از کمینه سازی ارزش خالص کاسته شده هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی در بازه زمانی برنامه‌ریزی برای تعیین برنامه گسترش ظرفیت استفاده شده است. بازه زمانی برنامه‌ریزی ۲۰ سال و مراحل برنامه‌ریزی دو ساله در نظر گرفته شده‌اند.

کل بار سالیانه با تقسیم بندی فصلی (تابستان، زمستان، بهار/پاییز) و ساعات روز (روز، غروب و شب) به ۹ بخش تقسیم شده است. دو بخش هم برای قله تابستان و زمستان جداگانه در نظر گرفته شده‌اند.

انواع فن‌آوری های توزیع‌پذیر نظیر بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، پیل سوختی و هسته‌ای و انواع فن‌آوریهای تجدیدپذیر نظیر برق آبی و زمین گرمایی و انواع فن‌آوریهای متناوب نظیر بادی، حرارتی خورشیدی و فتوولتائیک در الگو لحاظ شده‌اند.

در این الگو متغیرهای تصمیم شامل ساخت ظرفیتهای جدید تولید (فن‌آوری‌های توزیع پذیر، تجدید پذیر و متناوب)، و مبادله برق واحدها (بین مناطق) می‌باشد. این الگو ترکیبی از گزینه‌های موجود که موجب رعایت مقررات محیطی و تولید اقتصادی و قابل اطمینان برق در طول افق برنامه‌ریزی می‌شود را ارائه می‌کند.

۳-۱- تابع هدف

تابع هدف مسأله کمینه سازی مجموع تنزیل شده ارزش هزینه‌های گسترش جهت پاسخگویی به تقاضا با رعایت قوانین

محیطی در طول افق برنامه‌ریزی است. ضریب هر متغیر تصمیم ارزش حال هزینه‌های تنزیل شده به قیمت سال جاری است. اجزای هزینه‌ای تابع هدف شامل موارد زیر می‌گردد.

هزینه ساخت ظرفیت جدید (CBLD*BLD)

هزینه ساخت ظرفیت جدید برای منطقه دیگر (CBDI*BDI)

هزینه عملیاتی ثابت واحدهای توزیع پذیر (CFXD*EXD)

هزینه‌های عملیاتی شامل حمل و نقل برای ظرفیتهای توزیع پذیر (COPD*OPD)

هزینه عملیاتی ظرفیت تجدید پذیر (COPR*OPR)

هزینه عملیاتی ظرفیت آبی (COPH*OPH)

هزینه سوخت گاز، نفت کوره و گازوئیل (PNG*QNG)

(POL*QOL و PGO*QGO)

هزینه برآورده نشدن تقاضا (CUSD*USD)

متغیرهای تصمیم مسئله در دو مرحله اتخاذ می‌شوند. متغیرهای مرحله اول تصمیمات مربوط به گسترش ظرفیت است. پارامتر غیر قطعی در این الگو تقاضا است. متغیرهای تصمیم مرحله دوم بعد از مشخص شدن مقدار پارامتر غیر قطعی تقاضا تعیین می‌شوند. متغیرهای مرحله دوم شامل میزان تولید هر یک از انواع ظرفیتهای و تقاضای پاسخ داده نشده در هر مرحله است. تابع هدف به شکل زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \text{Min} & \sum_{y,f,c} \text{CBLD}_{src} \cdot \text{BLD}_{src} + \sum_{y,e,f,c} \text{CBDI}_{src} \cdot \text{BDI}_{src} + \sum_{y,f,c} \text{CFXD}_{src} \cdot \text{EXD}_{src} \\ & + \sum_{s \in S} P_s \left\{ \sum_{y,r,d,l} \text{COPD}_{yrd} \cdot \text{OPD}_{yrd} + \sum_{y,r,n} \text{COPR}_{yrm} \cdot \text{OPR}_{yrm} + \sum_{y,r,l} \text{COPH}_{yrl} \cdot \text{OPH}_{yrl} \right\} \\ & + \sum_{y,r} (\text{PNG}_y \cdot \text{QNG}_{rys} + \text{POL}_y \cdot \text{QOL}_{rys} + \text{PGO}_y \cdot \text{QGO}_{rys}) + \sum_{y,r,l} \text{CUSD}_{yl} \cdot \text{USD}_{yrl} \end{aligned}$$

که EXD مجموع ظرفیتهای در دسترس و ظرفیتهای جدید ساخته شده تا سال y می‌باشد.

۳-۲- محدودیتها

آلودگیها

این محدودیتهای تولید آلودگیهای مختلف توسط واحدهای تولید برق را محدود می‌کند. معادلات زیر نشان‌دهنده محدودیت تولید آلودگیهای SO_2 و CO_2 است.

SO_2 نشان‌دهنده نرخ آلودگی دی اکسید سولفور و CO_2 نشان‌دهنده نرخ آلودگی دی اکسیدکربن برای هر یک از سوختها است. میزان آلودگی برای هر منطقه برابر ضرب میزان مصرف سوخت نیروگاه در همان منطقه (QNG,QOL,QGO) در نرخ آلودگیهای آنها (SO_2, CO_2) خواهد بود.

$$\sum_f (QNG_{rys} \cdot SO2_{NG} + QOL_{rys} \cdot SO2_{OL} + QGO_{rys} \cdot SO2_{GO}) \leq ASO2_y$$

برای هر سال y و حالت s ,

این محدودیت به طور مشابه برای آلودگی های دی اکسید

کربن نیز نوشته می‌شود.

محدودیت تعمیر و نگهداری برنامه ریزی شده

این محدودیتها تضمین کننده آن هستند که مجموع تعمیرات برنامه ریزی شده برای هر فن آوری موجود، نیازهای سالیانه تعمیرات فن آوری مورد نظر را برآورده می‌کند.

LHRS تعداد ساعات در مقطع I و PMC تعیین کننده میزان ظرفیتی است که در مقطع مورد نظر تعمیرات برنامه ریزی شده خواهد داشت. عبارت $CPMR * EXD$ تعداد ساعات تعمیرات ظرفیتهای موجود را نشان می‌دهد.

$$\sum_l LHRS_l \cdot PMC_{yrcls} - CPMR_{rc} \cdot EXD_{yrcl} \geq 0$$

برای هر ظرفیت نوع c در منطقه r و سال y و حالت تقاضای s،

نیازمندیهای بار

هر مقطع بار نیازمندیهای مخصوص ظرفیت (ارتفاع) و انرژی دارد. از آنجاییکه هر مقطع بار یک مقطع ثابت زمانی را نشان می‌دهد، ظرفیت و انرژی مورد نیاز به طور مستقیم متناسبند و قابل اندازه گیری در واحد ظرفیت و یا انرژی هستند. ELC نشاندهنده ارتفاع مقاطع بار برای هر منطقه است.

انرژی مورد نیاز در هر مقطع ممکن است توسط روشهای مختلفی تامین شود. سهم ظرفیتهای توزیع پذیر در تامین نیازهای مقطع بار حاصلضرب ظرفیت عملیاتی از واحدهای توزیع پذیر OPD در نرخهای کاهش آنها ELA است.

ظرفیتهای تجدید پذیر (به غیر از متناوب) مانند زمین گرمایی با توجه به محدودیت منابع از ظرفیت کامل خود برای تامین بار استفاده می‌کنند. سهم بار برای ظرفیتهای تجدیدپذیر برابر ظرفیت OPR در نرخ کاهش ELR است.

ظرفیت انرژیهای متناوب برای تامین انرژی هر یک از مقاطع نیز با توجه به ورودی آنها که می‌تواند کامل و یا قسمتی از آن در دسترس باشد استفاده می‌شود. به عنوان مثال واحد خورشیدی در طول مقطعی از بار که خورشید می‌تابد، قابل استفاده است. در نهایت بار می‌تواند توسط ظرفیت برق آبی OPH تامین گردد. بار تامین نشده نیز توسط متغیر USD نشان داده شده است. پارامتر TLOSS نیز تلفات بین منطقه ای را نشان می‌دهد.

$$\sum_c ELA_{yrcl} \cdot OPD_{yrcls} + \sum_n ELR_{yrn} \cdot OPR_{yrns} + OPH_{yrh} + \sum_l ELI_{yrll} \cdot EXDR_{yrli} + \sum_{l=1}^y \sum_{e=1}^e ELI_{yrli} \cdot BLD_{yrle} + \sum_{e=1}^e \sum_{l=1}^y ELI_{yrli} \cdot TLOSS_{yer} \cdot BDI_{jeer} + USD_{yrh} \geq ELC_{yrh}$$

برای تمام مقاطع بار I در سال y و منطقه r و حالت تقاضا s،

تعادل تولید

این محدودیت میزان تولید برق را با قابلیتهای تولید در

دسترس محدود می‌کند که شامل واحدهای موجود و جدید می‌شود.

برای تولید برق، هر یک از فن آوریهای تولید از ظرفیتهای خود بهره‌برداری می‌کنند (OPD). قابلیتهای تولید برای ظرفیت نوع c مجموع ظرفیتهای موجود (EXDR) و ظرفیت جدید جمعی (BLD یا BDI) با در نظر گرفتن تعمیرات (PMC) می‌باشد. همچنین میزان ظرفیت موجود به تصمیمات صادرات و واردات (TRN) آن مربوط است.

برای ظرفیتهای تجدیدپذیر نیز حالتی مشابه ظرفیتهای توزیع پذیر برقرار است. در حالیکه بهره برداری از ظرفیتهای تجدیدپذیر توسط دسترسی به منابع آن مشخص می‌شود. برای ظرفیت برق آبی نیز نرخ بهره برداری از اطلاعات میزان تولید آن در گذشته مشخص می‌شود، که فرض شده محدودیتهای مصرف آب را رعایت می‌کند.

برای ظرفیتهای توزیع پذیر:

$$OPD_{yrcls} - EXDR_{yrcl} - \sum_{j=1}^y BLD_{jrcl} - \sum_{j=1}^y \sum_{e=1}^e BDI_{jeer} \cdot TLOSS_{jer} + PMC_{yrcls} + \sum_g TRN_{yrcls} - \sum_e TRN_{yecrs} \cdot TLOSS_{yer} \leq 0$$

برای هر نوع ظرفیت c در مقطع I منطقه r سال y و حالت تقاضا s. حالت مشابهی را برای ظرفیت تجدیدپذیر خواهیم داشت. این محدودیت برای ظرفیت برق آبی به شکل زیر است.

$$OPH_{yrh} - ELH_{yrh} \cdot EXDR_{yrh} - \sum_{j=1}^y ELH_{yrh} \cdot BLD_{jrhl} - \sum_{j=1}^y \sum_{e=1}^e ELH_{yeh} \cdot BDI_{jeer} \cdot TLOSS_{jer} + \sum_g TRN_{yrhgs} - \sum_e TRN_{yehrs} \cdot TLOSS_{yer} \leq 0$$

برای هر مقطع I و منطقه r در سال y،

مصرف سوخت توسط فن آوریهای مختلف تولید

برای واحدهای نوع c با سوخت نفت، گاز و گازوئیل این محدودیت به شکل زیر است. تولید برابر با حاصلضرب ظرفیت (OPD) در نرخ کاهش آنها (ELA) و تعداد ساعات هر مقطع بار (LHRS) است. ضرب میزان تولید در سهم مصرف سوخت (FS) مورد نظر در نرخ حرارتی (HRD) تقسیم بر ۸۲۹۷ که ارزش حرارتی گاز می‌باشد، مجموع سوخت مصرفی مطابق با ظرفیتهای انتخاب شده می‌باشد. QNG، QOL یا QGO به ترتیب متغیرهای تصمیم میزان مصرف گاز و نفت و گازوئیل می‌باشد. این محدودیتها به شکل زیر تعریف می‌شوند.

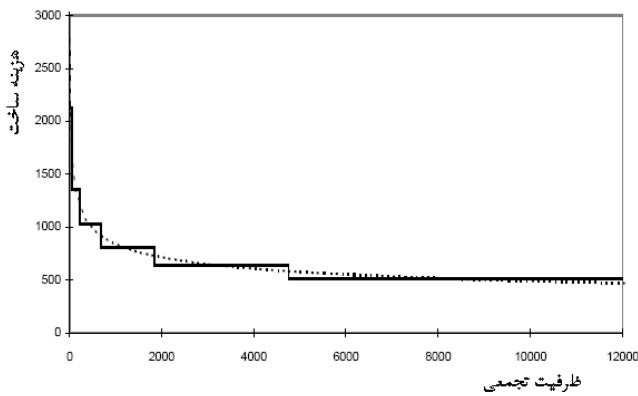
$$\sum_{c,l} ELA_{yrcl} \cdot OPD_{yrcls} \cdot FS_{r,c,NG} \cdot LHRS_l \cdot HRD_{yrcl} / 8297 - QNG_{yrh} \leq 0$$

هر ظرفیت نوع c با سوخت گاز طبیعی در سال y و حالت تقاضا s،

این محدودیت به شکل مشابه برای سوختهای نفت کوره و گازوئیل نیز نوشته می‌شود.

۳-۳- بومی شدن فن آوری

در این قسمت رویکرد منحنی یادگیری برای الگو نمودن بومی شدن فن آوری های تولید استفاده شده است که نشان دهنده کاهش هزینه ها در اثر افزایش تجربه تولید می باشد. تجربه توسط ظرفیت تجمعی اندازه گیری می شود. شکل (۱) تقریب پله ای از منحنی یادگیری را نشان می دهد. برای الگو نمودن رفتار یادگیری در این الگو از روش موجود در مرجع [۱۲] استفاده می شود.



شکل (۱): تقریب پله ای از منحنی یادگیری

این روش از متغیرهای صفر و یک برای الگو نمودن یادگیری استفاده می کند که باعث کمتر شدن زمان حل می گردد. این روش در این قسمت توضیح داده می شود. ظرفیت تجمعی توسط مجموع متغیرهای λ در هر یک از مقاطع منحنی یادگیری نشان داده می شود.

$$C_{cy} = \sum_{i=1}^N \lambda_{c_{iy}} \quad (2)$$

که C ظرفیت تجمعی هر یک از فن آوری ها در هر سال است و اندیس i نیز هر یک از مقاطع منحنی یادگیری را نشان می دهد و N تعداد مقاطع می باشد.

هزینه تجمعی نیز به صورت ترکیب خطی از متغیرهای λ ، متغیرهای صفر و یک و پارامترهای α و β به صورت زیر نوشته شده است.

$$TC_{cy} = \sum_{i=1}^N (\alpha_{ci} \cdot \delta_{c_{iy}} + \beta_{ci} \cdot \lambda_{c_{iy}}) \quad (3)$$

δ متغیر صفر و یک است که فقط به ازای یک i برابر یک است که مقطع فعال را نشان می دهد. پارامتر β شیب خط هر مقطع را نشان می دهد که بر اساس رابطه (۴) تعیین می شود.

$$\beta_{ci} = \frac{TC_{c,i} - TC_{c,i-1}}{C_{c,i} - C_{c,i-1}} \quad (4)$$

محدودیت صادرات جریان برق بین منطقه ای از یک منطقه توسط قابلیت های انتقال موجود محدود می شود.

$$\sum_{c,g} TRN_{yrcgs} \leq EXP_{yr}$$

برای هر منطقه r در سال y و حالت تقاضا s ،

محدودیت ساخت ظرفیت جدید

به دلیل وجود منابع محدود ساخت ظرفیت های جدید متناوب، تجدید پذیر و برق آبی محدود می شود.

$$EXDR_{yrc} + \sum_{j=1}^y BLD_{jri} + \sum_{j=1}^y \sum_e BDI_{jrie} \leq CAPL_{cr}$$

برای هر فن آوری متناوب، تجدید پذیر و برق آبی c در منطقه r ،

محدودیت تولید متناوب

این محدودیت میزان تولید برق توسط فن آوری های تجدیدپذیر متناوب برای حفظ پایداری در سیستم انتقال را مطرح می کند.

$$\sum_{i,d} ELI_{yri} \cdot EXDR_{yri} \cdot LHRS_i + \sum_{j=1}^y \sum_{i,d} ELI_{yri} \cdot BLD_{jri} \cdot LHRS_i + \sum_{j=1}^y \sum_{i,d} ELI_{yri} \cdot BDI_{jrie} \cdot LHRS_i - PINT \cdot GEL_{yrs} \leq 0$$

برای هر منطقه r در سال y با حالت تقاضای s ،

که GEL میزان مجموع تولید برق است. در واقع سهم تولید متناوب از کل تولید باید از $PINT$ بیشتر نشود.

محدودیت سهم تولید تجدیدپذیر

این محدودیت نشان می دهد که یک میزان کمینه از سهم تولید برق باید توسط فن آوری های تجدیدپذیر تولید شود. این محدودیت برای فن آوری های تجدیدپذیر نظیر خورشیدی، بادی، و زمین گرمایی برای هر سال نوشته می شود.

$$\sum_{r,i,d} ISHR_i \cdot ELI_{yri} \cdot LHRS_i \cdot (EXDR_{yri} + \sum_{z=1}^y (BLD_{zri} + \sum_e TLOSS_{zer} \cdot BDI_{zrie})) + \sum_{r,n,d} RSHR_n \cdot ELR_{yri} \cdot LHRS_i \cdot OPR_{yrs} - RMIN_y \cdot GEL_{yrs} \geq 0$$

برای هر سال y و حالت تقاضای s ،

جمله اول مربوط به تولید فن آوری های متناوب موجود و جدید با توجه به سهم تولید مشخص شده ($ISHR$) هر فن آوری است. جمله دوم نیز به طور مشابه نشان دهنده تولید ظرفیت بقیه تجدیدپذیرهاست. از ضرب مجموع تولید در سهم تعیین شده ($RMIN$) مینیمم نیازمندی های تولید تجدیدپذیر حاصل می شود. در واقع سهم مجموع تولید تجدیدپذیر و متناوب از کل تولید باید از $RMIN$ بیشتر باشد.

محدودیت بودجه سرمایه گذاری

این محدودیت تعیین کننده میزان بودجه در اختیار صنعت برق برای ظرفیت سازی است که مجموع هزینه های ساخت نباید از بودجه موجود در هر سال فراتر رود.

$$\sum_{r,c} CBLD_{yrc} \cdot BLD_{yrc} + \sum_{e,r,c} CBDI_{yerc} \cdot BDI_{yerc} \leq BDGL_y$$



۳-۴- آزمایش الگو

به منظور آزمایش و اعتبار سنجی الگوی ارائه شده آزمایشهای مختلفی روی آن انجام شد. هر یک از آزمایشها و نتایج آنها به طور خلاصه در این قسمت توضیح داده می‌شوند. برای آزمایش تاثیر بخش احتمالی الگو، احتمال وقوع حالتها مختلف تقاضا متفاوت در نظر گرفته شد. یکبار احتمال حالت اول ۱۰۰ درصد و دو حالت دیگر ۰ درصد و در بار دوم احتمال حالت سوم ۱۰۰ درصد و دو حالت دیگر ۰ درصد در نظر گرفته شد. در آزمایش اول که بر حالت اول تاکید داشت ۴۵۰۰ مگاوات ظرفیت ساخته شد در حالیکه در آزمایش دوم که بر حالت سوم تاکید بیشتری دارد ۶۱۱۰۰ مگاوات ظرفیت ساخته شد. نتایج آزمایش اول برابر با جواب قطعی الگو با حالت اول تقاضا است و آزمایش دوم نیز برابر جواب قطعی الگو با حالت سوم است.

برای آزمایش تاثیر ضرایب تابع هدف یکبار مقدار مرحله اول تابع هدف ۱۰ برابر در نظر گرفته شد و یکبار هم مقدار مرحله دوم تابع هدف ۱۰ برابر شد. در آزمایش اول نیروگاههای سیکل ترکیبی، زمین گرمایی و آبی سهم بیشتری پیدا کرده اند. ولی در آزمایش دوم نیروگاههای گازی، اتمی و بادی سهم بیشتری دارند. دلیل آن هم این است که با گران شدن هزینه سرمایه گذاری تمام فن‌آوریها، آنهایی که هزینه متغیر کمتری دارند (نیروگاههای بار پایه) پسندیده‌تر می‌شوند. در حالت دوم با گرانتر شدن هزینه متغیر تولید، نیروگاههایی که هزینه ساخت کمتری دارند (نیروگاههای بار قله) پسندیده‌تر هستند.

در یک آزمایش هم هزینه سوخت گاز دو برابر شد. در این حالت نیروگاه گازی سهم کمتری را در طرح بهینه پیدا کرد. زیرا هزینه‌های متغیر تولید آن افزایش یافته است. همچنین به دلیل اینکه نیروگاه سیکل ترکیبی بهره‌وری بسیار بالاتری نسبت به نیروگاه گازی دارد با گران تر شدن سوخت هزینه های متغیر آن به مقدار کمتری زیاد می‌شود و لذا مطلوب تر شده و کمی سهم آن در طرح بهینه افزایش یافته است.

۳-۵- نتایج اجرای الگو

در این قسمت نتایج اجرای الگو ارائه شده است. الگوی برنامه ریزی گسترش ظرفیت نیروگاهی شامل ۱۰ نوع فن‌آوری مختلف تولید در نظر گرفته شده است. افق زمانی الگو ۲۰ ساله است که به منظور کاهش حجم الگو و افزایش سرعت حل آن به ۱۰ مرحله دو ساله تقسیم شده است.

پارامتر α نیز عرض از مبدا هر یک از مقاطع را نشان می‌دهد که توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

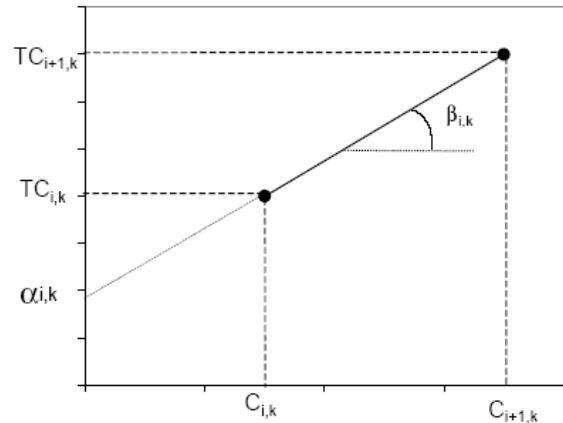
$$\alpha_{ci} = TC_{c,i-1} - \beta_{ci} \cdot C_{c,i-1} \quad (5)$$

محدودیت‌هایی در این زمینه اضافه می‌شوند تا مقطع فعال از هزینه تجمعی را توسط متغیرهای صفر و یک تعیین کنند.

$$\lambda_{c_{iy}} \geq C_{c,i} \cdot \delta_{c_{iy}} \quad (6)$$

$$\lambda_{c_{iy}} \leq C_{c,i+1} \cdot \delta_{c_{iy}}$$

در واقع این دو محدودیت تعیین می‌کنند که متغیر λ بین دو نقطه متوالی از ظرفیت تجمعی مقاطع قرار گرفته است.



شکل (۲): پارامترهای آلفا و بتا هر مقطع از هزینه تجمعی

با توجه به اینکه در هر مرحله زمانی فقط یک مقطع فعال خواهد بود، لذا مجموع مقادیر صفر و یک در هر مرحله برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum_{i=1}^N \delta_{c_{iy}} = 1 \quad (7)$$

برای کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت حل مسئله می‌توان محدودیت‌های اضافی تعریف نمود که در واقع این محدودیت‌ها نشانگر آن هستند که تجربه باید افزایش یابد و یا در همان حد باقی بماند. این محدودیت‌ها در رابطه (۸) آمده است.

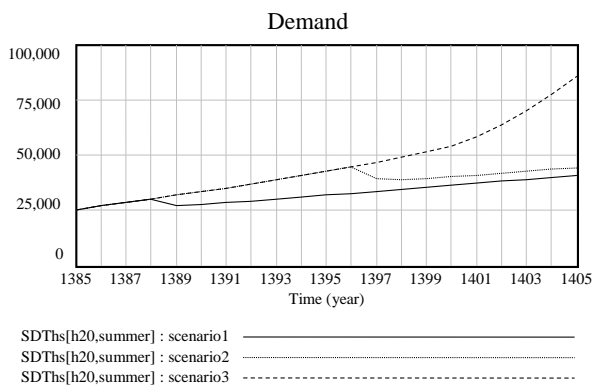
$$\sum_{P=1}^i \delta_{c,P,y} \geq \sum_{P=1}^i \delta_{c,P,y+1} \quad (8)$$

$$\sum_{P=i}^N \delta_{c,P,y} \leq \sum_{P=i}^N \delta_{c,P,y+1}$$

سرمایه گذاری انجام شده در هر مرحله نیز با توجه به هزینه تجمعی در رابطه (۹)، محاسبه می‌شود.

$$IC_{cy} = TC_{c,y} - TC_{c,y-1} \quad (9)$$

در نهایت متغیر IC با احتساب ضریب کاهش در هر سال در تابع هدف مسئله وارد می‌شود.



شکل (۳): پیش بینی تقاضا برای ساعت ۲۰ فصل تابستان بر حسب مگاوات

خروجی اصلی الگو ساخت فن‌آوریهای مختلف در هر منطقه و در هر سال برنامه ریزی است. در این قسمت خلاصه‌ای از خروجیهای کلی الگو توضیح داده می‌شوند.

ظرفیتهای جدید پیشنهاد شده توسط الگو برای ساخت در (جدول ۱) برای هر فن‌آوری در هر سال نشان داده شده است که هزینه طرح بهینه برابر ۳۸۸۸۲۳ میلیارد ریال است. همانطور که در جدول مشخص است ساخت ظرفیت برق آبی برای دوره‌های اولیه افق زمانی به مقدار زیادی پیشنهاد شده است. از بین انرژی‌های نو نیز از فن‌آوری‌های زمین‌گرایی و بادی در طرح بهینه حضور دارند. از بین نیروگاه‌های حرارتی نیز نیروگاه گازی بیشترین سهم را در ساخت ظرفیت دارد و بیشتر در دوره‌های پایانی ساخته می‌شود. نیروگاه سیکل ترکیبی با اینکه کارایی بیشتری از نیروگاه گازی دارد ولی در طرح بهینه سهم کمتری را به خود اختصاص داده است. نیروگاه اتمی نیز به میزانی در دوره‌های میانی وارد مدار شده است که به دلیل وجود محدودیت انتشار آلودگی توسط الگو ساخته می‌شود. پیشنهاد ساخت ظرفیت برای نیروگاه‌های بخاری، پیل سوختی، حرارتی خورشیدی و فتوولتائیک نیز در طرح بهینه داده نشده است.

۴- تحلیل رفتار میزان سرمایه‌گذاری حاصل از

برنامه بهینه گسترش ظرفیتهای

در این قسمت به منظور تحلیل رفتار سرمایه‌گذاری در هزینه‌های صنعت برق تحت هر یک از حالتها الگوی پویایی سیستمهایی ایجاد شده است که قادر است نحوه تغییر رفتار سرمایه‌گذاری با برنامه ارائه شده توسط الگوی بهینه سازی را تحت هر یک از حالتها ممکن شبیه سازی کند. این الگو با

این الگو با استفاده از نرم افزار LINGO نسخه ۹,۰ طراحی و اجرا شده است. این الگو شامل ۱۴۷۱۲۴ متغیر تصمیم است که از این تعداد ۲۲۰ متغیر آن عدد صحیح است. تعداد محدودیتهای الگو نیز ۶۴۲۳۷ است. زمان اجرای الگو در حالت کلی در حدود ۲۶۰ دقیقه است. با حذف بخش بومی سازی فن‌آوری زمان حل به کمتر از ۶۰ دقیقه کاهش خواهد یافت.

با توجه به اینکه برنامه ریزی نیروگاهی صنعت برق، یک برنامه ریزی طولانی مدت است، استفاده از روشهای رگرسیون و اقتصاد سنجی برای پیش بینی تقاضای برق آینده مناسب به نظر نمی‌رسند. زیرا روشهای اقتصاد سنجی برای پیش بینی های کوتاه مدت مناسب است و تغییرات ساختاری در روند تقاضای آینده را لحاظ نمی‌کنند. روشهای اقتصاد سنجی و رگرسیونی به علت استفاده از ساختار خطی در پیش بینی، برای پیش بینی کوتاه مدت مناسب است درحالیکه برنامه ریزی گسترش ظرفیت طولانی مدت (در این مقاله ۲۰ ساله) استفاده از روشهای پیش بینی با ساختار خطی به علت طولانی بودن مدت پیش بینی خطای پیش بینی را به مقدار زیادی افزایش خواهد داد. روشی که در این مقاله برای پیش بینی تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است روش پویایی سیستمها است که به علت استفاده از ساختاری غیر خطی پیش بینی‌های بلند مدت قابل قبولی از رفتار سیستم در آینده تولید می‌کند و امکان تحلیل تغییرات ساختاری در صنعت برق نظیر تاثیر تغییر قیمت برق بر تقاضای آینده را فراهم می‌کند.

در این راستا از پروژه‌های که اخیراً در "موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه ریزی انرژی" انجام شده است با عنوان "مدلسازی سیستم هدفمند یارانه برق با نگرش سیستمی" [۲] استفاده شده است.

با استفاده از الگوی پویایی سیستمها در این قسمت سه حالت خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه برای تقاضا در نظر گرفته شده است. در حالت خوش‌بینانه فرض شده که قیمت‌های برق در سال ۱۳۸۸ به طور ساختاری تغییر می‌یابند که در اثر این تغییر قیمت رشد تقاضا متعادل‌تر خواهد شد. در حالت میانه سال تغییر قیمت‌ها ۱۳۹۶ در نظر گرفته شده و حالت بدبینانه نیز فرض می‌کند تا انتهای دوره مورد مطالعه تغییرات ساختاری در میزان تعرفه‌های برق صورت نخواهد کرد. پیش بینی تقاضا در سالهای آتی توسط مدل پویایی سیستمها برای فصل تابستان در ساعت ۲۰ تحت هر یک از حالتها در شکل (۳) نشان داده شده است.

استفاده از نرم افزار vensim نسخه ۵,۳ DSS طراحی و اجرا شده است.

برای تحلیل رفتار میزان سرمایه گذاری یک الگوی پویایی سیستمها ایجاد شده است که شامل سه بخش است. بخش اول ظرفیت سازی در نیروگاهها با فن آوریهای مختلف را نشان می دهد که ظرفیتها با توجه به نتایج طرح بهینه شده در الگوی پویایی سیستمها ساخته می شوند. یک بخش هم به زمانبندی تولید هر یک از فن آوریها با توجه به تقاضای موجود اختصاص دارد. بخش آخر نیز هزینه ها و سود صنعت برق را محاسبه می کند.

الگوی تحلیل رفتار ارائه شده از الگوی پویایی سیستمهای پیش بینی تقاضا نیز بازخورد دارد که نتایج به ازای حالتهاى مختلف تقاضا بررسی شده است. در بخش ظرفیت سازی این الگو فرض شده است در هر یک از حالتها هنگامیکه میزان تقاضا با ظرفیت تفاوت زیادی دارد روند ظرفیت سازی به طور منطقی کاهش و یا افزایش می یابد. یعنی اگر صنعت برق ظرفیت

موجود را برای پیش بینی تقاضا کافی بداند، روند ظرفیت سازی را کندتر خواهد کرد. همچنین اگر صنعت برق به مقدار زیادی کمبود ظرفیت در آینده را پیش بینی کند اقدام به ساخت ظرفیتهای گازی به منظور کاهش کمبود تولید را خواهد داشت.

در شکل (۴-الف) سه خط اول تغییر ظرفیتهای را توسط طرح بهینه شده تحت هر یک از حالتهاى تقاضا و سه خط دوم نیز تغییر ظرفیتهای را توسط الگوی شبیه سازی نشان می دهد که برای مقایسه آورده شده اند. با مقایسه نتایج آنها پیداست که در الگوی شبیه سازی شده با طرح بهینه در ابتدا ظرفیتهای زیادی ساخته شده است که بیش از ظرفیت مورد نیاز است و بیشتر آنها ظرفیتهای برق آبی است. دلیل پیشنهاد ساخت آنها توسط الگو نیز نیاز سیستم به نیروگاه بار پایه است. برای حالتهاى اول و دوم با کاهش تقاضای آنها روند ظرفیت سازی نیز کندتر شده است ولی در حالت سوم صنعت برق با کمبود ظرفیت مواجه شده که مقداری از این کمبود را با ساخت نیروگاه گازی جبران کرده است.

جدول (۱): پیشنهاد ساخت ظرفیت ها برای کل کشور بر حسب مگاوات در برنامه ۲۰ سال

سال نوع نیروگاه	۱۳۸۵	۱۳۸۷	۱۳۸۹	۱۳۹۱	۱۳۹۳	۱۳۹۵	۱۳۹۷	۱۳۹۹	۱۴۰۱	۱۴۰۳
بخاری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
گازی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳۴۹	۴۹۳۹	۹۳۷۵	۳۲
سیکل ترکیبی	۰	۰	۰	۰	۰	۲۷۲۶	۵۰۹	۱۵۸۴	۲۸۷۶	۱۰۵
پیل سوختی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اتمی	۰	۰	۰	۰	۰	۷۸۰	۱۶۲۹	۲۸۹	۰	۰
زمین گرمایی	۰	۰	۱۵۵۲	۴۴۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
برق آبی	۰	۰	۰	۳۳۴۹	۶۴۷۴	۲۵۱۹	۱۲۵	۹۱۲	۶۶۵	۱۹۶۵
بادی	۰	۰	۰	۳۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حرارتی خورشیدی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فتوولتائیک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

خواهد کرد. همانطور که نشان داده شده سود صنعت برق منفی است. یعنی صنعت برق یک صنعت زیان ده است که با تغییر هر چه زودتر قیمتها صنعت برق می تواند زیان خود را کمتر کرده و در آینده سود آور شود.

به منظور محاسبه هزینه اضافی که صنعت برق به علت عدم قطعیت در تقاضا متحمل خواهد شد، طرح بهینه قطعی تحت هر یک از حالتها ایجاد شد و نتایج آن در الگوی پویایی سیستمها وارد شد تا مقایسه ای بین هزینه ها صورت گیرد. در شکل (۴-د) سه خط اول مربوط به هزینه طرح بهینه احتمالی و سه خط دوم هزینه طرح بهینه قطعی تحت هر یک از حالتها است. در دوره های انتهایی حالت سوم هزینه رشد زیادی پیدا کرده است

شکل (۴-ب) درصد تقاضای برآورده نشده را تحت هر یک از حالتهاى تقاضا نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است درصد تقاضای برآورده نشده کاهش یافته و به نزدیک صفر رسیده است. در حالت سوم تقاضای برآورده نشده در انتهای دوره به شدت افزایش یافته است زیرا صنعت برق در انتهای حالت سوم با کمبود ظرفیت مواجه می شود که با شروع به ساخت نیروگاه گازی کمی از آن را جبران می کند. سود صنعت برق نیز در شکل (۴-ج) نشان داده شده است که حاصل کسر درآمد حاصل از فروش برق از هزینه ها است.

همانطور که نشان داده شده است با تغییر قیمتها سود به یکباره زیاد شده که در دراز مدت روند رشد بیشتری پیدا

که به دلیل وجود تقاضای برآورده نشده است.

برای محاسبه هزینه اضافی، ارزش انتظاری اطلاعات درست (EVPI) محاسبه می‌شود که برابر بیشینه هزینه‌ای است که صنعت برق آمادگی پرداخت در مقابل اطلاعات درست از آینده را دارد. این مقدار توسط رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

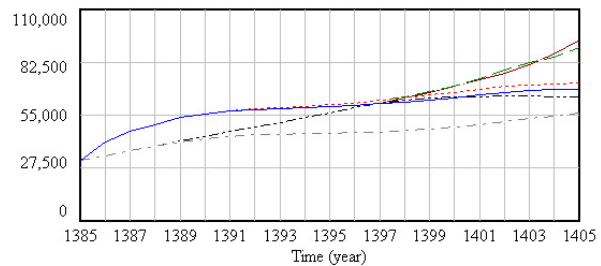
$$EVPI = HN - WS \quad (10)$$

که HN هزینه طرح احتمالی و WS امید ریاضی هزینه طرحهای قطعی برای هر حالت است. ارزش انتظاری مورد محاسبه برای افق زمانی ۲۰ ساله رقم ۱۹۲۱۹ میلیارد ریال است. در واقع این مبلغ هزینه‌ای است که صنعت برق باید به علت وجود عدم قطعیت در تقاضا بپردازد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

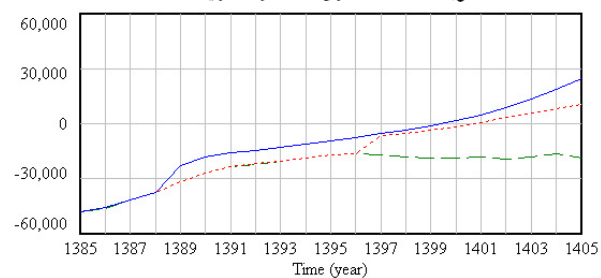
با نگاهی گذرا به نتایج به دست آمده مشخص است که الگو، پیشنهاد ساخت نیروگاه برق آبی را در دوره‌های اولیه می‌دهد. نیروگاه گازی نیز بیشترین سهم را از گسترش ظرفیت دارد. از دیگر نیروگاه‌های حرارتی، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و اتمی

(الف) روند تغییر ظرفیتهای موجود تحت هر یک از سناریوهای تقاضا



PCs[generation and transition] : scenario1 — MW
 PCs[generation and transition] : scenario2 - - - MW
 PCs[generation and transition] : scenario3 - - - MW
 PCs[generation and transition] : s1mscenario1 - - - MW
 PCs[generation and transition] : s1mscenario2 - - - MW
 PCs[generation and transition] : s1mscenario3 - - - MW

(ج) سود صنعت برق تحت هر سناریو

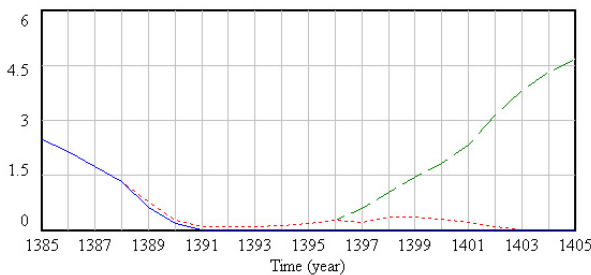


profitR : scenario1 — MW
 profitR : scenario2 - - - MW
 profitR : scenario3 - - - MW

نیز در طرح بهینه وجود دارند که نیروگاه اتمی به علت وجود محدودیت‌های آلودگی ساخته می‌شود. از نیروگاه‌های انرژی های نو، فن‌آوری زمین گرمایی و بادی در طرح بهینه حضور دارند. ساخت نیروگاه زمین گرمایی اقتصادی‌تر از نیروگاه بادی به نظر می‌رسد ولی ساخت چنین نیروگاهی برای کشور محدودیت دارد و پتانسیل زیادی از این نوع در کشور موجود نیست، اگر چه هنوز مطالعه جامعی در زمینه تعیین پتانسیل زمین گرمایی کل کشور انجام نشده است. ظرفیت بادی نیز به میزان اندکی در طرح بهینه دیده می‌شود.

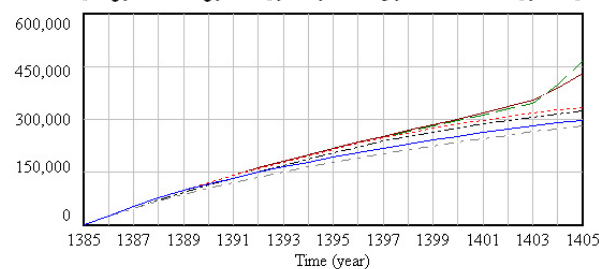
در کل طول دوره مورد مطالعه پیشنهاد ساخت ۴۶۳۰۰ مگاوات ظرفیت نیروگاهی جدید داده شده است. سهم نیروگاه‌های گازی از گسترش ظرفیتها ۳۹ درصد است که بیشترین سهم را در مقابل با بقیه فن‌آوری‌ها دارد. بعد از آن به ترتیب نیروگاه برق آبی با ۳۳ درصد، نیروگاه سیکل ترکیبی با ۱۷ درصد، هسته‌ای با ۶ درصد، زمین گرمایی با ۴ درصد و بادی با ۱ درصد در طرح بهینه گسترش ظرفیت سهم دارند.

(ب) درصد تقاضای برآورده نشده تحت هر یک از سناریوهای تقاضا



PUDe[generation and transition] : scenario1 — Dmnl
 PUDe[generation and transition] : scenario2 - - - Dmnl
 PUDe[generation and transition] : scenario3 - - - Dmnl

(د) مقایسه هزینه‌های صنعت برق تحت هر سناریو با طرح فعلی و طرح بهینه قطعی



TC : scenario1 — millierd rial
 TC : scenario2 - - - millierd rial
 TC : scenario3 - - - millierd rial
 TC : optscenario1 - - - millierd rial
 TC : optscenario2 - - - millierd rial
 TC : optscenario3 - - - millierd rial

شکل (۴): شبیه‌سازی رفتار میزان سرمایه‌گذاری حاصل از برنامه بهینه گسترش ظرفیتها

بیشترین میزان تقاضا در حالت اول در حدود ۳۹۷۰۰ مگاوات، برای حالت دوم ۴۴۶۰۰ مگاوات و برای حالت سوم ۷۷۶۰۰ مگاوات است. این اعداد نشان می‌دهند که سیاستهای صحیح

در بخش آخر با استفاده از یک الگوی پویایی سیستمها، رفتار سرمایه‌گذاری تحت هر یک از حالتها تحلیل شد. همچنین تقاضا برای حالت‌های مختلف در این بخش نشان داده شد.

قیمت‌گذاری تاثیر بسیار زیادی در میزان تقاضا خواهند داشت. همچنین در این بخش نشان داده شد که تقاضای برآورده نشده توسط طرح بهینه شده تحت حالت اول و دوم بسیار کم است، ولی تحت حالت سوم از اواسط دوره به شدت افزایش یافته و تا انتهای دوره به ۴ درصد نیز می‌رسد. هزینه‌ها تحت هر حالت به ترتیب برابر ۲۹۷۹۹۶، ۳۳۴۸۹۶، و ۴۶۶۳۶۶ میلیارد ریال است. سود صنعت برق که برابر تفاوت درآمد و هزینه‌ها است نیز در این قسمت محاسبه شد. سود صنعت برق در آخرین سال برنامه‌ریزی برای حالت اول ۲۴۵۳۰، برای حالت دوم ۱۰۷۱۱ و برای حالت سوم ۱۸۷۰۰- میلیارد ریال خواهد بود. بنابراین صنعت برق می‌تواند با ایجاد تغییرات ساختاری در تعرفه‌ها و اجرای سیاستهای صحیح قیمت‌گذاری سود خود را به مقدار زیادی افزایش دهد.

چند پیشنهاد برای ادامه کار در این زمینه ارائه می‌شود.

از لحاظ تئوری امکان افزودن پارامتر ریسک به الگو می‌تواند جالب باشد. یعنی تصمیم گیر بتواند با تعیین میزانی از ریسک برای آینده سرمایه گذاری کند. همچنین می‌توان حل مسئله برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت را با روش بهینه سازی استوار^{۱۱} پیشنهاد داد تا نتایج استوارتری را نسبت به عدم قطعیت موجود در تقاضا بدست آورد. در روش بهینه سازی استوار که شاخه‌ای از برنامه ریزی احتمالی است، واریانس برآورده نشدن محدودیتها به حداقل می‌رسد که باعث هموارسازی جوابها خواهد شد.

با توجه به وسعت مسئله و زمان حل زیاد آن، ارائه روشهای ابتکاری به منظور کاهش زمان حل می‌تواند بسیار مفید باشد. در صورت پیچیده‌تر شدن الگو نمودن مسئله، زمان حل به میزان زیادی افزایش خواهد یافت. به ویژه زمان حل مسئله با اضافه شدن متغیرهای عدد صحیح به مسئله بسیار زیاد می‌شود. برای نمونه اگر اندازه هر یک از واحدهای تولید در اندازه‌های واقعی و استاندارد آنها در نظر گرفته شوند، چنین مشکلی پیش می‌آید.

از لحاظ کاربردی امکان آن وجود دارد که در الگوی بهینه سازی کل بخشهای انرژی اعم از انرژی‌های اولیه و ثانویه نظیر نفت، گاز، برق و انرژی‌های نو در یک الگوی بهینه سازی با هم الگو شوند. این کار به ما اجازه می‌دهد تا طرح بهینه را برای کل بخش‌های انرژی ارائه کنیم، زیرا هر یک از بخشهای انرژی جدا از هم نیستند و به نحوی به هم وابسته‌اند. بدین منظور پیشنهاد می‌شود الگوی کلانی برای کلیه بخشهای انرژی تهیه شود تا ارتباط بخشهای مختلف انرژی در تصمیم‌گیری

لحاظ شوند. سپس در مرحله بعدی هر یک از بخشها به صورت جزئی‌تر الگو شوند تا بدین شکل ارتباط بین بخشهای مختلف انرژی در تصمیم‌گیری حفظ شود.

در این مقاله تاثیر قیمت گذاری متفاوت برای ساعات اوج مصرف مورد بررسی قرار نگرفت. با استفاده از سیاست‌های صحیح قیمت گذاری ساعات اوج مصرف می‌توان مصرف کنندگان را به مصرف در ساعات کم‌بار تشویق کرد که باعث کاهش اوج مصرف می‌شود. با کاهش اوج مصرف نیز نیاز به سرمایه گذاری در ظرفیتهای جدید کاهش خواهد یافت. بررسی این مسئله و تحلیل هزینه و سود آن برای صنعت برق نیز می‌تواند موضوعی برای تحقیقات آتی باشد.

در این مقاله فرض شد که واحدهای موجود به هنگام تمام شدن عمر آنها، با تعمیرات اساسی طول عمر آنها افزایش داده می‌شود ولی تعمیرات اساسی می‌تواند به عنوان یک متغیر تصمیم برای واحدهای موجود باشد که چه زمانی روی واحدهای موجود تعمیرات اساسی انجام گیرد و یا مستهلک شده و از موجودی ظرفیتهای خارج شوند. در نظر گرفتن این موضوع به اطلاعات میزان هزینه لازم برای تعمیرات اساسی هر یک از واحدها نیاز خواهد داشت که به سادگی قابل دسترس نیست و همچنین پیچیدگی الگو را نیز بیشتر خواهد نمود ولی نتایج آن به واقعیت نزدیک تر خواهد بود.

۶- مراجع

- [۱] گزارش مدل‌های انرژی، موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی، ۱۳۸۴.
- [۲] پروژه هدفمندسازی یارانه برق و بررسی تأثیرات آن بر شاخصهای صنعتی برق (فاز مدلسازی)، موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه ریزی انرژی، ۸۴-۱۳۸۳.
- [۳] Zhu J.; Chow M., "A Review of Emerging Techniques on Generation Expansion Planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 1722-1728, 1997.
- [۴] Tzeng G.H., et al., "Multiobjective Decision-Making Approach to Energy Supply Mix Decision in Taiwan," *Energy Sources*, vol. 16, pp. 301-316, 1994.
- [۵] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Wien Automatic System Planning Package (WASP-III) User's Manual*, Vienna, Austria (1980).
- [۶] Park J.; Park Y.; "An Improved genetic algorithm for generation expansion planning", *IEEE Trans. on power systems*, Vol.15, No.3, 2000.

- J. Alvarez; K. Ponnambalam, V. Quintana, [۷]
"Generation Expansion under Risk Using
Stochastic Programming", Proceedings of the 37th
Annual North American Power Symposium, pp.
530-537, 2005.
- Botterud A.; Ilic M.; Wangenstein I.; [۸]
"Optimal Investments in Power Generation Under
Centralized and Decentralized Decision Making",
IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 1,
pp. 254-263, 2005.
- Pokharel S.; Ponnambalam K.; [۹]
"Investment Planning for Electricity Generation Expansion",
International Journal of Energy Research, Vol. 21,
pp. 185-194, 1997.
- Albornoz V.M.; Benario P. ; Rojas M.E.; [۱۰]
"A two-stage stochastic integer programming model for a
thermal power system expansion", International
Transactions in Operational Research, Vol.11, pp.
243-257, 2004.
- Energy Information Administration, [۱۱]
"The Electricity Market Module of the National Energy
Modeling System : Model Documentation Report",
March 2004.
- Barreto L.; [۱۲]
"Technological Learning In Energy
Optimization Models And Deployment Of
Emerging Technologies", Doctoral Dissertation,

۷- زیر نویس ها

∩ Power System Expansion

∪ Extensive Form

∨ MARKAL: واژه MARKAL متشکل از حروف اول عبارت

MARKet ALlocation به معنای تخصیص بازار می باشد.

€ MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy

Alternatives and their General Environmental Impact

° International institute for Applied Systems Analysis

∩ WASP: Wien Automatic System Planning

∪ NEMS: National Energy Model System

^ Expected Value of Perfect Information

^ Here-and-Now

∩ Wait-and-See

∩∩ Robust Optimization