برنامه ريزي براي گسترش ظرفيت توليد برق در ايران به كمك روش برنامه‌ريزي احتمالي

عليرضا تقي پور رضوان[i]، عباس سيفي[ii]

چكيده

در اين مقاله، يك الگوي برنامه‌ريزي خطي احتمالي با متغيرهاي عدد صحيح ارائه شده است كه مجموع هزينه هاي توليد را با توجه به فن‌آوري‌هاي مختلف توليد برق در طول بازه زماني مورد مطالعه، حداقل مي‌سازد. در اين الگو، ميزان تقاضا غير قطعي است و سه حالت براي تقاضا در قالب برنامه‌ريزي احتمالي در نظر گرفته شده است. در اين الگو كل كشور به مناطقي تقسيم شده كه تصميمات گسترش ظرفيت براي هر يك از مناطق در يک الگوي يكپارچه گرفته مي‌شود. همچنين در اين الگو، ساز و كاري در نظر گرفته شده است تا كاهش هزينه‌هاي سرمايه گذاري، با بومي شدن فن‌آوري و افزايش يادگيري نيز در الگو منظور شوند. در انتها نيز به منظور تحليل نتايج خروجي الگوي بهينه سازي، الگوي پويايي سيستمها ايجاد شده است تا تاثير برنامه ارائه شده روي شاخصهايي از صنعت برق نظير هزينه و سود تحت هر يک از حالتهاي تقاضا مورد مطالعه قرار گيرد.

برنامه بهينه گسترش ظرفيت پيشنهاد شده توسط الگو، شامل فن‌آوريهاي مختلف توليد برق است كه نيروگاه گازي بيشترين سهم از گسترش ظرفيت را داراست. نيروگاه‌هاي برق آبي، سيكل تركيبي، هسته‌اي، زمين گرمايي و بادي نيز در طرح بهينه وجود دارند.

كلمات كليدي

برنامه ريزي گسترش ظرفيت، صنعت برق، توليد برق، برنامه ريزي احتمالي، پويايي سيستمها

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.

[i] دانشجوي دكتراي مهندسي صنايع، دانشگاه صنعتي اميركبير : Email: alirezatag@gmail.com

[ii] دانشيار دانشكده مهندسي صنايع دانشگاه صنعتي اميركبير: Email: aseifi@aut.ac.ir

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

۱- مقدمه

گسترش سيستم قدرت[1] بخشي از برنامه ريزي انرژي است و بيشتر براساس سياستهاي خاص توسعه در جهت منابع ملي هر كشورانجام مي‌شود. در اين مسئله هزينه اقتصادي طرح گسترش و محدوديت منابع انرژي نقش عمده‌اي در سياستگذاري دارد. هدف از برنامه ريزي انرژي بررسي جامع منابع انرژي و ايجاد هماهنگي بين اين منابع (فن‌آوريهاي توليد برق) است. علاوه بر سياست‌هاي مبتني بر منافع ملي، گسترش سيستم قدرت هماهنگ با ميزان افزايش تقاضاي انرژي در آينده صورت مي‌گيرد.

هدف از برنامه ريزي گسترش ظرفيت توليد جستجو براي انتخاب اقتصادي‌ترين طرح گسترش با دست يابي به يک سطح خاص قابليت اعتماد و مطابق با پيش بيني افزايش تقاضا در يک دوره زماني خاص است.

در اين طرح، پرسشهايي كه بايدپاسخ داده شوند عبارتنداز :

۱- نوع نيروگاه‌هاي توليد قدرت كه بايد به سيستم اضافه شوند چيست ؟

۲- هزينه سوخت و منابع انرژي مورد نياز در طرح كدامند ؟

۳- زمان ساخت و بهره برداري از اين واحد ها چه وقت است ؟

۴- مكان استقرار اين واحدهاي توليدي در كجاست ؟

۲- مرور بر تاريخچه گسترش ظرفيت توليد برق

درسالهاي اخير، روش‌هاي گوناگوني براي بررسي و حل مسئله گسترش ظرفيت توليد برق مطرح شده‌اند و الگوهاي تجاري گوناگوني در اين زمينه ايجاد شده‌اند.

۲-۱- روشهاي الگو نمودن مسئله گسترش ظرفيت توليد برق

الگوهاي برنامه ريزي خطي از سي سال پيش تا كنون كاربردهاي موفقي را در حل مسئله گسترش ظرفيت توليد برق داشته‌اند. برتري برنامه ريزي خطي، قابليت الگو نمودن مسائل بزرگ و پيچيده و همچنين اجراي ساده آن به كمک الگوريتم‌هاي موجود است [۳] .

در برنامه ريزي خطي با متغيرهاي عدد صحيح، ظرفيت واحدهاي نيروگاهي در اندازه هاي مشخصي در نظر گرفته مي‌شوند. با توجه به اينكه واحدهاي توليد نيروگاهي در اندازه هاي استاندارد موجود هستند، در مسائلي كه انتخاب پروژه‌ها به طور واقعي مد نظر باشد استفاده از چنين الگويي مناسب‌تر خواهد بود.

برنامه ريزي چند هدفه براي تصميم گيري با وجود چند تابع هدف متناقض از طريق تبديل آن به مسئله‌اي با يک تابع هدف انجام مي‌شود. اهداف مختلف در يك مسئله گسترش سيستم قدرت مي‌تواند كمينه سازي هزينه، كمينه سازي آلودگي محيطي و بيشينه سازي قابليت اطمينان سيستم باشد [٤].

برنامه ريزي پويا مسئله بهينه سازي چند مرحله‌اي را به يک سري مسايل ساده تبديل مي‌كند و از طريق روش بازگشتي مسئله را در جهت بهينه سازي تابع هدف حل مي‌كند. برنامه ريزي پويا و تلفيق آن با برنامه هاي شبيه سازي هزينه توليد در بسته‌هاي نرم افزاري معروف مانند WASP استفاده شده است [۵]. در سالهاي اخير ازكاربرد الگوريتم ژنتيك، به عنوان يكي از روش‌هاي بهينه سازي ابتكاري در سيستمهاي قدرت نتايج خوبي به ويژه در برخورد با مسايل با ابعاد بزرگ بدست آمده است [٦].

عدم قطعيت، يكي از موضوعاتي است كه صنعت برق در سالهاي گذشته با آن روبرو بوده است. پارامترها و فاكتورهايي نظير رشد بار، قيمت سوخت، هزينه سرمايه، و قوانين تاثير زيادي روي بازدهي سرمايه گذاري در صنعت برق دارند كه اين پارامترها نيز خود تحت تاثير شرايط غير قطعي هستند. برنامه ريزي احتمالي يک روش مطالعه تصميم گيري تحت شرايط عدم قطعيت در طول زمان مي‌باشد. عدم قطعيت مي تواند در پارامترهاي الگو و يا در خود الگو باشد. عدم قطعيت در طول زمان توسط حالتهايي كه تقريبي از آينده هستند الگو مي‌شود. روش برنامه ريزي احتمالي جوابي را كه در مقابل عدم قطعيت‌هاي آينده استوار است تعيين مي‌كند. مقالات [۷]،[۸] به بررسي مسئله گسترش ظرفيتهاي توليد برق با رويكرد برنامه ريزي احتمالي پرداخته اند. مقاله [۹] مسئله گسترش ظرفيتهاي توليد برق را در حالتي كه قيمتهاي سوخت براي آينده غير قطعي هستند مطالعه كرده است. در مقاله [۱۰] نيز يک الگوي برنامه‌ريزي احتمالي دو مرحله‌اي براي گسترش ظرفيتهاي توليد برق حرارتي ارائه شده است كه در اين الگو قابليت دسترسي به واحدهاي حرارتي در آينده غير قطعي است.

يك الگوي ساده شده برنامه ريزي احتمالي دومرحله اي را مي‌توان مطابق با رابطه (۱) نوشت كه اين رابطه به نام شكل گسترده[2] الگوي برنامه ريزي احتمالي معروف است.

$$\begin{aligned} \min \quad & z = c^T x + \sum_{k=1}^{K} p_k q_k^T y_k \\ s.t. \quad & Ax = b \\ & T_k x + W y_k = h_k \quad k = 1,\ldots,K \\ & x \geq 0, y_k \geq 0 \quad k = 1,\ldots,K \end{aligned} \qquad (1)$$

در اين رابطه فرض شده است كه حالتهاي ممكن يك مجموعه K عنصري باشد كه p_k احتمال وقوع هريك از حالتها است. اين رابطه نشان‌دهنده يك الگوي خطي احتمالي دومرحله‌اي معمول است. از آن جهت به اين الگو دو مرحله‌اي گفته مي‌شود كه متغيرهاي تصميم طي دو مرحله بدست مي‌آيند. تصميمات مرحله اول با بردار x نشان داده شده است. در مرحله دوم مقدار متغير غير قطعي مطابق با هر حالت ممكن مشخص مي‌شود و با مشخص شدن آن، بردارهاي q، h و T معلوم مشخص مي‌شوند. سپس تصميمات مرحله دوم y براي هر حالت تعيين مي‌شود.

۲-۲- الگوهاي تجاري موجود براي گسترش بخش انرژي

با توجه مهم بودن مسئله و همچنين ارزش اقتصادي ساخت نيروگاه‌هاي مناسب، الگوهاي بسيار زيادي در اين زمينه ايجاد شده اند كه هر يك به گونه‌اي به گسترش ظرفيتهاي بخش انرژي مربوط مي‌شوند. در اين قسمت بعضي از اين الگوها مورد بررسي قرار گرفته و مقايسه مي‌شوند [۱].

الگوي ماركال[۳] كه توسط آژانس بين المللي انرژي طراحي شده است، مجموعه‌اي از الگوهاي سيستمي انرژي با رويكرد تحليلي پايين به بالا است. اين الگوها، هر دو بخش عرضه و تقاضاي انرژي را در برمي‌گيرند. ماركال قادر است براي برنامه‌ريزان و سياستگذاران بخش‌هاي خصوصي و دولتي، توضيحات و جزئيات وسيعي از فن‌آوري‌هاي توليد و مصرف انرژي را فراهم آورد. همچنين مي‌تواند ارتباط بين اقتصاد كلان و مصرف انرژي را به شكلي قابل فهم، تفسير و توجيه نمايد. الگوي ماركال كل بخشهاي انرژي را شامل مي‌شود.

مسيج[۴] (الگوي آلترناتيوهاي سيستم‌هاي عرضه انرژي و اثرات كلي زيست محيطي آن‌ها) يك الگوي بهينه‌يابي است كه براي برنامه‌ريزي‌هاي ميان‌مدت و بلندمدت انرژي، تحليل سياست‌هاي انرژي و توسعه حالتها به كار مي‌رود. ريشه‌هاي توسعه آن به برنامه سيستم‌هاي انرژي IIASA[۵] در دهه ۷۰ برمي‌گردد. اين الگو نيز مانند ماركال براي برنامه ريزي همه بخشهاي انرژي قابل استفاده است.

الگوي WASP[6] كه توسط آژانس بين المللي انرژي اتمي ايجاد شده است عمومي ترين و مشهورترين نرم افزار دراين زمينه مي‌باشد كه توسط كشورهاي زيادي مورد استفاده قرار گرفته است. اين الگو فقط گسترش بخش هاي نيروگاهي را مد نظر قرار مي‌دهد. اين الگو به صورت ملي و منطقه اي قابل استفاده است. در نهايت اين الگو تعيين مي‌كند كه چه نوع نيروگاه‌هايي بايد به سيستم اضافه شوند تا سيستم در سطحي از قابليت اعتماد پاسخگوي تقاضا بوده و مجموع هزينه‌ها را مينيمم كند ولي مكاني كه بايد نيروگاه در آنجا ساخته شود را تعيين نمي‌كند.

نمز[۷] سيستم الگو نمودن انرژي ملي آمريكا؛ براي بازه زماني تا سال ۲۰۲۵ ميلادي طراحي شده است. سياستگذاري در توليد، تبديل، مصرف و قيمت انرژي بر اساس اين الگو براي دوره زماني مورد مطالعه طراحي مي‌شود. طراحي سياست‌هاي انرژي در سيستم به هم پيوسته اقتصاد و انرژي انجام شده و تاثير سياست‌هاي انرژي بر تعامل سيستم اقتصاد و انرژي در موضوعات و زمينه‌هاي مختلفي مانند مسائل مالي و اقتصاد كلان، بازار جهاني انرژي، هزينه‌ها و نحوه دسترسي به منابع انرژي، معيارهاي انتخاب فن‌آوري‌هاي توليد و مصرف انرژي، ويژگي‌هاي عملكردي و هزينه فن‌آوري‌هاي انرژي و متغيرهاي جمعيتي مورد بررسي قرار گرفته است. اين الگو شامل بسته‌هاي نرم‌افزاري بسيار زيادي است كه در بخش تقاضا از روش پويايي سيستمها براي برآورد تقاضا استفاده شده است ولي در بخش عرضه انرژي از روشهاي بهينه سازي به منظور الگو نمودن و تصميم سازي استفاده شده است [۱۱].

۳- الگو و اجراي برنامه ريزي گسترش ظرفيت

مسئله گسترش ظرفيت توليد برق شامل تغييرات موجودي سرمايه صنعت برق در بازه برنامه ريزي از طريق سرمايه گذاري است. اين مسئله به اين پرسش پاسخ مي‌دهد كه چگونه صنعت برق، قابليتهاي توليد خود را در اثر تغيير تقاضا و يا مقررات عمومي تغيير مي‌دهد. اين الگو شامل تصميمات سرمايه گذاري در ظرفيتهاي جديد مي‌شود. همچنين محدوديتهاي آلودگي هاي محيطي توسط واحدهاي توليدي نيز در اين الگو لحاظ خواهند شد.

نيروگاه‌ها را مي‌توان به سه دسته واحدهاي بار پايه، مياني، و قله تقسيم بندي كرد. واحدهاي بار پايه واحدهايي هستند كه هزينه سرمايه گذاري آنها بالا ولي هزينه عملياتي آنها پايين است. اين نوع واحدها در طول كل زمانهاي برنامه ريزي قابل بارگيري هستند. در صورتي كه كار دائم توليد برق مورد انتظار باشد (بار پايه)، فن‌آوري با هزينه‌اي زياد سرمايه‌اي و هزينه

كم اجرا انتخاب مناسبي براي استفاده در افزايش ظرفيت توليد خواهد بود. در مقابل واحدهاي قله واحدهايي هستند كه هزينه سرمايه گذاري كم و عملياتي زيادي دارند و در طول ساعات قله بار گيري مي‌شوند. در صورتي كه برآورده كردن حداكثر نياز مصرف انرژي (قله بار) مورد نظر باشد، واحدهاي قله گزينه مناسب‌تري براي گسترش ظرفيت خواهند بود. واحدهاي مياني نيز واحدهايي هستند كه در بين اين دو حالت قرار دارند الگوي برنامه‌ريزي گسترش ظرفيت به دنبال انتخاب مناسبي بين انواع نيروگاه‌هاي پايه، مياني و پيک با توجه به رشد تقاضا است.

ظرفيت توليد نيز به تفكيك شركتهاي برق منطقه‌اي موجود الگو شده‌اند. صنعت برق شامل ۱۶ شركت برق منطقه‌اي در سطح كشور است كه ظرفيت توليد به تفكيک اين مناطق در نظر گرفته شده و ظرفيت انتقال برق نيز براي سادگي فقط شامل ظرفيت انتقال بين هر يک از مناطق فرض شده است.

اين الگو از روش برنامه ريزي خطي احتمالي با متغيرهاي عدد صحيح براي حل مسئله گسترش ظرفيتها استفاده مي‌كند. در اين الگو از كمينه سازي ارزش خالص كاسته شده هزينه هاي سرمايه گذاري و عملياتي در بازه زماني برنامه ريزي براي تعيين برنامه گسترش ظرفيت استفاده شده است. بازه زماني برنامه ريزي ۲۰ سال و مراحل برنامه ريزي دو ساله در نظر گرفته شده‌اند.

كل بار سالیانه با تقسيم بندي فصلي (تابستان، زمستان، بهار/پاييز) و ساعات روز (روز، غروب و شب) به ۹ بخش تقسيم شده است. دو بخش هم براي قله تابستان و زمستان جداگانه در نظر گرفته شده‌اند.

انواع فن‌آوري هاي توزيع‌پذير نظير بخاري، گازي، سيكل تركيبي، پيل سوختي و هسته‌اي و انواع فن‌آوريهاي تجديدپذير نظير برق آبي و زمين گرمايي و انواع فن‌آوريهاي متناوب نظير بادي، حرارتي خورشيدي و فتوولتائيك در الگو لحاظ شده‌اند.

در اين الگو متغيرهاي تصميم شامل ساخت ظرفيتهاي جديد توليد (فن‌آوري‌هاي توزيع پذير، تجديد پذير و متناوب)، ومبادله برق واحدها (بين مناطق) مي‌باشد. اين الگو تركيبي از گزينه‌هاي موجود كه موجب رعايت مقررات محيطي و توليد اقتصادي و قابل اطمينان برق در طول افق برنامه ريزي مي‌شود را ارائه مي‌كند.

۳-۱- تابع هدف

تابع هدف مسأله كمينه سازي مجموع تنزيل شده ارزش هزينه‌هاي گسترش جهت پاسخگويي به تقاضا با رعايت قوانين محيطي در طول افق برنامه ريزي است. ضريب هر متغير تصميم ارزش حال هزينه‌هاي تنزيل شده به قيمت سال جاري است. اجزاي هزينه‌اي تابع هدف شامل موارد زير مي‌گردد.

هزينه ساخت ظرفيت جديد (CBLD*BLD)

هزينه ساخت ظرفيت جديد براي منطقه ديگر (CBDI*BDI)

هزينه عملياتي ثابت واحدهاي توزيع پذير (CFXD*EXD)

هزينه‌هاي عملياتي شامل حمل و نقل بـراي ظرفيـت‌هـاي توزيـع پذير (COPD*OPD)

هزينه عملياتي ظرفيت تجديد پذير (COPR*OPR)

هزينه عملياتي ظرفيت آبي (COPH*OPH)

هزينــه ســوخت گــاز، نفــت كــوره و گازوئيــل(PNG*QNG، POL*QOL و PGO*QGO)

هزينه برآورده نشدن تقاضا (CUSD*USD)

متغيرهاي تصميم مسئله در دو مرحله اتخاذ مي‌شوند. متغيرهاي مرحله اول تصميمات مربوط به گسترش ظرفيت است. پارامتر غير قطعي در اين الگو تقاضا است. متغيرهاي تصميم مرحله دوم بعد از مشخص شدن مقدار پارامتر غير قطعي تقاضا تعيين مي‌شوند. متغيرهاي مرحله دوم شامل ميزان توليد هر يک از انواع ظرفيتها و تقاضاي پاسخ داده نشده در هر مرحله است.تابع هدف به شكل زير خواهد بود.

$$Min \quad \sum_{y,r,c} \mathrm{CBLD}_{yrc} \cdot BLD_{yrc} + \sum_{y,e,r,c} \mathrm{CBDI}_{yerc} \cdot BDI_{yerc} + \sum_{y,r,c} \mathrm{CFXD}_{yrc} \cdot EXD_{yrc}$$
$$+ \sum_{s \in S} \mathrm{P}_s \left\{ \sum_{y,r,D,l} \mathrm{COPD}_{yrDl} \cdot OPD_{yrDls} + \sum_{y,r,n} \mathrm{COPR}_{yrn} \cdot OPR_{yrns} + \sum_{y,r,l} \mathrm{COPH}_{yrl} \cdot OPH_{yrls} \right.$$
$$\left. + \sum_{y,r} (\mathrm{PNG}_y \cdot QNG_{rys} + \mathrm{POL}_y \cdot QOL_{rys} + \mathrm{PGO}_y \cdot QGO_{rys}) + \sum_{y,r,l} \mathrm{CUSD}_{yl} \cdot USD_{yrls} \right\}$$

كـه EXD مجمـوع ظرفيتهـاي در دسـترس و ظرفيتهـاي جديـد ساخته شده تا سال y مي‌باشد.

۳-۲- محدوديتها

آلودگيها

اين محدوديتها توليد آلودگيهاي مختلف توسط واحدهاي توليد برق را محدود مي‌كند. معادلات زير نشان‌دهنده محدوديت توليد آلودگيهاي SO_2 و CO_2 است.

SO2 نشان‌دهنده نرخ آلودگي دي اكسيد سولفور و CO2 نشان‌دهنده نرخ آلودگي دي اكسيدكربن براي هر يک از سوختها است. ميزان آلودگي براي هر منطقه برابر ضرب ميزان مصرف سوخت نيروگاه در همان منطقه (QNG,QOL,QGO) در نرخ آلودگيهاي آنها (SO2,CO2) خواهد بود.

$$\sum_{r} (QNG_{rys} \cdot \mathrm{SO2}_{NG} + QOL_{rys} \cdot \mathrm{SO2}_{OL} + QGO_{rys} \cdot \mathrm{SO2}_{GO}) \le \mathrm{ASO2}_y$$

براي هر سال y و حالت s ،

اين محدوديت به طور مشابه براي آلودگي هاي دي اكسيد

کربن نیز نوشته مي‌شود.

محدوديت تعمير و نگهداري برنامه ريزي شده

اين محدوديتها تضمين كننده آن هستند كه مجموع تعميرات برنامه ريزي شده براي هر فن‌آوري موجود، نيازهاي ساليانه تعميرات فن‌آوري مورد نظر را برآورده مي‌كند.

LHRS تعداد ساعات در مقطع l و PMC تعيين كننده ميزان ظرفيتي است كه در مقطع مورد نظر تعميرات برنامه ريزي شده خواهد داشت. عبارت CPMR*EXD تعداد ساعات تعميرات ظرفيتهاي موجود را نشان مي‌دهد.

$$\sum_{l} \mathrm{LHRS}_{l} \cdot PMC_{yrcls} - \mathrm{CPMR}_{rc} \cdot EXD_{yrc} \geq 0$$

براي هر ظرفيت نوع c در منطقه r و سال y و حالت تقاضاي s، نيازمنديهاي بار

هر مقطع بار نيازمنديهاي مخصوص ظرفيت (ارتفاع) و انرژي دارد. از آنجاييكه هر مقطع بار يک مقطع ثابت زماني را نشان مي‌دهد، ظرفيت و انرژي مورد نياز به طور مستقيم متناسبند و قابل اندازه گيري در واحد ظرفيت و يا انرژي هستند. ELC نشاندهنده ارتفاع مقاطع بار براي هر منطقه است.

انرژي مورد نياز در هر مقطع ممكن است توسط روشهاي مختلفي تامين شود. سهم ظرفيتهاي توزيع پذير در تامين نيازهاي مقطع بار حاصلضرب ظرفيت عملياتي از واحدهاي توزيع پذير OPD در نرخهاي كاهش آنها ELA است.

ظرفيت‌هاي تجديد پذير (به غير از متناوب) مانند زمين گرمايي با توجه به محدوديت منابع از ظرفيت كامل خود براي تامين بار استفاده مي‌كنند. سهم بار براي ظرفيت‌هاي تجديدپذير برابر ظرفيت OPR در نرخ كاهش ELR است.

ظرفيت انرژي‌هاي متناوب براي تامين انرژي هر يک از مقاطع نيز با توجه به ورودي آنها كه مي‌تواند كامل و يا قسمتي از آن در دسترس باشد استفاده مي‌شود. به عنوان مثال واحد خورشيدي در طول مقاطعي از بار كه خورشيد مي‌تابد، قابل استفاده است. در نهايت بار مي‌تواند توسط ظرفيت برق آبي OPH تامين گردد. بار تامين نشده نيز توسط متغير USD نشان داده شده است. پارامتر TLOSS نيز تلفات بين منطقه اي را نشان مي‌دهد.

$$\sum_{c} \mathrm{ELA}_{yrcl} \cdot OPD_{yrcls} + \sum_{n} \mathrm{ELR}_{yrn} \cdot OPR_{yrns} + OPH_{yrls}$$
$$+ \sum_{i} \mathrm{ELI}_{yril} \cdot EXDR_{yri} + \sum_{i} \sum_{z=1}^{y} \mathrm{ELI}_{zril} \cdot BLD_{zri} + \sum_{i,e} \sum_{z=1}^{y} \mathrm{ELI}_{zril} \cdot \mathrm{TLOSS}_{zer} \cdot BDI_{zeir} + USD_{yrls} \geq \mathrm{ELC}_{yrls}$$

براي تمام مقاطع بار l در سال y و منطقه r و حالت تقاضا s ، تعادل توليد

اين محدوديت ميزان توليد برق را با قابليتهاي توليد در دسترس محدود مي‌كند كه شامل واحدهاي موجود و جديد مي‌شود.

براي توليد برق، هر يک از فن‌آوريهاي توليد از ظرفيتهاي خود بهره‌برداري مي‌كنند (OPD). قابليتهاي توليد براي ظرفيت نوع c مجموع ظرفيتهاي موجود (EXDR) و ظرفيت جديد تجمعي (BLD يا BDI) با در نظر گرفتن تعميرات (PMC) مي‌باشد. همچنين ميزان ظرفيت موجود به تصميمات صادرات و واردات(TRN) آن مربوط است.

براي ظرفيتهاي تجديدپذير نيز حالتي مشابه ظرفيت‌هاي توزيع پذير برقرار است. در حاليكه بهره برداري از ظرفيتهاي تجديدپذير توسط دسترسي به منابع آن مشخص مي‌شود. براي ظرفيت برق آبي نيز نرخ بهره برداري از اطلاعات ميزان توليد آن در گذشته مشخص مي‌شود، كه فرض شده محدوديتهاي مصرف آب را رعايت مي‌كند.

براي ظرفيتهاي توزيع پذير:

$$OPD_{yrcls} - \mathrm{EXDR}_{yrc} - \sum_{j=1}^{y} BLD_{jrc} - \sum_{j=1}^{y} \sum_{e} BDI_{jecr} \cdot \mathrm{TLOSS}_{jer} + PMC_{yrcls}$$
$$+ \sum_{g} TRN_{yrcgs} - \sum_{e} TRN_{yecrs} \cdot \mathrm{TLOSS}_{yer} \leq 0$$

براي هرنوع ظرفيت c درمقطع l منطقه r سال y وحالت تقاضا s. حالت مشابهي را براي ظرفيت تجديدپذير خواهيم داشت.

اين محدوديت براي ظرفيت برق آبي به شكل زير است.

$$OPH_{yrls} - \mathrm{ELH}_{yrl} \cdot \mathrm{EXDR}_{yrh} - \sum_{j=1}^{y} \mathrm{ELH}_{yrl} \cdot BLD_{jrh} - \sum_{j=1}^{y} \sum_{e} \mathrm{ELH}_{yel} \cdot BDI_{jehr} \cdot \mathrm{TLOSS}_{jer}$$
$$+ \sum_{g} TRN_{yrhgs} - \sum_{e} TRN_{yehrs} \cdot \mathrm{TLOSS}_{yer} \leq 0$$

براي هر مقطع l و منطقه r در سال y ،

مصرف سوخت توسط فن‌آوريهاي مختلف توليد

براي واحدهاي نوع c با سوخت نفت، گاز و گازوئيل اين محدوديت به شكل زير است. توليد برابر با حاصلضرب ظرفيت (OPD) در نرخ كاهش آنها (ELA) و تعداد ساعات هر مقطع بار (LHRS) است. ضرب ميزان توليد در سهم مصرف سوخت (FS) مورد نظر در نرخ حرارتي (HRD) تقسيم بر ۸۲۹۷ كه ارزش حرارتي گاز مي‌باشد، مجموع سوخت مصرفي مطابق با ظرفيتهاي انتخاب شده مي‌باشد. QNG، QOL يا QGO به ترتيب متغيرهاي تصميم ميزان مصرف گاز و نفت و گازوئيل مي‌باشد. اين محدوديتها به شكل زير تعريف مي‌شوند.

$$\sum_{c,l} \mathrm{ELA}_{yrcl} \cdot OPD_{yrcls} \cdot \mathrm{FS}_{r,c,NG} \cdot \mathrm{LHRS}_{l} \cdot \mathrm{HRD}_{yrc} / 8297 - QNG_{rys} \leq 0$$

هر ظرفيت نوع c با سوخت گاز طبيعي در سال y و حالت تقاضا s ،

اين محدوديت به شكل مشابه براي سوختهاي نفت كوره و گازوئيل نيز نوشته مي‌شود.

محدوديت صادرات برق بين منطقه اي

محدوديت صادرات جريان برق بين منطقه‌اي از يک منطقه توسط قابليتهاي انتقال موجود محدود مي‌شود.

$$\sum_{c,g} TRN_{yrcgs} \le \mathrm{EXP}_{yr}$$

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

محدوديت ساخت ظرفيت جديد

به دليل وجود منابع محدود ساخت ظرفيت‌هاي جديد متناوب، تجديد پذير و برق آبي محدود مي‌شود.

$$\mathrm{EXDR}_{yrc} + \sum_{j=1}^{y} BLD_{jri} + \sum_{j=1}^{y}\sum_{e} BDI_{jrie} \le \mathrm{CAPL}_{cr}$$

براي هر فن‌آوري متناوب،تجديد پذير و برق آبي c در منطقه r ،

محدوديت توليد متناوب

اين محدوديت ميزان توليد برق توسط فن‌آوري‌هاي تجديدپذير متناوب براي حفظ پايداري در سيستم انتقال را مطرح مي‌كند.

$$\sum_{i,l} \mathrm{ELI}_{yril} \cdot \mathrm{EXDR}_{yri} \cdot \mathrm{LHRS}_{l} + \sum_{j=1}^{y}\sum_{i,l} \mathrm{ELI}_{yril} \cdot BLD_{jri} \cdot \mathrm{LHRS}_{l} + \sum_{j=1}^{y}\sum_{i,e,l} \mathrm{ELI}_{yril} \cdot BDI_{jeir} \cdot \mathrm{LHRS}_{l} - \mathrm{PINT} \cdot GEL_{yrs} \le 0$$

براي هر منطقه r در سال y با حالت تقاضاي s ،

كه GEL ميزان مجموع توليد برق است. در واقع سهم توليد متناوب از كل توليد بايد از PINT بيشتر نشود.

محدوديت سهم توليد تجديدپذير

اين محدوديت نشان مي‌دهد كه يک ميزان كمينه از سهم توليد برق بايد توسط فن‌آوري‌هاي تجديدپذير توليد شود. اين محدوديت براي فن‌آوري‌هاي تجديدپذير نظير خورشيدي، بادي، و زمين گرمايي براي هر سال نوشته مي‌شود.

$$\sum_{r,i,l} \mathrm{ISHR}_{i} \cdot \mathrm{ELI}_{yril} \cdot \mathrm{LHRS}_{l} \cdot (\mathrm{EXDR}_{yri} + \sum_{z=1}^{y}(BLD_{zri} + \sum_{e} \mathrm{TLOSS}_{zer} \cdot BDI_{zrie})) + \sum_{r,n,l} \mathrm{RSHR}_{n} \cdot \mathrm{ELR}_{yrn} \cdot \mathrm{LHRS}_{l} \cdot OPR_{yrns} - \mathrm{RMIN}_{y} \cdot \sum_{r} GEL_{yrs} \ge 0$$

براي هر سال y و حالت تقاضاي s ،

جمله اول مربوط به توليد فن‌آوري‌هاي متناوب موجود و جديد با توجه به سهم توليد مشخص شده (ISHR) هر فن‌آوري است. جمله دوم نيز به طور مشابه نشان‌دهنده توليد ظرفيت بقيه تجديدپذيرهاست. از ضرب مجموع توليد در سهم تعيين شده (RMIN) مينيمم نيازمنديهاي توليد تجديدپذير حاصل مي‌شود. در واقع سهم مجموع توليد تجديدپذير و متناوب از كل توليد بايد از RMIN بيشتر باشد.

محدوديت بودجه سرمايه‌گذاري

اين محدوديت تعيين كننده ميزان بودجه در اختيار صنعت برق براي ظرفيت سازي است كه مجموع هزينه‌هاي ساخت نبايد از بودجه موجود در هر سال فراتر رود.

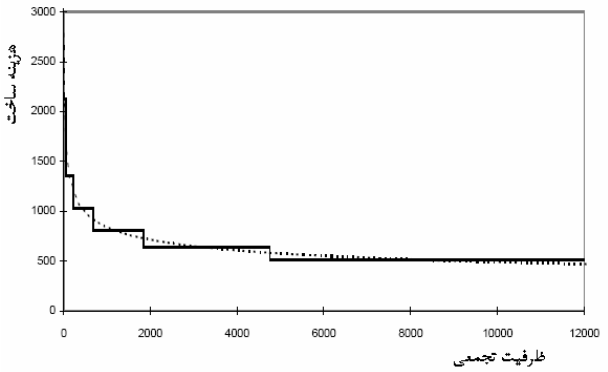
$$\sum_{r,c} CBLD_{yrc} \cdot BLD_{yrc} + \sum_{e,r,c} CBDI_{yerc} \cdot BDI_{yerc} \le BDGL_{y}$$

براي هر سال y ،

۳-۳- بومي شدن فن‌آوري

در اين قسمت رويكرد منحني يادگيري براي الگو نمودن بومي شدن فن‌آوري‌هاي توليد استفاده شده است كه نشان‌دهنده كاهش هزينه‌ها در اثر افزايش تجربه توليد مي‌باشد. تجربه توسط ظرفيت تجمعي اندازه گيري مي‌شود.

شكل (۱) تقريب پله‌اي از منحني يادگيري را نشان مي‌دهد. براي الگو نمودن رفتار يادگيري در اين الگو از روش موجود در مرجع [۱۲] استفاده مي‌شود.



شكل (۱): تقريب پله اي از منحني يادگيري

اين روش از متغيرهاي صفر و يك براي الگو نمودن يادگيري استفاده مي‌كند كه باعث كمتر شدن زمان حل مي‌گردد. اين روش در اين قسمت توضيح داده مي‌شود.

ظرفيت تجمعي توسط مجموع متغيرهاي λ در هر يك از مقاطع منحني يادگيري نشان داده مي‌شود.

$$C_{cy} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{ciy} \qquad (۲)$$

كه C ظرفيت تجمعي هر يك از فن‌آوري ها در هر سال است و انديس i نيز هر يك از مقاطع منحني يادگيري را نشان مي‌دهد و N تعداد مقاطع مي‌باشد.

هزينه تجمعي نيز به صورت تركيب خطي از متغيرهاي λ ، متغيرهاي صفر و يك و پارامترهاي α و β به صورت زير نوشته شده است.

$$TC_{cy} = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_{ci} \cdot \delta_{ciy} + \beta_{ci} \cdot \lambda_{ciy}) \qquad (۳)$$

δ متغير صفر و يك است كه فقط به ازاي يك i برابر يك است كه مقطع فعال را نشان مي‌دهد. پارامتر β شيب خط هر مقطع را نشان مي‌دهد كه بر اساس رابطه (۴) تعيين مي‌شود.

$$\beta_{ci} = \frac{TC_{c,i} - TC_{c,i-1}}{C_{c,i} - C_{c,i-1}} \qquad (٤)$$

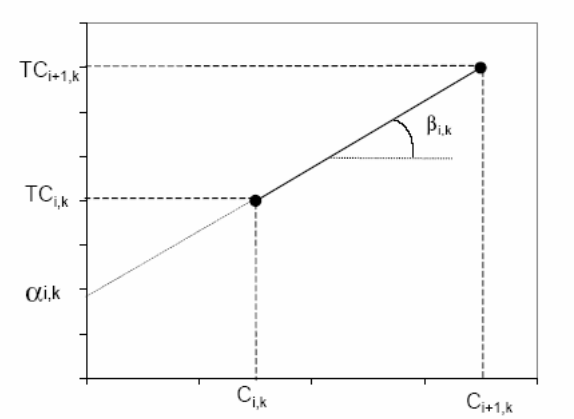
پارامتر α نيز عرض از مبدا هر يك از مقاطع را نشان مي‌دهـد كه توسط رابطه (۵) محاسبه مي‌شود.

$$\alpha_{ci} = TC_{c,i-1} - \beta_{ci} \cdot C_{c,i-1} \qquad (۵)$$

محدوديت‌هايي در اين زمينه اضافه مي شوند تا مقطـع فعـال از هزينه تجمعي را توسط متغير هاي صفر و يك تعيين كنند.

$$\lambda_{ciy} \geq C_{c,i} \cdot \delta_{ciy}$$
$$\lambda_{ciy} \leq C_{c,i+1} \cdot \delta_{ciy} \qquad (٦)$$

در واقع اين دو محدوديت تعيين مي‌كنند كـه متغيـر λ بـين دو نقطه متوالي از ظرفيت تجمعي مقاطع قرار گرفته است.



شكل (۲): پارامترهاي آلفا و بتا هر مقطع از هزينه تجمعي

با توجه به اينكه در هر مرحله زماني فقط يك مقطع فعال خواهد بود، لذا مجموع مقادير صفر و يك در هر مرحله برابر يك در نظر گرفته مي‌شود.

$$\sum_{i=1}^{N} \delta_{ciy} = ۱ \qquad (۷)$$

براي كاهش حجم محاسبات و افزايش سرعت حل مسئله مي‌توان محدوديتهاي اضافي تعريف نمود كه در واقع اين محدوديت‌ها نشانگر آن هستند كه تجربه بايد افزايش يابد و يا در همان حد باقي بماند. اين محدوديت‌ها در رابطه (۸) آمده است.

$$\sum_{P=1}^{i} \delta_{c,P,y} \geq \sum_{P=1}^{i} \delta_{c,P,y+1}$$
$$\sum_{P=i}^{N} \delta_{c,P,y} \leq \sum_{P=i}^{N} \delta_{c,P,y+1} \qquad (۸)$$

سرمايه گذاري انجام شده در هر مرحله نيز با توجـه بـه هزينـه تجمعي در رابطه (۹)، محاسبه مي‌شود.

$$IC_{cy} = TC_{c,y} - TC_{c,y-1} \qquad (۹)$$

در نهايت متغير IC با احتساب ضـريب كـاهش در هـر سـال در تابع هدف مسئله وارد مي‌شود.

۳-۴- آزمايش الگو

به منظور آزمايش و اعتبار سنجي الگوي ارائه شده آزمايشهاي مختلفي روي آن انجام شد. هر يک از آزمايشها و نتايج آنها به طور خلاصه در اين قسمت توضيح داده مي‌شوند.

براي آزمايش تاثير بخش احتمالي الگو، احتمال وقوع حالتهاي مختلف تقاضا متفاوت در نظر گرفته شد. يكبار احتمال حالت اول ۱۰۰ در صد و دو حالت ديگر ۰ درصد و در بار دوم احتمال حالت سوم ۱۰۰ در صد و دو حالت ديگر ۰ در صد در نظر گرفته شد. در آزمايش اول كه بر حالت اول تاكيد داشت ۴۵۰۰ مگاوات ظرفيت ساخته شد در حاليكه در آزمايش دوم كه بر حالت سوم تاكيد بيشتري دارد ۶۱۱۰۰ مگاوات ظرفيت ساخته شد. نتايج آزمايش اول برابر با جواب قطعي الگو با حالت اول تقاضا است و آزمايش دوم نيز برابر جواب قطعي الگو با حالت سوم است.

براي آزمايش تاثير ضرايب تابع هدف يكبار مقدار مرحله اول تابع هدف ۱۰ برابر در نظر گرفته شد و يكبار هم مقدار مرحله دوم تابع هدف ۱۰ برابر شد. در آزمايش اول نيروگاه‌هاي سيكل تركيبي، زمين گرمايي و آبي سهم بيشتري پيدا كرده اند. ولي در آزمايش دوم نيروگاه‌هاي گازي، اتمي و بادي سهم بيشتري دارند. دليل آن هم اين است كه با گران شدن هزينه سرمايه گذاري تمام فن‌آوريها، آنهايي كه هزينه متغير كمتري دارند (نيروگاه‌هاي بار پايه) پسنديده‌تر مي‌شوند. در حالت دوم با گرانتر شدن هزينه متغير توليد، نيروگاه‌هايي كه هزينه ساخت كمتري دارند (نيروگاه‌هاي بار قله) پسنديده‌تر هستند.

در يک آزمايش هم هزينه سوخت گاز دو برابر شد. در اين حالت نيروگاه گازي سهم كمتري را در طرح بهينه پيدا كرد. زيرا هزينه‌هاي متغير توليد آن افزايش يافته است. همچنين به دليل اينكه نيروگاه سيكل تركيبي بهره‌وري بسيار بالاتري نسبت به نيروگاه گازي دارد با گران تر شدن سوخت هزينه هاي متغير آن به مقدار كمتري زياد مي‌شود و لذا مطلوب تر شده و كمي سهم آن در طرح بهينه افزايش يافته است.

۳-۵- نتايج اجراي الگو

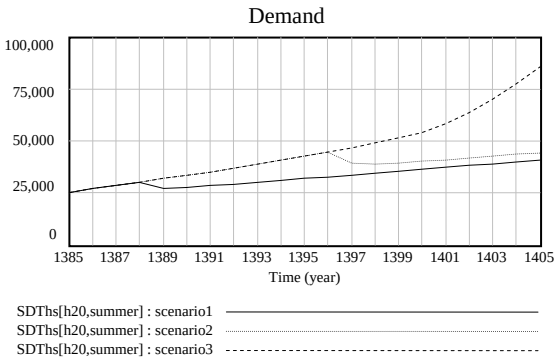
در اين قسمت نتايج اجراي الگو ارائه شده است. الگوي برنامه ريزي گسترش ظرفيت نيروگاهي شامل ۱۰ نوع فن‌آوري مختلف توليد در نظر گرفته شده است. افق زماني الگو ۲۰ ساله است كه به منظور كاهش حجم الگو و افزايش سرعت حل آن به ۱۰ مرحله دو ساله تقسيم شده است.

این الگو با استفاده از نرم افزار LINGO نسخه ۹,۰ طراحي و اجرا شده است. این الگو شامل ۱۴۷۱۲۴ متغیر تصمیم است که از این تعداد ۲۲۰ متغیر آن عدد صحیح است. تعداد محدوديتهاي الگو نيز ۶۴۲۳۷ است. زمان اجراي الگو در حالت كلي در حدود ۲۶۰ دقيقه است. با حذف بخش بومي سازي فن‌آوري زمان حل به كمتر از ۶۰ دقيقه كاهش خواهد يافت.

با توجه به اينكه برنامه ريزي نيروگاهي صنعت برق، يك برنامه ريزي طولاني مدت است، استفاده از روشهاي رگرسيون و اقتصاد سنجي براي پيش بيني تقاضاي برق آينده مناسب به نظر نمي رسند. زيرا روشهاي اقتصاد سنجي براي پيش بيني هاي كوتاه مدت مناسب است و تغييرات ساختاري در روند تقاضاي آينده را لحاظ نمي‌كنند. روشهاي اقتصاد سنجي و رگرسيوني به علت استفاده از ساختار خطي در پيش بيني، براي پيش بيني كوتاه مدت مناسب است درحاليكه برنامه‌ريزي گسترش ظرفيت طولاني مدت (در اين مقاله ۲۰ ساله) استفاده از روشهاي پيش بيني با ساختار خطي به علت طولاني بودن مدت پيش بيني خطاي پيش بيني را به مقدار زيادي افزايش خواهد داد. روشي كه در اين مقاله براي پيش بيني تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است روش پويايي سيستمها است كه به علت استفاده از ساختاري غير خطي پيش بيني‌هاي بلند مدت قابل قبولي از رفتار سيستم در آينده توليد مي‌كند و امكان تحليل تغييرات ساختاري در صنعت برق نظير تاثير تغيير قيمت برق بر تقاضاي آينده را فراهم مي‌كند.

در اين راستا از پروژه‌اي كه اخيرا در "موسسه پژوهش در مديريت و برنامه ريزي انرژي" انجام شده است با عنوان "مدلسازي سيستم هدفمند يارانه برق با نگرش سيستمي" [۲] استفاده شده است.

با استفاده از الگوي پويايي سيستمها در اين قسمت سه حالت خوش‌بينانه، ميانه و بدبينانه براي تقاضا در نظر گرفته شده است. در حالت خوش‌بينانه فرض شده كه قيمتهاي برق در سال ۱۳۸۸ به طور ساختاري تغيير مي‌يابند كه در اثر اين تغيير قيمت رشد تقاضا متعادل‌تر خواهد شد. در حالت ميانه سال تغيير قيمتها ۱۳۹۶ در نظر گرفته شده و حالت بدبينانه نيز فرض مي كند تا انتهاي دوره مورد مطالعه تغييرات ساختاري در ميزان تعرفه‌هاي برق صورت نخواهد كرد. پيش بيني تقاضا در سالهاي آتي توسط مدل پويايي سيستمها براي فصل تابستان در ساعت ۲۰ تحت هر يک از حالتها در شكل (۳) نشان داده شده است.



شكل (۳): پيش بيني تقاضا براي ساعت ۲۰ فصل تابستان بر حسب مگاوات

خروجي اصلي الگو ساخت فن‌آوريهاي مختلف در هر منطقه و در هر سال برنامه ريزي است. در اين قسمت خلاصه‌اي از خروجيهاي كلي الگو توضيح داده مي‌شوند.

ظرفيتهاي جديد پيشنهاد شده توسط الگو براي ساخت در(جدول ۱) براي هر فن‌آوري در هر سال نشان داده شده است كه هزينه طرح بهينه برابر ۳۸۸۸۲۳ ميليارد ريال است. همانطور كه در جدول مشخص است ساخت ظرفيت برق آبي براي دوره‌هاي اوليه افق زماني به مقدار زيادي پيشنهاد شده است. از بين انرژي هاي نو نيز از فن‌آوري‌هاي زمين گرمايي و بادي در طرح بهينه حضور دارند. از بين نيروگاه هاي حرارتي نيز نيروگاه گازي بيشترين سهم را در ساخت ظرفيت دارد و بيشتر در دوره‌هاي پاياني ساخته مي‌شود. نيروگاه سيكل تركيبي با اينكه كارايي بيشتري از نيروگاه گازي دارد ولي در طرح بهينه سهم كمتري را به خود اختصاص داده است. نيروگاه اتمي نيز به ميزاني در دوره‌هاي مياني وارد مدار شده است كه به دليل وجود محدوديت انتشار آلودگي توسط الگو ساخته مي-شود. پيشنهاد ساخت ظرفيت براي نيروگاه هاي بخاري، پيل سوختي، حرارتي خورشيدي و فتوولتائيک نيز در طرح بهينه داده نشده است.

۴- تحليل رفتار ميزان سرمايه‌گذاري حاصل از برنامه بهينه گسترش ظرفيتها

در اين قسمت به منظور تحليل رفتار سرمايه گذاري در هزينه‌هاي صنعت برق تحت هر يک از حالتها الگوي پويايي سيستمهايي ايجاد شده است كه قادر است نحوه تغيير رفتار سرمايه گذاري با برنامه ارائه شده توسط الگوي بهينه سازي را تحت هر يک از حالتهاي ممكن شبيه سازي كند. اين الگو با استفاده از نرم‌افزار vensim نسخه DSS ۵,۳ طراحي و اجرا

شده است.

براي تحليل رفتار ميزان سرمايه گذاري يک الگوي پويايي سيستمها ايجاد شده است که شامل سه بخش است. بخش اول ظرفيت سازي در نيروگاه‌ها با فن‌آوريهاي مختلف را نشان مي‌دهد که ظرفيتها با توجه به نتايج طرح بهينه شده در الگوي پويايي سيستمها ساخته مي‌شوند. يك بخش هم به زمانبندي توليد هر يك از فن‌آوريها با توجه به تقاضاي موجود اختصاص دارد. بخش آخر نيز هزينه‌ها و سود صنعت برق را محاسبه مي‌كند.

الگوي تحليل رفتار ارائه شده از الگوي پويايي سيستمهاي پيش بيني تقاضا نيز بازخورد دارد که نتايج به ازاي حالتهاي مختلف تقاضا بررسي شده است. در بخش ظرفيت سازي اين الگو فرض شده است در هر يک از حالتها هنگاميکه ميزان تقاضا با ظرفيت تفاوت زيادي دارد روند ظرفيت سازي به طور منطقي كاهش و يا افزايش مي‌يابد. يعني اگر صنعت برق ظرفيت موجود را براي پيش‌بيني تقاضا كافي بداند، روند ظرفيت سازي را كندتر خواهد كرد. همچنين اگر صنعت برق به مقدار زيادي كمبود ظرفيت در آينده را پيش بيني كند اقدام به ساخت ظرفيتهاي گازي به منظور كاهش كمبود توليد را خواهد داشت.

در شكل (۴-الف) سه خط اول تغيير ظرفيتها را توسط طرح بهينه شده تحت هر يک از حالتهاي تقاضا و سه خط دوم نيز تغيير ظرفيتها را توسط الگوي شبيه سازي نشان مي‌دهد که براي مقايسه آورده شده‌اند. با مقايسه نتايج آنها پيداست که در الگوي شبيه سازي شده با طرح بهينه در ابتدا ظرفيتهاي زيادي ساخته شده است که بيش از ظرفيت مورد نياز است و بيشتر آنها ظرفيتهاي برق آبي است. دليل پيشنهاد ساخت آنها توسط الگو نيز نياز سيستم به نيروگاه بار پايه است. براي حالتهاي اول و دوم با كاهش تقاضاي آنها روند ظرفيت سازي نيز كندتر شده است ولي در حالت سوم صنعت برق با كمبود ظرفيت مواجه شده كه مقداري از اين كمبود را با ساخت نيروگاه گازي جبران كرده است.

جدول (۱): پيشنهاد ساخت ظرفيت ها براي كل كشور بر حسب مگاوات در برنامه ۲۰ سال

سال / نوع نيروگاه	۱۳۸۵	۱۳۸۷	۱۳۸۹	۱۳۹۱	۱۳۹۳	۱۳۹۵	۱۳۹۷	۱۳۹۹	۱۴۰۱	۱۴۰۳
بخاري	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
گازي	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳۴۹	۴۹۳۹	۹۳۷۵	۳۲
سيكل تركيبي	۰	۰	۰	۰	۰	۲۷۲۶	۵۰۹	۱۵۸۴	۲۸۷۶	۱۰۵
پيل سوختي	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اتمي	۰	۰	۰	۰	۰	۷۸۰	۱۶۲۹	۲۸۹	۰	۰
زمين گرمايي	۰	۰	۱۵۵۲	۴۴۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
برق آبي	۰	۰	۰	۳۳۴۹	۶۴۷۴	۲۵۱۹	۱۲۵	۹۱۲	۶۶۵	۱۹۶۵
بادي	۰	۰	۰	۳۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حرارتي خورشيدي	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فتوولتائيك	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

شكل (۴-ب) درصد تقاضاي برآورده نشده را تحت هر يک از حالتهاي تقاضا نشان مي‌دهد. همانطور كه نشان داده شده است درصد تقاضاي برآورده نشده كاهش يافته و به نزديک صفر رسيده است. در حالت سوم تقاضاي برآورده نشده در انتهاي دوره به شدت افزايش يافته است زيرا صنعت برق در انتهاي حالت سوم با كمبود ظرفيت مواجه مي‌شود كه با شروع به ساخت نيروگاه گازي كمي از آن را جبران مي‌كند. سود صنعت برق نيز درشكل (۴-ج) نشان داده شده است كه حاصل كسر درآمد حاصل از فروش برق از هزينه‌ها است.

همانطور كه نشان داده شده است با تغيير قيمتها سود به يكباره زياد شده كه در دراز مدت روند رشد بيشتري پيدا خواهد كرد. همانطور كه نشان داده شده سود صنعت برق منفي است. يعني صنعت برق يک صنعت زيان ده است كه با تغيير هر چه زودتر قيمتها صنعت برق مي‌تواند زيان خود را كمتر كرده و در آينده سود آور شود.

به منظور محاسبه هزينه اضافي كه صنعت برق به علت عدم قطعيت در تقاضا متحمل خواهد شد، طرح بهينه قطعي تحت هر يک از حالتها ايجاد شد و نتايج آن در الگوي پويايي سيستمها وارد شد تا مقايسه‌اي بين هزينه ها صورت گيرد. درشكل (۴-د) سه خط اول مربوط به هزينه طرح بهينه احتمالي و سه خط دوم هزينه طرح بهينه قطعي تحت هر يک از حالتها است. در دوره‌هاي انتهايي حالت سوم هزينه رشد زيادي پيدا كرده است

که به دليل وجود تقاضاي برآورده نشده است.

براي محاسبه هزينه اضافي، ارزش انتظاري اطلاعات درست (EVPI[8]) محاسبه مي‌شود که برابر بيشينه هزينه‌اي است که صنعت برق آمادگي پرداخت در مقابل اطلاعات درست از آينده را دارد. اين مقدار توسط رابطه (۱۰) تعريف مي‌شود.

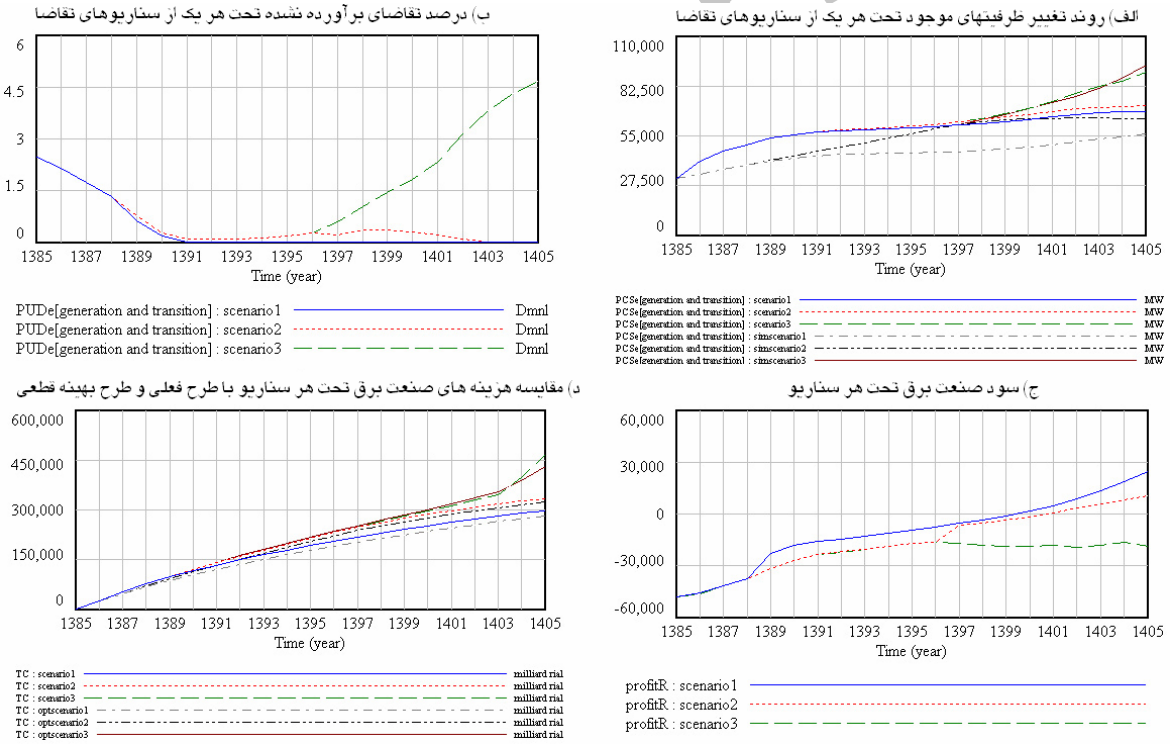
$$EVPI = HN - WS \qquad (۱۰)$$

که HN[9] هزينه طرح احتمالي و WS[10] اميد رياضي هزينه طرحهاي قطعي براي هر حالت است. ارزش انتظاري مورد محاسبه براي افق زماني ۲۰ ساله رقم ۱۹۲۱۹ ميليارد ريال است.در واقع اين مبلغ هزينه‌اي است که صنعت برق بايد به علت وجود عدم قطعيت در تقاضا بپردازد.

۵- نتيجه گيري و پيشنهادها

با نگاهي گذرا به نتايج به دست آمده مشخص است که الگو، پيشنهاد ساخت نيروگاه برق آبي را در دوره‌هاي اوليه مي‌دهد. نيروگاه گازي نيز بيشترين سهم را از گسترش ظرفيت دارد. از ديگر نيروگاه‌هاي حرارتي، نيروگاه‌هاي سيکل ترکيبي و اتمي نيز در طرح بهينه وجود دارند که نيروگاه اتمي به علت وجود محدوديت‌هاي آلودگي ساخته مي‌شود. از نيروگاههاي انرژي هاي نو، فن‌آوري زمين گرمايي و بادي در طرح بهينه حضور دارند. ساخت نيروگاه زمين گرمايي اقتصادي‌تر از نيروگاه بادي به نظر مي‌رسد ولي ساخت چنين نيروگاهي براي کشور محدوديت دارد و پتانسيل زيادي از اين نوع در کشور موجود نيست، اگر چه هنوز مطالعه جامعي در زمينه تعيين پتانسيل زمين گرمايي کل کشور انجام نشده است. ظرفيت بادي نيز به ميزان اندکي در طرح بهينه ديده مي‌شود.

در کل طول دوره مورد مطالعه پيشنهاد ساخت ۴۶۳۰۰ مگاوات ظرفيت نيروگاهي جديد داده شده است. سهم نيروگاه‌هاي گازي از گسترش ظرفيتها ۳۹ درصد است که بيشترين سهم را در مقابل با بقيه فن‌آوري‌ها دارد. بعد از آن به ترتيب نيروگاه برق آبي با ۳۳ درصد، نيروگاه سيکل ترکيبي با ۱۷درصد، هسته‌اي با ۶ درصد، زمين گرمايي با ۴ درصد و بادي با ۱ درصد در طرح بهينه گسترش ظرفيت سهم دارند.



شکل (۴): شبيه‌سازي رفتار ميزان سرمايه‌گذاري حاصل از برنامه بهينه گسترش ظرفيتها

در بخش آخر با استفاده از يك الگوي پويايي سيستمها، رفتار سرمايه گذاري تحت هر يك از حالتها تحليل شد. همچنين تقاضا براي حالتهاي مختلف در اين بخش نشان داده شد. بيشترين ميزان تقاضا در حالت اول در حدود ۳۹۷۰۰ مگاوات، براي حالت دوم ۴۴۶۰۰ مگاوات و براي حالت سوم ۷۷۶۰۰ مگاوات است. اين اعداد نشان مي‌دهند که سياستهاي صحيح

قيمت‌گذاري تاثير بسيار زيادي در ميزان تقاضا خواهند داشت. همچنين در اين بخش نشان داده شد كه تقاضاي برآورده نشده توسط طرح بهينه شده تحت حالت اول و دوم بسيار كم است، ولي تحت حالت سوم از اواسط دوره به شدت افزايش يافته و تا انتهاي دوره به ۴ درصد نيز مي‌رسد. هزينه‌ها تحت هر حالت به ترتيب برابر ۲۹۷۹۹۶، ۳۳۴۸۹۶، و ۴۶۶۳۶۶ ميليارد ريال است. سود صنعت برق كه برابر تفاوت درآمد و هزينه ها است نيز در اين قسمت محاسبه شد. سود صنعت برق در آخرين سال برنامه‌ريزي براي حالت اول ۲۴۵۳۰، براي حالت دوم ۱۰۷۱۱ و براي حالت سوم ۱۸۷۰۰- ميليارد ريال خواهد بود. بنابراين صنعت برق مي‌تواند با ايجاد تغييرات ساختاري در تعرفه‌ها و اجراي سياستهاي صحيح قيمت‌گذاري سود خود را به مقدار زيادي افزايش دهد.

چند پيشنهاد براي ادامه كار در اين زمينه ارائه مي‌شود.

از لحاظ تئوري امكان افزودن پارامتر ريسك به الگو مي‌تواند جالب باشد. يعني تصميم گير بتواند با تعيين ميزاني از ريسك براي آينده سرمايه گذاري كند. همچنين مي‌توان حل مسئله برنامه‌ريزي گسترش ظرفيت را با روش بهينه سازي استوار[11] پيشنهاد داد تا نتايج استوارتري را نسبت به عدم قطعيت موجود در تقاضا بدست آورد. در روش بهينه سازي استوار كه شاخه‌اي از برنامه ريزي احتمالي است، واريانس برآورده نشدن محدوديتها به حداقل مي‌رسد كه باعث هموارسازي جوابها خواهد شد.

با توجه به وسعت مسئله و زمان حل زياد آن، ارائه روشهاي ابتكاري به منظور كاهش زمان حل مي‌تواند بسيار مفيد باشد. در صورت پيچيده‌تر شدن الگو نمودن مسئله، زمان حل به ميزان زيادي افزايش خواهد يافت. به ويژه زمان حل مسئله با اضافه شدن متغيرهاي عدد صحيح به مسئله بسيار زياد مي‌شود. براي نمونه اگر اندازه هر يک از واحدهاي توليد در اندازه‌هاي واقعي و استاندارد آنها در نظر گرفته شوند، چنين مشكلي پيش مي‌آيد.

از لحاظ كاربردي امكان آن وجود دارد كه در الگوي بهينه سازي كل بخشهاي انرژي اعم از انرژي‌هاي اوليه و ثانويه نظير نفت، گاز، برق و انرژي هاي نو در يك الگوي بهينه سازي با هم الگو شوند. اين كار به ما اجازه مي‌دهد تا طرح بهينه را براي كل بخش‌هاي انرژي ارائه كنيم، زيرا هر يك از بخشهاي انرژي جدا از هم نيستند و به نحوي به هم وابسته‌اند. بدين منظور پيشنهاد مي‌شود الگوي كلاني براي كليه بخشهاي انرژي تهيه شود تا ارتباط بخشهاي مختلف انرژي در تصميم‌گيري لحاظ شوند. سپس در مرحله بعدي هر يك از بخشها به صورت جزئي‌تر الگو شوند تا بدين شكل ارتباط بين بخشهاي مختلف انرژي در تصميم‌گيري حفظ شود.

در اين مقاله تاثير قيمت گذاري متفاوت براي ساعات اوج مصرف مورد بررسي قرار نگرفت. با استفاده از سياست‌هاي صحيح قيمت گذاري ساعات اوج مصرف مي‌توان مصرف كنندگان را به مصرف در ساعات كم‌بار تشويق كرد كه باعث كاهش اوج مصرف مي‌شود. با كاهش اوج مصرف نيز نياز به سرمايه گذاري در ظرفيتهاي جديد كاهش خواهد يافت. بررسي اين مسئله و تحليل هزينه و سود آن براي صنعت برق نيز مي‌تواند موضوعي براي تحقيقات آتي باشد.

در اين مقاله فرض شد كه واحدهاي موجود به هنگام تمام شدن عمر آنها، با تعميرات اساسي طول عمر آنها افزايش داده مي شود ولي تعميرات اساسي مي‌تواند به عنوان يک متغير تصميم براي واحدهاي موجود باشد كه چه زماني روي واحدهاي موجود تعميرات اساسي انجام گيرد و يا مستهلک شده و از موجودي ظرفيتها خارج شوند. در نظر گرفتن اين موضوع به اطلاعات ميزان هزينه لازم براي تعميرات اساسي هر يک از واحدها نياز خواهد داشت كه به سادگي قابل دسترس نيست و همچنين پيچيدگي الگو را نيز بيشتر خواهد نمود ولي نتايج آن به واقعيت نزديک تر خواهد بود.

۶- مراجع

[۱] گزارش مدل‌هاي انرژي، موسسه پژوهش در مديريت و برنامه‌ريزي انرژي، ۱۳۸۴.

[۲] پروژه هدفمندسازي يارانه برق و بررسي تأثيرات آن بر شاخصهاي صنعتي برق (فاز مدلسازي)، موسسه پژوهش در مديريت و برنامه ريزي انرژي، 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 Source*s, vol. 16 , pp. 301-316, 1994.

[۵] International Atomic Energy Agency (IAE*A), 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.

[۷] J. Alvarez; K. Ponnambalam, V. Quintana, "Generation Expansion under Risk Using Stochastic Programming", Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, pp. 530-537, 2005.

[۸] Botterud A.; Ilic M.; Wangensteen I.; "Optimal Investments in Power Generation Under Centralized and Decentralized Decision Making", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 254-263, 2005.

[۹] Pokharel S.; Ponnambalam K.; "Investment Planning for Electricity Generation Expansion", International Journal of Energy Research, Vol. 21, pp. 185-194, 1997.

[۱۰] Albornoz V.M.; Benario P. ; Rojas M.E.; "A two-stage stochastic integer programming model for a thermal power system expansion", International Transactions in Operational Research, Vol.11, pp. 243-257, 2004.

[۱۱] Energy Information Administration, "The Electricity Market Module of the National Energy Modeling System : Model Documentation Report", March 2004.

[۱۲] Barreto L.; "Technological Learning In Energy Optimization Models And Deployment Of Emerging Technologies", Doctoral Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2001.

۷- زیرنویس ها

[1] Power System Expansion
[2] Extensive Form
[3] MARKAL: واژه MARKAL متشکل از حروف اول عبارت MARKet ALlocation به معناي تخصيص بازار مي‌باشد.
[4] MESSAGE: **M**odel for **E**nergy **S**upply **S**trategy **A**lternatives and their **G**eneral **E**nvironmental Impact
[5] International institute for Applied Systems Analysis
[6] WASP: Wien Automatic System Planning
[7] NEMS: National Energy Model System
[8] Expected Value of Perfect Information
[9] Here-and-Now
[10] Wait-and-See
[11] Robust Optimization