تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یکم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۴
Volume 1, No. 1, Spring 2005(IR - WRR)
۶۸-۷۷

اعمال عدم‌قطعیت تقاضا برای انرژی به مدل بهینه‌یابی سیستم نیروگاههای آبی- حرارتی با مخازن چند منظوره

رضا اردکانیان[۱]، اکبر کریمی[۲]

چکیده

بهره‌برداری توامان نیروگاههای آبی – حرارتی از روشهای بهینه برای کاهش هزینه تولید انرژی الکتریکی می‌باشد. تحقیقات برای تهیه مدلهای بهره‌برداری از نیروگاههای آبی – حرارتی تقریبا از ۵۰ سال قبل آغاز شده و با پیشرفت تکنیکهای حل مسائل بهینه‌یابی ، مدلهای جدید تهیه گردیده است. از جمله این مدلها مجموعه نرم‌افزاری HTCOM[۱] است که در سال ۱۹۹۷ در دانشگاه مکمستر(کانادا) تهیه شده است. در این مجموعه که برنامه‌ریزی بلند مدت سیستم نیروگاههای آبی – حرارتی را ارائه می‌نماید ، آورد رودخانه غیرقطعی و تقاضا برای انرژی قطعی در نظر گرفته شده است. در این مقاله با توجه به قابلیتهای این مدل در برنامه‌ریزی بهینه سیستم نیروگاههای آبی – حرارتی ، روش اعمال عدم‌قطعیت در تمام پارامترهای این مدل از جمله تقاضا برای انرژی، به مجموعه نرم‌افزاری HTCOM اضافه شده و نتایج کاربرد آن در سیستم خوزستان شامل مخازن چند منظوره و نیروگاههای حرارتی عرضه شده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی تولید نیروگاههای آبی- حرارتی، برنامه‌ریزی استوکستیک، روش تحلیل سناریوها، مدلهای تلفیقی ، عدم‌قطعیت تقاضا برای انرژی.

Applying Uncertainty in Energy Demand to Hydrothermal Coordination Model for Multi-purpose Reserviors

Reza Ardakanian[1], Akbar Karimi[2]

Abstract

Coordination of operation of hydrothermal power systems is in line with optimum reduction of energy generation costs. Researches for preparation of operational models for planning of hydrothermal power systems have been started since 50 years ago. HTCOM software package as one of these models was developed in 1997 in McMaster University ,Canada. This model determines long-term operational policies for a hydrothermal power system with multi-purpose reservoirs. This nonlinear model considers stochastic inflows by scenario analysis. However, energy demand is considered deterministic. Considering capabilities of this model in dealing with hydrothermal planning and to improve its performance, uncertain energy demand is applied to this model in this paper. The improved model has been utilized in a real world system in the Khuzestan province in Iran, comprising of multi-purpose reservoirs and thermal power plants.

Keywords: Hydrothermal planning, Uncertain parameters, stochastic programming , Scenario Analysis, Energy Demand

[۱] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی شریف

[1] *Assistant Prof. School of Civil Engineering, Sharif University of Technology*
[2] *MSc. Student Of Water Resources Engineering, School of Civil Engineering, Sharif University of Technology*

۱- مقدمه

در بیشتر نقاط دنیا برای تامین انرژی الکتریکی از نیروگاههای آبی، حرارتی و یا هر دو آنها استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه از این منابع برای تولید انرژی الکتریکی به طور قطع لازم و ضروری می‌باشد. لزوم این امر بدان علت است که استفاده توامان (هماهنگ‌سازی) از هر دو منبع چنانچه به طور بهینه باشد صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه‌ای در هزینه تولید انرژی الکتریکی به همراه خواهد داشت. موضوع این تحقیق اعمال عدم‌قطعیت تقاضا برای انرژی به مدل برنامه‌ریزی بلند مدت سیستم نیروگاههای آبی – حرارتی با مخازن چند منظوره می‌باشد. تابع هدف این مدل شامل هزینه تولید انرژی از نیروگاههای آبی- حرارتی و صادرات و واردات انرژی می باشد. قیود مساله شامل معادله پیوستگی در مخزن و گره‌های سیستم، حداکثر ظرفیت تولید برای نیروگاههای آبی و حرارتی، ارضا نیازهای آبی به صورت یک نیاز یکپارچه، تامین نیاز انرژی و حداقل رهاسازی آب در رودخانه کارون می‌باشد. مسایلی مثل کنترل سیل، حداکثر حجم آب قابل ذخیره و حداقل آبی که بایستی در مخزن موجود باشد در قالب منحنی فرمان به مدل اعمال می‌گردد. این مدل از نرم‌افزار برنامه‌ریزی بهینه سیستمها، GAMS[2] ، استفاده می‌کند.

در این مدل عدم‌قطعیت مربوط به آورد به مخازن نیروگاهها در نظر گرفته شده است. از دیگر خصوصیات این مدل چند دوره‌ای[3] بودن آن می‌باشد. در این مدل با استفاده از روش تحلیل سناریوها عدم‌قطعیت در نظر گرفته می‌شود. مدل در یک افق سه ساله و با دوره‌های یک ماهه حل می‌شود. با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف در قالب برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای غیرقطعی پیوست (الف) مساله اولیه از نظر محاسباتی، بسیار بزرگ می شود. برای حل مساله اولیه بزرگ شده از الگوریتم بندرز پیوست (ب) استفاده می‌شود. این الگوریتم مساله اولیه را به زیر مساله‌هایی به تعداد سناریوها و یک مساله اصلی تجزیه می‌کند. سپس در یک فرایند تکراری شامل حل زیر مساله‌ها و هماهنگ‌سازی آنها توسط مساله اصلی، مساله اولیه به سمت جواب بهینه سوق پیدا می‌کند. بسته نرم‌افزاری HTCOM که در دانشگاه مکمستر تهیه شده، شامل سه مدل با نامهای HTCOM-I، HTCOM-II و HTCOM-III می شود. تفاوت اصلی این سه مدل در نحوه برخورد با عدم‌قطعیت پارامترها می‌باشد. مدل اول، یک مدل قطعی می باشد. دو مدل دیگر عدم‌قطعیت در پارامترها را در نظر می‌گیرند. تفاوت مدل دوم و سوم در این می‌باشد که مدل دوم نسبت به مدل سوم مقیدتر است. مدل اول بررسی عملکرد فعلی یک سیستم شامل نیروگاههای آبی- حرارتی ، تعیین امکان بهبود در عملکرد سیستم را انجام می‌دهد. چنانچه امکان ایجاد بهبود در عملکرد سیستم توسط مدل تعیین شود، سپس با شبیه‌سازی، کاربرد عملی مدل در سیستم و مقایسه آن با عملکرد واقعی در یک دوره آزمایشی که از عملکرد گذشته سیستم انتخاب می شود نیز برای تعیین مقدار واقعی بهبودی که در صورت استفاده از مدل در عملکرد سیستم قابل حصول می باشد صورت می پذیرد(مدل دوم). در صورتی که میزان بهبود از نقطه نظر تصمیم گیرنده‌ها برای سیستم قابل قبول باشد از این مدل برای برنامه‌ریزی عملکرد آتی سیستم استفاده می‌کنند(مدل سوم). در مدل اول که تمام پارامترها را قطعی در نظر می گیرد، یا به عبارت دیگر نسبت به مقدار پارامترهای غیر قطعی در دوره آزمایشی که مقدار واقعی جریان ورودی به مخازن و تقاضا برای انرژی است، اطلاع[4] دارد، امکان بهبود بالقوه در عملکرد سیستم ارزیابی می شود. در واقع مدل با امتیاز اطلاع از تحقق پارامترهای غیر قطعی در دوره آزمایشی اقدام به برنامه ریزی میکند در حالی که در همین دوره بهره بردار سیستم نسبت به این پارامترها هیچ اطلاعی نداشته و در معرض این عدم‌قطعیتها اقدام به برنامه‌ریزی کرده است.

بدین ترتیب و با توجه به پیش آگهی مدل جوابهای آن شبیه یا بهتر از عملکرد بهره بردارخواهد بود. توجه شود این نتیجه به شرطی صحت دارد که مدل دارای ساختاری کامل بوده و سیستم را به خوبی تصویر کند. به شرط اینکه نتایج مدل اول امکان بهبود بالقوه در عملکرد سیستم را نشان دهد. برای اطلاع از میزان دقیق این بهبود، مدل دوم در شرایطی مشابه با شرایط بهره بردار اجرا می شود. بهبود بالقوه با توجه به کمتر بودن هزینه استفاده از سیستم برای تولید انرژی ، صادرات و واردات آن و نیز تخطی از تامین نیازهای مختلف می باشد. مدل اول با امتیاز، اطلاع از پارامترهای غیر قطعی برنامه ریزی کرده است در حالی که در واقعیت چنین شرایطی برای مدل فراهم نیست. بنابراین برای دقیقتر شدن مقایسه نتایج مدل با عملکرد واقعی در دوره آزمایشی، مدل دوم در ابتدای دوره آزمایشی سه ساله بدون هیچ اطلاع نسبت به تحقق پارامترهای غیر قطعی در سه سال آینده(۱۳۷۲-۱۳۷۴) قرار می گیرد.

مدل با استفاده از روش تحلیل سناریوها اقدام به تولید سناریوهای تحقق پارامترها در سه سال آینده میکند و در قالب الگوریتم بندرز مساله را حل میکند. با گذشت اولین دوره(ماه) و تحقق پارامترهای غیر قطعی در آن، مدل برنامه ریزی برای باقی مانده دوره ها را با تصحیح مقدار ماه اول پارامترها به مقدار تحقق یافته آن ماه و انجام برنامه ریزی، که در واقع هم برنامه ریزی برای باقی مانده دوره ها می باشد و هم شبیه سازی رفتار سیستم در ماه گذشته، میزان تخطی ها از اهداف ماه اول را تعیین می کند. سپس با تحقق ماه دوم علاوه بر ماه اول، مقدار پارامترهای سناریوها در ماه دوم نیز به مقدار تحقق یافته تصحیح می شود. دوباره مدل اجرا شده و تخطی های ماه دوم نیز بدست می آید. این روند تا ۳۶ امین دوره از سه سال ادامه می یابد و در نهایت که همه پارامترها تحقق پیدا کردند میزان تخطی‌های مدل محاسبه شده و هزینه راه اندازی سیستم نیروگاه ها و تولید انرژی و صادرات و واردات محاسبه می شود. چنانچه هزینه مدل و میزان

تخطیهای آن از ارضا نیازهای مختلف در مقایسه با عملکرد واقعی در همان سه سال کمتر باشد. تصمیم گیرنده مطمئن می شود که استفاده از مدل به صرفه تر می باشد.

با حصول این اطمینان تصمیم گیرنده می تواند از این پس از مدل در قالب مدل سوم برای برنامه ریزی عملکرد سیستم استفاده کند. با توجه به قابلیتهای این مدل در برنامه ریزی سیستمهای نیروگاهی و برای دقیق تر شدن جوابهای این مدل در این تحقیق مساله [۴] اعمال عدم قطعیت تقاضا برای انرژی به مدل HTCOM [۳] بررسی می شود. هماهنگ سازی برنامه تولید نیروگاه های آبی – حرارتی در یک افق بلند مدت از اهمیت ویژه ای در برنامه ریزی تولید سیستم نیروگاه های آبی – حرارتی برخوردار می باشد این اهمیت بدان علت است که نتایج برنامه ریزی بلند مدت بعنوان هدف برای برنامه ریزی میان مدت و کوتاه مدت تلقی می شود. بنابراین هرچه این اهداف دقیقتر و واقع بینانه تر تعیین شوند ، مطمئنا بهره برداری از سیستم نیروگاه های آبی – حرارتی نیز بهینه‌تر خواهد شد.

در مساله برنامه‌ریزی بلند مدت اکثر پارامترها غیرقطعی می‌باشند و نمی‌توان آنها را قطعی فرض کرد چون خطاهای بزرگی را در جواب مساله ایجاد می‌کند. این موضوع پیچیدگی خاصی به مساله برنامه‌ریزی می‌دهد که البته محققین فراوانی سعی کرده‌اند که این مساله را با تمام پیچیدگیهایش در قالب برنامه‌ریزی ریاضی و با استفاده از تکنیکهای مختلف حل کنند. Ardekanian(1997) برای بهینه‌یابی برنامه‌ریزی بلند مدت سیستم نیروگاه‌های آبی – حرارتی با مخازن چند منظوره سیستم را به صورت یک مساله خطی استوکستیک فرمولبندی کرده است. در این مدلسازی عدم‌قطعیت در ورودی آب به مخازن در نظر گرفته شده است. وی با استفاده از تکنیک تجزیه Benders و روش تحلیل سناریوها اقدام به حل این مساله می‌نماید. روزبهانی(۱۳۷۹) مدل ارائه شده توسط Ardekanian(1997) را به نحوی بهبود بخشید که رابطه غیرخطی توان تولیدی نیروگاههای آبی نیز در نظر گرفته شود. حمیدی(۱۳۸۰) با استفاده از نتایج مدل بلند مدت HTCOM اقدام به تهیه مدلهای میان مدت و کوتاه مدت برای برنامه‌ریزی سیستم نیروگاههای آبی – حرارتی کرده‌اند. فرخ زاد(۱۳۸۰) با استفاده از دو رویکرد آزادسازی لاگرانژ و همچنین الگوریتم ژنتیک اقدام به برنامه‌ریزی سیستم نیروگاههای آبی – حرارتی در یک افق یک ساله در مقاطع زمانی ماهیانه کرده است. در مدلی که توسط ایشان تهیه شده است عدم‌قطعیت مربوط به آورد به مخازن در قالب مدل پیشبینی آماری ، ARMA ، در نظر گرفته شده است. تقاضا برای انرژی در قالب اطمینان‌پذیری [۵] تامین تقاضا برای انرژی در نظر گرفته شده است. Chao-an et.al.(1990) از روش تجزیه- هماهنگی [۶] برای بهینه‌یابی برنامه‌ریزی بلند مدت سیستم نیروگاههای آبی- حرارتی با در نظر گرفتن آورد غیرقطعی در قالب یک زنجیره مارکف استفاده کرده‌اند. Nowak(1996) با استفاده از روش جهت های نزولی [۷] برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم نیروگاههای آبی- حرارتی را انجام داده‌اند. سیستم به صورت یک برنامه خطی مختلط با متغیرهای دوتایی فرمولبندی شده است. در این مدل عدم‌قطعیت در تقاضا برای انرژی توسط روش درخت سناریوها [۸] به مدل اعمال شده است.

Pereire et.al.(1999) مساله برنامه‌ریزی میان مدت و کوتاه مدت سیستم نیروگاههای آبی- حرارتی را با فرمولبندی در قالب SDDP [۹] مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مدل هم ورودی آب به مخازن و هم تقاضا برای انرژی هر دو غیر قطعی در نظر گرفته شده اند. عدم‌قطعیت در هر دو پارامتر با استفاده از روش درخت سناریوها به مدل اعمال می‌شود. با توجه به کارهای انجام شده در این زمینه مساله عدم‌قطعیت و اعمال آن به مدلهای برنامه‌ریزی به طور کامل انجام نشده و در مواردی نیز که عدم‌قطعیت در بیش از یک پارامتر (حداکثر دو پارامتر) در نظر گرفته شده است، به مسایلی چون اندرکنش پارامترها توجه نشده است. در این مقاله نحوه اعمال عدم‌قطعیت در تمام یا بخشی از پارامترها به یک مدل بهینه‌یابی ارائه شده است. علاوه بر این در این مقاله تقاضا برای انرژی به عنوان دومین پارامتر غیرقطعی به مدل HTCOM اعمال شده است. سپس مطالعه موردی برای نشان دادن کاربرد مدل در سیستم خوزستان آورده شده است. نتایج اجرای مدل در قالب نموداری ارائه می‌گردد. سپس نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- روش تحقیق

مدل HTCOM در شکل اولیه و تمام تغییراتی که تا کنون در آن اعمال شده است فقط عدم‌قطعیت مربوط به ورودی آب به مخازن را در نظر می‌گیرد. بقیه پارامترهای موجود در مدل قطعی در نظر گرفته شده‌اند. قطعی در نظر گرفتن پارامترها معمولا منجر به جوابهایی می‌شود که خوشبینانه و دور از واقعیت می‌باشند. مدل HTCOM که بر اساس برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای پایه‌ریزی شده است، پارامترهای غیرقطعی آن همگی از نوع سریهای زمانی می‌باشند. شکل کلی مساله به صورت زیر می‌باشد.(برای توضیح بیشتر به Kirsh (1981), Dantzig (1963) مراجعه شود) :

$$\text{Min.} \quad Z_0 = E\left[F\left(\underset{\sim}{X},\underset{\sim}{Y} \mid \varepsilon\right)\right] \qquad (۱)$$

$$\text{S.T.} \quad g_i\left(\underset{\sim}{X}\right) + k_i\left(\underset{\sim}{Y}|\varepsilon\right) = B_i^{\varepsilon} \quad i = 1,2,\ldots,n \qquad (۲)$$

$$h_j\left(\underset{\sim}{X}\right) = C_j^{D} \quad j = 1,2,\ldots,m \qquad (۳)$$

$$\underset{\sim}{X} \geq \underset{\sim}{0}, \underset{\sim}{Y} \geq \underset{\sim}{0} \qquad (۴)$$

در مجموعه معادلات بالا Z_0 مقدار قابل انتظار تابع هدف غیرقطعی $F(\underset{\sim}{X},\underset{\sim}{Y}|\varepsilon)$ می‌باشد که بایستی حداقل شود. $\underset{\sim}{X}$ بردار متغیر اصلی تصمیم و $\underset{\sim}{Y}$ بردار متغیرهای کمکی نام دارند. B_i^{ε} پارامترهای غیرقطعی

می‌باشند، که به عبارت دیگر قیود غیرقطعی را تشکیل می‌دهند. C_j^D پارامترهای قطعی را نشان میدهند. $g_i(\underset{\sim}{X}), k_i(\underset{\sim}{Y}|\varepsilon)$ سمت چپ قیود غیرقطعی و $h_j(\underset{\sim}{X})$ سمت چپ قیود قطعی می‌باشند. ε نشان دهنده فضای نمونه تحقق تمام پارامترهای غیرقطعی می‌باشد. بردار $\underset{\sim}{Y}$ وابسته به این فضای نمونه می‌باشد. $\underset{\sim}{X}$ باید به گونه‌ای تعیین شود که Z_0 در تمام فضای نمونه تحقق پارامترهای غیرقطعی حداقل شود. در قالب برداری می توان B_i^{ε} را به صورت $\underset{\sim}{B}^{\varepsilon}$ نشان داد. به ازا هر بار نمونه‌گیری از فضای نمونه ε یک بردار $\underset{\sim}{B}$ به عنوان یک تحقق محتمل از $\underset{\sim}{B}^{\varepsilon}$ انتخاب می‌شود و به ازا آن مساله حل می‌شود و جواب بهینه بدست می‌آید، سپس نمونه‌گیری بعدی و حل دوباره مساله و پس از تعدادی نمونه‌گیری (ترجیحا ۳۰ بار نمونه‌گیری) مقدار قابل انتظار تابع هدف برای فضای نمونه ε بهینه میشود. البته تابع هدف در این مساله شکل پیوسته عملگر مقدار انتظاری را دارد. در بهینه‌یابی چند مرحله‌ای تابع هدف از فرم پیوسته به صورت گسسته زیر در می‌آید:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^{N} F(\underset{\sim}{X}, \underset{\sim}{Y}|\varepsilon_i) * P(\varepsilon_i) \qquad (۵)$$

در معادله بالا $P(\varepsilon_i)$ احتمال وقوع نمونه ε_i را نشان می‌دهد. ε_i نمونه i ام را نشان میدهد. به تعداد N دفعه نمونه‌گیری انجام می‌گیرد. در معادله بالا $\hat{Z}_0$ برآوردی از Z_0 می‌باشد. قبل از اینکه نحوه اعمال عدم‌قطعیتها در قالب تئوری نمونه‌گیری(روش مونت کارلو) بحث شود ذکر این نکته ضروری می‌باشد که، بایستی بردار $\underset{\sim}{B}$ به زیر بردارهای مستقل (از بعد آماری) افراز شود. اکنون $\underset{\sim}{B}$ به صورت $\left(\underset{\sim}{B}^1, \underset{\sim}{B}^2, ..., \underset{\sim}{B}^W\right)^T$ قابل نمایش می‌باشد. اندیسها نشان دهنده شماره بردار مستقل از بقیه بردارها می‌باشد. اکنون هر کدام از این زیر بردارها در قالب یک مدل چند متغیره مدلسازی می‌شوند. هر زیر بردار $\underset{\sim}{B}^W$ خود از مولفه‌های مختلفی تشکیل شده که همبستگی این مولفه‌ها از نظر احتمالاتی، آنها را در قالب یک زیر بردار $\underset{\sim}{B}^W$ قرار می‌دهد. به عبارت دیگر زیر بردار $\underset{\sim}{B}^W$ به صورت $(B_t^{W1}, B_t^{W2}, ..., B_t^{WL})^T$ قابل نمایش می‌باشد. هر کدام از مولفه‌های B_t^{WL} یک سری زمانی می‌باشد که اندرکنش با بقیه مولفه‌ها در زیر بردار $\underset{\sim}{B}^W$ دارد. با توجه به اینکه عدم‌قطعیت پارامترهای مدل از نوع زمانی می‌باشد، از مدلسازی سری زمانی برای مدلسازی پارامترهای غیرقطعی و سناریوسازی استفاده می‌شود. هر روش شناخته شده‌ای برای مدلسازی سری زمانی می‌تواند به کار برود و هیچ روش خاصی الزام ندارد. روش مدلسازی سری زمانی که در اینجا مطرح شده فقط به عنوان نمونه آورده شده است. ابتدا بایستی متغیرهای سری زمانی درون هر زیر بردار را با استفاده از معادله زیر فیلتر کرد[Bowerman and O'Connel (1981)]:

$$B^{WL}{}_t = Tr^{WL}{}_t + SNf^{WL}{}_t + CL^{WL}{}_t + IR^{WL}{}_t \qquad (۶)$$
$$L = 1,2,... \quad W = 1,2,...$$

در این معادله B_t^{WL} نشان دهنده L امین مولفه در زیر بردار $\underset{\sim}{B}^W$ می‌باشد. Tr_t نشان دهنده روند وابسته به زمان می باشد. SNf_t نشان دهنده خصوصیت فصلی می‌باشد. البته این خصوصیت فصلی ثابت بوده و مقدار ضرایب آن از سالی به سال دیگر تغییر نمی کند(قطعی می‌باشد). CL_t به خصلت چرخه‌ای معروف می‌باشد و نشان دهنده بخشی از مدل می‌باشد که با دوره‌های زمانی بیش از یک سال تکرار می‌شود(این جزء نیز قطعی می‌باشد). IR_t به بخش غیرقطعی مدل معروف می‌باشد. در این جزء غیرقطعی مولفه‌هایی مثل روند، خصوصیت فصلی و خصوصیت چرخه‌ای غیرقطعی نهفته بوده و با مدلسازی BJ[10] مدل میشوند. پس از فیلتر کردن هر متغیر سری زمانی(هر مولفه از $\underset{\sim}{B}^W$) ،آنچه می‌ماند IR_t^{LW} بوده، که در قالب زیر بردارهای مستقل، به صورت $\underset{\sim}{IR}_t^{\,W}$ نشان داده می‌شود. $\underset{\sim}{IR}_t^{\,W}$ جزء غیرقطعی زیر بردار $\underset{\sim}{B}^W$ است. این جزء غیرقطعی، $\underset{\sim}{IR}_t^{\,W}$، به صورت کلی زیر مدلسازی چند متغیره می شود. البته در یر فقط شکل برداری مدل AR(P)[11] برای این مدلسازی آورده شده است.Salas et.al.(1988) :

$$\underset{\sim}{IR}_t^{W} = \sum_{i=1}^{P} [\Phi]_i^W . \underset{\sim}{IR}_{t-i}^{W} + [\Theta]^W . \underset{\sim}{\eta}_t^{W} \qquad (۷)$$

در معادله بالا P مرتبه مدل AR را نشان میدهد. $[\Phi]_i^W$ ماتریس ضرایب مولفه Autoregressive مدل می‌باشد. $[\Theta]^W$ ماتریس ضرایب مولفه تصادفی خالص مدل می‌باشد. $\underset{\sim}{\eta}_t^{W}$ بردار تصادفی خالص با میانگین صفر می‌باشد. البته الزامی بر نرمال بودن بردار تصادفی $\underset{\sim}{\eta}_t^{W}$ نیست، بلکه شرط اصلی در مورد بردار $\underset{\sim}{\eta}_t^{W}$، صفر بودن میانگین آن است. توجه می شود که $\underset{\sim}{IR}_t^{\,W}$ از میانگین کم شده است، که در نهایت دوباره این میانگین پس از مدلسازی به $\underset{\sim}{IR}_t^{\,W}$ بر می‌گردد. با مدلسازی پارامترهای غیرقطعی در قالبی که در بالا مطرح شد، می‌توان با استفاده از آن مدل به ساختن سناریوها اقدام کرد(شبیه‌سازی مونت کارلو). سناریوها در واقع داده‌های تولید شده توسط مدل آماری برای سه سال برنامه‌ریزی می‌باشند. مدل در یک حلقه تکرار به تعداد دلخواه سناریوهای سه ساله تولید می‌کند. البته روشهای دیگر تولید سناریو وجود دارد که بعنوان مثال روش درخت سناریوها یک رویکرد دیگر برای ساختن سناریوها است. در هر دو روش ساخت سناریوها برای تقاضا، سناریوهای پرمصرف، معمولی و کم‌مصرف وجود خواهد داشت. با مدلسازی عدم‌قطعیت به شکل بالا می‌توان برای پارامترهای مورد نظر سناریوسازی کرد منتها پس از آن W بردار وجود خواهد داشت که هر کدام S سناریو نیز دارد. در نظر گرفتن W بردار مستقل که هرکدام نیز S سناریو

دارد منجر $\prod_{i=1}^{w} S_i$ حالت توام برای تحقق پارامترها می‌شود. برای بهینه‌یابی بایستی مساله را برای تمام فضای نمونه تحقق پارامترها حل کرد. حل زیر مساله ها برای تمام حالتهای ممکن، می‌تواند خیلی وقت گیر باشد به گونه‌ای که عملا غیرممکن شود. برای رفع مشکلات محاسباتی و حلقه‌های تو در تو اگر از تئوری حد مرکزی استفاده شود زمان حل کاهش می‌یابد بدون آنکه از دقت مساله نیز زیاد کاسته شود. اگر تعداد سناریوها از ۳۰ بیشتر باشد طبق تئوری حد مرکزی تابع هدف دارای توزیع نزدیک نرمال است. آنچه پس از این مرحله باقی می‌ماند تفسیر این مقدار بهینه ، $\hat{Z}_0$ ، از لحاظ آماری می‌باشد. $\hat{Z}_0$ برآوردی از Z_0 می‌باشد. مقدار واقعی مقدار قابل انتظار تابع هدف با احتمال $1-\alpha$ در بازه $\left[\hat{Z}_0 \pm t_{\alpha/2}\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}}\right]$ است. $\hat{\sigma}$ انحراف معیار محاسبه شده از $F(\underset{\sim}{X},\underset{\sim}{Y}|\varepsilon)$ و N نیز تعداد سناریوها می‌باشد. $t_{\alpha/2}$ سطح زیر نمودار توزیع t است، که برابر $1-\alpha/2$ می‌باشد. بدین صورت مساله برنامه‌ریزی غیرقطعی با برآورد بهینه مقدار قابل انتظار تابع هدف و همچنین بازه اطمینان آن در قالب برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای و استفاده از تئوری حد مرکزی صورت می‌پذیرد.

۳- مطالعه موردی

برای بررسی کارایی مجموعه نرم‌افزاری HTCOM، مساله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن چندمنظوره و نیروگاههای آبی- حرارتی استان خوزستان، توسط این مجموعه نرم‌افزاری انجام می‌پذیرد. سیستم شامل سدهای شهید عباسپور و دز به همراه نیروگاههای برقابی آنها است. علاوه بر این نیروگاه حرارتی رامین و مدحج گازی و بخاری از تشکیل دهنده‌های سیستم خوزستان می‌باشند. دیگر مشخصه قابل ذکر این سیستم تبادل انرژی الکتریکی با استانهای همجوار است. ظرفیت نصب شده نیروگاه رامین ۱۸۶۰مگاوات می‌باشد که مشتمل بر ۶ واحد ۳۱۰ مگاواتی است. نیروگاه شهید مدحج (زرگان) دارای دو واحد بخار ۱۴۵ مگاواتی و ۴ واحد توربین گاز ۳۲ مگاواتی جمعا به‌قدرت ۴۱۸ مگاوات احداث گردید. مصارف انرژی الکتریکی در استان خوزستان شامل مصارف خانگی، عمومی، تجاری، صنعتی و کشاورزی می‌باشد. در ادامه کاربرد مدل HTCOM در سیستم خوزستان با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در ورودی آب به مخازن و تقاضا برای انرژی بررسی می‌گردد.

هدف از برنامه‌ریزی عملکرد سیستم برآوردن نیازهای مختلفی می‌باشد که از سیستم انتظار می‌رود به نحوی که هزینه عملکرد سیستم از جنبه‌های مختلف حداقل شود. از مشخصات بارز این سیستم تامین نیاز آب و انرژی می‌باشد. سیستم مدل شده در این تحقیق از اطلاعات خوزستان در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷۴ استفاده می‌کند. فرض بر این است که اکنون مدل در ابتدای سال ۱۳۷۲ قرار دارد و داده‌های مربوط به ورودی آب به مخازن و تقاضای انرژی برای سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷۴ وجود ندارد. مدل HTCOM بایستی با مدلسازی بر اساس داده‌های تاریخی و الگوریتم خاصی که در درون آن وجود دارد برای داده‌ها سناریوهای مختلف ساخته و اقدام به برنامه‌ریزی کند. مدلسازی و سناریوسازی ورودی آب به مخازن توسط روش مدلسازی اندیس شده مرحله‌ای[۱۲] صورت گرفته است.

(برای اطلاعات بیشتر به Labadie et.al.(1987) مراجعه شود). تقاضا برای انرژی با استفاده از مدلهای آماری مدلسازی شده است. برای مدلسازی تقاضا برای انرژی از مدلهای رگرسیون زمانی[۱۳] استفاده شده است. مدلسازی با توجه به داده‌های تقاضا برای انرژی در سالهای ۱۳۶۹-۱۳۷۱ صورت گرفته است. شکل کلی این مدل ماهانه، در زیر نشان داده شده است:

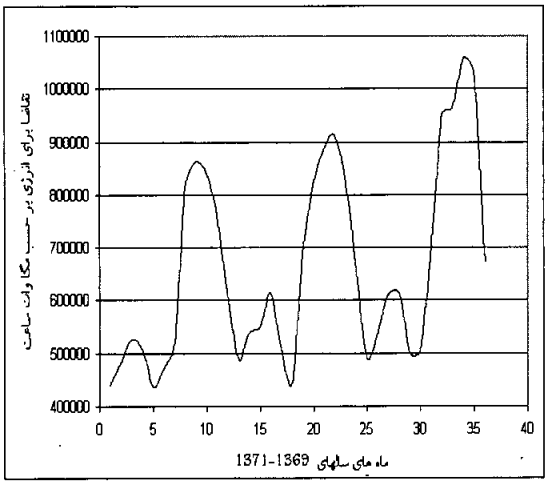
$$Log\ (ED_t) = Tr_t + SNf_t + CL_t + IR_t \qquad (۸)$$

این معادله که به معادله (۶) شباهت دارد، مولفه‌های سمت راست آن همان تعریف مولفه‌های سمت راست معادله (۶) را دارد. ED_t سری زمانی تقاضا برای انرژی می‌باشد. تبدیل لگاریتمی که روی ED_t اثر کرده است برای نرمال‌سازی آن به کار رفته است. توجه به این نکته ضروری میباشد که تقاضا برای انرژی و آورد به مخازن برای تمام تقاضاهای زمانی از یکدیگر مستقل بوده و این موضوع فرایند مدلسازی را آسانتر می کند. نمودار سری زمانی داده‌های تقاضا برای انرژی در شکل (۱) آورده شده است. پس از فیلتر کردن داده‌ها مدلسازی تقاضا برای انرژی با توجه به جز IR_t و تابع خودهمبستگی و تابع خودهمبستگی جزئی IR_t صورت می‌پذیرد. تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی برای تاخیرهای زمانی ۱ تا ۱۷ در زیر حدود ۹۵ درصد اطمینان قرار گرفته و با توجه به این موضوع، IR_t بایستی یک نویز سفید[۱۴] باشند. از سوی دیگر بررسی IR_t نشان می‌دهد که IR_t بایستی توزیع نرمال داشته باشند. این موضوع با آزمون نرمال آندرسون- دارلینگ تایید شده است. پارامترهای این آزمون P-Value و A-Aquared می‌باشند که به ترتیب ۰/۷۷۴ و ۰/۲۳۵ می‌باشد. پس از برآورد پارامترها مدل برازش داده شده به تقاضا برای انرژی در سیستم خوزستان به صورت زیر می‌باشد.

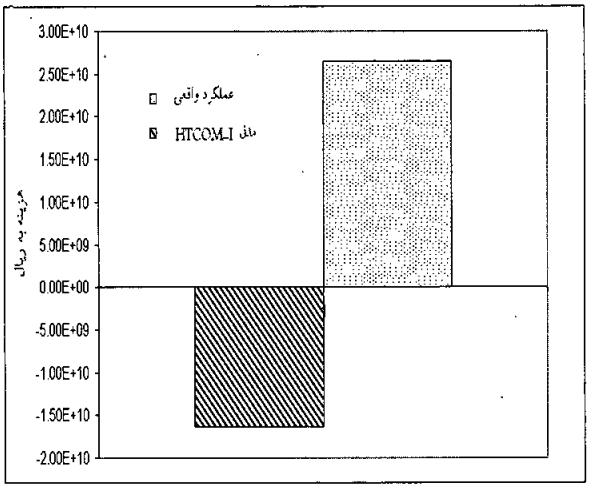
$$Log(ED_t) = (0.0027\times t + 5.7696) + SNf_t + (-0.0143 + 0.02\times \eta_t) \qquad (۹)$$

در این فورمولاسیون η_t متغیر تصادفی نرمال استاندارد می‌باشد. ضریب چرخه‌ای صفر بدست آمده است. SNf_t شامل ۱۲ ضریب فصلی می باشد که با دوره تناوب ۱۲ ماهه تکرار می‌شوند(جدول شماره ۱). جزء آخر نیز IR_t است. بدین صورت تقاضای انرژی سیستم خوزستان مدل می‌شود. از این مدل برای تولید سناریوهای تقاضا برای انرژی در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷۴ استفاده می‌شود. شکل (۲) تعدادی از این سناریوها را نشان میدهد. اکنون

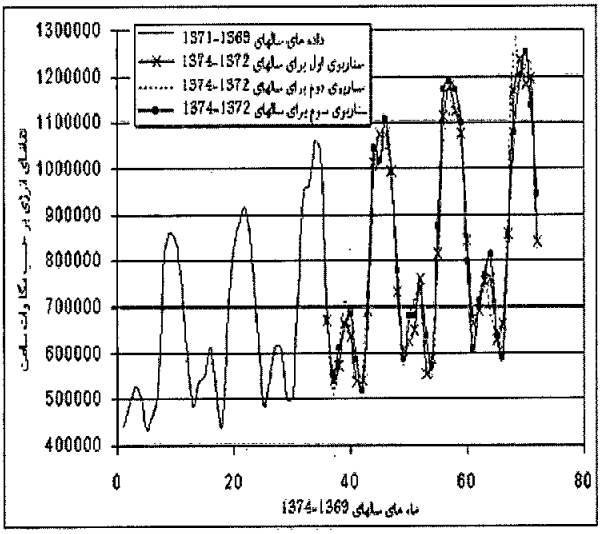
ورودیهای لازم برای اجرای مدل مورد استفاده در این تحقیق به مدل داده شده و نتایج بهینه‌سازی برای سیستم خوزستان بدست آمده است. نتایج اجرای مدل HTCOM در ادامه آمده است. هزینه مدل HTCOM-I در مقایسه با عملکرد واقعی در شکل(۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) مدل HTCOM-I بجای هزینه ، سوددهی به اندازه ده میلیارد ریال داشته است. از سوی دیگر تبعیت از منحنی فرمان و ارضای نیازها به بهترین شکل صورت پذیرفته است. منحنی فرمان به منظور کنترل سیلاب در پایین دست سد و حداقل آب مورد نیاز برای تولید انرژی در این مدل در نظر گرفته شده است. بعنوان نمونه تبعیت از منحنی فرمان سد دز برای مدل HTCOM-I در شکل (۴) آورده شده است.



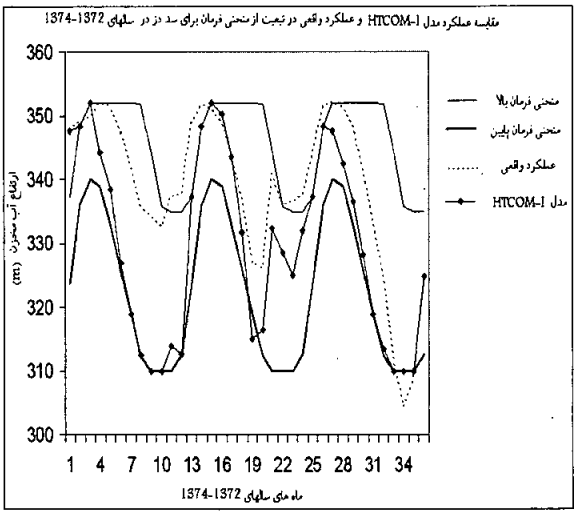
شکل (۱) سری زمانی تقاضا برای انرژی در خوزستان برای سالهای ۱۳۷۱-۱۳۶۹



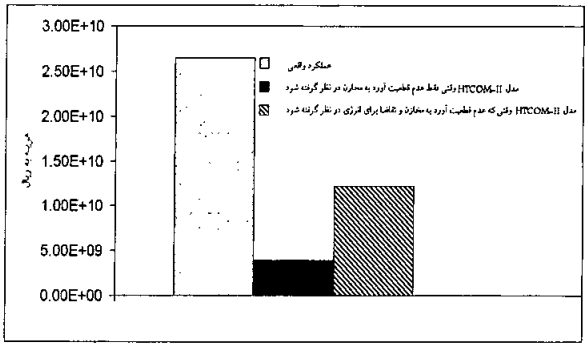
شکل(۳) مقایسه هزینه مدل HTCOM-I و عملکرد واقعی در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤



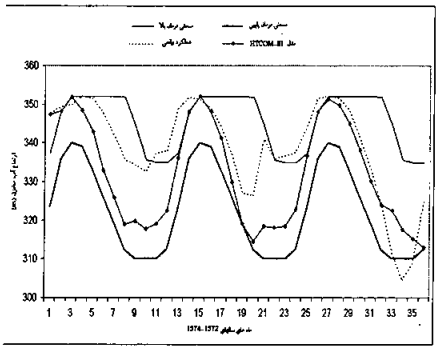
شکل(۲) تعدادی از سناریوهای تقاضا برای انرژی در خوزستان طی سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤



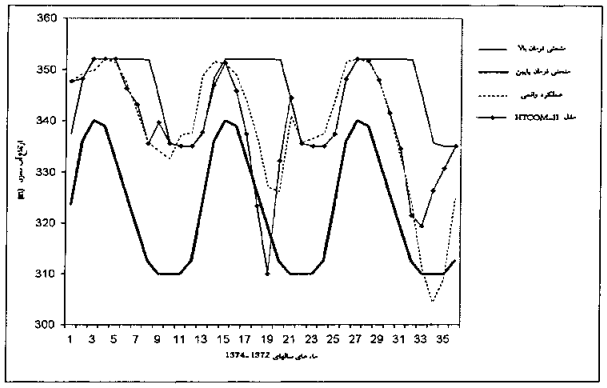
شکل (۴) مقایسه عملکرد مدل HTCOM-I و عملکرد واقعی در تبعیت از منحنی فرمان سد دز در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤



شکل(۵) مقایسه هزینه مدل HTCOM-II و عملکرد واقعی در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤



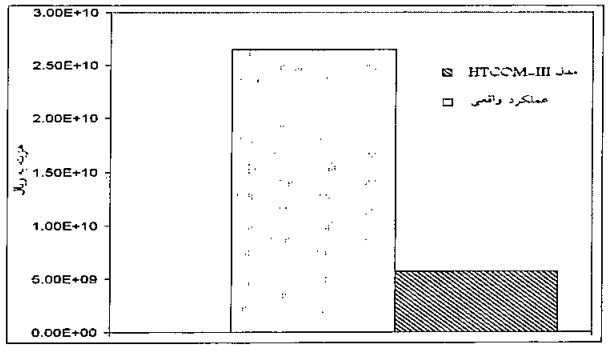
شکل (۸) مقایسه عملکرد مدل HTCOM-III و عملکرد واقعی در تبعیت از منحنی فرمان سد دز طی سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤



شکل (۶) مقایسه عملکرد مدل HTCOM-II و عملکرد واقعی در تبعیت از منحنی فرمان سد دز طی سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤

جدول (۱) مقدار ضرایب فصلی

ضریب فصلی فروردین	-۰/ ۱۱۵۹
ضریب فصلی اردیبهشت	-۰/ ۰۷۷۵
ضریب فصلی خرداد	-۰/ ۰۴۷۵
ضریب فصلی تیر	-۰/ ۰۳۸۵
ضریب فصلی مرداد	-۰/ ۱۱۹۲
ضریب فصلی شهریور	-۰/ ۱۲۹۵
ضریب فصلی مهر	-۰/ ۰۰۵۱
ضریب فصلی آبان	۰/ ۱۲۶۰
ضریب فصلی آذر	۰/ ۱۴۳۶
ضریب فصلی دی	۰/ ۱۵۵۴
ضریب فصلی بهمن	۰/ ۱۱۹۴
ضریب فصلی اسفند	-۰/ ۰۱۳۰



شکل(۷) مقایسه هزینه مدل HTCOM-III و عملکرد واقعی در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷٤

این نتیجه امکان بهبود بالقوه در عملکرد فعلی سیستم را بـه وضـوح نشـان می‌دهد. منظور از عملکرد فعلی ، عملکرد در سالهای بعد از ۱۳۷۴ می‌باشد.

تا سال ۱۳۷۴ مربوط به گذشته سیستم می‌شود که البته سه سال قبل آن برای آزمایش مدل انتخاب و استفاده شده بود. با توجه به عملکرد واقعی در این سه سال ۱۳۷۲-۱۳۷۴ و مقایسه آن با نتایج مدل در همین سه سال این تصمیم که آیا بهتر است از مدل برای برنامه‌ریزی آینده سیستم استفاده شود یا خیر، اتخاذ می‌شود. در واقع مدل اول فقط نشان می‌دهد که آیا امکان بهبود در عملکرد سیستم وجود دارد.

این مدل ابعاد دقیقی از بهبود، به این علت که اطلاع از آورد به مخازن و تقاضا برای انرژی در سه سال آینده دارد، بدست نمی‌دهد. همین اطلاع سبب می‌شود که عملکرد مدل HTCOM-I معیار دقیقی برای مقایسه با عملکرد واقعی نباشد زیرا که به طور معمول بهتر از عملکرد واقعی خواهد بود. منتها برای تعیین مقدار واقعی بهبودی که در عملکرد سیستم قابل دسترسی می باشد بایستی مدل در شرایطی واقعی‌تر اجرا شود تا معلوم گردد چه مقدار بهبود در عملکرد سیستم با کاربرد مدل حاصل می‌شود.

بنابراین مدل HTCOM-II در ابتدای سال ۱۳۷۲ قرار می‌گیرد و بدون اطلاع از آورد به مخازن و تقاضا برای انرژی در سه سال آینده (۱۳۷۲-۱۳۷۴) ، اجرا شده و نتایج آن برای عملکرد سیستم نیز ارائه می‌گردد. نتایج مدل دوم حاصل بهینه‌یابی و شبیه‌سازی توام می‌باشد. این الگوریتم برای تعیین عملکرد واقعی مدل و هزینه‌های واقعی که تصمیمات تجویزی آن به همراه داشته صورت می‌پذیرد. در ادامه نتایج کاربرد مدل بهبود یافته HTCOM-II در سیستم خوزستان آورده شده است.

با توجه به شکل (۵) افزودن بر پارامترهای غیرقطعی مدل بر هزینه مدل افزوده است. مدل HTCOM قبل از این تحقیق فقط در معرض عدم‌قطعیت مربوط به آورد به مخازن، فرایند بهینه‌سازی عملکرد سیستم را انجام می‌داده است . اما در تحقیق اخیر علاوه بر آورد غیرقطعی ، عدم‌قطعیت تقاضا برای انرژی نیز در نظر گرفته شده است. هزینه مدل افزایش یافته است اما در عوض اطمینان پذیری سیاستهای پیشنهادی آن به مراتب از حالتی که عدم قطعیت به طور کامل در نظر گرفته نشده ، بیشتر شده است. علاوه بر این نتایج مدل هنوز در مقایسه با عملکرد واقعی بهتر است.

در شکل (۶) عملکرد مدل برای تبعیت از منحنی فرمان سد دز آورده شده است. با تایید کارآیی مدل در این دو مرحله می‌توان از مدل سوم ، HTCOM-III ، برای برنامه‌ریزی عملکرد سیستم در همان سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷۴ استفاده کرد. در شکل (۷) مقدار قابل انتظار هزینه عملکرد مدل HTCOM-III در صورت اعمال تصمیمهای مدل برای پریود اول (فروردین ۱۳۷۲) در سیستم خوزستان نشان داده شده است. در شکل (۸) نیز تبعیت مدل از منحنی فرمان سد دز بعنوان مثال آورده شده است.

پی نوشت ها:

1 Hydro-Thermal Coordination Model
2 General Algebraic Modeling System
3 Multi-Period
4 Knowledge
5 Reliability Theory
6 Decomposition – Coordination
7 Descent Directions
8 Scenario Tree
9 Stochastic Dual Dynamic Programming
10 BoxJenkins
11 Autoregressive
12 Indexed Sequential Modeling
13 Time Regression Models
14 White Noise

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مساله اعمال عدم قطعیت به مدلهای بهینه‌یابی در قالب برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای غیرقطعی، در یک حالت کلی و بررسی نظری آن صورت پذیرفت. در نظر گرفتن این موضوع در مدل بهره‌برداری بهینه از نیروگاههای آبی- حرارتی، HTCOM ، بررسی شد. در ادامه کاربرد مدل بهبود یافته در سیستم خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کاربرد مدل بهبود یافته در سیستم خوزستان و مقایسه آن با عملکرد واقعی سیستم عملکرد بهتر مدل را برای این سیستم روشن ساخت. معیارهای مقایسه هزینه کمتر تولید وتبادل انرژی ، تامین نیازهای آبی و زیست محیطی و تبعیت از منحنی فرمان مخازن نیروگاههای آبی می‌باشند. با توجه به این معیارها مدل عملکرد بهتری نسبت به عملکرد واقعی در دوره برنامه‌ریزی آزمایشی داشته است. یکی از دستاوردهای این تحقیق ارائه روشی برای در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در تمام یا بخشی از پارامترهای مدل بهینه‌سازی می‌باشد. روش بهینه‌یابی سناریوها که در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی زیاد، حل آن را از بعد عملی غیرممکن می‌ساخت با استفاده از تئوری حد مرکزی قابل حل شد. حل مسایل بزرگ با پارامترهای غیرقطعی زیادی در قالب الگوریتمی که در ضمیمه ارئه شده است ممکن می‌گردد. در نظر گرفتن عدم قطعیتهای مختلف بر اطمینان پذیری پاسخهای مدل می افزاید. بسته نرم‌افزاری HTCOM از نرم‌افزار GAMS Solver Minos آن برای حل مسایل استفاده می‌کند. استفاده از نرم‌افزار HTCOM در سیستم خوزستان، توانایی نرم افزار GAMS را در حل مسایل بزرگ با ابعاد واقعی را به خوبی نشان داده است.

۵- تشکر

در اینجا لازم است از همکاران وزارت نیرو و آقای دکتر داود فرخزاد که در دسترسی به داده‌های مورد نیاز مولفین را کمک نمودند تشکر و قدردانی شود.

۶- مراجع

روزبهانی، ر.(۱۳۷۹) : "بهبود مجموعه نرم‌افزاری HTCOM با اعمال رابطه غیرخطی محاسبه توان تولیدی نیروگاههای آبی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر رضا اردکانیان، دانشگاه صنعتی شریف

حمیدی، س. ا.(۱۳۸۰) :"تهیه مدلهای بهره‌برداری میان مدت و کوتاه مدت از مخازن چند منظوره و نیروگاههای آبی حرارتی با استفاده از نتایج مدل بلند مدت HTCOM"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ، استاد راهنما:دکتر رضا اردکانیان ،دانشگاه صنعتی شریف

فرخزاد، داود(۱۳۸۰) :"بهینه‌سازی برنامه‌ریزی بلند مدت تولید نیروگاههای حرارتی و آبی با مخازن چند منظوره و محاسبه همزمان پایایی"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شریف

Ardakanian, R.(1997), 'Long Term Optimal Operation of Hydro-Thermal Systems', PhD. Dissertation, McMaster University.

Chao-an Li, Rui yan and Jing-yan Zhou (1990),"Stochastic optimization of interconnected multi-reservoir power systems", IEEE Trans. On Power systems, Vol. 5, No. 4.

Nowak,M. P. (1996)," A Fast Descent Method for the Hydro Storage Sub roblems in Power Generation", WP – 96 - 109, International Institute for pplied Systems Analysis, Luxemburg, Austria.

Pereira,M. Campodnico,N. Kelman,R. (1999), " Application of Stochastic Dual DP and extensions to Hydrothermal scheduling", PRSI Technical Report 012/99.

Kirsch,Uri (1981)," OPTIMUM STRUCTRUAL DESIGN Concepts, Methods nd Applications", Chapter 8, Technion, Israel Institute of Technology, McGraw-Hill Publications, Haifa, Israel.

Salas,J.D. Delluer,J.W. Yevjevich,V. and Lane,W.L. (1988)," Applied Modeling of Hydrologic Time Series", Water Resources Publications, 3d edition, Littleton, Colorado State University,Fort Collins,Co.

Bowerman,B.L. O'Connel,R.T.(1987)," Time Series Forecasting", Boston, Duxbury Press, 2nd Edition.

Dantzig,G.B. (1963):" Linear Programming and Extensions", Princeton University Press, Princeton, N.J.

Labadie,J.W. Fontane,D.J. Tabios,G.Q. and Fang Chou,N. (1987):" Stochastic Analysis of Dependable Hydropower Capacity", ASCE J. of Water Resources Planning and Management, Vol. 113, No. 3.

پیوست (الف): برنامه ریزی دو مرحله‌ای استوکستیک

یک مساله برنامه‌ریزی استوکستیک می‌تواند به شکل کلی زیر نوشته شود:

$$Min \quad F(\underset{\sim}{X}) \tag{۱۰}$$

$$S.T. \quad g_i(\underset{\sim}{X}) = B_i^U$$
$$\underset{\sim}{X}^{LL} \le \underset{\sim}{X} \le \underset{\sim}{X}^{UL} \tag{۱۱}$$
$$\underset{\sim}{X} \ge 0$$

در مساله بالا $F(\underset{\sim}{X})$ تابع هدف می‌باشد که بایستی حداقل گردد. تابع هدف برخلاف قیود قطعی می‌باشد. در اصل هدف پیدا کردن آن $\underset{\sim}{X}$ می‌باشد که تابع هدف را در معرض عدم‌قطعیت بهینه کند. $\underset{\sim}{X}$ نیز قطعی بوده و تصمیمی است که تابع هدف را حداقل می‌کند. منتها وجود عدم‌قطعیت در قیود باعث می شود که برای بهینه‌سازی تابع هدف الگوریتم خاصی دنبال شود، که در ادامه توضیح داده خواهد شد. B_i^U پارامتر سمت راست قیود می‌باشد و در حالت کلی غیرقطعی فرض می‌گردد. $g_i(\underset{\sim}{X})$ تابع بیان کننده سمت چپ قیود می‌باشد. در ضمن $\underset{\sim}{X}$ که متغیر تصمیم می‌باشد علاوه بر مثبت بودن، بین دو حد $\underset{\sim}{X}^{LL}$ و $\underset{\sim}{X}^{UL}$ قرار می‌گیرد. در ابتدا (مرحله اول تصمیم‌گیری) از پارامترهای غیرقطعی B_i^U اطلاعی در دست نیست. بنابراین بدون توجه به قید غیرقطعی یک $\underset{\sim}{X}$ بین حد پایین و بالا برای $\underset{\sim}{X}$ حدس زده می‌شود، سپس یک مقدار ممکن برای B_i^U با احتمال وابسته به آن در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله (مرحله دوم) با توجه به تصمیمی که قبل از تحقق B_i^U اتخاذ شده ، الزاما $\underset{\sim}{X}$ قیود غیرقطعی را ارضا نمی‌کند. بنابراین متغیرهای دیگری به نام $\underset{\sim}{Y}$ (متغیر کمکی) به کار گرفته می‌شوند. در این مرحله برای حل مساله متغیرهای کمکی به مساله وارد شده و شکل آن به صورت زیر در می‌آید:

$$Min. \quad \underset{\varepsilon}{E}[F(\underset{\sim}{X}) + q(\underset{\sim}{Y}|\varepsilon)] \tag{۱۲}$$

$$S.T. \quad g_i(\underset{\sim}{X}) + k_i(\underset{\sim}{Y}|\varepsilon) = B_i^{\varepsilon} \tag{۱۳}$$
$$\underset{\sim}{X}^{LL} \le \underset{\sim}{X} \le \underset{\sim}{X}^{UL}$$
$$\underset{\sim}{X} \ge 0$$

در روابط بالا ε فضای نمونه تحقق پارامترهای غیرقطعی B_i^{ε} می‌باشد. $\underset{\sim}{Y}$ مقدار تخطی از قیود تحقق پیدا کرده می‌باشد و برای هر نمونه‌گیری از فضای نمونه ε مقدار یک $\underset{\sim}{Y}$ وجود دارد که می‌توان آنرا به صورت $\underset{\sim}{Y}^{\varepsilon}$ نیز نشان داد . $\underset{\sim}{Y}$ هزینه‌ای نیز به همراه خواهد داشت که $q(\underset{\sim}{Y})$ می‌باشد. برای تحققهای دیگر B_i^{ε} نیز $\underset{\sim}{Y}^{\varepsilon}$ مربوط به آن و هزینه که به صورت $F(\underset{\sim}{X}) + q(\underset{\sim}{Y}|\varepsilon)$ است، حساب می‌شود. سپس مقدار قابل انتظار $F(\underset{\sim}{X}) + q(\underset{\sim}{Y}|\varepsilon)$ برای تمام فضای ε محاسبه می‌شود. در واقع از این مرحله به بعد یک الگوریتم جستجو نیاز می‌باشد تا از $\underset{\sim}{X}$ حدسی اولیه به سمت آن $\underset{\sim}{X}$ که مساله را بهینه می‌کند بتوان حرکت کرد. با انتخاب $\underset{\sim}{X}$ دیگری در قالبی که الگوریتم جستجو پیشنهاد می‌کند، مراحل بالا تکرار می‌شود. اکنون دو مقدار قابل انتظار برای دو مقدار از $\underset{\sim}{X}$ در دست می‌باشد. با مقایسه مقدار قابل انتظار هر دو اگر اختلاف مقدار قابل انتظار هر دو از هم از یک مقدار پیش فرض کمتر باشد آن $\underset{\sim}{X}$ یک جواب برای مساله غیرقطعی مورد نظر می‌باشد. برای بدست آوردن بقیه $\underset{\sim}{X}$ های ممکن بایستی $\underset{\sim}{X}$ های بیشتری را مورد بررسی قرار داد. مطالبی که مطرح شد اصول روش برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای غیرقطعی با متغیرهای کمکی می‌باشد. برای اطلاع بیشتر به[Dantzig [1963] مراجعه شود.

پیوست (ب):الگوریتم بندرز و الگوریتمی که در مدل HTCOM به کار رفته است

این الگوریتم مدل زیر را حل می کند(قبلا معرفی شده است، معادلات (۱) تا (۴)):

$$\text{Min.} \quad Z_0 = E\left[F\left(\underset{\sim}{X}, \underset{\sim}{Y} \mid \varepsilon\right)\right]$$

$$\text{S.T.} \quad g_i\left(\underset{\sim}{X}\right) + k_i\left(\underset{\sim}{Y} \mid \varepsilon\right) = B_i^{\varepsilon} \qquad i = 1,2,\ldots, n$$

$$h_j\left(\underset{\sim}{X}\right) = C_j^D \qquad j = 1,2,\ldots, m$$

$$\underset{\sim}{X} \geq \underset{\sim}{0}, \underset{\sim}{Y} \geq \underset{\sim}{0}$$

این مدل در قالب یک مساله اصلی و ۳۰ زیر مساله به صورت زیر در می‌آید:

$$Min.\ Z_0 = \tfrac{1}{30}\sum_{S=1}^{30} Z(S, \underset{\sim}{X}) \qquad (۱۴)$$

$$S.T. \quad h_j(\underset{\sim}{X}) = C_j^D$$

$$\underset{\sim}{X}^{LL} \leq \underset{\sim}{X} \leq \underset{\sim}{X}^{UL} \qquad (۱۵)$$

این مساله اصلی برای اینکه جواب بهینه را بدست دهد احتیاج به یک الگوریتم جستجو دارد. الگوریتم بندرز که با توجه به خصوصیات تابع هدف(محدب) بنا نهاده شده است، نحوه این جستجو برای جواب بهینه را ممکن می سازد. مقدار تابع $Z(S, \underset{\sim}{X})$، همان مقدار بهینه تابع $F(\underset{\sim}{X}, \underset{\sim}{Y}|S)$ برای سناریوی S می باشد. مدل زیرمساله‌ها، در ادامه آورده شده است.

$$Min.\ Z(S, \underset{\sim}{X}) = F(\underset{\sim}{X}, \underset{\sim}{Y}|S) \qquad (۱۶)$$

$$S.T. \quad g_i(\underset{\sim}{X}) + k_i(\underset{\sim}{Y}|S) = B_i^S \qquad (۱۷)$$

$$\underset{\sim}{Y} \geq \underset{\sim}{0}$$

شایان ذکر است که الگوریتم بندرز مساله اصلی را به صورت در می‌آورد:

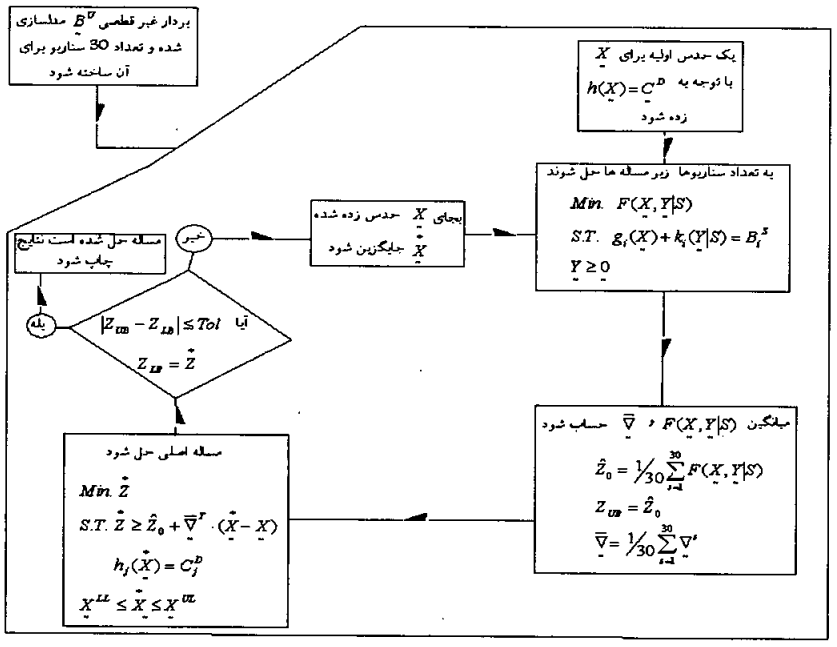
$$Min.\ \hat{Z} \qquad (۱۸)$$

$$S.T.\ \hat{Z} \geq \hat{Z}_0 + \overline{\nabla}^T \cdot (\hat{\underset{\sim}{X}} - \underset{\sim}{X})$$

$$h_j(\hat{\underset{\sim}{X}}) = C_j^D \qquad (۱۹)$$

$$\underset{\sim}{X}^{LL} \leq \hat{\underset{\sim}{X}} \leq \underset{\sim}{X}^{UL}$$

در ادامه الگوریتم بندرز به صورت نموداری آورده شده است. غیرقطعی زیاد، حل آن را از بعد عملی غیرممکن می‌ساخت با استفاده از تئوری حد مرکزی قابل حل شد. حل مسایل بزرگ با پارامترهای غیرقطعی زیادی در قالب الگوریتمی که در ضمیمه ارئه شده است ممکن می‌گردد. در نظر گرفتن عدم قطعیتهای مختلف بر اطمینان پذیری پاسخهای مدل می افزاید. بسته نرم‌افزاری HTCOM از نرم‌افزار Minos Solver GAMS آن برای حل مسایل استفاده می‌کند. استفاده از نرم‌افزار HTCOM در سیستم خوزستان، توانایی نرم افزار GAMS را در حل مسایل بزرگ با ابعاد واقعی را به خوبی نشان داده است.



شکل ۱پ: الگوریتم بندرز