تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یکم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۴
Volume 1, No. 1, Spring 2005(IR - WRR)
۵۸-۶۷

مدل تلفیقی طراحی و بهره‌برداری از مخازن برق آبی: مطالعه موردی بر سیستم پاعلم-کرخه

بنفشه زهرایی[۱]، محمد کارآموز[۲] و کوروش بهزادیان[۳]

چکیده

در این مقاله، ساختار یک رویکرد تلفیقی برای طراحی و بهره برداری از مخازن برق آبی تشریح شده است. برای این منظور از یک مدل بهینه‌سازی پویا برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم دو مخزنی سری برق آبی سری بهره گرفته شده است. به منظور کاهش مشکلات ابعادی برخی از پارامترهای طراحی با استفاده از تحلیل حساسیت بر نتایج درازمدت مدل بهینه‌سازی تعیین شده‌اند. این پارامترها شامل ظرفیت نصب نیروگاه، ضریب کارکرد و تراز نرمال و حداقل بهره برداری می باشند. به منظور ارزیابی نتایج شبیه سازی بر اساس تغییرات این پارامترها، تغییرات انرژی مطمئن تولید کل سالانه و اطمینان پذیری تامین نیازهای آبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف مدل تدوین شده، ارزیابی تاثیر تدوین سیاست‌های بهینه بهره برداری در مرحله انتخاب پارامترهای اصلی طراحی مخازن برق آبی می‌باشد. شبیه‌سازی عملکرد سیستم دومخزنی پاعلم-کرخه براساس سیاستهای بهینه تدوین شده نشان دهنده اهمیت درنظر گرفتن تاثیر این سیاستها بر عملکرد درازمدت سیستم و تعیین پارامترهای طراحی بوده است.

کلمات کلیدی: مخازن برق آبی، پارامترهای طراحی، شبیه سازی، برنامه‌ریزی پویا، سیاست های بهره برداری

A Coupled Model for Design and Operation of Hydropower Reservoirs: A Case Study of Paalam-Karkheh System

Banafsheh Zahraie[1], Mohammad Karamouz[2] Koroush Behzadian[3]

Abstract

In this paper, a framework for design and operation of hydropower reservoirs is presented. For this purpose, a dynamic programming model is developed to optimize the operation of a dual cascade reservoir system. The model has been applied to the Pa-alam and Karkheh Reservoir system in southwest of Iran. In order to decrease the computational burden of the problem, certain design parameters are selected based on the sensitivity analysis of the long-term simulation results.These Parameters include installed capacity and Plant Factor of the Power Plant and normal and minimum water levels in the reservoir. In order to evaluate the results of simulation based on the variation of these parameters, variations of firm energy, total annual power generation, and reliability of water supply are analysed. Comparison of the results of the optimization model and the long-term simulation based on the optimal operating policies shows that the selection of design parameters can significantly affect the long-term performance of the system.

Keywords: Hydropower Reservoirs, Design Parameters, Simulation, Dynamic Programing, Operating Policies

[۱] استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران
[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه امیرکبیر
[۳] دانشجوی دکترای مهندسی آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[1] Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran
[3] Ph.D. Student, School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University (Tehran Polytechnic)

۱-مقدمه

دستیابی به ساختار بهینه برای سیستم‌های منابع آب با توجه به اهداف مختلف طرحهای توسعه، همواره از چالشهای مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده است. این اهداف می‌تواند شامل تأمین نیازهای پایین دست، کنترل سیلاب و حداکثر تولید برق یا تأمین برق در زمان‌های مشخص و یا ترکیبی از این اهداف باشد. در نظر گرفتن این اهداف در زمان طراحی مخازن بدلیل تعدد متغیرهای تصمیم و حالت و مشکلات ابعادی، اغلب با بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. در این دیدگاه، براساس سیاستهای خاص بهره‌برداری و در نظر گرفتن میزان نیازهای آبی و انرژی، با شبیه‌سازی عملکرد سیستم در درازمدت در طی دوره برنامه‌ریزی، پارامترهای مورد نظر هیدرولوژیکی و منابع آب مخزن تعیین می‌شوند. در این رویکرد، به منظور تعیین پارامترهای هیدرولوژیکی مخزن، دو دسته روش ساده شده و روش روندیابی متوالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه این روش‌های ساده شده تنها بایستی در مطالعات اولیه به نحوی مورد استفاده قرار گیرند که با استفاده از آنها پتانسیل یک مخزن در تامین اهداف تعیین شود، ولی در بسیاری از مطالعات بویژه در سیستم های چندمخزنه، همین رویکردهای ساده پایه و اساس بسیاری از سرمایه گذاری های کلان در امر توسعه منابع آب بوده است.

اگرچه استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی دارای سابقه گسترده‌ای در تدوین سیاستهای بهره‌برداری از سدها و سایر تاسیسات ذخیره سازی و استحصال منابع آب است، کاربرد محدودی در مطالعات طراحی و تعیین پارامترهای منابع آب موثر در محاسبات سازه سدها و تاسیسات وابسته به آنها داشته است. علت این امر همانطور که ذکر شد، عمدتاً مشکلات ابعادی در استفاده از مدلهای بهینه‌سازی بوده است که در مدلهای بهینه‌سازی پویا از آن تحت عنوان نفرین ابعادی[1] یاد می شود. بررسی سابقه مطالعات نشان می‌دهد، تعدادی از محققان از مدل‌های بهینه‌سازی خطی که مشکلات ابعادی کمتری دارند، جهت طراحی مشخصات فیزیکی مخازن بهره برده‌اند.

Houck et al.(1980) از روش برنامه ریزی خطی برای سیستم های چند مخزنه چند منظوره با تابع هدف اقتصادی استفاده کردند. در این تحقیق تابع هدف با سه روش توسعه یافته است. در اولین نوع آن، تابع هدف براساس به حداکثر رساندن سود خالص اقتصادی[2] ناشی از تامین آب و تولید برق تدوین شده است. دومین نوع تابع هدف صرفاً براساس به حداکثر رساندن کل تولید برق طراحی شده و در حالت سوم، تابع هدف تأمین آبدهی مطمئن در نظر گرفته شده است.

Revelle and Eartman (1973) یک روش مستقیم برای یک حالت خاص طراحی را ارائه دادند که در آن ذخیره مخزن در یک فصل به صورت محدودیت در مدل بهینه‌سازی قرار داده شده است. Turgeon (1987) یک مدل برنامه‌ریزی خطی را در طراحی مخازن برق آبی توسعه داد که در آن هدف، انتخاب محل مناسب مخزن و مشخصات فیزیکی آن نظیر نوع و ظرفیت نصب و حجم مخزن از اهداف طراحی بوده است. در این بررسی از یک روش برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شده که در آن عدد صحیح بمنظور در نظر گرفتن شماره محل مورد نظر، مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت به منظور تحلیل مسأله در همه حالت های ممکن از یک تحلیل پارامتری استفاده شده است.

Yeh et al. (1992) مسأله بهره‌برداری از سیستم‌های برق‌آبی متشکل از واحدهای حرارتی و برق‌آبی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان مسأله بهره‌برداری را در سه بازه زمانی ماهانه، روزانه و ساعتی مدلسازی کردند. Srinivasan & Simonovic (1994) مدلی برای بهینه‌سازی تولید برق براساس اطمینان‌پذیری تامین نیازها تدوین کردند. مدل پیشنهادی، سود حاصل از تولید برق را حداکثر و خسارتهای ناشی از عدم تامین اطمینان‌پذیری مورد انتظار برای تولید برق و کنترل سیلاب را حداقل می‌کند.

روش‌های ساده شده برای تعیین حجم مفید سدها بطور عمده به دو دسته منحنی جرم[3] و منحنی تداوم جریان[4] تقسیم می‌شوند. در صورتی که تولید برق یکی از اهداف طراحی مخزن باشد، روش روندیابی متوالی جریان مورد نیاز است،که با استفاده از آن بتوان به دقت مورد نظر دست یافت. (American Society of Civil Engineers, 1989).در پروژه‌های مخزنی برق آبی که میزان خروجی مستقل از بلندای آب مخزن است، برای دستیابی به دقت بالاتر لازم است که از روش روندیابی متوالی بمنظور تخمین پتانسیل انرژی مخزن استفاده شود. معادله اصلی در روش روندیابی متوالی جریان، معادله پیوستگی در مخزن است :

$$\Delta S_t = I_t - O_t - L_t \qquad (۱)$$

ΔS_t: تغییرات حجم مخزن در بازه زمانی t

I_t : ورودی به مخزن در بازه زمانی t

O_t: خروجی از مخزن در بازه زمانی t

L_t: تلفات شامل تبخیر و نشت آب از مخزن

در این تحقیق از یک مدل بهینه‌سازی پویا[5] برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سری دو مخزنی برق آبی بهره گرفته شده است. به منظور کاهش مشکلات ابعادی برخی از پارامترهای طراحی با استفاده از تحلیل حساسیت بر نتایج درازمدت مدل بهینه سازی تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است که استفاده از برنامه‌ریزی پویا بعلت تطابق این روش با روش‌های روندیابی متوالی جریان و درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های جریان ورودی بصورت ضمنی در مورد سیستم برق آبی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۱): متوسط جریان ورودی به سدهای پاعلم و کرخه و برآوردهای بین راهی در شرایط طبیعی (میلیو ن متر مکعب) (از مهر ۱۳۳٦ تا شهریور ۱۳۷۹)

ماه	ورودی به سد پاعلم	برآورد بین راهی بین سد کرخه و سد پاعلم	ورودی به سد کرخه
مهر	۱۲۸	۲۰	۱٤۷
آبان	۲۳۵	٤٤	۲۷۹
آذر	۳۸۸	۸۷	٤۷۵
دی	۳۸۸	۸۹	٤۷۸
بهمن	۵۲۵	۱۱٤	٦۳۹
اسفند	۷۵٦	۱۱۲	۸٦۷
فروردین	۱۱۵٤	۱۱۳	۱۲٦۷
اردیبهشت	۷۸۳	۸۲	۸٦۵
خرداد	۲۹۷	٤۸	۳٤۵
تیر	۱۵۵	۳۱	۱۸۷
مرداد	۱۱۹	۲۷	۱٤٦
شهریور	۱۰۵	۲۷	۱۳۲
	۵۰۳٤	۷۹۳	۵۸۲٦

مطالعه موردی این تحقیق بر سیستم دو مخزنی سری پا علم – کرخه که از جمله بهترین پتانسیلهای برق آبی در کشور می باشد، صورت گرفته است. در این تحقیق با توجه به اهمیت مولفه های مختلف سیستم مورد مطالعه و تاثیر قابل توجه آن در فرآیند طراحی مدل، ابتدا ساختار سیستم منابع آب کرخه تشریح شده است. مطالعات پایه برای تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی مورد نیاز جهت طراحی مخزن به جهت اهمیت قابل توجه آنها به طور خلاصه در بخشهای بعدی مقاله تشریح شده‌اند. سپس ساختار مدل بهینه‌سازی تلفیقی طراحی و بهره‌برداری تشریح شده و در نهایت نتایج مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بررسی نتایج این مطالعات نشان دهنده اهمیت درنظر گرفتن تاثیر سیاستهای بهینه بهره برداری در عملکرد درازمدت سیستم در تعیین پارامترهای طراحی بوده است.

۲- مشخصات پایه سیستم منابع آب کرخه

رودخانه کرخه که پس از رودخانه‌های دز و کارون، بزرگترین رودخانه کشور محسوب می‌شود، از دو سرشاخه اصلی سیمره و کشکان سرچشمه می‌گیرد. سرشاخه‌های اصلی رودخانه سیمره را رودخانه‌های قره سو و گاماسیاب تشکیل می‌دهند. مجموع کل ظرفیت سدهای مخزنی در این حوزه آبریز در شرایط توسعه کامل حدود ۱۸ میلیارد متر مکعب خواهد بود که از این میزان نزدیک به ۹/۳ میلیارد متر مکعب به عنوان حجم مفید درنظر گرفته شده است. در حال حاضر تنها سد مخزنی در دست بهره‌برداری در این سیستم، سد مخزنی کرخه است. هدف اصلی از احداث کلیه سدهای مخزنی در این حوزه آبریز، تولید انرژی برق‌آبی است. سد مخزنی کرخه با حجم کل ۵۵۷۲ میلیون مترمکعب، عمدتاً با هدف تامین آب اراضی پای پل، حمیدیه، قدس و آزادگان توسعه داده شده است. اهداف جنبی ساخت این سد، تولید برق و کنترل سیلابها هستند. به استناد مطالعات مهاب قدس (۱۳۷۱)، تا قبل از شروع بهره‌برداری از سد مخزنی کرخه بیش از ۹۰ هزار هکتار از اراضی این دشتها زیر کشت بوده که حدود ۱۱ هزار هکتار توسط آب زیرزمینی و مابقی که دربرگیرنده اراضی حقابه‌بر خارج از محدوده طرح شبکه آبیاری نیز می‌گردد از طریق جریان رودخانه کرخه آبیاری شده‌اند. کل آب مورد نیاز برای این اراضی بیش از ۳۶۰۰ میلیون متر مکعب برآورد شده است. همچنین درصد آب برگشتی این اراضی بین ۵ تا ۳۵ درصد متغیر درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که ارقام فوق برای درصد آب برگشتی براساس مطالعات شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس (۱۳۷۱) در این مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. برای اطلاعات بیشتر در مورد سیستم منابع آب حوزه آبریز کرخه و سدهای دردست ساخت و مطالعه می توانید به شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس (آذر و تیر ماه ۱۳۷۱) و مهندسین مشاور سکو (۱۳۸۱) مراجعه کنید.

۲-۱- تخمین رسوبات

در این بخش از تحقیق با بهره‌گیری از نتایج تحلیلهای هیدرولوژیک، بار رسوبی رودخانه کرخه در محل سد پاعلم و با استفاده از نرم‌افزار *HEC6* تغییرات حجم مخزن در یک دوره پنجاه ساله مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های ورودی مدل *HEC6*، به سه بخش داده‌های هندسی، اطلاعات مربوط به رسوب و داده‌های هیدرولوژی قابل تقسیم می‌باشد. به منظور تهیه داده‌های هندسی مورد نیاز از مقطع دریاچه سد،

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیستم تک مخزنی پاعلم با درنظر گرفتن گزینه‌های مختلف ترازهای حداقل تولید برق (ظرفیت نصب: ۴۰۰ مگاوات – ضریب)

گزینه	تراز حداقل بهره برداری	مفید حجم مخزن (MCM)	انرژی متوسط سالانه (GWh)	متوسط خروجی تولید سالانه (MCM) برق	عبوری درصد نیروگاه از	متوسط تبخیر سالانه (MCM)	سرریز متوسط سالانه (MCM)	درصد سرریز سالانه	(GWh) مطمئن انرژی			(GWh) ثانویه انرژی		
									اوج	غیراوج	مجموع	اوج	غیراوج	مجموع
۱	۴۱۰	۲۳۷۷	۱۲۴۷	۴۷۱۶	%۹۵	۱۲۰	۲۴۹	%۵	۵۱۸	۲۸	۵۴۶	۲۵۵	۴۳۵	۶۹۰
۲	۴۲۰	۲۰۳۶	۱۲۳۸	۴۶۲۹	%۹۳	۱۲۳	۳۳۰	%۷	۵۹۶	۳۳	۶۲۹	۱۹۱	۴۱۸	۶۰۹
۳	۴۳۰	۱۶۸۸	۱۲۷۴	۴۶۶۸	%۹۴	۱۲۷	۲۷۸	%۶	۵۳۶	۱۸	۵۵۴	۲۶۳	۴۵۷	۷۲۰
۴	۴۴۰	۱۱۵۹	۱۲۸۸	۴۵۶۲	%۹۳	۱۳۷	۳۶۱	%۷	۵۳۳	۵	۵۳۸	۲۵۸	۴۹۲	۷۵۰
۵	۴۵۰	۶۲۹	۱۲۸۶	۴۴۲۲	%۹۰	۱۴۷	۴۸۶	%۱۰	۵۵۴	۰	۵۵۴	۲۱۵	۵۱۸	۷۳۳
۶	۴۵۵	۳۱۵	۱۲۶۴	۴۳۳۵	%۸۹	۱۵۷	۵۵۶	%۱۱	۵۲۶	۲۵	۵۵۱	۱۹۳	۵۲۰	۷۱۳

تعداد ۱۹ مقطع عرضی از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰ برداشت شده است. موقعیت این مقاطع به نحوی انتخاب شده که پوشش مطلوبی به تغییرات مقاطع دریاچه از سرآب تا دیواره سد داده شود.

به منظور برآورد ضریب مانینگ، از روابط تجربی پیشنهادی (Subramanya,1986) استفاده شده است. اطلاعات دانه‌بندی مواد معلق و بار بستر در رودخانه کرخه نیز به استناد اطلاعات موجود و مطالعات قبلی برآورد شده است. به منظور تکمیل اطلاعات رسوب که در مدل *HEC6* مورد نیازاست، از نتایج بررسی‌های انجام شده بر رابطه دبی رسوب و دبی آب، و به منظور برآورد بار بستر از روابط پیشنهادی توسط Yang (1973) استفاده شده است. در توسعه این روابط فرض Yang بر میزان بار بستر متناسب با استهلاک انرژی جریان استوار است.

به منظور تکمیل اطلاعات هیدرولوژیکی مورد نیاز در مدل از اطلاعات ۴۳ ساله بهره‌برداری از سد پاعلم که در این تحقیق براساس سیاستهای بهینه مدل برنامه‌ریزی پویا تدوین شده، استفاده شده است. جزییات نحوه تعیین خروجی‌ها و تغییرهای تراز آب در مخزن در قسمتهای بعدی گزارش ارائه شده است. با توجه به نتایج مدل، رسوب ورودی به سد پاعلم در یک دوره ۵۰ ساله به طور متوسط ۱۰۶۶ میلیون متر مکعب برآورد شده است. تاثیر رسوبات ورودی بر منحنی حجم – سطح – ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته و درنهایت تغییرهای منحنی حجم – سطح – ارتفاع در مدل بهینه‌سازی لحاظ شده است (مهندسین مشاور سکو، ۱۳۸۱). رویکرد مشابهی در مورد حجم رسوبات پنجاه ساله سد کرخه مورد استفاده قرار گرفته و ارقام تخمینی در مدل بهینه‌سازی دو مخزنی توسعه داده شده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- ساختار مدل بهینه‌سازی تلفیقی طراحی و بهره برداری

در این مطالعه از ترکیبی از یک مدل برنامه‌ریزی پویای قطعی، تحلیل رگرسیون و مدل شبیه‌سازی که تحت عنوان مدل DPR شناخته می‌شود که توسط Karamouz et al.(1992) تدوین شده، استفاده شده و مدل جهت تعیین پارامترهای بهره‌برداری و طراحی سیستم دو مخزنی پاعلم – کرخه توسعه داده شده است. هر سیکل این مدل شامل عبور از یک حلقه بهینه‌سازی، تحلیل رگرسیون و یک الگوریتم شبیه‌سازی است و در هر سیکل، قوانین بهره‌برداری با افزایش همبستگی بین سیاستهای بهینه و شبیه‌سازی، بهبود می‌یابد. معادله هدف که در بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی پویا حل می‌شود تنها به منظور بهینه‌سازی تامین نیاز تعریف شده است.

در این تحقیق به منظور توسعه مدل بهینه‌سازی سعی بر این است که قوانین بهره‌برداری بگونه‌ای اصلاح شوند که کل برق تولید شده حاصل از شبیه‌سازی در طول سری تاریخی حداکثر شود. همچنین در این مدل نیاز تولید برق نیز بر اساس ضریب کارکرد نیروگاه مورد توجه قرار گرفته است. نیاز تولید برق (DE) در هر ماه بر حسب ضریب کارکرد نیروگاه بصورت زیر تعریف می شود:

$$DE = PF \times 24 \times 30 \times P_s \qquad (۲)$$

در این رابطه PF ضریب کارکرد نیروگاه[۶] و P_s ظرفیت نصب نیروگاه S است. بمنظور تأمین نیاز برق، عدم تأمین این نیاز بصورت خسارت در ساختار تابع هدف مدل در نظر گرفته می‌شود. معادله برگشتی این مدل بهینه‌سازی که با استفاده از برنامه‌ریزی پویا در سری تاریخی مورد استفاده قرار می‌گیرد به شرح زیراست:

$$f_{t+1}(S_{1,t+1}, S_{2,t+1}) = \min_{\substack{S_{1,t} \in \Omega_{1,t} \\ S_{2,t} \in \Omega_{2,t}}} \left[\sum_{s=1}^{2} \xi\left(PG(R_{s,t}, S_{s,t}), DE\right) + f_t(S_{1,t}, S_{2,t}) \right] \qquad (۳)$$

در این معادله T طول دوره تاریخی، $R_{s,t}$ میزان خروجی از مخزنs در ماهt، $S_{s,t}$ میزان متوسط حجم مخزنs در ماهt ، PG معرف تابع تولید برق[۷] و ξ نشان دهنده تابع خسارت عدم تامین نیاز انرژی می باشد. در این رابطه شرایط اولیه عبارتند از:

$$f_1(S_{1,1}, S_{2,1}) = 0 \qquad S_{1,1} \in \Omega_{1,1}, S_{2,1} \in \Omega_{2,1} \qquad (۴)$$

در این معادله ها $\Omega_{s,t}$ مجموعه سطوح مختلف حجم مخزن در ابتدای ماه t و در مخزن s است و $f_t(s)$ نشان دهنده مجموع مقدار تابع هدف از ابتدای دوره تاریخی تا زمان t برای یکی از ترازهای مخزن است. پس از تعیین نتایج بهینه، بر اساس رگرسیون بین نتایج مدل برای هر ماه معادله سیاستی تدوین می‌شود که میزان خروجی بهینه $R_{s,t}$ را براساس حجم مخزن بهینه و ورودی به مخزن محاسبه می‌کند:

$$\hat{R}_{s,t} = a_m I_{s,t} + b_m S_{s,t} + c_m \qquad (۵)$$

در این معادله $I_{s,t}$ و $S_{s,t}$ به ترتیب معرف میزان ورودی و حجم مخزن S براساس نتایج مدل بهینه‌سازی در ماه t (t=1, ..., T) و a_m، b_m و c_m ضرایب معادله سیاست در ماه m (m=1, ..., 12) هستند. بر این اساس، این معادله برای ۱۲ ماه محاسبه می‌شود. در ابتدا هیچ محدودیت حداقل و حداکثر اضافی روی خروجی‌ها اعمال نمی‌شود و حداقل خروجی صفر است. مدل برنامه‌ریزی پویا اجرا شده و سیاستهای بهینه در یک تحلیل رگرسیون چند متغیره برای پیدا کردن قوانین بهره‌برداری عمومی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قوانین سپس برای شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخازن در یک افق زمانی درازمدت، استفاده می‌شوند و هزینه‌های شبیه‌سازی متناظر با سیاست مورد استفاده، تعیین می‌شود. این فرآیند اولین تکرار مدل را شامل می‌شود. بدلیل اینکه بتوان هر چه بیشتر نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی حاصل از سیاست‌های بهره‌برداری را به یکدیگر نزدیک کرد مدل بهینه‌سازی مجدداً تکرار می‌شود. از تکرار دوم، خروجی مجاز در برنامه‌ریزی پویا در محدوده‌ای از خروجی‌های تکرار قبلی حاصل از قوانین بهره‌برداری کلی، به شکل زیر محدود می‌شوند:

$$(1 - bound)\hat{R}_{s,t} \le R_{s,t} \le (1 + bound)\hat{R}_{s,t} \qquad (۶)$$

این عملیات تا زمانی که قانون بهره‌برداری بهبود یافته و یا قانون بهتری برای مقداری مشخص از bound بدست آید ، تکرار می‌شود. بدین طریق میزان درجه همبستگی بین معادله سیاست در هر تکرار افزایش می‌یابد. الگوریتم در هر تکرار با کوچکتر کردن bound، روند برنامه‌ریزی پویا، تحلیل رگرسیون و فرایند شبیه‌سازی را ادامه می‌دهد. اگر باند خیلی کوچک شود، به‌دلیل اینکه محدودیتهای بیشتر روی خروجی در برنامه‌ریزی پویا احتمالاً منجر به سیاستهای بهره‌برداری بهتری نخواهد شد، الگوریتم متوقف خواهد شد.

همانطور که در مقدمه ذکر شد، به منظور کاهش مشکلات ابعادی، پارامترهای طراحی در گزینه‌های مختلف متغیر درنظر گرفته شده و براساس تحلیل حساسیت نتایج درازمدت مدل، مقادیر مطلوب این پارامترها انتخاب شده است. برای این منظور گزینه‌های زیر در سیستم مورد مطالعه، بررسی شده‌اند:

- تراز نرمال بهره‌برداری، که بعنوان اولین پارامتر طراحی است و در گزینه‌های مختلف از ۴۵۰ تا ۴۷۰ متر در نظر گرفته شده و تأثیر آن در تنظیم جریان و تولید برق مورد ارزیابی قرار گرفته است.

- ظرفیت نصب نیروگاه بمنظور پوشش دادن به حالت های مختلف از ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاوات در ۴ گزینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که برخلاف مطالعاتی که توسط بسیاری از مشاورین صورت گرفته و ظرفیت نصب نیروگاه بر اساس روشهایی نظیر منحنی تداوم جریان و انرژی انتخاب شده است در این تحقیق، این پارامتر در محدوده نسبتاً وسیعی متغیر درنظر گرفته شده تا بتوان تحلیلهای اقتصادی جامعتری بر میزان تولید اوج (پیک)[۸] در ساعات اوج مصرف و غیر اوج (غیرپیک)[۹] در سایر ساعات شبانه روز و انرژی مطمئن تولیدی نیروگاه انجام داد.

- تراز حداقل بهره‌برداری با توجه به گزینه‌های تراز مختلف نرمال مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر آن در تنظیم جریان و تولید برق بررسی شده است.

در شکل (۱) رویکرد مورد استفاده در مدل تلفیقی طراحی و بهره‌برداری نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده، فرآیند تعیین پارامترهای طراحی به دو بخش اصلی تقسیم شده است. در بخش اول، پارامترهای تراز نرمال، ظرفیت نصب و تراز حداقل براساس نتایج مدلهای بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند و سپس بهینه‌سازی مجدد به منظور تعیین مقدار بهینه تراز حداقل صورت می‌گیرد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در هر دو مرحله بهینه‌سازی بهره برداری در مقیاس بلندمدت صورت گرفته و ارزیابی نتایج براساس عملکرد درازمدت سیستم در هر دو مرحله بهینه‌سازی و شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. این رویکرد، امکان تحلیل تاثیر بکارگیری سیاست بهره‌برداری را فراهم می‌سازد. بطور کلی در مدل توسعه داده شده اهداف اصلی بشرح زیر مد نظر قرار گرفته است:

- حداکثر سازی متوسط انرژی سالانه[۱۰]
- حداکثر سازی انرژی مطمئن[۱۱]

در نظر گرفتن هر یک از این دو هدف به تنهایی در مدل بهینه‌سازی نتایج متفاوتی را ایجاد می‌کند. بدین منظور در مدل تهیه شده از روش ε -حدی (ε-Constraint Method) برای تحلیل چند معیاره استفاده شده است. به این صورت که تابع هدف مدل بهینه‌سازی بر مبنای به حداکثر رساندن انرژی متوسط سالانه در نظر گرفته شده و انرژی مطمئن ماهانه نیز بعنوان

یک مقدار حدی و نیاز انرژی مورد نیاز در هر ماه بعنوان یک محدودیت فرض شده است.

۴- فرضیات طراحی

فرضیات مورد استفاده در بهینه‌سازی پارامترهای طراحی بشرح زیر است:

- جریان ورودی ماهانه به مخزن برای یک دوره ۴۳ ساله از سالهای آبی ۱۳۳۶ تا ۱۳۷۹ در نظر گرفته شده است. میزان متوسط جریان ورودی سالانه به مخزن ۵۰۳۴ میلیون متر مکعب است. در جدول (۱) متوسط جریان ورودی به مخازن پاعلم و کرخه نشان داده شده است.
- در مدل بهینه‌سازی تهیه شده، میزان تبخیر از مخازن سدهای پاعلم و کرخه با توجه به تراز آب در مخزن در هر ماه برآورد و در معادله های پیوستگی جریان و تعیین سیاستهای بهینه در نظر گرفته شده است. میزان متوسط تبخیر سالانه بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیون متر مکعب برای گزینه‌های مختلف تراز نرمال بهره‌برداری محاسبه شده است.
- مشخصات فیزیکی سدهای کرخه و پاعلم با توجه به موقعیت دریچه‌ها، منحنی‌های سطح – حجم – ارتفاع و ظرفیت و مشخصات نیروگاه سد کرخه در مدل بهینه‌سازی دو مخزنی منظور شده است. ظرفیت نصب نیروگاه سد کرخه ۴۰۰ مگاوات شامل ۳ واحد ۱۳۳ مگاوات است.
- معادله های زیر برای محاسبه بلندای موثر آب بمنظور تولید برق براساس دبی خروجی مورد استفاده قرار گرفته اند:

پاعلم:

$$H_t = H_u - 328.05 - 0.004\,Q + \left(8\times10^{-7}\right)Q^2 \qquad (۷)$$

کرخه:

$$H_t = H_u - 113.12 - 0.0011\,Q + \left(5\times10^{-8}\right)Q^2 \qquad (۸)$$

در این روابط، H_u و H_t به ترتیب تراز آب در سراب و بلندای مؤثر آب به منظور تولید برق برحسب متر و Q دبی خروجی برحسب میلیون متر مکعب در ماه است. معادله های فوق براساس منحنی های ارائه شده توسط مشاور طرح تدوین شده اند. در مدل بهینه‌سازی، با توجه به تغییرهای دبی خروجی از سد، تغییرات میزان تراز آب در پایاب براساس معادله های فوق ملحوظ شده است.

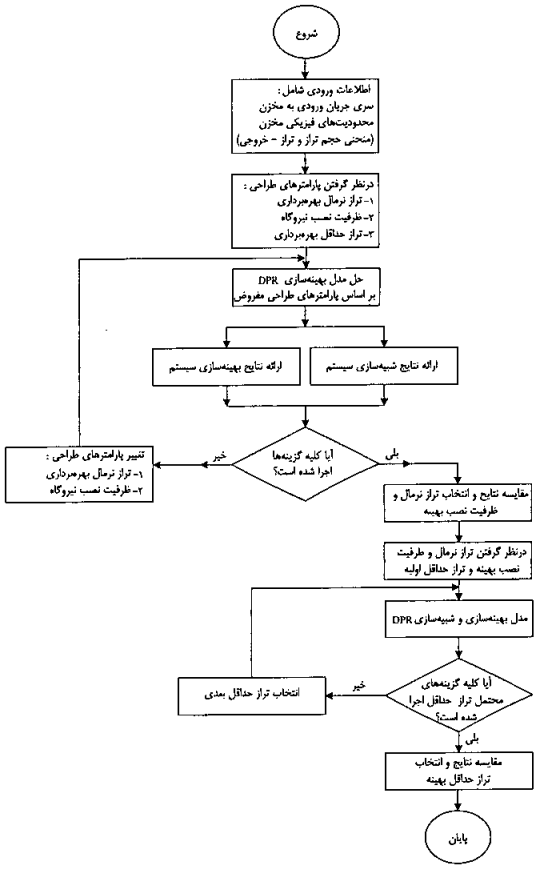
- تامین نیازهای آبی در کلیه گزینه‌های مختلف به صورت محدودیت در نظر گرفته شده و به عبارت دیگر سیاستهای بهره‌برداری به نحوی تدوین شده‌اند که بیش از ۹۰ درصد نیازهای آبی در ماه‌های مختلف سال تامین شوند. برای این منظور در ساختار حلقه بهینه‌سازی برای حالت هایی که کمتر از ۹۰ درصد نیاز تامین شود، خسارت قابل توجهی درنظر گرفته شده به نحوی که این جوابها در تعیین مسیر بهینه انتخاب نشوند.
- به منظور محاسبه انرژی مطمئن۱۲ سیستم، حداقل تولید ماهانه با احتمال ۹۰ درصد مورد توجه قرار گرفته است و انرژی تولید شده مازاد بر انرژی مطمئن به عنوان انرژی ثانویه۱۳ درنظر گرفته شده است.

۵- نتایج مدل برای سیستم تک مخزنی و دو مخزنی

در این بخش، عملکرد سیستم تک مخزنی پاعلم و دو مخزنه پاعلم – کرخه در گزینه‌های مختلف براساس سیاستهای بهینه تدوین شده توسط مدل DPR شبیه‌سازی شده است. در نتایج ارائه شده میزان تولید برق مطمئن (Firm) و ثانویه در هر گزینه در ساعات پیک و غیر پیک نشان داده شده است. برای این منظور تولید ماهانه توسط یک مدل شبیه‌سازی به تولید ساعتی شکسته شده و تولید اوج و غیراوج محاسبه شده است (به عنوان نمونه به جدول (۲) مراجعه کنید). زمان پیک در این مطالعات ۶ ساعت درنظر گرفته شده و اولویت تولید برق مطمئن نیز با توجه به ارزش بیشتر برق تولیدی در ساعت‌های پرمصرف در ساعات پیک درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در مدل بهینه‌سازی ، تغییرهای حجم مخازن کرخه و پاعلم در اثر رسوبات ورودی درنظر گرفته شده است. در ادامه مقاله، به تفکیک نتایج حلقه بهینه‌سازی مدل DPR برای سیستم تک مخزنی و نتایج شبیه‌سازی عملکرد درازمدت سیستم دو مخزنی پاعلم - کرخه براساس سیاستهای بهینه مدل DPR ارائه شده است. مقایسه این نتایج امکان تحلیل تاثیر استفاده از سیاست بهینه نشان داده شده در معادله (۶) را در نتایج بهینه‌سازی فراهم می‌سازد. همچنین تاثیر درنظر گرفتن سد مخزنی کرخه در بهره‌برداری از سد پاعلم و میزان تولید انرژی نشان داده شده است.

۵-۱- نتایج بهینه سازی بهره‌برداری از سیستم تک مخزنی پاعلم

نتایج ارائه شده در این بخش متوسط درازمدت شاخصهای عملکرد سیستم تک مخزنی پاعلم نظیر انرژی مطمئن و کل در ساعات اوج و غیراوج، تبخیر و جریان عبوری از دریچه ها و توربین‌ها را براساس مسیر بهینه شناسایی شده در حلقه بهینه‌سازی مدل DPR نشان می‌دهد. در گزینه‌های مختلف، تراز نرمال بهره‌برداری از ۴۵۰ تا ۴۷۰ متر تغییر داده شده و تأثیر آن در تنظیم جریان و تولید برق مورد ارزیابی قرار گرفته است. ظرفیت نصب نیروگاه از ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاوات در گزینه‌های مختلف متغیر درنظر گرفته شده است. تراز حداقل بهره‌برداری نیز با توجه به گزینه‌های تراز مختلف نرمال مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر آن در تنظیم جریان و تولید برق بررسی شده است. به عنوان نمونه، نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیستم تک مخزنی پاعلم با درنظر گرفتن گزینه‌های مختلف ترازهای حداقل تولید برق، ظرفیت نصب ۴۰۰ مگاوات، ضریب کارکرد ۲۵ درصد و تراز نرمال ۴۶۰ متر از سطح دریا نشان داده شده است. درشکلهای (۲) تا (۴)، مقایسه متوسط انرژی سالانه و ضریب کارکرد و جریان عبوری از نیروگاه در گزینه‌های مختلف ارائه شده است.

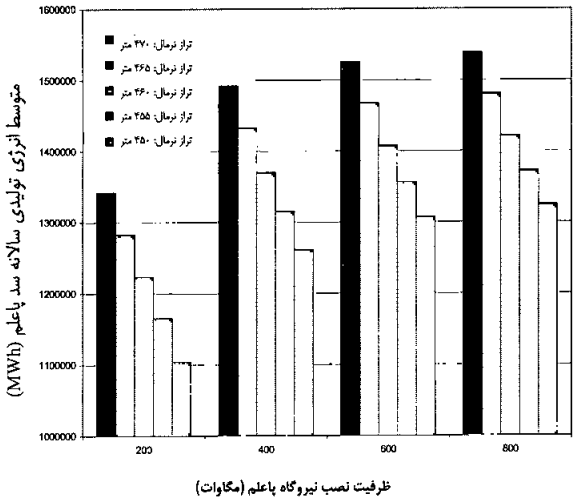


شکل (۱): شمای کلی فلوچارت مدل تلفیقی بهینه سازی طراحی و بهره برداری

همانطور که در این شکلها مشاهده می‌شود، درصد جریان عبوری از نیروگاه در همه حالت ها در شرایط بهره‌برداری بر اساس سیاست بهینه بیش از ۸۵ درصد است. بررسی نتایج تولید سالانه انرژی نشان می‌دهد که با افزایش تراز نرمال از ۴۵۰ متر تا ۴۷۰ متر، کل تولید سالانه حدود ۱۸ درصد برای هر ظرفیت نصب افزایش یافته است. شکل (۵) انرژی مطمئن تولیدی در برخی از گزینه ها با ترازهای نرمال متفاوت وظرفیت نصب ۴۰۰ مگاوات را نشان می‌دهدکه با افزایش تراز نرمال از ۴۵۰ تا ۴۷۰، انرژی مطمئن سالانه حدود ۱۳ درصد بهبود یافته است.

۵-۲- نتایج شبیه سازی عملکرد درازمدت سیستم دو مخزنی براساس سیاستهای بهینه

در این بخش نتایج شبیه‌سازی عملکرد درازمدت سیستم دو مخزنی براساس ارائه شده است. شکل (۶) تغییرهای تولید کل **DPR**سیاستهای بهینه مدل سالانه سد پاعلم در گزینه‌های با ظرفیت نصب ۴۰۰ مگاوات و ضریب کارکرد ۲۵ درصد را نشان می‌دهد. افزایش تراز نرمال سد پاعلم از ۴۵۰ به

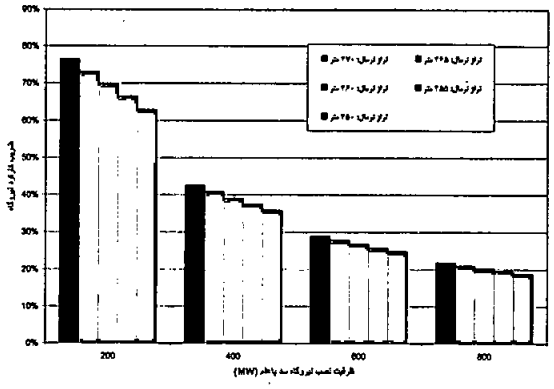


شکل (۲): نتایج بهینه‌سازی متوسط انرژی سالانه سد پاعلم با درنظر گرفتن ترازهای نرمال مختلف و ظرفیت‌های نصب نیروگاه

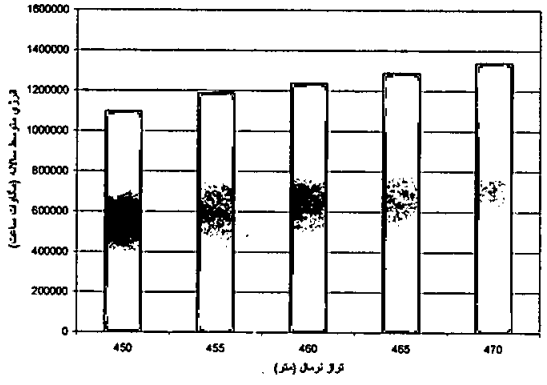
۴۷۰ متر، تولید کل سالانه سد پاعلم با درنظر گرفتن ظرفیت نصب ۴۰۰ مگاوات و ضریب کارکرد ۲۵ درصد، حدود ۱۸ درصد بهبود می‌یابد که این نرخ افزایش مشابه نتایج بهینه‌سازی بوده است.

شکل (۷) تغییرهای انرژی مطمئن در گزینه‌های مذکور را نشان می‌دهد. بررسی نتایج گزینه‌های مختلف نشان می دهد که با افزایش تراز نرمال سد پاعلم از ۴۵۰ تا ۴۷۰ متر از سطح دریا، انرژی مطمئن تولید شده در سیستم پاعلم – کرخه ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. بیشترین میزان انرژی مطمئن در تراز نرمال ۴۶۰ متر از سطح دریا مشاهده شده است. شکل (۸) تغییرهای انرژی مطمئن سد پاعلم را برای گزینه‌های مختلف با تراز نرمال ۴۶۰ متر نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان انرژی مطمئن با ظرفیت نصب ۶۰۰ مگاوات و ضریب کارکرد ۱۵ درصد و پس از آن با درنظر گرفتن ظرفیت نصب ۴۰۰ مگاوات با ضریب کارکرد ۲۵ درصد قابل استحصال است. به منظور تعیین تراز حداقل، تحلیل حساسیت انجام شده و تغییر میزان تولید مطمئن و تولید کل که براساس شبیه‌سازی عملکرد سیستم دو مخزنی در درازمدت براساس سیاستهای بهینه تعیین شده با افزایش تراز حداقل تولید انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

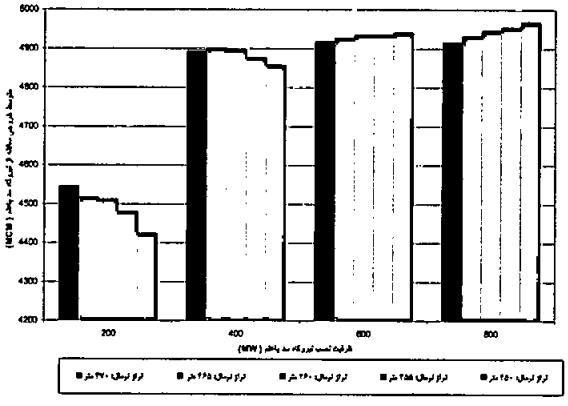
جدول (۲) بطور نمونه، نتایج گزینه‌های مختلف با درنظر گرفتن ظرفیت نصب ۴۰۰ مگاوات، تراز نرمال ۴۶۰ متر از سطح دریا و ضریب کارکرد ۲۵ درصد را با درنظر گرفتن تراز حداقل به میزان ۴۱۰، ۴۲۰، ۴۳۰، ۴۴۰، ۴۵۰، ۴۵۵ متر از سطح دریا نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین میزان انرژی مطمئن در گزینه با تراز حداقل ۴۲۰ متر و حداکثر تولید کل در تراز حداقل ۴۴۰ متر از سطح دریا محاسبه شده است.



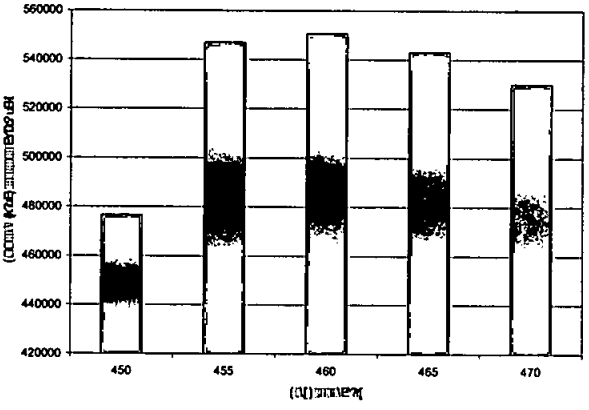
شکل (۳): میزان ضریب کارکرد نیروگاه در نتایج بهینه‌سازی متوسط انرژی سالانه سد پاعلم با درنظر گرفتن ترازهای نرمال مختلف و ظرفیت‌های نصب نیروگاه



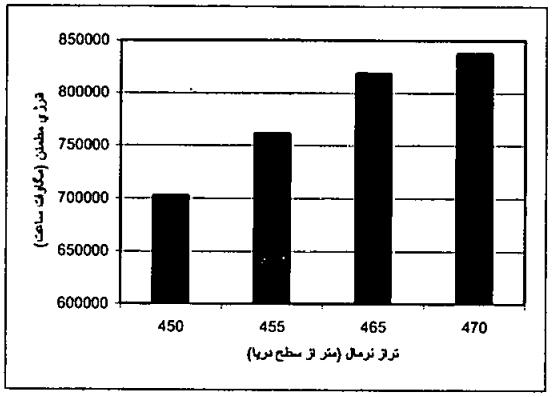
شکل (٦): تولید کل سالانه سد پاعلم در شبیه‌سازی سیستم دو مخزنی پاعلم–کرخه (ظرفیت نصب: ٤٠٠ مگاوات - ضریب کارکرد: ۲۵ درصد)



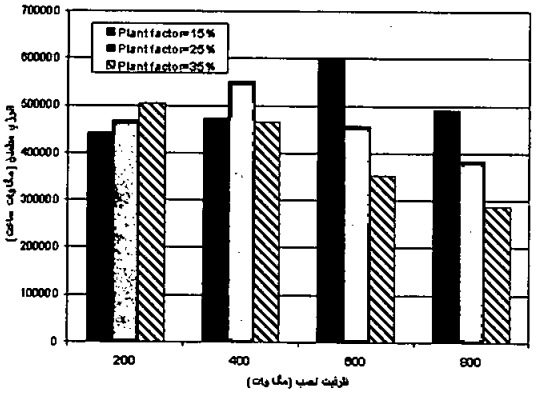
شکل (۴): میزان جریان خروجی از نیروگاه در نتایج بهینه‌سازی متوسط انرژی سالانه سد پاعلم با درنظر گرفتن ترازهای نرمال مختلف و ظرفیت‌های نصب نیروگاه



شکل (۷): نتایج انرژی مطمئن سالانه در شبیه‌سازی سیستم دو مخزنی پاعلم–کرخه (ظرفیت نصب: ٤٠٠ مگاوات - ضریب کارکرد: ۲۵ درصد)



شکل (۵): نتایج بهینه‌سازی انرژی مطمئن سد پاعلم با درنظر گرفتن ترازهای نرمال مختلف



شکل (۸): انرژی مطمئن سالانه سد پاعلم در شبیه‌سازی سیستم دو مخزنی پاعلم – کرخه (تراز نرمال: ٤٦٠ متر)

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامترهای طراحی سد پاعلم در قالب یک مدل تلفیقی بهینه‌سازی تک مخزنه و دو مخزنه بهره‌برداری تعیین شده است. به این منظور، ابتدا ورودی‌های مدل بهره‌برداری ارزیابی و بازنگری شده‌اند. منحنی ارتفاع مخزن و تغییرات آن براثر رسوبات ورودی در دوره – سطح –حجم برنامه ریزی در تدوین سیاستهای بهینه بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفته است. برآوردهای انجام شده در این مورد نشان می‌دهد که بدون درنظر گرفتن تاثیر سدهای بالادست، حجم کل سد پاعلم در تراز ۴۶۰ متر به میزان ۱۰۶۶ میلیون متر مکعب در یک دوره ۵۰ ساله کاهش خواهد یافت.

در ادامه بمنظور تعیین پارامترهای اصلی طراحی سد شامل تراز نرمال و حداقل، ظرفیت نصب نیروگاه و ضریب کارکرد، مدل بهینه‌سازی که در این مطالعات برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم تک مخزنی پاعلم و سیستم دو مخزنی کرخه – پاعلم توسعه داده شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در تدوین تابع هدف این مدلها، بیشینه سازی تولید کل سالانه و تامین نیاز انرژی با توجه به ظرفیت نصب و ضریب کارکرد مورد توجه قرار گرفته است. گزینه‌های مختلف جهت تحلیل حساسیت تولید انرژی کل و انرژی مطمئن با درنظر گرفتن ظرفیت نصب ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاوات، ضریب کارکرد ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد و تراز نرمال ۴۵۰ تا ۴۷۰ متر درنظر گرفته شده که نتایج برخی از گزینه‌ها در مقاله ارائه شد.

مقایسه نتایج بهینه‌سازی سیستم تک مخزنی و شبیه‌سازی براساس سیاستهای بهینه تدوین شده برای سیستم دو مخزنی با درنظر گرفتن فرضیات مشابه برای ترازهای نرمال و حداقل، ظرفیت نصب و ضریب کارکرد، نشان می‌دهد که میزان تولید برق سد پاعلم در گزینه‌های مختلف تراز نرمال در نتایج شبیه‌سازی براساس سیاستهای بهینه حدود ۱۰ درصد کاهش نسبت به نتایج بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. این امر نشان می دهد که با وجود انعطاف پذیری بیشتری سیستم دو مخزنی نسبت به سیستم تک مخزنی در کنترل برآوردها و افزایش میزان تولید، تاثیر کاربرد سیاستهای بهینه در بهره‌برداری از سیستم پس از ساخت می‌تواند حایز اهمیت باشد. به عبارت دیگر استفاده از نتایج بهینه‌سازی جهت تدوین سیاستهای توسعه سیستم های منابع آب و انرژی می‌تواند خطاهایی را در برآوردهای انجام شده به همراه داشته باشد.

نتایج این مقایسه در مورد انرژی مطمئن تولیدی سد پاعلم نشان دهنده اهمیت بیشتر این پارامتر است . بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که انرژی مطمئن سد پاعلم (با اطمینان پذیری۹۰ درصد) در گزینه‌های مختلف بین ۲۷ تا ۳۶ درصد کاهش نسبت به نتایج بهینه‌سازی داشته که قابل توجه است . با توجه به اینکه برنامه‌ریزی برای توسعه اکثر سدهای برق آبی کشور با توجه به نقش آنها در تولید مطمئن در ساعات اوج مورد ارزیابی و تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد، توجه به محدودیتهای حاکم بر بهره‌برداری می‌تواند این برنامه‌ها را دچار تغییرهای قابل ملاحظه ای کرده و بنابراین استفاده تلفیقی از مدلهای بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری توصیه می شود.

۷-تشکر

نتایج ارائه شده در این تحقیق در قالب دستاوردهای پژوهشی مطالعات تکمیلی فاز اول طرح سد و نیروگاه پاعلم و با پشتیبانی مالی شرکت مهندسین مشاور سکو انجام شده است. بدین وسیله از دیدگاههای سازنده آقای مهندس توکلی مدیر این پروژه در شرکت سکو قدردانی می شود.

پی نوشت‌ها:

1.Curse of Dimensionality
2.Net Benefit
3.Mass Curve
4.Flow Duration Curve
5.Dynamic Programming
6.Plant Factor
7.Power Generation
8.Peak
9.Offpeak
10.Annual Average Energy
11.Firm Energy
12.Firm Energy
13.Secondary Energy

۸- مراجع

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، نیروگاه سد مخزنی کرخه، خلاصه نتایج مطالعات مربوط به بهینه‌یابی تعداد واحدهای نیروگاه، ، تیر ماه ۱۳۷۱.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، طرح سد مخزنی کرخه (مطالعات مرحله اول) – پیوست شماره ۴-۵ – برنامه ریزی منابع آب، آذر ماه ۱۳۷۱.

مهندسین مشاور سکو، مطالعات طرح سد مخزنی و نیروگاه پاعلم، گزارش مطالعات برنامه‌ریزی منابع آب «مطالعات تکمیلی مرحله اول»، بهمن ۱۳۸۱.

American Society of Civil Engineers (1989), "Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments", Volume 1- Planning, Design of Dams, and Related Topics, and Environmental, American Society of Civil Engineers, New York, NY.

Eartman, J., and Revelle, C. S. (1973), "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 3, Direct Capacity Determination and Interaseasonal Constraints", Water Resources Research, 9(1), 29-42.

Houck, M. H., Cohon, J. L., and Revelle C. S. (1980). "Linear Decision Rule in Reservoir Design and Management 6.Incorporation of Economic Efficiency

Subramanya, K. (1986), "Flow in Open Channels", McGraw Hill, New York.

Benefits and Hydropower Energy Generation", Water Resources Research, 16(1), 196-200.

Karamouz, M., and Houck, M. H. (1982). "Annual and Monthly Reservoir Operating Rules", Water Resources Research, 18(5), 1337-1344.

Karamouz, M., Houck, M.H., and Delleur, J.W., (1992), "Optimization and Simulation of Multiple Reservoir Systems", ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol 118, No. 1, pp 71-81, January-February 1992.

Srinivasan, R. and S. P. Simonovic (1994), "A Reliability Programming Model for Hydropower Optimization", Canadian Journal of Civil Engineering, 21, pp. 1061-1073.

Turgeon, A. (1987). "An Application of Parametric Mixed-Integer Linear Programming to Hydropower Development", Water Resources Research, 23(3), 399-407

Yang, C. T. (1973), "Incipient Motion and Sediment Transport", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY10, Proc. Paper 10067, pp. 16791704, October 1973.

Yeh, W. W-G., L. Becker, Sh. Q. Hua, D-P Wen, and J-M liu (1992), "Optimization of Real-Time Hydrothermal System Operation ", Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 636-653.