

بهینه‌سازی منحنی فرمان بهره‌برداری از سدهای کرج، لار و لتیان بمنظور تامین آب شرب تهران

مسعود نجفی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه مازندران

بهیه جعفری بی‌بالان

کارشناس منابع آب موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

دکتر هادی نظریور

استادیار دانشگاه مازندران

چکیده

در حال حاضر با افزایش روزافزون جمعیت و رشد صنعت در تهران، تقاضای آب بیش از عرضه آن بوده و بنابراین می‌توان انتظار داشت که در آینده‌ای نزدیک، نیاز آب شرب تهران با کمبود مواجه شود. منابع اصلی تامین کننده آب شرب تهران، سدهای کرج، لار و لتیان می‌باشند که تدوین دستورالعمل بهینه بهره‌برداری از آنها و بهینه‌سازی آن در شرایط مختلف، ضروری بنظر می‌رسد. سیاست بهره‌برداری استاندارد، فرمان ساده‌ای برای رهاسازی میزان نیاز پایین دست می‌باشند که اگر مقدار آب برای تامین نیاز پایین دست کافی نباشد، مخزن سد خالی می‌گردد. این امر سبب ایجاد شکست‌های بزرگ و متوالی در تامین نیاز پایین دست می‌گردد. برای رفع این نقیصه و نیز متعادل نمودن کمبودها، منحنی‌های فرمان تدوین می‌گردند. منحنی فرمان شرح می‌دهد که چه مقدار ذخیره در اوقات مختلف سال باید در مخزن وجود داشته باشد تا آب مورد نیاز را همواره یا با حداقل کمبود بتوانیم تامین نماییم. بهینه نمودن منحنی فرمان سبب می‌شود تا در هر شرایط، بهترین روش بهره‌برداری انجام پذیرد. در این تحقیق بهینه‌سازی منحنی فرمان بهره‌برداری از سدهای کرج، لار و لتیان به منظور تامین آب شرب تهران صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: عرضه و تقاضا، کمبود، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، منحنی فرمان

مقدمه

تا دو دهه‌ی گذشته بیشتر کارشناسان و متخصصان صنعت آب در دنیا سعی و کوشش خود را در جهت دستیابی به تکنیک‌های ساخت سازه‌های آبی بکار می‌بردند و اکثر پروژه‌ها منتهی به ساخت سد و شبکه انتقال و توزیع آب می‌شد. در این راستا تحقیقات گسترده‌ای انجام شد که منجر به تهیه‌ی استانداردهای جهانی گردید.

با اینکه تکنولوژی ساخت یک سازه‌ی آبی و ضائمی آن نقش مهمی در بالا بردن راندمان پروژه در یک سیستم منابع آب (Water Resources Management) دارد ولی به تنهایی قادر به مدیریت آن سیستم نمی‌باشد. مدیریت منابع آب بخصوص از دیدگاه ریاضی در سال‌های اخیر با توجه به تحقیقات گسترده‌ای که در این زمینه می‌شود، منجر به دستاوردهای ارزشمندی شده است. یکی از بحث‌های مدیریت منابع آب بخصوص در کشورهایی که تعداد زیادی سدهای مخزنی دارند، مربوط به مدیریت مخازن سدها می‌باشد. در ایران با بیش از ۸۰ سد در حال بهره‌برداری و ده‌ها سد در دست مطالعه، در اکثر موارد مشاهده می‌شود که حجم آب ذخیره شده‌ی پشت سد به مراتب کمتر از حجم طراحی می‌باشد. محدودیت‌های مربوط به رودخانه‌های پر آب و دائمی، عدم دارا بودن یک سیستم منسجم مدیریت حوضه آبریز، مدیریت منطقی، اصولی و واقع بینانه‌ای را در بهره‌برداری از سدها ایجاب می‌کند. [۱]

بهره‌برداری بهینه (Optimal Operation) از مخازن سدها نیازمند مدیریت در نواحی ذخیره است که برای جریان‌های ورودی آتی پیش‌بینی شده است. بهینه‌سازی (Optimization) یک مفهوم اساسی برای افزایش مدیریت و بهره‌وری تاثیرات متقابل پروژه‌های سدسازی می‌باشد. بهینه‌سازی بهره‌برداری به نرم‌افزارهای موثری برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخازن، از پیش‌بینی‌های قطعی در زمان واقعی تا پیش‌بینی‌های طولانی‌مدت مبتنی بر احتمال، نیاز دارد. این نرم‌افزارها همچنین باید دستورالعمل‌های راهنمایی (قواعد بهره‌برداری) را برای اتخاذ تصمیمات بهره‌برداری، تامین نمایند. [۲]

قواعد بهره‌برداری مخزن، راهنمایی‌هایی برای مسئولان بهره‌برداری مخزن می‌باشند. این قواعد برای مخازن در حال بهره‌برداری در شرایط ماندگار (و نه برای مخزنی که بلافاصله پس از ساخت پر شده و یا برای تامین مجموعه‌ای از اهداف جدید موقت بهره‌برداری می‌شوند) کاربرد دارند. قواعد بهره‌برداری از مخازن در واقع انتقال اطلاعات طراح به متصدیان بهره‌برداری می‌باشد که بطور مکرر باید بهنگام‌سازی (Updated) شوند. چند نوع از قواعد وجود دارند، اما هر یک به حجم‌های ذخیره یا خروجی مخزن مطلوب یا لازم، در هر زمان خاص از سال اشاره می‌کنند. برخی از این قواعد حجم‌های ذخیره مورد نظر را تعیین می‌کنند که از آنها با نام منحنی‌های فرمان (Rule Curves) یاد می‌کنند. یک منحنی فرمان شرح می‌دهد که چه مقدار ذخیره در اوقات مختلف سال باید در مخزن وجود داشته باشد تا آب مورد نیاز را همواره یا با حداقل کمبود (Shortage) بتوانیم تامین نماییم. مدل‌های شبیه‌سازی (Simulation Models) روش‌های موثری را برای ارزیابی کارآیی سیاست‌های بهره‌برداری (Operation Policies) در اختیار قرار داده و با جزئیات بیشتری نسبت به مدل‌های بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه را بررسی می‌کنند، اما ابزار موثری جهت انتخاب و یا تعریف بهترین سیاست بهره‌برداری نمی‌باشند. آنها در واقع برای پیش‌بینی عملکرد سیستم تحت یکسری شرایط خاص که شخص استفاده کننده از مدل آنها را اعمال می‌کند، بکار می‌روند و در نهایت شخص پس از چندین بار اجرای مدل، حالت بهینه را انتخاب می‌کند. [۳]

بواسطه‌ی افزایش نیاز آبی به خاطر رشد جمعیت، مهاجرت به تهران و افزایش مصرف آب به خاطر بهتر شدن

اجتماعی و بی‌ثباتی سیاسی خواهد شد. بنابراین برای هر اجتماعی حفاظت از این منابع آبی برای کاهش تلفات تا جایی که امکان داشته باشد، ضروری است. برای رسیدگی کردن به موضوع کمبود آب شرب در تهران، تدوین دستورالعمل‌های بهینه‌ی بهره‌برداری از سد‌های لار، لتیان و کرج و بهینه‌سازی آنها در شرایط مختلف، ضروری بنظر می‌رسد. همانگونه که گفته شد، بهره‌برداری در زمان واقعی از این مخازن، نیازمند دستورالعمل‌های مشخص بهره‌برداری است. یکی از ساده‌ترین این دستورالعمل‌ها، منحنی‌های فرمان می‌باشند که حجم ذخیره‌ی مخزن را در انتهای هر ماه از سال مشخص می‌کنند. [۴]

متن اصلی

تهران پایتخت ایران، در شمال مرکزی ایران با ۹,۰۱۸ میلیون نفر جمعیت (براساس سرشماری سال ۱۳۷۵) قرار دارد. با توجه به اینکه جمعیت تهران در سال ۱۳۵۵ برابر ۴,۹۸۳ میلیون نفر بوده است پس در این ۲۰ سال شاهد افزایش ۴,۰۳۵ نفری جمعیت، یعنی ضریب رشد ۸۱٪ بوده‌ایم که انتظار می‌رود تا سال ۱۴۰۰، جمعیت تهران بالغ بر ۱۵,۱ میلیون نفر شود. تهران بوسیله‌ی سلسله جبال البرز در شمال، رودخانه‌ی کن در غرب، رودخانه‌ی سرخه‌حصار در شرق و دشت ورامین در جنوب احاطه شده است. این محدوده تقریباً ۵۱۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. نیاز آب شرب فعلی تهران بوسیله‌ی سه سد مخزنی و استحصال آب از سفره‌ی آب زیرزمینی تهران، تامین می‌شود. [۵]

در جدول (۱) نام و سهم هر یک از منابع آبی که آب شرب تهران را تامین می‌کنند، آورده شده است. سد کرج در فاصله‌ی ۶۰ کیلومتری، لتیان در فاصله‌ی ۳۵ کیلومتری و سد لار در فاصله‌ی ۸۵ کیلومتری تهران قرار دارند. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی این سدها نشان داده شده است. نکته‌ی مهم این است که منابع آب سطحی (سد‌های کرج، لتیان و لار) به حوضه‌های دیگری تعلق دارند که بخشی از آب تنظیمی خویش را به نیازهای محلی اختصاص می‌دهند و باقیمانده (بخش اصلی) را به تهران انتقال می‌دهند. هر چند که انتقال بخش اصلی از آب تنظیمی این سدها، طرح اصلی نبوده است اما بواسطه‌ی افزایش جمعیت تهران، آب تخصیص یافته به تهران در مواقع مورد لزوم بتدریج با افزایش نیاز، افزایش یافته است. حقیقت دیگر این است که علیرغم انتقال آب از حوضه‌های مجاور، در حال حاضر تقاضای آب شرب در تهران بیش از عرضه‌ی آن بوده، بنابراین می‌توان انتظار داشت که در آینده‌ای نزدیک، نیاز آب شرب تهران با کمبود مواجه شود. [۴]

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی مخازن بصورت تک سدی به منظور تدقیق اطلاعات موجود و واسنجی مدل، شبیه‌سازی یکپارچه سیستم تامین آب تهران و همچنین محاسبه و بهینه‌سازی منحنی فرمان هر یک از مخازن بصورت تک سدی و یکپارچه می‌باشد. لذا مخازن مورد نظر را یکبار بصورت تک سدی و یکبار بصورت یکپارچه، شبیه‌سازی می‌کنیم. برای شبیه‌سازی تک سدی از نرم‌افزاری به نام RESOPER (Reservoir Operation) که یک مدل ریاضی شبیه‌سازی تک سدی بهره‌برداری از مخازن می‌باشد و برای شبیه‌سازی یکپارچه سیستم، از نرم‌افزار WEAP21 استفاده شده است. در این نرم‌افزارها، عملکرد مخازن بصورت ماهانه شبیه‌سازی می‌شود و در انتهای هر ماه پارامترهای مختلفی، ارزیابی می‌شود.

اطلاعات ورودی استفاده شده برای این شبیه‌سازی عبارتند از [۶]:

- ۱- سری زمانی دبی ورودی به هر یک از مخازن سدهای کرج، لار و لتیان از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴
- ۲- داده‌های مربوط به تبخیر از سطح آزاد هر یک از مخازن سدهای کرج، لار و لتیان از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴
- ۳- داده‌های مربوط به مصارف شرب و کشاورزی که توسط هر یک از مخازن سدهای کرج، لار و لتیان از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴ تامین شده‌اند.
- ۴- داده‌های مربوط به سطح و حجم با ارتفاع هر یک از مخازن سدهای کرج، لار و لتیان
- ۵- داده‌های مربوط به نشت از مخزن سد لار

برای استخراج منحنی فرمان هر یک از مخازن، ابتدا با استفاده از نتایج خروجی شبیه‌سازی مخازن فوق‌الذکر، آمار احجام ماهانه‌ی مخازن را استخراج می‌کنیم. با توجه به حجم حداقل (مرده) و حداکثر مخازن سدها، سال‌هایی را که حجم مخازن بدلیل خشکسالی و کمبود آب، به حجم مینیمم مخازن رسیده است را از آمار حجم‌های ماهانه‌ی مخازن حذف کرده و مینیمم حجم مخازن در هر ماه را بصورت جدول (۲) استخراج می‌کنیم. از این مینیمم‌ها بعنوان مقادیر حدی که در واقع کمتر از آنها مخازن دچار کمبود شدید می‌شود، برای واسنجی مخازن سدها، مورد استفاده قرار می‌دهیم. شبیه‌سازی بر اساس این مینیمم احجام و درصد‌های مختلف تامین نیاز (منحنی‌های فرمان) از ۴۰٪ تا ۸۰٪ کل نیاز آبی صورت می‌گیرد. منحنی‌های فرمان به این معنا هستند که در همه‌ی ماه‌ها فقط درصد تعیین شده، مثلاً ۸۰٪ از نیاز آبی تامین شود تا ۲۰٪ مابقی صرف ذخیره‌سازی شود. با وجود اینکه با این کار تعداد ماه‌هایی که با کمبود مواجه می‌شویم افزایش پیدا می‌کنند، ولی مقدار کمبود در ماه‌هایی که با کمبود بالایی مواجه هستند، کاهش می‌یابد. پس از شبیه‌سازی بر اساس احجام مینیمم و منحنی‌های فرمانی که در بالا ذکر شد، نتایج بصورت نسبت تامین به نیاز در هر ماه برای سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و منحنی‌های فرمان ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪، ۷۰٪، ۷۵٪ و ۸۰٪ استخراج شده و تعداد مواقعی که کمتر و مساوی ۹۵، ۹۰، ۸۰، ۷۵، ۷۰ و ۵۰ درصد نیازها برآورده شده است، برای مخازن هر یک از سدها در جداول (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است. نسبت‌های تامین به نیاز مساوی و یا بیشتر از ۷۰ درصد حالت نرمالی می‌باشد که مخزن با کمبودی قابل جبران مواجه بوده ولی کمتر و مساوی ۵۰ درصد نمایانگر حالت بحرانی مخزن در مورد وقوع کمبود می‌باشد. بنابراین برای رسیدن به بهترین منحنی فرمان بایستی نسبت‌های تامین به نیاز ۷۰ درصد و ۵۰ درصد را با هم مقایسه کنیم. بر اساس جداول فوق‌الذکر، منحنی فرمان ۷۰٪ دارای کمترین عدد وقوع نسبت تامین به نیاز کمتر و مساوی ۷۰ درصد می‌باشد. از طرفی تعداد مواقعی که کمبود شدید کمتر از ۵۰ درصد اتفاق افتاده نیز به صورت محسوسی کمتر از سایر منحنی‌های فرمان‌ها می‌باشد. به همین دلیل منحنی فرمان ۷۰٪ با توجه به حداقل حجم مخازن تعیین شده، منحنی فرمان اِپتیمم می‌باشد. علاوه بر این عملکرد مخزن در حالت SOP و منحنی‌های فرمان ذکر شده نیز بصورت جدول (۶) با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطوری که مشاهده می‌شود منحنی فرمان ۷۰٪ اختلاف جریان تنظیمی و سرریز ناچیزی نسبت به حالت SOP داشته و درصد کمبودی در حدود درصد کمبود حالت SOP دارد. بنابراین منحنی فرمان ۷۰٪ منحنی فرمان بهینه‌ی هر یک از مخازن سدهای کرج، لتیان و لار می‌باشد.

شبیه‌سازی بصورت یکپارچه با استفاده از WEAP21

با استفاده از همان اطلاعات ورودی که برای شبیه‌سازی تک سدی گفته شد، منابع و مصارف آب سیستم مورد نظر (سدهای لار، لتیان و کرج) را بصورت یکپارچه شبیه‌سازی می‌کنیم. پس از اجرای مدل با استفاده از اطلاعات فوق‌الذکر، WEAP سیستم را در حالت SOP شبیه‌سازی می‌کند و نتایج حاصل از نرم‌افزار RESOPER را تأیید می‌کند با این تفاوت که نحوه‌ی تخصیص نیاز شرب تهران از هر یک از مخازن در WEAP بصورت بهینه‌تری بوده و با میزان کمبود کمتری مواجه می‌شود. برای استخراج منحنی فرمان مخازن بصورت یکپارچه، ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی یکپارچه اولیه فوق‌الذکر، آمار حجم‌های ماهانه‌ی هر یک از مخازن را استخراج می‌کنیم. با توجه به حجم‌های استخراج شده از نرم‌افزار در هر یک از مخازن، سال‌هایی را که حجم هر یک از مخازن بدلیل خشکسالی و کمبود آب، به حجم مینیمم (حجم مرده) رسیده است را از سری درازمدت حجم هر یک از مخازن حذف کرده و مینیمم سالانه‌ی حجم هر یک از مخازن در هر ماه را بصورت جدول (۷) استخراج می‌کنیم. این مقادیر مینیمم در WEAP با نام حجم احتیاطی (Buffer Volume) نامیده می‌شوند که در گزینه مربوط به آن در نرم‌افزار وارد می‌گردد. شبیه‌سازی بر اساس این مینیمم احجام و درصدهای مختلف استفاده از حجم احتیاطی از ۱۰٪ تا ۷۰٪ صورت می‌گیرد. بعلاوه یک مورد منحنی فرمان نیز بصورت متغیر در هر ماه (شش ماه اول بدون استفاده از حجم احتیاطی و شش ماه بعدی ۳۰٪ از حجم احتیاطی) اعمال شده است. این منحنی فرمان‌ها بدینگونه عمل می‌کنند که در هنگام خشکسالی تنها مثلاً ۷۰٪ از حجم احتیاطی مورد استفاده قرار گرفته و بقیه همچنان در مخازن ذخیره گردد. پس از شبیه‌سازی بر اساس احجام مینیمم و منحنی‌های فرمانی که در بالا ذکر شد، نتایج بصورت نسبت تامین به نیاز در هر ماه برای SOP و منحنی‌های فرمان ۱۰٪، ۳۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪، ۷۰٪ و منحنی فرمان ماهانه‌ی متغیر ۰٪ و ۳۰٪ استخراج شده و تعداد مواقعی که مقدار تامین کمتر و مساوی ۱۰۰٪، ۹۵٪، ۹۰٪، ۸۰٪، ۷۰٪، ۶۰٪ و ۵۰٪ نیاز بوده است، در جدول (۸) آورده شده است. نسبت‌های تامین به نیاز مساوی و یا بیشتر از ۷۰٪ حالت نرمالی است که مخزن با کمبودی قابل جبران مواجه بوده ولی کمتر و مساوی ۶۰٪ نمایانگر حالت بحرانی مخزن در مورد وقوع کمبود می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود میزان تامین کمتر از ۵۰٪ بدلیل بهینه‌سازی WEAP وجود ندارد، به همین دلیل میزان تامین مساوی و کمتر از ۶۰٪ به عنوان حالت بحرانی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان تامین برابر ۱۰۰٪ نیز به عنوان شاخص دیگری در نظر گرفته شده است، چرا که هر چه تعداد مواقع تامین ۱۰۰٪ نیاز بیشتر باشد، از نظر بهره‌برداری حالت بهینه‌تری می‌باشد. همچنین علاوه بر این شاخص‌ها، میزان کمبود کل نیز به عنوان عامل محدود کننده‌ی دیگری در نظر گرفته می‌شود. جدول (۹) میزان کمبود کل را برای هر منحنی فرمان نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود حالت SOP دارای کمترین مقدار کل کمبود می‌باشد ولی تعداد مواقعی که مقدار تامین مساوی ۱۰۰٪ نیاز بوده، از منحنی‌های فرمان دیگر، کمتر است. همچنین بدلیل کمبودهای شدیدی که در حالت SOP رخ داده، تعداد مواقعی که مقدار تامین کمتر و مساوی ۶۰٪ نیاز بوده، از دیگر منحنی‌های فرمان بزرگتر است. با اعمال منحنی‌های فرمان، با وجود مشاهده‌ی افزایش مقدار کل کمبود که البته ناچیز می‌باشد، تعداد مواقع تامین‌های مختلف نیاز افزایش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود منحنی‌های فرمان ۳۰٪ و ۱۰٪ دارای کمترین تعداد مواقعی‌اند که مقدار تامین، کمتر و مساوی ۶۰٪ نیاز بوده و همچنین بین این دو منحنی فرمان، منحنی فرمان ۳۰٪ دارای بیشترین تعداد مواقعی است که ۱۰۰٪ نیاز را تامین کرده و مقدار کل کمبودی کمتر از منحنی فرمان ۱۰٪ می‌باشد. بنابراین منحنی فرمان ۳۰٪ به عنوان منحنی فرمان اپتیمم انتخاب

نتیجه گیری

سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)، فرمان ساده‌ای برای رهاسازی میزان نیاز پایین دست می‌باشند که اگر مقدار آب برای تامین نیاز پایین دست کافی نباشد، مخزن سد خالی می‌گردد. این امر سبب ایجاد شکست‌های بزرگ و متوالی در تامین نیاز پایین دست می‌گردد. برای رفع این نقیصه و نیز متعادل نمودن کمبودها، منحنی‌های فرمان تدوین می‌گردند. نتایج کلی استنتاج شده از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر جمع‌بندی نمود:

۱. با استفاده از RESOPER هر یک از مخازن بطور جداگانه شبیه‌سازی شدند و منحنی فرمان ۷۰٪ به عنوان منحنی فرمان بهینه‌ی هر کدام از آنها انتخاب شد. مشابه بودن منحنی فرمان هر سه سد به این علت می‌باشد که هر سه تقریباً در مناطقی یکسان از نظر هیدرولوژیکی و دوره‌های تر و خشک و همچنین الگوی کشت می‌باشند که این مسائل باعث شده میزان آبدهی و مصرف در آنها تقریباً بصورت مشابه تغییر کند.
۲. با شبیه‌سازی یکپارچه هر سه سد، منحنی فرمان ۳۰٪ به عنوان منحنی فرمان بهینه انتخاب شد. یعنی برای رسیدن به بهره‌برداری بهینه از این سدها جهت تامین آب شرب تهران، بهتر است که احجام ارائه شده در جدول (۷) بعنوان حجم احتیاطی جهت مواقع بحرانی در نظر گرفته شود و همواره ۷۰٪ از این حجم در مخزن ذخیره گردد تا با کمبود شدیدی (مثلاً کمتر از ۵۰٪ نیاز) مواجه نشویم.
۳. با استفاده از نتایج WEAP مشاهده گردید که مخازن در حالت SOP در ۱۰۰٪ مواقع فقط ۹۰٫۷٪ نیاز آب شرب تهران تامین می‌شود در حالی که با اعمال منحنی فرمان ۳۰٪ در ۱۰۰٪ مواقع، ۹۳٫۳٪ نیاز آب شرب تهران تامین می‌شود.
۴. در شبیه‌سازی تک سدی، هر مخزن فقط با توجه به شرایط خود، نیاز آبی پایین دست را تامین می‌کند ولی با استفاده از شبیه‌سازی یکپارچه، مخازن با توجه به جمیع شرایط مخازن دیگر، نیاز آبی پایین دست خود را تامین می‌کنند که اینکار باعث می‌شود هر یک از مخازن بهترین تخصیص را برای تامین نیازها داشته باشد.
۵. همانگونه که مشاهده می‌شود، منحنی فرمان باعث افزایش مقدار کل کمبود در تامین نیاز شده است ولی عملاً از شدت کمبودهایی که در تامین نیازها ایجاد می‌شود، جلوگیری می‌کند.

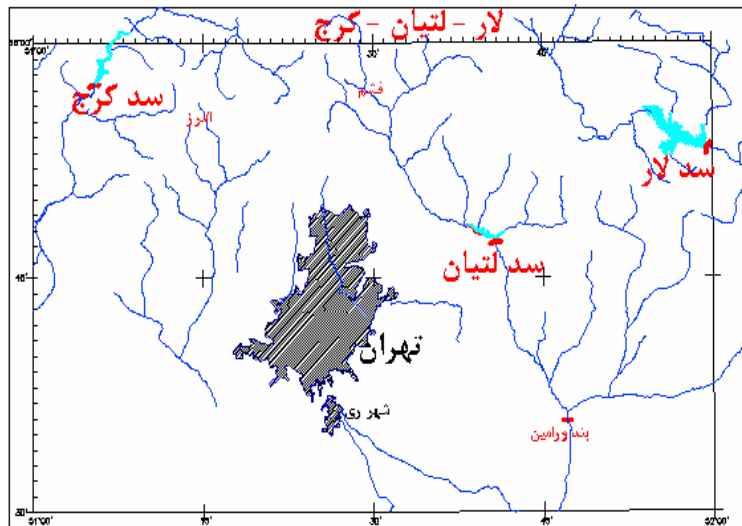
مراجع

۱. خلقی، مجید، خرداد ۱۳۸۳، "سیستم پشتیبانی تصمیم در مدیریت مخازن سدها"، کارگاه آموزشی - تخصصی مدل‌های ریاضی در بهره‌برداری از مخازن سدها، کرج، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران.

2. WCD Thematic Review Options Assessment IV.5, (2000), A synthesis by CDD Howard of documents prepared for the World Commission on Dams (WCD), Operations, Monitoring and Decommissioning of Dams, South Africa.

3. Daniel P.Loucks and Jerry R. Stedinger and Douglas A. Haith, (1981), Water

4. A. Salavitar, (2004), Green productivity (GP) Practices for Water Resources Management, Tehran Water resources, Water Supply and Distribution Network, I.R.IRAN.
۵. گزارش نهایی بهنگام کردن مطالعات طرح جامع آب تهران، شرکت مهندسیین جاماب، (۱۳۸۱)
۶. گزارشات سازمان آب منطقه‌ای تهران موجود در سایت اینترنتی این سازمان
۷. جعفری بی‌بالان، بهیه، "تدوین منحنی فرمان احتمالاتی برای مخزن"، فصل‌نامه مه‌اب‌قدس، زمستان ۱۳۸۳
۸. کارآموز، محمد، "پروژه‌ی مدل ریاضی آبهای سطحی تهران"، شرکت مهندسیین مشاور جاماب، مهر ۱۳۷۴
9. D.P. Loucks and Oliveira, R., 1997. "Operating rules for multi reservoir systems", Water Resour., Res., 33(4), 839-852



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سد‌های تامین کننده‌ی آب شرب تهران

جدول ۱: منابع تامین آب شرب تهران

منابع آب شرب	نام منبع	تنظیم سالانه
آب سطحی	سد کرج	۳۳۰ MCM/y
	سد لتیان	۱۶۰ MCM/y
	سد لار	۱۶۰ MCM/y = سهمیه‌ی تهران ۳۹۰ MCM/y = کل تنظیمی
آب زیرزمینی مجموع	سفره‌ی آب زیرزمینی تهران	۲۵۰ MCM/y ۸۷ MCM/y

جدول ۲: مقادیر مینیمم حجم هر یک از مخازن سدهای کرج، لار و لتیان

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
حجم مخزن سد کرج (MCM)	۶۴.۳	۱۱۰.۱	۱۳۲.۴	۱۲۱.۵	۱۰۵.۱	۸۸	۷۰.۲	۷۰	۶۳.۹	۴۹.۴	۳۸.۳	۴۶.۷
حجم مخزن سد لار (MCM)	۶.۰	۷۴.۲	۱۴۵.۲	۱۳۵.۷	۱۰۹.۱	۸۱.۰	۶۴.۵	۵۲.۰	۴۰.۲	۲۶.۵	۱۳.۶	۲.۷
حجم مخزن سد لتیان (MCM)	۸۰.۰	۹۶.۰	۹۶.۰	۸۱.۷	۶۴.۳	۴۷.۴	۴۰.۲	۳۸.۱	۳۷.۷	۲۴.۴	۳۹.۴	۴۶.۶

جدول ۳: تعداد مواقع نسبت‌های تامین به نیاز در منحنی‌های فرمان مختلف مخزن سد کرج

منحنی فرمان	SOP	۰.۸	۰.۷۵	۰.۷	۰.۶	۰.۵	۰.۴
"<۰.۹۵"	۴۱	۷۳	۷۰	۶۹	۶۸	۶۵	۶۳
"<۰.۹۰"	۴۰	۶۶	۶۶	۶۵	۶۲	۶۱	۵۸
"<۰.۸۰"	۳۹	۲۶	۶۰	۵۸	۵۱	۴۷	۴۴
"<۰.۷۰"	۳۶	۲۱	۱۹	۱۶	۴۵	۴۰	۳۶
"<۰.۶۰"	۳۲	۱۵	۱۲	۱۱	۷	۳۴	۲۹
"<۰.۵۰"	۲۴	۱۲	۱۰	۶	۳	۲	۲۲

جدول ۴: تعداد مواقع نسبت‌های تامین به نیاز در منحنی‌های فرمان مختلف مخزن سد لتیان

منحنی فرمان	SOP	۰.۸	۰.۷۵	۰.۷	۰.۶	۰.۵	۰.۴
"<۰.۹۵"	۴۱	۷۵	۷۲	۷۱	۶۸	۶۷	۶۶
"<۰.۹۰"	۳۸	۷۵	۷۰	۶۹	۶۷	۶۴	۶۲
"<۰.۸۰"	۲۹	۲۰	۶۵	۶۲	۵۹	۵۵	۵۲
"<۰.۷۰"	۲۵	۱۷	۱۶	۱۴	۵۱	۴۷	۴۴
"<۰.۶۰"	۲۳	۱۶	۱۴	۱۳	۷	۳۴	۳۰
"<۰.۵۰"	۱۹	۱۳	۱۲	۱۰	۶	۳	۲۳

جدول ۵: تعداد مواقع نسبت‌های تامین به نیاز در منحنی‌های فرمان مختلف مخزن سد لار

منحنی فرمان	SOP	۰.۸	۰.۷۵	۰.۷	۰.۶	۰.۵	۰.۴
"<۰.۹۵"	۳۴	۴۷	۴۷	۴۷	۴۶	۴۴	۴۲
"<۰.۹۰"	۳۴	۴۷	۴۷	۴۷	۴۶	۴۴	۴۱
"<۰.۸۰"	۳۳	۳۱	۴۶	۴۶	۴۵	۴۳	۳۹
"<۰.۷۰"	۳۲	۳۰	۲۷	۲۵	۴۳	۴۱	۳۸
"<۰.۶۰"	۳۰	۲۶	۲۵	۲۳	۱۹	۴۱	۳۸
"<۰.۵۰"	۲۹	۲۵	۲۴	۲۳	۱۹	۱۴	۳۷

جدول ۶: مقایسه‌ی عملکرد هر یک از مخازن سدها در حالت SOP و منحنی فرمان ۷۰٪

	منحنی فرمان	مجموع نیازها (MCM)	تلفات سالیانه (MCM)	جریان تنظیمی سالیانه (MCM)	مجموع سرریز (MCM)	مجموع کمبود (MCM)	درصد کمبود	مجموع رهاسازی (MCM)
مخزن سد کرج	SOP	۳۷۴.۴	۴.۷	۳۵۵.۷	۶۳.۴	-۱۸.۷	-۵	۴۱۹.۱
	۷۰	۳۷۴.۴	۴.۸	۳۵۵.۱	۶۳.۹	-۱۹.۳	-۵.۲	۴۱۹
مخزن سد لتیان	SOP	۱۹۹.۹	۳.۷	۱۹۰.۹	۱۱۸.۴	-۹	-۴.۵	۳۰۹.۳
	۷۰	۱۹۹.۹	۳.۸	۱۸۹	۱۲۰.۲	-۱۰.۸	-۵.۴	۳۰۹.۲
مخزن سد لار	SOP	۴۲۵.۳	۹	۴۱۱.۹	۵.۹	-۱۳.۴	-۳.۶	۴۱۷.۸
	۷۰	۴۲۵.۳	۹.۱	۴۱۱.۸	۵.۹	-۱۳.۵	-۳.۶	۴۱۷.۷

جدول ۷- مقادیر مینیمم ماهیانه‌ی درازمدت هر یک از مخازن (MCM)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
مخزن سد کرج	۶۴.۳	۱۱۰.۲	۱۳۲.۵	۱۲۱.۶	۱۰۵.۲	۸۸.۲	۷۰.۴	۷۰.۲	۶۴.۰	۴۹.۵	۳۸.۴	۴۶.۸
مخزن سد لتیان	۷۹.۵	۹۶.۰	۹۶.۰	۸۱.۸	۶۴.۲	۴۷.۱	۳۹.۹	۳۷.۸	۳۷.۳	۳۴.۰	۳۸.۹	۴۶.۱
مخزن سد لار	۱۸.۱	۱۷۵.۴	۲۳۷.۹	۲۳۹.۵	۲۲۱.۰	۱۹۲.۱	۱۶۳.۱	۱۳۵.۴	۱۰۶.۹	۷۸.۴	۵۵.۴	۲۸.۷

جدول ۸- تعداد مواقع نسبت‌های تامین به نیاز در منحنی‌های فرمان مختلف

منحنی فرمان	SOP	۷۰	۶۰	۵۰	۳۰	۱۰	صفر و ۳۰
"=۱۰۰"	۲۲۸	۲۳۲	۲۳۴	۲۳۵	۲۳۶	۲۳۴	۲۲۱
"<=۹۵"	۶۸	۶۲	۶۳	۶۲	۶۰	۶۰	۶۱
"<=۹۰"	۵۳	۵۱	۵۲	۵۲	۵۱	۴۶	۵۲
"<=۸۰"	۳۲	۲۹	۲۹	۲۷	۲۲	۲۰	۲۰
"<=۷۰"	۱۹	۱۷	۱۶	۱۶	۱۲	۷	۱۰
"<=۶۰"	۹	۷	۶	۶	۲	۲	۴
"<=۵۰"	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۹- مقدار کل کمبود برای هر یک از منحنی‌های فرمان (MCM)

منحنی فرمان	SOP	۷۰	۶۰	۵۰	۳۰	۱۰	صفر و ۳۰
مقدار کل کمبود	۸۵.۰۳	۸۵.۱۴	۸۵.۲۵	۸۵.۴۶	۸۶.۶۵	۸۸.۵	۸۷.۵۶