تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۹
Volume 6, No. 1, Spring 2010 (IR-WRR)
۱۵-۲۷

مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخازن با استفاده از برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط (MILP)

کورش قادری[۱*]، جمال محمدولی سامانی[۲]،
سید جمشید موسوی[۳]، حمیدرضا اسلامی[۴] و داودرضا عرب[۵]

چکیده

یکی از راه کارهای مقابله با مسائل و مشکلات مدیریت منابع آب و عدم توزیع زمانی و مکانی متناسب آن، استفاده بهینه از مخازن است. تکنیک‌های بهینه‌سازی در خلال چند دهه اخیر اهمیت زیادی در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم پیچیده مخازن داشته‌اند. متخصصان منابع آب در سراسر دنیا برای حل مسائل منابع آب و بویژه مسئله بهره‌برداری مخازن با کمک فن‌آوری اطلاعات، کامپیوترهای جدید و افزایش سرعت محاسبات، روش‌ها و ابزار گوناگونی را برای بهینه‌سازی ابداع و مورد استفاده قرار داده‌اند. در این تحقیق نیز برای بهره‌برداری از مخازن چندگانه چندهدفه دشت تهران-کرج شامل سدهای لار، لتیان و کرج، نرم افزاری بر اساس روش برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط(MILP) توسعه داده شده است. انتخاب و توسعه روش MILP براساس مشخصات و خصوصیات مخازن موجود در محدوده مطالعاتی، دردسترس بودن داده‌ها و نوع و خصوصیات تابع اهداف و قیود مسئله مورد نظر بوده است. پیکربندی سیستم مورد نظر با استفاده از رویکرد مدل‌های شبکه جریان (گره و کمان) استفاده شده است. پیکربندی سیستم مورد نظر شامل منابع آبهای سطحی (سدهای لار، لتیان و کرج)، مصارف آب (مصارف شهری، کشاورزی، صنعتی و غیره) و ارتباط هیدرولیکی و فیزیکی بین منابع و مصارف می‌باشد. برای حل این مسئله می‌بایست فرمول بندی تابع اهداف، قیود، تبدیل روابط غیرخطی به رابطه‌های خطی و اولویت‌ها و جرائم در هر گره و کمان مشخص شود. در این تحقیق یک نرم‌افزار جامع که شامل رابط گرافیکی کاربر(GUI)، بانک اطلاعاتی، قسمت حل مسائل و قسمت نمایش دهنده تجزیه و تحلیل نتایج بصورت جداول و نمودار برای بهینه‌سازی مخازن چندگانه چندهدفه توسعه داده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که نرم‌افزار توسعه یافته مدل مناسبی برای استخراج قوانین بهره‌برداری در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد. نتایج حاکی از آن هستند که تخصیص منابع به مصارف با استفاده از این روش در محدوده مورد مطالعه دارای عملکرد بسیار بهتری نسبت به مدل برنامه‌ریزی خطی(LP) و دوره تاریخی مدنظر می‌باشند.

کلمات کلیدی: بهره برداری از مخازن، MILP، دشت تهران، مدل‌سازی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴ مرداد ۱۳۸۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۳۰ آبان ۱۳۸۸

۱- استادیار بخش مهندس آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- استاد گروه سازه‌های آبی- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار دانشکده عمران- دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب- دانشگاه گرگان
۵- دکتری منابع آب
*- نویسنده مسئول

Optimal Operation Modeling of Reservoirs using Mixed Integer Linear Programming (MILP)

K. Qaderi [1] , J. M. V. Samani [2] , S. J. Mousavi[3], H. R. Eslami[4] and D. R. Arab[5]*

Abstract

One of the best ways to deal with water resources management problems and the unwanted temporal and spatial distribution of water is the optimal operation of reservoirs. Optimization techniques have become increasingly important over the last three decades in the management and operation of complex reservoir systems. In recent years the water resource experts have benefited from many hardware and software advances and used different kinds of tools and methods for optimization. In this research a software is developed based on the Mixed Integer Linear Programming (NIILP) for optimal use of the multiobjective multireservoir system of the Tehran-Karaj plane. The MILP method is selected due to the characteristics of the reservoir system, the availability of data, and the objectives and constraints. The topology of the system is designed based on the network flow optimization approach. The topology includes the water resources (Lar, Latian, and Karaj reservoirs), the water consumers (i.e. domestic, agriculture, industrial), and the hydraulic connections. The objective function, constraints, and piecewise linear of nonlinear relationships were formulated and the penalties and the priorities in each branch and bound were introduced. The software includes GUI, a database, a solver, spreadsheets and graphical output analysis. The results of this research indicated that the developed software is a suitable model for deriving operational rules in the system under study. Results also show that using this model for management and operation of the water resources system in the Tehran-Karaj plain result in a better allocation of water to the consumer compared to the LP model and historical operations.

Keywords: Reservoir Operation, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Tehran Plain, Modeling

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agriculture Faculty, University of Shahid Bahonar, Kerman. Email: kouroshqaderi @ mail.uk.ac.ir
2-Professor, Hydrostructure Department, Agriculture Department, University of Tarbiat Modares, Tehran.
3- Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Amir Kabir University, Tehran.
4- M. S. in Water Resource Management, University of Gorgan, Gorgan.
5- Ph. D. Water Resources,
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

سیلاب، خشکسالی، کمبود آب، بهره‌برداری بهینه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و آلودگی منابع آب از جمله مسائل مهم و تأثیرگذار مهندسی منابع آب می‌باشند. به نظر می‌رسد که در آینده هم با توجه به افزایش روزافزون جمعیت، افزایش تقاضا برای آب، تغییرات اساسی در کیفیت زندگی مردم و وابستگی مستقیم کشاورزی، صنعت، مصارف شهری و تولید انرژی برقابی به آب، مهندسی منابع آب و استفاده بهینه از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی از اهمیت بیشتری برخوردار شود.

چندین دهه از انجام تحقیقات روی مدل‌های بهینه‌سازی در سیستم مخازن می‌گذرد و روش‌های مختلفی برای این امر توسعه داده شده است، اما باز هم یک سری موانع و مشکلات در بهره‌برداری بهینه آنها وجود دارد و بنا به نظر محققان، فاصله عمیق بین تئوری این روش‌ها و کاربرد آنها وجود دارد (Wurbs,1993). نوع روش بهینه‌سازی به خصوصیات سیستم، در دسترس بودن داده‌ها، نوع تابع هدف و قیود، تعداد قیود و متغیرها بستگی دارد. از انواع روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی می‌توان به بهینه‌سازی احتمالاتی ضمنی[۱](ISO)، مدل برنامه‌ریزی خطی[۲](LP)، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی[۳](NLP)، برنامه‌ریزی پویا[۴](DP) و الگوریتم‌های تکامل‌گرا[۵](EA) اشاره کرد که هرکدام از روش‌های فوق دارای مزایا و معایبی هستند. برنامه‌ریزی خطی رسیدن به پاسخ‌های بهینه را تضمین می‌کند اما می‌بایست تمام معادلات (شامل تابع هدف و محدودیت‌ها) خطی باشند. اما در اکثر موارد کاربردی مدیریت منابع آب ممکن است هیچ کدام از تابع هدف و قیود خطی نباشند. از طرف دیگر یک مشکل عمومی در فرمولاسیون برنامه‌ریزی خطی در بهره‌برداری از مخازن این است که رابطه پیوستگی حجم مخزن نمی‌تواند بطور صریح روی جریان خروجی از سرریز مخزن کنترل داشته باشد. بنابراین ممکن است مخزن در حالت نیمه پر باشد، اما سرریز دارای مقدار باشد. حتی اگر سرریز را به عنوان یک مؤلفه در رابطه پیوستگی مخزن نیز در نظر بگیریم، باز هم قیدی وجود ندارد که سرریز را متناسب با حجم و ظرفیت مخزن کنترل کند. این مشکل در تحقیقات دیگر محققان نیز مانند Moy *et al.,* (1986) و Revelle (1994) ذکر شده است. در این تحقیق نیز چنین مشکلی وجود داشت. از آنجایی که سیستم مخازن سدهای لار، لتیان و کرج یک سیستم بزرگ مقیاس بوده و با تعداد متغیرها و قیود بسیار زیاد در طول یک دوره تاریخی طولانی همراه می‌باشد و از طرف دیگر برای غلبه بر مشکلات موجود در برنامه‌ریزی خطی و خصوصیات مخازن در محدوده مورد نظر، می‌بایست از یک تکنیک مناسب مانند روش MILP[۶] برای بهینه‌سازی سیستم مخازن در محدوده مورد نظر استفاده شود.

۲- مروری بر سوابق تحقیق

ارزیابی جامعی از روش‌های مختلف بهینه‌سازی و کاربردهای آنها در مسائل مهندسی منابع آب و بویژه بهره‌برداری از مخازن توسط محققانی مانند (Yeh,1985)، (Simonovic,1992)، (Wurbs,1993) و (Labadie, 2004) انجام شده است. این محققان مدیریت مخازن و مدل‌های بهره‌برداری مشتمل بر مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شامل روش‌های LP، DP و NLP، شبکه جریان، برنامه‌ریزی آرمانی، و مدل‌های فراذهنی شامل GA[۷]، NN[۸] و FS[۹] را مورد بحث و بررسی قرار داده و کاربردها، مزایا و معایب هرکدام را ذکر کرده‌اند. یکی از تکنیک‌های مطلوب بهینه‌سازی در مدل‌های سیستم مخازن روش سیمپلکس[۱۰] برنامه‌ریزی خطی و روش‌های جایگزین آن می‌باشد. کاربردهای برنامه‌ریزی خطی در مدیریت منابع آب از مسائل ساده تخصیص تا مسائل پیچیده بهره‌برداری و مدیریت منابع آب گزارش شده است. از مهمترین مزایای برنامه‌ریزی خطی می‌توان به قابلیت حل مطلوب مسائل بزرگ مقیاس، همگرائی به سمت پاسخ بهینه سراسری، عدم احتیاج به راه حل اولیه، انجام آسان تحلیل حساسیت با توجه به نظریه دوگان[۱۱] و راحتی حل مسائل اشاره کرد.

هیودر سال ۱۹۸۵ از ترکیب ISO همراه با برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی ۸ سد در کلرادوی شمالی استفاده کرد (Barros *et al.,* 2003). از روش‌های دیگر مانند مقیاس‌دهی الحاقی[۱۲] و برآورد نقطه داخلی[۱۳] نیز به جای روش سیمپلکس برای حل مسائل بزرگ مقیاس استفاده شده است (Labadie, 2004). از پیشرفت‌های انجام شده در برنامه‌ریزی خطی می‌توان به انواع مدل‌های توسعه یافته‌تر برنامه‌ریزی خطی مانند برنامه‌ریزی خطی باینری[۱۴]، صحیح و مختلط اشاره کرد که برای بیان عبارات غیرخطی و غیرمحدب در تابع هدف و قیود بسیار مفید هستند، اما ممکن است از لحاظ محاسباتی کارائی کمتری داشته باشند (Trezos, 1991). هوک و کوزرا فرم‌های مختلف برنامه‌ریزی خطی را برای بهره‌برداری مخزن مورد استفاده قرار دادند (Labadie, 2004). دیگر محققین مانند Needham *et al.* (2000) از روش برنامه‌ریزی خطی صحیح در بهره‌برداری کنترل سیلاب در رودخانه آیوا استفاده کردند. Srinvasan *et al.* (1999) از مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط برای بهینه‌سازی مخزن استفاده کردند. Barros *et al.* (2003) نیز از برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی

سیستم نیروگاهی کشور برزیل استفاده کرده و نتایج بهینه‌سازی را با دیگر روش‌های غیرخطی مقایسه کردند. برنامه‌ریزی خطی پاسخ‌های قابل قبولی را ارائه کرده است (Barros *et al.*, 2003).

تقریب قطعه‌ای خطی[15] از توابع غیرخطی، از دیگر مواردی است که اغلب در برنامه‌ریزی‌های تفکیک‌پذیر[16] مورد استفاده قرار گرفته است. (Crawly and Dandy, 1993) از برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر برای بهینه‌سازی سیستم مخزن شهر آدلاید استرالیا استفاده کردند. Mousavi et al. (2004) از برنامه‌ریزی خطی با الگوریتم حل نقطه داخلی برای بهره‌برداری بهینه از مخازن چندمنظوره استفاده کردند. اسلامی و همکاران (۱۳۸۴) از برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط برای بهره‌برداری بهینه از سیستم نیروگاهی تولید انرژی برقآبی در سیستم مخازن رودخانه‌های دز و کارون استفاده کردند. دیگر محققان نیز از ترکیب برنامه‌ریزی خطی با دیگر روش‌های بهینه‌سازی برای حل مسائل مدیریتی منابع آب استفاده کرده‌اند (Cai *et al.*, 2001).

سیستم مرتبط مخازن را می‌توان بصورت شبکه‌ای از گره و کمان‌ها نشان داد. گره‌ها بیانگر نقاط ذخیره آب و یا مکان‌های انحراف و تلاقی بوده و کمان‌ها بیانگر خروجی‌های مخازن، کانال‌ها، خطوط انتقال و یا تبخیر و دیگر افت‌ها می‌باشند. این نوع از بهینه‌سازی مبتنی بر مدل‌های شبکه جریان می‌باشد. مدل‌های بهینه‌سازی بر اساس شبکه جریان توسط محققان مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Labadie, 2004). چندین نرم‌افزار مهندسی منابع آب نیز بر اساس مدل‌های بهینه‌سازی شبکه جریان مانند MODSIM (Labadie and Baldo, 2000)، CALSIM (گروه مهندسی منابع آب دانشگاه کالیفرنیا) و HEC-PRM (گروه مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا) توسعه یافته است.

هدف از اجرای این تحقیق، مطالعه توانائی‌های تکنیک MILP برای استخراج سیاست‌های عمومی بهره‌برداری از مخازن چندگانه چندهدفه می‌باشد. با توجه به خصوصیات مخازن موجود در محدوده مطالعاتی، وجود تعدادی رابطه غیرخطی بین حجم مخزن- جریان خروجی، در دسترس بودن یک ابزار حل[17] مفید که قادر به حل مسائل بزرگ مقیاس برنامه‌ریزی خطی و انواع توسعه یافته‌تر آن با تعداد بسیار زیادی متغیر و قید می‌باشد، یک مدل کلاسیک برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط برای بهره‌برداری از مخازن موجود در محدوده مطالعاتی توسعه داده شده است. پس از تعریف پیکربندی سیستم از طریق رویکرد مدل‌های شبکه جریان، پیاده‌سازی اجزای سیستم با استفاده از گره و کمان و فرمول‌بندی مسئله مورد نظر(تعریف تابع هدف و قیود) که حداکثر تطابق را با واقیت دارد، مسئله با استفاده ازMILP حل می‌شود. لذا در این تحقیق ابتدا یک مدل برنامه ریزی خطی(LP) و سپس مدل MILP برای محدوده مورد نظر توسعه داده شده است.

۳- مفهوم MILP

در این قسمت بطور خلاصه مفهوم اولیه تکنیک MILP، چگونگی تبدیل رابطه غیرخطی به روابط خطی، فرمول‌بندی، ساختار و الگوریتم آن تشریح می‌گردد.

۳-۱- فرمول‌بندی ریاضی مسئله

فرمول‌بندی ریاضی مورد استفاده در این تحقیق، مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی (تابع هدف و قیود خطی) و برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط می‌باشد. تابع هدف بیانگر میزان جرائم و اولویت‌های اختصاص یافته به مصارف و منابع می‌باشد و قیود مجموعه محدودیت‌های فیزیکی و بهره‌برداری در مسئله را بیان می‌کند. در این مدل می‌توان با توجه به نوع مسئله و تابع هدف از حداقل‌سازی یا حداکثرسازی تابع هدف برای بدست آوردن پاسخ‌های بهینه که تمام محدودیت‌ها را ارضا می‌کنند، استفاده کرد. میزان وزن‌هایی که برای اولویت‌ها یا جرائم متغیرها (جریان یا حجم) در تابع هدف وارد می‌شوند بیانگر اهمیت نسبی یک متغیر ویژه در بهره‌برداری سیستم می‌باشد.

در این تحقیق، پیکربندی سیستم مورد مطالعه بر اساس مدل‌سازی شبکه جریان انجام شده است. دلایل استفاده از مدل شبکه جریان برای مدل‌سازی سیستم‌های منابع عبارت از راحتی بیان سیستم حوضه رودخانه بصورت تصاویر فیزیکی، قابلیت استفاده از برنامه‌ریزی خطی و روش‌های توسعه یافته‌تر آن در شبکه جریان، قابلیت کاربرد در مسایل بزرگ مقیاس و آسانی انجام تغییرات در سیستم ایجاد شده می‌باشد. اجزای سیستم با استفاده از گره و کمان پیاده می‌شوند. هر گره و کمان دارای کرانه حداقل و حداکثر و یک ارزش می‌باشد. در مدل شبکه جریان با حداقل هزینه، تمام گره‌ها و کانال‌ها با یک ضریب که اولویت یا جریمه است، وارد تابع هدف می‌شوند. تابع هدف و قیود در این روش بصورت زیر می‌باشند.

$$Minimize \sum_{\ell \in A} C_\ell q_\ell \qquad for \ \ all \ \ arcs \qquad (۱)$$

$$\sum_{j\in O_i} q_i - \sum_{k\in I_i} q_x = 0 \qquad for\ all\ nodes \qquad (۲)$$

و

$$L_\ell \le q_\ell \le U_\ell \qquad for\ all\ arcs$$

که A مجموعه تمام کمان‌ها در شبکه، N مجموعه تمام گره‌ها، Oi مجموعه تمام کمان‌هایی که از گره i خارج می‌شوند، Iiمجموعه تمام کمان‌هایی که به گره i ختم می‌شوند، q_ℓ مقدار نرخ جریان در کمان ℓ، C_ℓ مقدار هزینه یا اولویت جریان در کمان ℓ، L_ℓ کرانه پایین جریان در کمان ℓ و U_ℓ کران بالای جریان در کمان ℓ می‌باشد. روابط (۲) بالانس حجمی در هر گره و کرانه‌های بالا و پایین را در کمان‌ها بیان می‌کنند.

همانطوریکه گفته شد، یکی از معایب یا مشکلات فرمول‌بندی LP در بهره‌برداری و مدیریت مخازن این است که محدودیت‌های پیوستگی حجم مخزن نمی‌توانند صریحاً روی سرریز کنترل داشته باشند بطوریکه ممکن است در پاسخ‌های بهینه‌سازی شده، سرریز دارای مقدار باشد، در حالیکه مخزن پر نباشد. همچنین ممکن است در بعضی از مخازن چندین رابطه غیرخطی وجود داشته باشد. بنابراین سعی شده است با معرفی مجموعه‌ای از محدودیت‌ها که شامل متغیرهای صحیح هستند، بتوان جریان سرریز را کنترل نمود و روابط غیرخطی را بصورت مجموعه‌ای از روابط خطی ارائه کرد. برای انجام این عمل از MILP استفاده شده است.

۳-۲- برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح

در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی، تعدادی از متغیرهای مستقل تنها می‌توانند مقادیر صحیح را اختیار کنند. این مسائل برنامه‌ریزی صحیح نامیده می‌شوند. تنها تفاوت یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح با مسئله برنامه‌ریزی خطی این است که تعداد جواب‌های آن بمراتب کمتر است. مهمترین الگوریتم‌های حل مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح در صورت امکان از روش سیمپلکس استفاده می‌کنند. پیچیدگی محاسبات یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح به تعداد متغیرهای عدد صحیح و ساختار مسئله بستگی دارد. در حال حاضر متداول‌ترین الگوریتم برای حل مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح، تکنیک انشعاب و تحدید[۱۸] است که نکته اصلی آن شمارش ضمنی جواب‌های موجود است. همانطوریکه در بخش‌های قبل گفته شد یک سری روابط غیرخطی در محدودیت‌ها وجود دارد که به روابط خطی تبدیل شده و از طریق برنامه‌ریزی خطی عددی صحیح حل می‌شوند. فرض کنید رابطه خروجی- حجم از مخزن یک سد بصورت شکل (۱) باشد. رابطه خروجی- حجم از مخزن بصورت یک منحنی بوده است که بعد از تقریب قطعه‌ای بصورت زیر تبدیل شده است. در شکل(۱)، S_a مقدار حجم اولیه مخزن، S_b نقطه شروع ناحیه دوم و S_c نقطه شروع ناحیه سوم و S_d نقطه انتهایی ناحیه سوم است. m_a و m_b، m_c به ترتیب شیب خطوط در نواحی ۱، ۲و ۳ و R_1، R_2، R_3 و R_4 به ترتیب مقادیر خروجی در نقاط شروع و پایان هر ناحیه می‌باشد. S^a_{t+1} مقادیر حجم در ناحیه ۱، S^b_{t+1} حجم در ناحیه ۲، S^C_{t+1} حجم در ناحیه ۳ و R^a_t، R^b_t و R^c_t به ترتیب جریان‌های خروجی در ناحیه ۱، ۲ و۳ می‌باشند و هر خط دارای یک معادله جداگانه است.

معادله هر خط در هر ناحیه بصورت زیر است:

$$Q = mS_t - mS_1 + Q_1 = mS_t + h_1 \qquad (۳)$$

که Q خروجی از مخزن در حجم S_t می‌باشد، m شیب خط، Q_1 دبی خروجی اولیه، S_1 حجم اولیه و h_1 عرض از مبداء می‌باشد. رابطه خروجی- حجم از چند خط تشکیل شده است. می‌بایست از معادله ترکیبی خطوط در هر لحظه، بتوان خروجی متناسب با هر حجم مخزن را محاسبه کرد. بنابراین:

$$Q_t = m_1 S^a_{t+1} + h_1 + m_2 S^b_{t+1} + h_2 + m_3 S^c_{t+1} + h_3 \qquad (۴)$$

و در صورت استفاده از متغیرهای صحیح، رابطه فوق بصورت زیر تبدیل می‌شود:

$$Q_t - h_1 X_1 - m_1 S^a_{t1} - h_2 X_2 - m_2 S^b_{t+1} - h_3 X_3 - m_3 S^c_{t+1} = 0 \qquad (۵)$$

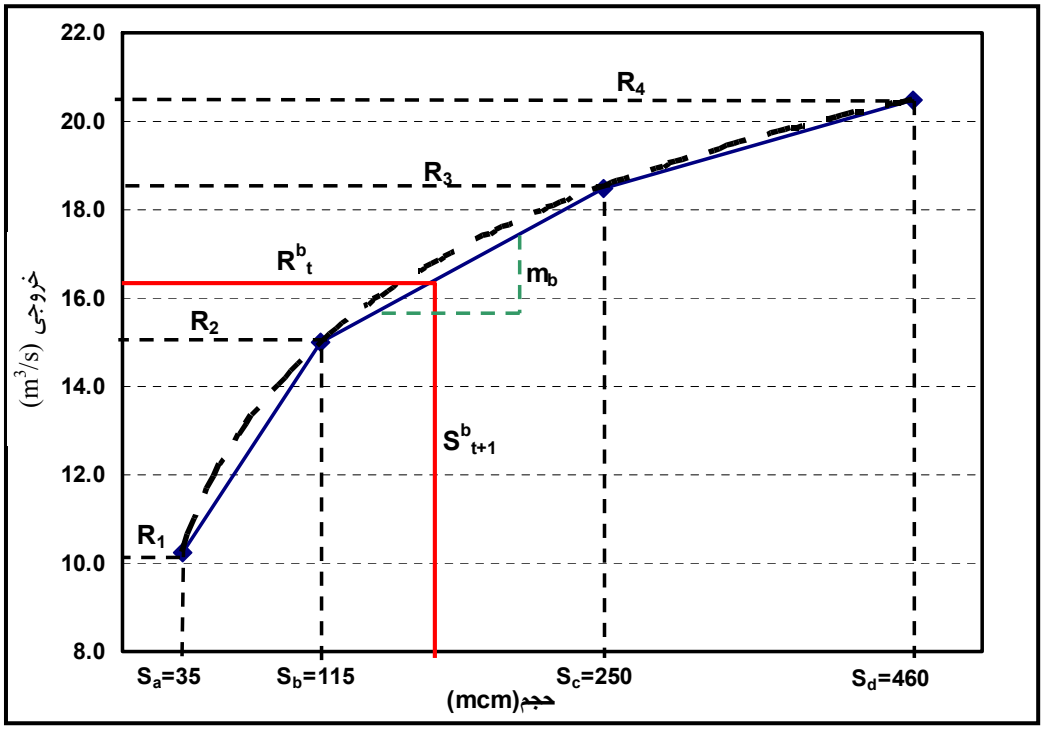
که $S^c_{t+1}, S^b_{t+1}, S^a_{t+1}$ به ترتیب بیانگر حجم در نواحی اول، دوم و سوم، h_3, h_2, h_1 بیانگر عرض از مبداء در نواحی اول و دوم و سوم و X_1 X_2 و X_3 به ترتیب متغیرهای مستقل صحیح هستند که می‌تواند تنها مقادیر صفر و یک را شامل شوند. مقدار حجم کل مخزن می‌بایست برابر با مجموع کل احجام مخزن در هر ناحیه باشد، لذا:

$$S_{t+1} - S_a X_2 - S^a_{t+1} - S_b X_3 - S^b_{t+1} - S^c_{t+1} = 0 \qquad (۶)$$

همچنین در هر ناحیه حجم مخزن می‌بایست بین کرانه‌های بالا و پایین آن ناحیه قرار داشته باشد.

$$0 \le S^c_{t+1} \le S_c - S_b \quad و \quad 0 \le S^b_{t+1} \le S_b - S_a \quad ، \qquad (۷)$$
$$S_a \le S^a_{t+1} \le S_b$$

متغیرهای صحیح تنها می‌توانند مقادیر صفر و یک را اختیار کند و مجموع آنها می‌بایست همیشه برابر با یک باشد.



شکل ۱- رابطه حجم- خروجی از مخزن یک سد

$$X_1+X_2+X_3=1 \qquad (۸)$$

متناسب با هر مقدار از حجم، یکی از متغیرهای صحیح دارای مقدار یک و بقیه صفر هستند. اگر X_2 برابر با یک شود، می‌بایست مقادیر S^a_{t+1} و S^c_{t+1} برابر با صفر و S^b_{t+1} دارای مقداری بین S_b تا S_c باشد. بنابراین:

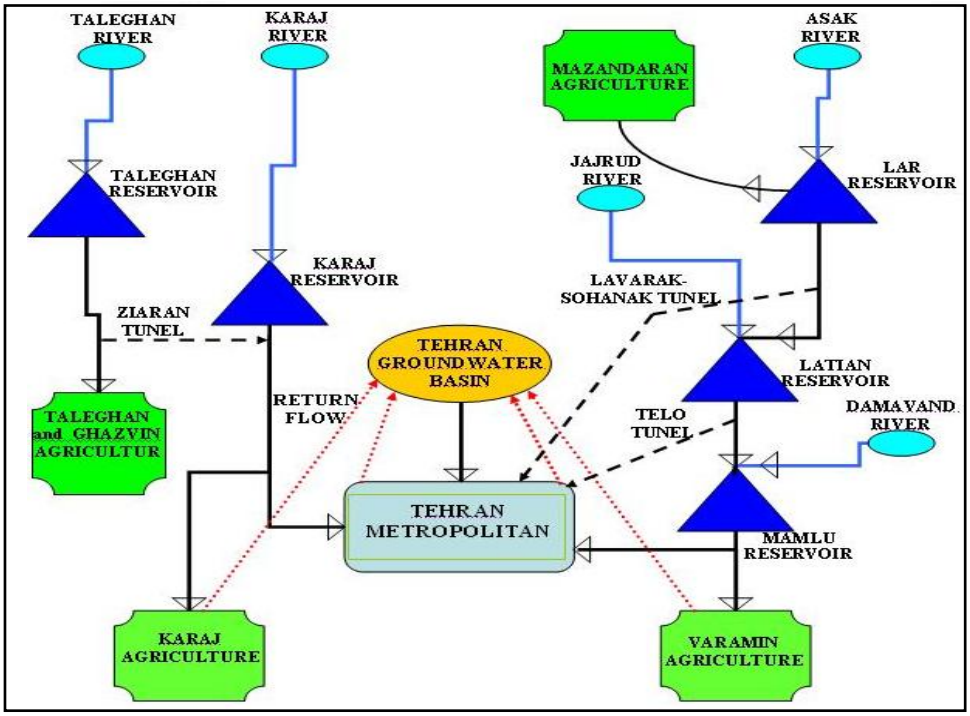
$$S^a_{t+1}-MX_1\le 0\ ،\ S^b_{t+1}-MX_2\le 0 \text{ و } S^c_{t+1}-MX_3\le 0 \qquad (۹)$$

که M یک مقدار ویژه بسیار بزرگ می‌باشد. با تعریف محدودیت‌ها بصورت روابط (۵) تا (۹)، یک تقریب قطعه‌ای از رابطه حجم- خروجی بیان می‌شود.

۴- محدوده مورد مطالعه

در این بخش خلاصه‌ای در مورد محدوده جغرافیائی مورد مطالعه، خصوصیات حوضه‌های آبریز منتهی به مخازن موجود، مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی مخازن، منابع و مصارف محدوده طرح و سابقه طرح‌های اجرائی ارائه شده است. آمار و اطلاعات لازم از آب منطقه‌ای تهران، شرکت مهندسین مشاور جاماب و مهندسین مشاور مهاب قدس تهیه شده است. محدوده مورد مطالعه شامل دشت و شهر تهران می‌باشد که در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز قرار دارد و شامل حوضه‌های آبریز و مخازن سدهای کرج، لار، سد لتیان می‌باشد. غیر از حوضه آبریز سد لار بقیه منطقه مورد مطالعه در دامنه‌های جنوبی بخش مرکزی سلسله جبال البرز قرار دارد. در شکل(۲) بطور شماتیک ارتباط بین منابع تأمین‌کننده آب‌های سطحی و زیرزمینی و مصارف دشت تهران بیان شده است.

لازم به ذکر است که در این تحقیق، فقط منابع آبهای سطحی در دست بهره‌برداری (که شامل مخازن سدهای لار، لتیان و کرج بوده) در نظر گرفته شده‌اند. مخازن سدهای طالقان و ماملو در حال اجرا هستند. آب سد کرج پس از تخلیه به رودخانه کرج (در محل آبگیر بیلقان، توسط خط لوله به تصفیه‌خانه‌های۱ و۲ تهران) منتقل می‌شود. بخشی از آب آزاد شده از این سد نیز برای تأمین نیاز کشاورزی دشت کرج اختصاص یافته است. مقداری از آب تنظیم شده از سد لار توسط تونل لار-کلان به سد لتیان منتقل و قسمتی نیز توسط رودخانه هراز برای تأمین نیاز کشاورزی دشت آمل و بابل ارسال می‌شود. بخش قابل توجهی از آب موجود در مخزن سد لار به علت نشت آب از مخزن به رودخانه هراز تخلیه می‌گردد. مشخصات مخازن لار، لتیان و کرج در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲- شماتیکی از ارتباط بین منابع و مصارف دشت تهران

جدول ۱- مشخصات مخازن موجود در محدوده مطالعاتی

نام سد	موقعیت	ظرفیت (mcm)	ارتفاع (m)	ظرفیت سرریز (cms)	جریان ورودی (mcm)	مساحت حوضه آبریز (km^2)
کرج	۲۳ کیلومتری شمال کرج	۲۰۵	۱۶۵	۱۴۵۰	۴۱۴	۸۵۰
لار	۷۵کیلومتری شمال شرق تهران	۹۶۰	۱۰۵	۱۰۸۰	۴۵۹	۶۸۰
لتیان	۳۵کیلومتری شمال شرق تهران	۹۵	۱۰۷	۱۷۵۰	۳۳۸	۷۱۰

شهر تهران تا حدود نیم قرن قبل، شهری کوچک و کم تحرک بود، لیکن امروزه به یکی از بزرگترین شهرهای دنیا تبدیل شده و بخش عمده‌ای از جمعیت ایران را در خود جای داده است. با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی این شهر، مسائل زیست‌محیطی روز به روز افزایش یافته و آلودگی‌های آب، هوا و خاک مرتباً بیشتر می‌شوند و مهمتر از همه اینکه منابع ذخیره آب‌های سطحی و زیرزمینی اطراف آن، کفاف نیازمندی‌های روزافزون جمعیت را نمی‌دهد. آب مورد نیاز شرب شهر تهران از منابع آب‌های سطحی موجود در محدوده طرح (مخازن لار، لتیان و کرج) و سفره‌های زیرزمینی موجود تأمین می‌شود. هر ساله مقدار زیادی آب از این منابع جهت رفع نیازهای شرب، کشاورزی، صنعت و فضای سبز اختصاص می‌یابد. در هر صورت مقدار منابع موجود محدود می‌باشد. در سال‌های خشک میزان استحصال از منابع آبهای زیرزمینی به شدت افزایش می‌یابد که خود این امر تأثیرات مخرب کمی و کیفی روی سفره دارد. از سال ۱۳۰۶ تاکنون طرح‌های متعددی برای تأمین نیازهای شهر تهران اجرا شده است. هرچند پس از مدتی با افزایش روزافزون جمعیت و بالا رفتن مقادیر نیازهای مصرف‌کننده‌های مختلف، طرح‌های اجرا شده قادر به تأمین نیازهای مصرف کنندگان نبودند. هم‌اکنون نیز چندین طرح در دست مطالعه و اجرا می‌باشد تا مقادیر بیشتری آب از مناطق دوردست وارد شهر تهران کنند. به نظر می‌رسد که بهترین راه، استفاده بهینه از منابع آب و بالا بردن فرهنگ مصرف آب باشد. در این تحقیق جهت برآورد نیاز آبی شرب، محدوده مطالعاتی به ۴ منطقه تقسیم شده است. این مناطق شامل مناطق تحت پوشش آبفای تهران، منطقه غرب تهران شامل مناطق ۲۱ و ۲۲ شهرداری تهران، منطقه جنوب تهران شامل شهرهای کهریزک و چهاردانگه و منطقه جنوب غربی تهران شامل اسلامشهر، شهریار، گلستان و شهر قدس می‌باشند. این تقسیم‌بندی به دلیل تفاوت در نرخ رشد جمعیت مناطق مذکور لحاظ شده است. مناطق ۶ گانه آبفای تهران همراه با

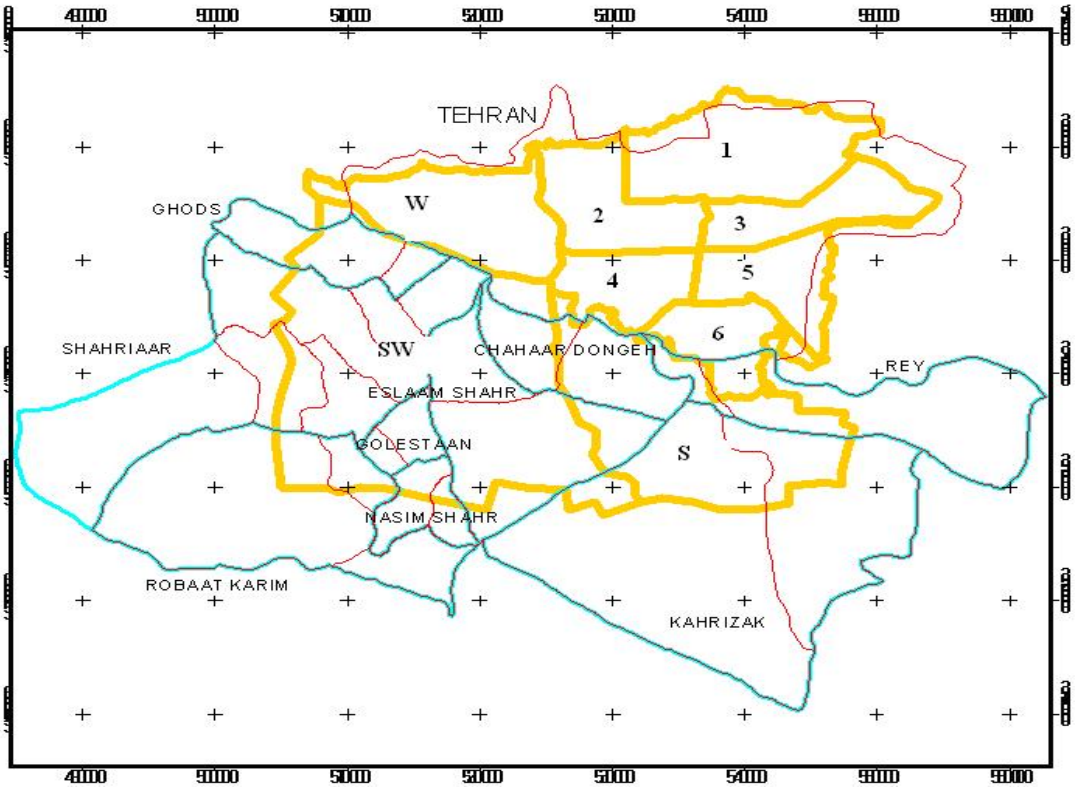
دیگر مناطق، در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. مصرف شرب ماهانه شهر تهران و شهرهای اطراف طی دوره تاریخی در نظر گرفته شده شبیه‌سازی شده است. بر اساس مطالعات انجام شده چهار عامل نرخ رشد جمعیت و به تبع آن جمعیت مناطق مورد بررسی، مصرف سرانه، ضرایب توزیع ماهانه مصرف در ماه‌های سال و ضرایب کارایی (بازدهی) در سیستم توزیع آب تحویل شده به تصفیه خانه‌ها و مخازن شهری بین مشترکین مصرف کننده در شبکه شرب در محاسبهٔ این مصارف مؤثرند.

۵- توسعه مدل MILP

همانطوریکه اشاره شد، برای پیاده‌سازی حل مسئله بهینه‌سازی مخازن چندگانه چندهدفه دشت تهران بر اساس برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط از مدل بهینه‌سازی شبکه جریان استفاده شده است. توپولوژی سیستم بر این اساس پیاده شده و سپس کل سیستم بر اساس برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط حل می‌گردد. در این روش، هر سیستم منابع آب شامل منابع و مصارف (طبیعی یا مصنوعی) بصورت ترکیبی از گره‌ها و کمان‌ها نشان داده می‌شود. گره‌ها بیانگر مخزن، سفره آب زیرزمینی، محل تقاطع دو و یا چند رودخانه، مصارف و یا ورودی‌ها می‌باشد. همچنین کمان‌ها نمایانگر جریان بین گره‌ها یا هدایت جریان به بیرون و یا درون سیستم می‌باشد. کمان‌ها می‌توانند بیانگر جریان ورودی، آب برگشتی، سرریز جریان، تراوش، آب مورد نیاز مصارف شهری یا کشاورزی، یا تونل انتقال جریان به نیروگاه باشند. نمونه‌ای از یک سیستم منابع آبی مورد نظر شامل گره‌ها و کمان‌ها در شکل (۴) ارائه شده است.

مدل طوری طراحی شده که قانون بقای جرم در تمام گره‌ها صادق باشد و در هر گره میزان آب ورودی با میزان آب خروجی برابر است. این قانون برای تمام گره‌ها به استثنای گره‌های ابتدایی (گره ورودی) و انتهایی (گره خروجی از سیستم) صادق است. معادله بالانس حجمی است که بیانگر برابر بودن میزان ورودی‌ها و خروجی‌ها از آن گره است.

$$\sum_{T=1}^{T}\sum_{J=1}^{N} O_{jT} - \sum_{T=1}^{T}\sum_{i=1}^{M} I_{iT} = 0 \quad for \ \ all \ \ i \ and \ \ j \qquad (۱۰)$$



شکل ۳- تقسیم‌بندی مناطق مختلف تهران

که O_j مجموع کل جریان خروجی از یک محل تقاطع، I_i مجموع کل جریان ورودی به یک محل تقاطع، N تعداد کمان‌های ورودی و M تعداد کمان‌های خروجی از محل تقاطع وT کل دوره بهینه‌سازی می‌باشد. رابطه بالانس حجمی مخزن:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق، S_{t+1} حجم مخزن در انتهای دوره t، S_t حجم مخزن در ابتدای دوره t، I_t میزان کل ورودی‌ها در طول دوره t و O_t میزان کل خروجی‌ها در طول دوره t می‌باشد؛ که شامل خروجی از دریچه W، خروجی از سرریز، تولید انرژی و تبخیر از سطح مخزن و تراوش می‌باشد.

دومین محدودیت کرانه‌های بالا و پایین حجم مخزن می‌باشد که برای دستیابی به حجم کافی برای کنترل سیلاب، حداقل حجم لازم برای حجم مرده و حجمی که بتوان با اطمینان و اعتمادپذیری خاصی انرژی برقآبی تولید نمود، تعریف می‌شوند. این محدودیت‌ها بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$S_{t,min} \le S \le S_{t,max} \qquad for\ t = 1,\ ...,\ T \qquad (۱۲)$$

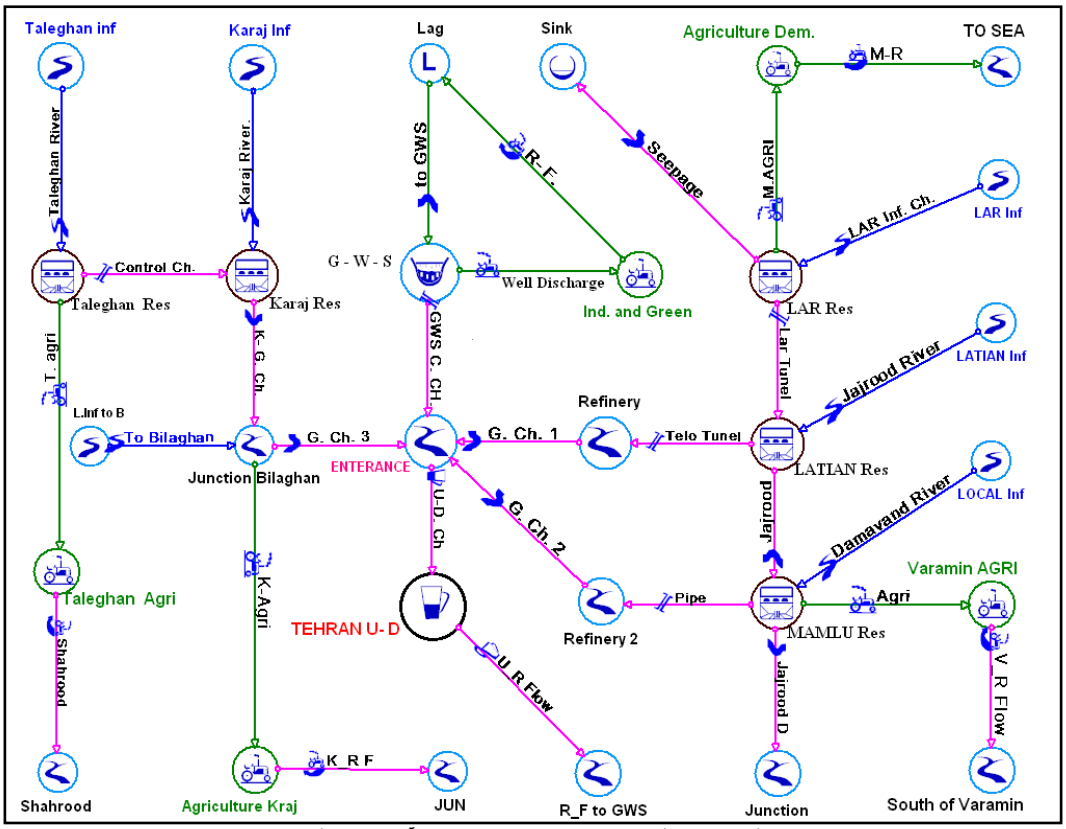
که S_t حجم مخزن در دوره t، $S_{t,max}$ حداکثرحجم مخزن و $S_{t,min}$ حداقل حجم مخزن در همان دوره می‌باشند. سومین محدودیتی که می‌بایست رعایت نمود، تأمین حداقل جریانات پایین‌دست برای حفظ کنترل کیفیت آب، حیات وحش و محیطزیست و همچنین حفاظت پایین‌دست از سیلاب می‌باشد. این محدودیت بصورت زیر می‌باشد:

$$R_{t\,min} \le R_t \le R_{t\,max} \qquad for\ t = 1,\ ...,\ T \qquad (۱۳)$$

یک سری معادلات دیگر در مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد که روابط بین سطح و حجم را بر اساس مشخصات و داده‌های فیزیکی مخزن مشخص می‌کند. معادله ساده شده ارتباط حجم – تراز، بصورت زیر است:

$$H_s.S_t - H_t = -I_h \qquad (۱۴)$$

که H_s شیب خط برازش شده به منحنی حجم–تراز، S_t حجم مخزن، H_t تراز مخزن و I_h عرض از مبداء خط برازش شده را نشان می‌دهد. در مخازنی که تولید انرژی وجود دارد، از این خط برای بدست آوردن هد مؤثر استفاده می‌شود. معادله دیگری نیز ارتباط بین حجم – سطح را بیان می‌کند که بصورت زیر است:



شکل ۴- شماتیکی از سیستم منابع آب تهیه شده

$$A_S.S_t - A_t = -I_A \qquad (۱۵)$$

A_S شیب خط برازش شده به منحنی حجم–سطح، A_t سطح مخزن و I_A عرض از مبداء خط برازش شده می‌باشد. این معادله برای محاسبه سطح مخزن در یک حجم معین، میزان تبخیر از واحد سطح و تلفات ناشی از تبخیر استفاده می‌شود.

مدیریت منابع آب تا حد زیادی به تأمین نیازهای آبی و پیش‌بینی مقادیر آن در آینده بستگی دارد. در سیستم تعریف نیازهای آبی شرب، کشاورزی، صنعت و محیط زیست از طریق گره نیاز آبی انجام می‌شود. معادله حاکم بر هر گره نیاز بصورت زیر است:

$$I + F = D \qquad (۱۶)$$

I متغیر مرتبط با میزان ورودی به گره نیاز و F متغیر مرتبط با میزان کمبود در همان گره است که می‌بایست محدوده آن متناسب با نوع نیاز توسط کاربر تعیین شود. D مقدار نیاز آبی می‌باشد. در هر گره نیاز می‌بایست علاوه بر تعیین میزان نیاز بصورت ثابت یا سری زمانی، میزان کمبود بصورت نسبی یا ثابت و میزان جریمه ناشی از کمبودها نیز توسط کاربر تعیین گردند. میزان کمبود همراه با تعیین یک ضریب توسط کاربر وارد تابع هدف می‌شود. میزان جریمه بستگی به نوع و مقدار نیاز دارد. به ترتیب اهمیت هر مصرف‌کننده، میزان جریمه کاهش می‌یابد. نیازهای در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل نیازهای شرب شهر تهران در مناطق مختلف آن، نیازهای کشاورزی کرج، مازندران و ورامین، نیازهای زیست محیطی و صنعت و فضای سبز در محدوده طرح می‌باشد. نرم افزار توسعه داده شده به راحتی قابلیت اتصال به بانک اطلاعاتی را دارد. این نرم‌افزار طوری طراحی شده که می‌توان نیازها را بصورت ثابت و یا یک سری زمانی وارد مدل نمود. در این تحقیق، این نیازها بصورت سری زمانی و بصورت متغیر در دوره تاریخی مورد نظر وارد شده‌اند.

ارتباط بین گره‌ها توسط کمان‌ها برقرار می‌شود. انواع مختلفی از کمان در این مدل طراحی شده که متناسب با نوع مصرف و نوع جریان می‌بایست ارتباط بین دو گره با یک کمان متناسب انجام شود. کمان سرریز، کمانی است که معمولاً بعد از مخازن قرار می‌گیرد و ارتباط بین مخزن را با گره بعد از مخزن برقرار می‌سازد. مقدار حداکثر سرریز به عوامل مختلف نظیر ظرفیت حمل رودخانه پایین‌دست و حفاظت پایین‌دست از سیلاب بستگی دارد. این کمان با اعمال یک مقدار جریمه وارد تابع هدف می‌شود. در واقع هدف این است که مخزن کمترین سرریز را داشته باشد؛ مگر در مواقعی که این امر ضروری به نظر می‌رسد. لذا با اعمال یک مقدار جریمه که بستگی به نظر کارشناسی، نوع مسئله، تابع هدف و محدودیت‌ها دارد، سعی می‌شود که مقدار سرریز کمتری رخ دهد. مقدار جریمه‌ای که برای سرریز در نظر گرفته می‌شود، بصورت یک ضریب در مقدار جریان ضرب شده و در تابع هدف ظاهر می‌شود. محدودیت سرریز بصورت زیر است:

$$0 \le P\ell \le P\ell_{t,max} \qquad (۱۷)$$

که $P\ell_{t,\max}$ حداکثر جریان عبوری از سرریز و $P\ell_t$ مقدار واقعی جریان عبوری از سرریز در دوره t می‌باشد.

۵-۱- تابع هدف

در مدل تهیه شده، تابع هدف بصورت $Minimize \sum_{\ell \varepsilon A} C_\ell q_\ell$ می‌باشد که حداقل‌سازی یک سری عبارات طراحی شده است، لذا می‌بایست جریمه‌ها را متناسب با نوع مصرف‌کننده و مقدار مصرف با یک ضریب مثبت و میزان اولویت‌ها را با یک ضریب منفی تعریف کرد. هر چه مقدار عددی جریمه برای محدودیت یک گره یا لینک بزرگتر باشد، مدل سعی می‌کند که کمتر از آن محدودیت تجاوز کند و هر چه مقدار عددی اولویت بیشتر باشد، مدل سعی می‌کند که ابتدا آن محدودیت را ارضاء کند. لذا کاربر می‌بایست مقدار و میزان عددی این جریمه و اولویت‌ها را با توجه به شرایط، نوع مصرف و میزان بزرگی آن با دقت تعیین کند. تابع هدف به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} &Minimize\ OBJ: \\ &= \sum_{1}^{n}\sum_{1}^{T} C_1.CH_{nT} + \sum_{1}^{n}\sum_{1}^{T} C_2.HO_{nT} + \\ &\sum_{1}^{n}\sum_{1}^{T} C_3.PL_{nT} + \sum_{1}^{n}\sum_{1}^{T} C_4.ST_{nT} + \sum_{1}^{n}\sum_{1}^{T} C_5.US_{nT} \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

که n تعداد مخازن، T کل دوره بهینه‌سازی و C_i ضرایب جریمه یا اولویت می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، هدف، حداقل‌کردن مجموع یک سری عبارات، شامل میزان کمبودهای نیازهای کشاورزی (HO)، شرب (US)، میزان سرریز (PL)، حداکثرسازی حجم مخزن (ST) و حداقل سازی تخطی جریان در کانال‌های کنترل شونده (CH) می‌باشد. ضرایب این عبارات توسط کاربر تعیین شده که این ضرایب ممکن است جریمه یا اولویت باشند. برنامه حل‌کننده تجاری برنامه‌ریزی خطی این قابلیت را دارد که تابع هدف را بصورت حداکثرسازی یک سری عبارات نیز بیان کند.

قیود نیز بصورت پیوستگی در مخزن، پیوستگی در هر گره، میزان کمبودهای نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی، متغیرهای صحیح، و

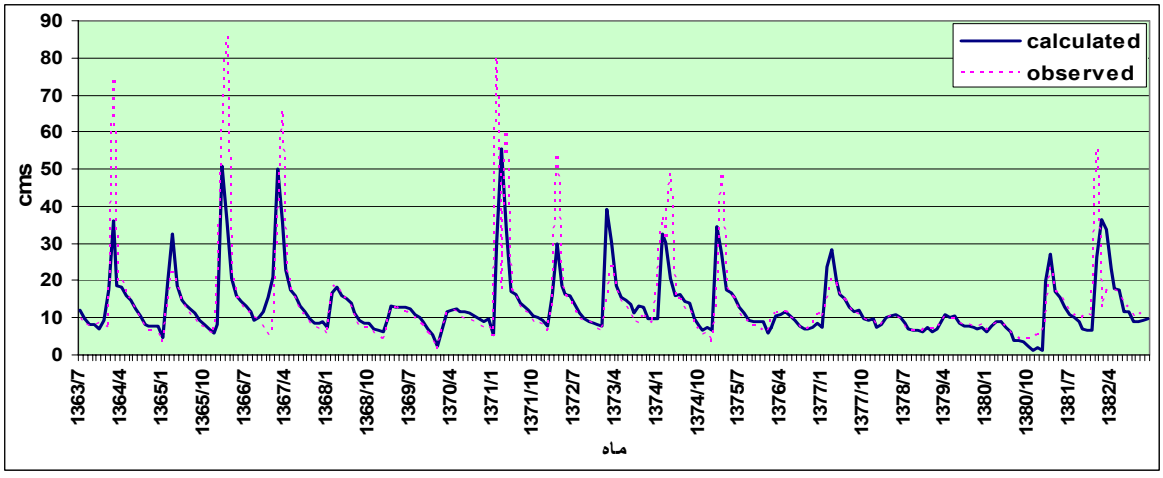
روابط حجم- ارتفاع در مخزن می‌باشند که قبلاً در مورد هر کدام از قیود، چگونگی روابط حاکم بر آنها قبلاً تعریف شده است. حال یک مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط توسعه داده شده که می‌توان از آن برای بهینه‌سازی سیستم منابع آب‌های سطحی مخازن سدهای کرج، لار و لتیان استفاده نمود. این مدل بر اساس فرمول‌های ارائه شده در روابط (۵) تا (۱۸) آماده شده است. به علت اینکه تعداد متغیرها، قیود و متغیرهای صحیح بسیار زیاد می‌باشد و حل این مسئله بزرگ مقیاس، بسیار وقت‌گیر است، از یک برنامه حل‌کننده (solver) برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط برای حل آن استفاده شده است. دوره زمانی درنظر گرفته شده برای حل این مسئله برابر با ۲۰سال، تعداد متغیرهای صحیح برابر با ۱۴۴۰، تعداد متغیرهای معمولی برابر با۶۰۹۶۰ و تعداد قیود۴۷۰۴۰ بوده است. مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط ارائه شده در این تحقیق به راحتی قابل توسعه بوده و بسیار انعطاف‌پذیر است. برای اینکه ضرایب جریمه و اولویت‌های اهداف می‌توانند توسط کاربر تغییر داده شوند. بعنوان مثال، می‌توان برای حداقل‌سازی جریان سرریز بعنوان هدف اولیه، مقدار جریمه بیشتری از دیگر اهداف در نظر گرفت. ورودی‌ها و خروجی‌های این مدل در قالب یک نرم‌افزار صفحه گسترده ارائه می‌شوند که براحتی قابل انتقال به دیگر صفحه گسترده‌ها هستند.

۶- نتایج MILP

عمده منابع سطحی فعلی تأمین‌کننده نیازهای آبی تهران را جریان‌های ورودی به سدهای کرج، لار و لتیان تشکیل می‌دهند و در آینده نزدیک رودخانه دماوند و ورودی به سد طالقان نیز به این منابع اضافه خواهند شد. عمده این منابع، جهت تامین نیاز شرب شهر تهران و بخشی از آن برای تامین نیازهای آبیاری کشاورزی دشت‌های شهریار از سد کرج و ورامین از سد لتیان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مطالعات بهینه‌سازی سامانه سدهای کرج، لار و لتیان فرضیات و معیارهایی جهت اجرای مدل توسعه داده شده سیستم منابع آب در نظر گرفته شده است. این فرضیات عمومی با توجه به مقاطع زمانی در نظر گرفته شده در مطالعات سیستم در وضع موجود بهره‌برداری به شرح زیر می‌باشد:

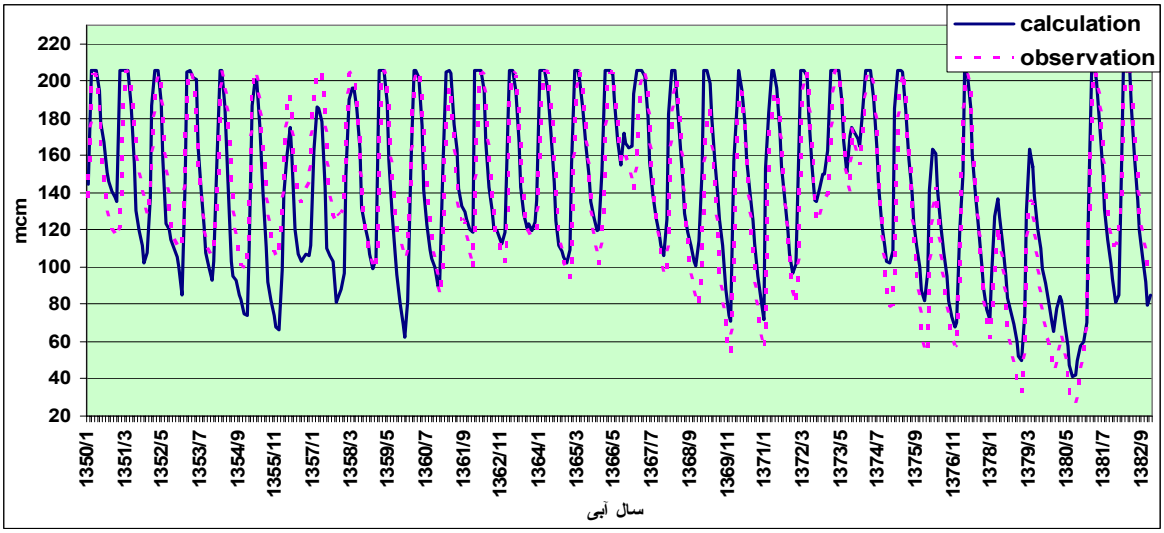
* محدودیت کمبود آب شرب بطور معمول ۵ درصد و محدودیت کمبود آب کشاورزی بین۱۰ تا ۳۰ درصد درنظر گرفته می‌شود. یعنی اینکه مدل برای رسیدن به محدوده مجاز و حرکت به سمت مسیر بهینه تنها می‌تواند به اندازه ۵ درصد از مقادیر واقعی نیاز شرب تخطی داشته باشد.
* مقدار آب برگشتی ناشی از مصارف شرب و کشاورزی به ترتیب ۶۰ و ۲۵ درصد منظور گردید.
* برای رعایت بیلان آبی مخازن، رقوم سطح آب، در ابتدا و انتهای دوره بهینه‌سازی، برابر مقادیر دوره تاریخی منظور شد.
* بهینه‌سازی به صورت ماهانه انجام شده است.
* دوره تاریخی برای اجرای مدل۲۰ ساله از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۲ در نظر گرفته شده است. تجزیه و تحلیل مقادیر بارش‌ها و جریان‌های ورودی در این دوره ۲۰ ساله، حاکی از آن است که در این سال‌ها با سه دوره چندساله ترسالی و نرمال و خشکسالی مواجه بوده‌ایم. بنابراین کلیه شرایط بحرانی و معمولی در دوره تاریخی در نظر گرفته شده، دیده شده است.

خروجی‌های بهینه محاسبه شده از روش MILP در مقایسه با جریان‌های خروجی مشاهداتی از هر کدام از مخازن لار، لتیان و کرج بدست آمده است؛ که برای نمونه مقادیر خروجی از سد کرج در شکل (۵) ارائه شده‌اند.



شکل ۵- جریان‌های خروجی بهینه و مشاهداتی از سد کرج

در مجموع به طور متوسط سالانه حدود ۳۳۶ میلیون متر مکعب آب از سد کرج، ۲۸۸ میلیون متر مکعب از سدهای لار و لتیان و ۲۴۰ میلیون متر مکعب از منابع آب زیرزمینی جهت تأمین نیاز شرب تهران تخصیص داده می‌شود، که سهم سد کرج ۳۸/۱۷ درصد، سدهای لار و لتیان ۳۳/۷۲ درصد و منابع زیرزمینی نیز ۲۸/۱ درصد می‌باشد. در سال آبی۸۰- ۱۳۷۹ که خشک‌ترین سال در دوره تاریخی در نظر گرفته شده، می‌باشد، در مجموع بطور متوسط حدود ۲۱۴ میلیون مترمکعب آب از سد کرج و ۲۵۹ میلیون مترمکعب از سدهای لار و لتیان برای مصرف شرب شهر تهران اختصاص یافته است. در حالیکه مصرف شرب شهر تهران در این سال آبی، ۸۶۲ میلیون مترمکعب بوده است و همانطوری که محاسبات نشان می‌دهند، ۳۹۰ میلیون مترمکعب کمبود وجود دارد که می‌بایست از منابع آب زیرزمینی جهت تأمین نیاز شرب تهران تخصیص داده شود. بیشترین برداشت از منابع آبهای زیرزمینی، در سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ بوده است. این درحالی است که بر اساس نتایج بدست آمده از اجرای مدل MILP، میزان برداشت از آب زیرزمینی۳۹۰ میلیون مترمکعب محاسبه شده، اما در عمل و بر اساس میزان آمار ارائه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای تهران، مقادیر برداشت از سفره آب زیرزمینی بیش از ۴۴۰ میلیون مترمکعب یعنی در حدود از ۴۹/۸۲ درصد از نیاز شرب تهران بوده است. برای نمونه، آمار بهره‌برداری واقعی حجم مخزن سد کرج در دوره تاریخی و سری شبیه‌سازی شده آن در مقایسه با مقادیر واقعی در شکل (۶) نشان داده شده است. صحت سیستم نه تنها به نتایج منطق محاسبات، بلکه به عملکرد مخازن در میزان جریان خروجی از آن‌ها، تغییرات حجم ذخیره مخزن، میزان جریان سرریز شده و کمبودهای نیازهای مختلف بستگی دارد. مقایسه مقادیر واقعی حجم مخزن و سری شبیه‌سازی شده حجم مخزن سد کرج، بیانگر این نکته می‌باشد که مدل بهینه‌سازی موجود با هدف کمینه‌سازی محدودیت نیاز شرب تهران تأمین شده از سد کرج و با در نظر گرفتن شرط پر نگه داشتن مخزن برای حفظ تراز حداقل نیروگاه شرایط فعلی را بخوبی کالیبره می‌کند. مقایسه سری‌های شبیه‌سازی شده مخازن سدهای لار و لتیان با مقادیر واقعی بیانگر این است که مدل بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی کمبودهای شرب تهران تأمین شده از سیستم لار و لتیان و با درنظر گرفتن شرط پرنگه داشتن مخزن لار برای حفظ محدودیت انتقال آب به لتیان و پر نگه داشتن مخزن لتیان برای تولید انرژی بخوبی عمل کرده است. نتایج مدل توسعه یافته MILP، با نتایج بدست آمده از مدل LP و نتایج دوره تاریخی، مقایسه شده‌اند. اگرچه زمان بسیار کمتری برای حل مدل LP در مقایسه با مدل MILP مورد نیاز است، اما نتایج بدست آمده توسط MILP در مقایسه با نتایج مدل LP و دوره تاریخی دارای عملکر بسیار بهتری است. نتایج بدست آمده از مدل توسعه یافته MILP نسبت به داده‌های دوره تاریخی، ۲۱/۷٪ سرریز کمتر، ۱۱/۶٪ جریان خروجی بیشترو ۱۵/۹٪ حجم ذخیره بیشتر و در مقایسه با نتایج مدل LP دارای ۱۲/۶٪ سرریز کمتر، ۵/۵٪ جریان خروجی بیشترو ۷/۸٪ حجم ذخیره بیشتر می‌باشند.



شکل ۶- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی حجم مخزن سد کرج

۷- بحث و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، توصیف چگونگی مدل‌سازی ریاضی برای شبیه‌سازی فرآیندهای بهره‌برداری در سیستم مخازن چندگانه چندهدفه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط در دشت تهران–کرج بوده است. در این تحقیق، از فاکتورهای اولویت و جریمه برای اهداف متضاد سیستم، بجای بهره گرفتن از تخمین توابع سود استفاده شده‌است. تناسب فاکتورهای انتخاب شده با مقایسه نتایج بدست آمده با بهره‌برداری دوره تاریخی و تناسب مجموعه وزن‌ها با استفاده از سعی و خطا بدست آمده‌اند. فرض شد که داده‌های خروجی دوره تاریخی بیان کننده عملیات بهره‌برداری در خلال دوره بهره‌برداری باشند. بنابراین، سعی شده است تجاربی از بهره‌برداری دوره تاریخی بدست آید، اما این، همه آن‌چیزی نیست که ما می‌خواهیم. چرا که ما از قوانین بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی سرریز از خروجی مخزن استفاده می‌کنیم و در همان زمان می‌خواهیم که کمبودهای آب در مصرف کننده‌های مختلف نیز حداقل شود. ما نتایج مدل بهینه‌سازی را با بهره‌برداری دوره تاریخی مقایسه کرده‌ایم تا تناسب مجموعه فاکتورهای وزنی را مورد بررسی قرار داده به این امید که بتوان خروجی‌های بهتری بدست آوریم. در این تحقیق، از مدل بهینه‌سازی برای شبیه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن چندگانه چندهدفه استفاده کرده‌ایم، بدون اینکه قوانین بهره‌برداری از مخازن را مشخص کرده باشیم. بلکه با مشخص کردن فاکتورهای وزنی، جریمه و اولویت در تابع هدف این کار انجام شده است. بنابراین، از تابع هدف برای بدست‌آوردن قوانینی در میان سیستم مخازن چندگانه چندهدفه استفاده شده تا بتوان شبیه‌سازی بهتری از عملکرد مخازن نسبت به داده‌های تاریخی داشته‌باشیم. اگر مدل بهینه‌سازی طوری طراحی شود که عملکرد سیستم مخازن چندگانه چندهدفه را شبیه‌سازی کند، ممکن است از آن بتوان برای یافتن ترازهای ذخیره‌های مطلوب در هر مخزن در سیستم در بهره‌برداری دوره تاریخی استفاده کرد. از مدل بهینه‌سازی به عنوان موتوری برای شبیه‌سازی رفتار بهره‌برداری از سیستم مخازن چندگانه چندهدفه استفاده شده با این فرض که منحنی فرمان و یا حجم ذخیره مطلوبی وجود ندارد. در این تحقیق، تابع هدف بصورت معادله حاکم در شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخازن چندگانه چندهدفه می‌باشد که از چند نوع متغیر تصمیم تشکیل شده که در برگیرنده مقدار سرریز، حجم مخازن، مقادیر کمبود نیازهای مختلف مانند شرب، کشاورزی و صنعت در هر دوره در هر مخزن می‌باشند.

هدف اولیه از اجرای مدل بهره‌برداری، حداقل‌سازی میزان کمبودهای آب در محدوده مورد مطالعه در دوره تاریخی مورد نظر می‌باشد؛ طوری که میزان آب در دسترس افزایش یابد. بنابراین میزان جریان سرریز شده در ارزیابی عملکرد بهره‌برداری بسیار مهم می‌باشد. اولویت‌ها برای این در نظر گرفته می‌شوند که میزان جریان سرریز شده را به حداقل برساند و در نتیجه توان تولید نیروگاهی افزایش یافته و حجم مخزن حفظ می‌شود. در این تحقیق بیشترین تاکید بر روی فاکتورهای وزنی جریان سرریز شده از مخازن، جرایم کمبودهای شرب و فاکتورهای حفظ تراز حجم مخزن می‌باشد.

نتایج ارائه شده در بخش‌های فوق حاکی از آن است که پاسخ‌های تولید شده از تکنیک توسعه داده شده در این تحقیق عملکرد مناسبی داشته‌اند. مدل MILP یک روش مناسب و کارآمد برای بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب می‌باشد. نتایج بدست آمده از این روش دارای عملکرد بالائی هستند.

پی‌نوشت‌ها

1- Implicit Stochastic Optimization
2- Linear Programming
3- Non Linear Programming
4- Dynamic Programming
5- Evolutionary Algorithms
6- Mixed Integer Linear Programming
7- Genetic Algorithms
8- Neural Network
9- Fuzzy Systems
10- Simplex Method
11- Duality Theory
12-Affine Scaling
13- Interior Point
14- Binary Linear Programming
15-Piecewise Linear
16-Separable Programming
17-Solver
18- Branch and Bound

۸- مراجع

اسلامی، ح. ر.، رابعی، ف. و قادری، ک. (۱۳۸۴)، "بررسی اثرات انتقال آب از سرشاخه‌های کارون و دز بر میزان اعتمادپذیری تولید انرژی برقابی در سیستم مخازن رودخانه‌های دز و کارون"، کنفرانس انتقال آب بین حوضه‌ای، دانشکده صنعت آب و برق، تهران، ایران.

شرکت آب منطقه‌ای تهران (۱۳۸۵)، "پروژه مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع تأمین درازمدت آب تهران"، گزارش مدل‌سازی طرح جامع آب تهران، جلد چهارم، ویراست اول، بهار.

شرکت مهندسین مشاور جاماب (۱۳۸۴)، "پروژه مطالعات بررسی امکان تأمین آب درازمدت تهران مرکز مطالعات برنامه‌ریزی شهر تهران"، نهاد مشترک مسئول تهیه طرح‌های جامع و تفضیلی شهر تهران.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس (۱۳۸۴)، "طرح مطالعات بهینه بهره‌برداری کمی، کیفی و آلودگی منابع آب زیرزمینی دشت‌های تهران و شهریار"، مطالعات مدل‌های ریاضی کمی و کیفی آبخوان دشت تهران و شهریار، مرحله اول (جلد پنجم)، تیر.

Barros, M.T.L., Tsai, F., Yang, S.L., Lopes, J.E.G., and Yeh, W.G. (2003), "Optimization of large scale hydropower systems operation", *Journal of Water Res. Planning and Management, 129(3), pp.178-188.*

Cai, X., McKinney, D.C. and Lasdon, L.S. (2001), "Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach", *Advances in Water Resources, 24, pp.667-676.*

Crawly, F.D. and Dandy, G.C. (1993), "Optimal operation of multi reservoir systems", *Journal of Water Resources Planning and Management,* 119(1), pp.1-17.

Karunanithi, N., Grenney, W.J. and Whitley, D. (1994), "Neural network for river flow prediction", *Journal of Computing in Civil Engineering, 8, pp.201–209.*

Labadie, J.W and Baldo, M.L. (2000), "MODSIM: Decision support system for River Basin Management, Documentation and user Manual", Department of civil Engineering, Colorado State University.

Labadie, J.W. (2004), "Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review", *Journal of Water Resources Planning and Management, 130(2), pp.93-111.*

Mousavi. S.J., K. Shokrvand and Seifi, A. (2004), "Application of Interior-point algorithms to the optimization of large scale reservoir system operation", *Journal of Water Resources Planning and Management, 18, pp.519-540.*

Moy, W. S., Cohon, J. L. and Revelle, C. S. (1986), "A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir", *Water resource research, 22, pp, 489-498*

Needham, J., Watkins, D., Lund, J., and Nanda, K. (2000), "Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines river", *J. of Water Resources Planning and Management, 126(3), pp.118-127.*

Shih, J. S. and Revelle, C. S. (1994), "Water supply operations during drought: discrete hedging rule", *Journal of Water Resources Planning and Management, 120, pp.613-629.*

Simonovic, S.P. (1992), "Closing gap between theory and practice", *Journal of Water Resources Planning and Management, 118(3), pp.262-280.*

Srinivasan, K., Neelakantan, T.R., Shyam Narayan, P. and Nagarajukumar, C. (1999), "Mixed-Integer model for reservoir performance optimization", *Journal of Water Resources Planning and Management, 125(5), pp.298-301.*

Trezos, T. (1991), "Integer programming application for planning of hydropower production", *Journal of Water Resources Planning and Management, 117(3), pp.340-351.*

Wurbs, R.A. (1993), "Reservoir-System simulation and optimization models", *Journal of Water Resources Planning and Management, 119(4), pp.455-472.*

Yeh, W.G. (1985), "Reservoir management and operation models: A State-of-the-Art Review", *Water Resources Research, 21(12), pp.1797-1818.*