

بهینه‌سازی توزیع آب در سیستم چند مخزنه حوضه آبریز رودخانه کلامرز میانه

محمد تقی ستاری*، سید سعید اسلامیان** و احمد ابریشم‌چی***

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۰/۳/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۶/۱۷)

چکیده - محدودیت شدید منابع آب و هزینه هنگفت احداث تاسیسات آبی جدید لزوم بهره‌برداری بهینه از سیستمهای مخازن فعلی در کشور را تشدید می‌کند. برای مدیریت و توزیع مناسب آب در سیستم ۹ مخزنه حوضه کلامرز میانه اقدام به استفاده از مدل‌های ریاضی بهینه‌سازی شد. با توجه به تصادفی بودن مقدار دبی رودخانه و حجم ثابت مخازن و همچنین سطح ثابت اراضی زیرکشت یک مدل بهینه‌سازی خطی با محدودیت احتمالی نوشته شد و با استفاده از نرم افزار GAMS اجرا شد. این مدل صرفاً برای تنظیم درون‌سالی مخازن به کار گرفته شد. با استفاده از یک قاعده خطی برداشت مقادیر پارامترهای بهره‌برداری برای ماههای نیاز و همه مخازن توسط مدل استخراج شد. همچنین با استفاده از مدل اقدام به محاسبه مقادیر ضرایب انحراف دبی کل رودخانه به هر یک از مخازن و مقادیر حجم آب خروجی از سیستم در ماههای موردنظر محاسبه شد. نتایج حاصل از مدل با بیش از ۶۰٪ کمبود نسبت به تقاضا، نشانگر عدم توجه کافی به حجم بهینه مخازن در موقع احداث و توسعه بی‌رویه اراضی زیر کشت بدون در نظر گرفتن پتانسیل آبی رودخانه کلامرز بوده است.

واژگان کلیدی: سیستم چندمخزنه، بهره‌برداری بهینه، مدل‌های بهینه‌سازی، مدل‌های محدودیت احتمالی خطی

Optimization of Water Distribution in the Kalamarz Multi-Reservoir System, Mianeh Basin

M. T. Sattari, S. S. Eslamian and A. Abrishamchi
College of Agriculture, Tabriz University
College of Agriculture, Isfahan University of Technology
Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

Abstract: Limitations on water resources and the high costs of new hydraulic structure construction intensify the need for an optimum operation of Iranian reservoir systems. For appropriate water distribution and management in a 9-reservoir system on

*** - دانشیار

** - استادیار

* - کارشناسی ارشد

the Kalamariz river, Mianeh basin optimizing mathematical models are applied. Considering the stochastic nature of river discharges and the constant amount of reservoir volume and farmland area, an optimum linear chance constrained model is programmed and run by GAMS software. This model is only used for within-year regulation. Using a linear yield regulation, operation parameters for request months and all reservoirs are derived by the model. Also, the model computes portions of river discharge diverted to each reservoir in different months and outflow from downstream for different months. Results show greater than 60 percent deficit that indicates the lack of sufficient attention to constructing an optimum reservoir volume and extensive development of farmlands for each reservoir..

Keywords: Multi-reservoir system, optimal operation optimizing Models, linear chance constrained model

لیست علائم

$b_{(i,t)}$ پارامتر بهره برداری در مخزن i در ماه t	$K_{(i)}$ ظرفیت مخزن i
$\text{Remain}(t)$ حجم آب خروجی از سیستم در هر ماه t	$DT_{(i,t)}$ حداکثر تقاضای مورد نیاز در مخزن i و ماه t
$P_{(i,t)}$ قابلیت اطمینان در مخزن i در ماه t	$i = 1, \dots, 9$ تعداد مخازن
$1 - P_{(i,t)}$ ریسک یا احتمال شکست مخزن i در ماه t	$t = 1, \dots, 12$ تعداد ماهها
P_t احتمال	$QR_{(i,t)}$ مقدار حجم آب رودخانه با احتمال مشخص در ماه t ام
B_i متغیر تصادفی	$QD_{(i,t)}$ مقدار آب منحرف شده از سایت i ام به سمت کانال i ام برای ذخیره در مخزن i ام
$g_i(x)$ تابع بردار تصمیم غیر تصادفی x	$QI_{(i,t)}$ مقدار آب ورودی به مخزن i ام در ماه t ام
P_i احتمال با مقدار مشخص	$R_{(i,t)}$ مقدار آب خروجی از مخزن i ام در ماه t ام
t دوره	$CL_{(i,t)}$ مقدار آب هرز رفته در طول کانال i ام در ماه t ام
S_{t+1} حجم ذخیره در دوره $t+1$	$S_{(i,t)}$ حجم ذخیره مخزن i ام در ابتدای ماه t ام
S_t حجم ذخیره اولیه مخزن	$E_{(i,t)}$ حجم تبخیر از سطح مخزن i ام در ماه t ام
R_t حجم خروجی از مخزن در دوره t	$C_{(i,t)}$ درصد آب انحرافی از حجم کل آب رودخانه به هر یک از کانالها در مخزن i در ماه t
Q_t حجم ورودی به مخزن در دوره t	$F_{(i,t)}$ درصد کمبود نسبت به تقاضا در مخزن i در ماه t
E_t حجم تلفات ناشی از تبخیر در دوره t	

۱- مقدمه

تخریبهای زیست محیطی شده است. از آنجایی که طراحی و ساخت تاسیسات آبی هزینه های هنگفتی را می طلبد، بی توجهی به مقوله بهره برداری مناسب نه تنها سود پیش بینی شده حاصل از ایجاد تاسیسات را تامین نمی کند بلکه در مقیاس کلی باعث ازدیاد مشکلات اجتماعی نیز می شود.

ریپل^۱ در سال ۱۸۸۳ برای نخستین بار روش طراحی ترسیمی را برای طراحی یک مخزن پیشنهاد کرد. روش وی به صورت روش نمودار جرم^۲ تکامل یافت محدودیت این روش به کاربردن تقاضای ثابت است [۲]. در اوایل سال ۱۹۶۰، توماس. روش ساده پیشنهاد کرد که آن را روش اوجهای متوالی^۳ نامید

بی شک آب به عنوان نیاز انسان برای ادامه حیات و از مهمترین عوامل پیدایش و بقای تمدنها بوده است و از این رو تمدنهای بزرگ همواره در کنار منابع آب شکل گرفته اند [۱]. با توجه به وضع اقلیمی ایران که جزو مناطق خشک محسوب می شود، استفاده بهینه از منابع آب برای توسعه کشاورزی و صنعت حائز اهمیت است. تجارب سالهای اخیر نشان داده است که عدم توجه کافی به مقوله بهره برداری مناسب از منابع آب و تاسیسات آبی باعث هدر رفتن سرمایه های اولیه و حتی

که با این روش طراحی مخزن با توجه به تقاضای متغیر انجام می‌گیرد [۳].

نخستین پیشنهاد کاربرد برنامه ریزی خطی برای بهره‌برداری و طراحی یک مخزن تامین آب توسط دورفمن^۴ در سال ۱۹۶۲ پیشنهاد شد. در سال ۱۹۶۹، رول و همکاران [۴] با برنامه ریزی خطی و به کمک یک قاعده تصمیم خطی^۵ اقدام به طراحی و مدیریت مخزن کردند، آنها بنا به قاعده تصمیم خطی مشخصاً مقدار خروجی از مخزن در طول دوره بهره‌برداری را اختلاف بین ذخیره موجود در مخزن در ابتدای دوره و پارامتر تصمیم بهره‌برداری در نظر گرفتند. این پارامتر به وسیله حل برنامه ریزی خطی مشخص می‌شود. مسائل مورد حل می‌توانست به صورت خطی و یا همچنین احتمالی باشد.

در سال ۱۹۷۰، لاکس اقدام به کاربرد مدل خطی با محدودیت احتمالی و معادل قطعی آن برای حل مسائل چند مخزن نه کرد [۵]. در سال ۱۹۷۳، ایستمن یک مدل محدودیت احتمالی برای بهره‌برداری از مخازن چند منظوره توسعه داد. تابع هدف وی بهینه کردن ظرفیت مورد نیاز مخزن با محدودیت‌های آبرسانی و کنترل سیلاب بود [۶].

در سال ۱۹۷۵، رول و گاندلیچ قاعده تصمیم خطی ارائه شده برای طراحی و مدیریت مخازن را مورد بازبینی قرار دادند و قاعده تصمیم خطی جدیدی پیشنهاد نمودند. در قاعده پیشنهادی خسارات مورد انتظار ناشی از تفاوت خروجی با سطح تقاضا کمینه می‌شود [۷].

در سال ۱۹۷۹، رول و کربی کاربرد قاعده تصمیم خطی در طراحی و مدیریت مخازن را در دو شاخه توسعه دادند، نخست یک قاعده تصمیم خطی با در نظر گرفتن تلفات ناشی از تبخیر منظور شد، دومین مورد اندازه‌گیری عملکرد مخازن مختلف با مشخص کردن یک تابع هدف بود که می‌توانست به وسیله برنامه‌ریزی خطی حل شود [۸].

یانگ در سال ۱۹۶۷ از برنامه ریزی پویا برای تعیین خروجی بهینه مخازن استفاده و در مدل پیشنهادی خود تابع هدف را به صورت کمینه کردن تابع خسارت تعریف کرد [۹].

ابریشم چی و آشتیانی (۱۹۸۱) با ارائه یک قاعده تصمیم خطی جدید برای تبدیل محدودیت‌های احتمالی به قطعی مدلی ارائه دادند که نه تنها تنظیم درون سالی بلکه تنظیم برون سالی را هم در بردارد [۱۰].

استدینگر (۱۹۸۴) مقایسه‌ای بین حجم مخزن و سیاست بهره‌برداری یک سد با استفاده از روش یک و چند قاعده تصمیم خطی انجام داده است [۱۱]. بیچ (۱۹۸۵) روش برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالی را که رول و همکاران اولین بار مورد استفاده قرار داده بودند را بهترین روش احتمالی معرفی کردند [۱۲]. افشار و همکاران در سال ۱۹۹۱ نیز روش برنامه‌ریزی خطی با اعداد صحیح را برای طرح ابعاد شبکه و مخزن مورد استفاده قرار دادند و برای خطی کردن تابع هزینه از متغیرهای عدد صحیح استفاده کردند [۱۳]. افشار و پیرویان در سال ۱۹۹۴ برای طراحی حجم بهینه مخزن سد با استفاده از دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و استفاده از روش سیاست بهره‌برداری استاندارد طراحی و عملکرد سد را به طور همزمان بهینه کردند [۱۴]. گوئل و جین در سال ۱۹۹۸ برای یک سیستم آب در هندوستان شامل ۴ مخزن و ۳ سازه انحراف به عنوان یک سیستم چند مخزنه اقدام به محاسبه و استخراج منحنیهای فرمان (یک منحنی فرمان ساده مقدار جریان خروجی برای دوره آینده را بر اساس سطح ذخیره ماه فعلی تعیین می‌کند) کردند [۱۵]. لاند و گازمن (۱۹۹۹) اقدام به ارزیابی سیاست های مختلف بهره‌برداری از مخازن تک منظوره که به صورت سری یا متوالی و با اهدافی چون تامین آب، کنترل سیلاب، برق‌آبی و... احداث می‌شود، کردند [۱۶].

جین (۱۹۹۹) از روش مصنوعی عصبی (ANNS) برای پیش بینی آب ورودی و همچنین بهره‌برداری از مخزن استفاده نمودند [۱۷]. هسو (۱۹۹۵) بر اساس فرایند هیدرولوژیک روزانه مدلی را برای تخمین جریان و بهره‌برداری از مخزن نوشت. وی ادعا کرد که با بهره‌برداری روزانه مخزن دقت حاصل از تخمین جریان بالا می‌رود [۱۸].

جدول ۱- حجم آبدهی رودخانه کلارمز با قابلیت اعتمادهای ۵۰٪ و ۷۵٪ برحسب m^3

شماره ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
قابلیت اعتماد P (درصد)	۳۰۱۰۸۷	۷۰۷۰۹۸	۸۸۵۰۱۲	۷۷۵۵۲۶	۹۹۹۰۶۰	۲۲۹۳۱۲۵	۱۶۷۸۵۹۶	۳۷۰۹۹۰۵	۱۰۴۱۷۹۰	۱۰۳۷۰۸	۴۷۱۴	۴۷۱۴
	۱۱۸۶۱۰	۵۹۰۷۶۹	۵۸۸۴۸۸	۶۸۴۲۸۸	۶۹۱۱۳۱	۱۶۱۴۰۰۷	۴۲۲۸۴۴۴	۲۱۸۰۲۱۸	۳۱۳۴۸۰	۴۷۱۴۰	۰	۰

۲- ویژگی های منطقه

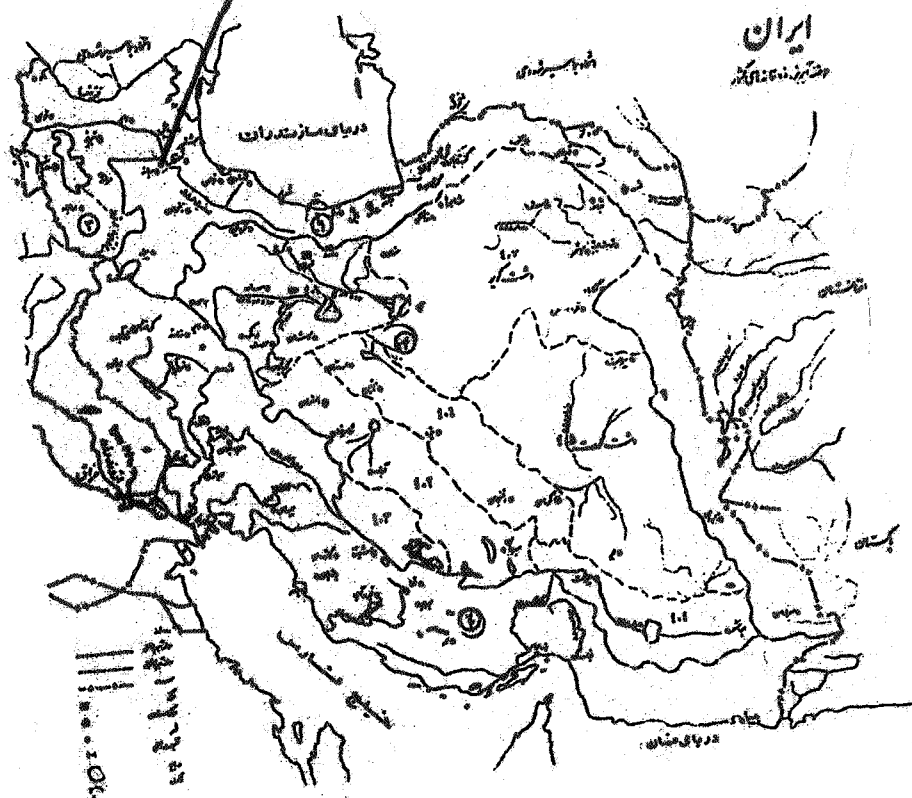
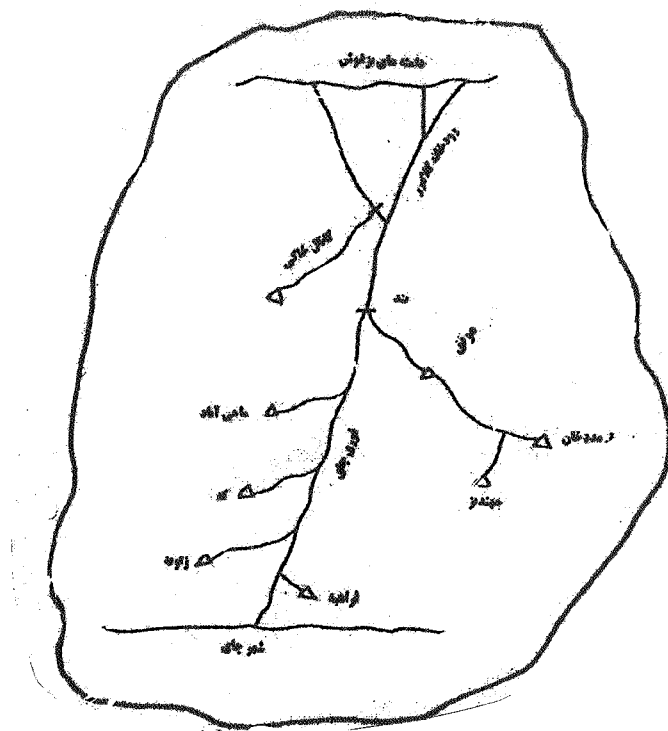
منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی و در شمال شهرستان میانه و دامنه‌های جنوبی رشته کوه بزقوش با حداکثر ارتفاع ۳۱۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. منطقه کلارمز جای دارای طول جغرافیایی $47^{\circ} 36'$ تا $47^{\circ} 47'$ (طول شرقی) و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 35'$ تا $37^{\circ} 41'$ (عرض شرقی) است. رودخانه کلارمز به عنوان زهکش حوضه آبریز عمل کرده و از جهت شمال به جنوب جریان دارد. شکل (۱). این منطقه دارای بافت خساک سطحی سنگین همراه با کمی سنگریزه و شیب کلی ۵-۲ درصد است و دارای پستی و بلندی و فرسایش نسبتاً زیاد است [۱۹]. ریزشهای سالانه منطقه با استفاده از آمار ایستگاههای منتخب (اریاط میانه، استور، کوهسالار و میانه) به ترتیب ۳۵۹، ۳۲۱، ۳۴۱ و ۳۲۴ میلی‌متر برآورد شده است [۱۹]. داده‌های بارش ماهانه نشانگر آن است که ماههای فروردین و اردیبهشت پر باران‌ترین ماهها، تیر و مرداد کم باران‌ترین ماهها را تشکیل می‌دهند. رژیم بارندگی حوضه نشانگر آن است که در ماههایی چون تیر و مرداد که نیاز آبی حداکثر است بارندگی نمی‌تواند جوابگوی تقاضا باشد [۱۹]. با استفاده از اطلاعات موجود در ایستگاههای فوق الذکر حجم آبدهی رودخانه کلارمز در طول ۲۵ سال و با به کارگیری منحنی تداوم جریان، حجم آبدهی رودخانه با قابلیت اعتمادهای ۵۰٪ و ۷۵٪ محاسبه شد، جدول (۱). دبی با قابلیت اعتماد ۷۵٪

بعنوان دبی نرمال در حالت کم آبی در نظر گرفته می‌شود. نیاز خالص آبیاری بر اساس توصیه‌های سازمان جهانی خواربار کشاورزی FAO برای مناطق و اقلیمهای مختلف در فصل زراعی مقدار ثابتی در نظر گرفته شد. [۱۹] و نهایتاً با توجه به الگوی کشت منطقه، شرایط اقلیمی و راندمان کل، نیازناخالص آبیاری محاسبه شد، جدول (۲).

بر اساس اطلاعات و آمار اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی سطح اراضی زیر کشت مربوط به هر یک از مخازن سدها برحسب هکتار محاسبه و حجم تقاضای هر یک از سدها تعیین شد. بر روی رودخانه کلارمز ۹ مخزن احداث شده است که با استفاده از کانالهای منشعب شده از رودخانه در طول ماههای مرطوب پر می‌شوند. کانالهای انشعابی عمدتاً خاکی اند. در این تحقیق با توجه به احجام ثابت مخازن و سطح زیرکشت ثابت در پایین دست مخازن و در نظر گرفتن قابلیت‌های اعتماد مختلف از روی تابع توزیع داده‌های جریان نسبت به بهینه‌سازی توزیع یکنواخت در مخازن اقدام شده است، جدول (۳). این جدول بر اساس گزارشات ارائه شده از سوی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی تهیه و تنظیم شده است.

۳- مدل‌های بهینه سازی

با توجه به افزایش بی‌رویه جمعیت و تقاضای آب و کمیاب بودن منابع آب شیرین، نیاز به تحلیل سیستمهای منابع



شکل ۱- موقعیت حوضه کلامرز جای بر روی نقشه ایران و محل قرارگیری مخازن

جدول ۲- نیاز ناخالص آبیاری برحسب مترمکعب درهکتار

الگوی کشت	ماه	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	کل دوره رشد
غلات		۱۱۳۰	۳۷۷۰	۱۴۳۰	۰	۰	۰	۶۳۳۰
یونجه		۲۸۰	۲۷۷۰	۳۷۲۰	۳۵۵۰	۲۶۰۰	۵۷۰	۱۳۴۹۰
حبوبات		۰	۱۰۸۰	۳۹۶۰	۲۷۵۰	۰	۰	۷۷۹۰
باغات		۰	۱۶۲۰	۲۴۹۰	۲۱۳۰	۱۵۷۰	۵۹۰	۸۴۰۰

جدول ۳- سطح اراضی زیرکشت، تقاضای کل و حجم مفید هریک از مخازن

شماره مخزن i	نام سد	سطح اراضی زیرکشت (هکتار)	تقاضای کل (مترمکعب)	حجم (میلیون مترمکعب)
۱	کزرج	۱۶۰	۱۳۸۲۱۶۰	۱/۵
۲	صومعه کبودین	۱۵۰	۱۲۹۶۹۴۵	۱/۸
۳	مونق	۱۰۰	۹۲۰۳۵۰	۲/۲۵
۴	برنلیق مددخان	۱۲۰	۱۲۰۲۷۶۰	۰/۲۵
۵	جهندیز	۳۰۰	۲۵۹۱۵۵۰	۰/۵
۶	ماهی آباد	۱۲۰	۱۰۳۶۶۲۰	۰/۶۵
۷	که	۶۰	۵۱۸۳۱۰	۱/۲
۸	زاویه	۱۵	۱۴۱۱۱۵	۱/۴
۹	فراهیه	۶۰	۵۵۱۷۰۰	۰/۵

روشهای برنامه‌ریزی ریاضی یک تصمیم‌بینه برای بهره‌برداری سیستم به دست می‌دهند، به طوری که همه قیود سیستم با توجه به بیشینه یا کمینه کردن تابع هدف، برآورد شود [۱۲]. در مدل‌های خطی ارتباط بین متغیرهای تصمیم‌گیری چه در تابع هدف و چه در قیودها خطی است. روشهای حل بسیاری برای مدل‌های خطی ارائه شده است که از این میان می‌توان به روش سیمپلکس اشاره کرد. از آن جایی که بسیاری از مسئله‌ها در طبیعت غیرخطی‌اند، به دلیل برتریهای برنامه‌ریزی خطی، روشهای گوناگونی برای تبدیل رابطه‌های غیرخطی به خطی توسعه یافته است که از کارآمدترین این روشها، می‌توان به روش خطی‌سازی رابطه‌ها اشاره کرد [۶].

آب و برنامه‌ریزی در مورد نحوه بهره‌برداری از آنها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این اهمیت در سیستم‌های منابع آب سطحی که دارای عدم قطعیت‌اند، به صورت چشمگیر خود را نشان می‌دهد. به دلیل تنوع در اهداف و قیود، مسئله برنامه‌ریزی در منابع آب پیچیده بوده و برای بررسی سیستمها نیاز به مدل‌های مناسب ریاضی است، که این مدلها مهمترین بخش از فرآیند برنامه‌ریزی را تشکیل می‌دهند. یکی از مهم‌ترین پیشرفتهایی که در ۲۰ سال گذشته در زمینه مهندسی منابع آب به دست آمده، گسترش روشهای بینه‌سازی برای تصمیم‌گیری، طراحی و مدیریت سیستم‌های پیچیده منابع آب می‌باشد که بیشتر آنها بر پایه روشهای برنامه‌ریزی ریاضی است [۱۲].

۴- نرم افزار GAMS

امروزه نرم افزارهای زیادی برای حل مدل‌های ریاضی وجود دارد که یکی از این نرم افزارها، GAMS است که به وسیله بانک جهانی تهیه شده است [۲۰]. از این نرم افزار به دلیل ویژگیهای زیر در این تحقیق استفاده شد:

- GAMS از یک زبان برنامه‌ریزی سطح بالا بهره می‌گیرد و فهم آن آسان است.

- به سادگی می‌توان در ویژگیهای مدل تغییر داد.

- توصیف مدل مستقل از الگوریتم حل است.

با بهره‌گیری از این برنامه می‌توان بهینه‌سازی غیرخطی عدد صحیح مختلط و عدد صحیح مختلط غیرخطی را انجام داد.

خانواده نرم افزار GAMS شامل ۳ زیر برنامه است: GAMS که برای حل مسائل خطی به کار می‌رود، GAMS/MINOS که برای هر دو مسائل خطی و غیرخطی کاربرد دارد و GAMS/ZOOM که برای ترکیب مسائل برنامه ریزی صحیح به کار می‌رود. تمامی این سه برنامه دارای نسخه‌هایی برای رایانه‌های شخصی و شبکه‌ای است [۲۰].

در GAMS که به وسیله گروه اقتصادی بانک جهانی توسعه داده شده تلاش بر این است که ساختار یک سیستم با زبان برنامه‌نویسی، همراه با جزئیات برنامه ریزی تهیه شود. یک مدل GAMS مجموعه‌ای به زبان GAMS است که به عنوان ورودی استفاده می‌شود. این مدل شامل عبارتی برای بیان و تعریف ساختار ورودی‌ها به تعریف داده‌ها و معادله‌هاست. فرمت داده‌های ورودی نیز آزاد است [۲۰].

۵- مدل‌های محدودیت احتمالی

مدل‌های محدودیت احتمالی برای طراحی اقتصادی مخزن (ظرفیت‌ها و هدف‌ها) و تعیین سیاست بهره‌برداری پیشنهاد شده است. حل این مدل‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت مخزن و سیاست بهره‌برداری بایستی شامل محدوده‌ای مشخص از حجم‌های خروجی از مخزن و ظرفیت مخزن در سطح مشخصی از قابلیت اطمینان باشد. مدل‌ها می‌توانند برای تعیین

حجم ذخیره و خروجی و سیاست بهره‌برداری در سطحی مشخص از قابلیت اطمینان به کار برده شوند [۲].

فرم کلی محدودیت احتمالی به صورت زیر است:

$$P_r[g_i(x) \leq B_i] \geq P_i \quad (1)$$

که در آن P_r نشانگر احتمال، تابع $g_i(x)$ شامل بردار تصمیم غیر تصادفی x و B_i یک متغیر تصادفی است که تابع توزیع آن به شکل $F_{B_i}(b_i)$ است.

رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت [۲]:

$$P_r[g_i(x) \geq B_i] \leq 1 - P_i \quad (2)$$

محدودیت احتمالی (۱) بیانگر این است که تابع $g_i(x)$ با حداقل احتمال P_i کوچکتر از متغیر تصادفی B_i است. معادل قطعی محدودیت احتمالی (۲) به شکل زیر است:

$$g_i(x) \leq b_i^{(1-P_i)} \quad (3)$$

مفهوم رابطه بالا این است که $b_i^{(1-P_i)}$ به عنوان یک مقدار مشخص از متغیر تصادفی B_i بزرگتر یا مساوی تابع $g_i(x)$ است که شامل بردار تصمیم غیر تصادفی x است، [۲]. به صورت مشابه معادله‌های قطعی محدودیت‌های احتمالی:

$$P_r[g_i(x) \geq B_i] \geq P_i \quad (4)$$

$$P_r[g_i(x) \leq B_i] \geq 1 - P_i \quad (5)$$

برابرخواهد بود با:

$$g_i(x) \geq b_i^{(P_i)} \quad (6)$$

$b_i^{(1-P_i)}$ و $b_i^{(P_i)}$ مقادیر ویژه و مشخصی از متغیر تصادفی B_i است.

فرمولهای اشاره شده معادلات بالا به عنوان راهنمایی برای توسعه معادله‌های قطعی محدودیت احتمالی به کار می‌روند [۲]. شکل ساده شده معادله پیوستگی بدون احتساب تلفات در یک مخزن منفرد به صورت زیر است:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t \quad (7)$$

که در آن S_{t+1} ذخیره در دوره بعد است. در این رابطه Q_t حجم ورودی به مخزن در دوره t است که یک متغیر تصادفی بوده و با داشتن طول دوره آماری و تابع توزیع احتمالی مشخص

می شود. احجام ذخیره اولیسه S_t ، و خروجی از مخزن R_t ، متغیرهای تصادفی هستند که توزیع آنها نامعلوم است. این متغیرها تا زمانی که تابعی از ظرفیت ذخیره حداکثر مخزن S_t^{max} و سیاست بهره برداری از مخزن همچون قاعده خطی برداشت هستند، قطعی خواهند بود. اگر توابع توزیع خطی باشند، نتایج مدل‌های قطعی نیز خطی بوده و مدل می‌تواند به روش برنامه ریزی خطی حل شود. در قاعده خطی برداشت از مخزن منفرد داریم:

QR_(t) متغیر تصادفی دبی است که تابع توزیع آن با احتمالات مشخص P (قابلیت اعتماد) با توجه به آمار هیدرولوژی رودخانه قابل تعیین است. در این مدل پارامترهای $C_{(i,t)}$ ، $b_{(i,t)}$ ، $F_{(i,t)}$ ، $QD_{(i,t)}$ ، $QI_{(i,t)}$ ، $R_{(i,t)}$ ، $S_{(i,t)}$ ، $Remain(t)$ مجهول اند. اما مقادیر $DT_{(i,t)}$ ، $QR_{(t)}$ ، $K_{(t)}$ معلوم در نظر گرفته می‌شود. با توجه به کمبود اطلاعات و داده‌ها و به ویژه عدم وجود منحنی‌های سطح - حجم - ارتفاع مخازن، ابعاد مشخص کانال‌های خاکی مقادیر تلفات ناشی از تبخیر $E_{(i,t)}$ و نفوذ $CL_{(i,t)}$ در مدل صفر در نظر گرفته شد. بدیهی است در صورت وجود پارامترهای بالا به راحتی وارد مدل می‌شود.

$$R_t = S_t + Q_t - E_t - b_t \quad (8)$$

معادله پیوستگی در هر سایت i بر روی رودخانه در ماه t و مقدار آب منحرف شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

E_t تلفات ناشی از تبخیر در دوره t و b_t پارامتر قطعی، غیر منفی و مجهول بهره‌برداری است. این قاعده برداشت بیان می‌کند که برداشت برابر با کل دبی قابل دسترس $(S_t + Q_t - E_t)$ منهای مقدار ثابت b_t است. با جایگذاری قاعده برداشت خطی در معادله پیوستگی زیر:

$$QD_{(i,t)} = C_{(i,t)} \times QR_{(t)} \quad \forall i,t \quad (11)$$

که در این معادله $C_{(i,t)} < 1$ و به عبارتی $\sum C_{(i,t)} \leq 1$ خواهد بود. در طول کانال انتقال آب از سایت i تا مخزن i معادله پیوستگی زیر را خواهیم داشت:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t \quad (9)$$

در این معادله $1 < C_{(i,t)}$ و به عبارتی $\sum C_{(i,t)} \leq 1$ خواهد بود. در طول کانال انتقال آب از سایت i تا مخزن i معادله پیوستگی زیر را خواهیم داشت:

خواهیم داشت:

$$QI_{(i,t)} = QD_{(i,t)} - CL_{(i,t)} \quad \forall i,t \quad (12)$$

$$S_{t+1} = b_t \quad (10)$$

با توجه به اینکه مقدار ذخیره در مخزن بایستی کمتر از ظرفیت مجاز مخزن باشد، محدودیت زیر را خواهیم داشت:

که در آن حجم تصادفی ذخیره برابر با پارامتر غیر تصادفی b_t است. با استفاده از این قاعده واریانس (تغییرات) جریان ورودی مستقیماً قابل انتقال به مقدار خروجی است. مقادیر b_t با استفاده از حل مدل به دست می‌آید.

$$S_{(i,t)} \leq K_{(t)} \quad \forall i,t \quad (13)$$

ظرفیت مجاز مخزن در ارتباط با عمر مفید و حجم رسوبگذاری در مخزن است در صورتی که برآوردی از نحوه توزیع رسوب و اثر آن بر روی کاهش حجم مفید مخزن در دسترس باشد می‌توان آن را به صورت یک پارامتر داخل مدل نمود.

۶- الگوریتم و روش توسعه مدل

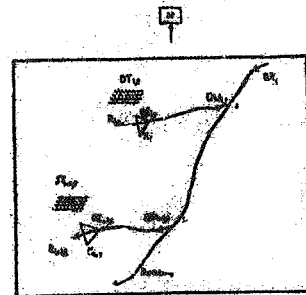
ذخیره مخزن در آخر هر دوره از سال برابر با ذخیره در ابتدای دوره سال بعد خواهد بود. پس:

با استفاده از معادلات پیوستگی و محدودیت‌های احتمالی نسبت به توسعه مدل بهینه‌سازی خطی اقدام شد. این مدل توسط نرم افزار GAMS اجرا و جواب‌های بهینه محاسبه شد. تصویر شماتیک سیستم مخازن کلارمز به شکل زیر است:

$$S_{(i,13)} = S_{(i,1)} \quad \forall i \quad (14)$$

اندیس ۱ نشانگر ماه اول در سال اول و اندیس ۱۳ نشانگر ماه اول در سال بعد است.

با استفاده از قاعده تصمیم خطی برداشت از مخزن i و ماه t داریم:



$$R_{(i,t)} = S_{(i,t)} + QI_{(i,t)} - E_{(i,t)} - b_{(i,t)} \quad \forall i,t \quad (15)$$

که در آن مطابق مدل محدودیت احتمالی خواهیم داشت :

$$S_{(i,t)} = b_{(i,t-1)} \quad \forall i,t \quad (16)$$

$$S_{(i,t+1)} = b_{(i,t)} \quad \text{و یا}$$

بایستی در بیش از $P_{(i,t)}$ درصد مواقع مقدار کمبود کمتر از $F_{(i,t)}$ درصد $DT_{(i,t)}$ باشد. مقدار تقاضای $DT_{(i,t)}$ تابعی از نیاز آبی گیاه و سطح زیرکشت بوده که با افزایش سطح زیر کشت مقدار $DT_{(i,t)}$ افزایش یافته و در صورت نبود آب کافی کمبود نیز افزایش می یابد. بنا بر این:

$$P_r [DT_{(i,t)} - R_{(i,t)} \leq F_{(i,t)} \cdot DT_{(i,t)}] \geq P_{(i,t)} \quad (17)$$

با جایگذاری مقدار $R_{(i,t)}$ از رابطه (15) خواهیم داشت :

$$P_r [DT_{(i,t)} - b_{(i,t-1)} + E_{(i,t)} + b_{(i,t)} - F_{(i,t)} \cdot DT_{(i,t)} \leq QI_{(i,t)}] \geq P_{(i,t)} \quad (18)$$

که معادل قطعی قید فوق به صورت زیر در آمده و وارد مدل می شود :

$$DT_{(i,t)} - b_{(i,t-1)} + E_{(i,t)} + b_{(i,t)} - F_{(i,t)} \cdot DT_{(i,t)} \leq QI_{(i,t)} \cdot I_{(i,t)}^{(1-P_{(i,t)})} \quad (19)$$

در این مدل تابع هدف به صورت کمینه کردن مقدار $F(1,1)$ تعریف می شود ، به شرطی که قدر مطلق تفاضل بین مقدار درصد کمبودها کوچکتر از مقدار مشخص و معلوم Δ باشد تا یکنواختی توزیع کمبود رعایت شود :

$$\text{Min } F(1,1) \quad (20)$$

$$S.T \quad |F(1,1) - F(i,t)| \leq \Delta \quad (21)$$

در این مدل مقدار Δ برابر ۱٪ در نظر گرفته شده است . این مقدار می تواند با توجه به یکنواختی مورد انتظار از سیستم افزایش یابد. بدیهی است هرچه این مقدار کوچک باشد یکنواختی بیشتری تأمین خواهد شد. همچنین تابع هدف در این مدل می توانست کمینه کردن مقدار کمبود در هر یک از ۹ مخزن دیگر باشد و چون هدف توزیع یکنواخت آب و یا به عبارتی صریحتر کمبود است ، این کار تأثیری روی جوابهای مدل نمی گذارد. پس از حل مدل توسط نرم افزار GAMS مقادیر بهینه برای F و همچنین پارامترهای مجهول محاسبه می شوند . مدل ارائه شده با توزیع یکنواخت کمبود در بین

مخازن و در نتیجه بین زارعین، از بروز مسائل اجتماعی در منطقه جلوگیری می کند. عدم وجود داده های مربوط به حجم رسوب گذاری در مخازن و به تبع آن فقدان پارامتر رسوب در مدل را می توان به عنوان یک محدودیت ذکر کرد.

۷- نتایج

پس از اجرای مدل مشخص شد که با قابلیت اعتماد ۵۰٪ (دبی با احتمال ۵۰٪) متوسط درصد کمبود ۶۱٪ و با قابلیت اعتماد ۷۵٪ (دبی با احتمال ۷۵٪) متوسط درصد کمبود ۶۶٪ است . همانطور که ملاحظه می شود با افزایش قابلیت اعتماد مقدار درصد کمبود افزایش می یابد . برابری و یا نزدیکی مقادیر درصد کمبود با توجه به مقدار تعریف شده برای Δ قابل توجه است. در صورتیکه در مدل مقدار Δ بیشتر از ۱٪ در نظر گرفته شود مقادیر درصد کمبود با یکدیگر اختلاف داشته و این اختلاف با عث محقق نشدن یکنواختی کمبود خواهد شد.

برای قابلیت اعتماد ۵۰٪ (دبی با احتمال ۵۰٪) پارامترهای مجهول مدل به شرح جداول (۴) تا (۹). (در این جداول ماههای مورد نظر بر اساس فصل زراعی منطقه انتخاب شده اند).

مقادیر F درصد کمبود در قابلیت اعتماد ۵۰٪ برای مخزن ۱ در ماه اول ۰/۶۰۲ ، در ماه هشتم ۰/۵۹۲ و در بقیه مخازن و ماهها ۰/۶۱۲ و همچنین در قابلیت اعتماد ۷۵٪ برای مخزن ۱ در ماه اول ۰/۶۶۵ و در بقیه مخازن و ماهها ۰/۶۷۵ است .

با اجرای مدل، مشخص شد که در دبی با احتمالهای مختلف علی رغم وجود کمبود فراوان، مقدار قابل توجهی از آب سیستم رودخانه در ماههایی که تقاضا وجود ندارد ، ذخیره نشده و از سیستم خارج می شود. نکته قابل توجه این بود که با اجرای مدل با فرض افزایش حجم مخازن (K چند برابر شود) ضمن کاهش مقدار کمبود از مقدار آب خروجی از سیستم نیز

جدول ۴ - مقادیر C درصد ضریب انحراف دبی کل به هریک از مخازن در ماههای مختلف در قابلیت اعتماد ۵۰٪

مخزن	ماه					
	۱	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۰/۰۶۱	۰/۵۹۲	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۰۴۸	۰/۶۱۲	۰	۰	۰	۰
۳	۰/۰۴۹	۰/۵۹۲	۰/۱۵۲	۰	۰	۱
۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۱۱۲	۰/۵۵۷	۰	۱
۵	۰/۱۱۲	۰/۱۵۵	۰/۳۳۳	۰/۴۴۳	۱	۰
۶	۰/۰۴۵	۰/۱۰۵	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۰۲۴	۰/۰۰۴	۰/۱۷۲	۰	۰	۰
۸	۰/۰۰۷	۰	۰/۰۴۸	۰	۰	۰
۹	۰/۰۱۸	۰/۰۰۵	۰/۱۸۳	۰	۰	۰

جدول ۵ - مقادیر b پارامتر بهره برداری برحسب m^3 در قابلیت اعتماد ۵۰٪

مخزن	ماه					
	۱	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۰	۴۷۸۸۷۳	۲۹۳۶۸۸	۱۵۲۸۹۸	۶۴۷۲۹	۰
۲	۰	۴۴۶۷۴۳	۳۶۱۲۳۶	۱۳۲۵۴۴	۵۶۰۸۵	۰
۳	۰	۱۶۵۸۹۴	۲۶۲۳۶۴	۱۳۲۵۴۴	۵۶۰۸۵	۰
۴	۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۷۸۷۱۴	۷۲۹۶۱	۰
۵	۰	۵۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۲۸۱۹۷۰	۱۲۱۳۶۸	۰
۶	۰	۳۵۹۱۵۵	۲۲۰۲۶۶	۱۱۴۶۷۳	۴۸۵۴۷	۰
۷	۰	۰	۱۱۰۱۳۳	۵۷۳۳۷	۲۴۲۴۴	۰
۸	۰	۰	۳۳۹۳۶	۱۹۱۱۲	۸۰۹۱	۰
۹	۰	۰	۱۱۱۹۰۳	۵۷۲۷۹	۲۴۲۱۵	۰

جدول ۶ - حجم آب خروجی از سیستم در ماههای مختلف برحسب m^3 در قابلیت اعتماد ۵۰٪

ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
Remain	۱۶۹۹۹۱	۷۰۷۰۹۸	۸۸۵۰۱۲	۷۷۵۵۲۶	۹۹۹۰۶۰	۲۲۹۳۱۲۵	۵۴۲۵۷۹۶	۱۲۴۸۶۶۸

جدول ۷ - مقادیر C درصد ضریب انحراف دبی کل به هریک از مخازن در ماههای مختلف در قابلیت اعتماد ۷۵٪

مخزن	ماه						
	۱	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۰/۱۳۱	۰/۰۱۷	۰/۱۶۶	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۱۰۲	۰/۰۹۷	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰/۱۰۳	۰	۰/۱۳۱	۰	۰	۰	۰
۴	۰/۱۵۲	۰	۰/۱۲۱	۰/۳۱۲	۰/۲۴۳	۰	۰
۵	۰/۲۲۸	۰	۰/۲۵۸	۰/۶۸۸	۰/۷۵۷	۱	۰
۶	۰/۰۹۵	۰	۰/۱۴۹	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۰۴۸	۰	۰/۰۷۵	۰	۰	۰	۰
۸	۰/۰۱۶	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰
۹	۰/۰۳۷	۰	۰/۰۸	۰	۰	۰	۱

جدول ۸ - مقادیر b پارامتر بهره برداری برحسب m^3 در قابلیت اعتماد ۷۵٪

مخزن	ماه						
	۱	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۰	۷۱۶۴۱	۴۰۰۷۱۵	۲۴۵۷۵۴	۱۲۷۹۴۳	۵۴۱۶۵	۰
۲	۰	۴۰۹۰۲۱	۳۷۳۸۲۹	۲۱۹۵۴۲	۱۱۰۹۱۱	۴۶۹۳۱	۰
۳	۰	۰	۲۷۱۰۰۲	۱۸۲۷۵۷	۱۰۱۹۶۵	۴۳۱۷۳	۰
۴	۰	۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۵۳۵۳۲	۶۴۹۹۸	۰
۵	۰	۰	۵۰۰۰۰۰	۴۲۵۱۲۱	۲۳۹۸۹۳	۱۰۱۵۵۹	۰
۶	۰	۰	۳۰۰۵۳۶	۱۸۴۳۱۸	۹۵۹۵۷	۴۰۶۲۴	۰
۷	۰	۰	۱۵۰۲۶۸	۹۲۱۵۸	۴۷۹۷۹	۲۰۳۱۲	۰
۸	۰	۰	۴۱۶۴۶	۲۸۳۹۸	۱۵۹۹۳	۱۷۷۱	۰
۹	۰	۰	۱۵۹۲۹۹	۹۳۶۳۹	۴۷۹۳۰	۲۰۲۶۳	۰

جدول ۹ - حجم آب خروجی از سیستم در ماههای مختلف برحسب m^3 در قابلیت اعتماد ۷۵٪

ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
Remain	۹۱۲۶	۵۹۰۷۶۹	۵۸۸۴۸۸	۶۸۴۲۸۸	۶۹۱۱۳۱	۱۶۱۴۰۰۷	۳۷۴۷۷۸۱	۰

مخزن تأثیری روی F ندارد. با افزایش حجم مخازن در دبی با احتمال های ۵۰٪ و ۷۵٪ مقدار F ثابت شده و بعد از آن دیگر کاهش نمی یابد. مقدار آب خروجی از سیستم نیز به حداقل مقدار خود می رسد. توجه شود که برای ماههای دوم تا هفتم، به علت عدم نیاز به آب کشاورزی مقدار کمبود، صفر است.

مشخص شد که در دبی با احتمال ۵۰٪ اگر مقدار ظرفیت مخزن ۲/۶ برابر شود، حداقل مقدار کمبود F برابر با ۱۰٪ شده و بعد از آن افزایش حجم مخزن تأثیری در F نداشته و همواره ثابت می ماند. برای دبی با احتمال ۷۵٪ با ۱/۴ برابر نمودن ظرفیت مخازن تنها از مقدار کمبود ۲٪ کاسته می شود. افزایش ظرفیت

مناسب از هر مدل و کاربردی کردن آن منوط به وجود داده‌های مورد نیاز مدل، ابزار اندازه‌گیری دقیق و کاربران فنی و ماهر می‌باشد. بنابر این سازمانهای ذیربط با لحاظ کردن موارد فوق می‌توانند عملاً از این مدل در برنامه بهره‌برداری خود استفاده کنند.

محصوله از مدل نشانگر عدم توجه کافی به محاسبه حجم نه مخازن در موقع احداث و توسعه بی‌رویه اراضی زیر ت در طول دوره بهره‌برداری است. بنابراین بایستی قبل از باد هرگونه مشکل ناشی از کمبود آب و برای داشتن حداکثر بازده و حداقل کمبود قبل از احداث هر سد نسبت به محاسبه حجم بهینه مخزن و سطح زیر کشت آن اقدام شود. استفاده

واژه نامه

- 1- Ripple
- 2- Mass Curve
- 3- Sequent Peak
- 4- Dorfmen

- 5- Liner Decision Rule
- 6- General Algebraic Modeling System
- 7-Objective Function

مراجع:

۱. جنیدی، ف.، "آگاهی‌های ایرانیان باستان از آب و بهره‌برداری از نیروی آن در ایران"، مجموعه مقالات نخستین همایش سد خاکی، ص ص ۳۰۰-۳۱۱، ۱۳۷۶.
2. Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Halth, D. A., *Water Resource Systems Planing and Analysis*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1981.
3. Thomas, H. A., and Burden, R. P., *Operation Researches in Water Quality Management*, Harvard University, Cambridge, MA, 1963.
4. Revelle, C., "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 1) Development of the Stochastic Model", *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 767-777, 1969.
5. Loucks, D. P., "Some Comments on Linear Decision Rules and Chance Constraints", *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 6, pp. 668-671, 1970.
6. Eastman, J., "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 3). Direct Capacity Determination and Interseasonal Constraints", *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 29-42, 1973.
7. Revelle, C., and Gundelach, J., "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 4). A Rule that Minimizes out put Variance", *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 197-203, 1975.
8. Revelle, C., and Kirby, W., "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 2. Performance Optimization", *Water Resources Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 1033-1044, 1979.
9. Yang, G. K., "Finding Reservoir Operating Rule", *J. Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 93, No. 6, pp. 297-321, 1967.
۱۰. ابریشم چی، ا. و آشتیانی، ه.، "برنامه‌ریزی، طرح و بهره‌برداری سد"، مجله استقلال، شماره ۳، ص ص ۳۱-۴۵، ۱۳۶۳.
11. Stedinger, J. R., "The Performance of LDR Models for Preliminary Design", *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 215-224, 1984.
12. Yeh, W. W., "Reservoir Management and Operating Models", *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 2, 1985.
13. Afshar, A., Marino, P., and Abrishamchi, A., "Reservoir Planing for Irrigation District", *ASCE*, Vol. 117, No. 1, 1991.
۱۴. پیرویان، ف. و افشار، ع.، "بهینه‌سازی و شبیه‌سازی طراحی و تحلیل عملکرد سدهای مخزنی"، مجموعه مقالات کنفرانس منطقه‌ای مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ص ۲۵۲-۲۳۹، ۱۳۷۴.
15. Jain, S. K., and Goel, M. K., "Reservoir Operation Studies of Sabramati System, India", *J. Water Resources Planing and Management*, pp.31-38, 1998.
16. Lound, J. R., and Guzman, J., "Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel", *J. Water Resources Planing and Management*, pp.143-153, 1999.
17. Jain, S. K., "Application of ANN for Reservoir in Flow Prediction and Operation", *J. Water Resources Planing and Management* Vol. 125, No. 5, pp. 263-271, 1999.
18. Hsu, N., and Kuo, J., "Proposed Daily Streamflow-Forecasting Model for Reservoir Operation", *J. Water Resources Planing and Management*, Vol. 121, No. 2, pp. 132-143, 1995.

۱۹. مهندسین مشاور آشناب، "گزارش هیدرولوژیکی حوضه
کلامرز"، ص ۸۰، ۱۳۷۶.

0. Brooke, A., Kendrick, D., and Mearaus, A.,

"GAMS, A Users Guide", GAMS Development
Corporation, 1996.