مقاله کوتاه

بهینه‌سازی توزیع آب در سیستم چند مخزنهٔ حوضهٔ آبریز رودخانهٔ کلامرز میانه

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

دانشکدهٔ کشاورزی ، دانشگاه تبریز

دانشکدهٔ 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 ۹مخزنهٔ حوضهٔ 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 صرفا برای تنظیم درون‌سالی مخازن به کار گرفته شد. با استفاده از یک قاعدهٔ خطی برداشت مقادیر پارامترهای بهره‌برداری برای ماههای نیاز و همه مخازن توسط مدل استخراج شد. همچنین با استفاده از مدل اقدام به محاسبهٔ مقادیر ضرایب انحراف دبی کل رودخانه به هر یک از مخازن و مقادیر حجم آب خروجی از سیستم در ماههای موردنظرمحاسبه 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 توسعهٔ بی رویه 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*

* - کارشناسی ارشد ** - استادیار *** - دانشیار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

the Kalamarz 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-reseruoir system, optimal operation optimizing Models, linear chance constrained model*

لیست علائم

$K_{(i)}$ ظرفیت مخزن iام

$DT_{(i,t)}$ حداکثر تقاضای مورد نیاز در مخزن i و ماه t

$i = 1,\ldots,9$ تعداد مخازن

$t = 1,\ldots,12$ تعداد ماهها

$QR_{(i)}$ مقدار حجم آب رودخانه با احتمال مشخص در ماه tام

$QD_{(i,t)}$ مقدار آب منحرف شده از سایت iام به سمت کانال iام برای ذخیره در مخزن iام

$QI_{(i,t)}$ مقدار آب ورودی به مخزن iام در ماه tام

$R_{(i,t)}$ مقدار آب خروجی از مخزن iام در ماه tام

$CL_{(i,t)}$ مقدار آب هرز رفته در طول کانال iام در ماه tام

$S_{(i,t)}$ حجم ذخیره مخزن iام در ابتدای ماه tام

$E_{(i,t)}$ حجم تبخیر از سطح مخزن iام در ماه tام

$C_{(i,t)}$ درصد آب انحرافی از حجم کل آب رودخانه به هر یک از کانالها در مخزن i در ماه t

$F_{(i,t)}$ درصد کمبود نسبت به تقاضا در مخزن i در ماه t

$b_{(i,t)}$ پارامتر بهره برداری در مخزن i در ماه t

Remain(t) حجم آب خروجی از سیستم در هر ماه t

$P_{(i,t)}$ قابلیت اطمینان در مخزن i در ماه t

$1-P_{(i,t)}$ ریسک یا احتمال شکست مخزن i در ماه t

P_r احتمال

B_i متغیر تصادفی

$g_i(x)$ تابع بردار تصمیم غیرتصادفی x

P_i احتمال با مقدار مشخص

t دوره

S_{t+1} حجم ذخیره در دوره t+1

S_t حجم ذخیره اولیه مخزن

R_t حجم خروجی از مخزن در دوره t

Q_t حجم ورودی به مخزن در دوره t

E_t حجم تلفات ناشی از تبخیر در دوره t

۱- مقدمه

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 گرفته‌اند[۱]. با توجه به وضع اقلیمی ایران که جزو مناطق خشک محسوب می شود، استفادهٔ بهینه از منابع آب برای توسعهٔ کشاورزی و صنعت حائز اهمیت است. تجارب سالهای اخیر نشان داده است که عدم توجه کافی به مقوله بهره‌برداری مناسب از منابع آب و تاسیسات آبی باعث هدر رفتن سرمایه‌های اولیه و حتی تخریبهای زیست محیطی شده است. از آنجایی که طراحی و ساخت تاسیسات آبی هزینه های هنگفتی را می طلبد، بی توجهی به مقوله بهره‌برداری 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[1] درسال ۱۸۸۳برای نخستین بار روش طراحی ترسیمی را برای طراحی یک مخزن پیشنهاد کرد. روش وی به صورت روش نمودار جرم[2] 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[3] نامید

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

که با این روش طراحی مخزن با توجه به تقاضای متغیر انجام می گیرد [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 [٤] با برنامه ریزی خطی و به کمک یک قاعدهٔ 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 نظرگرفتند. این پارامتر به وسیله حل برنامه ریزی خطی مشخص می شد. مسائل مورد حل می توانست 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 مخز نه کرد[۵]. در سال ۱۹۷۳ ، ایسمتن 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 [٦] .

در سال ۱۹۷۵، رول وگاندلیچ قاعده تصمیم‌خطی 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 می شود [۷] .

در سال ۱۹۷۹، رول و کربی کاربرد قاعده تصمیم خطی در طراحی و مدیریت مخازن را دردو 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 ۱۹٦۷ 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].

ابریشم‌چی وآشتیانی(۱۹۸۱) با ارائهٔ یک قاعدهٔ تصمیم‌خطی 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 (۱۹۸٤) مقایسه‌ای بین حجم مخزن و سیاست بهره‌برداری یک سد با استفاده از روش یک وچند قاعده تصمیم خطی انجام داده است [۱۱]..یح (۱۹۸۵) روش برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالی را که رول و همکاران اولین بار مورد استفاده قرارداده 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 درسال ۱۹۹٤ 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 [۱٤] .گوئل و جین در سال ۱۹۹۸ برای یک سیستم آب در هندوستان شامل ٤ 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 [۱٦] .

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 می رود [۱۸] .

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

جدول۱- حجم آبدهی رودخانه کلامرز با قابلیت اعتمادهای ۵۰٪ و۷۵٪ برحسب m^3

شماره ماه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
قابلیت اعتماد P (درصد)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۵۰	۳۰۱۰۸۷	۷۰۷۰۹۸	۸۸۵۰۱۲	۷۷۵۵۲٦	۹۹۹۰٦۰	۲۲۹۳۱۲۵	٥٤۲٥۷۹٦	۳۷۰۹۹۰٥	۱۰٤۱۷۹۰	۱۰۳۷۰۸	٤۷۱٤	٤۷۱٤
۷۵	۱۱۸٦۱۰	٥۹۰۷٦۹	٥۸۸٤۸۸	٦۸٤۲۸۸	٦۹۱۱۳۱	۱٦۱٤۰۰۷	٤۲۲۸٤٤٤	۲۱۸۰۲۱۸	۳۱۳٤۸۰	٤۷۱٤۰	۰	۰

۲- ویژگی های منطقه

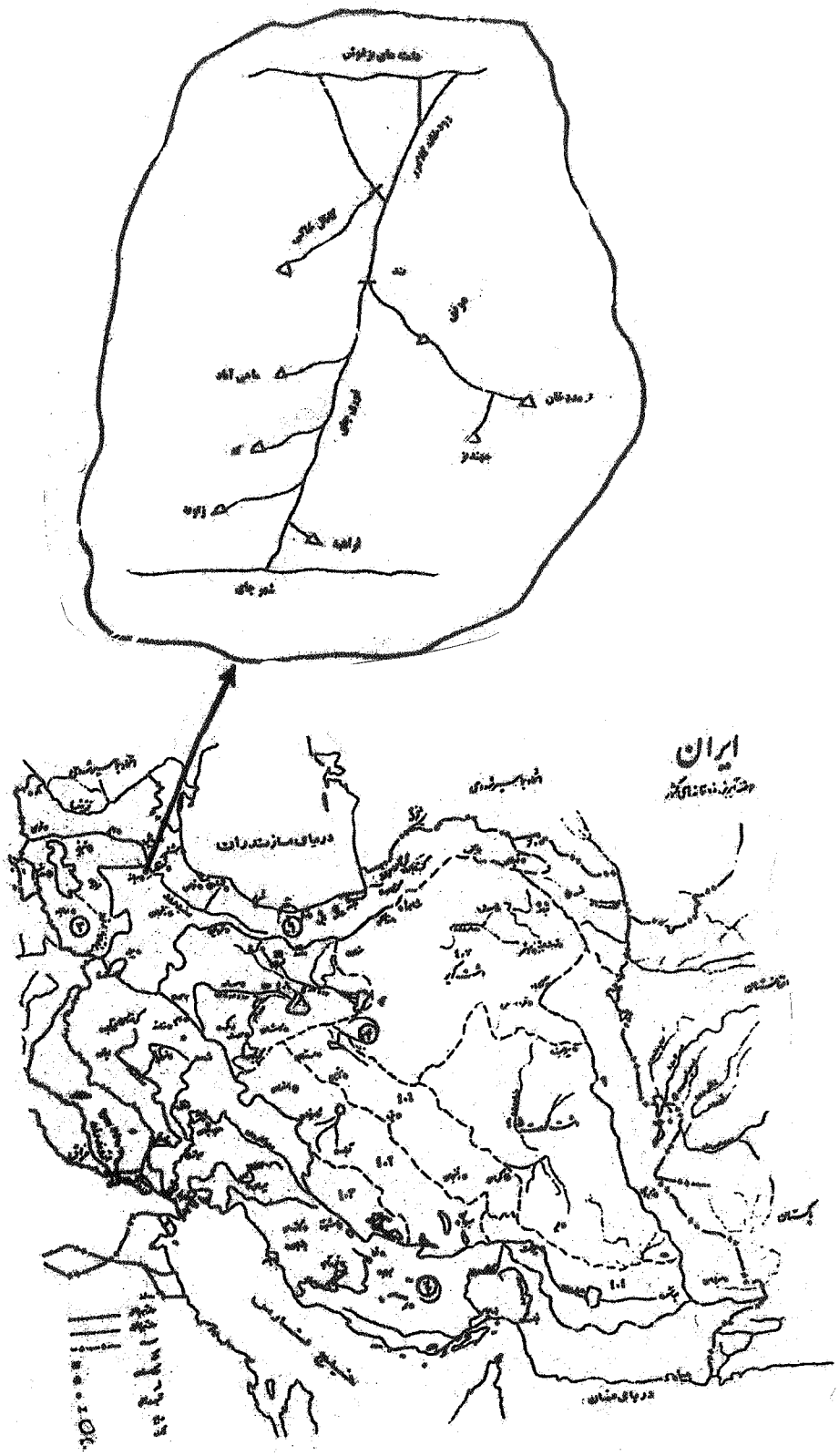
منطقهٔ مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی و درشمال شهرستان میانه و دامنه‌های جنوبی رشته کوه بزقوش با حداکثر ارتفاع ۳۱۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. منطقه کلامرز چای دارای طول جغرا فیایی 36′ 47°تا 47′ 47°(طول شرقی) و عرض جغرافیایی 35′ 37°تا 41′ 37° (عرض شرقی) است. رودخانه کلامرز به عنوان زهکش حوضه آبریز عمل کرده و از جهت شمال به جنوب جریان دارد. شکل (۱). این منطقه دارای بافت خاک 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 (ارباط میانه، استور، کوهسالار و میانه) به ترتیب ۳۵۹، ۳۲۱، ۳٤۱ و ۳۲٤ میلی‌متر برآورد شده است[۱۹] .داده‌های بارش ماهانه نشانگر آن است که ماههای فروردین واردیبهشت پرباران‌ترین ماهها، تیر و مردادکم باران‌ترین ماهها را تشکیل می دهند. رژیم بارندگی حوضه نشانگر آن است که درماههایی چون تیر و مردادکه نیاز آبی حداکثراست بارندگی نمی‌تواند جوابگوی تقاضا باشد [۱۹] . با استفاده از اطلاعات موجود در ایستگاههای فوق الذکرحجم آبدهی رودخانه کلامرز در طول ۲۵ سال و با به کارگیری منحنی تداوم جریان ، حجم آبدهی رودخانه با قابلیت اعتمادهای ۵۰٪ و۷۵٪ محاسبه شد،جدول (۱). دبی با قابلیت اعتماد ۷۵٪ بعنوان دبی نرمال در حالت کم آبی در نظر گرفته می شود. 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).

براساس اطلاعات وآمار اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی سطح اراضی زیر کشت مربوط به هریک از مخازن سدها برحسب هکتار محاسبه وحجم تقاضای هر یک از سدها تعیین شد. برروی رودخانه کلامرز ۹ مخزن احداث شده است که با استفاده از کانالهای منشعب شده از رودخانه در طول ماههای مرطوب پر می شوند. 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]



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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

جدول۲- نیاز ناخالص آبیاری برحسب مترمکعب درهکتار

ماه / الگوی‌کشت	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	کل دوره رشد
غلات	۱۱۳۰	۳۷۷۰	۱٤۳۰	۰	۰	۰	٦۳۳۰
یونجه	۲۸۰	۲۷۷۰	۳۷۲۰	۳۵۵۰	۲٦۰۰	۵۷۰	۱۳٤۹۰
حبوبات	۰	۱۰۸۰	۳۹٦۰	۲۷۵۰	۰	۰	۷۷۹۰
باغات	۰	۱٦۲۰	۲٤۹۰	۲۱۳۰	۱۵۷۰	۵۹۰	۸٤۰۰

جدول۳- سطح اراضی زیرکشت، تقاضای کل و حجم مفید هریک از مخازن

شماره مخزنi	نام سد	سطح اراضی زیرکشت (هکتار)	تقاضای کل (مترمکعب)	حجم(میلیون مترمکعب)
۱	کزرج	۱٦۰	۱۳۸۲۱٦۰	۱/۵
۲	صومعه کبودین	۱۵۰	۱۲۹٦۹٤۵	۱/۸
۳	مونق	۱۰۰	۹۲۰۳۵۰	۲/۲۵
٤	برنلیق مددخان	۱۲۰	۱۲۰۲۷٦۰	۰/۲۵
۵	جهندیز	۳۰۰	۲۵۹۱۵۵۰	۰/۵
٦	ماهی آباد	۱۲۰	۱۰۳٦٦۲۰	۰/٦۵
۷	که	٦۰	۵۱۸۳۱۰	۱/۲
۸	زاویه	۱۵	۱٤۱۱۱۵	۱/٤
۹	فراهیه	٦۰	۵۵۱۷۰۰	۰/۵

آب و برنامه‌ریزی در مورد نحوهٔ بهره‌برداری از آنها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این اهمیت در سیستمهای منابع آب سطحی که دارای عدم قطعیت اند، به صورت چشمگیر خود را نشان می‌دهد. به دلیل تنوع در اهداف و قیود، مسئلهٔ 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 در۲۰ سال گذشته در زمینه مهندسی منابع آب به دست آمده، گسترش روشهای بهینه‌سازی برای تصمیم‌گیری، طراحی و مدیریت سیستم‌های پیچیده منابع آب می‌باشد که بیشترآنها بر پایهٔ روشهای برنامه‌ریزی ریاضی است [۱۲] .

روشهای برنامه‌ریزی ریاضی یک تصمیم بهینه برای بهره‌برداری سیستم به دست می‌دهد، به‌طوری که همه قیود سیستم با توجه به بیشینه یا کمینه‌کردن تابع هدف، برآورد شود [۱۲] . در مدلهای خطی ارتباط بین متغیرهای تصمیم‌گیری چه درتابع هدف و چه در قیدها خطی است. روشهای حل بسیاری برای مدل های خطی ارائه شده است که از این میان می توان به روش سیمپلکس اشاره کرد . از آن جایی که بسیاری از مسئله ها درطبیعت غیرخطی اند، به دلیل برتریهای برنامه ریزی خطی، روشهای گوناگونی برای تبدیل رابطه‌های غیرخطی به خطی توسعه یافته است‌که ازکارآمدترین این روشها، می‌توان به روش خطی‌سازی رابطه‌ها اشاره کرد[٦].

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

٤- نرم افزار GAMS[1]

امروزه نرم افزارهای زیادی برای حل مدلهای ریاضی وجود دارد که یکی از این نرم افزارها ، GAMS است که به وسیلهٔ 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 می توان 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 می رود، GAMS/MINOS که برای هر دو مسائل خطی و غیرخطی کاربرد دارد و GAMS/ZOOM که برای ترکیب مسائل برنامه ریزی صحیح به کار می رود. تمامی این سه برنامه دارای نسخه هایی برای رایانه‌های شخصی و شبکه‌ای است [۲۰].

در GAMS که به وسیلهٔ 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 مجموعه ای به زبان GAMS است که به عنوان ورودی استفاده می شود. این مدل شامل عبارتی برای بیان و تعریف ساختار ورودی ها به تعریف داده‌ها و معادله‌هاست. فرمت داده‌های ورودی نیز آزاد است[۲۰].

۵- مدلهای محدودیت احتمالی

مدلهای محدودیت احتمالی برای طراحی اقتصادی مخزن (ظرفیت ها و هدف‌ها) وتعیین سیاست بهره‌برداری پیشنهاد شده است. حل این مدلها نشان می دهد 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 :

$$P_r[g_i(x) \le B_i] \ge P_i \qquad (۱)$$

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 می توان به صورت زیر نیز نوشت [۲]:

$$P_r[g_i(x) \ge B_i] \le 1-P_i \qquad (۲)$$

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 :

$$g_i(x) \le b_i^{(1-P_i)} \qquad (۳)$$

مفهوم رابطهٔ 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 معادلهای قطعی محدودیتهای احتمالی :

$$P_r[g_i(x) \ge B_i] \ge P_i \qquad (٤)$$

یا

$$P_r[g_i(x) \le B_i] \ge 1-P_i \qquad (٥)$$

برابرخواهد بود با :

$$g_i(x) \ge b_i^{(P_i)} \qquad (٦)$$

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

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

$$S_{t+1}=S_t+Q_t-R_t \qquad (۷)$$

که در آن S_{t+1} ذخیرهٔ در دورهٔ بعد است. در این رابطه Q_t حجم ورودی به مخزن در دورهٔ t است که یک متغیرتصادفی بوده و با داشتن طول دورهٔ آماری وتابع توزیع احتمالی مشخص

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

می شود. احجام ذخیره اولیه 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 می‌توانند به روش برنامه ریزی خطی حل شود . در قاعدهٔ خطی برداشت ازمخزن منفرد داریم :

$$R_t = S_t + Q_t - E_t - b_t \qquad (۸)$$

E_t تلفات ناشی از تبخیر در دورهٔ t و b_t پارامترقطعی، غیرمنفی ومجهول بهره‌برداری است. این قاعده برداشت بیان می‌کند که برداشت برابر با کل دبی آب قابل دسترس $(S_t + Q_t - E_t)$ منهای مقدار ثابت b_t است. با جایگذاری قاعده برداشت خطی در معادله پیوستگی زیر :

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t \qquad (۹)$$

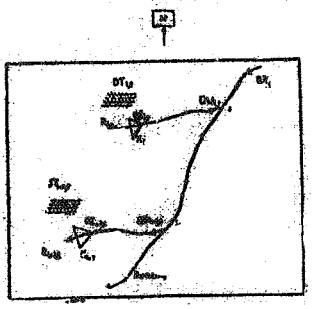
خواهیم داشت :

$$S_{t+1} = b_t \qquad (۱۰)$$

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

٦- الگوریتم و روش توسعهٔ مدل

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



$QR_{(t)}$ 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 $Remain(t)$، $S_{(i,t)}$، $R_{(i,t)}$، $QI_{(i,t)}$، $QD_{(i,t)}$، $F_{(i,t)}$، $b_{(i,t)}$ و $C_{(i,t)}$ مجهول اند. اما مقادیر $DT_{(i,t)}$ ، $QR_{(t)}$ و $K_{(i)}$ معلوم در نظر گرفته می شود. با توجه به کمبود اطلاعات و داده ها و به ویژه عدم وجود منحنی های سطح – حجم – ارتفاع مخازن ، ابعاد مشخص کانالهای خاکی مقادیر تلفات ناشی از تبخیر $E_{(i,t)}$ و نفوذ $CL_{(i,t)}$ در مدل صفردرنظر گرفته شد. بدیهی است در صورت وجود پارامترهای بالا به راحتی وارد مدل می شود .

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

$$QD_{(i,t)} = C_{(i,t)} \times QR_{(t)} \qquad \forall i,t \qquad (۱۱)$$

که در این معادله $C_{(i,t)} < 1$ و به عبارتی $\Sigma C_{(i,t)} \leq 1$ خواهد بود.

در طول کانال انتقال آب از سایت i تا مخزن i معادلهٔ پیوستگی زیر را خواهیم داشت :

$$QI_{(i,t)} = QD_{(i,t)} - CL_{(i,t)} \ \forall i,t \qquad (۱۲)$$

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

$$S_{(i,t)} \leq K_{(i)} \ \forall i,t \qquad (۱۳)$$

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

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

$$S_{(i,13)} = S_{(i,1)} \qquad \forall i \qquad (۱٤)$$

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:

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

$$R_{(i,t)} = S_{(i,t)} + QI_{(i,t)} - E_{(i,t)} - b_{(i,t)} \qquad \forall i,t \qquad (۱۵)$$

که در آن مطابق مدل محدودیت احتمالی خواهیم داشت :

$$S_{(i,t)} = b_{(i,t-1)} \qquad \forall i,t \qquad (۱۶)$$

و یا

$$S_{(i,t+1)} = b_{(i,t)}$$

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 ودرصورت نبود آب کافی کمبود نیز افزایش می یابد. بنا بر این:

$$P_r\,[DT_{(i,t)} - R_{(i,t)} \le F_{(i,t)}.DT_{(i,t)}] \ge P_{(i,t)} \qquad (۱۷)$$

با جایگذاری مقدار $R(i,t)$ از رابطهٔ (۱۵) خواهیم داشت :

$$P_r[DT_{(i,t)} - b_{(i,t-1)} + E_{(i,t)} + b_{(i,t)} - F_{(i,t)}.DT_{(i,t)} \le QI_{(i,t)}] \ge P_{(i,t)} \qquad (۱۸)$$

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

$$DT_{(i,t)} - b_{(i,t-1)} + E_{(i,t)} + b_{(i,t)} - F_{(i,t)}.DT_{(i,t)} \le Q\,I_{(i,t)}^{(1-p(i,t))} \qquad (۱۹)$$

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 :

$$\overset{7}{O}F: \text{Min } F(1,1) \qquad (۲۰)$$

$$S.T \quad |F(1,1) - F(i,t)| \le \Delta \qquad (۲۱)$$

در این مدل مقدار Δ برابر ۱٪ درنظرگرفته شد ه است . این مقدار می‌تواند با توجه به یکنواختی مورد انتظار از سیستم افزایش یابد. بدیهی است هرچه این مقدارکوچک 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 می‌شوند . مدل ارائه شده با توزیع یکنواخت کمبود در بین مخازن و در نتیجه بین زارعین، از بروز مسائل اجتماعی در منطقه جلوگیری می‌کند. عدم وجود داده‌های مربوط به حجم رسوب‌گذاری در مخازن و به تبع آن فقدان پارامتر رسوب در مدل را می‌توان 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 توجیه 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(٤) تا (۹).

(در این جداول ماههای مورد نظر بر اساس فصل زراعی منطقه انتخاب شده‌اند.)

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 شدکه در دبی با احتمالهای مختلف علی رغم وجود کمبود فراوان، مقدار قابل توجهی از آب سیستم رودخانه درماههایی 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

جدول ٤ – مقادیر C درصد ضریب انحراف دبی کل به هریک از مخازن درماههای 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
٤	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۱۱۲	۰/۵۵۷	۰	۱
۵	۰/۱۱۲	۰/۱۵۵	۰/۳۳۳	۰/٤٤۳	۱	۰
٦	۰/۰٤۵	۰/۱۰۵	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۰۲٤	۰/۰۰٤	۰/۱۷۲	۰	۰	۰
۸	۰/۰۰۷	۰	۰/۰٤۸	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	٤۷۸۸۷۳	۲۹۳٦۸۸	۱۵۲۸۹۸	٦٤۷۲۹	۰
۲	۰	٤٤٦۷٤۳	۲٦۲۳٦٤	۱۳۲۵٤٤	۵٦۰۸۵	۰
۳	۰	۱٦۵۸۹٤	۲٦۲۳٦٤	۱۳۲۵٤٤	۵٦۰۸۵	۰
٤	۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۷۸۷٦٤	۷۲۹٦۱	۰
۵	۰	۵۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۲۸۱۹۷۰	۱۲۱۳٦۸	۰
٦	۰	۳۵۹۱۵۵	۲۲۰۲٦٦	۱۱٤٦۷۳	٤۸۵٤۷	۰
۷	۰	۰	۱۱۰۱۳۳	۵۷۳۳۷	۲٤۲۷٤	۰
۸	۰	۰	۳۳۹۳٦	۱۹۱۱۲	۸۰۹۱	۰
۹	۰	۰	۱۱۱۹۰۳	۵۷۲۷۹	۲٤۲۱۵	۰

جدول ٦ – حجم آب خروجی از سیستم در ماههای مختلف برحسب m^3 در قابلیت اعتماد ۵۰٪

ماه	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸
Remain	۱٦۹۹۹۱	۷۰۷۰۹۸	۸۸۵۰۱۲	۷۷۵۵۲٦	۹۹۹۰٦۰	۲۲۹۳۱۲۵	۵٤۲۵۷۹٦	۱۲٤۸٦٦۸

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

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

مخزن		ماه					
	۱	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۰/۱۳۱	۰/۰۱۷	۰/۱٦٦	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۱۰۲	۰/۰۹۷	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰/۱۰۳	۰	۰/۱۳۱	۰	۰	۰	۰
٤	۰/۱۵۲	۰	۰/۱۲۱	۰/۳۱۲	۰/۲٤۳	۰	
۵	۰/۲۳۸	۰	۰/۲۵۸	۰/٦۸۸	۰/۷۵۷	۱	۰
٦	۰/۰۹۵	۰	۰/۱٤۹	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۰٤۸	۰	۰/۰۷۵	۰	۰	۰	۰
۸	۰/۰۱٦	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	۷۱٦٤۱	٤۰۰۷۱۵	۲٤۵۷۵٤	۱۲۷۹٤۳	۵٤۱٦۵	۰
۲	۰	٤۰۹۰۲۱	۳۷۳۸۲۹	۲۱۹۵٤۲	۱۱۰۹۱۱	٤٦۹۳۱	۰
۳	۰	۰	۲۷۱۰۰۲	۱۸۲۷۵۷	۱۰۱۹٦۵	٤۳۱۷۳	۰
٤	۰	۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۵۳۵۳۲	٦٤۹۹۸	۰
۵	۰	۰	۵۰۰۰۰۰	٤۲۵۱۲۱	۲۳۹۸۹۳	۱۰۱۵۵۹	۰
٦	۰	۰	۳۰۰۵۳٦	۱۸٤۳۱۸	۹۵۹۵۷	٤۰٦۲٤	۰
۷	۰	۰	۱۵۰۲٦۸	۹۲۱۵۸	٤۷۹۷۹	۲۰۳۱۲	۰
۸	۰	۰	٤۱٦٤٦	۲۸۳۹۸	۱۵۹۹۳	۱۷۷۱	۰
۹	۰	۰	۱۵۹۲۹۹	۹۳٦۳۹	٤۷۹۳۰	۲۰۲٦۳	۰

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

ماه	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸
Remain	۹۱۲٦	۵۹۰۷٦۹	۵۸۸٤۸۸	٦۸٤۲۸۸	٦۹۱۱۳۱	۱٦۱٤۰۰۷	۳۷٤۷۷۸۱	۰

مشخص شد که در دبی با احتمال ۵۰٪ اگر مقدار ظرفیت مخزن ۲/٦ برابر شود، حداقل مقدار کمبود F برابر با ۱۰٪ شده و بعد ازآن افزایش حجم مخزن تأثیری در F نداشته و همواره ثابت می ماند. برای دبی با احتمال ۷۵٪ با ۱/٤ برابر نمودن ظرفیت مخازن تنها از مقدار کمبود ۲٪ کاسته می شود . افزایش ظرفیت 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

ج حاصله از مدل نشانگر عدم توجه کافی به محاسبهٔ حجم
ه مخازن در موقع احداث و توسعه بی رویه اراضی زیر
ت در طول دوره بهره‌برداری است . بنابراین بایستی قبل از
یاد 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
مناسب از هر مدل و کاربردی کردن آن منوط به وجود داده‌های
مورد نیاز مدل، ابزار اندازه‌گیری دقیق و کاربران فنی و ماهر
می باشد. بنابر این سازمانهای ذیربط با لحاظ کردن موارد فوق
می توانند عملاً از این مدل در برنامه بهره‌برداری خود استفاده
کنند.

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 بهره برداری 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 Interaseasonal 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 بهره برداری سد"، مجلهٔ استقلال، شمارهٔ 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. ، "بهینه سازی و شبیه سازی طراحی و تحلیل عملکرد سدهای مخزنی"، مجموعه مقالات کنفرانس منطقه ای 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]

۱۹. مهندسین مشاور آشناب ،"گزارش هیدرولـوژیکـی حوضـه کلامرز"، ص ۸۰، ۱۳۷٦.

0. Brooke, A., Kendrick, D., and Mearaus, A., "GAMS, A Users Guide", GAMS Development Corporation, 1996.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1381.21.2.15.9]