

## مدل بهره برداری از مخزن سد ارس با استفاده از برنامه ریزی پویا

منصور مؤمنی<sup>۱\*</sup>، نادر رضایی<sup>۲</sup>

۱. استادیار دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۴/۹/۱، تاریخ تصویب: ۱۳۸۷/۴/۲۲)

### چکیده

در این تحقیق تلاش شده است مدل ریاضی جهت بهره برداری به هنگام از مخزن چند منظوره سد ارس با اهداف تامین نیازهای کشاورزی، تولید انرژی برق آبی و کنترل سیلاب ارایه، و معادلات حاکم بسط داده شود. روابط حاکم بر سیستم سد مخزنی شناسائی شده و این روابط در قالب مدل های برنامه ریزی پویای معین و پویایی تصادفی حل شوند. نتایج اجرایی این مدل ارایه دستورالعملی است که مقدار خروجی از مخزن را به صورت تابعی از حجم ذخیره اولیه مخزن و جریان ورودی در ماه جاری و جریان ورودی در ماه قبل نشان دهد. نظر به اینکه در هنگام بهره برداری به هنگام، مقدار جریان ورودی در ماه جاری مشخص نیست لذا به یک مدل پیش بینی جریان نیاز می باشد. همچنین بنا به فرض مارکوفی بودن فرایند آب دهی ماهانه رودخانه، از ماتریس های احتمال گذار بین حالات مختلف آب دهی استفاده می شود. نتایج تحقیق نشان می دهد مدل تصادفی، مقدار آب در دسترس بیشتری را در اکثر ماه های مختلف برای تامین مصارف کشاورزی و برق آبی در اختیار می گذارد بنابراین مدل تصادفی مناسب تر است.

### واژه های کلیدی:

**۱. مقدمه**

در سه دهه گذشته تحقیقاتی در زمینه توسعه مدل‌های ریاضی بهره‌برداری از مخازن انجام گردیده است که هدف از ارایه این مدل‌ها هماهنگ‌سازی توزیع آب ورودی به سد بین واحدهای زمانی یک دوره آبی با توزیع آب مورد نیاز بوده است. به نحوی که هم کمترین هزینه (یا بیشترین سود) را حاصل نماید و هم توسعه پایدار و هماهنگ زیست محیطی را شامل گردد.

در این تحقیق سعی شده است با توجه به تجربیات حاصل در زمینه الگوهای بهینه‌سازی و شبیه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری از سدهای مخزنی، مدلی برای سد ارس پیشنهاد شود. در این تحقیق به منظور اعمال مدیریت و تدوین سیاست‌های بهینه در بهره‌برداری از مخازن سدها برای تأمین تقاضای آب مدلی ارایه می‌گردد که مبتنی بر بهینه‌سازی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویا می‌باشد.

**۲. تعریف مسأله**

در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سدها مسأله این است که جهت تأمین نیازها نرخ خروجی مناسب از سد در طول زمان به چه میزان باشد. این امر ارتباط مستقیم با ورودی‌های مخزن دارد با توجه به معلوم بودن ورودی، حجم مخزن (سد) و میزان تقاضای آب، سیاست بهره‌برداری به هنگام از سد در بازه‌های زمانی ماهانه با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی پویا تعیین می‌شود.

در این جا سعی می‌شود روابط متغیرهای درگیر در بهره‌برداری مخزن سد ارس تعیین و مشخص شود و با توجه به اهداف ایجاد سد، مدل ریاضی را فرموله‌بندی کند تا در نحوه کنترل روی خروجی‌ها در جهت تأمین هر چه بهتر اهداف اقدام نمود. در طی این تحقیق اهداف زیر مدنظر بوده است

- الف) تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه و ایجاد طرحی برای نحوه‌ی کنترل روی خروجی‌های سد به منظور استفاده هر چه بهتر از منابع آب
- ب) حداقل نمودن خسارات وارده با تخصیص بهینه منابع آب بر نیازها
- ج) تعیین روابط متغیرها و پارامترهای موجود در سیستم سد ارس از نقطه نظر بهره‌برداری و احتمال تغییرات آن‌ها.

### ۳. ادبیات تحقیق

در دنیای واقعی مدیریت بهره برداری از مخازن سد می تواند بسیار پیچیده باشد. یکی از دلایل این پیچیدگی به متغیر بودن موجود در عناصر سیستم منابع آب مربوط می شود. در [۶] و [۱۴] روش های مختلف مورد استفاده در مسایل مدیریت مخازن مورد بررسی قرار گرفته که از بین روش های مورد بررسی، برنامه ریزی پویا را مناسب تر تشخیص داده اند. کاربردهای برنامه ریزی پویا برای تحلیل منابع آب توسط یا کویتز در ۱۹۸۲ مرور شده است [۱۳]. در ۱۹۸۳ جانسون و دیگران [۸] از برنامه ریزی پویای تصادفی، با توجه به عدم اطمینان ناشی از میزان ورودی های مخزن استفاده کردند. در ۱۹۹۶ از یک مدل فازی برای اهداف چندگانه و متغیرهای مختلف حاکم بر سدها استفاده کردند [۱۱]. در سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ نیز از شبکه های عصبی، نظریه فازی و فرایندهای تصادفی برای مدیریت مخازن سد استفاده شده است [۱۰] و [۱۲].

دانیل و دیگران [۵] نگرش های مختلف نسبت به مسایل منابع آب را به چهار دسته طبقه بندی کرده اند: برنامه ریزی خطی، برنامه ریزی پویا، برنامه ریزی غیرخطی، و شبیه سازی. با توجه به این که عموماً در مدیریت منابع آب اهداف مختلفی دنبال می شود [۷] و [۴] بسیاری از مدل های مذکور اهدافی چون تامین نیازهای آبی شرب و زمین های زراعی، تولید برق، کنترل سیلات، و ... را در نظر گرفته اند.

موارد متنوع و مسایل نمونه ای فراوانی از مدل های بهینه سازی مطرح شده که در آنها از این تکنیک ها و ترکیب آنها در مدل بهره برداری به جهت بهبود و تدوین سیاست های خروجی از مخزن به بحث گذشته شده است. برنامه ریزی پویا یکی از کاربردی ترین تکنیک هایی است که امروزه جهت مدل سازی سیستم های بهره برداری از مخازن مورد استفاده واقع می شود. اصولاً برنامه ریزی پویا برای مسایل و برنامه ریزی وضعیت هایی که در آن مراحل زمانی یا مکانی مورد توجه باشد مناسب است.

برای اولین بار ماسی و لیتل ایده هایی را در مورد استفاده از الگوریتم برنامه ریزی مرحله ای برای بهره برداری از مخزن سد مطرح کردند [۱۳].

مدل برنامه ریزی پویا به دو صورت قطعی و احتمالی جهت تولید سیاست بهره برداری از مخزن بکار گرفته می شود که در مدل های قطعی برای مشخص کردن سیاست های بهره برداری از یک سری ورودی معین (تاریخی یا مصنوعی) استفاده می کنند در حالی که برای گروه دوم از یک بیان آماری برای چگونگی وقوع جریان بهره می گیرند.

در تدوین قوانین بهره‌برداری ماهانه و سالانه از مخزن با استفاده از مدل بهینه‌سازی قطعی، از یک الگوریتم مشتمل بر برنامه‌ریزی پویای معین و پیش‌بینی ورودی مخزن استفاده می‌شود. تابع هدف به صورت حداقل کردن کل خسارت حاصل از بهره‌برداری در یک پریود زمانی مشخص است که به عنوان تابعی از خروجی محسوب می‌گردد.

در برنامه‌ریزی‌های احتمالی جهت‌گیری به سمتی است که در نهایت بتوان عدم قطعیت‌های موجود در تحلیل را به نحو موثرتری در فرایند تصمیم‌گیری دخالت داد. در اکثر مدل‌های اولیه به عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها اهمیت زیادی داده نمی‌شد زیرا که برای پیش‌بینی براساس یک سری زمانی اصولاً تحلیلی برای تعیین عدم قطعیت انجام نمی‌گردد. ولی مدل‌های بهینه‌سازی می‌بایستی یک سطح مطمئن از عدم قطعیت در شرایط جریان بعدی را مشخص کنند و از این جهت لازم است تا از جهت ثبت مقادیر پیش‌بینی جریان، از یک فرایند مناسب با دقت کافی استفاده به عمل آید.

به این جهت می‌توان از احتمالات انتقال از یک موقعیت به موقعیت بعدی در دسته‌های مدل پویای احتمالی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی با بهره‌گیری از مدل زنجیره‌ای مارکف استفاده نمود. در مدل فوق پیش‌بینی جریان برای ماه بعد، ورودی واقعی در ماه جاری و حجم مخزن در ابتدای ماه به عنوان متغیرهای موقعیت بکار رفته‌اند.

### ۱-۳. برنامه‌ریزی پویا

بلمن در سال ۱۹۵۷ روش برنامه‌ریزی پویا که روشی عمومی برای حداکثر کردن و حداقل کردن توابع ریاضی است معرفی کرد [۳].

برنامه‌ریزی پویا یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌هایی است که امروزه جهت مدل کردن سیستم‌های بهره‌وری از مخازن استفاده می‌شود برای آنکه بتوان تشخیص داد که آیا اصولاً می‌توان مسئله‌ای را با برنامه‌ریزی پویا حل کرد و اگر می‌شود راه حل آن چگونه است، ضرورت دارد که ساختار کلی مسایل برنامه‌ریزی پویا شناخته شود. فرم عمومی برنامه‌ریزی پویا به صورت زیر است:

Find  $d_1, d_2, \dots, d_n$

Which  $opt f(d_1, d_2, \dots, d_n) = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n r_i(d_i, x_{i+1})$

s.t :  $x_i = t_i(x_{i+1}, d_i)$  و  $i = 1, 2, \dots, n$

$d_i$ : متغیر تصمیم گیری

$X_i$ : متغیر حالت

$R_i$ : تابع برگشت

$i$ : مرحله

$t_i$ : معادله تبدیل مرحله به مرحله

$F_i$ : میزان انحراف از اهداف مرحله  $i$

تابع هدفی که در اینجا استفاده شده تابعی است که براساس حداقل سازی میزان انحراف از اهداف بیان گردیده. که علاوه بر خروجی از مخزن، تراز مخزن در پایان دوره را نیز به دست می دهد.

برنامه ریزی پویا در حل مسایل پیچیده با تعداد زیادی متغیر دارای مزیت تجزیه مؤثر به یک سری مسایل فرعی است.

مراحل برنامه ریزی پویا نشان دهنده نقاط مختلف در فضا و زمان و «حالات» نیز ممکن است گسسته یا پیوسته باشند ویژگی اصلی کاربرد برنامه ریزی پویا آن است که معمولاً به صورت چند مرحله برای یک مسأله به کار می رود.

برای تجزیه و تحلیل یک مسأله کلی به چند مرحله با تصمیم گیری های لازم در مرحله، مقدار هر مرحله بایستی شرط تفکیک پذیری و شرایط یکنواختی را برآورده سازد.

برنامه ریزی پویا در بهینه سازی سیستم های منابع آب بطور گسترده ای استفاده می شود. هال و بوراس [۶] معتقدند که مرسوم شدن و موفقیت این روش را می توان به این حقیقت نسبت داد که ویژگی های غیرخطی و تصادفی که مشخصه تعداد زیادی از سیستم های منابع آب است را می توان به زبان برنامه ریزی پویا بیان کرد.

به طور کلی برنامه ریزی پویا به دو شاخه قطعی و احتمالی تقسیم می شود:

#### الف) برنامه ریزی پویای قطعی

یک مدل پویای قطعی با رابطه برگشتی زیر مشخص می شود.

$$f_n(S_n, X_n) = \text{opt}\{C_n(S_n, X_n) \otimes f_{n+1}(S_{n+1})\}$$

$C_n(S_n, X_n)$ : سود یا خسارت اضافه شده در مرحله  $n$

$f_{n+1}(S_{n+1})$ : سود یا خسارت بهینه از مرحله  $n+1$  به بعد

$X_n$ : متغیر تصمیم

$S_n$ : وضعیت مرحله  $n$

$S_{n+1}$ : وضعیت مرحله  $n+1$

⊗: عملگر بسته به ساختار مسأله ممکن است جمع، ضرب یا غیر آن باشد.

علیرغم ماهیت تصادفی متغیرهایی از نوع آب‌دهی ماهانه استفاده از یک مدل پویای قطعی با تخمین‌های نقطه‌ای حاصل از مدل‌های پیش‌بینی، از مزیت سادگی تحلیل و محاسبه برخوردار است.

در این مدل رابطه برگشتی، رابطه پیوستگی تغییرات آب در مخزن است و رابطه برگشتی کلی مدل پویای قطعی بهره‌برداری از مخزن در بالا آورده شده است.

### ب) برنامه‌ریزی پویای تصادفی

برنامه‌ریزی پویای تصادفی با قطعی از این نظر متفاوت است که وضعیت در مرحله بعدی توسط وضعیت و اتخاذ یک رویه در مرحله جاری کاملاً مشخص و معین نخواهد شد. آنچه که در این جا معلوم است تابع وضعیت‌های مرحله بعدی است. به این ترتیب بهینه‌سازی از هر مرحله به بعد براساس امید ریاضی تابع هدف صورت می‌گیرد.

تابع برگشتی در مدل‌های احتمالی به قرار زیر است:

$$f_n(S_n, X_n) = \text{opt}\{C_n(S_n, X_n) \otimes E[f_{n+1}(S_{n+1})]\}$$

$S_n$ : وضعیت در مرحله  $n$

$E$ : امید ریاضی

$X_n$ : متغیر تصمیم در مرحله  $n$

$S_{n+1}$ : وضعیت در مرحله  $n+1$

با توجه به این که آب‌دهی رودخانه رفتاری تصادفی دارد اصولاً مدل‌های پویای تصادفی به نحو بهتری فرایند بهره‌برداری از مخزن را توصیف می‌کند.

در تکنیک بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پویای تصادفی متغیرهای موقعیت تحت تأثیر حجم و وردی‌های به مخزن طی آن دوره (روز، هفته، ماه) در نظر گرفته شدند که با دسته‌بندی‌های مناسب جهت افراز اقدام می‌شود. برای انتقال از یک وضعیت در دوره  $i$  به وضعیت دیگر در دوره  $i+1$  یک تابع انتقال احتمال در نظر گرفته می‌شود و این امر سبب شده که این فرایند به صورت یک زنجیره مارکوفی نظر شود.

### ۲-۳. مدیریت بهره برداری از مخازن

مدیریت بهره برداری از مخازن سدها عمدتاً به منظور تامین تعدادی از اهداف زیر صورت می گیرد [۱].

۱. شناسایی مخزن: در این حالت، هدف درک فرایندهای موجود در یک مخزن و عوامل مؤثر بر تغییرات کارکردی آن است. شناسایی زیر سیستم‌ها، ورودی‌ها و خروجی‌های مخزن و روابط بین ورودی و خروجی و تعامل زیر سیستم‌ها در این مقوله می‌گنجد.

۲. بهینه‌سازی عملکرد مخزن: استفاده از مدل‌ها به منظور تامین خروجی‌های مورد نظر از طریق تغییر در پارامترها یا اثرگذاری بر متغیرها.

۳. کنترل عملکرد مخزن: کنترل به منظور تامین خروجی‌های مورد نظر از طریق تغییر در پارامترها یا اثرگذاری بر متغیرها.

در مدیریت بهره برداری مخازن متناسب با ساختار و مشخصات مخازن از مدل‌های مناسب با آن‌ها استفاده می‌شود.

نوع و میزان آمار و داده‌های موجود در انتخاب مدل‌های تحلیل و ارزیابی بسیار مؤثر می‌باشد. پارامترها و اطلاعات مورد نیاز در مدیریت بهره برداری مخازن شرح زیر است:

الف) داده‌های هیدرولوژیکی

ب) نیازهای آبی

ج) مشخصات مخزن

د) رابطه حجم - سطح - ارتفاع مخزن

ه) مصارف انرژی

### ۴. مدل ریاضی

در این قسمت سعی می‌شود مدل برنامه‌ریزی پویا به گونه‌ای توسعه داده شود که منطبق بر شرایط حاکم بر سد ارس باشد.

سد ارس از نوع سد خاکی - سنگ‌ریزه با هسته رسی و با اهداف: تامین نیازهای آبی اراضی دشت مغان و میل، تولید انرژی برقآبی، مهار و کنترل سیلاب ایجاد و به منظور تحقق اهداف اقتصادی، اجتماعی و سیاسی توجیه پذیر ساخته شده است [۲]. حال به توسعه یک مدل ریاضی متناسب با اهداف مذکور پرداخته می‌شود.

### الف) تامین نیازهای آبی کشاورزی میل و مغان

تقاضا برای برداشت آب از سد ارس به کاربردهای کشاورزی و تامین آب نیروگاه برقآبی مربوط می شود. آب خروجی از مخزن ( $R_t$ ) شامل آب خروجی از دریچه های تخلیه سرریز ( $R_{1t}$ ) و آب خروجی از دریچه های توربین ( $R_{2t}$ ) می باشد. برای برآوردن این تقاضا ( $D_t$ )، به صورت زیر، انحراف از این هدف حداقل می شود:

$$f_1(t) = \text{Min} \{R_t - D_t\}$$

$$R_t = R_{1t} + R_{2t}$$

### ب) تولید نیروی برقآبی

تولید انرژی برقآبی طی هر دوره و در هر مخزن خاص به ظرفیت واحد نصب شده جریان گذرنده از توربین ها متوسط ارتفاع مؤثر مخزن، تعداد ساعات در دوره، ضریب واحد، و ثابت تبدیل حاصل ضرب جریان در ارتفاع و بازده نیروگاه به انرژی الکتریکی برحسب کیلووات بستگی دارد.

برای اجتناب از خاموشی نیروگاه و کار کردن توربین، کاهش ارتفاع آب در مخزن ( $H_t$ ) از تراز حداقل مجاز نسبت به توربین ( $H_{\text{Min}}$ ) و مقدار آب خروجی از دریچه های توربین ( $R_{2t}$ ) از میزان آب مورد نیاز برای کار کردن توربین ( $R_0$ ) حداقل می شوند:

$$f_2(t) = \text{Min} \{H_t - H_{\text{Min}} \text{ و } R_{2t} - R_0\}$$

### ج) مهار و کنترل سیلاب

علاوه بر ظرفیت های ذخیره فعال یک مخزن، ممکن است ظرفیت هایی را برای ذخیره موقت جریان های سیلاب در دوره های معین از سال تخصیص داد.

حجم کل مخزن ( $S_{\text{Max}}$ ) به صورت مجموع حجم ذخیره مرده ( $S_d$ )، حجم ذخیره فعال ( $S_t$ ) و حجم ذخیره سیلاب ( $S_c$ ) است و از آنجا که حجم ذخیره فعال لازم در طول سال تغییر می کند و ذخیره سیلاب در همه فصل ها لازم نیست، برای ارایه رابطه کنترل سیلاب به صورت زیر عمل می شود:

$$f_3(t) = \text{Min} \{(S_{\text{Max}} - S_t - S_d) - S_c \text{ و } R_{1t} - (R_{\text{Max}} - R_0)\}$$

انحراف حجم کل مخزن ( $S_{\text{Max}}$ ) با کسر حجم ذخیره فعال ( $S_t$ ) و حجم ذخیره مرده ( $S_d$ ) از حجم ذخیره سیلاب ( $S_c$ ) و انحراف آب خروجی از دریچه های تخلیه از حداکثر حجم آب قابل هدایت توسط بستر رودخانه با کسر میزان آب لازم برای کار کردن توربین حداقل می گردد.



این تعریف از ظرفیت کل، امکان موازنه بین حجم ذخیره فعال و ذخیره سیلاب را در صورتی فراهم می‌سازد که بتوان موازنه‌ای بین فصل‌های مختلف ایجاد کرد.

در نهایت، تابع کل،  $f(t)$ ، برابر با مجموع همه توابع فوق‌الذکر است:

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t)$$

در ضمن رابطه پیوستگی عملکرد مخزن به عنوان یک محدودیت غیرقابل اجتناب رعایت می‌شود.

### ۵. حل مدل ریاضی با برنامه‌ریزی پویا

با استفاده از یک مدل پویای قطعی ۱۲ مرحله‌ای می‌توان سیاست‌های بهینه بهره برداری در هر ماه را تعیین کرد که در آن از داده‌های به دست آمده از مدل پیش‌بینی استفاده می‌شود برای پیش‌بینی از یک مدل جمعی سری زمانی به کمک نرم افزار Minitab استفاده شده است.

توابع مدل همان توابع ارائه شده با محدودیت رابطه پیوستگی و تعادل کلی حجم مخزن می‌باشد.

متغیرهای تصمیم، مقادیر آب خروجی از سرریز ( $R_1$ ) و دریچه توربین ( $R_2$ ) می‌باشد و متغیر حالت آب در دسترس (حجم آب آخر ماه به علاوه آب ورودی) برای مصارف مختلف می‌باشد. ماه به عنوان یک مرحله در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از مقادیر آب خروجی می‌توان حجم آب مخزن در انتهای هر ماه را به دست آورد. مقادیر آب مخزن در ابتدای هر ماه (که همان حجم آب مخزن در انتهای ماه قبل می‌باشد) علاوه بر مقادیر آب‌دهی ماه قبل، آب در دسترس برای این ماه است که براساس این مقادیر سیاست بهینه هر مرحله به دست می‌آید.

حداکثر حجم آب در مخزن ۱۳۵۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که با فواصل ۲۵ میلیون متر مکعب به ۵۵ حالت تقسیم می‌شود. آب‌دهی رودخانه نیز با فواصل ۵۰ متر مکعب در ثانیه به چند حالت متفاوت در هر ماه تقسیم می‌شود [۱].

با توجه به مفروضات فوق‌الذکر، مدل پویای قطعی برای حالت‌های مختلف به صورت پیشرو حل می‌گردد و سیاست‌های بهره‌برداری بهینه ماه مربوطه براساس آن محاسبه می‌گردد. نتایج با توجه به حجم آب اولیه مخزن، آب‌دهی ماه قبل و نیازهای کشاورزی و

برقابی به دست می آید. این نتایج معرف میزان آب رها شده و سیاست‌های بهره برداری بهینه طی هر ماه است.

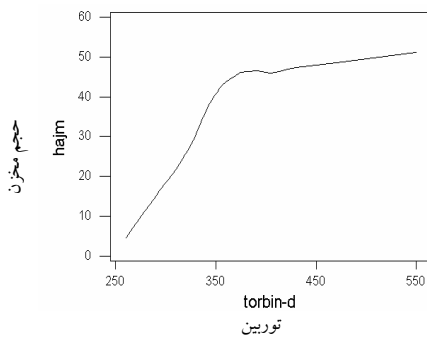
همان‌طور که قبلاً گفته شد در برنامه‌ریزی منابع آب، سری زمانی آب‌دهی بصورت یک فرایند مارکف در نظر گرفته می‌شود، بنابراین با گروه بندی داده‌های مربوط به هر ماه از سال می‌توان سری زمانی آب‌دهی‌های ماهانه را بصورت یک زنجیره مارکف در آورد به این ترتیب تخمین نقطه‌ای احتمالات گذار بین حالات مختلف به دست می‌آیند و با استفاده از آن‌ها در مدل پویای تصادفی، تصمیم‌گیری شرطی در مورد بهره برداری از مخزن میسر خواهد بود.

به این منظور توزیع فراوانی داده‌های مربوط به ماه‌ها را در قالب ۱۰ طبقه تقسیم‌بندی می‌کنیم و احتمال گذار بین طبقات در مابین ماه‌های مختلف را روی داده‌های نمونه محاسبه کرده و آن را به عنوان تخمین نقطه‌ای احتمال گذار به کل فرایند تعمیم می‌دهیم.

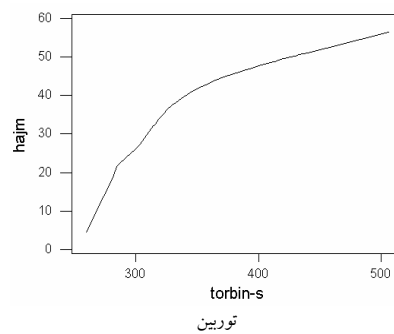
در حل مساله بهره برداری سد ارس ۵۵ حالت برای حجم مخزن در نظر گرفته می‌شود و آب‌دهی‌های محتمل نیز با توجه به احتمالات و زنجیره‌های به دست آمده از فرایند مارکفی مشخص شده است این زنجیره‌ها به صورت نمودارهای انتقال وضعیت ماهانه در طول یک سال مشخص می‌شود. که برای هر ماه از ترکیب آب ورودی و آب باقی مانده از دوره (ماه) قبل مقدار آب در دسترس به دست می‌آید. با الزام کردن محدودیت‌های نیازهای کشاورزی، برقابی و سیلاب، مقدار خروجی‌ها به تفکیک به دست می‌آید. برای حل مدل برنامه‌ریزی پویا در هر دو حالت قطعی و احتمالی برنامه‌هایی (حدود ۷۰۰ سطر) با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C نوشته شد که به علت طولانی بودن برنامه از آوردن آن خودداری می‌شود.

## ۶. بررسی نتایج

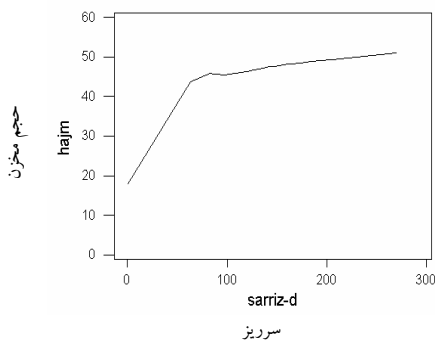
با استفاده از نتایج دو مدل حل شده (سیاست‌های پیشنهادی توسط دو مدل) تغییرات هر دو خروجی (توربین و سرریز) با توجه به حالت‌های مختلف مخزن در دو وضعیت قطعی و احتمالی بررسی می‌شود. این تغییرات به صورت نمودارهای شماره ۱ تا ۴ نشان داده می‌شوند. در این نمودارها در محور عمودی حجم خروجی توربین ذکر شده است. جهت مقایسه نتایج حاصل از حل دو مدل قطعی و تصادفی و به دست آوردن تفاوت میان جواب‌های حاصل از حل دو مدل می‌توان از یک آزمون مقایسه زوجی استفاده کرد.



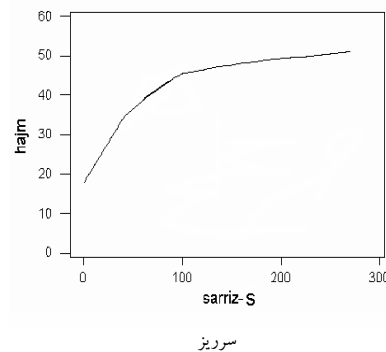
نمودار ۲. تغییرات توربین در حالت احتمالی



نمودار ۱. تغییرات توربین در حالت قطعی



نمودار ۴. تغییرات سرریز در حالت احتمالی



نمودار ۳. تغییرات سرریز در حالت قطعی

در اینجا ما یک نمونه  $n$  تایی از نتایج به دست آمده مدل‌های قطعی و پویای در نظر می‌گیریم متغیر تصادفی  $D_i$  را که از اختلاف نتایج انتخاب شده به دست می‌آیند، محاسبه می‌کنیم.  $(D_i = X_i - Y_i)$  اگر میانگین  $D_i$  در فاصله  $\bar{D} \pm t_{(\alpha/2, n-1)}$  قرار داشته باشد دو دسته از جواب‌ها باهم اختلاف معناداری ندارند و اگر در خارج از این فاصله باشد فرضیه وجود اختلاف معنادار بین عناصر جواب‌های قطعی و احتمالی تایید می‌شود.

آماره  $t_{\frac{\alpha}{2}}$  استیودنت با  $n-1$  درجه آزادی است و اگر نمونه بزرگتر از ۳۰ باشد می‌توان از آماره  $Z$  استفاده کرد. آزمون مقایسه زوجی جواب‌های به دست آمده از حل مدل‌های قطعی و تصادفی برای ماه‌های مختلف در سطوح حجمی متفاوت انجام می‌شود.

نتایج حاصله در نگاره ۱ و ۲ آمده است حرف d به معنای آن است که نتیجه مدل قطعی از نتیجه مدل تصادفی بیشتر است و حرف s به معنای آن است که نتیجه مدل تصادفی از نتیجه مدل قطعی بیشتر است.

نگاره ۱. مقایسه نتایج دو مدل برای توربین

ماه	D	Sd	فاصله اطمینان	
1	5.49	3.15	( 2.58 , 8.40 )	d
2	-3.3	5.17	( -5.11 , 4.45 )	s
3	0.057	2.09	( -1.88 , 1.99 )	d
4	58.6	35.6	( 2.56 , 9.15 )	d
5	2.97	2.22	( 0.91 , 5.02 )	d
6	-1.32	1.86	( -3.01 , 0.35 )	s
7	0.71	2.35	( -1.46 , 2.89 )	d
8	-0.61	1.98	( -2.48 , 1.22 )	s
9	-2.89	7.48	( -9.881 , 4.02 )	s
10	-1.33	2.69	( -7.62 , 0.64 )	s
11	-0.28	2.51	( -2.61 , 2.04 )	s
12	-3.04	3.76	( -6.52 , 0.44 )	s

نگاره ۲. مقایسه نتایج دو مدل برای سرریز

ماه	D	Sd	فاصله اطمینان	
1	-2.14	2.72	( -4.66 , 0.37 )	s
2	1.33	3.87	( -2.26 , 4.91 )	d
3	-1.85	2.43	( -4.11 , 0.39 )	s
4	-2.19	3.05	( -5.00 , 0.63 )	s
5	0.01	0	-	d
6	-2.8	0.21	( -3.00 , -2.60 )	s
7	-1.97	2.74	( -4.5 , 0.56 )	s
8	-2.1	2.86	( -4.75 , 0.55 )	s
9	-2.1	2.71	( -4.61 , .041 )	s
10	-3.49	4.46	( -7.62 , 0.64 )	s
11	-2.29	3.08	( -5.14 , 0.57 )	s
12	-2.7	3.43	( -5.88 , 0.48 )	s

با توجه به نتایج حاصله می توان گفت مدل تصادفی مقدار آب در دسترس بیشتری را در اکثر ماه های مختلف برای مصارف کشاورزی و برقابی در اختیار می گذارد بنابراین مدل تصادفی بهتر تشخیص داده می شود.

## ۶. نتیجه گیری

مدیریت عملیات بهره برداری از یک سد بسیار پیچیده و با متغیرهای مختلف و از نوع احتمالی مواجه است. نوع و میزان اطلاعات و آمار موجود در مدیریت بهره برداری مخازن و انتخاب مدل تحلیلی مؤثرند. اطلاعاتی از قبیل نیازهای آبی، داده های هیدرولیکی،

مشخصات مخزن، مصارف انرژی و رابطه حجم - سطح - ارتفاع و مخزن در این مقوله جای می گیرند.

تابع هدف در مدل پیشنهادی به گونه‌ای توسعه داده شد تا اهداف مختلفی همچون تأمین نیازهای آبی کشاورزی، تولید نیروی برقی و مهار و کنترل سیلاب را در نظر بگیرد و میزان انحراف از مقادیر مورد انتظاری را حداقل کند. آزمون مقایسه زوجی برای مقایسه دو مدل پویای قطعی و احتمالی بهره‌برداری از سد ارس، نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین دو مدل وجود دارد. به عبارت دیگر شواهد کافی وجود دارد که مدل پویای احتمالی به نحو مناسب‌تری پاسخگوی شرایط حاکم بر سد است.

وجه تمایز مدل موجود با مدل‌های قبلی یکی تابع هدف است که اهداف مختلف (تأمین نیازهای آبی کشاورزی، تولید برق آبی، و مهار و کنترل سیلاب) را در نظر می‌گیرد و دیگر مقایسه استفاده از دو مدل پویای قطعی و احتمالی است که نتایج برتری مدل دوم (احتمالی) را تایید می‌کند.

## منابع

۱. طرح جامع آب کشور، حوضه آبریز ارس، ۱۳۸۰.
۲. کارنامه سازمان آب و برق آذربایجان، ۱۳۵۴.
3. Bellman, R. (1957). *Dynamic programming*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
4. Cohon, J. and D. H. Marks, (1974). Multi objectives in water resources systems analysis: the surrogate worth tradeoff method, *Water Resources Research*, Vol 10. No. 4, pp. 615-625.
5. Daniel P.L., Stedinger J.R. and Haith D.A. (1981). *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice Hall.
6. Daniel, L., Stedinger J.R. and Haith D.A. (1981), "*Water Resource Systems Planning and Analysis*", Prentice Hall, Inc.
7. Hall W.A., and Buras N. (1961). "The Dynamic Programming Approach to Water Resource Development", *Journal of Geophysics Research*, No. 66.

8. Johnson S.A., Stedinger, J., Shoemaker, Li Y., and Tejada-Guibert, J.A., (1993). Numerical solution of continuous-state dynamic programming using linear and spline interpolation, *Oper. Res.* Vol. 41, No. 13, pp. 484-500.
9. Liang Q., Jonson L.E. and Yu Y.S., (1996). A Comparison of two methods for multiobjective optimization for reservoir operation, *Water Resources Research*, Vol 32, No.2.
10. Mousavi, S.J., Karamouz, M., and Menhadj, M.B., (2004). Fuzzy-State stochastic dynamic programming for reservoir operation, *Journal of Water Resource Planning and Management*, Vol. 130, No. 6, pp. 460-470.
11. Russell, S.O., and Campbell, P.E. (1996). Reservoir operating rules with fuzzy programming, *Journal of water Resource Planning and Management*, Vol. 122, No. 3, pp. 165-170.
12. Tilmant, A., Vanclooster, M., Ducketein L., and Persoons, E. (2002). Comparison of fuzzy and nonfuzzy optimal reservoir operating policies, *Journal of Water Resource Planning and Management*, Vol. 128, No. 6, pp. 390-398.
13. Yakowitz, S., (1982). Dynamic programming application in water resources, *Journal of Geophysics Research*, Vol 18 , No. 66.
14. Yeh, W. W-G. (1985). Reservoir management and operation models: a state of the art review, *Water Resource Research*, Vol. 21, No.12, pp. 1797-1818.