

## توسعه سیاست جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره در شرایط محدودیت منابع آب با استفاده از مدل MODSIM 8.1

پری ناز رزاقی<sup>۱</sup>، حسین بابازاده<sup>۲\*</sup>، مجتبی شوریان<sup>۳</sup>

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات تهران؛ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ گروه مهندسی آب؛ تهران؛ ایران

(۲) استادیار؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات تهران؛ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ گروه مهندسی آب؛ تهران؛ ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [h\\_babazadeh@srbiau.ac.ir](mailto:h_babazadeh@srbiau.ac.ir)

(۳) استادیار؛ دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۲

### چکیده

توزیع نامناسب بارندگی در بسیاری از نقاط کشور باعث شده است تا تامین مطمئن آب از طریق ذخیره‌سازی انجام شود. در سال‌های اخیر احداث سدهای مخزنی بزرگ برای ذخیره آب گسترش یافته است. احداث این مخازن ضمن تحمیل هزینه‌های گزاف، مسائل زیست‌محیطی متعددی را نیز به همراه داشته است. وقوع خشکسالی‌های متوالی باعث شده است تا سیاست جیره‌بندی آب بیش از پیش مورد توجه بهره‌برداران مخازن قرار گیرد. هدف این تحقیق توسعه و اعمال سیاست جیره‌بندی برای کاهش تنش‌های شدید در دوره‌های خشکسالی از طریق ذخیره‌سازی در ماه‌های قبل از تنش می‌باشد. بدین منظور، سد مخزنی نمود و زیرحوضه پایین‌دست آن با استفاده از مدل MODSIM8.1 شبیه‌سازی شد. پس از واسنجی مدل، الگوریتم جیره‌بندی توسعه داده شده در محیط داخلی مدل کدنویسی شد و مدل برای دو حالت با و بدون جیره‌بندی اجرا گردید. شاخص‌های درصد تامین، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری سیستم برای دو حالت محاسبه شد. نتایج نشان داد که اعمال سیاست جیره‌بندی بر اساس الگوریتم توسعه یافته باعث تعدیل تنش‌های شدید و توزیع یکنواخت آن در دوره بهره‌برداری می‌گردد. با اعمال سیاست جیره‌بندی، شاخص‌های اعتمادپذیری و پایداری سیستم به ترتیب به میزان ۱۰ و ۷ درصد افزایش می‌یابد و شاخص‌های آسیب‌پذیری و سرعت برگشت‌پذیری ۱۸ و ۹ درصد کاهش می‌یابد که نشان از بهبود این شاخص‌ها در شرایط اعمال سیاست جیره‌بندی در سیستم دارد.

**کلید واژه‌ها:** جیره‌بندی؛ سیاست بهره‌برداری؛ شبیه‌سازی مخزن؛ MODSIM 8.1

### مقدمه

(۱۳۷۸). امروزه به دلیل محدودیت کمی و کیفی منابع آبی، خطرات ناشی از آلودگی، پراکندگی این منابع در مناطق مختلف و همچنین توزیع غیریکنواخت مکانی و زمانی منابع و مصارف، ذخیره و برنامه‌ریزی منابع آب به روش‌های مختلف به منظور بهره‌برداری از آب در دوره‌های طولانی مدت‌تر از طریق احداث سدهای مخزنی، بندهای

هدف از مدیریت جامع منابع آب، شناخت مولفه‌ها و عدم قطعیت‌های آنها، مشخص و روشن نمودن ارتباطات بین مولفه‌ها و اثرات مستقیم و غیرمستقیم بین مولفه‌ها می‌باشد تا با حل یک مشکل و برنامه‌ریزی برای آن مولفه، قسمت‌های دیگر سیستم تحت‌الشعاع قرار نگیرد (کارآموز،

سه<sup>۳</sup> و تابع نمایی<sup>۴</sup> به این نتیجه رسیدند که می‌توان با انتخاب روش جیره‌بندی دو نقطه‌ای به بهترین سیاست جیره‌بندی دست پیدا کرد. با توجه به مطالعات Draper (۲۰۰۱) در کالیفرنیا در یک دوره دراز مدت، مشخص شده است که توابع درجه دو به عنوان توابع سود، جواب‌های بهتر و دقیق‌تری نسبت به سایر توابع غیر خطی به همراه دارند. بر اساس مطالعه Dariane (۲۰۰۹) بر روی سد مخزنی کرج با استفاده از مدل اصلاح شده‌ی جیره‌بندی عمومی Shih و Revelle (۱۹۹۴) مشخص گردید برای دوره‌های خشک یک تا سه ساله، معیارهای اعتمادپذیری<sup>۵</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۶</sup> کاهش و برگشت‌پذیری<sup>۷</sup> افزایش می‌باید و مدل جیره‌بندی، برتری محسوسی در کاهش خسارات ناشی از خشکسالی نشان داد. Cai و You (۲۰۰۸) با استفاده از مطالعات پیشین Pegram (۱۹۸۰) و تغییر معادله‌ی مورد استفاده‌ی او به این نتیجه رسید که در مواقعی که تابع هدف خطی باشد SOP بهترین روش می‌باشد. آذرانفر و شهسواری (۱۳۸۵) با استفاده از مدل آبدهی و جیره‌بندی، منحنی فرمان سد کمندان را مقایسه نمودند. با توجه به این بررسی، مدل آبدهی نتیجه خوبی نداشت و مدل جیره‌بندی برای بهره‌برداری در شرایط بحرانی پیشنهاد شده است.

تحقیقاتی نیز توسط Felfelani و همکاران (۲۰۱۳) جهت اعمال سیاست جیره‌بندی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم بر روی سد مخزنی دز انجام شد.

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم‌های ذخیره آب، بیشتر از میانگین و واریانس سود و ضرر یا بعضی پارامترهای بهره‌برداری استفاده می‌شده است. Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) شاخص‌های قابلیت اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و سرعت برگشت‌پذیری را جهت ارزیابی عملکرد احتمالی معرفی کردند. به نقل از محمدی و منتصری (۱۳۸۷)،

انحرافی و سایر سازه‌های تنظیمی صورت می‌گیرد (خوشدوز و همکاران، ۱۳۹۲). بهره‌برداری از چنین سازه‌هایی بر اساس سیاست‌های مختلفی همچون سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP<sup>۱</sup>) و سیاست‌های جیره‌بندی متنوع انجام می‌شود.

در زمینه‌ی قواعد بهره‌برداری مخازن، سیستم‌های مختلفی وجود دارد. ساده‌ترین این قواعد بهره‌برداری، سیستم SOP یا سیاست استاندارد بهره‌برداری (منحنی S) است که توسط Loucks و همکاران (۱۹۸۱) برای اولین بار مطرح و پایه‌ریزی شد. عمادی و همکاران (۱۳۸۸) در بررسی مدل SOP به این نتیجه رسیدند که کمبودهای ایجاد شده در این مدل بسیار شدید می‌باشد. عمادی و خادمی (۱۳۹۰) در ادامه مطالعات به این نتیجه رسیدند که روش SOP در طراحی و بدست آوردن حجم مخزن و تراز نرمال مفید است و جهت تعدیل میزان کمبود و کاهش خسارت باید از سیاست‌هایی با انعطاف‌پذیری بیشتر در دوره بهره‌برداری استفاده شود.

جهت اعمال سیاست‌های کاربردی تعدیل تنش‌ها همچون جیره‌بندی، Shih و Revelle (۱۹۹۴) جیره‌بندی پیوسته را ارائه نمودند. Cai و You (۲۰۰۸) بر اساس مطالعات قبلی Maass و همکاران (۱۹۶۲)، Shih و Revelle (۱۹۹۴) با اعمال ضریبی بر میزان رهاسازی، سیاست جیره‌بندی را در مدل‌های عددی و مفهومی ارائه کرده است. به نقل از Draper (۲۰۰۱) انواع جیره‌بندی شامل:

جیره‌بندی تک نقطه‌ای توسط Shih و Revelle (۱۹۹۴)، جیره‌بندی دو نقطه‌ای توسط Philipose و Srinivasan (۱۹۹۶)، جیره‌بندی پیوسته توسط Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲)، جیره‌بندی ناحیه‌بندی شده توسط Hrisch (۱۹۷۸) می‌باشد. Draper و Lund (۲۰۰۴) با بررسی توابع هدف سیاست‌های جیره‌بندی و روش SOP و فرضیات و قیود مرتبط و توابع سود در سه حالت توابع درجه دو<sup>۲</sup>، درجه

<sup>۳</sup> Cubic

<sup>۴</sup> Power Value

<sup>۵</sup> Reliability

<sup>۶</sup> Vulnerability

<sup>۷</sup> Resiliency

<sup>۱</sup> Standard Operation Policy

<sup>۲</sup> Quadratic

Triana (۲۰۰۷) نرم‌افزارهای Arc GIS و MODSIM را با یکدیگر تلفیق کرد و الحاقیه<sup>۴</sup> GEO\_MODSIM را در محیط ArcMap توسعه دادند.

در این تحقیق در نظر است با توسعه الگوریتم‌های مدیریتی در نرم‌افزار شبیه‌ساز، میزان تنش‌های موجود در تامین مصارف را تعدیل و روند بروز شکست در مصارف مختلف را یکنواخت‌تر نمود. این اعمال با استفاده از سیاست‌های جیره‌بندی و تعدیل تنش‌ها، شدت خسارات ناشی از تنش‌های شدید را کاهش و نحوه‌ی تامین مصارف را بهبود می‌دهد.

#### مواد و روش‌ها

با توجه به اهداف مورد نظر این تحقیق، سد مخزنی نمرود واقع در استان تهران، شهرستان فیروزکوه و دشت پایاب آن (دشت گرمسار) به عنوان منطقه‌ی مورد بررسی انتخاب گردید. این سد چند منظوره به ترتیب اولویت به منظور تامین نیازها شرب، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی مناطق فیروزکوه و گرمسار در دست اجرا می‌باشد. این سد بر روی رودخانه نمرود واقع شده است که پس از تلاقی با شاخه‌های اصلی گورسفید، سیمین‌دشت-دلیچای از طریق حبله‌رود به دشت گرمسار می‌ریزد. در این مسیر ۳ ایستگاه هیدرومتری نمرود، حبله‌رود و بن‌کوه واقع شده‌اند. همچنین داده‌های چاه‌های پیرومتری جهت بررسی روند افت آبخوان دشت گرمسار استفاده شده است. در شکل ۱ نمای کلی از سیستم رودخانه‌ای و نقاط مصرف منطقه مورد بررسی ارائه شده است.

بررسی‌ها در این تحقیق در شرایط وضع موجود، احداث سد بدون اعمال جیره‌بندی و احداث سد با اعمال جیره‌بندی انجام شده است. به منظور ارزیابی اثر اعمال سیاست جیره‌بندی بر تامین نیازها در مخازن ذخیره آب، ابتدا سیستم رودخانه‌ای مد نظر توسط نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و با توجه به بیلان منابع و مصارف منطقه در وضع موجود، مقادیر نفوذ، تبخیر از سطح آزاد آب و روابط

Zongxue و همکاران (۱۹۹۶) شاخص آسیب‌پذیری را به صورت نسبت تمام آب عرضه شده در طول دوره‌های شکست به کل تقاضا در طول همان دوره‌های شکست، توصیف کردند. با توجه به عدم وجود رابطه‌ی همگرایی بین شاخص‌های عملکرد مخزن در برخی بررسی‌ها، Loucks و van Beek (۲۰۰۵) شاخص پایداری<sup>۱</sup> را که ترکیبی از سه شاخص هاشیموتو بود را معرفی نمود. حیدری و همکاران (۱۳۸۹) با کمک شاخص‌های تعیین عملکرد و تحلیل حجم مخزن سد باراندوز با کمک تحلیل رفتار (BA) اقدام به ترسیم منحنی‌های فرمان کردند.

به منظور شبیه‌سازی سیستم مخزن و حوضه آبریز، مدل‌های شبیه‌سازی بسیاری تاکنون توسعه داده شده و یا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل MODSIM8.1 یک نرم افزار شبیه‌سازی جامع سیستم حوضه آبریز است که بر اساس الگوریتم برنامه‌ریزی شبکه جریان و یا NFP<sup>۲</sup> عمل کرده و تاکنون در بسیاری از پروژه‌های مطرح در سطح دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از خصوصیات بارز این مدل امکان ویژه‌سازی<sup>۳</sup> در محیط نرم‌افزار است که با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی در محیط MODSIM، امکان تعریف و پیاده‌سازی سناریوهای مختلف بهره‌برداری و تصمیم‌گیری شرطی در کنار بهینه‌سازی تخصیص را برای کاربر فراهم می‌سازد. Shourian و همکاران (۲۰۰۸) مدل MODSIM8.1 و الگوریتم بهینه‌سازی هوش تجمعی ذرات (PSO) را با یکدیگر تلفیق و مدل PSO-MODSIM را که مدلی کاربردی جهت تصمیم‌گیری بهینه در خصوص طراحی و بهره‌برداری در سطح حوضه آبریز می‌باشد، بر روی حوضه رودخانه سیروان پیاده‌سازی کردند. در ادامه‌ی مطالعات پیشین Shourian و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی مدل MODSIM و الگوریتم PSO و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) تلاش کردند تا راهی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب بین مصارف بالادست شهر سیروان پیدا کنند.

<sup>1</sup> Sustainability

<sup>2</sup> Network Flow Programming

<sup>3</sup> Customization

<sup>4</sup> Extension

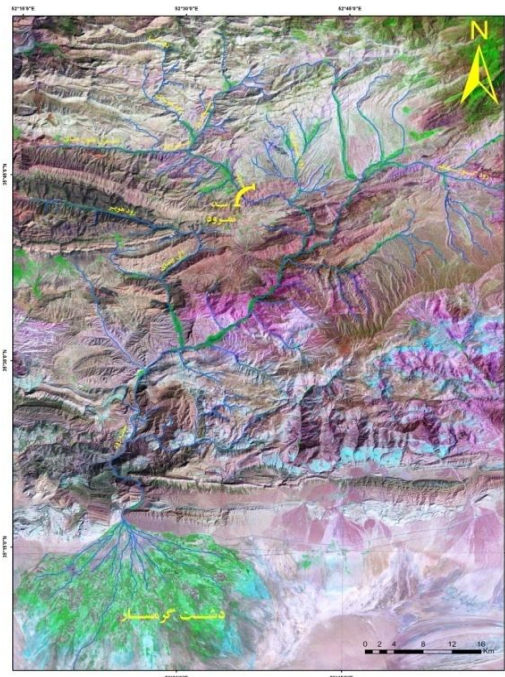
گونه‌ای اعمال گردد که مدل طی شبیه‌سازی متوالی سیستم حوضه آبریز، تنش‌های موجود در تأمین نیازها را حداکثر از چهار ماه قبل از بروز تنش تشخیص و سیاست جیره‌بندی برداشت تا سطح قابل قبول تأمین نیازها را اعمال نماید. این تدابیر به صورت برگشتی<sup>۱</sup> عمل می‌نمایند. بر این اساس قبل از اولین شبیه‌سازی، آستانه قابل قبول تأمین<sup>۲</sup> نیازها برای هر نیاز به مدل معرفی گردید. در این مطالعه میزان حد آستانه درصد تأمین نیاز شرب ۹۵٪، حد آستانه‌ی نیاز صنعت ۹۰٪ و حد آستانه نیاز کشاورزی ۷۰٪ ماهانه در نظر گرفته شده است. از این حدود آستانه در مدل به منظور محدود کردن میزان تأمین نیازهای مختلف در ماههایی که تأمین با تنش مواجه بوده استفاده شده است. در واقع میزان مصارف بر اساس این حدود به دو دسته مصارف اولیه (رابطه ۱) و ثانویه (رابطه ۲) تقسیم شده‌اند، که مصارف اولیه نیاز به تأمین قطعی دارد، اما مصارف ثانویه در صورت وجود آب کافی تأمین می‌گردند.

$$Dem 1 = Coef \times Total Dem \quad (1)$$

$$Dem 2 = (1 - Coef) \times Total Dem \quad (2)$$

در صورت عدم تأمین نیازهای ثانویه خسارت چندانی رخ نمی‌دهد، ولی عدم تأمین نیازهای اولیه، سیستم را با خسارات شدید مواجه می‌کند. اگر محدود کردن میزان مصارف به حدود نیاز اولیه در ماه بروز تنش پاسخگوی تعدیل تنش‌ها نباشد، در ماه قبل از بروز تنش نیز مصارف حداکثر به میزان نیاز اولیه محدود می‌گردد تا از بروز تنش شدید در ماه بعد جلوگیری شود. این روند تا حداکثر چهار ماه قبل از بروز تنش ادامه می‌یابد. بدین معنی که در مدل حاضر فرض گردیده پیش آگاهی نسبت به وقوع یک ماه خشک در آینده که منجر به خسارات شدید در تأمین نیازهای آبی مخزن می‌گردد، حداکثر از چهار ماه قبل امکانپذیر است.

هندسی مخزن در شرایط آبدهی نرمال شبیه‌سازی، و نتایج خروجی مدل با توجه به داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه و داده‌های ۱۰ ساله چاه‌های پیزومتری موجود در آبخوان گرمسار از نظر منابع آب سطحی و زیرزمینی بررسی و مدل واسنجی گردید. پس از اطمینان از صحت نتایج خروجی مدل، به منظور بررسی اثر تنش‌های کم‌آبی و خشکسالی بر روی تأمین مصارف، دوره‌ای خشک از سری بلندمدت آماری انتخاب شد و مدل بر اساس آن تحلیل گردید. با اضافه نمودن سد نمرود و مصارف مرتبط با آن در شرایط آبی، وضعیت تأمین نیازها و شاخص‌های برنامه‌ریزی منابع آب در هر گام زمانی محاسبه گردید. در شکل ۲ شماتیک بیلان منابع و مصارف منطقه با فرض دوره خشکسالی ارائه شده است. شکل ۳ شماتیک منطقه مورد بررسی در شرایط احداث سد را در محیط نرم‌افزار MODSIM8.1 نشان می‌دهد.

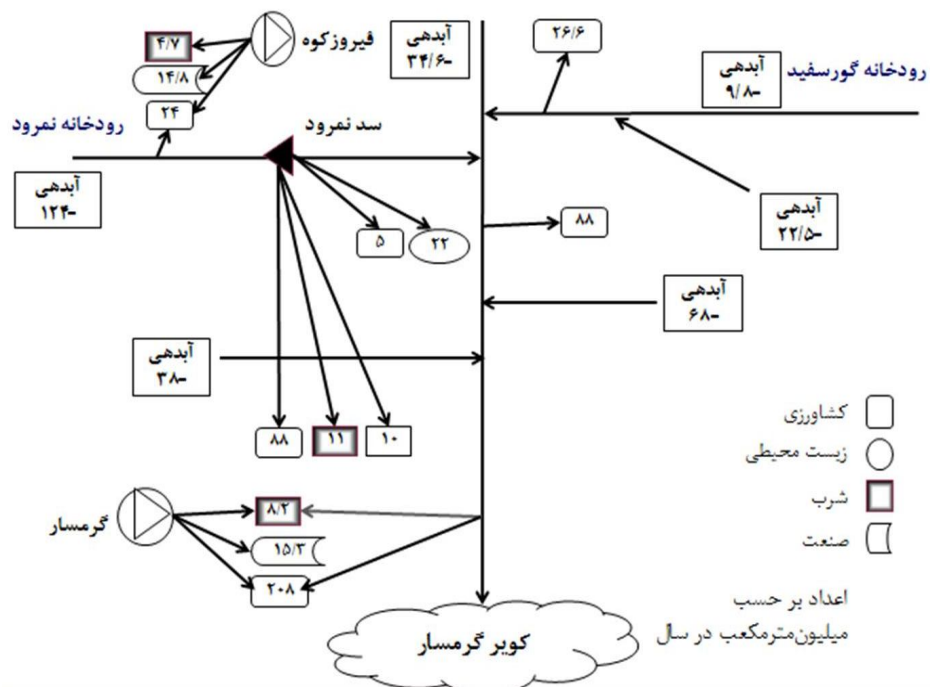


شکل ۱. نقشه منطقه و سیستم رودخانه‌ای

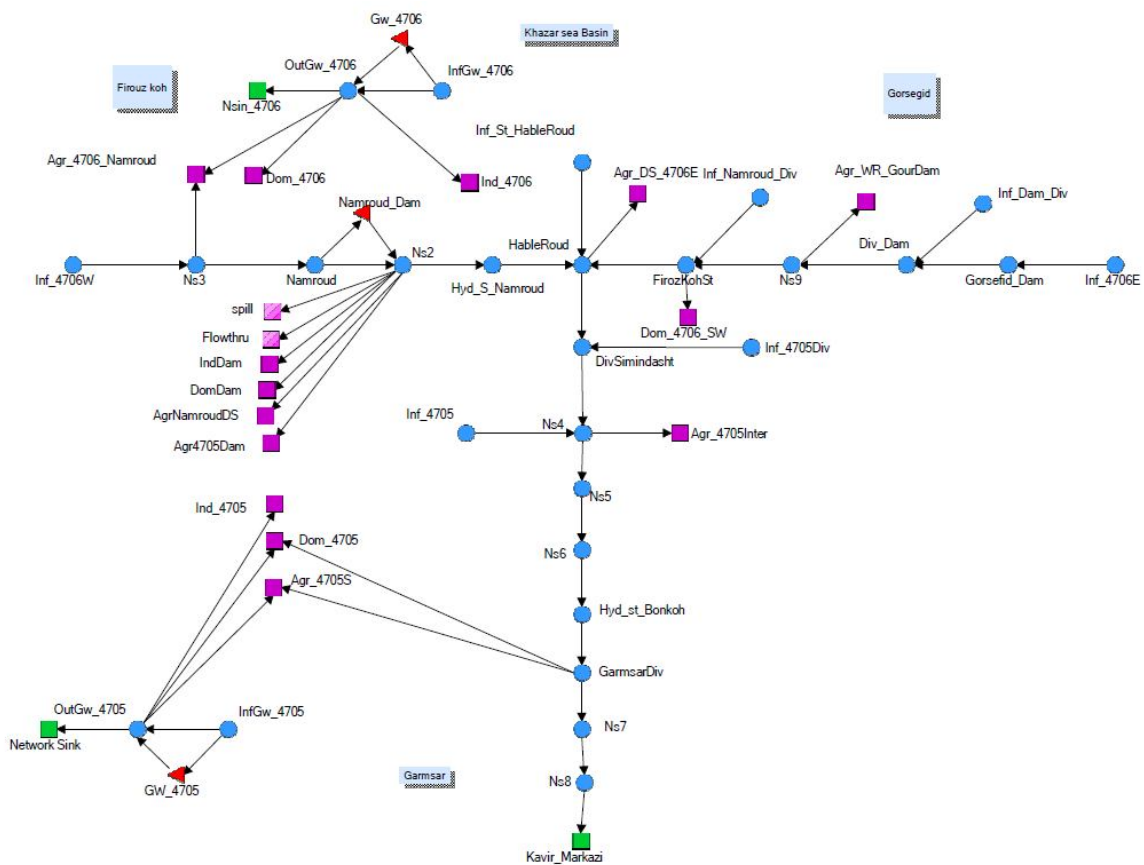
پس از واسنجی و اجرای مدل در شرایط وضع موجود، با استفاده از قابلیت ویژه‌سازی مدل شبیه‌ساز MODSIM8.1، نسبت به کدنویسی در محیط VB.NET اقدام گردید تا با استفاده از آن سیاست جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن به

<sup>1</sup> Back warding

<sup>2</sup> Satisfaction



شکل ۲. شماتیک بیلان منابع و مصارف منطقه در شرایط خشکسالی



شکل ۳. شماتیک منطقه مورد بررسی در شرایط احداث سد در محیط نرم افزار MODSIM

درصد اعتمادپذیری: احتمال اینکه سیستم در طول دوره‌ی عملکرد خود در حالت بهره‌برداری نرمال (عدم شکست) قرار گیرد را ارائه می‌دهد. بطوریکه در رابطه ۳،  $f$  تعداد کل دوره‌های شکست  $T$  تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری و  $\delta$  قابلیت اعتمادپذیری می‌باشد.

$$\delta = 100 \left( 1 - \frac{f}{T} \right) \quad (3)$$

سرعت برگشت‌پذیری: برای ارزیابی یک سیستم ذخیره در برگشت از حالت شکست به حالت بهره‌برداری نرمال، از این شاخص استفاده می‌شود. به طوری که در رابطه ۴،  $\gamma$  شاخص سرعت برگشت‌پذیری و  $f_s$  تعداد دوره‌های شکست پیوسته می‌باشد.

$$\gamma = \frac{1/f}{f_s} \quad (4)$$

آسیب‌پذیری: این شاخص، بیانگر شدت کمبود در طی دوره شکست می‌باشد. طبق رابطه ۵  $R_t^*$  تقاضا در نظر گرفته شده طرح برای  $t$  امین دوره شکست و  $R_t$  آب خروجی از مخزن در طول  $t$  امین دوره شکست و  $\eta$  شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد.

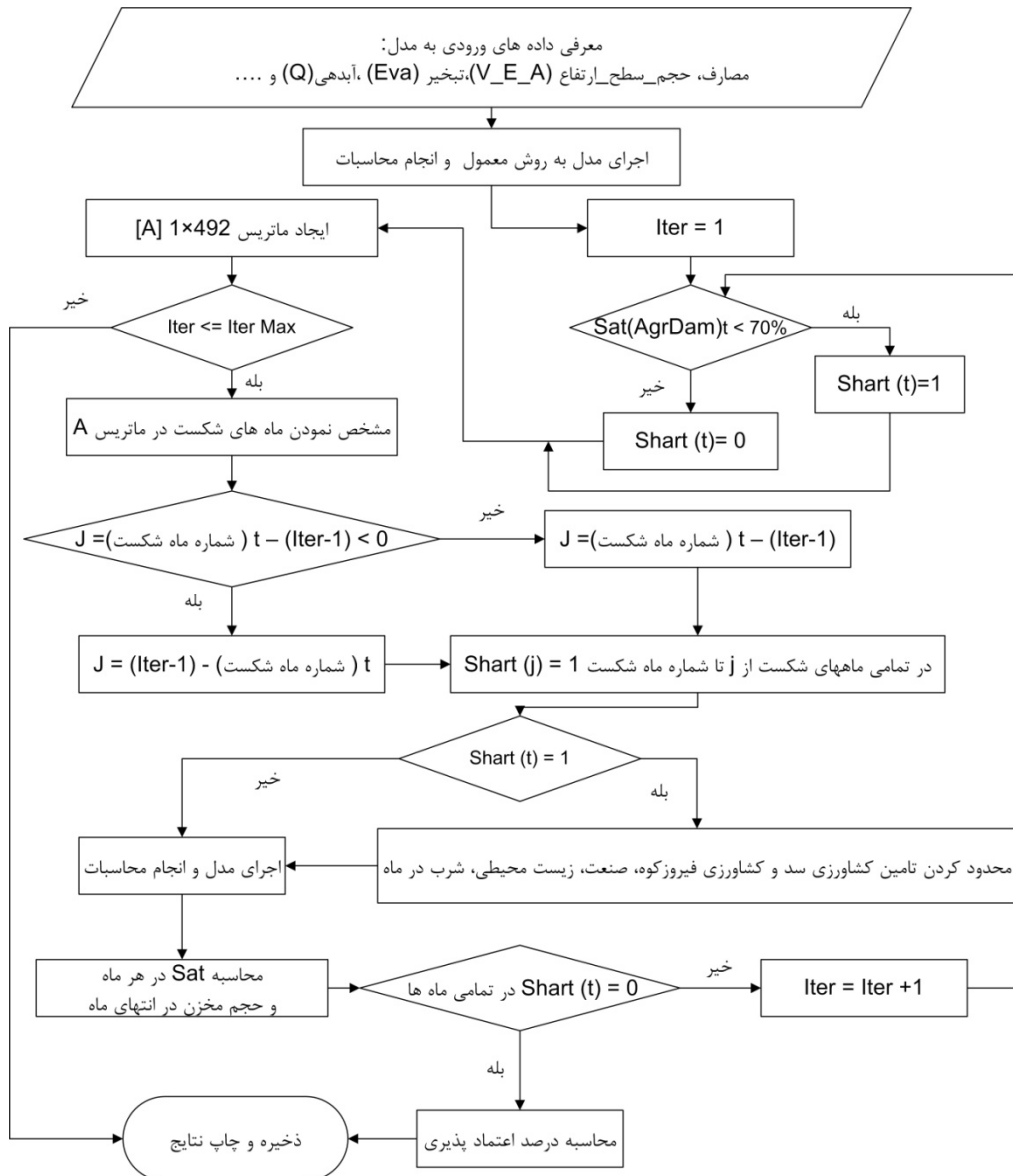
$$\eta = \frac{\sum R_t^* - \sum R_t}{\sum R_t^*} \quad (5)$$

شاخص پایداری (انعطاف‌پذیری): با توجه به عدم وجود رابطه‌ی همگرایی بین شاخص‌های عملکرد مخزن در برخی بررسی‌ها، Loucks (۱۹۹۷) شاخص پایداری را که ترکیبی از سه شاخص هاشیموتو بود را معرفی نمود. گزینه‌ای که بیشترین شاخص پایداری را داشته باشد به عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. رابطه‌ی ریاضی این شاخص به صورت رابطه ۶ می‌باشد که در آن  $\varphi$ : شاخص پایداری،  $\delta$ : شاخص اعتمادپذیری،  $\gamma$ : شاخص سرعت برگشت‌پذیری و  $\eta$ : شاخص آسیب‌پذیری می‌باشند.

$$\varphi = \delta \gamma (1 - \eta) \quad (6)$$

بر این اساس پس از اجرای نخست، مدل به صورت خودکار درصد تامین نیازها سد را در تمامی ماه‌ها محاسبه و ماه‌های شکست (دچار تنش) را بر اساس شکست‌های موجود در مصارف کشاورزی مشخص می‌کند. در اولین قدم مدل به صورت خودکار با محدود کردن میزان تامین تمامی مصارف در ماه دچار شکست به میزان نیاز اولیه سعی بر تعدیل تنش‌ها از طریق تغییر نحوه‌ی توزیع آب بین مصارف مختلف می‌نماید. پس از محدود کردن میزان تامین نیازها، مدل بار دوم اجرا می‌گردد و مقادیر درصد تامین در هر ماه مشخص می‌گردد. مجدداً ماه‌های دچار تنش مشخص می‌گردند. در این مرحله، جیره‌بندی علاوه بر ماه دچار تنش، بر ماه قبل از بروز تنش نیز اعمال می‌شود و میزان تامین نیازها در این ماه‌ها به مقدار نیاز اولیه محدود می‌گردد، سپس مدل مجدداً اجرا می‌گردد. در صورت وجود ماه‌های دچار تنش، مدل به صورت خودکار از دو ماه قبل از بروز تنش تا خود ماه دچار تنش، میزان مصارف را به مقدار نیاز اولیه محدود می‌کند. این روند تا آنجا ادامه می‌یابد که حداکثر از چهارماه قبل از بروز تنش جیره‌بندی اعمال گردد. در هر مرحله از اجرا اگر تمامی مصارف به حد قابل قبول تامین گردند و ماه دچار تنش وجود نداشته باشد مدل از حلقه‌ی اجرا خارج شده و نتایج نهایی را به کاربر ارائه می‌کند در غیر این صورت حداکثر تا چهار ماه قبل از بروز تنش جیره‌بندی اعمال می‌گردد و نتایج در انتها ارائه می‌گردند. چهارچوب کلی حل مسئله توسط الگوریتم جیره‌بندی در شکل ۴ ارائه شده است.

پس از استخراج نتایج از مدل شبیه‌ساز پس از احداث سد در شرایط جیره‌بندی و عدم جیره‌بندی، شاخص‌های درصد تامین و اعتمادپذیری توسط مدل به صورت خودکار ارائه گردیده و سایر شاخص‌ها همچون آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. روند محاسبه این شاخص‌ها در ادامه ارائه شده است.

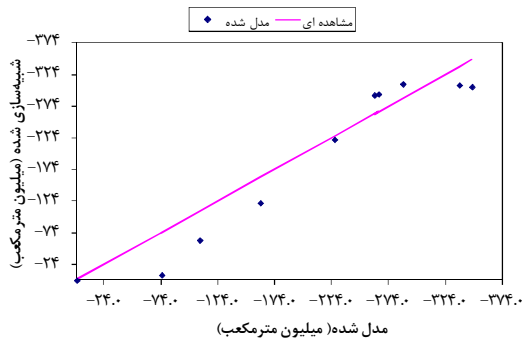
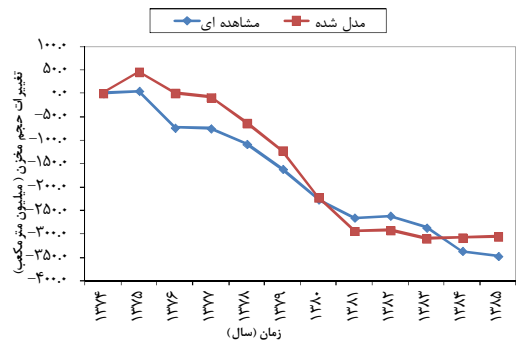


شکل ۴. روندنمای نحوه‌ی اعمال سیاست‌های جیره‌بندی و مدیریتی جهت تعدیل تنش‌ها

## نتایج و بحث

**واسنجی منابع آب سطحی:** نتایج واسنجی مدل از نظر منابع آب سطحی با توجه به داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد با اعمال تغییرات موجود در ضرایب نفوذپذیری رودخانه و میزان مصارف در مدل شبیه‌ساز، شبیه‌سازی در وضع موجود با تقریب مناسبی انجام شده است. **واسنجی منابع آب زیرزمینی:** علاوه بر واسنجی منابع آب سطحی، از داده‌های مشاهده‌ای چاه‌های پیژومتری منطقه

جهت بررسی روند نوسانات آبخوان در طی دوره بلند مدت و واسنجی آب زیرزمینی مدل، استفاده شده است. بر اساس داده‌های این چاه‌ها، متوسط سالانه میزان نوسانات آبخوان دشت گرمسار ۳۵/۲- میلیون مترمکعب می‌باشد که مدل MODSIM با توجه به ضرایب موجود در توابع این نرم‌افزار، توانسته است به خوبی و با تقریب مناسبی روند نوسانات آبخوان را شبیه‌سازی نماید، به گونه‌ای که مدل در وضع موجود نوسانات آبخوان را به میزان ۳۵/۱- میلیون مترمکعب برآورد نموده است. نمودار نوسانات

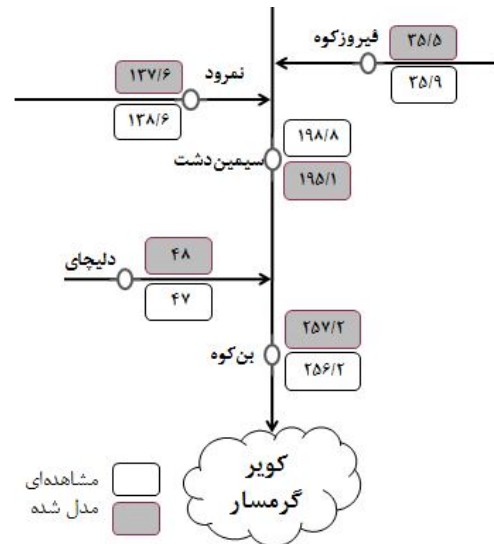


شکل ۶. نمودار یک به یک و روند نوسانات حجم مخزن

شکل ۷ نشان می‌دهد عدم جیره‌بندی در دوره خشک، احتمال تامین نیازها کشاورزی به میزان حد آستانه‌ی مورد نظر، ۸۵٪ می‌باشد که با کمک سیاست های جیره‌بندی این میزان به ۹۵٪ رسیده است. این میزان بهبود در احتمال عدم وقوع شکست می‌تواند در تعدیل خسارات احتمالی موثر باشد. در شکل ۸ متوسط درصد تامین نیازها کشاورزی گرمسار در شرایط اعمال و عدم اعمال جیره‌بندی ارائه شده است.

همانطور که انتظار می‌رود اعمال سیاست‌های جیره‌بندی برای سایر مصارف از ۴ ماه قبل، اثر معناداری بر تنش‌های موجود در مصارف کشاورزی منطقه داشته است. سیاست‌های جیره‌بندی بر مصارف شرب، صنعت و محیط زیست و کشاورزی فیروزکوه به گونه‌ای از ماه اسفند اعمال گردیده است که حداقل آستانه مد نظر در این مصارف تامین گردد. بدین صورت که بخشی از آب در ماه‌های قبل ذخیره شده و شدت تنش‌های کشاورزی و شیب نمودار درصد تامین در شرایط جیره‌بندی تعدیل گردیده است.

آبخوان با توجه به داده‌های مشاهده‌ای و مدل شده در دوره ۱۲ ساله و همچنین نمودار یک به یک داده‌های مشاهده‌ای و مدل شده با ضریب تبیین  $R^2=0/95$  در شکل ۶ ارائه شده است.



نام ایستگاه	فیروزکوه	نمرود	سیهین دشت	سیهین دشت	بن کوه
درصد خطا	۱/۲	۰/۸	۱/۹	۲/۴	۰/۴

شکل ۵. واسنجی مدل بر اساس وضعیت منابع آب سطحی

مصارف کشاورزی گرمسار به عنوان مبنای اهداف این تحقیق انتخاب گردید. علت انتخاب نیاز کشاورزی به عنوان شاخص و بررسی نوسانات موجود در تامین این نیاز، اولویت آخر و حجم بالای این نیاز در مقایسه با سایر مصارف سد می باشد. با انتخاب این نیاز، می‌توان اثر تنش‌ها را در بحرانی‌ترین حالات بررسی نمود.

#### منحنی تداوم:

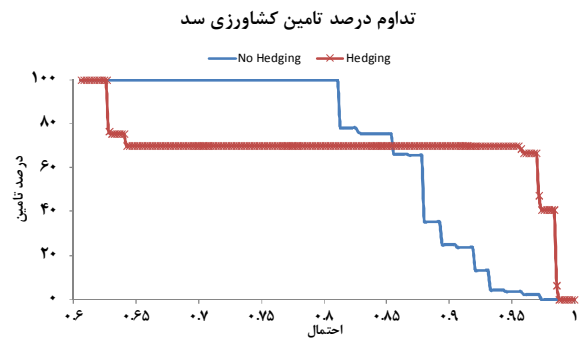
منحنی‌های تداوم احتمال وقوع شرایطی خاص که مد نظر بهره‌برداران می‌باشد را ارائه می‌دهند، که در اینجا هدف مورد بررسی، تامین ۷۰ درصدی مصارف کشاورزی دشت گرمسار بوده است و بر اساس منحنی تداوم کشاورزی می‌توان احتمال دستیابی به این درصد تامین را در شرایط جیره‌بندی و عدم جیره‌بندی بررسی نمود.



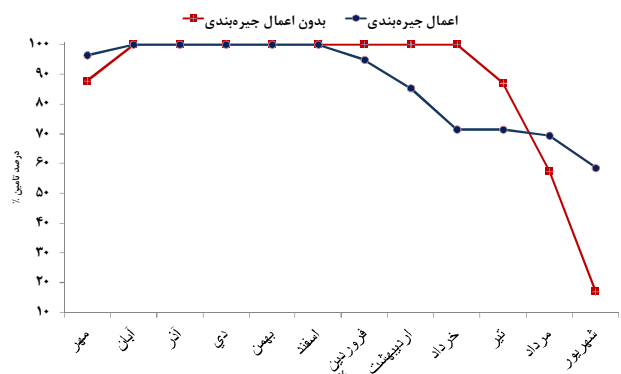
اعمال سیاست جیره‌بندی نوسانات درصد تامین مصرف کشاورزی بین ۲۰-۱۰۰ درصد متغیر بوده است و با اعمال سیاست‌های مدیریتی این نوسانات به ۶۰-۱۰۰ درصد تعدیل یافته است.

### منحنی نوسانات حجم مخزن:

منحنی متوسط ماهانه نوسانات حجم مخزن سد نمود در شرایط جیره‌بندی و عدم اعمال جیره‌بندی در شکل ۹ ارائه شده است. در اثر اعمال سیاست جیره‌بندی بر مصارف این دوره، متوسط میزان آب ذخیره شده در مخزن در ماه‌های مختلف نسبت به حالت معمول (عدم اعمال جیره‌بندی) افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار نوسانات حجم مخزن در دوره خشک، می‌توان اثر اعمال سیاست جیره‌بندی را به صورت درون‌سالی و برون‌سالی مشاهده نمود. این بدان معناست که با اعمال سیاست جیره‌بندی در ماه‌های پر آب (فصل زمستان)، نه تنها حجمی از آب به منظور تعدیل تنش‌های موجود در ماه‌های دچار تنش و کم آب در همان سال ذخیره می‌گردد، بلکه اعمال جیره‌بندی باعث ذخیره برون‌سالی نیز می‌گردد. در نتیجه اعمال این سیاست‌ها و افزایش حجم آب ذخیره شده در مخزن، انتظار می‌رود تنش‌های ناشی از کمبود آب در منطقه کاهش یابد.

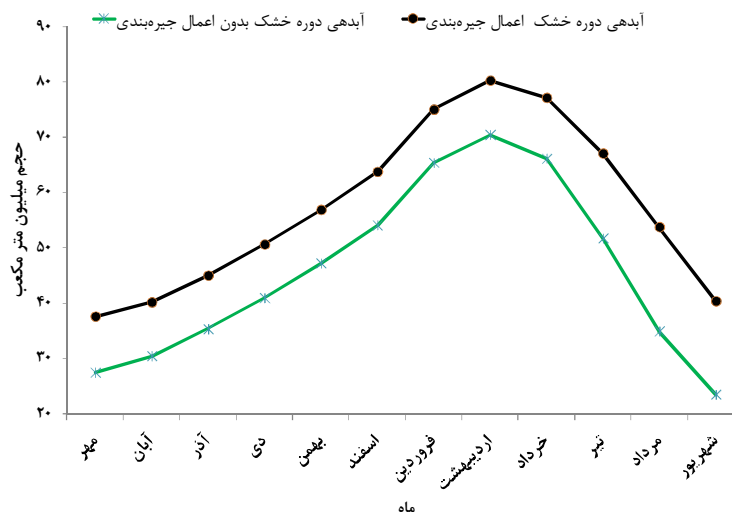


شکل ۷. منحنی تداوم درصد تامین نیاز کشاورزی از سد (نیاز کشاورزی گرمسار) در شرایط دوره خشک



شکل ۸. متوسط درصد تامین مصرف کشاورزی گرمسار در شرایط دوره خشک

در نتیجه با اعمال چنین سیاست‌هایی می‌توان در برخی ماه‌ها که تامین نیازها کمتر از حد آستانه بوده است، میزان درصد تامین را افزایش و به بالای آستانه رساند. بر این اساس، همانطور که ملاحظه می‌گردد، در این منطقه قبل از



شکل ۹. متوسط تغییرات حجم مخزن در شرایط اعمال و عدم اعمال جیره‌بندی

### شاخص‌های برنامه‌ریزی منابع آب در شرایط اعمال و عدم اعمال جیره‌بندی:

بر اساس نتایج حاصل از مدل شبیه‌ساز، شاخص‌های ارزیابی عملکرد مخزن محاسبه و برآورد گردید. با توجه به اینکه در مدل MODSIM8.1، تامین مصارف بر اساس اولویت انجام می‌گیرد، در طی دوره شبیه‌سازی مصارف شرب، محیط زیست، صنعت و کشاورزی منطقه فیروزکوه، با شکست‌های شدید مواجه نشده‌اند. در نتیجه به دلیل

وابستگی شاخص‌های سرعت برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به شکست‌های گسسته و متوالی رخ داده در هر گام زمانی و وابستگی شاخص پایداری به مقادیر این دو شاخص، سه شاخص مذکور تنها در مورد مصرف کشاورزی گرمسار قابل محاسبه بوده‌اند. در جدول ۱ مقادیر شاخص‌ها در حالت جیره‌بندی و عدم جیره‌بندی ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر متوسط شاخص‌ها پایداری سیستم‌های منابع آب در حالت جیره‌بندی و عدم جیره‌بندی (درصد)

نوع مصرف	درصد تامین		اعتمادپذیری		سرعت برگشت‌پذیری		درصد آسیب‌پذیری		شاخص پایداری	
	بدون	با	بدون	با	بدون	با	بدون	با	بدون	با
	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی	جیره‌بندی
شرب	۱۰۰	۹۸	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-
محیط زیست	۹۹	۹۷	۹۹	۹۹	-	-	-	-	-	-
صنعت	۹۸	۹۵	۹۷	۹۹	-	-	-	-	-	-
کشاورزی فیروزکوه	۹۷	۸۸	۹۷	۹۹	-	-	۱۰۰	۱۰۰	-	-
کشاورزی گرمسار از سد	۸۷	۸۷	۹۵	۹۶	۴۶	۳۶	۸۲	۶۳	۶	۱۴

همان‌گونه که ذکر شد، سیاست جیره‌بندی اعمال شده در شرایط بروز تنش، عدم تامین مصارف ثانویه و ذخیره آب جهت تغییر نحوه توزیع در بین نیازها می‌باشد. در نتیجه میزان متوسط درصد تامین مصارف در شرایط اعمال جیره‌بندی نسبت به شرایط عدم اعمال جیره‌بندی کاهش یافته است. به عبارت دیگر در روش جیره‌بندی در ماه‌های مذکور با کاهش میزان تامین مصارف شرب، صنعت، محیط زیست و ... به میزان حداقل قابل قبول، تلاش شده است از بروز تنش‌های شدید در مصارف کشاورزی جلوگیری شده و شاخص اعتمادپذیری افزایش یابد. در نتیجه همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، با کاهش متوسط درصد تامین مصارف، شاخص اعتمادپذیری افزایش یافته است که نشان‌دهنده کاهش تعداد ماه‌های شکست در دوره شبیه‌سازی می‌باشد. از آنجا که شاخص سرعت برگشت‌پذیری وابسته به شکست‌های متوالی رخ داده در طی شبیه‌سازی است و با توجه به اولویت مصارف، شکست‌های متوالی فقط در مصرف کشاورزی دشت

گرمسار رخ داده است، این شاخص تنها در مورد این مصرف قابل محاسبه می‌باشد. در شرایط اعمال جیره‌بندی، شاخص سرعت برگشت‌پذیری کاهش می‌یابد که نشان از کاهش تعداد شکست‌های متوالی و بهبود وضعیت تامین مصارف دارد. شاخص آسیب‌پذیری، شدت و اندازه شکست‌های احتمالی را بر اساس تعداد ماه‌های دچار تنش و میزان تامین مصارف در آن ماه‌ها دچار تنش می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد این شاخص برای مصارف کشاورزی فیروزکوه و گرمسار محاسبه گردیده است. در مورد نیاز کشاورزی فیروزکوه به دلیل ناچیز بودن میزان این مصرف، اعمال جیره‌بندی تاثیری بر شدت تنش‌های احتمالی نخواهد داشت. اما در مورد نیاز کشاورزی گرمسار شکست‌های احتمالی با بزرگی ۸۲٪ رخ خواهد داد که این میزان شکست، خسارات شدیدی به مصرف‌کنندگان وارد خواهد نمود. در شرایط اعمال جیره‌بندی از شدت تنش‌ها کاسته شده و شاخص آسیب‌پذیری کاهش یافته است که نشان از بهبود وضعیت تامین مصارف و کاهش خسارات

عمادی، ع. و خادمی، م. ۱۳۹۰. منحنی فرمان بهره‌برداری از سد مخزنی درودزن با استفاده از مدل آبدهی. نشریه‌ی آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۵): ۱۰۵۸-۱۰۶۸.

عمادی، ع.، قادری، ک. محسنی موحد، ا. سلیمانی، ع. مقامی، د. ۱۳۸۸، بررسی اعتماد پذیری تامین آب توسط سدهای مخزنی با استفاده از روش بهره‌برداری استاندارد. اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساختها، دانشگاه تهران، ۵ - ۷ آبان ماه.

کارآموز، م. ۱۳۸۷. چالش‌های کاربرد رویکردهای نوین در مدیریت منابع آب ایران، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، تبریز، ۲۳-۲۵ مهر ماه.

محمدی، ص. و منتصری، م. ۱۳۸۷ تعیین مقدار بهینه شاخص عملکرد آسیب‌پذیری در سیستم‌های مخازن ذخیره با استفاده از شاخص پایداری، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۳۸(۳): ۵۷-۶۲.

Darlane, A. B., 2009. Reservoir operation during Drought. International Journal of Engineering Transactions, 16(3):2009-2033.

Draper, A., 2001. Implicit stochastic optimization with limited fore sight for reservoir systems. PhD dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of California, Davis, Calif.

Draper, A. and Lund, J., 2004. Optimal hedging and carryover storage. Journal of Water Resource Planning and Management, 130(1):83-87.

Felfelani, F. Jalali Movahed, A. and Zarghami M., 2013. Simulating hedging rules for effective reservoir operation by using system dynamics: a case study of Dez Reservoir, Iran, Lake and Reservoir Management, 29(2), 126-140.

Hashimoto, T. Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. 1982. Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, 18 (1):14-20.

Hirsch. R.M. 1978. Risk analyses for a water-supply system Occoquan Reservoir, Fairfax and Prince William Counties, Virginia. U.S. Geological Survey, Reston, Va. Open-File Rep. 78-452.

Loucks, D.P. Stedinger, J.R. and Haith, D.A. 1981. Water resources systems planning and analysis. Prentice-Hall, New Jersey, pp:559.

Loucks, D.P. van Beek, E. 2005. Water Resources Systems Planning and Management, An Introduction to Methods, Models and Applications. UNESCO Publication, PP: 677

Maass, A. Hufschmidt, M. M. Dorfman, R. Thomas, H. A. Jr. Marglin, S. A. and Fair, G. M. 1962.

احتمالی دارد. شاخص پایداری که از ترکیب سه شاخص آسیب‌پذیری، اعتمادپذیری و سرعت برگشت پذیری محاسبه می‌گردد، در شرایط اعمال جیره‌بندی بر مصارف کشاورزی گرمسار افزایش می‌یابد که نشان از بهبود کلی وضعیت تأمین نیازها در شرایط اعمال سیاست جیره‌بندی رهاسازی از مخزن نسبت به شرایط بهره‌برداری نرمال دارد.

### نتیجه‌گیری

از آنجا که اکثر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی قابلیت بهینه‌سازی و حتی جیره‌بندی را ندارند، در این مقاله الگوریتمی کاربردی جهت اعمال سیاست جیره‌بندی در محیط داخلی نرم‌افزار شبیه‌ساز MODSIM8.1 ارائه شده است. بر این اساس، مدل شبیه‌ساز توانایی اعمال سیاست مدیریتی جیره‌بندی را حداکثر از چهار ماه قبل از بروز تنش خواهد داشت. با بررسی روند تامین نیازهای سد مخزنی نمرود، در شرایط اعمال و عدم اعمال جیره‌بندی و همچنین بررسی شاخص‌های برنامه‌ریزی منابع آب، می‌توان به این نتیجه رسید که اعمال سیاست جیره‌بندی رهاسازی از مخزن تاثیر قابل قبولی در تعدیل تنش‌ها و همگن نمودن شکست‌ها دارد. در این سیاست، با اعمال شکست‌های بیشتر اما با شدت کمتر که آسیب چندانی به تامین نیازها وارد نمی‌کنند، می‌توان از بروز تنش‌های شدید که باعث ایجاد خسارات جبران‌ناپذیری می‌شود، جلوگیری نمود.

### فهرست منابع

آذرانفر، آ. و شهسواری، م. ۱۳۸۵. کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳ و ۴ بهمن ماه.

حیدری، ج. و منتصری، م. ۱۳۸۹، رسم منحنی فرمان بهره‌برداری از مخازن با روش Behavior Analysis. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب. کرمان ۹-۱۰ بهمن ۱۳۸۹.

خوشدوز، ن.، بابازاده، ح.، طباطبائی س.ح. و نادری، م. ۱۳۹۲. توسعه مدل دراستیک اصلاح شده برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی. حفاظت منابع آب و خاک. ۳(۱): ۱۹-۳۱.

- Srinivasan, K. Philipose, M. C., 1996. Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation. *Water Resources Management*, 10:163–188.
- Triana, E. Labadie, J.W., 2007. GEO-MODSIM: Spatial Decision Support System for River Basin Management. ESRI International User Conference, San Diego Convention Center, California, June 18-22.
- You, J.Y. and Cai, X., 2008. Hedging rule for reservoir operation: Numerical Model, *Water resource research*, online publication 10. Jan, 44:W01416.
- You, J.Y. and Cai, X., 2008. Hedging rule for reservoir operation: Theoretical Model, *water resource research*, online publication 10. Jan. 44: W01415.
- Zongxue, X. Jinno, K. Kawamura, A. Takesaki, S. and Ito, K., 1996. Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management*, 12:13-30.
- Design of Water-Resource Systems: New Techniques for Relating Economic Objectives, Engineering Analysis, and Governmental Planning, Harvard University Press, Cambridge, Mass. pp:638.
- Pegram, G.G.S. 1980. On reservoir reliability, *Journal of Hydrology*, 47: 269 – 296.
- Shih, J.S. and Reville, C., 1994. Water-Supply Operations during Drought: Continuous Hedging Rule. *Journal of Water Resources planning and management*, 120(5):613-629.
- Shourian, M. Mousavi, S.J. Menhaj, M.B. Jabbari, E. 2008, Neural-network-based simulation-optimization model for water allocation planning at basin scale. *Journal of Hydroinformatics*, 10(4): 331-343.
- Shourian, M. Mousavi, S.J. Tahershamsi, A. 2008. Basin-wide Water Resources Planning by Integrating PSO Algorithm and MODSIM. *Water Resources Management*, 22:1347–1366.



ISSN 2251-7480

## **Development of multi-purpose reservoir operation hedging rule in water resources shortage conditions using MODSIM8.1**

**Parinaz Razaghi<sup>1</sup>, Hossein Babazadeh<sup>2\*</sup> and Mojtaba Shourian<sup>3</sup>**

---

---

**Abstract**

**Keywords:**