

## توسعه مدل یکپارچه منابع آب WEAP برای مدل‌سازی شرایط خشکسالی

فاطمه میرزایی ندوشن<sup>۱\*</sup>، شهاب عراقی‌نژاد<sup>۲</sup> و امید بزرگ‌حداد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، <sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و <sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۰

### چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های بهره‌برداری از سیستم‌های مدیریت منابع آب و به‌طور خاص مخازن سطحی در رویارویی با تغییرات هیدرولوژیکی، در نظر گرفتن وقوع پدیده خشکسالی در نحوه بهره‌برداری از منابع آب است. علاوه بر تغییرات دبی نسبت به متوسط، عامل مهم دیگر تداوم پدیده خشکسالی می‌باشد. یکی از راه‌های مقابله با خشکسالی، بهره‌برداری مناسب از منابع آب در شرایط خشکسالی است. برای بهره‌برداری از منابع آب مدل‌های مختلفی مانند WEAP توسعه یافته است. اما چنین مدلی قابلیت مدل‌سازی بهره‌برداری مخازن در شرایط خشکسالی را ندارد. بنابراین، توسعه چنین امکانی در مدل WEAP برای مهندسی منابع آب بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر امکان توسعه قوانین بهره‌برداری هجینگ در قالب نرم‌افزار WEAP مورد تحلیل قرار گرفت و برنامه‌ای الحاقی برای نرم‌افزار WEAP توسعه داده شد. توسعه این مدل امکان تلفیق بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در سطح حوزه‌های آبخیز را فراهم می‌کند. به‌منظور آزمون قابلیت‌های این برنامه الحاقی، بهره‌برداری از مخازن رودخانه گرگان‌رود مدل‌سازی شد و نتایج این مدل توسعه داده شده با نتایج مدل معمولی WEAP مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش کارایی نرم‌افزار WEAP در مدل‌سازی شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی از یک درصد در سد وشمگیر تا ۳۷ درصد در سد گلستان بوده است. شایان ذکر است که مدل الحاقی به‌صورت یک مدل عمومی توسعه پیدا کرده و قابل به‌کارگیری در حوضه‌های مختلف می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌برداری از مخزن، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، هجینگ و WEAP

### مقدمه

شدت بیشتر بوده‌اند. بنابراین برای کاهش کمبود آب و اثرات خشکسالی نیاز به پیشینه استفاده از منابع و مدیریت بهره‌برداری از مخازن موجود است. به‌طور کلی مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب دارای سه هدف اصلی است که عبارتند از: ۱- تامین نیاز پایه آب، ۲- افزایش کارایی اقتصادی مصرف آب، ۳- حفظ محیط زیست (Mays, ۱۹۹۶). منظور از نیاز پایه، نیاز شرب،

امروزه به‌دلیل افزایش جمعیت و گسترش بخش‌های کشاورزی، انرژی و صنعت، نیاز آبی روز به روز در حال افزایش است و با ثابت بودن آورد رودخانه‌ها و منابع آب، در تامین نیازها کمبودهایی وجود دارد و در حال افزایش نیز می‌باشد. در سال‌های اخیر مناطق مختلف جهان شاهد خشکسالی‌هایی با

حجم ذخیره مخزن<sup>۲</sup> و قانون محدودکننده بهینه وجود دارد. آن‌ها از طریق روشی تحلیلی و با استفاده از پارامترهای توابع سود خروجی و سود ذخیره‌ای، رابطه قانون محدودکننده بهینه را به دست آوردند. این روش تحلیلی اساس تحقیق حاضر است و از روش‌های عددی ساده‌تر می‌باشد.

برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، نیاز به ابزار مدل‌سازی برای تولید تصمیمات بهره‌برداری است. با وارد شدن مدل‌های منابع آب، این مدل‌ها در کنار جنبه مدیریتی منابع آب، یکی از جنبه‌های فنی برنامه‌ریزی منابع آب را شکل دادند. یکی از مدل‌های پرکاربرد در بهره‌برداری از منابع آب، مدل WEAP<sup>۳</sup> است. مدل WEAP قابلیت مدل‌سازی بهره‌برداری در شرایط خشکسالی را ندارد. بنابراین، توسعه چنین امکانی در مدل WEAP برای مهندسين منابع آب بسیار حائز اهمیت است.

به‌طور کلی مدل‌های شبیه‌سازی واکنش سیستم را با استفاده از مشخصات مخزن، آب در دسترس، مقدار نیاز و قوانین بهره‌برداری از پیش تعیین شده، ارائه می‌دهند. در واقع این مدل‌ها قانون بهره‌برداری بهینه برای مدیریت سیستم را پیدا نمی‌کنند، بلکه لازم است، از روش‌های سعی و خطا برای پیدا کردن حالت بهینه استفاده کرد. استفاده از روشی که بتواند انعطاف‌پذیری مدل‌های شبیه‌سازی را همراه با جستجوی کارآمد مدل‌های بهینه‌سازی داشته باشد، بسیار مطلوب خواهد بود. در تحقیقات پژوهش‌محور، راهکارهای مختلفی برای ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به کار رفته است (Wurbs, ۱۹۹۳). به‌طور مثال Jacoby و Loucks (۱۹۷۲)، محدودیت‌ها و مزایای استفاده مشترک از این دو مدل را در مسائل برنامه‌ریزی استاتیک و پویا تجزیه و تحلیل کرده‌اند.

در مورد دیگری Lund و Ferreira (۱۹۹۷)، یک شبکه جریان ارائه کردند که بر پایه مدل HEC-PRM توسط USACE یک مدل شبیه‌سازی شده برای تصحیح و آزمون قوانین بهره‌برداری به کار می‌رود. همین‌طور Nalbantis و Koutsoyiannis (۱۹۹۷) در

شهری و روستایی است و اولین هدف در برنامه‌ریزی منابع آب تامین این نیاز است. در هدف دوم، تصمیم‌گیرنده به دنبال بالابردن سود اقتصادی حاصل از تخصیص آب به مصارف مختلف است. هدف سوم که تامین نیاز زیست‌محیطی است، اخیراً به اهداف مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب اضافه شده است، به‌طوری‌که به‌عنوان نیاز پایه در نظر گرفته می‌شود.

در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، در مواقع خشکسالی و کم آبی سعی می‌شود تا سر حد امکان نیاز پایه تامین شود. اما در هدف دوم که بالا بردن سود اقتصادی است، هنگام وقوع خشکسالی و کم آبی، سعی در مدیریت صحیح مخازن آب و پخش کمبود آب در طول دوره بهره‌برداری است. در واقع با این کار خشکسالی‌های با تداوم کم اما شدت بالا به خشکسالی‌هایی با تداوم بیشتر اما شدت کمتر تبدیل می‌شوند و در نتیجه مجموع خسارت ناشی از خشکسالی در حالت دوم کمتر از حالت اول خواهد بود.

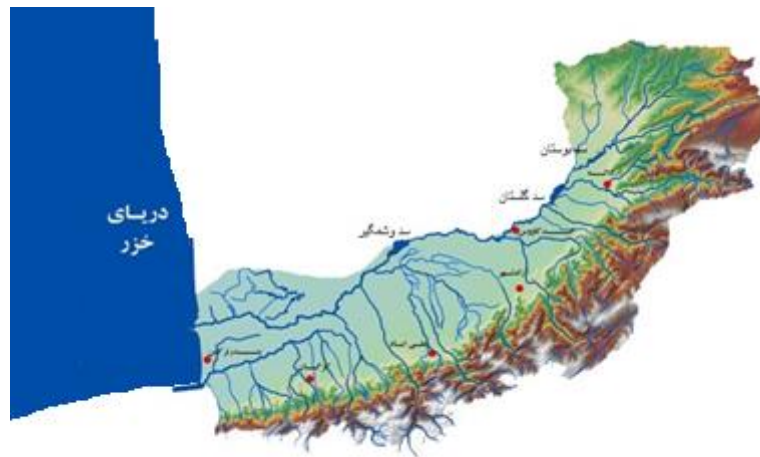
روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از منابع آب وجود دارد. در بهره‌برداری از منابع آب در شرایط خشکسالی، یک روش مدیریتی استفاده از قوانین محدودکننده<sup>۱</sup> است (Bower و همکاران، ۱۹۶۶). این قوانین محدودکننده در واقع دستورالعملی برای بهره‌برداری از مخازن و تعیین مقدار خروجی از منابع آب است (Lund و Guzman، ۱۹۹۶ و Bower، ۱۹۹۹). همکاران، (۱۹۶۶). باید اضافه کرد که Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) نشان دادند، زمانی که تابع خسارت بهره‌برداری از مخزن خطی باشد، قانون بهره‌برداری استاندارد (SOP) بهترین سیاست بهره‌برداری خواهد بود. به عبارت دیگر، لازم است تابع خسارت، غیرخطی و محدب (تابع سود، غیرخطی و مقعر) باشد تا قوانین محدودکننده بهینه باشند. در ضمن Klemes (۱۹۷۷) نشان داد که با افزایش عدم قطعیت هیدرولوژیکی یا اقتصادی، سیاست بهره‌برداری بهینه به قانون SOP همگرا خواهد بود. در مقاله‌ای Draper و Lund (۲۰۰۴) پس از مرور کلی بر انواع قوانین محدودکننده، ثابت کردند که ارتباط آشکاری بین

<sup>2</sup> Carryover Storage

<sup>3</sup> Water Evaluation and Planning

<sup>1</sup> Hedging

در مرحله بعد، پارامترهای توابع سود مورد استفاده برای به‌دست آوردن قوانین بهره‌برداری، با در نظر گرفتن سه سد به‌صورت یک مجموعه، به‌وسیله نرم‌افزار Lingo بهینه شدند و برای بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده قرار گرفتند. در تحقیق حاضر، با تلفیق مدل شبیه‌سازی WEAP و مدل بهینه‌سازی Lingo، قوانین بهره‌برداری بهینه در شرایط خشکسالی استخراج شده است. برای این کار از نرم‌افزار WEAP به‌عنوان مدل شبیه‌سازی و از نرم‌افزار Lingo برای بهینه‌سازی قوانین محدودکننده استفاده شد.



شکل ۱- حوزه گرگان‌رود-قره‌سو و محل قرارگیری سدهای مورد مطالعه

تحقیق خود یک قانون پارامتری برای مخازن پیشنهاد داده و مورد آزمون قرار دادند.

### مواد و روش‌ها

حوزه مورد مطالعه، حوزه گرگان‌رود-قره‌سو واقع در جنوب شرقی دریای خزر است و جزئی از حوزه آبخیز دریای خزر به شمار می‌رود. سدهای مورد بررسی، سد بوستان، گلستان و وشمگیر هستند که بر روی رودخانه گرگان‌رود به‌صورت سری قرار گرفته‌اند (شکل ۱). با استفاده از نرم‌افزار WEAP، قوانین محدودکننده در بهره‌برداری از این سه سد اعمال شد.

کل نیاز وجود دارد، یک روش مدیریتی برای کاهش خسارت ناشی از خشکسالی است. با استفاده از یک قانون محدودکننده، می‌توان مشخص کرد در یک دوره چه مقدار آب به مصارف کنونی تخصیص یابد و چه مقدار آب برای مصارف محتمل آینده در مخزن ذخیره شود. هدف از قوانین محدودکننده کاهش ریسک و خسارت ناشی از کمبودهای شدید، ولی در مقابل متحمل شدن خسارات ناشی از کمبودهای بیشتر اما با شدت کمتر است.

به‌طور کلی معادله پیوستگی مخزن برای یک سیستم تک مخزن به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

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

که در آن،  $S_t$  حجم آب مخزن در ابتدای دوره زمانی  $t$ ،  $S_{t+1}$  حجم آب مخزن در انتهای دوره زمانی  $t$ ،

**قانون بهره‌برداری استاندارد:** ساده‌ترین قانون بهره‌برداری از مخزن، قانون بهره‌برداری استاندارد (SOP) است. در این روش خروجی تابعی از کل آب در دسترس (حجم ذخیره شده در مخزن به‌علاوه جریان ورودی پیش‌بینی شده منهای تلفات) است. چنانچه آب در دسترس کمتر، یا برابر با مقدار هدف باشد، کل آب در دسترس برای تامین نیاز رها می‌شود و در صورتی که آب در دسترس بیشتر از نیاز باشد، مقدار آب اضافه بر نیاز ذخیره می‌شود تا جایی که در بیشینه ظرفیت، مخزن شروع به سرریز شدن می‌کند. در روش SOP بیشترین اولویت با رها کردن آب برای مصارف اقتصادی کنونی است.

**قوانین محدودکننده:** محدود کردن آب خروجی از مخزن، حتی در شرایطی که ذخیره کافی برای تامین

از این گزینه‌ها بر اساس محرک‌هایی که با توجه به سه متغیر حجم مخزن، ورودی و نیاز محاسبه شده‌اند، صورت می‌گیرد. بر اساس قوانین محدودکننده، در ابتدای هر بازه زمانی  $t$ ، مقدار خروجی از مخزن با توجه به محرک‌های خشکسالی به‌وسیله روابط زیر قابل بیان است.

$$\text{اگر } S_t + I_t < \text{Trigger}_{1t} \text{ آنگاه } R_t = I_t + S_t$$

$$\text{اگر } \text{Trigger}_{1t} < S_t + I_t < \text{Trigger}_{2t} \text{ آنگاه } R_t < D_t$$

$$\text{اگر } \text{Trigger}_{2t} \leq S_t + I_t < \text{Trigger}_{at} \text{ آنگاه } R_t = D_t$$

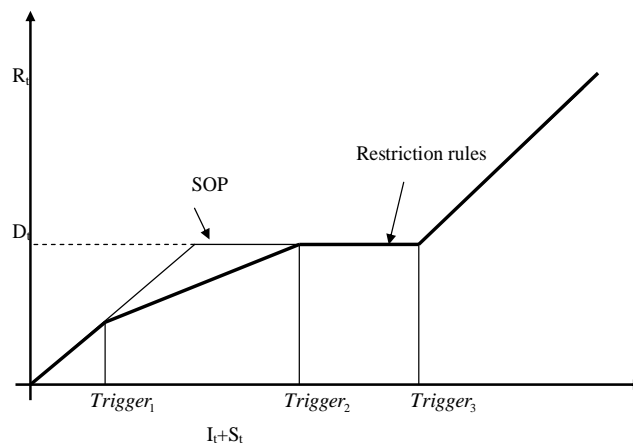
$$\text{اگر } \text{Trigger}_{at} \leq S_t + I_t \text{ آنگاه } R_t > D_t$$

که در آن‌ها،  $D_t$  نیاز آبی در زمان  $t$  و  $\text{Trigger}_{it}$  محرک‌های خشکسالی هستند. در شکل ۲ ارتباط بین محرک‌های اقلیمی و حالت‌های خاص بهره‌برداری نشان داده شده است.

$I_t$  ورودی مخزن،  $R_t$  خروجی از مخزن و  $E_t$  حجم تلفات در دوره زمانی  $t$  می‌باشند.

هنگام پیش‌بینی خشکسالی یا در مواقع قرار داشتن در آن باید محدودیت‌هایی برای تخصیص آب قائل شد. این محدودیت‌ها با توجه به میزان آب در دسترس و بر اساس محرک‌هایی که وضعیت قرار داشتن در شرایط خشکسالی را اعلام می‌کنند، به صورت قوانینی قابل بیان هستند که همان قوانین محدودکننده هستند.

در بهره‌برداری با استفاده از قوانین محدودکننده، در هر مرحله از تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری، چهار حالت را برای خروج آب می‌توان در نظر گرفت، خروج کل آب در دسترس، خروج آب به‌صورت کسری از نیاز پایین‌دست، خروج به میزان برابر با نیاز پایین‌دست و خروج آب بیش از نیاز آبی پایین‌دست. اعمال هر کدام



شکل ۲- منحنی فرمان قوانین محدودکننده با توجه به شاخص‌ها و محرک‌های خشکسالی (Lund و Draper، ۲۰۰۴)

$$S + I = A \quad (۳)$$

$$S \geq 0 \quad (۴)$$

$$S \leq Cap \quad (۵)$$

$$R \geq 0 \quad (۶)$$

که در آن‌ها،  $B(R)$  سود حاصل از رهاسازی آب،  $C(S)$  پتانسیل سود ذخیره‌سازی آب،  $A$  مجموع آب در دسترس برای دوره بهره‌برداری آتی شامل حجم ذخیره موجود ( $S$ ) و آوردهای آینده ( $I$ ) و  $Cap$  ظرفیت مخزن می‌باشند. روابط گفته شده تنها زمانی کاربرد خواهند داشت که مجموع حجم مخزن به‌علاوه

محاسبه محرک‌های خشکسالی: توسط Draper و

Lund (۲۰۰۴) روشی تحلیلی برای تعیین مقدار ذخیره بهینه و تخصیص در هر دوره بهره‌برداری ارائه شد. آن‌ها نشان دادند که نحوه بهره‌برداری از مخزن باید به گونه‌ای باشد که مجموع سود حاصل از خروجی و حجم مخزن در پایان هر دوره بیشینه شود، این شرایط را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان کرد.

$$\text{Max} z = B(R) + C(S) \quad (۲)$$

و محدودیت‌های اصلی بهره‌برداری در روابط (۳) تا (۶) آمده است و عبارتند از:

از آن در زمان واقعی، به واقعیت نیز نزدیک‌تر خواهد بود.

لازم به ذکر است با توجه به این که به دست آوردن توابع سود اقتصادی و سود ذخیره‌ای مربوط به هر سد، نیازمند اطلاعات وسیعی از خشکسالی‌های رخ داده در طول بهره‌برداری از سد و خسارات ناشی از خشکسالی بوده و خود تحقیقات وسیعی را می‌طلبد، در این تحقیق این توابع به صورت فرضی در نظر گرفته شده‌اند.

**بهره‌برداری از مخزن:** در این تحقیق سه روش برای بهره‌برداری از مخزن در طول دوره آماری مورد استفاده قرار گرفته است. در روش اول پس از تهیه پیکربندی سیستم منابع آب منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار WEAP، مدل به صورت ساده اجرا شد. در روش دوم با استفاده از برنامه‌ای الحاقی که در داخل نرم‌افزار WEAP نوشته و تهیه شده است، قوانین محدودکننده در بهره‌برداری از مخزن اعمال شد و روش مدل هجینگ تک سدی نامیده شد. در روش سوم، با هدف افزایش سود اقتصادی حاصل از بهره‌برداری از مجموع سدهای منطقه مورد مطالعه، همه سدها به صورت یک مجموعه در نظر گرفته شده و پارامترهای اقتصادی آن‌ها به وسیله نرم‌افزار Lingo بهینه شد. در نهایت با استفاده از برنامه الحاقی و پارامترهای جدید، مدل اجرا شد. این روش نیز، روش هجینگ چندسدی نامیده شد.

**شبیه‌سازی به وسیله مدل WEAP:** مدل WEAP یک ابزار شبیه‌سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی بر پایه معادلات بیلان آب است که می‌تواند مجموعه متناوبی از شرایط تامین و تقاضا را در طول افق برنامه‌ریزی بلندمدت بی‌آزماید. همان‌طور که اشاره شد، در مدل WEAP از قانون بهره‌برداری استاندارد (SOP) برای تعیین مقدار خروجی از مخزن در هر دوره استفاده شده است.

**مدل توسعه داده شده:** در مدل توسعه داده شده تحقیق حاضر، در سیستم تصمیم‌گیری نرم‌افزار WEAP یک ماجول خشکسالی توسعه داده شد که بهره‌برداری از مخزن را بر اساس قوانین محدودکننده تعیین می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در نرم‌افزار WEAP یک ماجول جدید با نام

حجم آورد پیش‌بینی شده (A) از مجموع ظرفیت مخزن و نیاز کمتر باشد.

در رابطه (۲) توابع  $B(R)$  و  $C(S)$  هر تابع پیوسته-ای می‌توانند باشند. چنانچه  $B(R)$  یک تابع خطی باشد، قوانین محدودکننده دیگر بهینه نبوده و از قانون SOP به عنوان قانون بهینه استفاده می‌شود. در صورتی که توابع  $B(R)$  و  $C(S)$  هر دو توابع درجه دوم و به صورت  $B(R) = a_r + b_r R + c_r R^2$  و  $C(S) = a_s + b_s S + c_s S^2$  در نظر گرفته شوند، با حل رابطه (۲) با استفاده از روش ضرائب لاگرانژ، خروجی بهینه  $R^*$  به صورت تابعی از آب در دسترس (A) طبق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$R^* = \frac{b_s - b_r + 2c_s(S_t + I_t)}{2(c_s + c_r)} \quad (7)$$

این فرم از قانون محدودکننده خطی تنها زمانی کاربرد خواهد داشت که قیود گفته شده در روابط (۳) الی (۶) برقرار باشند. بنابراین با در نظر گرفتن محدودیت بیلان آب و محدودیت‌های حجم کمینه و بیشینه مخزن، محرک‌های خشکسالی به صورت روابط (۸) الی (۱۰) به دست می‌آیند.

$$Trigger_{1t} = (b_s - b_r) / (2c_r) \quad (8)$$

$$Trigger_{2t} = \text{Min} \left[ \begin{array}{l} D_t(1 + \frac{c_r}{c_s}) + \frac{b_r - b_s}{2c_s}, \\ Cap(1 + \frac{c_s}{c_r}) + \frac{b_s - b_r}{2c_r} \end{array} \right] \quad (9)$$

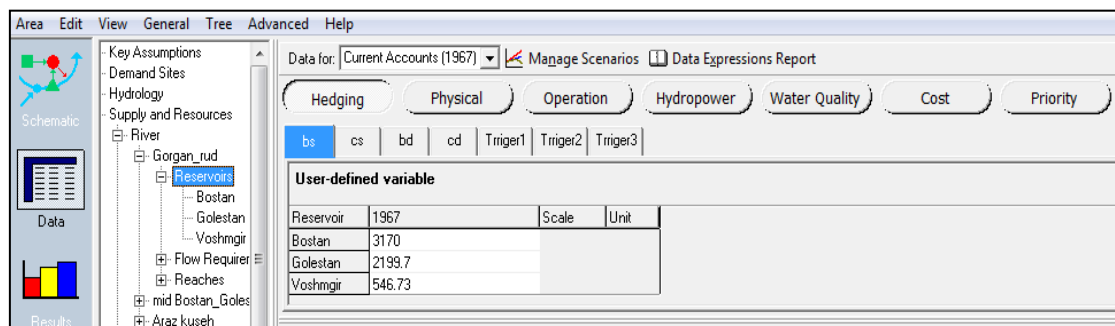
$$Trigger_{at} = D_t + Cap \quad (10)$$

خروجی بهینه زمانی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود که آب در دسترس (A)، کمتر از  $Trigger_{2t}$  و بیش از  $Trigger_{1t}$  باشد. با استفاده از روابط (۸) الی (۱۰) فرم کلی قانون محدودکننده نشان داده شده در شکل ۲ به دست می‌آید، که قوانین محدودکننده دونقطه‌ای<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. از مقایسه آب در دسترس با این محرک‌ها، میزان خروجی و ذخیره بهینه در هر دوره را می‌توان محاسبه کرد. تعیین مقادیر محرک‌های خشکسالی و خروجی بهینه از روابط فوق، منوط به وجود توابع سود خروجی و ذخیره می‌باشد. تعیین یافتن چنین توابعی می‌تواند آسان‌تر از تعیین مستقیم قوانین محدودکننده باشد و با توجه به امکان استفاده

<sup>1</sup> Two-Point Hedging Rules

قوانین محدودکننده هستند. پارامترهای توابع سود به وسیله کاربر در نرم افزار وارد می شود. مدل با استفاده از این پارامترها و اجرای برنامه الحاقی، محرک های خشکسالی برای هر سد را با توجه به پارامترهای سود وارد شده، میزان نیاز و ظرفیت ذخیره هر سد، به صورت ماهانه محاسبه می کند.

Hedging به ماجول های تعریف شده برای هر سد، اضافه شده است. در این قسمت، متغیرهای مربوط به توابع سود و همچنین، محرک های خشکسالی تعریف شده اند.  $b_s$  و  $c_s$  پارامترهای تابع سود ذخیره ای سد،  $b_d$  و  $c_d$  پارامترهای تابع سود خروجی سد و  $Trriger_1$ ،  $Trriger_2$  و  $Trriger_3$  محرک های خشکسالی مربوط به



شکل ۳- ماجول جدید خشکسالی اضافه شده به نرم افزار WEAP با نام Hedging

که در آن،  $n$  تعداد سدهای سیستم منابع آب مورد بررسی،  $m$  ماه مورد نظر،  $b_{ir}$  و  $c_{ir}$  پارامترهای تابع سود خروجی برای سد  $i$ ام و  $R_{im}$  خروجی از سد  $i$ ام در ماه  $m$  است.

پس از اجرای برنامه نوشته شده در نرم افزار Lingo، مقدار آب خروجی بهینه از سدها در هر ماه محاسبه می شود. با برازش منحنی درجه دوم بر این خروجی های بهینه به دست آمده، می توان پارامترهای بهینه توابع سود خروجی و سود ذخیره ای را به دست آورد. با استفاده از این روش، انتظار می رود میزان خسارت ناشی از خشکسالی حاصل از مجموعه سه سد به طور همزمان، از مجموع خسارت ناشی از سه سد در دو روش دیگر، کمتر باشد.

**معیارهای ارزیابی عملکرد بهره برداری:** به منظور بررسی کارایی الگوریتم مربوط به قوانین محدودکننده و مقایسه آن با الگوریتم های دیگر، لازم به استفاده از معیارهایی برای ارزیابی خشکسالی می باشد. در این تحقیق از معیارهای تداوم، شدت و میزان سود حاصل از خشکسالی استفاده شده است. معیارهای تداوم و شدت خشکسالی توسط Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) معرفی شده است که به صورت زیر می باشند.

**بهینه سازی به وسیله Lingo:** برای بهینه سازی پارامترهای توابع سود سدهای مورد مطالعه، از نرم افزار بهینه سازی Lingo استفاده شد. برای این منظور مقادیر جریان ورودی ماهانه به هر سد در یک دوره ۱۰ ساله، مقدار نیازها به صورت ماهانه و ظرفیت مخزن ها، به عنوان داده های ورودی وارد شدند. روابط (۱۱) الی (۱۳) نیز به عنوان محدودیت ها در برنامه تعریف شدند.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - E_t - Spill_t \quad (11)$$

$$0 \leq S \leq Cap \quad (12)$$

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad (13)$$

که در آن ها،  $S_t$  حجم مخزن در ابتدای دوره زمانی  $t$ ،  $S_{t+1}$  حجم مخزن در انتهای دوره زمانی  $t$ ،  $I_t$  ورودی مخزن،  $R_t$  خروجی از مخزن،  $E_t$  حجم تلفات و  $Spill_t$  سرریز از سد در دوره زمانی  $t$  و  $Cap$  ظرفیت مخزن می باشند. تابع هدف تعریف شده برای این مسئله به صورت رابطه (۱۴) است که برابر با مجموع سود اقتصادی حاصل از تخصیص در طول دوره آماری برای مجموعه سدهای منطقه مورد مطالعه است.

$$Max z = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{12} (b_{ir} R_{im} + c_{ir} R_{im}^2) \quad (14)$$

سود اقتصادی حاصل از تخصیص در هر سد، از رابطه (۱۶) استفاده شد.

$$z = \sum_{m=1}^{12} [(b_r R_m + c_r R_m^2) + (b_s S_m + c_s S_m^2)] \quad (16)$$

که در آن،  $b_r$  و  $c_r$  ضرایب تابع سود خروجی،  $b_s$  و  $c_s$  ضرایب تابع سود ذخیره ای،  $R_m$  مقدار خروجی ماهانه و  $S_m$  حجم ذخیره مخزن در هر دوره می‌باشند. برای تهیه پیکربندی سامانه منابع آب حوضه گرگان‌رود، لازم است تمام اجزای سامانه منابع آب حوضه، از جمله رودخانه‌ها، سدها و نقاط نیاز در نرم‌افزار Weap تعریف شده و داده‌ها مربوط به هر کدام وارد شود. در جداول ۱ و ۲ داده‌های مربوط به نیاز ماهانه در نقاط تقاضای موجود در حوضه و اولویت تخصیص مربوط به هر کدام آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تقاضا در بهار و تابستان که مربوط به ماه‌های مارس تا آگوست می‌باشد، نسبت به ماه‌های دیگر بیشتر است و بالاترین اولویت تخصیص به نیاز زیست محیطی تعلق دارد.

الف: تداوم خشکسالی (Drought Duration): تعداد سال‌های خشک متوالی به‌عنوان تداوم خشکسالی تعریف می‌شود.

ب: شدت خشکسالی (Drought Severity): این معیار برابر با مقدار کمبود آب در طول سال‌های خشک متوالی است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Severity_t = \sum^F (D_t - R_t) \quad (15)$$

که در آن،  $R_t$  خروجی در دوره  $t$  و  $D_t$  مقدار آب مورد نیاز نقطه مصرف در دوره  $t$  است.

ج: سود اقتصادی: علاوه بر دو معیار گفته شده در بالا، برای مقایسه دو مدل می‌توان خسارت خشکسالی وارد شده در هر نقطه نیاز را به‌عنوان معیاری برای مقایسه مدل‌های مختلف استفاده کرد. با توجه به این که در این تحقیق از توابع سود اقتصادی استفاده شده است، سود اقتصادی برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد، به‌طوری که هرچه سود اقتصادی بیشتر باشد، نشان‌دهنده کمتر بودن خسارت وارده است. برای محاسبه

جدول ۱- نیاز ماهانه نقاط مصرف سه سد مورد مطالعه (میلیون مترمکعب)

اولویت تخصیص	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	ژوئیه	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	نقاط مصرف
۱۲	۰	۱/۶۵	۰/۶۹	۴/۰۹	۵/۴۴	۴/۹۱	۳/۱۰	۴/۴۹	۳/۰۵	۱/۳۰	۰/۳۲	۰	نیاز کشاورزی سد بوستان
۱۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	نیاز آبی‌پروری سد بوستان
۱۴	۰/۸۱	۰/۷۸	۱/۶۹	۵/۴۳	۸/۲۲	۸/۳۰	۶/۴۵	۵/۵۶	۲/۹۶	۱/۱۲	۰/۶۲	۱/۱۵	مصارف بوستان
۱۵	۰	۴/۹۶	۲/۰۶	۵/۳۲	۱۲/۳۹	۱۳/۸۸	۹/۷۷	۱۰/۹۳	۷/۷۷	۳/۸۹	۰/۹۶	۰	نیاز کشاورزی سد گلستان
۱۵	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	نیاز آبی‌پروری سد گلستان
۱۵	۳/۹۳	۸/۰۳	۵/۴۱	۶/۵۲	۱۰/۵۸	۱۰/۶۳	۶/۷۷	۱۰/۱۷	۱۰/۸۱	۱۱/۵۰	۸/۹۹	۶/۸۳	مصارف گلستان
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲/۵۰	۱۲/۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	انتقال به سد وشمگیر
۱۵	۵/۷۶	۲/۵۵	۰	۱۰/۲۱	۱۳/۲۰	۱۱/۷۹	۷/۴۳	۱۳/۲۳	۱۰/۰۱	۴/۶۸	۱/۱۶	۰	نیاز کشاورزی سد وشمگیر
۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۶/۲۵	۷/۲۵	۷/۲۵	۰/۲۵	نیاز آبی‌پروری سد وشمگیر

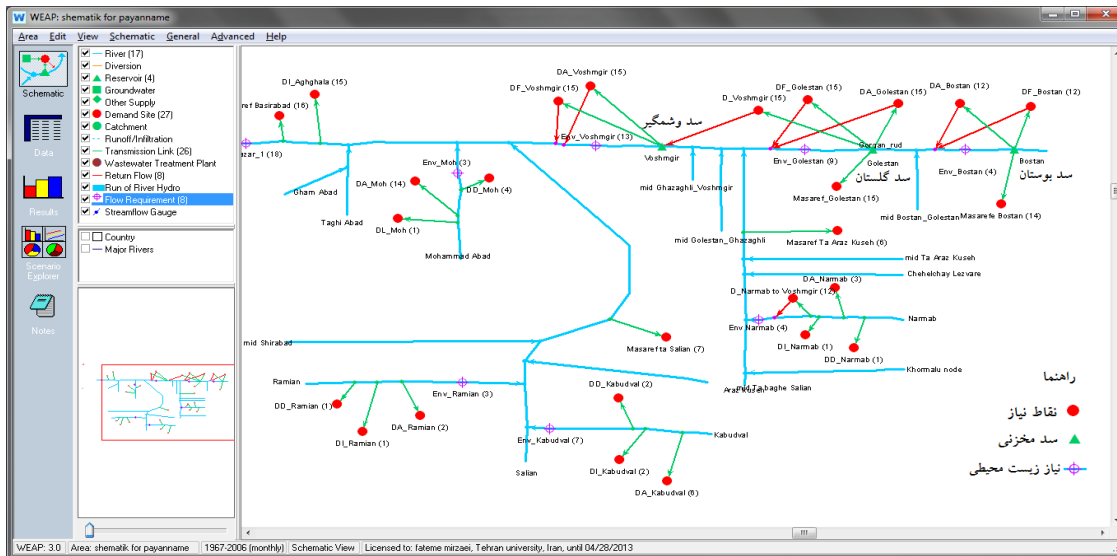
جدول ۲- نیازهای زیست محیطی مربوط به سدها (مترمکعب بر ثانیه)

اولویت	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگست	ژوئیه	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	نیاز زیست محیطی
۱	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۱/۰۹	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	۰/۷۴	۰/۴۲	۰/۴۳	سد بوستان
۱	۲/۱۶	۲/۱۶	۲/۱۶	۵/۴۹	۶/۷۰	۶/۷۰	۶/۷۰	۶/۷۰	۶/۷۰	۳/۷۳	۲/۱۴	۲/۱۶	سد گلستان
۱	۳/۷۸	۳/۷۸	۳/۷۸	۹/۲۹	۱۱/۳۰	۱۱/۳۰	۱۱/۳۰	۱۱/۳۰	۱۱/۳۰	۶/۳۷	۳/۷۴	۳/۷۸	سد وشمگیر

**نتایج و بحث**

مدل‌سازی فیزیکی در WEAP: برای مدل‌سازی حوضه گرگان‌رود در نرم‌افزار Weap، ابتدا پیکربندی سامانه منابع آب حوضه که شامل رودخانه‌ها، سدها، نقاط مصرف و خطوط انتقال است، رسم می‌شود و

سپس داده‌های مربوط به هر کدام از این اجزا در نرم‌افزار وارد می‌شوند. شکل ۴ پیکربندی سامانه منابع آب حوضه گرگان-رود را که در نرم‌افزار Weap تهیه شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۴- پیکربندی سامانه منابع آب حوضه گرگان‌رود، تهیه شده در نرم‌افزار WEAP

مقایسه نتایج سه روش: برای مقایسه سه روش ویپ رایج، هجینگ تک‌سدی و هجینگ چندسدی، شاخص‌های تداوم خشکسالی و شدت خشکسالی برای نقاط مصرف مربوط به هر سد و سود اقتصادی حاصل از تخصیص کل برای هر سد محاسبه شد. در جدول‌های ۳ الی ۵ شاخص‌های خشکسالی محاسبه شده در هر روش ارائه شده است.

همان‌طور که در جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، نتایج معیارهای به‌دست آمده در ستون‌های ۴ و ۶ در نیاز زیست محیطی دو سد بوستان و گلستان و وشمگیر که دارای اولویت اول هستند، در روش تک‌سدی نسبت به روش ویپ رایج مطلوب‌تر است. به‌طور مثال مقدار بیشترین شدت خشکسالی روش تک‌سدی در ستون چهارم، در نیاز زیست محیطی سد بوستان ۱۵ درصد، در نیاز زیست محیطی سد گلستان ۳۷ درصد و در نیاز زیست محیطی سد وشمگیر یک درصد بهبود یافته است. اما در نقاط مصرف دیگر که در اولویت بعدی قرار می‌گیرند، بیشترین شدت

خشکسالی در روش ویپ رایج کمتر از روش تک‌سدی به‌دست آمده است. برای محاسبه میزان سود اقتصادی حاصل از تخصیص هر سد در روش ویپ رایج، از توابع هدف روش تک‌سدی و روش چندسدی به‌طور جداگانه استفاده شده است که در دو ستون آخر جدول ۳ ارائه شده‌اند. سود اقتصادی حاصل از تخصیص در روش ویپ رایج برای سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر به‌ترتیب برابر با ۲/۹۴، ۱۵/۶۲ و ۱۲/۰۲ و در روش هجینگ تک‌سدی برابر با ۷/۷۷، ۲۶/۲۱ و ۱۴/۹۳ است که نشان‌دهنده بهبود نتایج در روش هجینگ تک‌سدی است. در جدول ۵ نتایج حاصل از روش هجینگ چندسدی آورده شده است. مقدار بیشترین شدت خشکسالی نیاز زیست محیطی روش چندسدی در سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر به‌ترتیب هشت، ۲۰ و ۳۹ درصد کمتر از روش ویپ رایج شده است. این مقادیر در روش چندسدی نسبت به روش تک‌سدی تنها در نیاز زیست محیطی سد وشمگیر ۳۸ درصد کاهش داشته است.



جدول ۳- شاخص‌های خشکسالی محاسبه شده در حالت ویپ رایج

(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)
نام سد	نقاط مصرف	بیشترین تداوم خشکسالی (ماه)	بیشترین شدت خشکسالی (میلیون مترمکعب)	مجموع تداوم خشکسالی (ماه)	سود اقتصادی کل	اطمینان پذیری (%)	پارامترهای تک سدی	سود اقتصادی کل پارامترهای چندسدی
سد بوستان	نیاز آبی‌پروری	۲۳	۳/۶۶	۲۵۷	۴۶/۰۵	۴۶/۴۶	۲/۹۴	۱۴/۸۸
	نیازهای کشاورزی	۱۰	۲۶/۷۹	۲۵۳	۷۲۷/۶۵	۴۷/۲۹		
	مصارف بوستان	۲۳	۶۰/۲۲	۲۶۷	۱۱۱۹/۹۱	۴۴/۳۷		
	نیاز محیط زیست	۶	۱۳/۱۰	۱۲۲	۲۵۳/۹۱	۷۴/۵۸		
سد گلستان	نیازهای کشاورزی	۸	۵۷/۸۲	۱۹۴	۱۲۹۲/۱۶	۵۹/۵۸	۱۵/۶۲	۴۰/۳۹
	نیاز آبی‌پروری	۱۶	۲/۰۲	۲۰۶	۲۵/۳۵	۵۷/۰۸		
	مصارف گلستان	۱۶	۱۰۷/۵۷	۲۰۸	۱۲۸۶/۳۶	۵۶/۶۷		
	انتقال به سد وشمگیر	۲	۲۵/۰۰	۵۲	۵۲۷/۲۸	۸۹/۱۷		
سد وشمگیر	نیاز محیط زیست	۵	۳۳/۲۷	۸۵	۵۰۳/۹۰	۸۲/۲۹	۱۲/۰۲	۱۱/۸۵
	نیازهای کشاورزی	۵	۴۲/۶۳	۷۲	۶۷۵/۸۵	۸۵/۰۰		
	نیاز آبی‌پروری	۵	۳/۱۷	۷۲	۱۸/۶۶	۸۵/۰۰		
	نیاز محیط زیست	۳	۲۳/۳۰	۴۱	۱۸۹/۰۳	۹۱/۴۶		

جدول ۴ - شاخص‌های خشکسالی محاسبه شده در روش هجینگ تک‌سدی

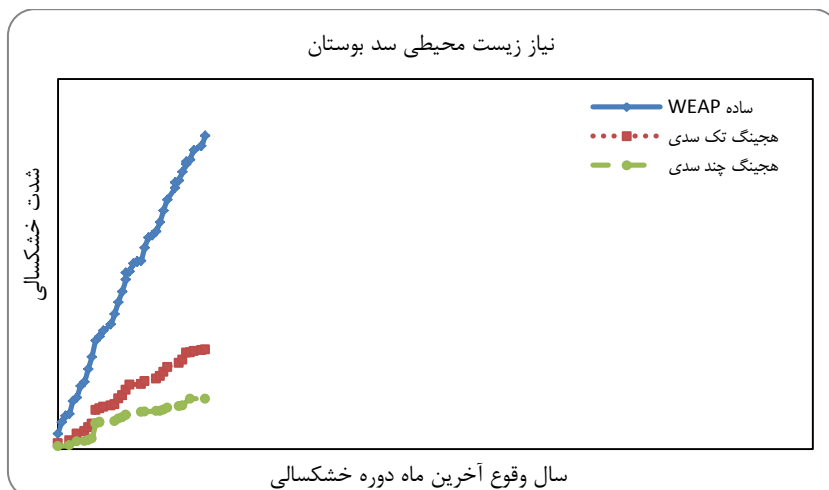
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
نام سد	نقاط مصرف	بیشترین تداوم خشکسالی (ماه)	بیشترین شدت خشکسالی (میلیون مترمکعب)	مجموع تداوم خشکسالی (ماه)	سود اقتصادی کل	اطمینان پذیری (%)	سود اقتصادی کل
سد بوستان	نیاز آبی‌پروری	۳۴	۶/۳۲	۳۳۱	۵۷/۴۱	۳۱/۰۴	۷/۷۷
	نیازهای کشاورزی	۱۰	۲۸/۰۸	۳۰۷	۸۳۱/۵۰	۳۶/۰۴	
	مصارف بوستان	۳۴	۱۱۲/۷۴	۳۳۱	۱۲۴۳/۲۶	۳۱/۰۴	
	نیاز محیط زیست	۶	۱۱/۱۷	۸۱	۸۰/۵۷	۸۳/۱۲	
سد گلستان	نیازهای کشاورزی	۱۰	۶۲/۶۱	۲۷۱	۱۶۲۰/۹۰	۴۳/۵۴	۲۶/۲۱
	نیاز آبی‌پروری	۲۰	۲/۲۲	۲۹۰	۳۱/۰۳	۳۹/۵۸	
	مصارف گلستان	۲۰	۱۲۲/۱۸	۲۹۰	۱۶۱۵/۵۷	۳۹/۵۸	
	انتقال به سد وشمگیر	۲	۲۵/۰۰	۷۸	۷۳۵/۷۴	۸۳/۷۵	
سد وشمگیر	نیاز محیط زیست	۴	۲۱/۰۷	۶۲	۱۹۴/۲۰	۸۷/۱۰	۱۴/۹۳
	نیازهای کشاورزی	۷	۵۶/۸۴	۱۶۶	۱۳۴۰/۳۵	۶۵/۴۲	
	نیاز آبی‌پروری	۷	۵/۶۴	۱۶۶	۵۷/۳۳	۶۵/۴۲	
	نیاز محیط زیست	۴	۲۳/۰۳	۵۴	۱۶۵/۹۸	۸۸/۷۵	

جدول ۵ - شاخص‌های خشکسالی محاسبه شده در روش هجینگ چندسدی

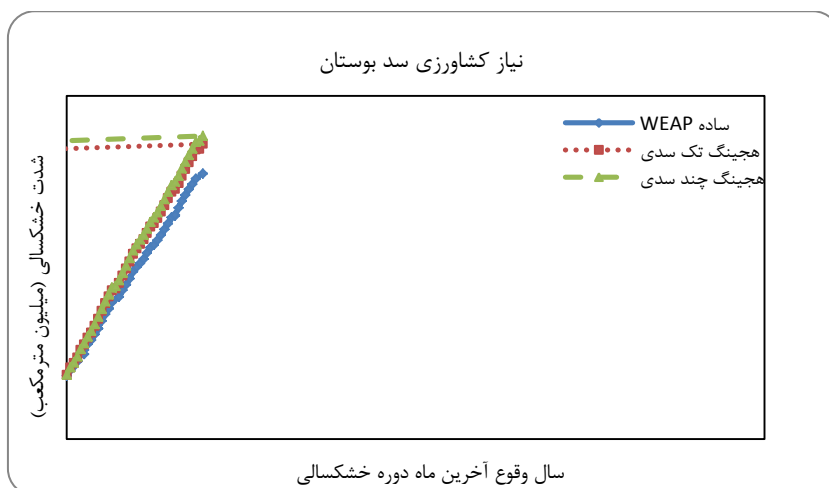
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
نام سد	نقاط مصرف	بیشترین تداوم خشکسالی (ماه)	بیشترین شدت خشکسالی (میلیون مترمکعب)	مجموع تداوم خشکسالی (ماه)	سود اقتصادی کل	اطمینان پذیری (درصد)	سود اقتصادی کل
سد بوستان	نیاز آبی‌پروری	۳۵	۵/۹۲	۳۵۹	۵۹/۸۳	۲۵/۳۰	۴۱/۰۴۴
	نیازهای کشاورزی	۱۰	۲۷/۷۴	۳۳۸	۸۵۹/۷۹	۲۹/۵۸	
	مصارف بوستان	۳۵	۱۱۱/۶۲	۳۵۹	۱۲۵۳/۸۴	۲۵/۳۰	
	نیاز محیط زیست	۶	۱۱/۹۹	۵۳	۴۰/۴۳	۸۸/۹۵	
سد گلستان	نیازهای کشاورزی	۱۰	۵۴/۹۴	۲۸۴	۱۴۱۹/۸۹	۴۰/۸۳	۶۹/۴۴۲
	نیاز آبی‌پروری	۳۹	۴/۴۸	۳۴۴	۴۰/۰۴	۲۶/۶۷	
	مصارف گلستان	۳۹	۲۱۶/۶۴	۳۵۲	۱۸۳۱/۶۱	۲۶/۶۷	
	انتقال به سد وشمگیر	۲	۲۳/۳۶	۵۸	۴۶۸/۲۳	۸۷/۹۲	
سد وشمگیر	نیاز محیط زیست	۷	۲۶/۶۴	۱۰۳	۳۹۶/۷۷	۷۸/۵۴	۱۳/۷۹
	نیازهای کشاورزی	۵	۴۴/۸۹	۱۱۱	۸۰۶/۳۵	۷۶/۸۷	
	نیاز آبی‌پروری	۵	۳/۷۶	۱۱۱	۲۵/۹۱	۷۶/۸۷	
	نیاز محیط زیست	۴	۱۴/۲۳	۴۱	۱۱۰/۶۳	۹۱/۴۶	

ملاحظه می‌شود، نتیجه به‌دست آمده در روش چندسدی ۱/۸ برابر شده است. لازم به ذکر است که سود حاصل از تخصیص در هر سد به‌صورت جداگانه نیز در روش چندسدی بالاتر است. در شکل‌های ۵ الی ۸ نمودار تغییرات شدت خشکسالی در نیاز زیست محیطی و نیاز کشاورزی دو سد بوستان و گلستان به‌عنوان نمونه ارائه شده است.

با توجه به متفاوت بودن توابع هدف دو روش تک‌سدی و چندسدی، معیار سود اقتصادی در این دو روش با یکدیگر قابل مقایسه نیستند. در روش چندسدی، با توجه به این‌که هدف بیشینه کردن سود حاصل از مجموع سه سد بوده است، مقدار مجموع سود اقتصادی سه سد مورد مقایسه قرار می‌گیرد، که این مقدار در روش ویپ برابر با ۶۷/۱۲ و در روش چندسدی برابر با ۱۲۴/۲۸ است. همان‌طور که



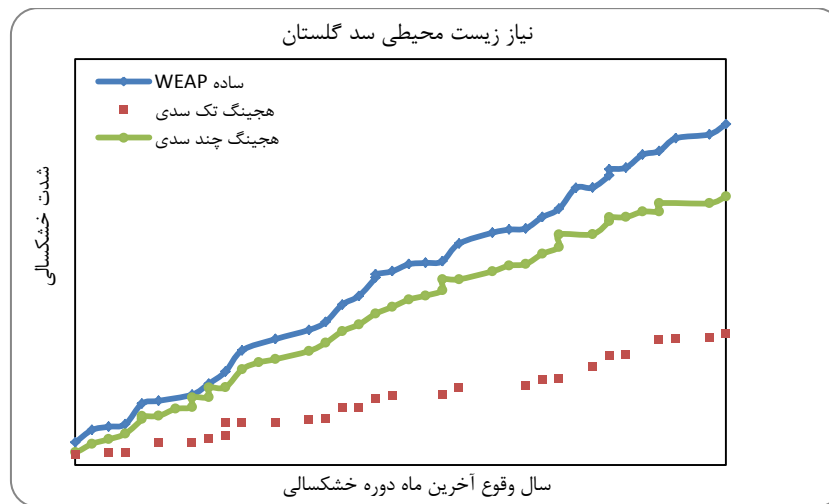
شکل ۵- نمودار تجمعی شدت خشکسالی حاصل از بهره‌برداری به‌وسیله سه روش مورد بررسی در نیاز محیط زیست سد بوستان



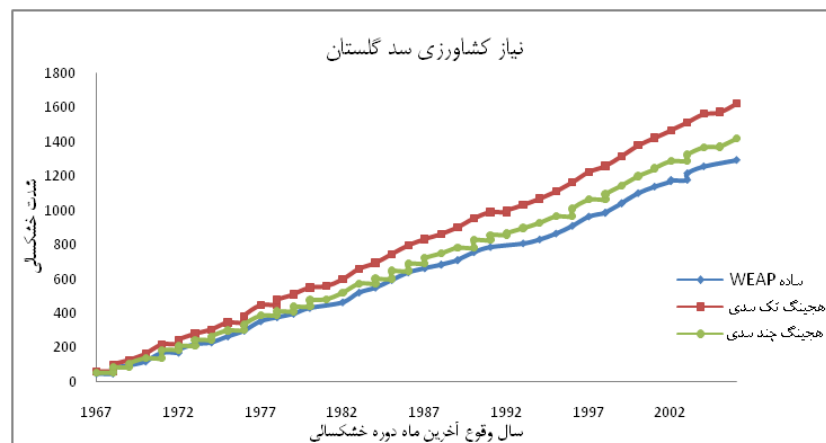
شکل ۶- نمودار تجمعی شدت خشکسالی حاصل از بهره‌برداری توسط سه روش مورد بررسی در نیاز کشاورزی سد بوستان

قرار گرفته‌اند و روند مطلوب‌تری نسبت به روش ویپ ساده نشان می‌دهند. در نمودار شکل ۶ خشکسالی‌های رخ داده در روش ویپ ساده روند مطلوب‌تری را نشان می‌دهند.

در نمودار تجمعی شکل ۵ روند شدت خشکسالی‌های رخ داده در نیاز زیست محیطی سد بوستان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار روش چندسدی و تک‌سدی زیر نمودار روش ویپ رایج



شکل ۷- نمودار تجمعی شدت خشکسالی حاصل از بهره‌برداری به‌وسیله سه روش مورد بررسی در نیاز محیط زیست سد گلستان



شکل ۸- نمودار تجمعی شدت خشکسالی حاصل از بهره‌برداری به‌وسیله سه روش مورد بررسی در نیاز کشاورزی سد گلستان

قانون بهره‌برداری استاندارد (SOP) در تعیین مقدار خروجی از مخزن هر دوره در این مدل، باعث شده است که مدل Weap به دوره‌های خشکسالی و پارامترهای اقتصادی غیرحساس باشد. در تحقیق حاضر با ایجاد تغییر در قوانین بهره‌برداری از مخزن سعی شده است، خسارات ناشی از خشکسالی کاهش یابد و سود اقتصادی حاصل از تخصیص در طول دوره بهره‌برداری افزایش داده شود. برای تغییر در قوانین بهره‌برداری مدل، یک برنامه الحاقی در نرم‌افزار Weap توسعه داده شد. این برنامه برای بهره‌برداری از مخزن، قوانین هجینگ را اعمال می‌کند. قوانین هجینگ با ایجاد محدودیت در تخصیص، شدت کمبود آب را در دوره‌های خشک پخش می‌کنند و با بالا بردن تداوم خشکسالی، شدت خشکسالی را کاهش می‌دهند. برای به‌دست آوردن قوانین محدودکننده هجینگ دونقطه-

در شکل ۷ روند خشکسالی‌های رخ داده در روش تک‌سدی مطلوب‌تر از دو روش دیگر است، به‌طوری‌که خشکسالی‌های کمتری با شدت‌های کمتر رخ داده است. اما در شکل ۸ روند نمودار مربوط به روش تک-سدی خشکسالی‌های با شدت بیشتری نسبت به دو روش دیگر نشان می‌دهد که علت این امر ثابت بودن مقدار آب و تخصیص آب به نیازهای با اولویت بالاتر است.

در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، مدل‌های منابع آب موجود نقشی کاربردی و مهم را ایفا می‌کنند. یکی از مدل‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب، مدل Weap است که از کاربردهای آن شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخازن در طول دوره آماری مورد نظر است. قانون بهره‌برداری مورد استفاده در این مدل، قانون بهره‌برداری استاندارد (SOP) است. استفاده از

اولویت بالاتر بوده است، آب کمتری به نیازهای دیگر تخصیص پیدا کرده است. بنابراین مجموع کمبود آب در تامین نیازهای غیر از نیاز زیست محیطی در دو روش هجینگ بیشتر از روش Weap ساده خواهد بود. نظر به این که هدف اصلی در این تحقیق کاهش خسارات خشکسالی یا به عبارتی افزایش سود اقتصادی است، ملاحظه می شود که سود اقتصادی حاصل از روش هجینگ تک سدی مربوط به هر سد نسبت به روش Weap ساده بیشتر شده است. در روش چندسدی با توجه به این که مجموع سه سد همزمان دیده شده است، برای مقایسه سود اقتصادی حاصل از تخصیص، باید مجموع سود اقتصادی حاصل از سه سد مورد مقایسه قرار گیرد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد، سود اقتصادی حاصل از روش چندسدی نه تنها به طور مجموع سه سد، بلکه برای هر سد به طور جداگانه نیز بیشتر از روش Weap ساده است. به علت متفاوت بودن توابع سود اقتصادی روش تک سدی و روش چندسدی، سود اقتصادی به دست آمده از این دو روش با یکدیگر قابل مقایسه نیستند و تنها می توان به مقایسه نتایج شدت و تداوم خشکسالی اکتفا کرد که نتایج به دست آمده در نیاز زیست محیطی سد بوستان و وشمگیر برتری روش چندسدی و در سد گلستان برتری روش تک سدی را نشان می دهد.

ای مورد نظر، از پارامترهای توابع سود واقعی هر سد استفاده شده است. در حوضه گرگان رود مورد مطالعه، سه سد سری بوستان، گلستان و وشمگیر مورد آزمون قرار گرفتند. هر کدام از سدها دارای مصارف مختلفی از جمله نیاز کشاورزی و نیاز زیست محیطی هستند. برای نیاز زیست محیطی، اولویت اول در نظر گرفته شد و نیازهای دیگر در اولویت بعدی قرار گرفتند.

برای اعمال قوانین هجینگ دو روش تک سدی و چندسدی مورد بررسی قرار گرفت. در روش تک سدی قوانین محدودکننده هر سد، به وسیله پارامترهای اقتصادی آن سد به دست آمد. اما در روش چندسدی با در نظر گرفتن سه سد مورد مطالعه به صورت یک مجموعه متاثر از یکدیگر، پارامترهای توابع سود اقتصادی سدها بهینه شده و در محاسبه قوانین محدودکننده مورد استفاده قرار گرفتند. برای بهینه سازی پارامترهای توابع سود از نرم افزار Lingo استفاده شد و تابع هدف بهینه سازی، سود حاصل از خروجی سه سد قرار داده شد. نمودارهای تجمعی شدت خشکسالی نیاز زیست محیطی دو سد بوستان و گلستان نشان می دهند که کمبودهای حاصل از تخصیص به وسیله دو روش هجینگ تک سدی و چندسدی دارای شدت کمتری نسبت به روش ویپ رایج هستند. با توجه به ثابت بودن مقدار آب، با تخصیص آب بیشتر به نیاز زیست محیطی که دارای

#### منابع مورد استفاده

1. Bower, B.T., M.M. Hufschmidt and W.W. Reedy. 1966. Operating procedures: Their role in the design of water-resource systems by simulation analyses. In: A. Maass., M.M.R. Hufschmidt, Design of Water Resources Systems. Harvard University Press, Cambridge, MA, 443-458.
2. Draper, A.J. and J.R. Lund. 2004. Optimal hedging and carryover storage value. Journal of Water Resources Planning and Management, 130(1): 83-87.
3. Hashimoto, T., J.R. Stedinger and D.P. Loucks. 1982. Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, 18(1): 14-20.
4. Jacoby, H.D. and D.P. Loucks. 1972. Combined use of optimization and simulation models in river basin Planning. Water Resources Research, 8(6): 1401-1414.
5. Klemes, V. 1977. Value of information in reservoir optimization. Water Resources Research, 13(5): 857-850.
6. Mays, L.W. 1996. Water Resources Handbook. McGraw-Hill Professional.
7. Lund, J.R. and I. Ferreira. 1997. Operating rule optimization for Missouri river reservoir system. Journal of Water Resources Planning and Management, 122(4): 287-295.
8. Lund, J.R. and J. Guzman. 1996. Developing seasonal and long-term reservoir system operation plans using HEC-PRM, Technical Report, RD-40, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
9. Lund, J.R. and J. Guzman. 1999. Derived operating rules for reservoirs in series or in parallel. Journal of Water Resources Planning and Management, 125(3): 143-153.

10. Nalbantis, I. and D. Koutsoyiannis. 1997. A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems. *Water Resources Research*, 33(9): 2165-2177.
11. Wurbs, R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4): 455-472.

## Developing WEAP an integrated water resources model for modeling in drought conditions

Fatemrh Mirzaie Nodoushan<sup>\*1</sup>, Shahab Araghinejad<sup>2</sup> and Omid Bozorghaddad<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MSc, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran, <sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran and

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

Received: 01 July 2014

Accepted: 10 December 2014

### Abstract

One of the most important problems of water resources operation systems, specifically surface reservoirs in confronting hydrologic variability, is considering drought phenomenon effects on operation methods. As well as flow variations relative to average flow, duration of the drought is another important factor. One way to resist the drought is suitable operation of water resources during drought conditions. There are several models developed for water resources management such as WEAP software. But such models do not have water resources modeling capability during drought conditions. Therefore, developing such capability on WEAP model is highly important for water resources engineers. Developing the hedging rules for operation based on WEAP software was investigated by this research by which an extension program was developed in WEAP software. Developing such model would enable us to jointly optimize and simulate on basins. In order to test the capability of the complementary program, modeling was performed on operation of Gorganrood river reservoirs. Then the results of the developed model were compared to the ordinary WEAP software results. The results indicated 1 to 38 percent increased capability of WEAP software on modeling for hydrologic drought conditions. It is worth mentioning that the complementary model was developed as a general model by which the model can be used on different basins.

**Key words:** Drought, Hedging, Optimization, Reservoir operation, Simulation and WEAP

---

\* Corresponding author: nodoushan\_m@ut.ac.ir