



Conjunctive Use of Water Resources Based on Drought Effects Reduction

V. Raghibi¹, H. R. Safavi^{2*}
and M. Mortazavi-Naeini³

Abstract

In the recent decades, continuous droughts in Iran caused a growing withdrawal trend from groundwater resources and reduce in surface water resources, especially storage volume of dams. Therefore, operation of water resources requires reviewing based on hydrologic conditions and especially, drought. On the other side, for the definition and characterization of drought by indices, a comprehensive survey of data existence, index applicability and goals in water resources operation is needed. In this article and towards an applicable standardized index in the conjunctive use of water resources, nonparametric functions used to achieve integration and applicability. The status of water resources is calculated via integration of climatic water balance and available hydrologic water by multivariate nonparametric function to obtain integrated drought index (IDI). In this study, the Zayandehrud River Basin is selected as the case study due to conjunctive use of surface and groundwater and occurrence of recent droughts in it. Zayandehrud Dam has a key role in streamflow regulation for downstream demands in the basin. With the index tool to determine the condition of the subbasins, dam resource reoperation is followed by the purpose of the minimum drought intensity. This way of operation resulted in demands supply reliability of more than 90%, Lenjanat aquifer balance, storage increase of Isfahan-Borkhar and Kuhpaye-Segzi aquifers by 400 million cubic meters, supply of Gavkhooni wetland water right with reliability of 96% and mean increase of 2.7 million cubic meters per month in streamflow entering the wetland in comparison with the past. The results underline the importance of the drought conditions consideration in the conjunctive use of water resources at the basin.

Keywords: Multivariate Analysis, Meteorological Drought, Hydrological Drought, Integrated Drought Index (IDI), Nonparametric Functions, Conjunctive Use.

Received: September 28, 2016

Accepted: November 30, 2016

بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب با تأکید بر کاهش اثرات خشکسالی

وحید رقیبی^۱، حمیدرضا صفوی^{۲*}
و سید محمد مرتضوی نائینی^۳

چکیده

در چند دهه اخیر وقوع خشکسالی‌های ممتد در کشور باعث روند فزاینده برداشت از منابع آب زیرزمینی و از طرف دیگر کاهش منابع آب سطحی به ویژه حجم ذخیره در مخازن سدها شده است. لذا بهره‌برداری از منابع آب نیاز به بازنگری براساس شرایط هیدرولوژیک به وقوع پیوسته و به ویژه خشکسالی دارد. از طرف دیگر برای تعریف خشکسالی و تبیین آن به‌وسیله شاخص‌ها، احتیاج به بررسی همه جانبه از نظر وجود داده، کاربردی بودن شاخص و حصول اهداف در زمینه بهره‌برداری از منابع آب دارد. در این مقاله و در راستای استاندارد سازی شاخص کاربردی در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب از توابع غیرپارامتریک استفاده شده تا جامعیت و کاربردی بودن آن حاصل شود. وضعیت منابع آب از طریق ادغام بیلان اقلیمی و آب دسترس هیدرولوژیک به‌وسیله تابع غیرپارامتریک چند متغیره محاسبه شده تا شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI) به دست آید. در این مطالعه حوضه آبریز زاینده‌رود به دلیل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و وقوع خشکسالی‌های اخیر در آن به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در این حوضه سد زاینده‌رود نقش کلیدی در تنظیم جریان سطحی برای مصارف مختلف زیر دست آن را دارد. با داشتن ابزار شاخص تعیین وضعیت منابع آب در زیرحوضه‌ها، بهره‌برداری از این سد در جهت کاهش اثرات خشکسالی دنبال شده است. این شیوه بهره‌برداری با قابلیت اطمینان بالای ۹۰٪ در تأمین نیازها سبب تعادل آبخوان لنجانات، افزایش ذخیره دو آبخوان اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگری تا ۴۰۰ میلیون مترمکعب، تأمین قناب تالاب گاوخونی با قابلیت اطمینان ۹۶٪ و افزایش متوسط ۲/۷ میلیون مترمکعب در ماه در ورودی به تالاب نسبت به گذشته شده است. این نتایج حاکی از اهمیت در نظر گرفتن شرایط خشکسالی در بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب حوضه است.

کلمات کلیدی: تحلیل چند متغیره، خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیک، شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI)، توابع غیرپارامتریک، بهره‌برداری تلفیقی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۷/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۹/۱۰

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan. Email: v.raghibi@cv.iut.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan. Email: hasafavi@cc.iut.ac.ir

3- Environmental Change Institute, University of Oxford, UK. Email: Mohammad.mortazavi-naeini@ouce.ox.ac.uk

*- Corresponding Author

۱- کاندیدای دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۳- مؤسسه تغییرات محیط زیست، دانشگاه آکسفورد، انگلستان

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

تخمین تأثیرات خشکسالی در سالهای اخیر بر افزایش خسارات ناشی از آن تأکید دارد. این تأثیرات با زمان و با افزایش نیاز جامعه به آب و خدمات محیطی افزایش می‌یابد (Wada et al., 2011). هر چند خشکسالی در هر جایی اتفاق می‌افتد، ولی بیشترین خسارات آن در مناطق خشک یا نیمه خشک است که در شرایط معمول نیز دسترسی به آب در حد زیر متوسط است و نیازها نزدیک به یا بیش از دسترسی طبیعی به آب است و اغلب جامعه توانایی سازگاری با خطر خشکسالی را ندارد (Dai, 2011). از طرف دیگر شیوه‌های متداولی برای تأمین و ذخیره آب در چنین مناطقی وجود دارد که بیشتر بر اساس نمکزدایی (Shrestha et al., 2011)، جمع‌آوری آب باران (European Commission, 2012)، بازیابی فاضلاب (European Commission, 2012; Grant et al., 2012) و روش‌های بحث برانگیزی مانند انتقال آب (Martin-Ortega et al., 2011) است. نکته اصلی در این جا حرکت از مدیریت کوتاه مدت بحران به برنامه‌ریزی بلند مدت با معیارهای پیشگیرانه است (Wilhite, 2000). دستیابی به این مهم، نیازمند بهبود دانش روند فیزیکی خشکسالی است تا پیش‌بینی، هشدار سریع و ارزیابی اثرات خشکسالی ممکن باشد.

به تجربه ثابت شده که یک نشانگر اغلب برای تصمیم‌گیری کافی نبوده و استفاده از چند نشانگر مفیدتر خواهد بود. توسعه یک شاخص جامع برای کمی‌سازی شدت خشکسالی از چالش‌های موجود بر سر راه تصمیم‌گیرندگان بخش مدیریت منابع آب و سیاست‌های مدیریت بهره‌برداری است. در این میان مشکل اصلی مقایسه در تفاوت مقیاس‌های شاخص‌های مختلف است و مقادیر نشانگرها (مثل بارش ماهانه، ذخیره ماهانه مخزن) می‌توانند نسبت به زمان و مکان با توجه به تحلیل فراوانی تغییر کنند. با توجه به این مشکل، کاربرد بیش از یک نشانگر در مدیریت خشکسالی باعث سردرگمی شده و پاسخ به موقع و مناسب را به تأخیر می‌اندازد. از این‌رو، از گذشته سعی بر توسعه شاخص‌های جامعی از قبیل PDSI^۲ (Palmer, 1965) و SWSI^۳ (Shafer and Dezman, 1982) شده که هر کدام نقاط قوت و ضعف خود را دارند. در ادامه این تلاش‌ها، مطالعات زیادی جهت توسعه شاخص‌های جامع چندگانه انجام شده تا بتوان بر اساس ترکیب چند متغیر یا شاخص، نشانگر خشکسالی جامعی را ارائه داد. از این مطالعات به عنوان نمونه می‌توان از شاخص ترکیبی برای بررسی آسیب‌پذیری خشکسالی (Safavi et al., 2014)، نشانگر خشکسالی ترکیبی (CDI)^۴ (Sepulcre-Canto et al., 2012)، شاخص خشکسالی ترکیبی (HDI)^۵ (Karamouz et al., 2009) و شاخص خشکسالی استاندارد

از نظر گستردگی جغرافیایی خطر، خشکسالی (با ۷/۵ درصد) در رتبه دوم و پس از سیل (با ۱۱ درصد) از مساحت خشکی‌های زمین را در بر دارد (Nagarajan, 2009). خشکسالی می‌تواند مناطق گسترده‌ای را فراگیرد و برای ماه‌ها تا سال‌ها تداوم یابد و آثار ویرانگری بر بخش‌های اقتصادی داشته باشد (Sheffield and Wood, 2011; Tallaksen and Van Lanen, 2004). خشکسالی به عنوان یک مشخصه اقلیمی قابل برگشت تلقی می‌شود و دارای مفهوم مطلق نیست. هر خشکسالی با مشخصه‌هایی مانند شدت، طول مدت و محدوده مکانی با خشکسالی‌های دیگر تفاوت دارد (Salamat and Alleyassin, 2001). خشکسالی که «فاجعه خزنده» نیز نامیده می‌شود (Mishra and Singh, 2010; Wilhite, 2000) رخدادی پیچیده است و بدینسان از جهات مختلفی تعریف شده است. تعریف جامعی از خشکسالی وجود ندارد و تعاریف گوناگونی برای آن در منابع ذکر شده است که به دلیل نسبی بودن مفهوم خشکسالی و نحوه عملکرد آن در زمان و مکان و تأثیرات آن است (Dracup et al., 1980; Mishra and Singh, 2010; Sheffield and Wood, 2011; Wilhite and Glantz, 1985). در این تحقیق از تعریف خشکسالی که توسط Tallaksen and Van Lanen, 2004 ارائه شده استفاده شده است: خشکسالی یک دوره پایدار پایین‌تر از حالت نرمال سطح دسترسی به آب است. این یک رخداد دوره‌ای است و با مشخصات زمانی و مکانی تعیین شده که به طور قابل توجه‌ای از یک منطقه به منطقه دیگر تغییر می‌کند.

اولین نشانه‌های خشکسالی معمولاً در ثبت بارندگی مشاهده می‌شود. به طور کلی کمبود طولانی مدت بارش سبب ورودی کمتر به سیستم هیدرولوژی می‌شود. در طی یک دوره خشک، تبخیر و تعرق پتانسیل می‌تواند افزایش یابد. پس از یک دوره زمانی کوتاه، مقدار ذخیره رطوبت خاک تحت اثر این شرایط شروع به کاهش می‌کند. در نتیجه تغذیه سیستم آب زیرزمینی کم شده و سطح تراز آب چاه‌ها ممکن است یک سال یا بیشتر پس از شروع خشکسالی به کمبود بارندگی واکنش نشان بدهد (Van Loon, 2013). جریان سطحی که به مقدار زیادی به ذخایر وابسته است با افت بارش‌ها و تراز ذخیره سطحی و زیرزمینی کاهش می‌یابد (Van Lanen et al., 2004). روندهای مذکور با عنوان انتشار خشکسالی بیان شده و بیانگر انتقال خشکسالی در اجزاء چرخه هیدرولوژی است.

چند متغیره (MSDI)^۶ (Hao and AghaKouchak, 2013) نام برد. لازم به ذکر است که بسیاری از شاخص‌ها، عضوی از خانواده شاخص‌های خشکسالی استاندارد شده^۷ هستند. SPI^۸ (McKee et al., 1993) یک نمونه از آن‌ها است که به صورت گسترده استفاده شده است (Núñez et al., 2014). مفهوم این شاخص برای فرموله کردن شاخص‌های جدید خشکسالی نیز تعمیم داده شده است که نمونه آن SPEI^۹ است. هر دوی این شاخص‌ها بر این پایه استوار هستند که یک توزیع احتمالاتی مناسب برای نرمال کردن شاخص انتخاب شود تا مقایسه بین اقلیم‌های مختلف تسهیل شود (Stagge et al., 2015). اما مقادیر SPI به خصوص به انتخاب تابع توزیع پارامتریک در دو انتهای آن حساس است (Quiring, 2009). انتخاب نامناسب توزیع احتمالاتی در محاسبه شاخص استاندارد ممکن است باعث شود مقادیر شدت خشکسالی بیشتر یا کمتر از واقعیت اظهار شوند (Farahmand and AghaKouchak, 2015). لذا برای رفع مشکل توابع توزیع پارامتریک، توابع تجربی غیرپارامتریک پیشنهاد شده‌اند (Farahmand and AghaKouchak, 2015).

در زمینه بهره‌برداری از منابع آب به ویژه مخازن سدها در شرایط خشکسالی تاکنون تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته که عمدتاً براساس مفهوم جیره بندی استوار است. بر این اساس، در کار Cañón et al., 2009 مدیریت سیستم چند مخزنه برای کاهش اثرات خشکسالی بهینه شد. به علاوه سطوح جیره‌بندی مخزن و زمان شروع آن در تحقیق Eum et al., 2011 با وقوع خشکسالی اعلام و مقادیر رهاسازی از سد با هدف حداکثر درآمد توسط برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی تعیین شدند. در تحقیق Gholamzadeh et al. (2011) از رویکرد سیستم زود هنگام خشکسالی جهت مدیریت سد زاینده‌رود و تعیین سیاست‌های جیره‌بندی استفاده شده است. همچنین در ادامه Hashemi Sheikhsabani et al. (2016) با بسط سیستم مذکور آن را در حوضه زاینده‌رود مورد مطالعه قرار دادند. Karamouz et al., 2013 الگوریتم پایش و هشدار خشکسالی را بر اساس دو شاخص SPI و PDSI بسط دادند که بر مبنای مقادیر مختلف شاخص‌ها، سیاست‌های مدیریتی تشریح شده تا عملکرد مخزن سد جهت برآورده کردن درصدی از نیازها برنامه‌ریزی شود. سیستم پشتیبان تصمیم خشکسالی توسط Nam et al., 2012 تهیه شده که بر اساس شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و مخزن، شرایط منطقه تعیین و بر پایه شرایط اقلیمی و سناریوهای مدیریت رهاسازی، نتایج تصمیمات در تولید محصولات نشان داده می‌شد. در

سیستم‌های منابع آب و دارای مخزن با توجه به این که عملکرد سیستم را می‌توان با حجم ذخیره مخزن بیان نمود، استفاده از آن به عنوان معرف خشکسالی مناسب است (Garrote et al., 2007)، هر چند سیستم‌های مبتنی بر چندین معرف و شاخص کارا تر هستند (Wilhite et al., 2014). در این مقاله سیستم پایش خشکسالی به وسیله شاخص جامع خشکسالی به اقدامات مدیریتی متصل شده که نشانگر وضعیت کل منابع آب دسترس اعم از سطحی و زیرزمینی است که کمتر در مطالعات قبلی به آن پرداخته شده است. براساس تعریف این شاخص به نحوه بهره‌برداری بهینه تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه پرداخته تا اثرات خشکسالی به حداقل برسد. البته در این تحقیق بدنبال جدا کردن اثرات کمبود آب حاصل از مصرف در خشکسالی نبوده و شاخص سعی دارد تصویر کلی وضعیت منابع آب را به همراه تأثیرات مصارف و توسعه جوامع نشان دهد. در این تحقیق سعی بر آن است چارچوبی در مدیریت مخزن ارائه شود که فارغ از زمان و مکان قابل کاربرد و تعمیم به دیگر مناطق باشد و داده‌های مشاهداتی تأثیری بر نتایج نشانگرها نداشته باشد. سپس عملکرد چارچوب معرفی شده در سیستم‌های تأمین آب حوضه آبریز زاینده‌رود مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته و از مدل جامع منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود که Safavi et al. (2015) در محیط نرم‌افزار WEAP^{۱۰} توسعه داده‌اند استفاده شده است.

۲- روش تحقیق

از جمله مسایل مهم در زمینه زیرساخت‌های اساسی مانند سدها، مسائل بهره‌برداری مجدد^{۱۱} و بهبود کارایی امکانات موجود برای اهداف چندگانه است (Davis, 2007). گزارش کمیته جهانی سدها بیشتر بر پایه مفاهیم و معیارهای توسعه پایدار با محوریت سیستم‌های منابع آب پایدار شکل گرفته است و این مفاهیم در مواضعی قابل کاربرد است که بهره‌برداری مجدد سد و امکان ذخیره‌سازی مجدد وجود داشته باشد (World Commission on Dams, 2000). از این رو با توجه به اثرات مخرب خشکسالی در ایران و به‌خصوص فلات مرکزی ایران و حوضه آبریز زاینده‌رود، هدف از این مقاله معرفی رویکردی جدید در مدیریت بهره‌برداری از منابع آب حوضه با ارزیابی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص یکپارچه خشکسالی در زیرحوضه‌های متأثر از جریان سطحی در حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشد. در ابتدا ابزار ارزیابی شاخص یکپارچه خشکسالی برای تحلیل و شناخت شرایط خشکسالی تشریح شده است؛ سپس مدل شبیه‌ساز سیستم منابع آب توضیح داده می‌شود. از

آنجا که ارائه هرگونه راهکار کمی مدیریتی نیاز به بررسی و بهینه‌سازی دارد، ابزارهای بهینه‌سازی در بخش آخر ارائه شده است. لازم به توضیح است که متغیر تصمیم مدیریت، مقدار رهاسازی بوده که به وسیله بهینه‌سازی و با هدف حداقل شدت شاخص خشکسالی تعیین و آثار هر مقدار ارائه شده از بهینه‌سازی توسط مدل شبیه‌ساز مشخص شده تا وضعیت زیرحوضه‌های متأثر از خشکسالی توسط شاخص یکپارچه نمایان شود.

۱-۲- تحلیل خشکسالی

در بررسی خشکسالی هواشناسی، نه تنها لازم است که وضعیت بارش مد نظر قرار گیرد، بلکه هر آنچه که به صورت بالقوه ممکن است در شدت خشکسالی مانند دما مؤثر باشد، در نظر گرفته شود (Stagge et al., 2014). تبخیر و تعرق پتانسیل ممکن است به علت تابش زیاد، سرعت باد یا کمبود فشار بخار که بر اثر دمای بالا بوده افزایش یابد. اختلاف بین بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل نشانگر ساده‌ای از وضعیت بیلان اقلیمی آب است (Thornthwaite, 1948). این روش اندازه‌گیری مطمئن‌تری از شدت خشکسالی در مقایسه با صرفاً در نظر گرفتن عامل بارندگی است (Begueria et al., 2014).

بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل به طور کل برابر متوسط یا متوسط وزنی داده‌های ایستگاه‌های درون یا مجاور حوضه/زیرحوضه است. اختلاف بین این دو متغیر برای ماه t برابر است با:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

که در این رابطه D_i بیلان اقلیمی آب در ماه i بر حسب میلیمتر، P_i بارش ماه i بر حسب میلیمتر و PET_i مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه i بر حسب میلیمتر است. این رابطه یک مقیاس ساده از بیلان اقلیمی آب در هر ماه به دست می‌دهد. برای تخمین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در این تحقیق از روش هارگریوز اصلاح شده (Droogers and Allen, 2002) استفاده شد تا پاسخی مناسب به شرایط کمبود داده و عدم دقت‌های احتمالی باشد. همچنین جهت بیلان بندی منابع آب برای رواناب یا جریان سطحی (R/S) از احجام مشاهداتی در ایستگاه‌های موجود استفاده شده، به طوری که در هر زیرحوضه حداقل یک ایستگاه هیدرومتری منتخب وجود داشته باشد. حجم ذخیره آب زیرزمینی (GS) بدین شکل تخمین زده شده که تفاضل تراز سطح آب و سنگ بستر در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه تا ضخامت و حجم لایه اشباع بدست آید و با ضرب حجم در ضریب ذخیره، میزان ذخیره آب زیرزمینی حاصل شود. حجم ذخیره آب

سطحی (SS) نیز از مقادیر گزارش شده استخراج شده است. بنابر این تعاریف، مجموع احجام ذخایر آب سطحی و زیرزمینی و رواناب یا جریان سطحی به عنوان «آب دسترس» (AW) قلمداد می‌شود و برای ماه t برابر است با:

$$AW_t = SS_t + GS_t + R_t/S_t \quad (2)$$

که احجام در این رابطه بر حسب میلیون مترمکعب در ماه است. سری متغیرهای بیلان اقلیمی آب و آب دسترس در شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI) به صورت دو متغیره ثبت می‌شوند تا ارزیابی احتمالاتی از خشکسالی‌ها را ممکن سازند.

در یک چارچوب جامع برای پایش خشکسالی نیاز است تا نشانگرهای مختلفی مانند بارش، تبخیر و تعرق، رواناب، آب زیرزمینی و... جستجو و متمایز شوند که اغلب دارای توابع توزیع احتمالاتی گوناگونی هستند (Farahmand and AghaKouchak, 2015). حتی توزیع احتمالاتی یک متغیر مانند بارش در شرایط اقلیمی مختلف متفاوت است. این حساسیت به تغییر ممکن است به تفسیری ناسازگار یا انحراف یافته از خشکسالی شدید در مناطق مختلف بیانجامد. در روش چند توزیعی که انتخاب بهترین گزینه برای توزیع نسبت به مکان است، مشخصات حالات حدی نیز نسبت به مکان تغییر می‌کنند. برای رفع این مشکلات، یک روش ناپارامتریک را می‌توان به کار برد تا انواع متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیک را بررسی کرده و نیازی به تعیین توزیع‌های پارامتریک بیان کننده هر یک از متغیرها نباشد. این روش بسیار سودمندی خواهد بود؛ بویژه هنگامی که با نشانگرهای خشکسالی متعددی سروکار دارید (Momtaz et al., 2014; Nijssen et al., 2014; Sheffield et al., 2014). این یک شیوه کلی در روش‌های محاسبه شاخص به ویژه استاندارد شده است که به وسیله توابع پارامتریک محاسبه می‌شوند (McKee et al., 1993) و می‌توان توابع ناپارامتریک احتمالاتی تجربی را جایگزین آن‌ها کرد تا شاخص ناپارامتریک استاندارد شده را بدست آورد. تابع احتمالاتی تجربی گرینگورتن^{۱۲} که در تحقیقات قبل پیشنهاد شده (Hao and AghaKouchak, 2014) در این تحقیق به کار برده شده است تا شاخص خشکسالی چند متغیره‌ای برای تعداد دلخواه از (مجموعه‌ای از) متغیرهای مربوط به خشکسالی را پوشش دهد. برای دو متغیر خشکسالی (مانند X =بیان اقلیمی آب و Y =آب دسترس)، توزیع دو متغیره بدین صورت تعریف می‌شود که $P(X \leq x, Y \leq y) = P_p$ و در این رابطه P_p احتمال مشترک دو متغیر X و Y است. احتمال مشترک تجربی را می‌توان با استفاده از مدل چند متغیره

رابطه گرینگورتن برای احتمال مشترک دو (یا چند) متغیر از رابطه ذیل بدست آورد (Yue et al., 1999):

$$p_p(x_k, y_k) = \frac{m_k - 0.44}{n + 0.12} \quad (3)$$

که در این رابطه m_k تعداد رخداد زوج (x_i, y_i) وقتی که $x_i \leq x_k$ و $y_i \leq y_k$ است و n تعداد کل نمونه‌ها است.

پس از استخراج توابع احتمالاتی و بدست آوردن توزیع مشترک، معیار احتمالاتی برای مدل کردن آن متغیرها بدست می‌آید. فارغ از این مسئله که آیا توزیع استفاده شده مناسب بوده یا خیر، مشکل در مقایسه مقادیر متغیرها بوجود می‌آید. یعنی یک مقدار احتمال نشان دهنده یک متغیر با مقدار احتمال متغیر دیگر قابل مقایسه نیست. برای غلبه بر این مشکل، احتمال تجمعی توزیع هر متغیر را در معکوس تابع توزیع نرمال استاندارد قرار داده تا یک مقیاس مشترک و یکسان بوجود آید و مقایسه بین شاخص‌های مختلف خشکسالی ممکن شود. بنابراین شاخص استاندارد شده متغیرها برابر است با $IDI = \Phi^{-1}(p_p)$ که در این رابطه IDI مقدار متغیرها به صورت استاندارد نرمال شده و برابر شاخص یکپارچه خشکسالی است که در یک فضای یکسان تعریف می‌شود؛ Φ تابع توزیع نرمال استاندارد است و p_p احتمال تجمعی متغیرهای مورد نظر است.

در سری‌های استاندارد شده، مقادیر مثبت نشان دهنده دوره مرطوب، مقادیر منفی نشانگر دوره خشک و مقدار صفر وضعیت نرمال را نشان می‌دهد. از آنجا که سری‌های استاندارد شده سطوح مختلفی از شدت خشکسالی را نشان می‌دهند، برای مقایسه و تفکیک بهتر، حد آستانه شروع خشکسالی متوسط (شدت -0.8) با توجه به طبقه‌بندی مقیاس D که برابر احتمال 20% است برای سنجش اعلام خشکسالی انتخاب شده است (Svoboda et al., 2002). این مقیاس دارای پنج دسته است که از خشکی غیرعادی (-0.5) تا خشکسالی استثنائی (-2) سطح‌بندی شده است. هر یک از دسته‌ها نشان دهنده احتمال مشخصی از توزیع نرمال استاندارد است که تبدیل آن را تسهیل می‌نماید (برای مثال مقدار -0.8 نشان دهنده رخدادی با احتمال وقوع تقریبی 20% است).

۲-۲- شبیه‌سازی سیستم منابع آب

در شبیه‌سازی منابع آب در مقیاس حوضه آبریز از مدل WEAP استفاده شده است. WEAP برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب با در نظر گرفتن جهت‌گیری سیاسی از تعادل نیاز و تأمین آب بهره می‌گیرد (Sieber and Purkey, 2011). عملکرد مدل WEAP براساس

محاسبه تعادل جرمی آب با گام‌های زمانی مختلف پایه‌گذاری شده است که می‌تواند در مقیاس یک زیرحوضه کوچک و ساده تا حوضه‌های آبریز بزرگ با هیدروسیستم‌های پیچیده به کار گرفته شود. این ابزار قابلیت تحلیل و بررسی طیف وسیعی از مسائل حوضه آبریز از جمله نیاز آبی، حفاظت از آب، کیفیت آب، قوانین آب، اولویت‌های تخصیص، آب‌های زیرزمینی، جریان‌های سطحی، بهره‌برداری از مخازن، تولید انرژی برق‌آبی، نیاز انرژی، نیاز اکوسیستم و تحلیل هزینه-سود پروژه‌ها را دارد (Sieber and Purkey, 2011). با بهره‌گیری از داده‌های موجود و نیز پتانسیل‌های علمی و تجربی موجود در منطقه، Safavi et al. (2015) مدل برنامه‌ریزی جامع منابع آب حوضه را با استفاده از ابزار WEAP توسعه دادند که برای شبیه‌سازی سیستم آب حوضه زاینده‌رود استفاده شده است. در این مطالعه از مدل تحقیق فوق استفاده شده است. خصوصیات این سیستم منابع آب در بخش ۳-۱ تشریح شده است.

۲-۳- تخصیص بهینه منابع آب

گرچه وقوع خشکسالی بخش معمولی از اقلیم هر منطقه می‌باشد، اما مدیریت آن در اکثر نقاط دنیا پیشرفت کمی داشته است. معیار مناسبی که جهت ارزیابی وضعیت حوضه در این تحقیق معرفی شده، شاخص یکپارچه خشکسالی است. انجام اقدامات مقتضی جهت کاهش شدت این شاخص راهکارهای مناسبی می‌طلبد. پیشنهاد هر گونه اقدامی به صورت کمی نیازمند ارزیابی و تعیین مقادیر مناسب به وسیله ابزار بهینه‌سازی است. ابزارهای به کار برده شده در این تحقیق جعبه‌ابزارهای بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک^۳ و جستجوی الگو^۴ از نرم‌افزار متلب^۵ است.

الگوریتم‌های تکاملی تکنیک‌های بهینه‌سازی سراسری قوی و نیرومندی برای حل مسائل با مقیاس بزرگ بوده که دارای بهینه‌های محلی زیادی هستند (Kelner et al., 2008). هر چند آن‌ها نیازمند زمان محاسبه زیادی هستند و بر حسب عملکرد همگرایی بسیار ضعیف عمل می‌کنند. از سوی دیگر، الگوریتم‌های جستجوی محلی می‌توانند در چند مرحله محدود همگرا شوند، ولی ویژگی سراسری را ندارند. ترکیب روش‌های جستجوی سراسری و محلی باید مزیت‌های هر دو روش بهینه‌سازی را حاصل کند در حالی که ضعف‌های آن‌ها جبران می‌شود. در این تحقیق تکنیک بهینه‌سازی ترکیبی به کار برده شده که روش جستجوی سراسری الگوریتم ژنتیک در کنار روش محلی جستجوی الگو قرار گرفته است. این تکنیک ترکیبی در تحقیقات متنوعی آزموده شده است و قدرت آن در یافتن دقیق بهینه

زیرزمینی، سطح آب در فروردین ۱۳۸۹ در عمق حدود ۷۷ متری قرار گرفته است (WWRI-IUT, 2012). بیشترین آسیب در حوضه از کمبود آب متوجه محیط زیست به ویژه مناطق پایین دست حوضه بوده است. آبیاری با آب ناکافی، تشدید شوری و قلیائیت اراضی را در پی داشته و سال‌هاست نیاز آبی تالاب گاوخونی برای تعادل بخشی و حفظ اکوسیستم تالاب تامین نشده (Navid, 1989) که این امر منجر به نابودی این تالاب شده است (Safavi and Golmohammadi, 2016). در شکل ۱ حوضه آبریز زاینده‌رود، زیرحوضه‌ها و آبخوان‌های حوضه، موقعیت رودخانه زاینده‌رود و سرشاخه‌های اصلی آن و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است.

سه رودخانه زاینده‌رود، پلاسجان و سمندگان براساس آمار ۲۱-ساله از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰، به ترتیب حدود ۸۷، ۱۲ و ۱ درصد آورد رودخانه را داشته‌اند (Safavi et al., 2015). در پائین‌دست سد زاینده‌رود رودخانه‌های فصلی وجود دارند که به رودخانه زاینده‌رود متصل می‌شده که در دهه‌های اخیر به علت خشکسالی‌های پیاپی و بهره‌برداری‌ها، دیگر آب این رودخانه‌های فصلی به رودخانه زاینده‌رود نمی‌ریزد؛ بنابراین در مطالعات از اهمیت زیادی برخوردار نیستند (Molle and Wester, 2009). در مقابل در پایین‌دست سد زاینده‌رود تغذیه آبخوان از بارش و رودخانه و اندرکنش بین رودخانه و آبخوان‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Golmohammadi, 2015). تونل‌های اول، دوم و سوم کوه‌رنگ به همراه ماربران با ظرفیت انتقال آب با میانگین سالانه حدود ۸۵۸ میلیون مترمکعب از حوضه آبریز کارون به زاینده‌رود ساخته شده‌اند که علاوه بر این‌ها طرح انتقال آب بهشت‌آباد نیز با حجم آبی حدود ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال در دست اقدام است و تونل چشمه‌لنگان حجم آب میانگین سالانه حدود ۱۶۴ میلیون مترمکعب را از حوضه آبریز دز انتقال می‌دهد (Safavi and Golmohammadi, 2016). احداث سد مخزنی زاینده‌رود در سال ۱۳۴۹ با ظرفیت ۱۴۷۰ میلیون مترمکعب تحول بزرگی در حوضه و بهره‌برداری از منابع آب ایجاد کرد (Molle and Wester, 2009).

از ۱۶ محدوده مطالعاتی حوضه آبریز زاینده‌رود، ۱۳ زیرحوضه دارای آبخوان‌های آب زیرزمینی فعال می‌باشند. آبخوان‌های سه زیرحوضه چلگرد-قلعه‌شاهرخ، یان‌چشمه و بن و سامان به علت قرار گرفتن در مناطق کوهستانی و ضخامت آبرفت کم در محاسبات حوضه از اهمیت بسیار کمی برخوردار هستند و به همین علت آبخوان‌های آن‌ها غیرفعال در نظر گرفته شده‌اند.

سراسری تأکید شده است (Labbi and Benattous, 2010; Park et al., 2014; Payne and Eppstein, 2005; Soltani et al., 2010). در این تحقیق الگوریتم ژنتیک به عنوان بهینه‌ساز سراسری، تمام فضای تصمیم را جستجو می‌کند تا نقطه بهینه سراسری را پیدا کند. اما در نزدیکی نقطه بهینه، ممکن است به دلیل ماهیت الگوریتمش حول نقطه بهینه جابه‌جا شود و نتواند به نقطه بهینه سراسری برسد (Chen and Chen, 2011). در این وضعیت و با حصول یکی از معیارهای همگرایی، الگوریتم ژنتیک متوقف می‌شود و نقطه بهینه نهایی که یافته است به عنوان نقطه اولیه به الگوریتم جستجوی الگو که یک بهینه‌ساز محلی است، داده می‌شود تا میزان دقت جواب و کیفیت تابع هدف را افزایش دهد. هر چند ممکن است نقطه اولیه تأثیر زیادی در جواب جستجوی الگو داشته باشد، اما یک نقطه اولیه مناسب که در نزدیکی نقطه بهینه سراسری باشد می‌تواند در بهبود جواب نهایی با این روش ساده ولی کارا مؤثر باشد.

۳- محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حوضه آبریز زاینده‌رود دارای مساحت تقریبی ۲۷ هزار کیلومترمربع است که شامل حدود ۶۳ درصد وسعت حوضه آبریز گاوخونی می‌باشد. رودخانه زاینده‌رود از نظر تأمین نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست در ایران مرکزی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Sally et al., 2000). این حوضه در بین حوضه‌های دریاچه نمک، دق‌سرخ، کویر سیاه‌کوه، کویر ابرقو و کارون قرار دارد. اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پایین‌ترین نقطه گاوخونی در حدود ۲۵۰۰ متر است. این حوضه آبریز یک حوضه بسته با هیدروسیستم پیچیده (Madani and Mariño, 2009) است و مهم‌ترین رودخانه مرکزی ایران، زاینده‌رود، در این حوضه قرار دارد و با امتدادی تقریباً غربی-شرقی به اراضی گاوخونی ختم می‌شود (Molle and Wester, 2009). سد زاینده‌رود جریان‌های اصلی این رودخانه را تنظیم می‌کند که حاصل سه جریان اصلی شاخه زاینده‌رود، پلاسجان و سمندگان است. معضل کم آبی در این حوضه به ویژه در طی دهه‌های اخیر با رشد مصارف ناشی از افزایش جمعیت و تمرکز صنایع و وقوع خشکسالی‌ها به بحران آب منجر شده است. با توجه به اولویت اول شرب و صنعت در مدیریت منابع این حوضه (Mamanpoush et al., 2000)، دسترسی کشاورزان به آب سطحی محدود شده که منجر به توسل آن‌ها به برداشت بیش از حد مجاز از آبخوان‌ها شده است. این برداشت‌ها باعث تخریب کمی و کیفی آن‌ها شده است. برای نمونه در منطقه قهدریجان در دشت نجف‌آباد در مهر ۱۳۸۶ سطح آب زیرزمینی در عمق حدود ۳۹ متری قرار داشته ولی به دلیل اثر سوء خشکسالی و فشار زیاد بر آب‌های

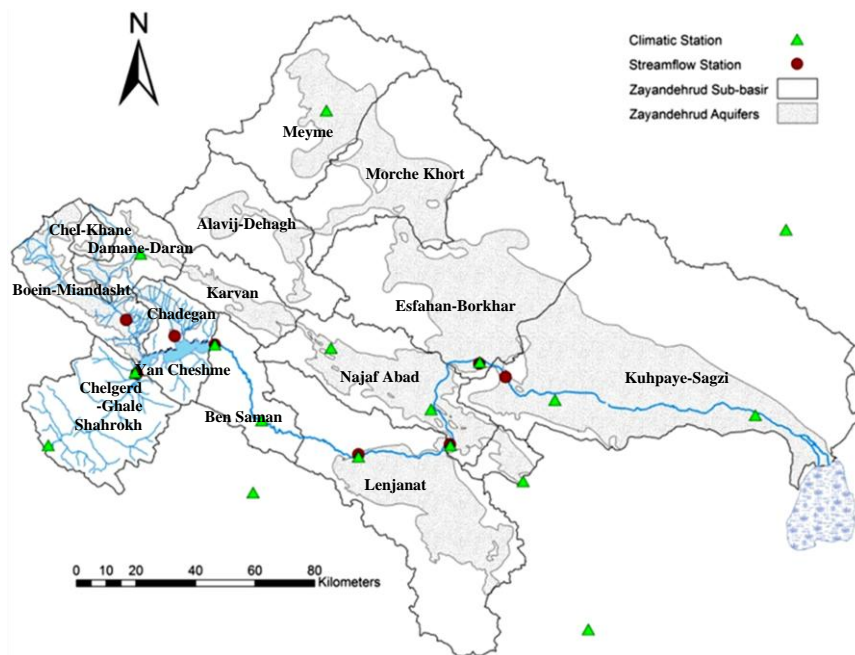


Fig. 1- Zayandehrud Basin and the location of its subbasins, aquifers, and climatic and streamflow stations
 شکل ۱- حوضه زاینده‌رود و موقعیت زیرحوضه‌ها، آبخوان‌ها و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در آن

جهت حفظ و بقای اکوسیستم و برقراری جریان پایه تالاب به طور متوسط حداقل حجمی حدود ۱۴۲ میلیون مترمکعب آب در سال نیاز است. واحدهای صنعتی در حوضه آبریز زاینده‌رود براساس داده‌های سال آبی ۱۳۸۵، مصرف سالانه حدود ۱۵۲ میلیون مترمکعب آب را به خود اختصاص می‌دهند (Safavi and Golmohammadi, 2016). عمده‌ترین مصرف‌کننده آب در حوضه آبریز زاینده‌رود کشاورزی است که براساس داده‌های سالهای آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰ حدود ۸۵٪ مصارف آب در حوضه را به خود اختصاص می‌دهد (Safavi et al., 2015). بیشتر مصارف آب کشاورزی در حوضه توسط کانال‌های آبیاری سطحی تأمین می‌شود. منبع اصلی تأمین آب کشاورزی در حوضه، رودخانه زاینده‌رود می‌باشد. از گذشته انهار سنتی (مادی‌ها) برای انحراف آب به اراضی کشاورزی استفاده می‌شده است که اغلب این انهار هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرند. حدود ۶۰ درصد آب برداشت شده توسط این مادی‌ها در این نواحی به عنوان آب برگشتی به رودخانه باز می‌گردد (Golmohammadi, 2015). برای اطلاعات کامل منابع و مصارف حوضه و نحوه ارتباط و اندرکنش آن‌ها با یکدیگر به Safavi et al. (2015) و Golmohammadi (2015) مراجعه کنید.

از ۱۳ آبخوان فعال در حوضه، ۴ آبخوان لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگری به سه دلیل از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند (Safavi and Golmohammadi, 2016): (۱) وجود عمده مصارف حوضه اعم از شرب و بهداشت، صنعت، کشاورزی و محیط زیست در این محدوده‌ها، (۲) بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی (رودخانه) و آب زیرزمینی در این نواحی و (۳) اندرکنش بین رودخانه و آبخوان‌های این محدوده‌های مطالعاتی.

چهار مصرف عمده در حوضه آبریز زاینده‌رود عبارتند از شرب و بهداشت، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی (تالاب گاوخونی). جمع آب مصرفی برای شرب، حدود ۴۳۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است. در واقع ۷۰ درصد آب شرب و بهداشت توسط رودخانه و ۳۰ درصد بقیه از آب‌های زیرزمینی که آبخوان‌های لنجانان، نجف‌آباد و اصفهان-برخوار می‌باشند تأمین می‌شود (Golmohammadi, 2015). یکی از مهم‌ترین مصارف آب در حوضه آبریز زاینده‌رود، نیاز زیست‌محیطی حوضه است که اصلی‌ترین آن تالاب گاوخونی می‌باشد. براساس مطالعاتی که توسط Sarhadi and Soltani (2013) انجام شد تالاب گاوخونی جهت بقای پرندگان در ماه‌های بحرانی به طور متوسط نیازمند حداقل ۶۰ میلیون مترمکعب آب در سال برای جبران حداقل تبخیر است، ولی

این تحقیق وجود ندارد و می‌توان از طول دوره‌های کمتر نیز استفاده کرد. طول دوره داده‌ها برای محاسبات شاخص خشکسالی برابر ۲۸ سال (سال‌های آبی ۹۰-۱۳۶۳) بوده است. داده‌های ماهانه حجم مخزن سد زاینده‌رود و مقادیر حجم ورودی و خروجی از سد از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان تهیه شده است. در این تحقیق برای افزایش دقت محاسبات از نقشه‌های GIS موقعیت سد زاینده‌رود، رودخانه، چاه‌های پیزومتری، آبخوان‌ها، سنگ کف و DEM استفاده شده است.

۳-۱- مدل‌سازی حوضه آبریز زاینده‌رود

در تحقیقات (Safavi et al., 2015) مدل WEAP با استفاده از داده‌ها و اطلاعات حوضه در طول ۲۱ سال دوره مطالعاتی (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) در دو بخش آب سطحی و زیرزمینی توسعه داده شد. این دوره شامل دوره ترسالی سال-های آبی ۱۳۷۱ تا ۱۳۷۴، سال‌های نرمال ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ و خشکسالی‌های سال‌های ۸۰-۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ تا انتهای دوره است مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی به طور جداگانه در محیط مدل توسعه داده شده‌اند.

در حوضه زاینده‌رود برداشت آب سطحی تا حد زیادی قابل کنترل است ولی منابع آب زیرزمینی تا حد وسیعی غیرقابل کنترل هستند. وجود چاه‌های غیرمجاز و غیرقابل کنترل بسیار در حوضه به خصوص در نواحی حریم رودخانه زاینده‌رود، همچنین کف‌شکنی‌های غیرمجاز در مواقع خشکسالی، منابع آب زیرزمینی حوضه را با چالش‌ها و خسارات جدی و حتی غیرقابل جبران روبرو کرده است. در طول زمان کاربران به این باور رسیده‌اند که هرگاه با کمبود آب سطحی مواجه می‌شوند، به تأمین نیازها از آب زیرزمینی به عنوان یک منبع پشتیبان مطمئن روی آورند که این امر به برداشت‌های بی‌رویه و خارج از مجوز از آب‌های زیرزمینی منجر شده است.

در این تحقیق نیاز به داده‌های ماهانه چرخه هیدرولوژی در دو بخش اقلیمی و هیدرولوژیک بود. در بخش اقلیمی نیاز به داده‌های مشاهداتی دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی (جدول ۱) و در بخش هیدرولوژیک، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری (جدول ۲)، سطح آب در چاه‌های پیزومتری و احجام ورودی و ذخیره سد زاینده‌رود بود. داده‌های اقلیمی به روش تبیین پلیگون و تراز پیزومتری به روش کریجینگ^{۱۶} منطقه‌ای شده‌اند. در مطالعات خشکسالی طول دوره اهمیت بسزایی دارد و حداقل ۳۰ سال در روش‌های پارامتریک توصیه می‌شود. هر چند این محدودیت در روش به کار برده شده در

Table 1- Specifications of climate stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

Station Name	Station Type	Coordinates		Station Name	Station Type	Coordinates	
		Lon	Lat			Lon	Lat
Fin	Evaporation Gauge	53.3711	33.944	Damane Faridan	Evaporation Gauge	50.495	33.0183
Ghale Shahrokh	Evaporation Gauge	45.4531	32.6638	Pol ZamanKhan	Evaporation Gauge	50.8953	32.4986
Zayandehrud Dam	Evaporation Gauge	50.7425	32.7342	Pol Kale	Rain Gauge	51.2306	32.3731
Esfahan	Synoptic	51.6667	32.6167	Lenj	Rain Gauge	51.5592	32.3906
Vazvan	Evaporation Gauge	51.1892	33.4172	Tiran	Evaporation Gauge	51.1558	32.7033
Zyar	Rain Gauge	51.94	32.5061	Zefre	Evaporation Gauge	51.4986	32.5019
Varzane	Rain Gauge	52.6469	32.4194	Mahyra	Evaporation Gauge	51.8089	32.2689
MaghsudBeyk	Evaporation Gauge	52.0056	31.8128	Shahrekor	Synoptic	50.85	32.2833
Neyestanak	Evaporation Gauge	52.8031	32.9681	Chelgerd	Rain Gauge	50.1231	32.4586

Table 2- Specifications of streamflow stations

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

Station Name	Coordinates		Station Name	Coordinates	
	Lon	Lat		Lon	Lat
Chelgerd	50.13083	32.4567	Pol Kale	51.2314	32.3794
Dare Dar	50.15111	32.4575	Diziche	51.5189	32.3697
Ghale Shahrokh	50.45861	32.6586	Lenj	51.5575	32.3933
Eskandari	50.43083	32.8219	Mussian	51.5261	32.5769
Menderjan	50.60139	32.7656	Pol Chum	51.7703	32.585
Sad Tanzimi	50.78333	32.7182	Varzane	52.6633	32.4236
Pol ZamanKhan	50.89472	32.4983			

در مدل آب سطحی فرض بر این بوده که نیاز هر بخش در حوضه برابر با مقدار نیازی است که از منابع آب سطحی تأمین شده است. همچنین جهت کالیبراسیون مدل آب سطحی، روش IFS^{۱۷} (Danner et al., 2006) بین هر دو ایستگاه هیدرومتری محاسبه شده و به عنوان مجموعه کالیبراسیون استفاده شده‌اند.

۴- نتایج و بحث

در این تحقیق از مدل شبیه سازی ارائه شده توسط Safavi et al. (2015) با گام زمانی ماهانه که براساس دوره مطالعاتی (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) تدوین گردیده استفاده شده است و عملکرد سیستم از نظر کاهش شدت شاخص یکپارچه خشکسالی در چهار زیرحوضه اصلی لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگری مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. بازبینی نحوه بهره‌برداری از سد در مقدار آب رهاسازی شده در طول دوره مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این زمینه فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- داده‌های بارش، دما، رواناب سطحی، برداشت از منابع آب زیرزمینی، منابع و مصارف همان مقادیر مشاهداتی و اندازه گیری شده در طول دوره مطالعاتی است که در مدل شبیه سازی نیز وارد شده است.

۲- نیاز تالاب گاوخونی تابعی از شرایط منابع آب در بالادست حوضه در نظر گرفته شده است. در هنگامی که زیر حوضه چلگرد-قلعه‌شاهرخ مطابق شاخص جامع خشکسالی در شرایط خشکسالی بوده، نیاز به رعایت حداقل حق‌آبه تالاب جهت زنده ماندن پرندگان (حدود ۶۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شده و در شرایط نرمال، نیاز به تأمین حق‌آبه تالاب جهت حفظ و بقای اکوسیستم (حدود ۱۴۲ میلیون مترمکعب) می‌باشد.

۳- اولویت تخصیص آب همچون گذشته در مدل با آب شرب بوده و بقیه نیازها با اولویت یکسان پس از آن قرار دارند.

۴- به علت این که برداشت از منابع آب زیرزمینی تا حد زیادی غیرقابل کنترل بوده، حداکثر درصد برداشت از این منابع جهت تأمین هر نیاز در نظر گرفته شده است.

۵- چنانچه حجم مخزن سد زاینده‌رود در یک گام زمانی از ۲۵۰ میلیون مترمکعب کمتر شود، خروجی از مخزن سد حداکثر برای تأمین آب شرب آن گام زمانی در نظر گرفته شده است.

برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب بر مبنای روش پارامتره کردن-شبیه‌سازی-بهینه‌سازی^{۱۸}، با اعمال فرض‌های بالا در مدل

ارزیابی اولیه کالیبراسیون آب‌های سطحی عملکرد سد زاینده‌رود در مدل با توجه به گذشته مشاهداتی در نظر گرفته شده است. همین کار برای مدل آب زیرزمینی نیز انجام شده است. مدل آب زیرزمینی به صورت توده‌ای با توجه به برداشت‌های مختلف از آبخوان‌ها و تخصیص آن‌ها به مصارف متعدد در حوضه توسعه داده شده و با استفاده از IFS‌های محاسبه‌شده برای هر آبخوان کالیبره شده است. اندرکنش بین رودخانه زاینده‌رود و آبخوان‌ها در حوضه براساس ایده‌ای که با توجه به ۱- تناسب نفوذ از بیلان آب سطحی بین دو ایستگاه هیدرومتری نسبت به طول جریان روی هر آبخوان، ۲- مقایسه بیلان آب سطحی و زیرزمینی، ۳- ویژگی نرم‌افزار WEAP در تخصیص آب و ۴- مشخصات حوضه آبریز زاینده‌رود در تحقیق ایشان ارائه شده، تعیین شده است. در نهایت پس از در نظر گرفتن اندرکنش رودخانه و آبخوان‌های تحت تأثیر آن، حجم نفوذ آب از رودخانه به آبخوان به صورت ماهانه به دست آمده است. در این تحقیق بنا به هدف تعیین شده که قرار بود مدل در شبیه‌سازی حوضه به کار گرفته شود، نیاز بود ضمن کالیبراسیون مدل، اعتبار آن نیز در شبیه‌سازی محک زده شود. این امر در تحقیق انجام شده بدین صورت انجام شده که از کل ۲۱ سال دوره مطالعاتی، ۱۷ سال (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۶) جهت کالیبراسیون و ۴ سال (از سال آبی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰) جهت اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شده است. جهت کالیبراسیون مدل، از مجموعه کالیبراسیون IFS استفاده شده است که با توجه به مدل تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی محاسبه شده‌اند و عملکرد سد زاینده‌رود به عنوان مبنای کالیبراسیون بوده است. جهت سنجش اعتبار مدل کالیبره شده پس از بارگذاری نیاز کل مصارف، جریان‌های طبیعی حوضه تخمین زده شده‌اند و تبخیر از مخزن سد با توجه به دمای ثبت شده وارد شده و مدل اجرا شده است. عملکرد مدل در دو مرحله براساس ضرایب ارزشیابی عملکرد (با مقایسه حجم مخزن، دبی ایستگاه‌های هیدرومتری، تغییرات سطح یا حجم آبخوان‌ها و میزان تخصیص مدل به مصارف بوده که ضریب همبستگی: $R^2 > 0.862$ و ضریب ناش-ساتکلیف: $E > 0.821$) سنجیده شده است. نتایج ارائه شده، هم به لحاظ مطالعات و هم به لحاظ مقایسه عملکرد مدل و واقعیت حوضه حاکی از عملکرد خوب و انطباق مدل برنامه‌ریزی زاینده‌رود با واقعیت‌های

برنامه‌ریزی حوضه آبریز زاینده‌رود، از تابع هدف زیر که براساس شاخص جامع خشکسالی تعریف گردیده استفاده شده است:

$$Z = - \sum_{j=1}^4 \left(\frac{A_j}{\sum_{k=1}^4 A_k} \sum_{i=1}^n |DI_{ij}| \right), \quad |DI_{ij}| < -0.8 \quad (4)$$

که در آن، $|DI_{ij}|$ شدت خشکسالی در مقیاس زمانی ماهانه در گام زمانی i ام در زیرحوضه A_j یا A_k مساحت زیرحوضه A_j یا A_k ، j و k شماره‌دهنده چهار زیرحوضه اصلی در اندرکنش با رودخانه زاینده‌رود در پایین‌دست سد و n کل تعداد گام‌های زمانی است.

ارزیابی مجدد بهره‌برداری از سد و تعیین میزان رهاسازی براساس شاخص خشکسالی به این صورت بوده که مقدار حجم آب رها شده از سد در هر ماه به عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود تا بهینه‌ترین حالت برای هر ماه با توجه به شرایط پایین‌دست حوضه تعیین و رهاسازی انجام شود. با کد نویسی در محیط نرم‌افزار مطلب و ارتباط آن با مدل برنامه‌ریزی حوضه به صورت ترکیبی استفاده شده و با اعمال فرضیات معرفی شده در مدل برنامه‌ریزی حوضه آبریز زاینده‌رود و تعیین و کنترل خروجی سد به وسیله بهینه‌سازها، بهینه‌ترین حالت با کمترین مقدار شدت خشکسالی در طول دوره مطالعاتی محاسبه گردیده است که نتایج در ادامه آورده شده است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی بنابر توصیه مراجع (Chen and Chen, 2011) و نتایج تکرارهای اولیه بدین شرح انتخاب شده‌اند: نوع بردار جمعیت اعداد حقیقی، اندازه جمعیت ۱۰۰۰، حداقل تغییرات تابع هدف ۰/۰۰۱، احتمال اختلاط ۰/۸، تعداد نسل‌ها ۵۰، تعداد نخبه‌ها ۵، احتمال جهش ۰/۰۵. همچنین تنظیمات بهینه‌ساز جستجوی الگو بدین شرح بوده است: نوع بردارهای الگوی کامل (۲N)، اندازه اولیه شبکه ۱۰۰، ضریب انبساط ۲، ضریب انقباض ۰/۵.

اولین مسئله‌ای که باید به آن اشاره شود این است که سری‌های زمانی شاخص‌ها سازگار و پایدار هستند. این بدان معنی است که روش غیرپارامتریک در توصیف شرایط تر و خشک با اطمینان کافی مؤثر است (برای نمونه شکل ۲ در یکی از زیرحوضه‌ها). بر این اساس مقادیر خروجی بهینه سازی شده از سد براساس شاخص خشکسالی با مقادیر رها شده در گذشته در شکل ۳ مقایسه شده است. به طور کل، در دوره ترسالی (۱۳۷۱-۷۲) روش بهینه‌سازی حجم آب کمتری رها کرده تا ذخیره بیشتری انجام شود و در دوره‌های بعدی پس از آن (۷۷-۱۳۷۳) جهت تأمین نیازها استفاده شود. بدین ترتیب در فاصله سال‌های ۷۷-۱۳۷۳ به طور متوسط روش بهینه حجم آب ۱۳۲/۵ میلیون مترمکعب در سال بیشتر از مقادیر مشاهداتی رها کرده است.

شکل ۴ اثر تغییر رویه مدیریت در بهره‌برداری از مخزن را در حجم ذخیره سد نشان می‌دهد. در روش بهینه مشهود است که بیشتر سعی در افزایش ذخیره به خصوص در دوره ترسالی ۷۴-۱۳۷۲ بوده است به صورتی که سد به حداکثر حجم ذخیره ۱۴۷۰ میلیون مترمکعب رسیده و در دو سال متوالی ۷۲-۱۳۷۱ و سال ۱۳۸۵ سرریز کرده که این اتفاق در دوره مشاهداتی وجود نداشته است. در حالت بهینه بیشتر افزایش ذخیره در طول سال‌های تر و نرمال دنبال شده تا حداکثر نیازها را در دوره خشکسالی تأمین کند و اثرات خشکسالی را کاهش دهد، اما در دوره نزدیک منتهی به خشکسالی تمایلی به ذخیره در بالادست نداشته تا تخصیص بیشتری از آب سطحی داده شود. این مسئله نشان می‌دهد با نگر داشت آب در بالادست و سعی در حفظ ذخیره بیشتر در سد (مانند جیره‌بندی) شدت خشکسالی در زیرحوضه‌های مهم پایین دست که تأثیر مستقیم از جریان رودخانه می‌پذیرند، افزایش می‌یابد. این مسئله از طرفی می‌تواند نشان دهنده آثار فعالیت‌های انسانی و فشار آن بر منابع آب زیرزمینی باشد.

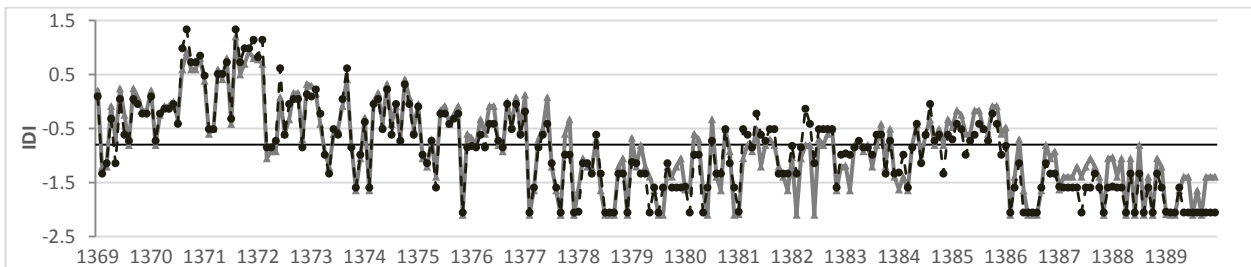


Fig. 2- A comparison of observed monthly drought index (gray line) and optimum method (dash line), Esfahan-Borkhar sub-basin

شکل ۲- مقایسه شاخص خشکسالی ماهانه مشاهداتی (خط خاکستری) با روش بهینه (خط چین)، زیرحوضه اصفهان-برخور

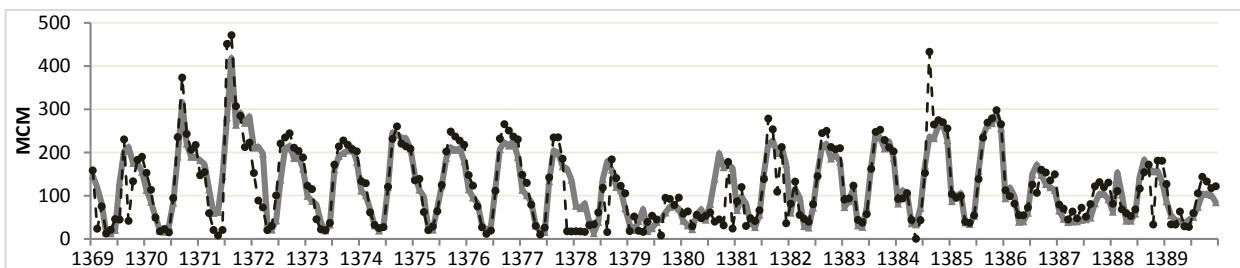


Fig. 3- A comparison of observed dam release (gray line) and results of optimum release method (dash line)
 شکل ۳- مقایسه حجم خروجی سد مشاهداتی (خط خاکستری) با نتایج روش رهاسازی بهینه (خط چین)

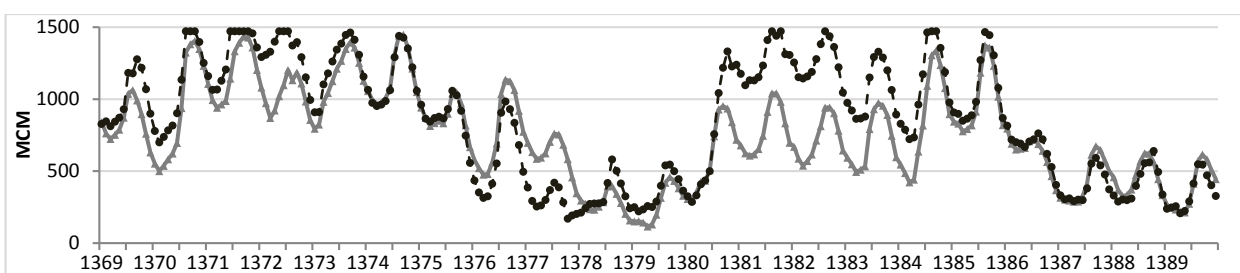


Fig. 4- A comparison of observed dam storage volume (gray line) and results of optimum release method (dash line)
 شکل ۴- مقایسه حجم ذخیره سد مشاهداتی (خط خاکستری) با نتایج روش رهاسازی بهینه (خط چین)

ماه‌های مواجه با کمبود تأمین به حداقل رسیده است. همچنین تأمین نیاز در دوره‌های خشکسالی (سال‌های آبی ۸۰-۱۳۷۹ و ۹۰-۱۳۸۷) همانند فرضیات به صورت مساوی انجام شده، به طوری که کمبود در تأمین در همه بخش‌ها توزیع شده است.

برای مقایسه بهتر میزان رهاسازی آب از سد در شرایط بهینه با در نظر گرفتن شاخص خشکسالی، میزان قابلیت اطمینان^{۱۹} (نسبت تعداد گام‌های زمانی که تأمین نیاز شده به کل تعداد گام‌های زمانی) تأمین نیاز نسبت به درصد‌های تأمین متفاوت در چهار گروه اصلی نیازها در جدول ۳ آورده شده است. در بخش شرب روش بهینه ۹۹ درصد مواقع موفق به تأمین نیازها شده است. مقدار تأمین در ماه‌های کمبود بیشتر از ۹۵ درصد بوده که در این سطح قابلیت اطمینان به ۱۰۰٪ می‌رسد. در بخش صنعت موفق به تأمین نیازها با ۸۹ درصد قابلیت اطمینان بوده است. همچنین تغییر در درصد تأمین تغییر معنی‌داری در قابلیت اطمینان نداشته است. این روش در بخش کشاورزی ۹۰ درصد قابلیت اطمینان داشته و همچنین قابلیت اطمینان در بخش تأمین آب مورد نیاز محیط زیست ۹۰ درصد است. تغییر در درصد تأمین تغییر معنی‌داری ایجاد نمی‌کند. لازم به ذکر است که درصد قابلیت اطمینان تأمین نیاز محیط زیست در گذشته تا سطح ۸۰ درصد تأمین نیاز برابر ۲۳٪ بوده است.

شکل ۵ نتایج حاصل در تأمین نیاز در بخش‌های مختلف شرب، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی را نشان داده است. در این شکل‌ها مقایسه بین نیاز تاریخی و نیاز تأمین شده در حوضه زاینده‌رود در هر ماه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تا زمانی که بعد از سد در بخش مصارف دسترسی به آب وجود داشته باشد برداشت در راستای تأمین نیاز صورت خواهد گرفت. نیاز شرب و بهداشت همچون گذشته از اولویت‌های تخصیص بوده و تأمین آن تقریباً به طور کامل انجام شده است (شکل ۵-۱). نیاز کشاورزی نیز وابستگی شدیدی به میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی دارد و در اکثر مواقع به اندازه نیاز، برداشت صورت گرفته است؛ در برخی اوقات کمبودهایی در تأمین نیاز مشاهده می‌شود که مربوط به کمبود آب سطحی و عدم وجود ظرفیت پمپاژ از آب زیرزمینی در محدوده‌های کشاورزی می‌باشد و سیستم نتوانسته برداشت لازم از منابع آب زیرزمینی را در جبران کمبود آب سطحی انجام دهد. از آنجا که در عمل تأمین نیازهای صنعت و محیط زیست شدیداً وابسته به منابع آب سطحی هستند، لذا در شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ مشاهده می‌شود که سیستم در تأمین نیاز این بخش‌ها در زمان‌های مختلف با کمبود مواجه شده است. در حالت بهینه حداکثر تأمین نیازها در نظر گرفته شده است و با توجه به خروجی سد بیشترین تأمین نیازهای صنعت و محیط زیست انجام شده و لذا

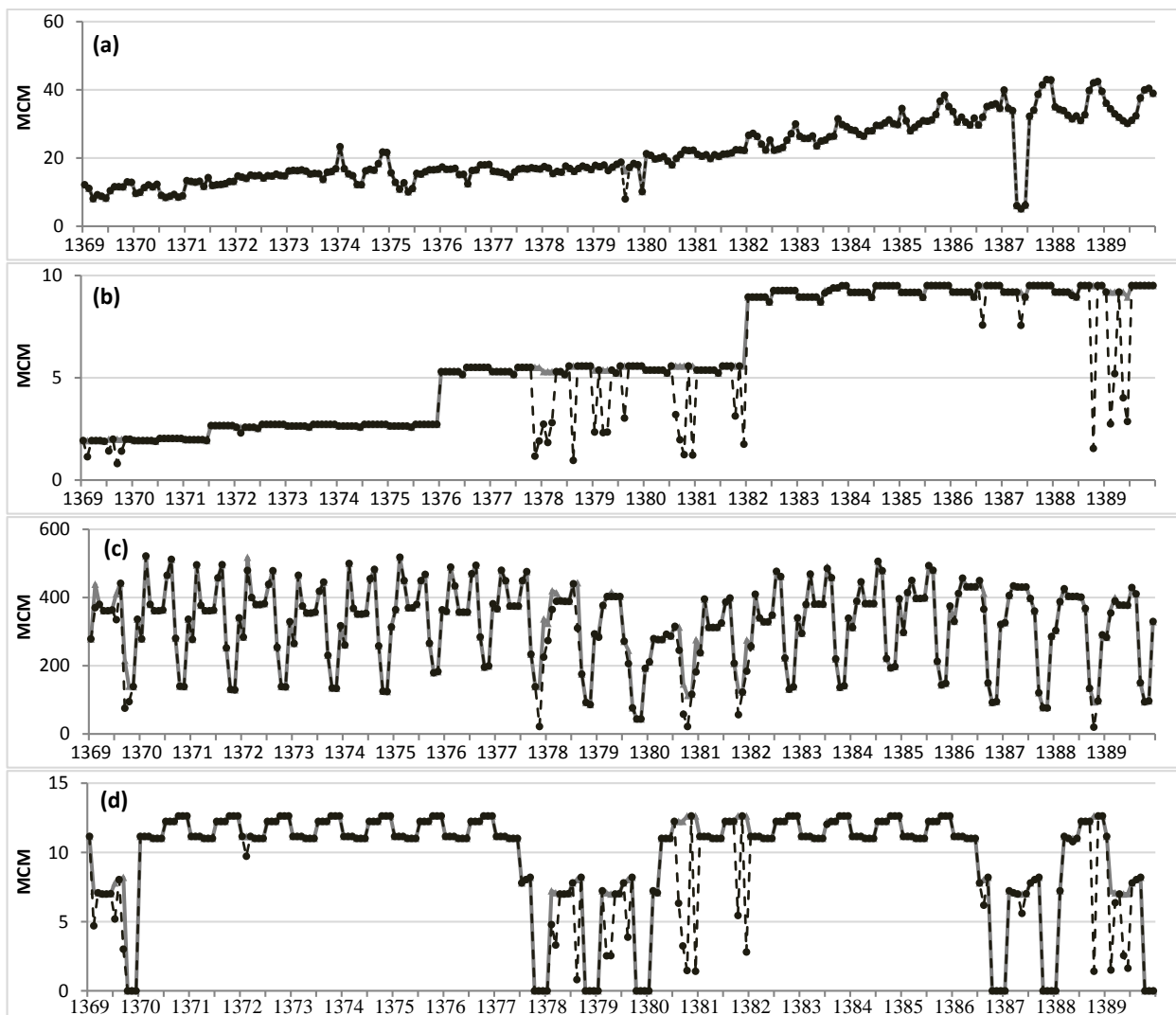


Fig. 5- A comparison of water allocation (gray line) and demands (dash line) in optimum method (a: municipal, b: industrial, c: agricultural, d: environmental)

شکل ۵- مقایسه تخصیص (خط چین) منابع آب به نیازها (خط خاکستری) در روش بهینه (a: شرب، b: صنعت، c: کشاورزی، d: محیط زیست)

Table 3- Reliability of optimization method for four main demand groups

جدول ۱- میزان قابلیت اطمینان روش بهینه‌سازی در چهار گروه نیاز اصلی

Demand Type	Reliability (%)			
Percent of Supply	100	95	90	80
Municipal	99	100	100	100
Industrial	89	89	89	90
Agricultural	90	92	93	95
Environmental	90	91	91	92

تغییرات حجم مخازن آب زیرزمینی در آبخوان‌های لنجان، نجف آباد، اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگزی نشان داده شده است. در شکل ۶ اثرات مثبت بهره‌برداری از سد با اعمال شاخص خشکسالی

از طرف دیگر تأثیر نحوه عملکرد بهره‌برداری از مخزن سد در رهاسازی آب به پایین دست، بطور مستقیم بر آبخوان‌های دارای اندرکنش با رودخانه تأثیر داشته که در شکل‌های ۶ تا ۹ روند

کوهپایه-سگری به دلیل وسعت و میزان برداشت از آن بسیار حائز اهمیت است. نقش میزان بهره‌برداری در آبخوان اصفهان-برخوار که در شکل ۸ نشان داده شده و نشانگر آن است که به دلیل اندرکنش رودخانه با آن می‌تواند منجر به افزایش ذخیره این آبخوان از حداقل ۱۰/۵ تا حداکثر ۳۳۰ میلیون مترمکعب به عنوان یک ذخیره استراتژیک در دوره‌های خشکسالی شود. روش بهینه بهره‌برداری از منابع آب منجر به افزایش تراز سطح آبخوان و ذخیره شده و در نتیجه باعث پایداری جریان در رودخانه و حفظ این آبخوان شده است.

بیشترین بهره در تغییر روند بهره‌برداری از سد متوجه آبخوان کوهپایه-سگری (شکل ۹) است که قابلیت دریافت بیشترین آثار سوء خشکسالی را دارد و عمده مشکلات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نیز در طی دو دهه گذشته در این زیرحوضه پدید آمده است. با پایداری جریان رودخانه زاینده‌رود میزان تغذیه این آبخوان بسیار بیشتر شده و افزایش حجم آن تا ۴۰۰ میلیون مترمکعب ممکن شده است. در دوره ترسالی ۱۳۷۲-۷۵ روش بهره‌برداری بهینه به تأمین نیاز آب و ذخیره بیشتر در آبخوان تا حداکثر حجم ۲۹۰ میلیون مترمکعب کمک کرده است تا در دوره خشکسالی ۸۰-۱۳۷۷ از این ذخیره در جهت کاهش اثرات خشکسالی استفاده شود.

خود را نشان می‌دهد. براین اساس، میزان رهاسازی آب از سد زاینده‌رود به گونه‌ای بوده است که آبخوان بین احجام ذخیره ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ میلیون مترمکعب به تعادل برسد و با حفظ ذخیره آبخوان بتوان از فرصت مناسب از آن به تعادل بخشی به دیگر زیرحوضه‌ها کمک کرد. این رویکرد در آبخوان نجف‌آباد به صورت افزایش در ذخیره آبخوان جهت کاهش اثرات خشکسالی در شکل ۷ خود را نشان داده است. با کنترل مناسب رهاسازی در روش بهینه در دوره ۷۵-۱۳۷۲، افزایش میزان ذخیره تا ۲۷۹۰ میلیون مترمکعب و تثبیت آن در احجام ۲۷۰۰ میلیون مترمکعب با تغذیه رودخانه و تأمین بیشتر از آب سطحی رخ داده است تا در دوره خشکسالی به ظرفیت کلی سیستم اضافه شود. هر چند خشکسالی‌های بعدی و تکیه استفاده‌کنندگان بر آب زیرزمینی میزان ذخیره را به مقادیر متعاقب مشاهداتی آن رسانده است که نشان دهنده اثر بیش از پیش فعالیت‌های انسانی در برداشت از این آبخوان است.

اما تغییر سیاست بهره‌برداری از سد بیش از پیش بر دو آبخوان انتهایی مسیر رودخانه در حوضه یعنی اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگری تأثیر گذاشته است تا اثرات خشکسالی بر آن‌ها هر چه بیشتر کاهش یابد. این دو آبخوان نقش بسیار مهمی در تأمین آب برای بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی داشته و به ویژه آبخوان

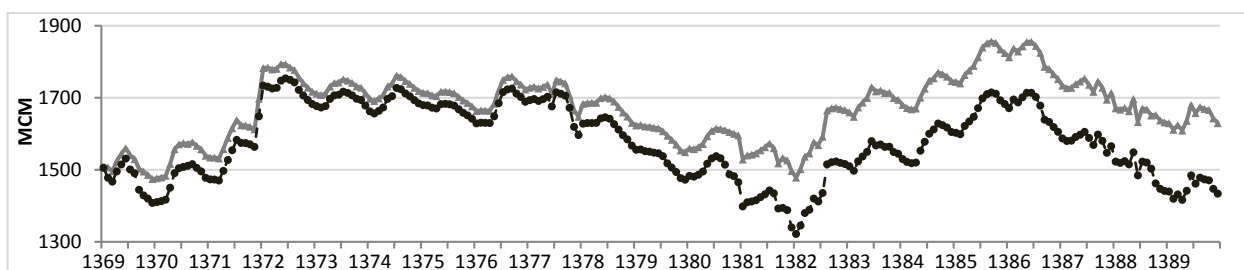


Fig. 6- A comparison of observed storage of Lenjanat aquifer (gray line) and results of optimum method (dash line)

شکل ۶- مقایسه حجم ذخیره گذشته آبخوان لنجان (خط خاکستری) با نتایج روش بهینه (خط چین)

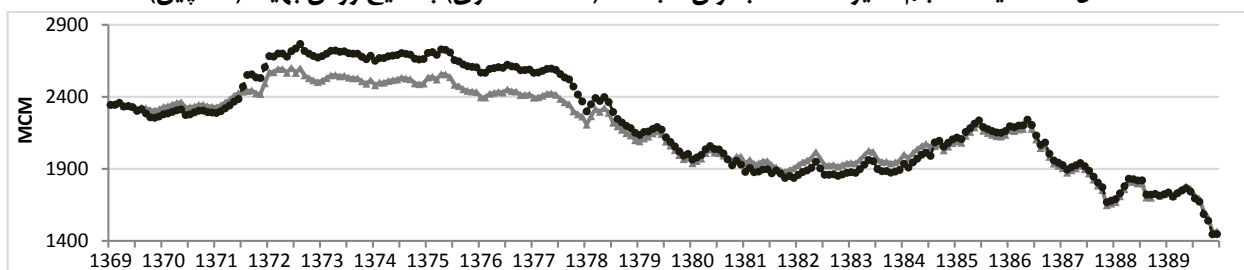


Fig. 7- A comparison of observed storage of NajafAbad aquifer (gray line) and results of optimum method (dash line)

شکل ۷- مقایسه حجم ذخیره گذشته آبخوان نجف‌آباد (خط خاکستری) با نتایج روش بهینه (خط چین)

از طرف دیگر برای بررسی تأمین حقایق تالاب گاوخونی و چگونگی پایداری جریان رودخانه، در شکل ۱۰ حجم آب عبوری از ایستگاه هیدرومتری ورزنه، که عملاً به عنوان حجم آب ورودی به تالاب گاوخونی می‌باشد، در طی دوره تاریخی و حالت بهینه نشان داده شده است. مقدار حداکثر حجم ماهانه وارده از ۲۴۲ به ۱۴۲ میلیون مترمکعب در ماه در حالت بهینه کاهش پیدا کرده است. این در حالی است که متوسط حجم ورودی ماهانه به تالاب در طی این دوره از ۸/۱ به ۱۰/۸ میلیون مترمکعب افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده افزایش متوسط ۲/۷ میلیون مترمکعب در ماه در ورودی به تالاب در حالت بهینه است. نتایج به خوبی گویای پایداری جریان بوده که قابلیت اطمینانی برابر ۹۶٪ داشته است.

این رویه در دوره نرمال ۸۶-۱۳۸۴ دنبال شده هر چند میزان تغذیه جوابگوی میزان برداشت‌ها نبوده و افت سطح ایستابی افتاده است. بیشترین میزان تغذیه و حفظ آبخوان در احجام ۲۴۸۰۰ میلیون مترمکعب در حالت بهینه کل اتفاق افتاده است. این می‌تواند بدین مفهوم باشد که حفظ پایداری تراز و ذخیره آبخوان با توجه به نقش آن در کاهش اثرات خشکسالی مفید بوده که در بهینه‌ترین حالت مدل حجم ذخیره را حتی در سال‌های خشک پایان دوره مطالعاتی حفظ کرده است تا کمترین میزان شدت خشکسالی در این زیرحوضه اتفاق بیفتد.

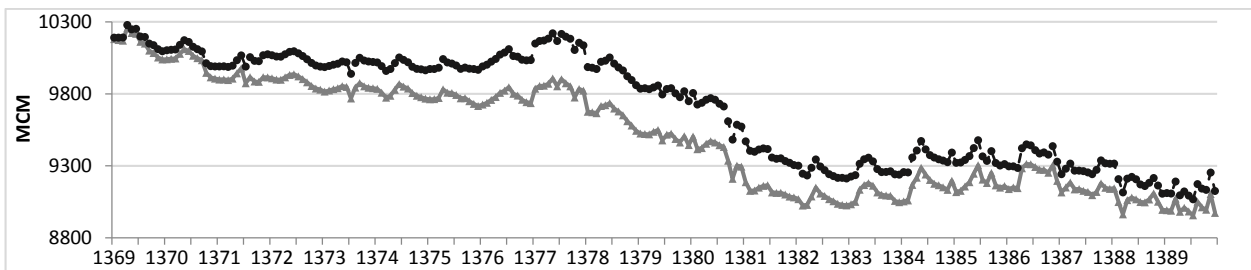


Fig. 8- A comparison of observed storage of Esfahn-Borkhar aquifer (gray line) and results of optimum method (dash line)

شکل ۸- مقایسه حجم ذخیره گذشته آبخوان اصفهان-برخوار (خط خاکستری) با نتایج روش بهینه (خط چین)

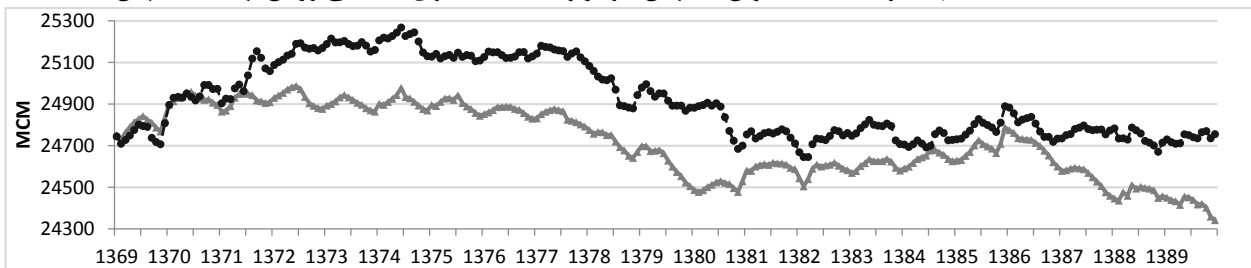


Fig. 9- A comparison of observed storage of Kuhpaye-Sagzi aquifer (gray line) and results of optimum method (dash line)

شکل ۹- مقایسه حجم ذخیره گذشته آبخوان کوهپایه-سگزی (خط خاکستری) با نتایج روش بهینه (خط چین)

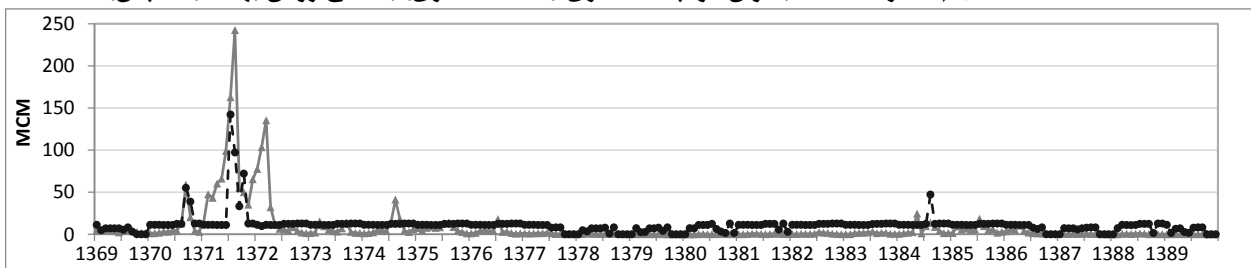


Fig. 10- A comparison of observed inflow to Gavkhuni wetland (gray line) and optimum method (dash line) in Varzane station

شکل ۱۰- مقایسه حجم مشاهداتی ورودی به تالاب گاوخونی با روش بهینه در ایستگاه ورزنه

با مروری بر نتایج به خوبی پیدا است که شاخص یکپارچه استاندارد شده توانایی رصد وقایع و پدیده خشکسالی را دارا بوده است. توالی وقایع ترسالی و خشکسالی توسط شاخص نشان داده شده و قدرت آن در تعیین شروع، تداوم و پایان خشکسالی را نشان می‌دهد. تصمیم‌گیری نهایی در مورد چگونگی بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی به کمک شاخص یکپارچه خشکسالی دو متغیره IDI به خوبی امکان پذیر بوده و این شاخص وضعیت شروع، تداوم و پایان خشکسالی را برای مدیریت شفاف‌تر می‌کند. این شاخص قضاوت را بر اساس شرایط بیلان اقلیمی آب و مجموع آب دسترس در چرخه هیدرولوژی آب ممکن می‌سازد. رویکرد نوینی که در این تحقیق دنبال شد، چگونگی مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی در جهت کاهش اثرات خشکسالی بوده است. توانایی شاخص یکپارچه خشکسالی این امکان را می‌دهد که اثر عملکرد مدیریت در هر بخش حوضه دیده شود و بتوانیم سیاست بهینه در کاهش اثر خشکسالی را اتخاذ نماییم. نتایج نشان می‌دهد که رهاسازی بهینه آب از سد با در نظر گرفتن شاخص خشکسالی منجر به قابلیت اطمینان بیشتر در تأمین منابع آب برای مصارف گوناگون در حوضه شده و نهایتاً پایداری حوضه در بخش‌های میانی و انتهایی آن بیشتر تأمین خواهد شد که بیشترین آسیب‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در طی دو دهه گذشته در بر داشته است.

پی‌نوشت‌ها

۶- مراجع

- Agrawala S, Barlow M, Cullen H, Lyon B (2001) The drought and humanitarian crisis in central and southwest Asia: A climate perspective. IRI Special Report NO. 01-11. Palisades, NY: International Research Institute for Climate Prediction
- Beguiría S, Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B (2014) Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34(10):3001–3023
- Cañón J, González J, Valdés J (2009) Reservoir operation and water allocation to mitigate drought effects in crops: A multilevel optimization using the drought frequency index. *Journal of Water Resources Planning and Management* 135(6):458-465
- Chen G, Chen X. (2011) A hybrid of adaptive genetic algorithm and pattern search for stock index optimized replicate. In 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC). IEEE
- Dai A (2011) Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(1):45–65
- Danner CL, McKinney DC, Teasley R, Sandoval-Solis S (2006) Documentation and testing of the WEAP model for the Rio Grande/Bravo basin. Texas University at Austin, TX
- Davis MD (2007) Integrated water resource management and water sharing. *Journal of Water Resources Planning and Management* 133(5):427–445
- Dracup JA, Lee KS, Paulson EG (1980) On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16(2):297–302
- Droogers P, Allen RG (2002) Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16(1):33–45
- Eum HI, Kim YO, Palmer RN (2011) Optimal drought management using sampling stochastic dynamic programming with a hedging rule. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(1):113-122

- 1- Integrated Drought Index
- 2- Palmer Drought Severity Index
- 3- Surface Water Supply Index
- 4- Combined Drought Indicator
- 5- Hybrid Drought Index
- 6- Multivariate Standardized Drought Index
- 7- Standardized
- 8- Standardized Precipitation Index
- 9- Standardized Precipitation-Evaporation Index
- 10- Water Evaluation and Planning System (WEAP)
- 11- Reoperation
- 12- Gringorten
- 13- Genetic Algorithm
- 14- Pattern Search
- 15- MATLAB
- 16- Kriging
- 17- Incremental Flows
- 18- The Parameterization–Simulation–Optimization (PSO) Approach

- Kelner V, Capitanescu F, Léonard O, Wehenkel L (2008) A hybrid optimization technique coupling an evolutionary and a local search algorithm. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 215(2):448–456
- Labbi Y, Benattous D (2010) A hybrid GA-PS method to solve the economic load dispatch problem. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 15(1):61–68
- Madani K, Mariño MA (2009) System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Journal of Water Resources Management*, 23(11):2163-2187
- Mamanpoush A, Miranzadeh M, Akbari M, Torabi M, Toomanian N, Murray-Rust H, Droogers P, Sally H, Gieske A (2000) Water management for sustainable irrigated agriculture in the Zayandeh Rud basin, Esfahan Province, Iran. *International Water Management Institute*, No. H028239
- Martin-Ortega J, Giannoccaro G, Berbel J (2011) Environmental and resource costs under water scarcity conditions: an estimation in the context of the European water framework directive. *Water Resources Management* 25(6):1615–1633
- McKee T, Doesken N, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proc. of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society Boston, MA
- Mishra AK, Singh VP (2010) A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391(1-2):202–216
- Molle F, Wester P (2009) River basin trajectories: societies, environments and development. *International Water Management Institute (IWMI)*, Vol. 8, Chapter 09
- Momtaz F, Nakhjiri N, AghaKouchak A (2014) Toward a drought cyberinfrastructure system. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 95(22):182–183
- Nagarajan R (2009) *Drought assessment*. Springer
- Nam WH, Choi JY, Yoo SH, Jang MW (2012) A decision support system for agricultural drought management using risk assessment. *Paddy and Water Environment* 10(3):197-207
- Navid D (1989) International law of migratory species: the Ramsar convention. *The Natural Resources Journal*, 29:1001, 1989
- Nijssen B, Shukla S, Lin C, Gao H, Zhou T, Ishottama Sheffield J, Wood EF, Lettenmaier DP (2014) A prototype global drought information system based European Commission (2012) Report on the review of the European water scarcity and droughts policy. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: COM (2012) 672 final
- Farahmand A, AghaKouchak A (2015) A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources* 76:140–145
- Garrote L, Martin-Carrasco F, Flores-Montoya F, Iglesias A (2007) Linking drought indicators to policy actions in the Tagus basin drought management plan. *Water Resources Management* 21(5):873–882
- Gholamzadeh M, Morid S, Delavar M (2011) Application of drought early warning system for operation of Zayandehrud Dam. *Journal of Water and Soil Science* 15(56):35–47 (In Persian)
- Grant SB, Saphores J.-D, Feldman DL, Hamilton AJ, Fletcher TD, Cook PLM, Stewardson M, Sanders BF, Levin LA, Ambrose RF, Deletic A, Brown R, Jiang SC, Rosso D, Cooper WJ, Marusic I (2012) Taking the 'waste' out of 'wastewater' for human water security and ecosystem sustainability. *Science (New York, NY)* 337(6095):681–6
- Golmohammadi MH (2015) Scenario analysis for integrated water resources planning and management (iwrpm) in the Zayandehrud basin under uncertainty using fuzzy performance criteria and sustainability index. Ph.D. Thesis, Isfahan University of Technology (In Persian)
- Hao Z, AghaKouchak A (2013) Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources* 57:12–18
- Hao Z, AghaKouchak A (2014) A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. *Journal of Hydrometeorology* 15(1):89–101
- Hashemi Sheikhsabani AA, Morid S, Delavar M (2016) Linking drought monitoring systems to management actions. *Iran Water Resources Research* 12(1):29–39 (In Persian)
- Karamouz M, Nazif S, Ahmadi A (2013) Development of integrated drought evaluation and monitoring system: case study of Aharchay river basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(7):897-910
- Karamouz M, Rasouli K, Nazif S (2009) Development of a hybrid index for drought prediction: case study. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(6):617–627

- hydrological approach. *Journal of Arid Environments*, 98:27-40
- Sepulcre-Canto G, Horion S, Singleton A, Carrao H, Vogt J (2012) Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Science* 12(11):3519–3531
- Shafer BA, Dezman LE (1982) Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: *Proc. of The Western Snow Conference*
- Sheffield J, Wood EF (2011) *Drought: past problems and future scenarios*. Routledge
- Sheffield J, Wood EF, Chaney N, Guan K, Sadri S, Yuan X, Olang L, Amani A, Ali A, Demuth S, Ogallo L (2014) A drought monitoring and forecasting system for sub-sahara african water resources and food security. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(6):861–882
- Shrestha E, Ahmad S, Johnson W, Shrestha P, Batista JR (2011) Carbon footprint of water conveyance versus desalination as alternatives to expand water supply. *Desalination* 280(1-3):33–43
- Sieber J, Purkey D (2011) *WEAP-water evaluation and planning system-user guide*. Stockholm Environment Institute, US Center, 335p
- Soltani F, Kerachian R, Shirangi E (2010) Developing operating rules for reservoirs considering the water quality issues: application of ANFIS-based surrogate models. *Expert Systems with Applications* 37(9):6639–6645
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K (2015) Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35(13):4027–4040
- Stagge JH, Tallaksen LM, Xu CY, Van Lanen HAJ (2014) Standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters. In: *IAHS-AISH Proc. and Reports (Vol. 363) Copernicus GmbH*
- Shvoboda M, LeComte D, Hayes M, Heim R, Gleason K, Angel J, Rippey B, Tinker R, Palecki M, Stooksbury D, Miskus D, Stephens S (2002) The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8):1181–1190
- Tallaksen LM, Van Lanen HAJ (2004) *Hydrological drought, Volume 48: Processes and estimation methods for streamflow and groundwater on multiple land surface models*. *Journal of Hydrometeorology* 15(4):1661–1676
- Núñez J, Rivera D, Oyarzún R, Arumí JL (2014) On the use of standardized drought indices under decadal climate variability: critical assessment and drought policy implications. *Journal of Hydrology* 517:458–470
- Palmer WC (1965) *Meteorological drought*. US Weather Bureau, Res Pap No 45. Washington, DC, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau
- Park Y, Cho KH, Kang J.-H, Lee SW, Kim JH (2014) Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model. *Science of The Total Environment* 466-467:871–880
- Payne JL, Eppstein MJ (2005) A hybrid genetic algorithm with pattern search for finding heavy atoms in protein crystals. In: *Proc. of the 2005 Conference on Genetic and Evolutionary Computation - GECCO '05*. New York, New York, USA: ACM Press
- Quiring SM (2009) Developing objective operational definitions for monitoring drought. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48(6):1217–1229
- Safavi HR, Esfahani MK, Zamani AR (2014) Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood river basin, Iran. *Water Resources Management* 28(6):1671–1688
- Safavi HR, Golmohammadi MH (2016) Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-Water Resources Research*, 12(1):68-83
- Safavi HR, Golmohammadi MH, Sandoval-Solis S (2015) Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud river basin. *Journal of Hydrology* 528:773–789
- Salamat AR, Alleyassin MR (2001) *How to work out a drought mitigation strategy*. (Rahimi H, Ed.) (49th–2001st ed.) Tehran: Iranian National Committee on Irrigation & Drainage (IRNCID) (In Persian)
- Sally H, Salemi HR, Mamanpoush A (2000) An overview of the hydrology of the Zayandeh Rud Basin. *International Water Management Institute*, No. H028241
- Sarhadi A, Soltani S (2013) Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A

- Wilhite DA, Glantz MH (1985) Understanding: the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International* 10(3):111–120
- Wilhite DA, Sivakumar MVK, Pulwarty R (2014) Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes* 3:4–13
- World Commission on Dams (2000) Dams and development: A new framework for decision-making: the report of the World Commission on Dams. Earthscan
- WWRI-Isfahan University of Technology (IUT) (2012) Isfahan crisis management, drought report. (In Persian)
- Yue S, Ouarda TBM, Bobée B, Legendre P, Bruneau P (1999) The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* 226(1-2):88–100
- Development in Water Science (Vol. 48). Elsevier Science B.V., Amsterdam, the Netherlands
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38(1):55–94
- Van Lanen HAJ, Fendeková M, Kupczyk E, Kasprzyk A, Pokojski W (2004) Flow generating processes. In: Tallaksen LM. and Van Lanen HAJ (Eds.), *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier B.V, The Netherlands
- Van Loon AF (2013) On the propagation of drought. Wageningen University
- Wada Y, Van Beek LPH, Bierkens MFP (2011) Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(12):3785–3808
- Wilhite DA (2000) *Drought: a global assessment*. Routledge Publishers, London, UK