

ارزیابی پایش خشکسالی با رویکرد احتمالاتی و شاخص ترکیبی عملکرد مخزن (MSUI)

صبا خواجه^{۱*}، شهلا پایمزد^۲، مه‌نوش مقدسی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه اراک

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه اراک

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه اراک

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۲/۲)

چکیده

سیستم‌های پایش از مقدمات لازم در طرح‌های مقابله با خشکسالی‌اند. تعیین شاخص مناسب یکی از اجزای سیستم‌های پایش است. در این تحقیق دو روش رویکرد احتمالاتی و شاخص پایداری اصلاح‌شده (MSUI) برای پایش دوره خشکسالی ۱۳۷۷-۱۳۸۰ در سیستم منابع آب زاینده‌رود ارزیابی و مقایسه شد. بدین منظور ابتدا، از بین شاخص‌های ترکیبی عملکرد مخزن، شاخص پایداری اصلاح‌شده برای منطقه مورد مطالعه انتخاب و خشکسالی بر اساس آن طبقه‌بندی شد. سپس، رویکرد احتمالاتی اجرا شد. نتایج نشان داد رویکرد احتمالاتی در اعلام هشدار زودهنگام خشکسالی سریع‌تر عمل می‌کند. بنابراین، جهت اعلام شروع وضعیت خشکسالی مناسب‌تر است. از طرف دیگر، شاخص پایداری اصلاح‌شده در طول دوره خشکسالی واکنش‌های مناسب‌تری نشان داد. بنابراین، استفاده هم‌زمان از دو شاخص معرفی شده می‌تواند در مدیریت و اعمال اقدامات لازم، هنگام شروع و در طول دوره خشکسالی، مؤثر باشد.

کلیدواژگان: پایش خشکسالی، رویکرد احتمالاتی، شاخص ترکیبی عملکرد مخزن.

مقدمه

به منظور مقابله با آثار زیانبار خشکسالی، سامانه‌های پایش خشکسالی یکی از ابزارهای مهم است که می‌تواند اطلاعات به‌هنگام را در زمینه دوام، شدت، و توسعه جغرافیایی خشکسالی در یک ناحیه به دست دهد. با توجه به اینکه سد در سیستم‌های آبی منابع آب نقش ذخیره‌ساز و تنظیم‌کننده منابع آب را بر عهده دارد، پایش خشکسالی و تصمیم‌گیری متناسب با ذخیره آن اهمیتی ویژه دارد. در این زمینه می‌توان به تحقیق Garrote (2006) اشاره کرد. وی نسخه‌ای ساده‌شده از فرایند تعیین آستانه‌ها را با رویکرد غیر احتمالاتی، به منظور توزیع بین ذی‌نفعان و مذاکره با آن‌ها، تولید کرد. در این رویکرد محرک‌های خشکسالی (حجم‌های ذخیره مخزن) بر اساس مجموعه‌ای از خشکسالی‌هایی به دست می‌آید که نماینده‌ای از خشکسالی‌های گذشته سیستم باشند. در تحقیقی دیگر، برنامه‌ریزی خشکسالی بر اساس حجم مخزن بررسی شد. در این تحقیق، به کمک شبیه‌سازی مخزن در مقیاس روزانه در سیستم منابع آب Springfield، در غرب ایالت ماساچوست، احتمال

شکست مخزن، که همان رسیدن به حجم‌های بحرانی است، به دست آمد. در این روش، سطوح هشدار خشکسالی در چهار سطح نرمال، ملایم، متوسط، و شدید طبقه‌بندی شد. هر سطح بازه‌ای از احتمالات شکست سیستم را در بر دارد (Westphal *et al.*, 2007). در تحقیقی دیگر Zarehzade Mehrizi and Morid (2011)، با روشی که Westphal ارائه کرد، طبقات مختلف خشکسالی را بر اساس تراز آب مخزن در سیستم منابع آب سد زاینده‌رود مشخص کردند. سطوح تعیین‌شده حجم مخزن متناظر با هر یک از احتمالات کاهش تراز مخزن تا ۱۰، ۳۰، و ۲ درصد است و به صورت ماهیانه به دست می‌آید. در این تحقیق، شاخص‌های SPI و EDI با شاخص تراز مخزن معرفی شده مقایسه شدند. نتایج نشان داد برای اعلام شروع وضعیت خشکسالی بهتر است از روش SPI با دوره شش‌ماهه استفاده شود. همچنین، در طول دوره بهره‌برداری و اقدامات مدیریتی برای پایش روش تراز مخزن و برای اعلام خاتمه آن EDI توصیه می‌شود. در تحقیق Garrote *et al.* (2007) رویکردی در برقراری ارتباط بین سیستم‌های پایش و اقدامات مدیریتی در سیستم‌های دارای مخزن ارائه شد. این رویکرد بر پایه ارزیابی احتمال عدم توانایی تأمین نیازهای سیستم در یک افق زمانی است. این مطالعه بر حوضه آبریز Tagus، واقع در اسپانیا و

استاندارد خشکسالی که آژانس منابع آب تایوان، بر اساس نرخ کاهش برای مصارف آب کشاورزی و عمومی، ارائه کرده استفاده کردند.

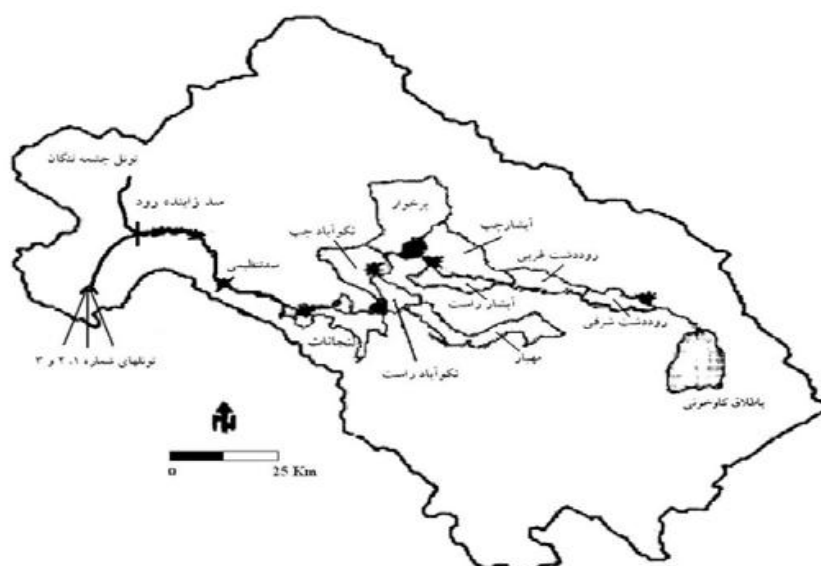
همان‌طور که اشاره شد، در زمینه پایش و هشدار خشکسالی، با استفاده از تراز مخزن، تحقیقاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. در بیشتر این مطالعات مقدار کمی کمبود مدنظر بوده و وسعت و تعداد و شدت آن لحاظ نشده است. از این رو، در این تحقیق به پایش خشکسالی با استفاده از شاخص ترکیبی عملکرد مخزن پرداخته شد. سپس، این روش با روش رویکرد احتمالاتی در اعلام هشدارهای مختلف مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران واقع شده است. سد مخزنی زاینده‌رود با حجم کل ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان قرار دارد. متوسط سالیانه جریان ورودی به سد ۱۶۰۰ میلیون متر مکعب است که در حدود ۶۰۰ میلیون متر مکعب آن از حوضه رودخانه کارون تأمین می‌شود و آب مورد نیاز شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها و روستاها، و حدود ۷۰ درصد کل تقاضای کشاورزی پایین‌دست را تأمین می‌کند (شکل ۱).

پرتقال، انجام گرفت و ارتباط معرف‌های خشکسالی و اقدامات مدیریتی بررسی شد. از آنجا که حجم ذخیره مخزن می‌تواند ریسک شکست سیستم را بیان کند، این متغیر شاخص و محرک خشکسالی در نظر گرفته شد. Gholamzadeh *et al* (2011) با بهره‌گیری از تحقیقات Huang and Chou (2008) یک سیستم پایش و هشدار خشکسالی را برای سد زاینده‌رود ارائه دادند که از سه بخش اصلی- شامل پایش خشکسالی، پیش‌بینی ورودی‌های رودخانه و مصرف آب، و محاسبه یک شاخص هشدار برای مدیریت خشکسالی- تشکیل می‌شود. ایشان، با ارائه شاخص هشدار خشکسالی (Drought Alert Index-DAI)، بر اساس پیش‌بینی‌های شش‌ماهه رهاسازی از مخزن سد و وضعیت خشکسالی فعلی مخزن، پنج سطح هشدار خشکسالی را برای دوره شش‌ماهه محاسبه کردند. نتایج نشان داد استفاده از سیستم هشدار زودهنگام طراحی شده می‌تواند نقشی مؤثر در مدیریت مخزن سد زاینده‌رود، تعیین سیاست‌های جیره‌بندی، و کاهش خسارت خشکسالی داشته باشد. Yang *et al* (2012) برای انتخاب شاخصی ترکیبی برای مخزن Tsengwen از سه شاخص ریسک خشکسالی، شاخص پایدار، و شاخص پایداری اصلاح‌شده استفاده کردند. آن‌ها، پس از انتخاب شاخص پایداری اصلاح‌شده (MSUI)، به منزله شاخصی مناسب برای منطقه، به منظور تعیین آستانه شاخص MSUI، برای سطوح مختلف تنش خشکی، از طبقه‌بندی



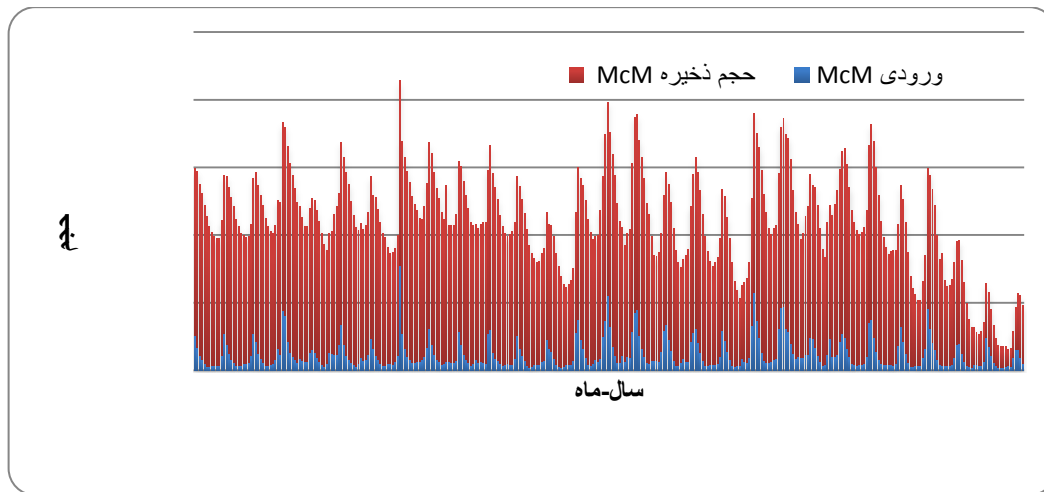
شکل ۱. شماتیک منطقه مطالعاتی

تأمین شد. یکی از خشکسالی‌های شدید این دوره در سال‌های آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۸ تا ۱۳۷۹-۱۳۸۰ روی داد که در این مقاله به طور خاص به آن پرداخته می‌شود. طی این دوره ذخیره سد تا

آمار و اطلاعات مورد نیاز- شامل جریان ماهیانه ورودی به سد، ذخیره ماهیانه سد، میزان رهاسازی و تقاضا از شرکت مدیریت منابع آب ایران برای سال‌های آبی ۱۳۵۲-۱۳۸۲-

تقارن فصل گرما با افزایش حجم فاضلاب‌ها، از دیگر تبعات این دوره بود.

حدود ۳۰ درصد بلندمدت آن کاهش یافت (شکل ۲) و بخش کشاورزی فقط برای سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ بیش از ۱٫۵ میلیارد ریال خسارت دید. مشکلات زیست‌محیطی، به دلیل



شکل ۲. نمودار تغییرات ورودی به مخزن و حجم ذخیره در سال‌های ۱۳۵۲ تا ۱۳۸۰

دست آورد. با استفاده از ذخایر به‌دست‌آمده از مدل تابع چگالی احتمال آن به دست می‌آید. بدین ترتیب، می‌توان توابع چگالی احتمال را به ازای f و h های متفاوت تخمین زد.

شاخص‌های ترکیبی عملکرد مخزن

شاخص‌های ترکیبی عملکرد مخزن بر اساس عملکرد سیستم‌های منابع آب تعریف می‌شوند. برای ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها (مخازن) شاخص‌های کارایی به کار رفت. به طور کلی، شکست در بهره‌برداری از مخزن جنبه‌های مختلف دارد: وسعت، تعداد، و شدت (Jain, 2010). شاخص‌های اعتمادپذیری (Hashimoto et al., 1982)، برگشت‌پذیری (Yang et al., 2012)، و آسیب‌پذیری (Loucks and Van Beek, 2005; Sandoval-Solis et al., 2011) بیانگر این جوانب‌اند. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه مدیریت منابع آب، با استفاده از شاخص‌های ترکیبی که از این سه شاخص تشکیل شده‌اند، صورت گرفته است (Loucks, 1997; Zongxue et al., 1998).

Loucks (1997) شاخصی ترکیبی به نام شاخص پایداری^۱ (SUI) ارائه دادند که محققان دیگر نیز آن را به کار گرفتند (Loucks, 1997; McMahon et al., 2006; Ray et al., 2010; Sandoval-Solis et al., 2011).

$$\text{SUI} = \left(\text{Rel} \times \text{Res} \times (1 - \text{Vul}) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{رابطه } ۱)$$

Rel اطمینان‌پذیری، Res برگشت‌پذیری، و Vul آسیب‌پذیری است. مقادیر این شاخص بین ۰ تا ۱ متغیر است.

رویکرد احتمالاتی

در این روش آستانه‌هایی برای هشدار خشکسالی بر اساس حجم ذخیره مخزن به صورت احتمالاتی تعریف و بر اساس میزان ذخیره سیستم (S) تعیین می‌شود؛ طوری که با آن بتوان کسری از نیاز سیستم (f) را در یک افق زمانی (h) و با احتمالی خاص (p) تأمین کرد.

مقادیر f و h و p پارامترهای مدل‌اند که باید با مشارکت ذی‌نفعان تعیین شوند. برآورد آستانه‌های هشدار خشکسالی در این روش مستلزم توسعه یک مدل شبیه‌سازی از سیستم منابع آب است. مدلی که در این تحقیق برای شبیه‌سازی سیستم در نظر گرفته شد یک مدل ساده بیلان است که فقط یک مخزن در آن در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از مدل شبیه‌سازی و سری تاریخی ورودی‌ها و مصارف در هر ماه، حداقل حجم ذخیره مورد نیاز برای تأمین f درصد از نیاز تا افق زمانی h محاسبه می‌شود. در نهایت، در هر ماه حداقل حجم مخزن جهت هشدار سطوح مختلف خشکسالی به دست می‌آید. بدین منظور، با فرض ذخیره‌ای ثابت در ابتدای ماه مورد نظر در کل سری زمانی موجود، مدل شبیه‌سازی با استفاده از سری تاریخی ورودی‌ها و مصارف به تعداد سال‌های تاریخی اجرا می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان احتمال تأمین f درصد از تقاضا را تا افق زمانی h به ازای هر حجم ذخیره در ابتدای هر ماه خاص برآورد کرد. با قراردادن حجم‌های مختلف به منزله ذخیره اولیه در هر ماه، می‌توان با استفاده از مدل شبیه‌سازی احتمال تأمین تقاضا را به ازای حجم‌های مختلف به

مقدار نزدیک به ۱ به این معناست که کمبود آب چندان جدی نیست.

در تحقیق دیگری یک شاخص ریسک یکپارچه، شاخص ریسک خشکسالی^۱ (DRI) به منزله یک تابع وزنی خطی از اطمینان پذیری، برگشت پذیری، و آسیب پذیری پیشنهاد شد (Zongxue et al., 1998):

$$\text{DRI} = \frac{1}{3}(1 - \text{ReI}) + \frac{1}{3}(1 - \text{Res}) + \frac{1}{3}(\text{Vul}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

مقادیر این شاخص نیز بین ۰ تا ۱ است. اما اینجا مقدار نزدیک به ۱ کمبود آب خطرناک تری را نشان می دهد.

شاخص دیگری به نام شاخص پایداری اصلاح شده^۲

(MSUI) ایجاد شد (Yang et al., 2012):

$$\text{MSUI} = \left((1 - \text{ReI}) \times (1 - \text{Res}) \times \text{Vul} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این شاخص نیز مانند DRI مقدار نزدیک به ۱ کمبود

آب جدی تری را نشان می دهد.

یافته‌ها و بحث

پایش و طبقه بندی خشکسالی بر اساس دو روش رویکرد احتمالاتی و شاخص پایداری اصلاح شده (MSUI) انجام شد که در ادامه نتایج هر یک ارائه می شود.

طبقه بندی خشکسالی با رویکرد احتمالاتی

سناریوهای مختلف از مقادیر f ، h ، و p سطوح مختلف خشکسالی را تعیین می کند. در این تحقیق پارامتر f برای سناریوی اول تا سوم به ترتیب برابر ۸۰، ۶۰، و ۳۰ درصد و پارامترهای p و h در این سه سناریو به ترتیب برابر ۱۰۰ درصد و شش ماه است. این سطوح بر اساس بدترین شرایط تأمین نیاز در وضعیت خشکسالی و تأمین نیازها در حالت عادی انتخاب شدند. انتخاب سطوح تأمین نیاز بر اساس سری تاریخی منابع و مصارف آب در منطقه مطالعه شده صورت گرفت. بدین گونه که پایین ترین سطح هشدار (۳۰٪ تأمین تقاضا) بر اساس شدیدترین خشکسالی، مربوط به سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۸۰، انتخاب شد. در این سال، کل آورد سالیانه معادل ۷۲۰ میلیون متر مکعب بود که پس از کسر نیاز سالیانه شرب و صنعت و نیار زیست محیطی می توانست ۳۰ درصد نیاز سالیانه کشاورزی را تأمین کند.

در ادامه در هر سال از سری تاریخی و به ازای یک ماه

به خصوص مدل شبیه سازی به ازای ذخایر متفاوت در ابتدای آن

ماه اجرا می شود و در نهایت در هر سال حداقل ذخیره اولیه جهت تأمین ۸۰، ۶۰، و ۳۰ درصد نیاز تا دوره زمانی شش ماه بعد در آن ماه به دست می آید. با مرتب کردن مقادیر ذخیره به دست آمده، به طور صعودی، تخمینی از توزیع احتمال تجمعی ذخیره مخزن مورد نیاز در آن ماه به دست می آید. شکل ۳ نتایج این تحلیل را برای تأمین ۸۰ درصد نیاز همه ماهها نشان می دهد.

طبق سه سناریوی تأمین تقاضا (۸۰، ۶۰، ۳۰٪ تأمین نیاز)، آستانه های حجم ذخیره جهت تعیین سطوح خشکسالی از نمودارهای مشابه شکل ۳ در ماه های مختلف استخراج شد و در نهایت نمودار شکل ۴ به دست آید.

نمودار شکل ۴ مقادیر آستانه های حجم مخزن را بر اساس تأمین تقاضا تا شش ماه بعد نشان می دهد. سه حجم مخزن مشخص شده در هر ماه سطوح مختلف خشکسالی را مشخص می کنند. همان طور که مشاهده می شود، در اردیبهشت حجم های ۶۸۰، ۴۸۵، و ۲۱۴ میلیون متر مکعب آستانه هایی برای سطوح ۱ تا ۴ خشکسالی اند. این بدان معناست که اگر حجم مخزن در اول اردیبهشت کمتر از ۶۸۰ و بیشتر از ۴۸۵ میلیون متر مکعب باشد، وضعیت در سطح ۲ خشکسالی است. همچنین، در برخی ماهها، مانند آبان و آذر و دی، آستانه های هشدار برای سطوح مختلف خشکسالی برابر و نزدیک حجم مرده مخزن است. این بدان معناست که در این ماهها حتی با وجود حجم مخزن نزدیک به حجم مرده آوردهای رودخانه به احتمال ۱۰۰ درصد همه نیازها را تا شش ماه آینده تأمین خواهد کرد و از این رو نیازی به اعلام هشدار نیست.

طبقه بندی خشکسالی با استفاده از شاخص ترکیبی

در این بخش ابتدا یک شاخص ترکیبی مناسب از میان شاخص های DRI، SUI، و MSUI برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس، خشکسالی با استفاده از این شاخص طبقه بندی شد.

انتخاب شاخص ترکیبی مناسب

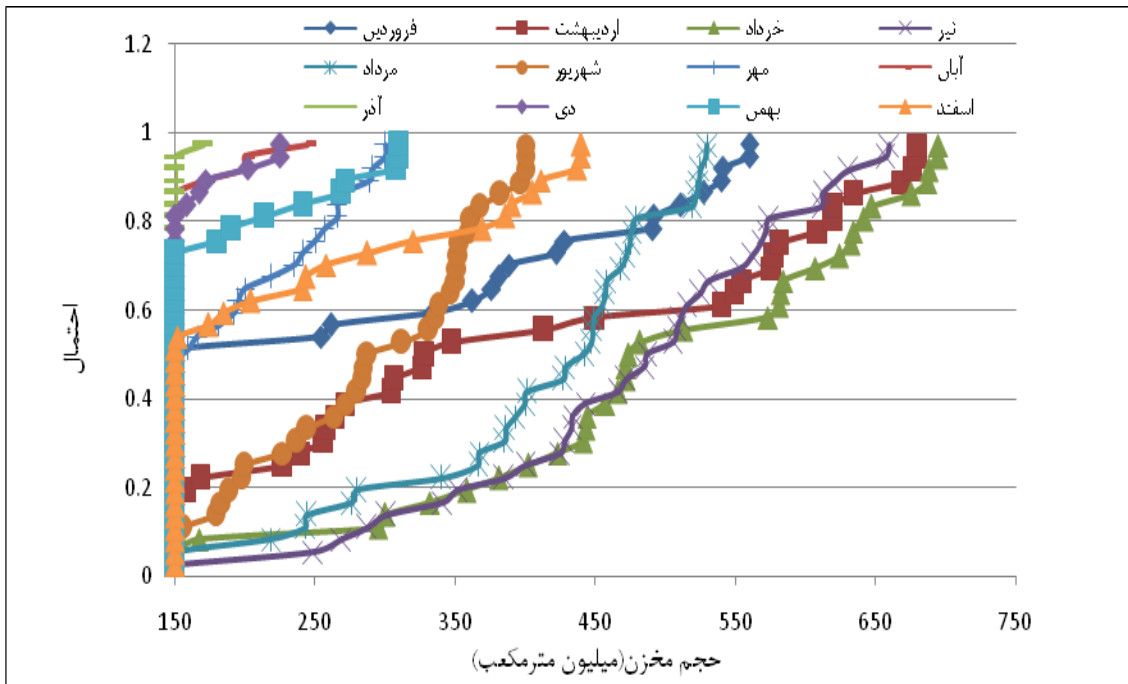
شاخص های ترکیبی باید در برابر متغیرهای مؤثر در محاسبه خود رفتاری یکنواخت داشته باشند (Kjeldsen and Rosbjer, 2010; Jain, 2004). در این تحقیق یکنواختی رفتار هر سه شاخص ترکیبی DRI، SUI، و MSUI برای انتخاب شاخص مناسب در منطقه مطالعاتی بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل رفتار شاخص های یاد شده تغییراتی در پارامترهای مؤثر بر آنها-

1. Drought risk index

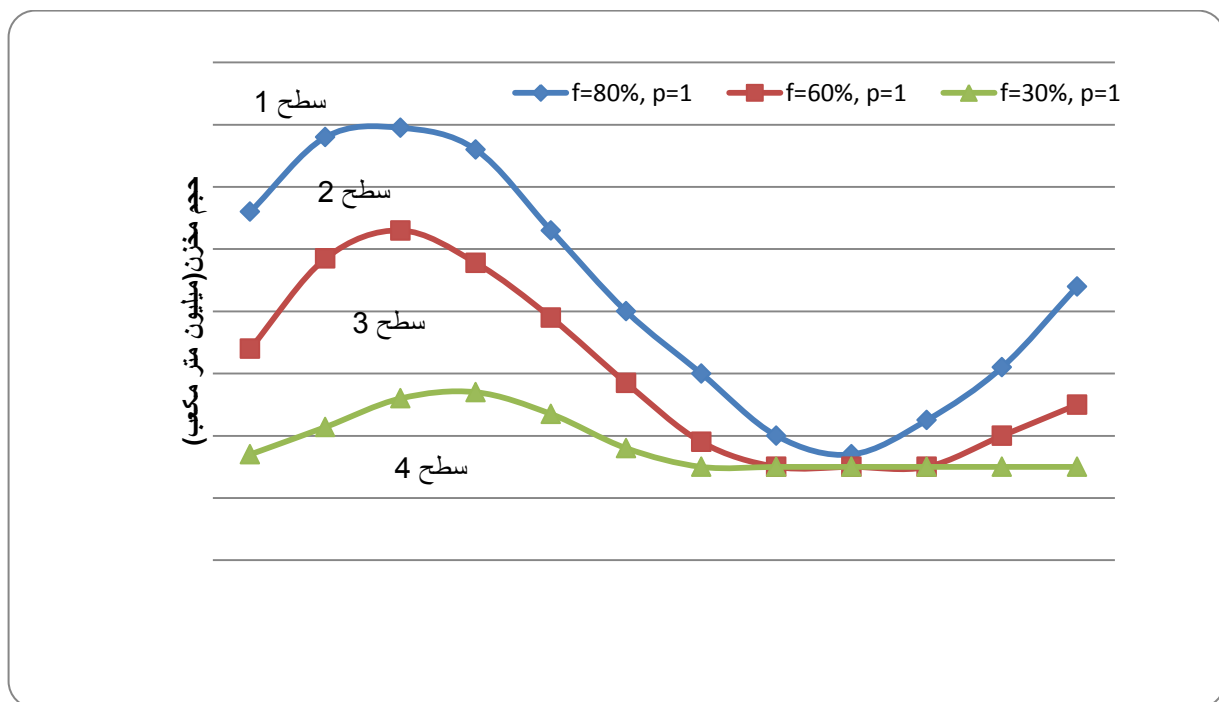
2. Modified the Sustainability index

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص DRI در برابر شاخص MSUI با تغییر دو پارامتر تقاضای آب و ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن نوسانات بیشتری از خود نشان می‌دهد. در نهایت، با مقایسه رفتار شاخص‌های منتخب در برابر تغییرات، شاخص MSUI شاخص مناسب برای تجزیه و تحلیل منطقه مورد نظر شناخته شد.

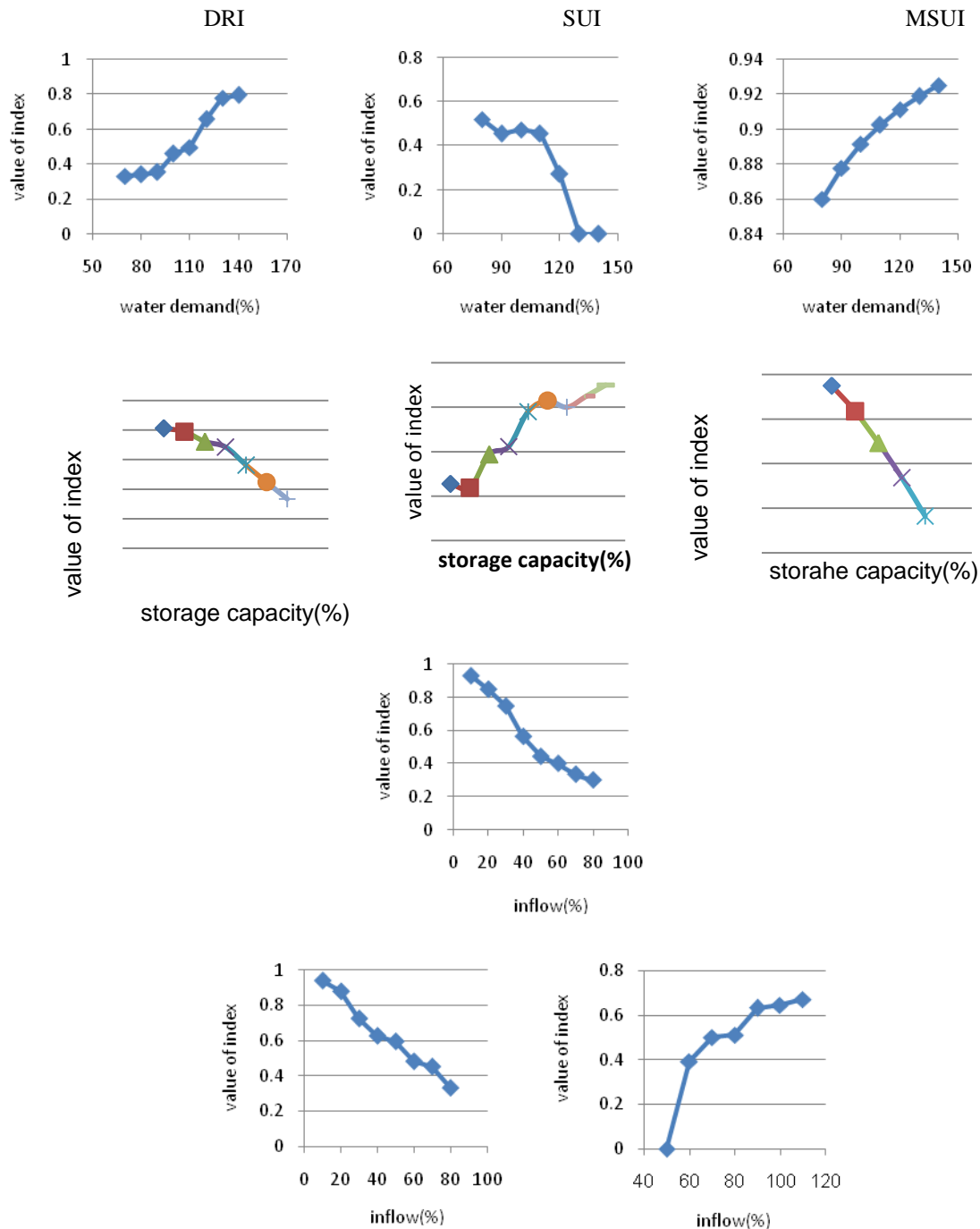
مانند جریان ورودی به مخزن، تقاضای آب، و ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن- ایجاد شد. نتایج در شکل ۵ می‌آید. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، شاخص SUI رفتاری غیر یکنواخت دارد و نوسانات بیشتری در برابر دو شاخص دیگر در تغییر هر سه پارامتر از خود نشان می‌دهد. شاخص‌های DRI و MSUI رفتاری تقریباً یکنواخت‌تر در برابر این تغییرات دارند. اما



شکل ۳. توزیع احتمال تجمعی ذخیره مورد نیاز مخزن برای تأمین ۸۰ درصد تقاضا تا شش ماه آینده در سیستم منابع آب زاینده‌رود



شکل ۴. آستانه‌های احتمالاتی سطوح مختلف خشکسالی بر اساس تأمین تقاضا تا شش ماه آینده در حوضه زاینده‌رود



شکل ۵. نتایج تجزیه و تحلیل رفتار یکنواخت هر یک از شاخص‌ها

همه‌انگهی با بهره‌برداری از سیستم منابع آب منطقه دوره شش‌ماهه برای تأمین تقاضا لحاظ شد. بنابراین، مقادیر MSUI و کمبود آب برای هر دوره شش‌ماهه از سال ۱۳۵۲ تا ۱۳۸۲ محاسبه شد و در نهایت برای هر سطح متناظر با درصد کمبود تأمین آب محدوده‌ای برای MSUI انتخاب شد که در جدول ۱ می‌آید.

طبقه‌بندی خشکسالی با استفاده از شاخص MSUI به منظور طبقه‌بندی سطوح خشکسالی به کمک شاخص MSUI، تعیین آستانه‌های مختلف این شاخص ضروری است. جهت تعیین این آستانه‌ها مقادیر مختلف کمبود تأمین آب (> 10 و $30-10$ ، $50-30$ و < 50) به ترتیب برای نمایش سطوح ۱ تا ۴ خشکسالی در نظر گرفته شد. همچنین، جهت

ارزیابی روش‌ها

جهت ارزیابی دقیق‌تر این دو روش، سطوح هشدار طی دوره خشکسالی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ محاسبه شد که در شکل ۶ می‌آید. همان‌طور که دیده می‌شود، رویکرد احتمالاتی سطح بالاتری از خشکسالی را در ابتدا و انتهای دوره نشان می‌دهد و طی این دوره نوسانات بیشتری بین سطوح مختلف داشته است؛ در حالی که شاخص ترکیبی ابتدا خشکسالی را با سطحی ملایم‌تر نشان داد، ولی در طول دوره در سطح ۴ خشکسالی (خشکسالی خیلی شدید) پایدارتر بوده است. رفتار کلی روش‌های معرفی شده طی این دوره خشکسالی در جدول ۲ می‌آید. ملاحظه می‌شود که بیشترین اعلام سطح ۴ در شاخص ترکیبی است.

در ادامه این روش‌ها با روش‌های ارائه شده در تحقیق Zarehzade Mehrizi and Morid (2011) مقایسه شد. نتایج نشان داد رویکرد احتمالاتی در اعلام زودهنگام خشکسالی حساس‌تر از شاخص بارندگی استاندارد شده با دوره ۳ ماهه (SPI6) عمل می‌کند و سطحی بالاتر از خشکسالی را در آغاز دوره نشان می‌دهد. شاخص ترکیبی نیز طی دوره خشکسالی در نظر گرفته شده در مقایسه با تراز مخزن در برابر خشکسالی واکنش‌هایی شدیدتر نشان می‌دهد و سطح خشکسالی خیلی شدید را بیشتر اعلام می‌کند.

نتیجه‌گیری

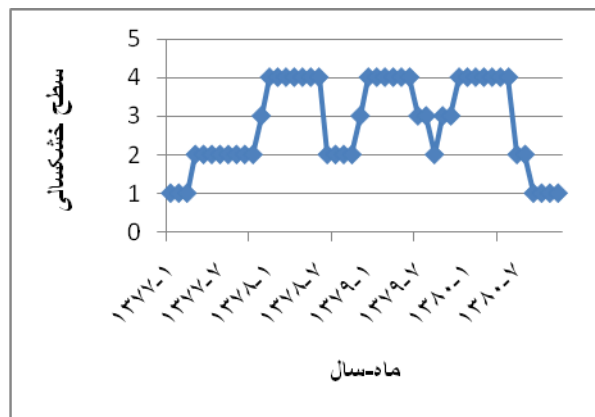
در این مقاله خشکسالی بر اساس رویکرد احتمالاتی و شاخص ترکیبی عملکرد مخزن پایش و طبقه‌بندی شد. در انتها نتایج این روش‌ها با یافته‌های Zarehzade Mehrizi and Morid (2011) مقایسه شد. نتایج نشان داد رویکرد احتمالاتی می‌تواند روشی مفید در اعلام زودهنگام خشکسالی در مقایسه با سایر روش‌ها باشد. شاخص ترکیبی ارائه شده برای این منطقه نیز در طول دوره خشکسالی در مقایسه با تراز مخزن، که Zarehzade Mehrizi and Morid (2011) ارائه کردند، رفتاری مناسب‌تر از خود نشان داد. همچنین، با توجه به اینکه هر دو روش معرفی شده در این تحقیق (رویکرد احتمالاتی و شاخص ترکیبی)، علاوه بر عوامل طبیعی، مانند بارندگی، میزان تقاضا و عوامل غیر طبیعی، نظیر مصرف بی‌رویه، را نیز در پایش خشکسالی در نظر می‌گیرند، می‌توانند روش‌هایی جامع‌تر برای پیش‌بینی خشکسالی باشند.

REFERENCES

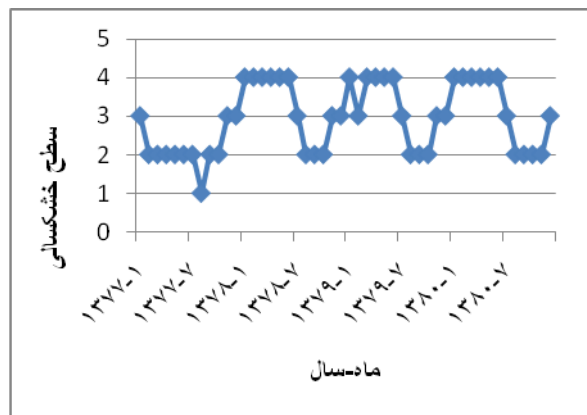
Garrote, L. (2006). Quantities tools for water supply, Drought Mitigation Methodologies, Tools and Management Options: ICARDA, June 2006.

جدول ۱. طبقه‌بندی مقادیر MSUI برای طبقات مختلف خشکسالی

سطح خشکسالی	محدوده MSUI
۱	۰-۰٫۴
۲	۰٫۴-۰٫۶۵
۳	۰٫۶۵-۰٫۷۵
۴	۰٫۷۵-۱



(الف)



(ب)

شکل ۶. سطح هشدار خشکسالی بر اساس الف) شاخص ترکیبی و ب) رویکرد احتمالاتی طی دوره خشکسالی ۱۳۷۷-۱۳۸۰

جدول ۲. درصد اعلام وقوع هر یک از طبقات خشکسالی توسط هر دو روش طی دوره خشکسالی ۱۳۷۷-۱۳۸۰

سطح خشکسالی	شاخص ترکیبی	رویکرد احتمالاتی
سطح ۱	۱۴/۵	۲/۱
سطح ۲	۳۳/۳	۳۷/۵
سطح ۳	۱۴/۵	۲۵/۴
سطح ۴	۳۷/۵	۳۶

Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Flores-Montoya, F., and Iglesias, F. (2007). Linking drought indicators to policy actions in the Tagus basin

- drought management plan. *Water Resources Management*, 21, 873-882.
- Gholamzadeh, M., Morid, S., and Delavar, M. (2011). Application of drought early warning system for operation of Zayandeh-Rud reservoir. *Journal of Water and Soil Science (Iran)*, 15(56), 35-48.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water-resource system performance evaluation. *Water Resources Management*, 18, 14-20.
- Huang, W. C. and Chou, C. C. (2008). Risk-based drought early warning system in reservoir operation. *Advances in Water Resources*, 31, 649-660.
- Jain, S. K. (2010). Investigating the behavior of statistical indices for performance assessment of a reservoir. *Journal of Hydrology*, 391, 90-96.
- Kjeldsen, T. R. and Rosbjerg, D. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 755-767.
- Loucks, D. P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 513-530.
- Loucks, D. P. and Van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management: an Introduction to Methods, Models and Applications*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- McMahon, T. A., Adeloye, A. J., and Sen-Lin, Z. (2006). Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324, 359-382.
- Ray, P. A., Vogel, R. M., and Watkins, D. W. (2010). Robust optimization using a variety of performance indices. in: *World Environmental and Water Resources Congress, ASCE*, Providence, RI, 4710-4719, 16-20 May.
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D., and Loucks, D. (2011). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137:381-390. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000134.
- Westphal, K. S., Laramie, R. L., Borgatti, D., and Stoops, R. (2007). Drought management planning with economic and risk factors. *Water Resources Planning and Management*, 133(4), 351-362.
- Yang, T. C., Chen, C., Kuo, C. M., Tseng, H. W., and Yu, P. S. (2012). Drought risk assessments of water resources systems under climate change: a case study in Southern Taiwan. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9: 12395-12433. doi: 10.5194/hessd-9-12395-2012.
- Zarezadeh Mehrizi, M. and Morid, S. (2011). Application of Reservoir Level and Meteorological Indices for Drought Monitoring: A Case Study: Zayandeh Rud Water System. *Soil and Water Research*, 2011 (Issue 1). (In Farsi)
- Zongxue, X., Jinno, K., Kawanura, A., Takesaki, S., and Ito, K. (1998). Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management*, 12, 13-30.