

## پایش خشکسالی با استفاده از تراز مخزن سد و شاخص‌های هواشناسی (مطالعه موردی سیستم آب زاینده رود اصفهان)

محبوبه زارعزاده مهریزی<sup>۱</sup> و سعید مرید<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۹/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۵/۱۶)

### چکیده

خشکسالی از جمله بلایای طبیعی می‌باشد که خسارات سنگینی به منابع آب وارد نموده و مدیریت را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد. پایش خشکسالی از مهمترین اقدامات در مدیریت آن می‌باشد که برای آن شاخص‌ها و روش‌های متفاوتی ارائه شده است که از معرف‌های گوناگونی بهره می‌جویند. این تحقیق تلاش دارد تا دو شاخص شناخته شده هواشناسی خشکسالی مؤثر (*EDI*) و بارندگی استاندارد شده (*SPI*) را با روش هیدرولوژیکی بر اساس تراز مخزن، برای پایش خشکسالی سیستم منابع آب زاینده‌رود مقایسه نماید که بدین منظور دوره خشکسالی ۱۳۸۰-۱۳۷۷ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هر کدام از روش‌ها قابلیت‌هایی دارند که طی دوره خشکسالی می‌توانند به مدیریت خشکسالی کمک کنند. لذا تأکید بر استفاده همزمان از چند شاخص برای پایش خشکسالی یک سیستم منابع آبی می‌گردد. برای منطقه مطالعاتی این تحقیق، نتایج نشان داد که برای اعلام شروع وضعیت خشکسالی بهتر است از روش *SPI* با دوره ۶ ماهه استفاده گردد. همچنین در طول دوره بهره‌برداری و اعمال اقدامات مدیریتی برای پایش روش تراز مخزن و برای اعلام خاتمه آن *EDI* قابل توصیه است.

**واژه‌های کلیدی:** پایش خشکسالی، *SPI*، *EDI*، تراز مخزن، سیستم آب زاینده‌رود.

### مقدمه

بارندگی می‌باشند. استقبال بیشتر از این شاخص عمدتاً بواسطه سهل الوصول بودن آمار بارندگی، فراوانی ایستگاه‌های هواشناسی، وجود شاخص‌های متعدد و تجربه بیشتر کار با آن‌ها می‌باشد. البته باید توجه داشت که با وجود اینکه کاهش بارندگی، عامل اصلی خشکسالی است، اما در مواردی مانند بهره‌برداری بیش از حد نیز ممکن است آثاری مشابه زمان خشکسالی به وجود آید که شاخص‌های بارندگی عکس‌العملی نسبت به آن نشان نمی‌دهند.

از این رو لازم است نقش بیشتری را به متغیرهای هیدرولوژیکی داد و از آن‌ها مستقیماً بهره جست. این کار باعث می‌گردد که در پایش بتوان همزمان منابع و مصارف را دخالت داد که بسیار بر آن تأکید شده است. از اولین کارها برای پایش خشکسالی با معرف‌های هیدرولوژیکی و بخصوص دبی، تحقیق Yevjevich (1967) است که بر اساس تئوری گردش (Run Theory) تعریف شد. وی با استفاده از سری زمانی دبی رودخانه، معیار سطح آستانه‌ای (Truncation Level) را برای اعلام خشکسالی پیشنهاد نمود. روش آستانه بعدها توسط Duckstein و Gupta (1975): Dracup et al. (1980) و Chang (1989, 1990) به کار گرفته شد. در روش Chang (1990) که چند معرفه تلقی می‌گردد، مجموعه‌ای از عوامل مانند ذخیره سدها و سفره‌های

با توجه به این که سد در سیستم‌های آبی منابع آب نقش ذخیره سازی و تنظیم منابع آبی را بر عهده دارد، پایش خشکسالی و اتخاذ تصمیمات لازم متناسب با ذخیره آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این درحالیست که سیستم‌های مرسوم عمدتاً بر معرف‌های هواشناسی تأکید دارند و لاجرم با تمهیداتی از آن‌ها برای پایش‌ها و مدیریت منابع آبی استفاده می‌کنند. Steinemann و Cavalcanti (2006) از توسعه معرف‌ها و محرک‌های چندگانه به منظور برنامه ریزی مدیریت خشکسالی با استفاده از ترکیب *SPI* با دوره زمانی‌های مختلف استفاده کردند. Kim et al. (2009) ارزیابی، بهبود و کاربرد شاخص خشکسالی مؤثر را برای بررسی خشکسالی‌های ۲۰۰ سال اخیر کره جنوبی مورد استفاده قرار دادند که در این مطالعه آن‌ها از شاخص‌های هواشناسی نظیر *SPI* و *EDI* به منظور پایش خشکسالی استفاده نمودند. یکی دیگر از شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه *AWRI* بود. *AWRI* از شاخص‌هایی است که در حین محاسبه *EDI* قابل استخراج بوده و به نوعی تعیین کننده منابع آب در دسترس می‌باشد که همگی بر مبنای

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: morid\_sa@modares.ac.ir

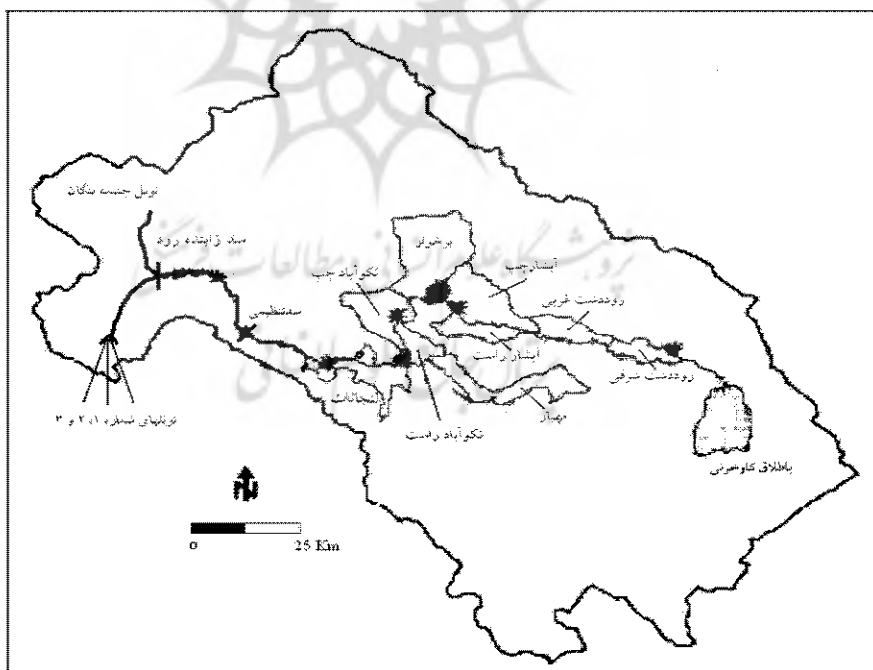
سیستم خاص پایش خشکسالی برای سیستم آب زاینده رود بر اساس ذخیره سد زاینده رود اصفهان ارائه دهد و سپس نتایج آن را با شاخص‌های هواشناسی با پایه بارندگی نظیر *EDI* و *SPI* مقایسه نماید.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز رودخانه زاینده رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران واقع شده و از مناطق کم آب ایران به شمار می‌رود. رودخانه زاینده رود با طول ۳۵۰ کیلومتر از رشته کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و به باتلاق گاوخونی ختم می‌گردد. بر روی این رودخانه، سد مخزنی زاینده رود که در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان قرار دارد، با حجم کل ۱۴۶۰ میلیون مترمکعب احداث شده است (شکل ۱). متوسط سالانه جریان ورودی به سد، ۱۶۰۰ میلیون مترمکعب بوده که در حدود ۶۰۰ میلیون مترمکعب آن از حوضه رودخانه کارون تامین می‌گردد که تامین آب مورد نیاز شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها و روستاها را بر عهده دارد. همچنین نیاز کشاورزی حدود ۷۰٪ کل تقاضای پایین دست را شامل می‌شود.

آب زیرزمینی و آورد رودخانه‌ها که می‌توانند معرف منابع آب در دسترس باشند، در نظر گرفته شده است. مصرف و یا تقاضا که یکی از عوامل کمبود آب می‌باشد، عملاً از طریق پایش ذخیره سد و سفره‌های آب زیرزمینی تعقیب می‌گردد. Westphal et al. (2007) برنامه‌ریزی خشکسالی را بر اساس حجم مخزن مورد بررسی قرار داده و با استفاده از موجودی مخزن، سطوح خشکسالی در منطقه را تعیین و سه خشکسالی رخ داده در منطقه را با استفاده از سطوح خشکسالی به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مقایسه شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در تحقیقات محدودی مورد توجه بوده است و در این خصوص می‌توان به کار Ameziane et al. (2003) اشاره کرد که عملکرد شاخص *SWSI* و *SPI* با دوره ۹ ماهه را به منظور پایش خشکسالی در مراکش بررسی و رفتار مشابهی را از آن دو گزارش کردند. Morid and Paimozd (2007) نیز روش چانگ را با شاخص *EDI* جهت پایش روزانه خشکسالی در استان تهران مقایسه کردند و نشان دادند، روش چانگ حساسیت بیشتری به خشکسالی به خصوص در طبقات شدیدتر دارد. با توجه به این مقدمه، این تحقیق تلاش دارد تا ابتدا یک



شکل ۱- شکل شماتیک منطقه مطالعاتی

منابع آب این حوضه عمدتاً از ارتفاعات بالا دست و زیر حوضه پلاسجان تامین می‌گردد که ایستگاه باران سنجی چهلگرد معرف مناسبی از آن می‌باشد و آمار آن طی سال‌های ۱۳۶۱ الی ۱۳۸۵ تهیه شد. همچنین اطلاعات مربوط به سد زاینده رود شامل ورودی، خروجی و موجودی سد طی دوره ۵۲-

۱۳۵۱ الی ۱۳۷۹-۸۰ تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. یکی از شدیدترین خشکسالی‌های این دوره، خشکسالی سال‌های آبی ۷۸-۱۳۷۷ لغایت ۸۰-۱۳۷۹ بوده که در این مقاله نیز به طور خاص به آن پرداخته شده است. طی این دوره ذخیره سد تا حدود ۳۰٪ بلند مدت آن کاهش یافت و بخش کشاورزی تنها

شدیدترین آن طی دوره آماری است، مینا قرار داده شد و احجام ۳۰ و ۱۰ درصد که به ترتیب برابر با متوسط و حداقل درصد حجم مخزن طی دوره فوق می‌باشند و همچنین حجم ۲ درصد که به عنوان حجم خالی مخزن در نظر گرفته شده است، مورد بررسی قرار گرفت.

برای این روش وضعیت سد در شروع خشکسالی و ماه وقوع آن اهمیت دارد، همچنین با توجه به شرایط منطقه، پایش برای دو سال دوره خشکسالی متناوب برنامه ریزی شد. بدین منظور، آمار ۱۰۰۰ ساله موجود به دوره‌های دو ساله تقسیم شدند (یعنی: ۱۰۰۰-۹۹۹، ...، ۳-۲، ۱-۲) که ۹۹۹ دوره بهره‌برداری حاصل و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای هریک از این دوره‌ها، ۱۲۰ حالت در نظر گرفته شده است که شامل ۱۰ وضعیت موجودی مخزن در ابتدای دوره بهره‌برداری (موجودی ۱۰۰٪، موجودی ۹۰٪، ...، موجودی ۲۰٪، موجودی ۱۰٪) و ۱۲ حالت برای ماه شروع بهره‌برداری می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱)، شرایط مخزن با ۹۹۹ نمونه فوق بررسی و برای هریک از حجم‌های اولیه احتمال شکست مخزن برای احجام بحرانی ۳۰، ۱۰ و ۲ درصد محاسبه شد. در آخر به ازای هر حجم اولیه و ماه مشخص یک احتمال شکست وجود خواهد داشت که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

در شکل (۲) اعداد روی منحنی‌ها، حجم اولیه مخزن را بر حسب درصد نشان می‌دهد. بر اساس شکل فوق می‌توان احتمال شکست مخزن را به ازای هر یک از ماه‌های مختلف سال و حجم اولیه مخزن در آن به دست آورد. به عنوان نمونه در صورتی که در دی ماه حجم اولیه مخزن ۲۰ درصد حجم کل باشد، به ترتیب ۸۵، ۳۰ و ۱۲ درصد احتمال رسیدن به احجام بحرانی مساوی یا کمتر از ۳۰، ۱۰ و ۲ درصد وجود خواهد داشت.

مرحله بعد تعیین سطوح خشکسالی است (شکل ۳) که از ترکیب سه نمودار فوق حاصل می‌گردد. برای به دست آوردن سطوح خشکسالی ابتدا عامل زمان را از نمودارهای فوق حذف کرده و احتمال کاهش حجم اولیه مخزن تا ۳۰ درصد حجم مخزن را در مقابل احتمالات کاهش تا ۱۰ و ۲ درصد حجم مخزن رسم نموده و سپس بر اساس این نمودار سطوح خشکسالی تعیین می‌گردد بدین منظور با استفاده از احتمالات به دست آمده برای شرایط مختلف مخزن، نمودار وضعیت احجام بحرانی مخزن استخراج می‌گردد. در این نمودار محور X نشان دهنده احتمال رسیدن به حجم بحرانی ۳۰ درصد و محور Y نشان دهنده احتمال رسیدن به احجام بحرانی ۱۰ و دو درصد می‌باشد.

برای سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ بیش از ۱/۵ میلیارد ریال خسارت تبعات محیط زیستی این دوره بواسطه تقارن فصل گرما با افزایش حجم زیاد فاضلاب‌ها از دیگر تبعات این دوره بود.

### پایش خشکسالی در سیستم آب زاینده رود

همانگونه که قبلاً اشاره شد دو رویکرد در پایش خشکسالی، یکی با اتکاء به موجودی سد که از معادله بیلان و ورودی‌ها و خروجی‌های آن حاصل می‌گردد و دوم استفاده صرف از آمار بارندگی منطقه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته خواهد شد.

#### پایش با استفاده از موجودی سد

روش منتخب برای این نوع پایش برگرفته از کار Westphal et al. (2007) می‌باشد که در قسمت‌هایی از آن، بخصوص بخش نمونه‌گیری تصادفی تغییراتی اعمال شد. مراحل این روش نسبتاً زیاد است و تلاش شده تا به تفکیک، شرح هر مرحله در زیر ارائه گردد. همچنین نتایج هر بخش برای خشکسالی ۱۳۸۰-۱۳۷۷ که دوره زمانی مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشد، ارائه خواهد شد. به منظور ارزیابی روش‌های مورد بررسی از نتایج این دوره استفاده شده است.

- تعیین سطوح خشکسالی با استفاده از تراز مخزن

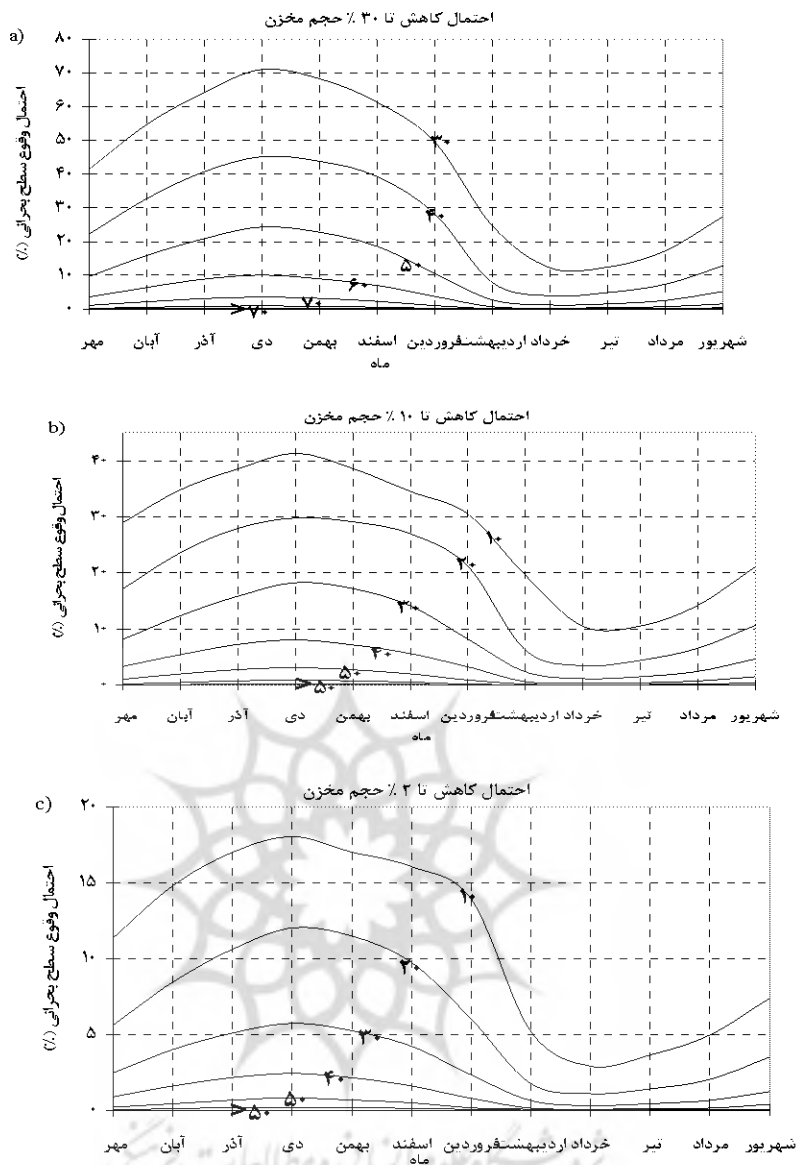
اساس این روش معادله بیلان و رابطه پیوستگی مخزن

است:

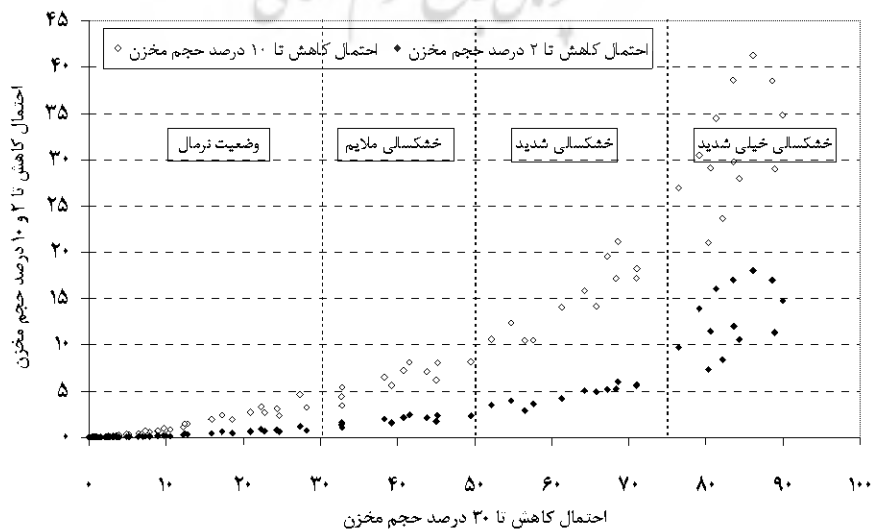
$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - ET_t - SP_t - Re_t \quad (1)$$

که در آن  $S$  حجم مخزن،  $Q$  ورودی طبیعی به مخزن،  $P$  بارش بر روی مخزن،  $ET$  تبخیر از سطح مخزن،  $SP$  سرریز از مخزن،  $Re$  خروجی از مخزن و  $t$  زمان بر حسب ماه می‌باشد. سپس از آن برای برآورد احتمال وقوع کم‌آبی و تعیین احتمال شکست مخزن (احتمال رسیدن به حجم بحرانی) استفاده خواهد شد.

بدین منظور و با استفاده از آمار سد، در ابتدا معادله پیوستگی (۱) برای یک دوره ۲۹ ساله (۱۳۸۰-۱۳۵۱) اجرا شد. برای بخش احتمالاتی آن، با استفاده از روش نمونه‌گیری Bootstrap به مدت ۱۰۰۰ سال برای هر ماه بطور جداگانه، سری متنوعی از داده‌های مورد نیاز رابطه فوق تولید شد و سپس از ترکیب آن‌ها سری زمانی ۱۰۰۰ ساله از پارامترهای رابطه پیوستگی سد زاینده‌رود بدست آمد. در ادامه با استفاده از داده‌های موجود، احتمال شکست (Probability of Failure) مخزن که همان احتمال رسیدن به "حجم بحرانی" مخزن می‌باشد، در ماه‌های مختلف محاسبه شد. در این تحقیق "احجام بحرانی" بر اساس خشکسالی ۱۳۸۰-۱۳۷۷ منطقه که



شکل ۲- احتمال کاهش بحرانی حجم مخزن برای دوره‌های بهره‌برداری ۲ ساله به ازای حجم‌های اولیه مختلف مخزن



شکل ۳- رابطه بین احتمال کاهش تا ۳۰ درصد حجم اولیه با احتمالات کاهش تا ۱۰ و ۲ درصد حجم اولیه

بارندگی‌های طولانی مدت محاسبه می‌شود. در ابتدا توزیع آماری مناسب، بر آمار بلند مدت بارندگی‌ها برازش داده می‌شود که این توزیع معمولاً توزیع گاما در نظر گرفته می‌شود. سپس تابع تجمعی توزیع مناسب در سطوح هم احتمال توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌گردد. مقادیر مثبت  $SPI$  بارندگی بیشتر از بارش متوسط و مقادیر منفی بارندگی کمتر از بارندگی متوسط را نشان می‌دهند. طبقات خشکسالی بر اساس این شاخص در جدول (۱) آمده است. با توجه به اهداف تحقیق  $SPI$  با دوره‌های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای پایش خشکسالی سیستم منابع آب منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت که این دوره‌ها برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی بیشتر توصیه شده‌اند. شکل (۵-ب) تغییرات آن شاخص را طی دوره خشکسالی ۱۳۸۰-۱۳۷۷ نشان می‌دهد.

**شاخص خشکسالی مؤثر (EDI)**

شاخص خشکسالی مؤثر توسط Byun (1996) ارائه گردید. در این شاخص خشکسالی به طور روزانه پایش می‌شود. اصلی‌ترین مفهوم در این شاخص بارش مؤثر ( $EP$ ) روزانه با یک تابع کاهشی وابسته به زمان می‌باشد. به عبارت دیگر  $EP$  هر روز، تابعی از بارندگی همان روز و یک دوره ماقبل خود می‌باشد که در آن بارش‌های اخیر نسبت به بارش‌های قدیمی‌تر وزن بیشتری را دارا می‌باشند. به منظور محاسبه  $EP$  می‌توان از رابطه (۲) استفاده نمود:

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[ \left( \sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right] \quad (2)$$

که در آن  $i$  تداوم فرضی،  $P_m$  بارندگی تا  $m-1$  روز قبل می‌باشد.

محاسبه این شاخص مراحل زیادی دارد که بطور کامل در مرجع Morid et al. (2005) قابل دسترس است. طبقه‌بندی هر یک از شاخص‌ها به صورت زیر می‌باشد.

**جدول ۱ - طبقات خشکسالی برای شاخص های  $SPI$  و  $EDI$**

وضعیت	$SPI$	$EDI$
خیلی خیلی مرطوب	بزرگتر یا مساوی ۲	بزرگتر یا مساوی ۲/۵
خیلی مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۲/۵
کمی مرطوب	۱ تا ۱/۹۹	۰/۷ تا ۱/۵
نزدیک به نرمال	-۰/۹۹ تا -۰/۹۹	-۰/۷ تا -۰/۷
کمی خشک	-۱ تا -۱/۴۹	-۱/۵ تا -۰/۷
خشک شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۲/۵ تا -۱/۵
بسیار زیاد خشک	کوچکتر یا مساوی -۲	کوچکتر یا مساوی -۲/۵

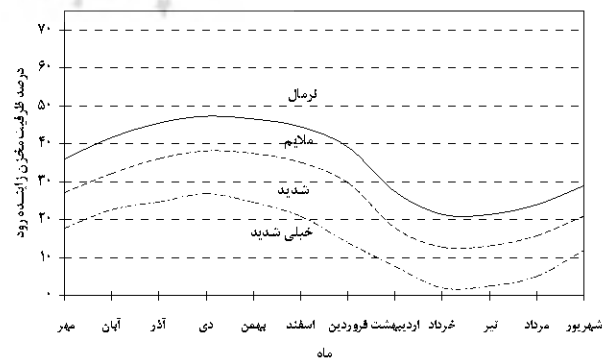
مقادیر روزانه  $EDI$  برای دوره خشکسالی مورد مطالعه در شکل (۵-د) قابل مشاهده است.

تعیین سطوح خشکسالی و نحوه تعریف آن تا حدی تابع شکل قرار گرفتن نقاط روی نمودار و قضاوت طراح می‌باشد (Westphal et al., 2007). شکل نشان می‌دهد که برای هر شرایط اولیهای اگر احتمال رسیدن به حجم بحرانی ۳۰ درصد کاهش حجم مخزن کمتر از ۳۰ درصد باشد، احتمال مربوط به رسیدن به حجم‌های بحرانی ۱۰ درصد کمتر از پنج درصد و احتمال خالی شدن مخزن تقریباً صفر است که این وضعیت "شرایط نرمال" اطلاق شده است. بدین ترتیب برای احتمال رسیدن به حجم ۳۰ درصد بین ۳۰ تا ۵۰ درصد، احتمال رسیدن به شرایط بحرانی ۱۰ درصد کمتر از ۱۰ درصد و احتمال خالی شدن مخزن حدود سه درصد می‌رسد که در اینجا "خشکسالی ملایم" قلمداد شده است. همین تفکر برای تعریف سایر طبقات نیز بکار گرفته شده است که در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

در ادامه با توجه به شکل (۳) و سطوح تعیین شده، حجم مخزن متناظر با هر یک از احتمالات کاهش تا ۳۰، ۱۰ و ۲ درصد را بطور ماهانه محاسبه نموده و سپس شکل (۴) که طبقات خشکسالی منطقه مطالعاتی بر اساس تراز آب در سد است، حاصل می‌گردد. به عبارت دیگر، سیستم پایش خشکسالی منطقه بر اساس موجود سد زاینده رود بدین گونه قابل طراحی می‌باشد. به عنوان نمونه در صورتی که شروع بهره برداری از ماه آذر باشد و ۳۰ درصد حجم مخزن در این ماه پر باشد، سیستم وضعیت "خشکسالی شدید" را اعلام می‌نماید.

**تعیین سطوح خشکسالی با استفاده از شاخص‌های هواشناسی**

در ادامه به تشریح تعیین سطوح خشکسالی با استفاده از متغیرهای هواشناسی پرداخته می‌شود. در این راستا از شاخص‌های  $SPI$  و  $EDI$  استفاده شده است که شرح مختصری از آن‌ها در ادامه ارائه می‌گردد.



**شکل ۴ - طبقات خشکسالی براساس تراز مخزن سد زاینده رود**

**شاخص بارش استاندارد (SPI)**

شاخص بارندگی استاندارد شده توسط Mckee et al. (1993) ارائه شد. این شاخص برای هر منطقه بر اساس ثبت

## نتایج و بحث

در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از پایش خشکسالی با روش‌های مورد اشاره پرداخته می‌شود. ابتدا رفتار آن‌ها مستقلاً ارزیابی شده و سپس مقایسه آن‌ها به انجام خواهد رسید.

## ارزیابی ماهانه روش‌ها

## الف- تراز مخزن

بر اساس نتایج به دست آمده در قسمت پایش با استفاده از موجودی سد و با توجه به حجم اولیه مخزن در هر ماه می‌توان شدت خشکسالی را با توجه به وضعیت مخزن در شروع ماه بهره‌برداری تعیین نمود. شکل (۵-ا) نتایج به دست آمده از روش تراز مخزن را در طول دوره ۱۳۷۸-۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰-۱۳۷۹ نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که از اواخر سال آبی ۷۸-۱۳۷۷، برای سد زاینده‌رود وضعیت "خشکسالی ملایم" و حتی برای مدتی "خشکسالی شدید" اعلام شده است. در سال آبی بعد این وضعیت ادامه پیدا کرده و تنها در یک ماه به واسطه افزایش ورودی‌های سیستم به طور موقت از بند خشکسالی رهایی می‌یابد. همچنین برای ۵ ماه از این سال وضعیت "خشکسالی شدید" اعلام می‌گردد. در سال آخر با ادامه کاهش ورودی‌ها سیستم "خشکسالی شدید" را به مدت شش ماه دنبال می‌کند، اما بارش‌های این دوره و بخصوص ماه آذر، تأثیر خود را در ماه‌های بعدی گذاشته و سد از اواخر سال از وضعیت خشکسالی فاصله می‌گیرد.

نکته قابل توجه تأخیر ذاتی بین بارش و رواناب است که این تأخیر ناشی از ریزش‌هایی در قالب برف و ذوب آن‌ها در ماه‌های بعدی می‌باشد. در پایش خشکسالی با استفاده از این روش می‌توان چنین تأخیرهایی را نیز مد نظر قرار داد. این بدان معناست که افزایش بارندگی‌ها با تأخیر بر حجم مخزن اثر می‌گذارد و از شدت طبقه خشکسالی می‌کاهد. این مهم در حالت عکس آن نیز صادق است یعنی کاهش بارندگی‌ها نیز با تأخیر بر ذخیره سد اثر می‌گذارد. لذا از بعد اعلام زود هنگام خشکسالی روش‌های متکی به بارندگی سریعتر عمل می‌کنند.

## ب- شاخص بارش استاندارد (SPI)

نتایج به دست آمده از روش SPI نیز در طول این دوره، وقوع خشکسالی را در منطقه نشان می‌دهند که این وضعیت در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. مقایسه مقادیر SPI با دوره‌های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه نشان می‌دهد که طی این دوره خشکسالی عمدتاً "خشکسالی ملایم" تا "خشکسالی شدید" بوده است. اما عکس‌العمل آن‌ها تفاوت‌هایی دارد که هر چه دوره طولانی‌تر باشد، نوسانات کمتر و عکس‌العمل‌ها کندتر می‌گردد. این تفاوت در SPI با دوره ۶ و ۱۲ ماهه کاملاً مشهود است. ولی

نقطه نسبتاً مشترک آن‌ها ورود بسیار کم به طبقه "خشکسالی خیلی شدید" بوده است. وضعیت "خشکسالی خیلی شدید" در SPI با دوره ۱۲ ماهه اعلام نشده است و در SPI ۹ ماهه تنها یک بار و در SPI ۶ ماهه، دو بار رخ داده است.

## ج- شاخص خشکسالی موثر (EDI)

سری زمانی بارش‌های روزانه و EDI در شکل (۵-ج) قابل مشاهده است. از نتایج روش EDI چند نکته قابل توجه می‌باشد. اول اینکه این شاخص نسبت به سایر روش‌ها دیرتر وضعیت خشکسالی را اعلام می‌دارد. این نکته به حافظه EP که بارش‌های یک‌سال قبل را در محاسبات دخالت می‌دهد، بر می‌گردد. لذا با توجه به این که دوره محاسباتی آن ۳۶۵ روز است، بارندگی سال آبی قبل نیز در کند کردن عکس‌العمل آن کاملاً قابل مشاهده است. از اواخر سال اول خشکسالی تا اواسط سال سوم وضعیت‌های اعلام شده عمدتاً در طبقه "خشکسالی ملایم" و "وضعیت نرمال" هستند ولی بعد از این دوره شاخص به سمت پایین و بخصوص "خشکسالی شدید" و "خشکسالی خیلی شدید" میل می‌کند. وضعیت خشکسالی خیلی شدید در SPI با دوره‌های ۶ و ۹ ماهه برای مدت کوتاهی اعلام شده است. وضعیت EDI در این مدت خاص از خشکسالی با روش "تراز مخزن" هماهنگی بیشتری دارد.

## ارزیابی فراوانی طبقات خشکسالی در روش‌ها

پس از مقایسه ماه به ماه شاخص‌ها، مقایسه کلی آن‌ها نیز برای دوره خشکسالی اخیر و بر اساس فراوانی نسبی هر یک از چهار وضعیت "نرمال"، "ملایم"، "شدید" و "خیلی شدید" محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است.

ملاحظه می‌گردد که در طبقه "نرمال"، SPI با دوره‌های ۹ و ۱۲ ماهه و از آن طرف EDI و تراز مخزن ارقام نزدیکی را ارائه داده‌اند. در این طبقه، SPI ۶ ماهه بیشترین و EDI کمترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. در طبقه "خشکسالی ملایم"، فراوانی دو روش SPI ۶ ماهه و تراز مخزن با یکدیگر برابر بوده و این دو روش حداقل مقدار را نیز دارا می‌باشند. در شرایط "خشکسالی شدید"، فراوانی هر سه دوره مربوط به روش SPI به یکدیگر نزدیک بوده و EDI نیز حداقل مقدار را به خود اختصاص داده است. قابل ملاحظه است که شاخص SPI "خشکسالی خیلی شدید" را بسیار کم اعلام می‌دارد. در این خصوص رفتار متفاوتی از EDI مشاهده می‌شود که فراوانی آن در "خشکسالی خیلی شدید" کاملاً قابل ملاحظه است. این فراوانی به درصد اعلام شده توسط روش تراز مخزن خیلی نزدیک می‌باشد.

جدول ۲ - درصد اعلام وقوع هر یک از طبقات خشکسالی توسط شاخص‌ها طی دوره خشکسالی (سال‌های آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰-۱۳۷۹)

شاخص / طبقه	<i>SPI12</i>	<i>SPI9</i>	<i>SPI6</i>	<i>EDI</i>	تراز مخزن
نرمال	۲۷/۸	۳۳/۳	۴۱/۷	۲۴/۷	۳۶/۱
ملايم	۳۰/۶	۳۳/۳	۱۹/۴	۴۷/۲	۱۹/۴
شدید	۴۱/۷	۳۰/۶	۳۳/۳	۵/۸	۱۱/۱
خیلی شدید	۰	۲/۸	۵/۶	۲۲/۴	۳۳/۳

### نتیجه گیری

این تحقیق تلاشی بود برای بررسی پایش خشکسالی در سیستم آب زاینده‌رود اصفهان با استفاده از تراز مخزن آن و مقایسه این روش با برخی از شاخص‌های معمول که بر مبنای بارندگی می‌باشند که نتایج زیر از آن قابل ارائه هستند:

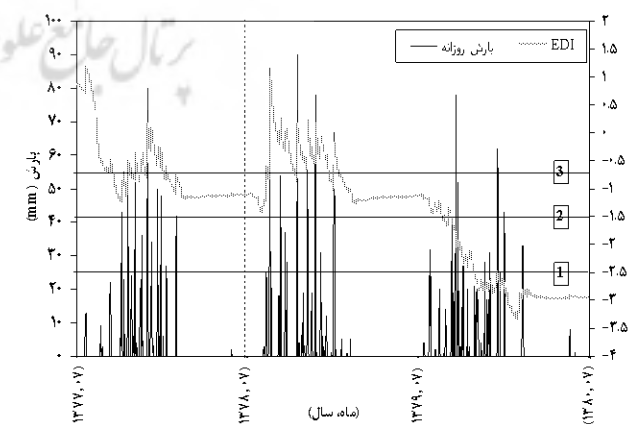
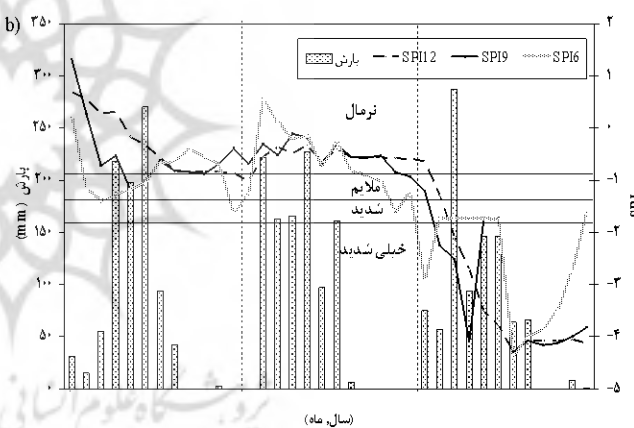
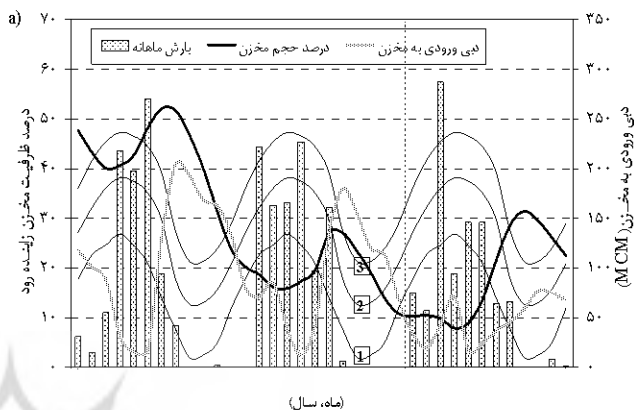
- نتایج نشان داد به دلیل وجود تأخیر ذاتی بین بارش و رواناب، اعلام شروع خشکسالی با روش تراز مخزن با کندی صورت می‌گیرد. این در حالیست که *SPI* عکس العمل سریعتری به اعلام وضعیت خشکسالی از خود نشان می‌دهد. از طرفی شاخص *EDI* بعد از ورود به شرایط خشکسالی دیرتر از وضع موجود خارج می‌گردد که علت آن حافظه نهفته در متغیر بارندگی مؤثر (*EP*) این شاخص می‌باشد.

- مقایسه شاخص *SPI* با سه دوره زمانی ۶، ۹ و ۱۲ ماهه نشان می‌دهد که برای استفاده از *SPI* در اعلام زودهنگام خشکسالی *SPI* ۶ ماهه کافی به نظر می‌رسد و از سایر دوره‌های *SPI* اطلاعات خاصی قابل دریافت نمی‌باشد.

- نتایج تحقیق تأکید بر استفاده همزمان از چند شاخص برای پایش خشکسالی یک سیستم منابع آبی دارد. همچنین نتایج نشان داد که رفتار هر یک از شاخص‌ها برای اعلام شروع و خاتمه خشکسالی و همچنین در طول دوره متفاوت می‌باشد. برای منطقه مطالعاتی این تحقیق، *SPI* ۶ ماهه و *EDI* به ترتیب برای هشدار زودهنگام خشکسالی و اعلام خاتمه آن قابل توصیه می‌باشد و در عین حال روش تراز مخزن برای پایش در حین خشکسالی و اعمال تصمیمات مدیریتی قابل توصیه می‌باشد.

- مقایسه کلی نتایج نیز نشان داد که در اعلام وضعیت "خشکسالی شدید" و "خشکسالی خیلی شدید" دو روش *EDI* و تراز مخزن هماهنگی بیشتری با یکدیگر دارند.

- از برتری‌های روش تراز مخزن، دخالت رابطه پیوستگی در آن است که به عبارتی میزان مصرف و یا تقاضا را نیز در نظر می‌گیرد. این عامل سبب می‌شود تا عوامل غیر طبیعی



محدوده بین خطوط ۱ و ۲ شرایط "خشکسالی شدید"، محدوده خط ۲ و ۳ شرایط "خشکسالی ملايم"،

بالای خط ۳ "شرایط نرمال" و زیر خط ۱ شرایط "خشکسالی خیلی شدید" را نشان می‌دهند.

شکل ۵ - تغییرات طبقات خشکسالی بر اساس روش‌های مختلف برای

خشکسالی سال‌های آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰-۱۳۷۹

$Q$ = ورودی طبیعی به مخزن  
 $P$ = بارش بر روی مخزن  
 $ET$ = تبخیر از سطح مخزن  
 $SP$ = سرریز از مخزن  
 $Re$ = خروجی از مخزن  
 $t$ = زمان بر حسب ماه  
 $iI$ = تداوم فرضی  
 $P_m$  = بارندگی تا  $m - 1$  روز قبل

نظیر مصرف بی‌رویه و یا کاهش مصرف به واسطه اعمال تصمیمات مدیریتی در پایش دخالت داده شود.

### فهرست علائم:

$EDI$ = Effective Drought Index  
 $SPI$ = Standardized Precipitation Index  
 $AWRI$ = Available Water Resources Index  
 $SWSI$ = Surface Water Supply Index  
 $EP$ = Effective Precipitation  
 $S$ = حجم مخزن

### REFERENCES

- Araghinejad, Sh. (2005). *Water Resources Mmanagement Based on Climate Evaluation*. PhD dissertation, Amir Kabir University, Iran. (In Farsi)
- Ameziane, T., Ouassou, A., Ziyad, A., and Belghihti, M. (2003). *Drought Risk Analysis and Impacts Evaluation in Morocco*. Ministry of Agriculture and Rural Development. (MARD).
- Byun, H. R., and Wilhite, D.A. (1999). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756.
- Chang, T. J. (1989). Characteristic of Stream Flow Drought, New Direction for Surface Water Modeling. *IAHS Pub.* 181, 333-341.
- Chang, T. J. (1990). Effective of Drought on Stream Flow Characteristics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 116, 332-341.
- Coughlan, M. J. (2001). *Managing Drought in Australia*. International workshop on drought management, may 2001, Tarbiat Modares University.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., and Paulson. E. G. (1980). On the Definition of Drought. *Journal of Water Resources Research*. 16, 294-302.
- Edwars, D. C. and Mckee T. B. (1997). *Characteristics of 20th Century Drought in the university, Colorado*.
- Efron, B., and Tibshirani, R.J. (1993). *An introduction to bootstrap*, Champman and Hall, New York, Tokyo.
- Gupta, V. K., and Duckstein, L. (1975). A Stochastic Analysis of Extreme Droughts. *Journal of Water Resources Research*. 11, 221-228
- Kim, D. W., Byun, H. R., and Choi, K. S. (2009). Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, 378 (1-2), 1-12.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Preprints 8th Conference on *Applied Climatology*, 179-184.
- Morid, S., Moghadasi, M., Paimozd, Sh., and Ghaemi, H. (2005). *Design of Tehran Drought Monitoring System*. Ministry of Energy. (In Farsi)
- Morid, S. and Paimozd, Sh. (2007). Comparison of Hydrological and Meteorological Methods in Daily Drought Monitoring: A Case Study: 1999-2001 drought in Tehran Province. *Journal of Agriculture and Natural Resources*, 42, 325-334 (In Farsi)
- Steinmann, A., and Cavalcanti, L. (2006). Developing Multiple Indicators and Triggers for Drought Plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 132 (3), 164-173.
- Westphal; K. S., Laramie, R. L., Borgatti, D., and Stoops, R. (2007). Drought Management Planning with Economic and Risk Factors. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 133 (4), 351-362.
- Yevjevich, V. M. (1967). *An Objective Approach to Definition and Investigation of Continental Hydrologic Drought*. Hydrologic Paper 23, Colorado State University, Colins, Colorado.