

پیش بینی سیل با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) در مقیاس روزانه

علیرضا شکوهی^۱، نازگل حسینی^۲ و افشین بختیاری^۳

^۱ استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، مؤسسه آموزش عالی صائب، ابهر

(دریافت: ۹۵/۷/۱ پذیرش: ۹۶/۲/۳۱ نشر آن‌لاین: ۹۶/۳/۱)

چکیده

یافتن روشی که بتواند در عین سادگی از دقت کافی در پیش‌بینی سیلاب برخوردار باشد از چالش‌های همیشگی محققین بخصوص در کشورهای در حال توسعه بوده است. در این تحقیق برای اولین بار به بررسی توانایی روش شناخته شده شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، که استفاده از مقیاس‌های بلند مدت آن برای مطالعات خشکسالی مرسوم است، برای پیش‌بینی سیل در مقیاس روزانه پرداخته شده است. برای این تحقیق از دو حوضه مطالعاتی، کسلیان در منطقه‌ای مرطوب با رژیم بارانی و کهلیک دره‌سی در حوضه آبریز صوفی‌چای در منطقه‌ای نیمه خشک با رژیم برفی- بارانی استفاده شد. نتایج حاصل از به کار بردن SPI در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ روزه برای پایش و پیش‌بینی سیل نشان داد که این شاخص در مقیاس‌های مختلف روزانه در پیش‌بینی و پایش سیل در هر دو حوضه آبریز کسلیان و کهلیک دره‌سی موفق بوده است. با استفاده از شاخص‌های احتمال تشخیص (POD)، هشدار غلط (FAR) و موقعیت بحرانی (CSR) بهترین نتیجه برای حوضه کسلیان با SPI6 و برای حوضه کهلیک دره‌سی برای زمان‌های بارانی با SPI3 و برای دوره‌های برفی با SPI9 بلندمدت‌تر از آن به دست آمد.

کلید واژه‌ها: پیش‌بینی سیل، SPI، مقیاس روزانه، مناطق مرطوب، رژیم برفی بارانی.

۱- مقدمه

میزان بارش در واقع مهم‌ترین متغیری است که تغییرات آن به طور مستقیم در رطوبت خاک، جریان‌های سطحی، مخازن زیرزمینی و ... منعکس شده و بنابراین اولین برداری است که می‌تواند در مطالعه هر حالتی از ترسالی و خشکسالی به کار گرفته شود. شاخص بارش استاندارد (SPI) که توسط McKee و همکاران در سال ۱۹۹۳ ابداع شد، در ابتدا برای پایش خشکسالی توسعه داده شد اما در تحقیقات بعد پیشنهاد شد که از این شاخص به عنوان نمایه‌ای از شرایط اشباع خاک برای پیش‌بینی سیل استفاده گردد (Komuscu, ۱۹۹۹). در این راستا تحقیقات معدودی انجام شده است که اهم آنها عبارتند از Seiler و همکاران (۲۰۰۲)، با استفاده از SPI ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه به بررسی رخداد‌های سیل در قسمت جنوبی استان کوردبا در آرژانتین پرداختند. نتایج مطالعات آنان نشان داد که SPI به خوبی قادر به تجزیه و تحلیل وقایع سیل است و استفاده از این شاخص در مقایسه با شاخص بارش آنومالی

در قرن بیست و یکم علی‌رغم دستاوردهای چشم‌گیر در علوم مختلف، مردم در سراسر دنیا هنوز از خسارت‌های ناشی از سیلاب رنج می‌برند. در این میان ایران به ویژه به دلیل پراکنش مکانی و زمانی نامناسب بارش‌ها، جزو آن دسته از کشورهایی است که سالانه متحمل خسارت‌های فراوانی می‌گردد. یکی از بهترین راه‌های مبارزه با این نوع خسارت‌ها استفاده از روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب یعنی توسعه سیستم‌های پیش‌بینی سیلاب می‌باشد که متأسفانه و بخصوص در کشورهای در حال توسعه حجم وسیع داده‌های مورد نیاز این سیستم‌ها، پیچیدگی آنها و هزینه مورد نیاز برای راه اندازی شبکه پشتیبان آنها مانعی بزرگ در سر راه به کارگیری آن می‌باشد. حل این مشکل و پیدا کردن راهی برای ساده کردن سیستم هشدار سیل یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر می‌باشد.

1. Standardized Precipitation Index

* نویسنده مسئول؛ ۰۲۸-۳۳۹۰۱۲۷۳

۳۵° ۵۸'۳۰ تا ۳۶° ۷'۱۵ واقع شده است. این حوضه دارای ۶ ایستگاه بارانسنج معمولی (روزانه) به نام‌های سنگده، درزیکلا، اوریملک، سوت کلا، کله و ولیک‌چال و ۶ بارانسنج ذخیره‌ای به نام‌های کشته، خاکستر، کته‌اوجا، پناکار، خجیردشت، والرو و گتی - نو است (شریفی، ۱۳۷۵). ایستگاه هیدرومتری موجود بر رودخانه کسلیان به نام ایستگاه ولیک‌بن در نزدیکی روستایی به همان نام که در محل خروجی حوضه، واقع شده است و به صورت یک پارشال فلوم بتنی با دهانه‌ای به عرض ۴ متر ساخته شده است و مجهز به اشل، پل اندازه‌گیری و لیمنوگراف می‌باشد و در واقع یک ایستگاه آب‌سنجی درجه یک محسوب می‌گردد. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در منطقه مورد مطالعه در شکل (۱-الف) نشان داده شده است.

۲-۱-۲- حوضه آبریز کهلیک دره سی

در استان آذربایجان شرقی در پشت سد علویان رودخانه‌ای به نام اسپیران چای به رودخانه صوفی چای می‌پیوندد. رودخانه صوفی چای از دامنه‌های جنوب غربی کوه سهند و از آب شدن برف‌های دائمی و به ویژه از دره بامیدژ سرچشمه می‌گیرد. مساحت حوضه آبریز رودخانه کهلیک دره‌سی ۴۲ کیلومتر مربع بوده و دارای اقلیم نیمه خشک و سرد و رژیم آن برفی-بارانی می‌باشد. قبل از محل تلاقی این رودخانه با رودخانه صوفی چای ایستگاه هیدرومتری به نام همین رودخانه وجود دارد که آمار آن از سال ۱۳۴۹-۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲-۱۳۹۳ در اختیار می‌باشد (پاراحمدی و نیکخو، ۱۳۸۹). این ایستگاه هیدرومتری یک ایستگاه درجه ۴ بوده و در مختصات ۳۷،۲۸ طول شرقی و ۴۶،۱۶ درجه عرض شمالی در کد ارتفاعی ۱۶۵۰ متر قرار دارد. شکل (۱-ب) موقعیت حوضه آبریز و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی را نشان می‌دهد. برای انجام مطالعه لازم است که در دوره آماری در دسترس از وقایع هم‌زمان بارش و سیل استفاده به عمل آید. با توجه به کم شدن تعداد داده‌های مورد اعتماد از این نظر در سالیان دور گذشته، برای تحلیل وقایع در هر دو حوضه مطالعاتی از داده‌های مربوط به سال-های ۱۳۸۱-۱۳۹۲ استفاده شده است.

۲-۲- شاخص SPI برای مقیاس‌های زمانی مختلف

محاسبه SPI با برازش یک منحنی چگالی احتمال، که معمولاً گامای دو پارامتری و بعضاً لوگ پیرسون تیپ III می‌باشد، بر مجموع بارش با دوره‌های زمانی مختلف انجام می‌شود (Angledis و همکاران، ۲۰۱۲). معادله گامای دو پارامتری مورد استفاده توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳ و ۱۹۹۵) به صورت زیر می‌باشد:

$$g(x) = \frac{1}{\beta \alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad X > 0 \quad (1)$$

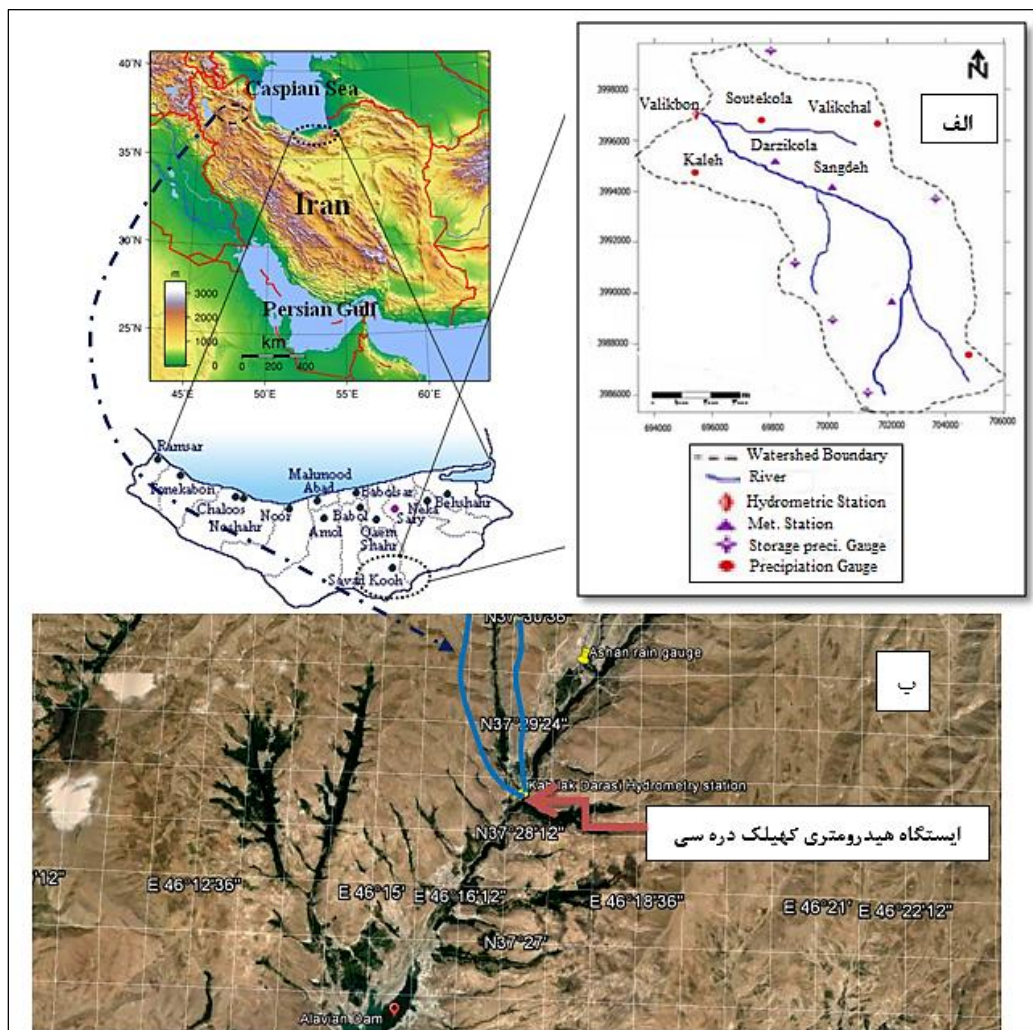
توجیه مناسب‌تری دارد. Du و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی استفاده از SPI ۲، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه به منظور بررسی شرایط تر و خشک در استان هونان چین پرداختند. نتایج آنان نشان داد که در تشخیص شرایط تر و خشک استفاده از SPI بلند مدت‌تر از شش ماه مناسب‌تر است. همچنین نتایج نشان داد که SPI دو ماهه به دلیل بهتر منعکس کردن مقدار رطوبت سطحی خاک، در نظارت بر سیل مناسب‌ترین مقیاس زمانی از میان مقیاس‌های مورد مطالعه می‌باشد. Chen و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای به بررسی اثر گرمایش جهانی بر الگوهای سیل یا خشکسالی در اواخر قرن ۲۱م پرداختند. آنها در مطالعه خود از شاخص SPI که در پایش مشخصات سیل یا خشکسالی (شدت، مدت و محدوده تأثیر) در چین عملکرد خوبی داشته استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در آینده محدوده تأثیر خشکسالی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد، در عوض تعداد و شدت وقوع سیلاب‌ها بیشتر و محدوده تأثیر آنها نیز وسیع‌تر خواهد بود. همان طور که ملاحظه گردید در رابطه با پیش‌بینی و پایش سیل با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده در مقیاس‌های مختلف روزانه مطالعه کافی انجام نشده است. با توجه به مقیاس زمانی مورد استفاده در سیستم‌های پایش و هشدار سیل، استفاده از SPI در مقیاس ماهانه نمی‌تواند کارایی چندانی داشته باشد. براین اساس در تحقیق حاضر از این شاخص در مقیاس روزانه استفاده شده است. برای نمایش عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای پایش و پیش‌بینی سیل از اطلاعات بارش و همچنین سیلاب‌های رخ داده در دو حوضه مختلف؛ یکی در منطقه مرطوب و دیگری نیمه خشک و در عین حال دارای رژیم برفی-بارانی استفاده به عمل آمده است. در بخش‌های بعد به ترتیب شاهد معرفی مختصر روش SPI، موقعیت، وضعیت اقلیمی، بارش و سیلاب‌های حوضه‌های مورد مطالعه، معرفی شاخص‌های تعیین کارایی SPI در پیش‌بینی سیلاب و در نهایت نتایج حاصله خواهیم بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

۲-۱-۱- حوضه آبریز کسلیان

حوضه آبریز کسلیان با مساحتی در حدود ۶۷/۵ کیلومتر مربع دومین حوضه آبریز معرف کشور می‌باشد. این حوضه در بین حوضه‌های اصلی شش‌گانه ایران در داخل حوضه آبریز دریای مازندران قرار گرفته است (شکل (۱)). آب و هوای این حوضه نیز با توجه به ضریب اقلیم دوماترین در گروه بسیار مرطوب و با توجه به ضریب اقلیمی آمبرژ در گروه اقلیم ارتفاعات قرار گرفت. حوضه کسلیان از مناطق سنگده، اوریملک و سوت کلا سرچشمه گرفته و بین طول شرقی ۵۳° ۸'۴۲ تا ۵۳° ۱۵'۴۲ و عرض شمالی



شکل ۱- موقعیت الف) حوزه آبریز کسلیلیان ب) حوزه آبریز کهیلاک دره سی

بیشتر از میانه و مقادیر منفی معرف بارش کمتر از میانه می باشد (شکوهی، ۱۳۹۱).

جدول ۱- طبقه بندی خشکسالی و ترسالی با استفاده از شاخص SPI

مقدار SPI	طبقه خشکسالی و ترسالی	احتمال (%)
$SPI \geq +2.00$	ترسالی بسیار شدید	۲/۳
$1.50 \leq SPI \leq 1.99$	ترسالی شدید	۴/۴
$1.00 \leq SPI \leq 1.49$	ترسالی متوسط	۹/۲
$0.00 \leq SPI \leq 0.99$	ترسالی خفیف	۳۴/۱

جهت محاسبه شاخص SPI از داده های بارندگی روزانه ۵ ایستگاه واقع در حوزه کسلیلیان در استان مازندران و همچنین ایستگاه آشان آذربایجان شرقی استفاده شده و محاسبات، با کدنویسی در محیط MATLAB انجام گردید.

که در آن α و β به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس و x مقدار بارش بوده و همچنین $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

تابع گاما با استفاده از تبدیلاتی که نمونه ای از آن تبدیل آبرامویتز استگان می باشد به توزیع نرمال استاندارد تبدیل می گردد (Hong و همکاران، ۲۰۰۴). با استفاده از تبدیل یاد شده مقدار SPI به عنوان یک متغیر نرمال شده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$SPI = Z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (3)$$

که در آن μ و σ به ترتیب میانگین بارندگی و انحراف از معیار جامعه می باشند.

اکنون با داشتن مقدار SPI از معادله (۳) می توان وضعیت ترسالی را از جدول (۱) برآورد نمود. مقادیر مثبت SPI معرف بارش

۲-۳- شاخص‌های معرف عملکرد SPI

به منظور مقایسه کمی برترین مقیاس محاسبه SPI در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه از سه شاخص احتمال تشخیص^۱ (POD)، نسبت هشداردهی اشتباه^۲ (FAR) و شاخص وضعیت بحرانی^۳ (CSI) استفاده شده است که در روابط (۴) تا (۶) ملاحظه می‌گردد:

$$POD = \frac{H}{H+M} \quad (4)$$

$$FAR = \frac{F}{H+F} \quad (5)$$

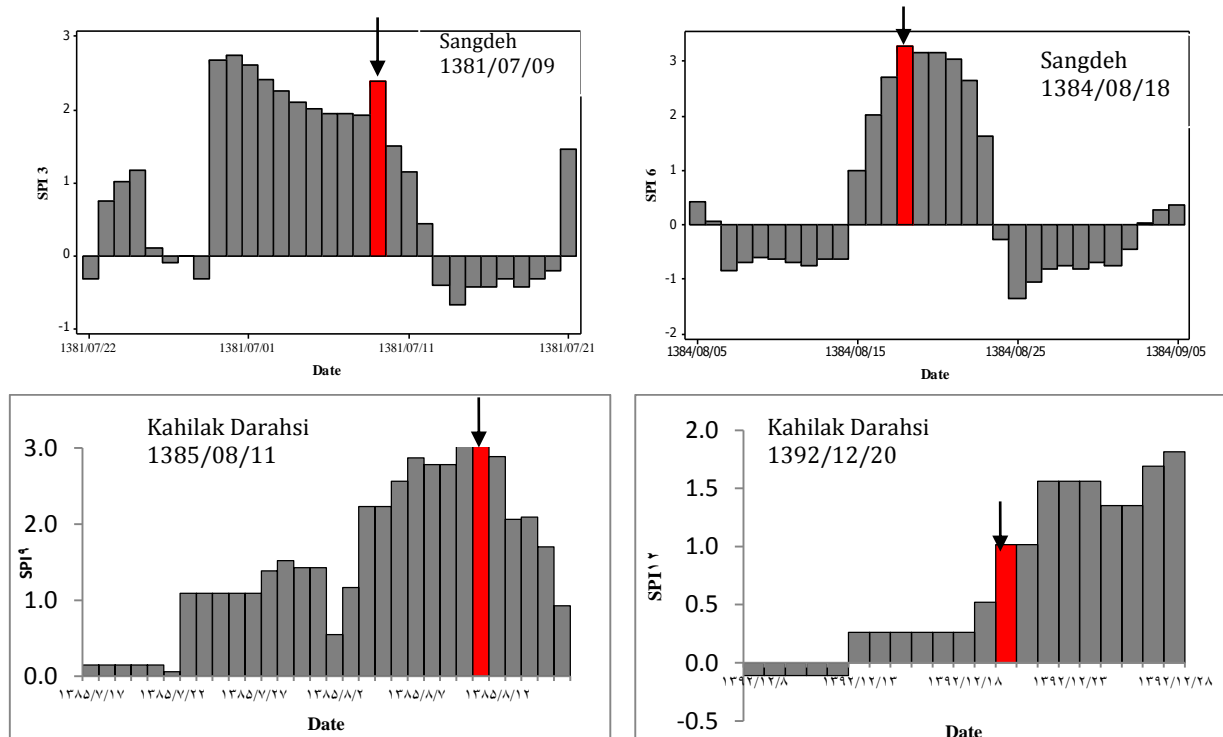
$$CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (6)$$

در روابط فوق H ، تعداد مشاهدات دوره مرطوب، M تعداد مشاهدات دوره مرطوب از دست رفته (پیش‌بینی نشده) و F تعداد مشاهدات مرطوب پیش‌بینی شده اما مشاهده نشده است. طبق تعریف، POD نشان‌دهنده فراوانی پیش‌بینی‌های درستی است که صورت گرفته، FAR درصد خطای پیش‌بینی برای سیلاب‌هایی است که اشتباهاً پیش‌بینی شده اند و CSI ترکیب تفاوت جنبه-های POD و FAR است و مهارت‌های تشخیص و پیش‌بینی مدل مورد استفاده را توصیف می‌کند (Hao و همکاران، ۲۰۱۴). در مورد POD و CSI هر چه مقدار این دو شاخص به یک نزدیک‌تر

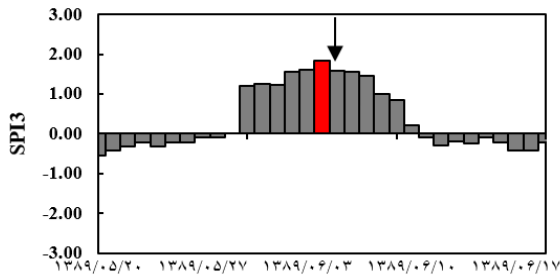
باشند وضعیت پیش‌بینی بهتر ولی در مورد FAR، هر چه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده خطای کمتر در پیش‌بینی خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

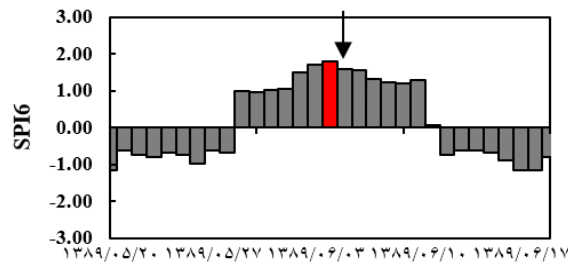
به منظور بررسی پتانسیل شاخص SPI در پایش و پیش‌بینی رخداد سیلاب، ابتدا شاخص بارش استاندارد شده برای مقیاس‌های زمانی ۳ تا ۱۲ روزه برای هر ۵ ایستگاه واقع در حوضه آبریز کسلیان یعنی ایستگاه‌های سنگده، درزیکلا، ولیک‌چال، سوت‌کلا و کله و همین‌طور ایستگاه‌های آن‌ها در حوضه آبریز کهلیک دره‌سی محاسبه گردید و سپس با زمان رخداد دبی‌های حدی رودخانه‌های مورد نظر مقایسه گردید. از آنجایی که تعداد وقوع سیل در دوره مورد مطالعه (از سال ۱۳۸۱ تا سال ۱۳۹۲) متجاوز از چهل مورد بود و نمایش SPI‌های مختلف برای همه ایستگاه مقاله را طولی می‌نماید لذا فقط ۴ سیل و آن هم برای ایستگاه سنگده واقع در مرکز ثقل حوضه آبریز کسلیان و ایستگاه‌های آن‌ها در شکل (۲) نشان‌ داده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد هر چه مقیاس زمانی SPI طولانی‌تر باشد، داده‌های بارش روزانه سهم کمتری در مقدار محاسبه شده SPI خواهند داشت.



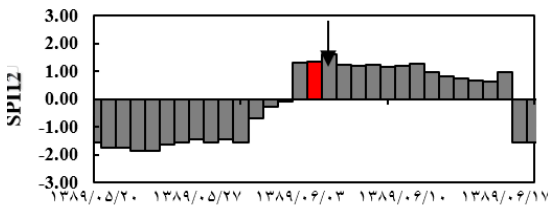
شکل ۲- نمایش تغییرات مقادیر SPI روزانه با تداوم‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه (پیکانی که در شکل ملاحظه می‌گردد معرف تاریخ رخداد سیلاب می‌باشد).



(الف)



(ب)



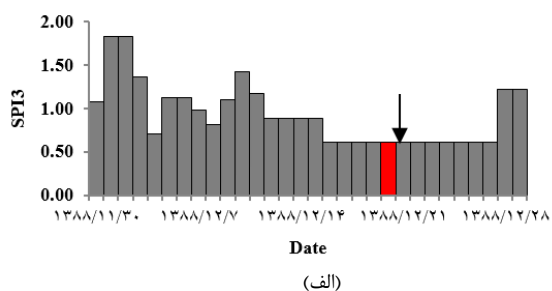
(ج)

شکل ۳- مقادیر SPI محاسبه شده در ایستگاه سنگده برای دوره‌های: الف) ۳ روزه (SPI₃)، ب) ۶ روزه (SPI₆)، ج) ۱۲ روزه (SPI₁₂) (پیکان‌های روی شکل معرف رخداد سیل در مورخه ۱۳۸۹/۰۶/۰۴ می‌باشند)

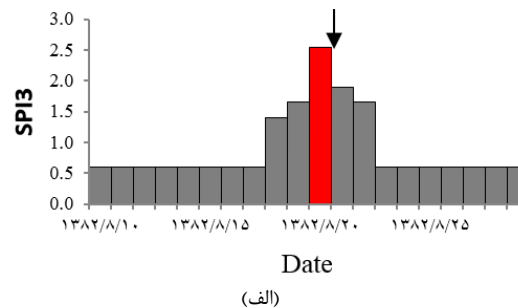
سیل انتخاب شده از مجموعه چهار سیلی است که در دوره مطالعاتی پس از بارش برف رخ داده است. همان طوری که ملاحظه می‌گردد کلیه دوره‌های زمانی SPI از حدود نزدیک به ۲۰ روز پیش نسبت به وقوع سیلاب مزبور هشدار داده‌اند ولی فقط این SPI₁₂ است که در چند روز قبل از وقوع سیلاب بالاتر از محدوده نرمال قرار دارد و بقیه SPIها در هنگام بروز سیلاب هشدار اعلام نمی‌نمایند. علت این که مقیاس ۱۲ روزه توانسته است به درستی سیل را تشخیص دهد این است که وقتی بارش اتفاق می‌افتد SPI در مورد سیل پیش‌بینی انجام می‌دهد و وقتی این بارش به صورت برف باشد، سیل به علت تأخیر در ذوب برف دیرتر اتفاق می‌فتد و بدین لحاظ مقیاس زمانی SPI هر چه بزرگ‌تر باشد بهتر خواهد توانست پدیده وقوع سیل را نشان دهد. همین برتری دوره‌های زمانی طولانی‌تر SPI یعنی مقیاس‌های زمانی ۹ و ۱۲ روزه در سه واقعه دیگر هم دیده شد.

بنابراین SPI در مقیاس زمانی کوتاه‌تر بارندگی نزدیک دوره را بهتر منعکس می‌کند. در مقیاس‌های کوتاه مدت یعنی ۳ روزه، مقدار SPI نوسانات حول صفر زیاد است و دوره تر با تداوم زیاد وجود ندارد. با افزایش مقیاس‌های زمانی، یعنی ۶، ۹ و ۱۲ روزه مقدار SPI نوسانات کمتر و در عین حال تداوم بیشتری پیدا می‌نماید، چنان که میانگین تداوم دوره تر برای SPI با مقیاس ۳ روزه، ۶ روزه و ۱۲ روزه در ایستگاه سنگده به ترتیب ۴/۱ و ۵/۲ و ۵/۹۵ روز به دست آمده است.

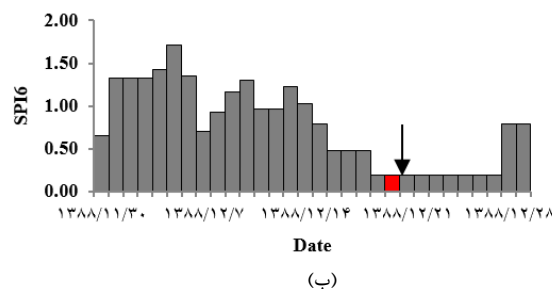
از میان سیل‌های اتفاق افتاده در دوره مورد مطالعه در کسلیان، سیل رخ داده در تاریخ ۱۳۸۹/۶/۴ بزرگترین سیل حوضه به‌شمار می‌رود. روند تغییرات SPI در این تاریخ در شکل (۳) نشان داده شده است. این سیل با دبی ۱۲/۱ متر مکعب بر ثانیه، بزرگترین مقدار دبی را طی دوره مورد مطالعه داشته و نیز دارای تداوم ۶ روز می‌باشد. لازم به ذکر است که اگر همان طوری که ملاحظه می‌شود که SPI محاسبه شده در هر سه مقیاس زمانی، ۳ روزه، ۶ روزه و ۱۲ روزه یعنی SPI₃، SPI₆ و SPI₁₂ به خوبی قادر به پیش‌بینی سیل می‌باشند. همان طور که گفته شد هرچه مقیاس زمانی محاسبه SPI طولانی‌تر می‌شود، دوره مرطوب نشان داده شده هم تداوم بیشتری دارد. مثلاً تعداد روزهای دوره مرطوب در SPI₃ برابر ۱۲ روز، در SPI₆ این دوره برابر ۱۴ روز و در SPI₁₂ تداوم دوره مرطوب برابر ۱۵ روز می‌باشد. بزرگ‌ترین مقدار SPI مربوط به SPI₃ است. زیرا همان‌طور که انتظار می‌رود در محاسبه SPI با مقیاس زمانی کوتاه مدت، بارش هر روز تأثیر بیشتری بر SPI محاسبه شده دارد و از اثرات متوسط‌گیری کم می‌شود (Du, و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین ملاحظه می‌شود که با بزرگ‌تر شدن مقیاس SPI، این شاخص پاسخ آهسته‌تری به وقوع بارش نشان می‌دهد. در مورد حوضه کهیلک دره‌سی به عنوان یک حوضه نیمه خشک که ریزش برف در آن در تأمین جریان رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، نتایج کار در عین نمایش توانمندی روش SPI در پیش‌بینی سیل با آنچه که در حوضه کسلیان دیده شد اندکی متفاوت است. در دوره‌های بارش بدون برف تقریباً همه مقیاس‌های زمانی SPI موفق به شناسایی احتمال وقوع سیل گشته‌اند ولی بیشترین موفقیت از آن SPI₃ می‌باشد. شکل (۴)، SPI مربوط به سیل مورخ ۱۳۸۲/۸/۲۰ و ۸۵/۸/۱۱ را نشان می‌دهد. در این شکل بخش الف) و ب) نشان می‌دهند فقط SPI₃ بوده که توانسته است از دو روز قبل وقوع سیل را پیش‌بینی نماید، حال آن که در بخش ج) دیده می‌شود که SPI₁₂ نیز توانسته از ۹ روز قبل وقوع سیل را پیشگویی نماید. در مورد سیلاب‌های ناشی از ذوب برف فقط SPIهای بلند مدت‌تر از ۶ روز چنین موفقیتی را به طور نسبی تجربه می‌نمایند. SPIهای روزانه محاسبه شده برای سیلی که در تاریخ ۸۸/۱۲/۲۰ اتفاق افتاده است در شکل (۵) نشان داده شده است.



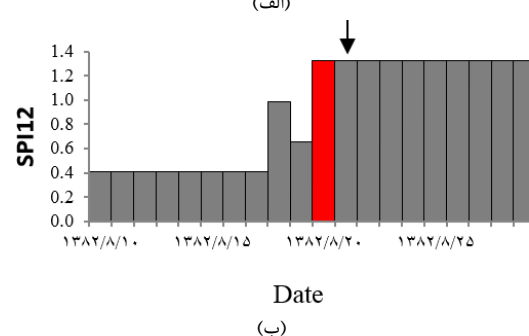
(الف)



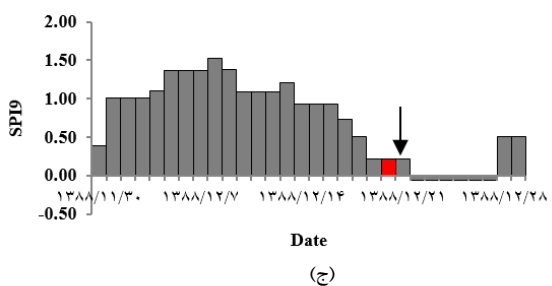
(الف)



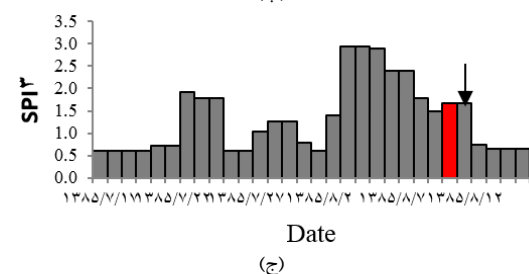
(ب)



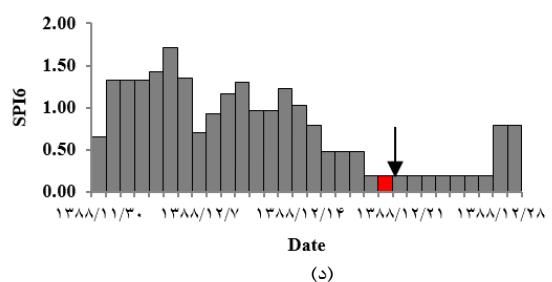
(ب)



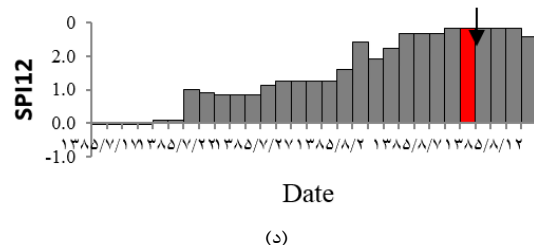
(ج)



(ج)



(د)



(د)

شکل ۵- SPIهای ۳ تا ۱۲ روزه برای سیلاب مورخ ۸۸/۱۲/۲۰ (حوضه کهلیک دره‌سی)

شکل ۴- SPIهای ۳ و ۱۲ ماهه حوضه کهلیک دره‌سی برای سیلاب‌های: (الف و ب) مورخ ۸۲/۸/۲۰، (ج و د) مورخ ۸۵/۸/۱۱

یعنی در نقاط دورتر (ایستگاه‌های سنگده و درزیکلا) تعداد روزها تا وقوع سیل بیشتر و در نقاط نزدیک خروجی (ایستگاه‌های کله و سوت کلا) تعداد روزها تا وقوع سیل کمتر است. البته استنتاج نهایی در این خصوص نیازمند بررسی و تحقیقاتی بیشتر به منظور دیدن اثر عواملی همچون شکل و مساحت حوضه و همچنین الگوی بارش بر مدت زمان انتظار تا وقوع سیلاب در نقاط مختلف حوضه می‌باشد. با بررسی زمان وقوع سیلاب‌های منطقه و مقایسه با میزان SPI در آن تاریخ‌ها ملاحظه گردید که در حوضه کسلیان از تعداد ۴۰ سیل رخ داده در طول دوره مورد مطالعه در بهترین حالت تعداد ۲۷ سیل به درستی توسط این شاخص پیش-بینی گردید.

به منظور بررسی بیشتر توانایی SPI در پیش‌هشدار رخداد سیل، تعداد روزهایی که SPI در همه مقیاس‌های زمانی روزانه در محدوده مرطوب قرار داشته تا پس از آن سیل اتفاق افتد، محاسبه گردید. نتایج محاسبات برای حوضه کسلیان در جدول (۲) آورده شده است. بررسی‌ها حاکی از آن است که تعداد روزهای مانده به رخداد سیل در دو مقیاس ۳ و ۶ روزه به یکدیگر نزدیک بوده و عملکرد بهتری نسبت به مقیاس ۱۲ روزه دارد. از طرفی از پنج ایستگاه مورد مطالعه واقع در حوضه، در سه ایستگاه SPI6 موفق‌تر از SPI3 بوده است.

از جمله نکاتی که از جدول شماره (۲) می‌توان در راستای درستی محاسبات انجام شده برداشت کرد این است که هر چه به سمت خروجی حوضه نزدیک‌تر می‌شویم، تعداد روزهای قابل پیش‌بینی تا وقوع سیل کاهش پیدا می‌کند.

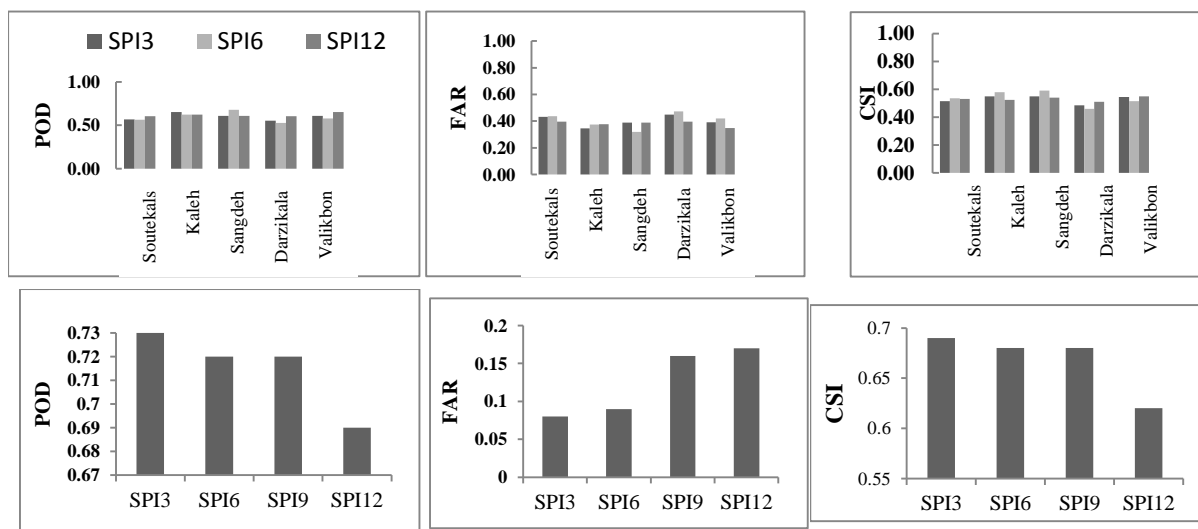
از عملکرد مقیاس‌های مختلف SPI در ایستگاه‌های متفاوت را نشان می‌دهد حاکی از برتری مقیاس ۶ روزه در ایستگاه سنگده است، البته باید توجه شود که دامنه تغییرات CSI برای ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۰/۵ تا ۰/۶ است که رقم قابل قبولی می‌باشد.

یکی از مسائل دیگری که می‌تواند در بررسی توانایی SPI برای پایش سیل مورد توجه قرار گیرد تغییرات احتمالی شاخص‌های فوق‌الذکر بر حسب ماه رخداد سیل و بارش متناظر آن باشد. با توجه به این که از دو حوضه مورد مطالعه، حوضه کسلیان تقریباً در همه ماه‌های سال سیلاب را تجربه نموده است بحث در خصوص تغییرات ماهیانه این شاخص را در این حوضه دنبال نموده و برای رعایت حجم مقاله تنها به ارائه نتایج حاصله در ایستگاه سنگده خواهیم پرداخت. شکل (۷) نتایج حاصله برای سه شاخص POD، FAR و CSI را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، POD تقریباً در اکثر ماه‌ها در SPI6 بالاتر از ۲ مقیاس دیگر یعنی SPI3 و SPI12 است. به طوری که میانگین POD در مقیاس ۶ روزه ۰/۷۹ و در دو مقیاس ۳ و ۱۲ روزه به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۷۰ می‌باشد. دامنه تغییرات POD برای SPI6 از ۰/۵۷ تا ۱ است. شاخص FAR نیز در مقیاس ۳ و ۱۲ روزه تقریباً مشابه هم بوده و بالاتر از SPI6 قرار می‌گیرند. CSI نیز که ترکیبی از دو شاخص قبلی است حاکی از عملکرد بهتر SPI6 نسبت به دو مقیاس دیگر است. یعنی تعداد بیشتری از وقایع سیل اتفاق افتاده در حوضه را پیش‌بینی نموده است.

جدول ۲- تعداد روزهایی که SPI در محدوده مرطوب قرار داشته

نام ایستگاه	SPI ₃	SPI ₆	SPI ₁₂
سنگده	۷/۶۸	۷/۹۵	۶/۰۵
کله	۶/۴۱	۶/۶۵	۵/۵۹
سوت کلا	۶/۴۵	۶/۴۴	۵/۸۳
ولیکچال	۷/۵۰	۷/۳۰	۵/۹۱
درزیکلا	۷/۵۲	۷/۸۰	۵/۹۵

تعداد سیل‌های پیش‌بینی نشده مورد ۸ مورد بود و ۱۳ مورد سیلاب به علت SPI بالا پیش‌بینی شد که عملاً سیلی در منطقه رخ نداد. این مورد آخر تقریباً در ماه‌های تابستان و علی‌الخصوص تیر دیده شد که می‌توان آن را به کمبود رطوبت خاک منطقه در ماه تیر نسبت داد. در منطقه کهلیک دره‌سی وضع پیش‌بینی از کسلیان بهتر بود چنان که از تعداد ۳۰ سیل ثبت شده در دوره آماری در بهترین حالت تعداد ۲۲ سیل به درستی پیش‌بینی شدند. برای بررسی بیشتر این مبحث و مقایسه دوره‌های زمانی SPI با یکدیگر از شاخص‌های POD، FAR و CSI استفاده به عمل آمد. نتیجه محاسبه این شاخص‌ها برای سه مقیاس زمانی (۳، ۶ و ۱۲ روزه) و برای ایستگاه‌های سنگده، ولیکچال، سوت کلا، درزیکلا و کله واقع در حوضه کسلیان محاسبه و در شکل (۶) نشان داده شده است. کمترین مقدار FAR برای ایستگاه سنگده بوده و معادل ۰/۲۲ بوده و بالاترین مقدار FAR مربوط به ایستگاه درزیکلا در مقیاس ۶ روزه و برابر ۰/۴۷ به دست آمد. CSI نیز که دیدی کلی



شکل ۶- شاخص‌های POD، FAR و CSI برای مقیاس‌های زمانی مختلف SPI (۳، ۶، ۹ و ۱۲ روزه) برای ایستگاه‌های واقع در حوضه‌های تحت مطالعه (ردیف اول مربوط به حوضه کسلیان و ردیف دوم مربوط به حوضه کهلیک دره‌سی می‌باشد)

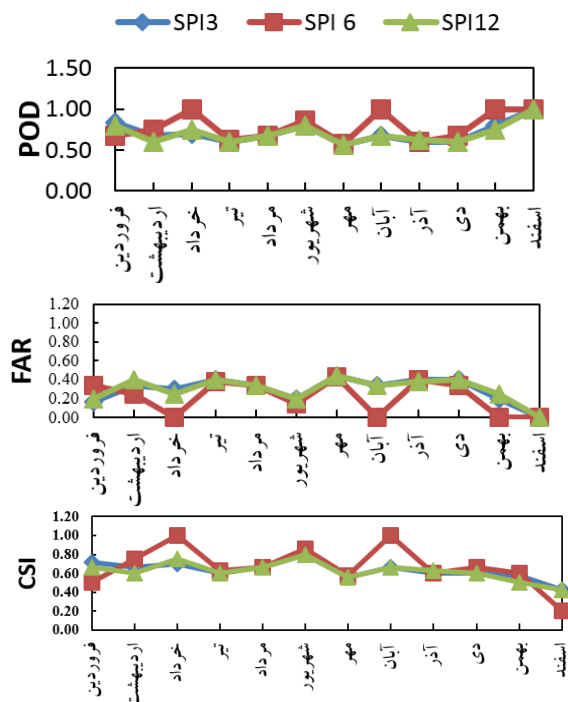
عنوان یک حوضه مرطوب و دارای بارندگی در همه ماه‌های سال، به طور میانگین شاخص‌های روزانه SPI از حدود ۷ روز پیش از وقوع سیل قادر به پیش‌بینی رخداد سیل بوده و می‌تواند به عنوان ابزاری جهت پیش‌هشدار سیل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از بین مقیاس‌های مختلف روزانه مورد همچنین این نتیجه نیز حاصل شد که هر چه به سمت خروجی حوضه نزدیک‌تر می‌شویم تعداد روزهای قابل پیش‌بینی تا وقوع سیل کاهش پیدا می‌کند یعنی در نقاط دورتر تعداد روزهای دارای SPI بالاتر از محدوده نرمال تا وقوع سیل بیشتر و در نقاط نزدیک خروجی تعداد روزها تا وقوع سیل کمتر است. بررسی مقادیر POD، FAR و CSI برای مقیاس‌های ۳، ۶ و ۱۲ روزه در هر ۵ ایستگاه، نشان داد که بهترین مقیاس، مقیاس ۶ روزه است، که می‌توان برای پیش‌بینی و پیش‌هشدار سیل آن را به کار گرفت.

نتایج حاصله از به کارگیری SPI روزانه در حوضه آبریز کهلیک دره‌سی در استان آذربایجان شرقی که رودخانه اصلی آن دارای رژیم برفی بارانی می‌باشد نتایج مشابه نتایج حاصله در حوضه کسپلیان با اندکی تفاوت را به دست داد. زمان پیش‌هشدار در این حوضه بیش از سه روز به دست نیامد و ارزیابی کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های POD، FAR و CSI نشان داد که SPI3 از کارایی بهتری در پیش‌بینی سیل برخوردار می‌باشد. نکته مهم دیگر حاصل از مطالعه انجام شده در حوضه آبریز کهلیک دره‌سی تأیید امکان تفسیر نتایج SPI در مناطق برف‌خیز می‌باشد. ادبیات موضوع به کارگرفتن این شاخص در مناطق برف‌خیز را تأیید نمی‌نماید در حالی که تحقیق حاضر نشان می‌دهد که SPI‌های بزرگتر از ۶ روز توانسته‌اند در دوره برفی نیز با ارائه زمان پیش‌هشدار مناسب وقوع سیلاب را پیش‌بینی نمایند. مورد اخیر نیازمند تحقیق بیشتر در حوضه‌های برف‌خیز می‌باشد و نمی‌توان با نتایج حاصله در اینجا نتیجه‌ای قاطع ارائه نمود. در عین حال دو نتیجه قابل اعتنا و معتبر به دست آمده در این تحقیق برای حوضه‌های دارای رژیم برفی بارانی را می‌توان: "۱- توانایی SPI برای به کارگیری در مناطق برف‌خیز برای اهداف مدیریت سیل و ۲- استفاده از دوره‌های بلند مدت روزانه SPI برای پایش سیل در این مناطق" ذکر نمود. از موارد قابل پژوهش در گام بعد، می‌توان از توسعه روش پیشنهادی برای تخمین روز وقوع سیل و همچنین بررسی اثر مشخصات فیزیوگرافی حوضه از یک طرف و توزیع زمانی و مکانی بارش در ترکیب با روش پیشنهادی از طرف دیگر برای پیش‌بینی سیلاب می‌باشد.

۵- مراجع

شریفی م، رفاهی ح، معزاردلان م، "ارزیابی ضریب رواناب ناشی از بارش در حوضه معرف کسپلیان"، مجله علوم کشاورزی ایران،

۲۷(۳)، ۱۳۷۵، ۱-۱۷.



شکل ۷- شاخص‌های POD، FAR و CSI برای مقیاس‌های زمانی مختلف SPI (۳، ۶ و ۱۲ روزه) در ایستگاه سنگه

۴- نتیجه‌گیری

بیشتر تحقیقات صورت گرفته برای SPI تا کنون به استفاده از این شاخص در تحلیل خشکسالی تمرکز داشته است. تحقیق حاضر به بررسی امکان استفاده از SPI برای پیش‌بینی رخداد سیلاب می‌پردازد. نکته حائز اهمیت در این تحقیق آن است که در صورت دستیابی به اهداف تحقیق از شاخصی برای رصد و پیش‌بینی سیلاب استفاده به عمل می‌آید که تنها از یک پارامتر برای پیش‌بینی استفاده می‌نماید. این مهم از دو جنبه اهمیت دارد. اول آن که مدلی که از یک پارامتر استفاده می‌نماید به‌طور بالقوه از کمترین خطا و لذا کمترین عدم قطعیت برخوردار می‌باشد و دوم آن که شاخص مورد نظر در این مطالعه یعنی شاخص بارش استاندارد از میزان بارندگی به عنوان متغیر استفاده می‌نماید. واضح است که بارش تنها داده‌ای است که در همه حوضه‌های آبریز با دقت مناسب و از سالیان دور در دسترس بوده و حداقل دو ارگان در سطح کشور به جمع‌آوری اطلاعات مربوط بدان می‌پردازند. نکته مهم دیگر در که در این تحقیق بدان توجه شده است استفاده از مقیاس روزانه است که در مطالعات مرسوم SPI برای خشکسالی نیازی بدان دیده نشده است.

نتایج حاصل از به کار بردن شاخص SPI در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ روزه برای پایش و پیش‌بینی سیل در دو حوضه مرطوب و نیمه خشک نشان داد که این شاخص در مقیاس‌های مختلف روزانه در پیش‌بینی و پایش سیل در هر دو حوضه آبریز کاملاً موفق بوده است. مطالعات نشان داد که در حوضه کسپلیان به

شکوهی ع، "مقایسه شاخص‌های RDI و SPI برای تحلیل خشکسالی در مقیاس ایستگاهی با تکیه بر خشکسالی کشاورزی (مطالعه موردی قزوین و تاکستان)"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره نهم، ۱۳۹۱، ۱۱۱-۱۲۲.

یاراحمدی ج، نیکخوم ر، "بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر وقوع سیلاب‌ها در حوضه صوفی چای"، نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز، سال ۱۶، شماره ۳۹، ۱۳۸۹، ۱۵۱-۱۶۹.

Angledis P, Maris F, Kotsovinos N, Hrissanthou V, "Computation of drought index SPI With alternative distribution functions", *Water resources management*, 2012, 26(9), 2453-2473.

Chen H, Sun J, Chen X, "Future Changes of Drought and Flood Events in China under a Global Warming Scenario", *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, 6(1), 8-13.

Du J, Fang J, Xu W, Shi P, "Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province, China", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 27(2), 377-387.

Hao Z, Aghakouchak A, "A non-parametric multivariate multi-Index drought monitoring framework", *Special Advance in Drought Monitoring Collection*, 2014, 89-101.

Hong W, Hayse MJ, Wilhite DA, Svoboda MD, "The effect of the length of record on the Standardized Precipitation Index calculation", *International Journal of Climatology*, 2004, 25, 505-520.

Komuscu AU, "Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey", *International Drought Information Center, University of Nebraska, Drought Network News*, 2014, 11, 7-13.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J, "Drought monitoring with multiple time scales", *The Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society: Dallas, Texas, USA, 15-20 January, 1995*.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J, "The relationship of drought frequency and duration to time scales", *The Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, CA, USA, 17-22 January, 1993*.

Seiler RA, Hayes MJ, Bressan L, "Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring", *International Journal of Climatology*, 2002, 22(11), 1365-1376.

EXTENDED ABSTRACTS

Flood Forecasting Via Daily Scale Standardized Precipitation Index

Alireza Shokoohi^{a,*}, Nazgol Hosseini Pajouh^a, Afshin Bakhtiari^b

^a Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^b Department of Civil Engineering, Abhar Institute of Higher Education, Abhar, Iran

Received: 25 September 2016; Accepted: 21 May 2017

Keywords:

Flood forecasting, SPI, Daily scale, Humid region, Rainfall-Snow regime.

1. Introduction

Most investigations on the SPI (Standard Precipitation Index) have focused on drought analysis yet. A few researchers including Seiler et al. (2002) and Du et al. (2012) using monthly data showed SPI2, SPI12, and SPI24 have the potential to forecast floods occurrence.

The present research aimed at using SPI for flood occurrence forecasting. The results of the study are important from two points of view: first, the applied model uses just one parameter that imposes less uncertainty through decreasing errors in preparing and introducing data to the model, and second, the model uses the most commonly available data with acceptable length everywhere; i.e. precipitation.

While in drought analysis monthly scale is common, in this research the SPI was used in daily scale to fit the purpose of the study. For the case study, two different watersheds were selected; one in a humid area (Kasilian watershed in the north of Iran) and the other in a semi-dry region with a river of rainfall-snowy hydrologic regime (Kailak Darahsi watershed in the north-west of Iran).

2. Methodology

The SPI is calculated through fitting a probability density function, mostly the gamma function, on cumulative precipitation of different time scales (McKee et al., 1993). For this study, 5 climatologic stations in Kasilian watershed and Ashan station in east Azarbayjan were used.

To distinguish the best time scale of SPI for flood occurrence forecast three different indices, namely Probability of Detection (POD), False Alarm Ratio (FAR), and Critical Success Index (CSI) were employed. The equations of the indices are as follows:

$$POD = \frac{H}{H+M} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{F}{H+F} \quad (2)$$

$$CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (3)$$

In which "H" is observation number during wet period, "M" is the number of missed observations in wet period, and F is the number of false reported observations (Hao and Aghalouchak, 2014).

3. Results and Discussion

* Corresponding Author

E-mail addresses: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir (Alireza Shokoohi), nazgol_hosseini@yahoo.com (Mohammad Nazgol Hosseini Pajouh), afshin.b2014@gmail.com (Afshin Bakhtiari).

For investigating on the potential of SPI in detecting and monitoring flood occurrence, SPI for all climatological stations in the two watersheds were calculated and then were compared with the time of flood occurrence in the pertinent rivers. Fig. (1) is an example for illustrating the calculated SPI for the two watersheds at different time scales, along with the time of the occurrence of floods during the rainy periods.

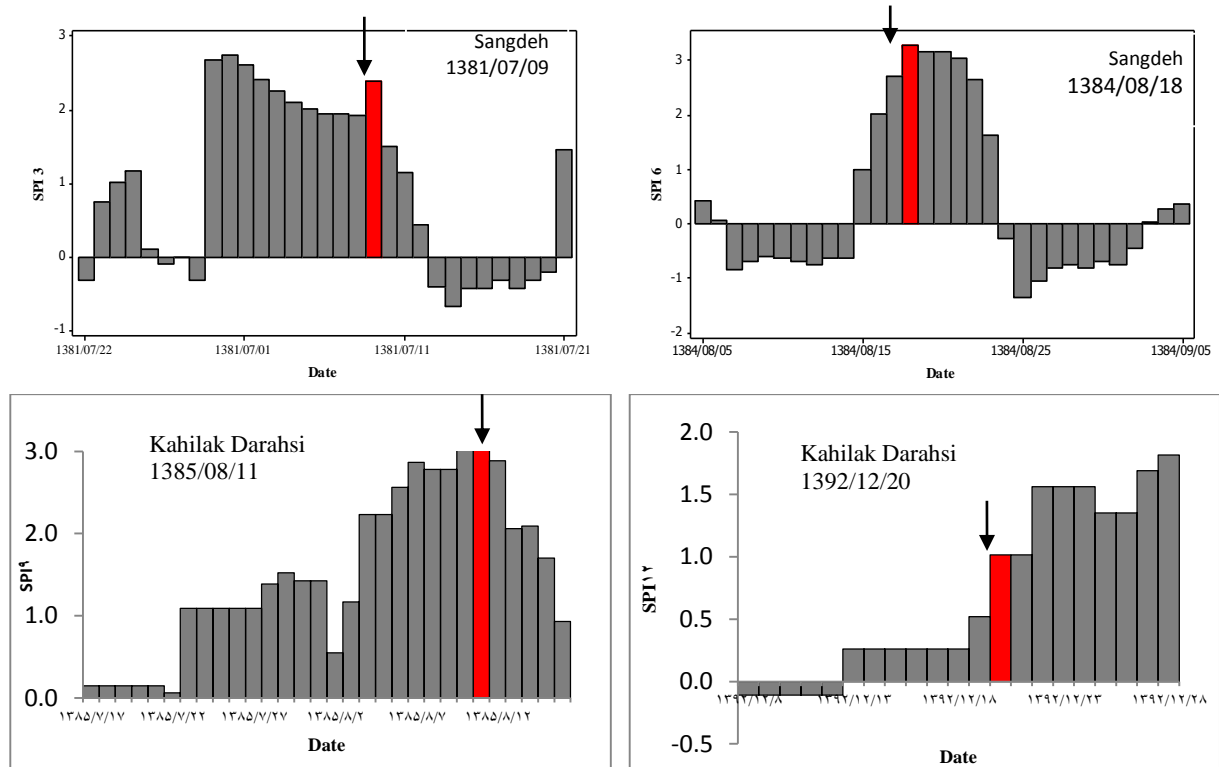


Fig. 1. SPI with different time scales in study regions (The arrow in the figure shows the occurrence time of observed floods)

4. Conclusions

The Results for 3, 6, 9, and 12 days SPI showed the success of the method in the two study watersheds. In the Kasilian watershed, located in a humid area and having precipitation all year long, SPI could predict flood occurrence 7 days ahead, while for Kahilak darahsi the lead time was 3 days at most. According to the obtained POD, FAR and CSI, SPI6 and SPI3 were the most accurate time scales for Kasilian and Kahilak Drarahsi watersheds, respectively.

5. References

- Seiler RA, Hayes MJ, Bressan L, "Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring", *International Journal of Climatology*, 2002, 22(11), 1365-1376 .
- Du J, Fang J, Xu W, Shi P, "Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province, China", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 27(2), 377-387.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J, "The relationship of drought frequency and duration to time scales", *The Eighth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim, CA., USA, 17-22 January 1993.
- Hao Z, Aghakouchak A, "A non-parametric multivariate multi-Index drought monitoring framework", *Special Advance in Drought Monitoring Collection*, 2014, 89-101.