



مطالعه عملکرد برخی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در یک منطقه نیمه‌خشک (مطالعه موردی: دشت کاشمر و بردسکن)

سمیه رجب‌زاده^{۱*}، ابوالفضل مساعدی^۲، محمد قبائی سوق^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب‌خیز، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد، ایران

۳- دکتری، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران

چکیده

شاخص‌های مختلفی برای کمی‌سازی پدیده خشکسالی توسعه یافته و در مناطق مختلف مورد استفاده واقع شده‌اند. این پژوهش به منظور بررسی وضعیت خشکسالی و مقایسه کارایی شاخص‌های خشکسالی SPI ، $SPEI$ ، RDI و $eRDI$ و انتخاب یک شاخص خشکسالی سازگار و مناسب برای منطقه مورد مطالعه انجام شده است. داده‌های ماهانه ۳ ایستگاه نزدیک به منطقه در دوره زمانی ۶۷-۱۳۶۶ تا ۹۵-۱۳۹۴ برای محاسبه شاخص‌های مورد نظر در مقیاس زمانی ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه مورد استفاده قرار گرفت و وضعیت خشکسالی و ویژگی‌های دوره خشک مانند شدت، مدت و تداوم خشکسالی بر مبنای هر یک از شاخص‌ها تعیین گردید و در ادامه ارتباط و همبستگی شاخص‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بر پایه نتایج بدست آمده، شاخص‌های خشکسالی، RDI و $eRDI$ عملکرد یکسانی داشته و با یکدیگر همبستگی کامل دارند. شاخص $SPEI$ در همه مقیاس‌های زمانی مورد بررسی، تعداد دوره‌های خشکسالی را کم‌تر ولی تداوم آن‌ها را در مقایسه با شاخص‌های دیگر بیش‌تر نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خشکسالی، $SPEI$ ، RDI ، $eRDI$ ، کاشمر



۱. مقدمه

خشکسالی به‌عنوان یک بلای طبیعی پیچیده و چند وجهی توصیف می‌شود (Li, He, P., He, Y., Han, Zeng, Lu, & Wang, 2020). در دهه‌های اخیر از میان حوادث طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده است؛ زیان‌بارترین آن‌ها از نظر شدت، مدت و گستره تحت پوشش و خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی پدیده خشکسالی بوده است. به دلیل وجود تغییرات قابل توجه در عرضه و تقاضای آب، دشوار است که یک تعریف واحد از خشکسالی در سراسر جهان وجود داشته باشد. (Tian, Yan & Quiring, 2018) شدت خشکسالی اغلب با ترکیب متغیرهایی شامل بارش، دما، رطوبت، باد و رطوبت خاک اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که خشکسالی در یک منطقه وسیع منتشر می‌شود و به‌طور آرام توسعه می‌یابد، دارای دینامیک‌های پیچیده‌ای می‌باشد. ایران همیشه در معرض خشکسالی بوده ولی در دهه‌های اخیر این موضوع روند افزایشی داشته است. اگر مقدار بارش در منطقه‌ای به صورت نرمال باشد ولی افزایش دما به‌صورت غیرعادی رخ دهد، می‌تواند سبب ایجاد شرایط خشکسالی شود. (خوشگفتار et al, 2019). برای شناسایی شروع، شدت، تداوم، محل، و توقف شرایط خشکسالی از نمایه‌ها یا شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود. سیستم‌های هشدار دهنده خشکسالی با هدف پیشگیری، ارزیابی و ارائه اطلاعات مربوط آب و هوا، شرایط هیدرولوژیکی و تامین آب و ارائه اطلاعات به موقع شروع زودرس خشکسالی براساس یک برنامه مدیریت ریسک، به‌عنوان وسیله‌ای برای کاهش اثرات بالقوه خشکسالی طراحی می‌شوند. در بیش‌تر سیستم‌های هشدار خشکسالی از شاخصی استفاده می‌شود که توانایی بهتری برای شناسایی شروع و پایان به موقع خشکسالی داشته باشد (درگاهیان et al, 2020). شاخص‌های خشکسالی معمولاً با استفاده از اطلاعات بارندگی، ارتفاع برف، رطوبت خاک و جریان آب رودخانه به منظور تبدیل شدن به یک نمونه بزرگ قابل فهم ساخته شده‌اند. به‌طور کلی شاخص‌های متعددی برای ارزیابی خشکسالی به‌کار برده می‌شوند که از آن جمله می‌توان شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص بارش، تبخیر و تعرق استاندارد (SPEI)، شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و روش دهک‌ها را برشمرد. ممکن است شاخص‌های ارائه شده برای یک منطقه، قابل استفاده برای سایر نواحی نباشند و علت آن متغیر بودن شرایط هواشناسی مؤثر بر ایجاد پدیده خشکسالی از نقطه‌ای به نقطه دیگر است، غالباً برای مناطقی که دارای شرایط اقلیمی یکسانی هستند می‌توان از شاخص‌های خشکسالی یکسانی استفاده نمود.

(زهتابیان et al, 2013) در بررسی خشکسالی استان خراسان جنوبی به کمک شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و RDI اظهار داشتند که محاسبه RDI استاندارد به اندازه محاسبه SPI پیچیده است و هر دو شاخص یک رفتار کلی مشابه دارند، ولی RDI با لحاظ نمودن ETo در محاسبات، بهتر گویای تغییر شرایط اقلیمی است. (اسدی‌زارچ et al, 2011) در ارزیابی وضعیت خشکسالی ایران با استفاده از شاخص RDI، و بررسی مقادیر شاخص‌های RDI و SPI طی دوره زمانی ۱۹۷۶-۲۰۰۵ در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه به این نتیجه رسیدند که رابطه‌ی RDI و SPI، ۳، ۶ و ۹ ماهه نسبت به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر قابل توجه بوده است. (مصطفی‌زاده & ذبیحی 2016) با تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در منطقه کردستان دریافتند که ضمن وجود تفاوت در الگوی وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی محاسبه شده با SPI و SPEI، شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در اکثر ایستگاه‌ها مشخص نموده است. براساس نتایج، ضریب همبستگی بین ۰/۱۹ در ایستگاه سقز و ۰/۵۲ در ایستگاه سنندج و معنی‌دار از نظر آماری (در سطح ۹۹ درصد)، متغیر بود و بیان داشتند که همبستگی ضعیف میان شاخص‌های SPI و



SPEI در ایستگاه سقز، ناشی از افزایش تبخیر و تعرق در فصل‌های بهار و تابستان است. (مبین و همکاران، et al, 2019) با بررسی ویژگی‌های خشکسالی کرمان و شیراز با استفاده از چهار شاخص SPEI، RDI، SPI و EDI دریافتند که شدت‌های خشکسالی محاسبه شده بر مبنای هر یک از شاخص‌ها در گام‌های زمانی مختلف در هر دو منطقه، تغییرات و نوسانات ماهانه مشابهی داشته و بر اساس نوع اقلیم، شاخصی که بیش‌ترین همبستگی را با سایر آن‌ها در گام‌های زمانی مختلف دارد، متفاوت است. (هاتفی و همکاران et al, 2016) با بررسی نقش تبخیر و تعرق در پایش خشکسالی هواشناسی در چند منطقه مختلف اقلیمی کشور با استفاده از شاخص‌های SPEI، RDI و SPI به این نتیجه رسیدند که در مناطق مرطوب بین شاخص SPI با شاخص‌های SPEI و RDI (که تبخیر و تعرق را نیز علاوه بر بارندگی در نظر می‌گیرند)، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد اما در مناطق خشک تفاوت نتایج شاخص‌ها واضح است و بیان داشتند که در فصول سرد سال، پدیده تبخیر و تعرق نقش کم‌تری در وقوع خشکسالی دارد.

(Spinoni, Naumann, Vogt & Barbosa, 2015) با استفاده از شاخص‌های خشکسالی، بارش استاندارد و تبخیر و تعرق استاندارد را به‌عنوان بزرگ‌ترین رویدادهای خشکسالی اروپا بررسی نموده و نتایج نشان دادند که افزایش خشکسالی جزئی اما مداومی از اوایل ۱۹۸۰ تا اوایل ۲۰۱۰ در این محدوده حکمفرما بوده است. (سبحانی et al, 2015) با استفاده از SEPI، به بررسی خشکسالی‌های استان اردبیل پرداختند و دریافتند که روند خشکسالی این استان رو به افزایش است. (حدادی & حیدری، 2015) با استفاده از مدل SPI و آزمون همبستگی، نوسانات بارش و دوره‌های خشکسالی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که با کاهش میزان بارش، میانگین دبی و انحراف معیار ایستگاه مورد مطالعه کاسته شده و مدل رگرسیونی دبی، سیر نزولی را نشان داده است. در بیش‌تر موارد نه تنها یک شاخص، بلکه لازم است چندین شاخص به صورت هم‌زمان برای تعیین بهتر ویژگی‌های یک رویداد خشکی در یک منطقه خاص مورد استفاده قرار گیرد (کریمی et al, 2019). از این رو، در تحقیق حاضر چهار شاخص هواشناسی SPI، SPEI، RDI و eRDI مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.

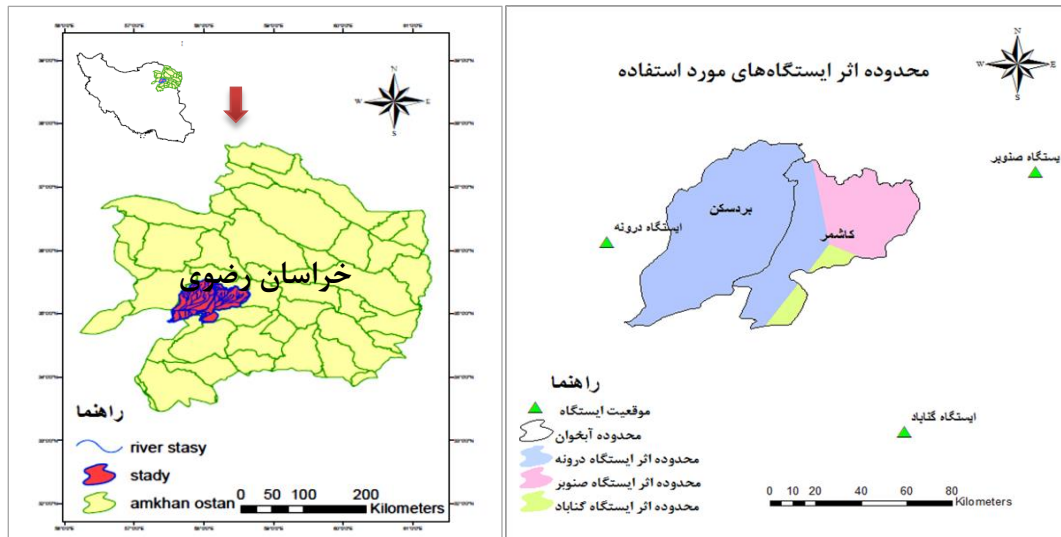
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی در محدوده دشت کاشمر، خلیل آباد و بردسکن واقع شده است. این منطقه از زیرحوضه‌های حوضه کویر مرکزی محسوب می‌شود و دارای وسعت ۴۵۶۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۹۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد و در محدوده ۵۸ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. قسمت شمال به ارتفاعات موسوم به کوهسرخ، از سمت جنوب به ارتفاعات کوه فغان، از شرق به دشت ازغند و از غرب به نمک‌زار (کویر مرکزی) محدود می‌گردد. قسمت شمالی محدوده به همراه بخشی از قسمت جنوبی آن توسط ارتفاعات پوشیده شده و مابقی قسمت‌ها شامل نواحی پست و کویری (دشت) می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های ماهانه مربوط به پارامترهای بارش، تبخیر از تشت، میانگین دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای متوسط ایستگاه‌های تبخیرسنجی و سینوپتیک صنوبر، درونه و گناباد در دوره زمانی ۲۹ ساله از سال آبی ۶۷-۶۶ تا ۹۵-۹۴ استفاده شده است. بعد از انتخاب ایستگاه، داده‌های موردنیاز جمع‌آوری و سپس تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها جهت نیل به هدف انجام گردید. به منظور بازسازی و تطویل آماری ایستگاه‌های ناقص از روش همبستگی بین ایستگاه‌ها استفاده شد. روند و استقلال داده‌های مورد نظر توسط روش



والدولفویتز، و بررسی همگنی داده‌ها با آزمون ران‌تست انجام شد. داده‌های پرت با آزمون گروزبک تعیین شد و به روش تیسن، میانگین وزنی فاکتورهای مورد استفاده محاسبه و برای کل منطقه ملاک عمل قرار گرفت. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و سطح اثر هر یک از ایستگاه‌های مورد استفاده در محدوده دشت کاشمر و بردسکن ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان و محدوده سطح اثر هر یک از ایستگاه‌های مورد استفاده

در ادامه شاخص‌های هواشناسی مورد نظر شامل SPI، SPEI، RDI و eRDI در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت، میان مدت و طولانی مدت محاسبه و ارتباط آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. پس از آن، ویژگی‌های دوره‌های خشک و مرطوب توسط هر یک از شاخص‌های مورد نظر شامل شدت، فراوانی و طول مدت و تداوم دوره‌ها محاسبه و در انتها به بررسی ارتباط و همبستگی بین شاخص‌ها پرداخته شده است.

۲-۲ شاخص‌های پایش خشکسالی

۱-۲-۲ شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص SPI یکی از شاخص‌های پرکاربرد در دهه‌های اخیر به منظور پایش خشکسالی در سراسر جهان می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته (Yihdego, 2019، غزنوی & مساعدی، 2020) و بسیاری از محققین به انعطاف‌پذیری این شاخص و توانایی آن در تحلیل جنبه‌های مختلف خشکسالی اذعان داشته‌اند (منتصری & امیرعطایی، 2015). این شاخص قادر به تعیین خشکسالی و ترسالی در یک مقیاس زمانی خاص برای هر مکان با دارا بودن داده‌های بارندگی می‌باشد. برای محاسبه نمایه SPI می‌توان بارش ماهانه و یا مجموع بارش در هر بازه زمانی دلخواه (۳ ماهه، ۶ ماهه و ...) را با استفاده از یک توزیع مناسب مانند توزیع گاما یا پیرسون تیپ سه برازش داد. سپس تابع تجمعی با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد. بر اساس این شاخص، دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار (SPI) مثبت گردد (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002).



۲-۲-۲ شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص SPEI با استفاده از سری تفاضل بارش از تبخیر و تعرق پتانسیل و برآورد تابع احتمال تجمعی برآزش یافته بر سری تفاضل و در نهایت تبدیل تابع توزیع تجمعی به توزیع نرمال استاندارد محاسبه می‌گردد (Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno, 2010). برای محاسبه شاخص SPEI نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد شود، سپس از طریق یک مدل ساده بیلان آب تفاوت بین مقدار بارش (P) و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای ماه i از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

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

محاسبه این شاخص همانند SPI نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر D_i از طریق برآزش یک تابع چگالی احتمال می‌باشد (Stagge, Tallaksen, Gudmundsson, Van Loon & Stahl, 2016). برای محاسبه مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) را دارای بهترین برآزش بر مقادیر D_i تشخیص دادند که فرم کلی تابع چگالی احتمال آن بصورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp \exp(-(1+kz)^{\frac{1}{k}}) (1+kz)^{\frac{1}{k}-1} \frac{1}{\sigma} \exp \exp(-z - \exp \exp(-z)) \\ \frac{1}{\sigma} \exp \exp(-z - \exp \exp(-z)) \end{cases} \quad 2$$

$$k = 0 \text{ or } k \neq 0 \quad z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

که در آن پارامترهای μ ، k و σ به ترتیب پارامترهای مکان، مقیاس و شکل برای مقادیر D_i در دامنه $-\infty$ تا $+\infty$ می‌باشند. در ادامه مقادیر احتمال تجمعی برای مقادیر D_i مطابق روش استفاده شده در شاخص SPI به تابع نرمال استاندارد شده تبدیل می‌شوند (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002)، که برابر مقادیر شاخص SPEI می‌باشند.

۳-۲-۲ شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

(Tsakiris, Pangalou & Vangelis 2007) با بیان اینکه شاخص‌های مبتنی بر بارش به تنهایی قادر به توصیف وضعیت خشکسالی نمی‌باشند؛ شاخص RDI را بر پایه مفاهیم SPI و نسبت داده‌های بارش به تبخیر و تعرق و در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی پیشنهاد دادند. مقادیر اولیه α_k با استفاده از نسبت بارش (P) به تبخیر و تعرق پتانسیل (PET یا ET_0) بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}, \quad i = 1 : N \quad \text{and} \quad j = 1 : 12 \quad 3$$

P_{ij} و PET_{ij} در این رابطه به ترتیب مقادیر باران و تبخیر و تعرق پتانسیل ماه i م از سال j م و متغیر N تعداد سال‌های آماری است. پیش فرض اولیه در فرمول‌بندی محاسبه RDI استاندارد شده (RDIST) که توسط (Tsakris & Vangelis, 2005) انجام شد، این است که مقادیر α_k (نسبت بارش بر تبخیر و تعرق پتانسیل)، از توزیع لوگ‌نرمال پیروی می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود:



$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\sigma_y}$$

۴

در این رابطه y^i برابر است با $Ln(\alpha_k^i)$ و \bar{y} و σ_y به ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر y^i است.

۲-۲-۴ شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI)

این شاخص برای بهبود نتایج حاصل از ارزیابی خشکسالی، به‌ویژه خشکسالی کشاورزی توسط (Tigkas, Vangelis & Tsakiris, 2017) پیشنهاد شده است و در واقع اصلاح شده‌ی شاخص RDI است که در آن، مقدار بارش (P)، با بارش مؤثر (Pe) جایگزین می‌شود. بارش مؤثر طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_e = \frac{P \times (125 - 0.2 \times P)}{125} & \text{for } P \leq 250mm \\ P_e = 0.1 \times P + 125 & \text{for } P > 250mm \end{array} \right. \quad ۵$$

۳. نتایج و بحث

۳-۱ نتایج بررسی داده‌های مورد استفاده در محدوده مورد مطالعه

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های ماهانه متغیرهای بارش، تبخیر از تشت، میانگین دمای کمینه، دمای بیشینه و دمای متوسط ایستگاه‌های تبخیرسنجی و سینوپتیک صنوبر، درونه و گناباد در دوره زمانی ۲۹ ساله از سال آبی ۶۷-۶۶ تا ۹۵-۹۴ انجام شده است. برای محاسبه شاخص‌های SPEI، RDI و eRDI، مقادیر ET_0 از روش هارگریوز محاسبه شد و پس از بررسی کمی و کیفی داده‌ها به کمک آزمون‌های مختلف که در ادامه نتایج آن ارائه می‌شود؛ با استفاده از روش تیسن، سطح اثر هر ایستگاه تعیین و مقدار بارش و تبخیر و تعرق متوسط ماهانه کل دشت در تمامی ماه‌های سال در طول دوره آماری محاسبه گردید. در جدول ۱ مشخصات آماری مربوط به داده‌های بارش، تبخیر و تعرق و تبخیر از تشت برای محدوده‌ی مورد مطالعه در طول دوره آماری ارائه شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات آماری متغیرهای هواشناسی و هیدرومتری در محدوده دشت کاشمر و بردسکن در طول دوره آماری

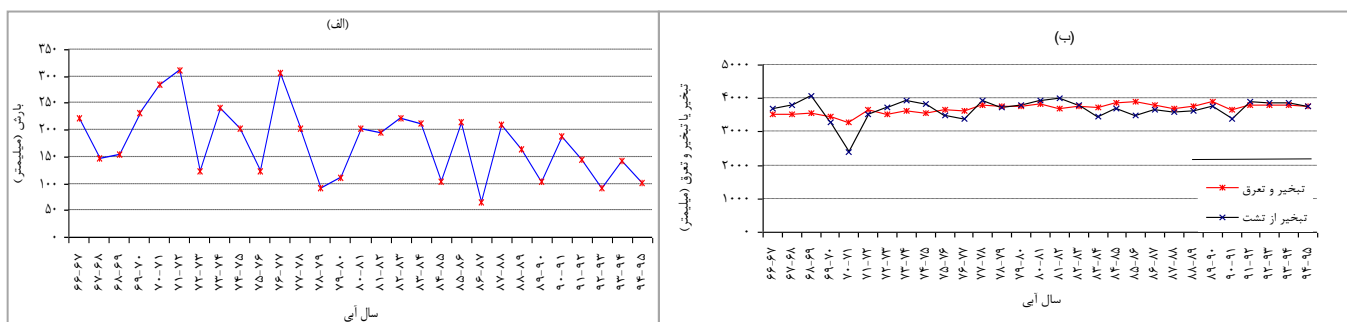
آماره	بارش (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	تبخیر از تشت (میلی‌متر)	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)
کمینه	۶۵/۶	۳۴۶۴	۲۳۹۸	۰/۱۰۱۰
بیشینه	۳۱۱/۱	۴۷۷۴	۴۰۷۲	۲/۳۸۵
میانگین	۱۷۶/۲	۳۷۲۱	۳۶۷۴	۰/۵۸۱۷
ضریب تغییرات	۰/۳۷	۰/۰۹	۰/۰۸	۱/۳۲

متغیر بارش با میانگین ۱۷۶ میلی‌متر در سال در محدوده ۶۵/۶ تا ۳۱۱ میلی‌متر در نوسان است. میانگین مقادیر تبخیر از تشت ۳۶۷۴ میلی‌متر می‌باشد که نسبت به تبخیر و تعرق پتانسیل با میانگین ۳۷۲۱ میلی‌متر تا حدودی کم‌تر است. ضریب تغییرات مقادیر کمینه و بیشینه متغیر ET_0 نیز ۰/۰۹ است که در مورد تبخیر از تشت، این مقدار ۰/۰۸ می‌باشد.



صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست

نتایج چگونگی تغییرات متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر از تشت در محدوده دشت کاشمر و بردسکن در شکل ۲ در بخش‌های الف و ب آورده شده است. با توجه به شکل ۲-الف، مقادیر بارش در دامنه‌ی کم‌تر از ۱۰۰ تا بیش‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر در طول سال‌های مختلف آماری در نوسان می‌باشد. کم‌ترین مقدار بارش با حدود ۶۵ میلی‌متر و بیش‌ترین مقدار با ۳۱۱ میلی‌متر به ترتیب در سال‌های ۸۷-۱۳۸۶ و ۷۲-۱۳۷۱ به وقوع پیوسته‌اند. به نظر می‌رسد که می‌توان آن‌ها را متناظر وقایع حدی خشکسالی و ترسالی بسیار شدید در نظر گرفت. بررسی مقادیر سری‌های ET_0 و تبخیر از تشت، نوسانات کم‌تری نسبت به مقادیر بارش نشان می‌دهد و در اکثر سال‌ها در دامنه ۳۰۰۰ تا حدود ۴۰۰۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. هم‌چنین کم‌ترین مقدار تبخیر از تشت در سال ۷۲-۱۳۷۱ اتفاق افتاده که با بیش‌ترین مقدار بارش که در این سال اتفاق افتاده است، منطبق است (شکل ۲-ب).



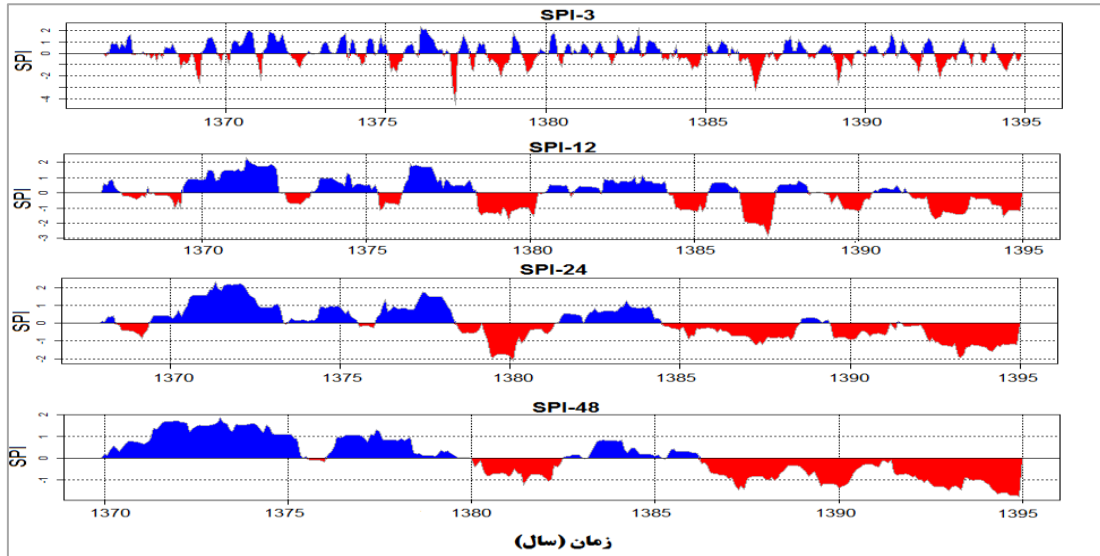
شکل ۲- تغییرات مقادیر متغیرهای بارش (الف) و مقادیر تبخیر از تشت و تبخیر و تعرق پتانسیل (ب)، در محدوده دشت کاشمر و بردسکن در مقیاس سالانه

۲-۳ نتایج پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی

وضعیت خشکسالی هواشناسی بر مبنای شاخص SPI در شکل ۳ نشان داده شده است، با توجه به مقادیر بدست آمده در مقیاس ۳ ماهه بیش‌تر ماه‌ها دارای وضعیت نرمال هستند. ۴۷ دوره خشک در این مقیاس شناسایی شده و کم‌ترین مقدار شاخص SPI با مقدار $-۴/۵۵$ در سه ماهه منتهی به ماه آذر در سال ۷۸-۱۳۷۷ به وقوع پیوسته و بیش‌ترین مقدار آن هم $۲/۳۶$ است که در سه ماهه منتهی به آبان در سال ۷۷-۱۳۷۶ به وقوع پیوسته است. در مقیاس‌های میان مدت به‌طور مثال ۱۲ ماهه، مرز دوره‌های خشک و مرطوب بهتر قابل تفکیک است، بیش‌ترین کمبود در این مقیاس مقدار $۲۶/۴۱$ بوده و تعداد ۲۰ دوره خشک شناسایی گردید که طولانی‌ترین دوره ۲۴ ماه به طول انجامیده است. از نظر مقادیر و وضعیت دوره‌های ترسالی و خشکسالی نیز بیش‌تر ماه‌ها، دارای وضعیت نرمال بوده‌اند. در مقیاس ۴۸ ماهه پس از یک دوره نسبتاً کوتاه خشکسالی که در طی سال آبی ۸۲-۸۱ اتفاق افتاده و یک دوره نرمال که در ادامه به وقوع پیوسته‌است، خشکسالی به‌طور جدی از سال ۸۷-۱۳۸۶ آغاز شده و تا پایان دوره مورد مطالعه ادامه دارد. مطابق نتایج شکل ۳، بر مبنای شاخص SPI دو دوره متمایز مرطوب و خشک قابل ملاحظه است. دوره اول درجات مختلفی از ترسالی را تا اواخر سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ مشخص نموده است و پس از آن به‌جز در حدود سال ۸۳-۱۳۸۲ که شرایط نرمال بوده، تا پایان دوره زمانی مورد بررسی، دوره‌های خشک تداوم و تمایز بیش‌تری دارند و در مقیاس زمانی کوتاه‌تر دوره مرطوب تداوم کم‌تری داشته در مقیاس زمانی طولانی‌تر این دوره‌ها تداوم بیش‌تری داشته و دوره خشک کمی دیرتر آغاز شده است. با توجه به شکل ۳، در مقیاس ۴۸ ماهه دوره خشک از سال ۸۰-۱۳۷۹ شروع شده و تا قبل از آن شرایط نرمال یا مرطوب بوده است اما در مقیاس ۱۲ ماهه دوره خشک از سال ۷۸-۱۳۷۷ آغاز شده و قبل از آن شرایط مرطوب یا نرمال بوده است. کمبود جریان و شدت خشکسالی در



حدود سال ۸۸-۱۳۸۷ بیش‌تر است که در این سال متوسط بارش نیز کم‌ترین مقدار را طی دوره آماری مورد بررسی داشته است.



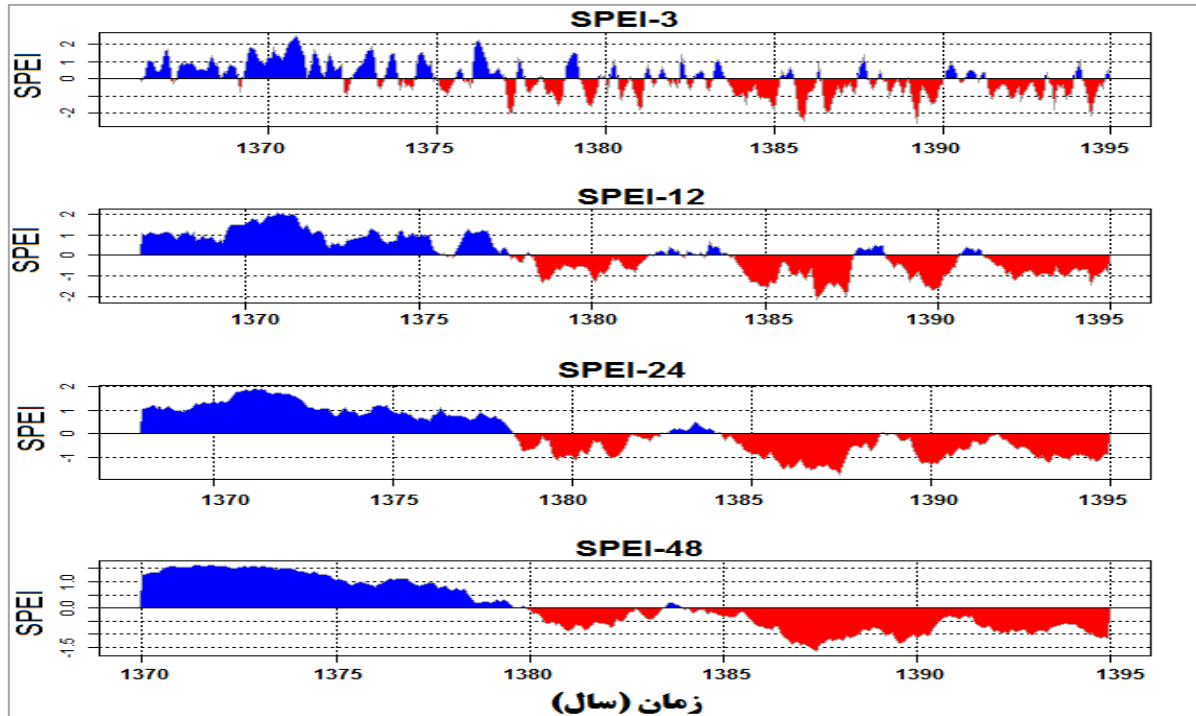
شکل ۳- نتایج پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص SPI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه

روند تغییرات در شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI قدری متفاوت است. شاخص SPEI در همه مقیاس‌های زمانی مورد بررسی سال‌های اولیه دوره را مرطوب دانسته و به‌طور کلی، دوره‌های خشک در شاخص SPEI از شدت و مقادیر کم‌تری نسبت به SPI برخوردارند. تحلیل نتایج حاصل از محاسبه شاخص خشکسالی SPEI نشان داد که در مقیاس‌های مختلف خشکسالی از شدت‌های متفاوتی برخوردار است، اما دوره‌ها در اکثر مقیاس‌های زمانی از تداوم بیش‌تری برخوردارند. هم‌چنین شاخص SPEI مقادیر کم‌تری را نسبت به شاخص SPI دارا می‌باشد. بررسی تغییرات زمانی شاخص SPEI نشان داد خشکسالی در مقیاس‌های مختلف مانند شاخص SPI تقریباً از الگوی یکسانی پیروی می‌کند اما در مقیاس کوتاه مدت ۳ ماهه تغییرپذیری زیاد شاخص SPI در سال‌های مورد بررسی مشهود است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ روند کاهشی در شاخص خشکسالی SPEI در کلیه مقیاس‌های زمانی مورد بررسی به چشم می‌خورد که نشان دهنده شرایط خشک‌تر در سال‌های اخیر است. تفاوت مقادیر خشکسالی در شاخص‌های SPI و SPEI مربوط به نحوه محاسبه این دو شاخص و وارد شدن نقش دما در شاخص SPEI است. همان‌طور که قبلاً عنوان شد SPEI بر مبنای یک مدل ساده بیلان آبی از طریق تفاضل مقادیر بارش از تبخیر و تعرق پتانسیل هر ماه در بازه مورد نظر بدست می‌آید، بنابراین با توجه به دامنه تغییرات ET_0 در ماه‌های مختلف و از طرف دیگر کم بودن مقدار بارش که در اکثر ماه‌ها صفر یا ناچیز می‌باشد سبب شده‌اند که نسبت به شاخص SPI که حد پائین آن مقدار بارش صفر است؛ در دامنه بزرگتری نوسان داشته باشد و نتایج متفاوتی نسبت به شاخص SPI و سایر شاخص‌ها که در ادامه می‌آید ایجاد نماید. به‌طور مثال وقتی برای ماه‌های خشک مثل مهر که دامنه نوسان بارش بین ۰ تا ۹ میلی‌متر است و دامنه تغییرات تبخیر و تعرق بین ۲۲۵ تا ۳۰۰ میلی‌متر است، در شاخص SPI اثر مقدار بارش ۵ تا ۹ میلی‌متر به ازای هر میلی‌متر کاملاً در شاخص خود را نشان می‌دهد اما وقتی مقدار تبخیر و تعرق از این مقادیر کم می‌شود حساسیت آن‌ها کم می‌شود و چه بسا تغییرات بارش با تغییرات تبخیر و تعرق نیز اثر آن‌ها محو شود. با کاهش مقدار بارش بخصوص در مناطق خشک از همبستگی SPEI با سایر شاخص‌ها کاسته می‌شود. نتایج



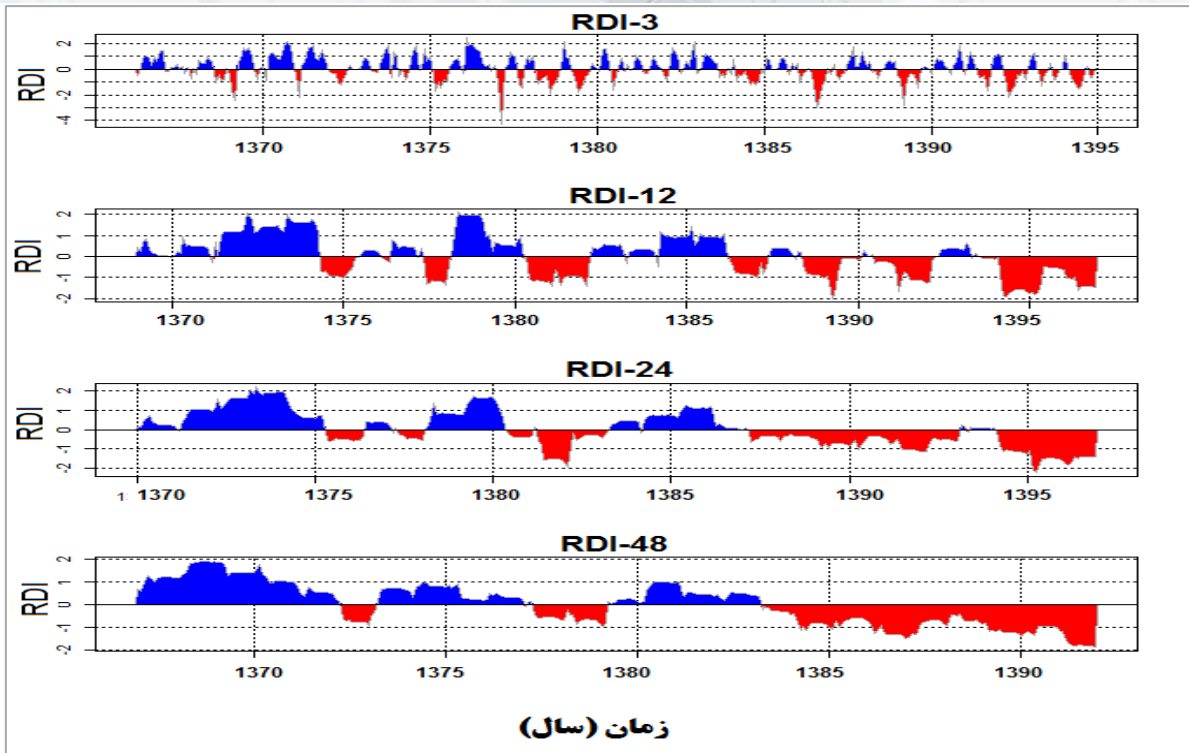
(مصطفی‌زاده et al, 2016)، (هاتفی et al, 2016)، (سیلاخوردی et al, 2019)، (غزنوی et al, 2019) و (یوسفی et al, 2017) نیز این موضوع را تأیید می‌کند.



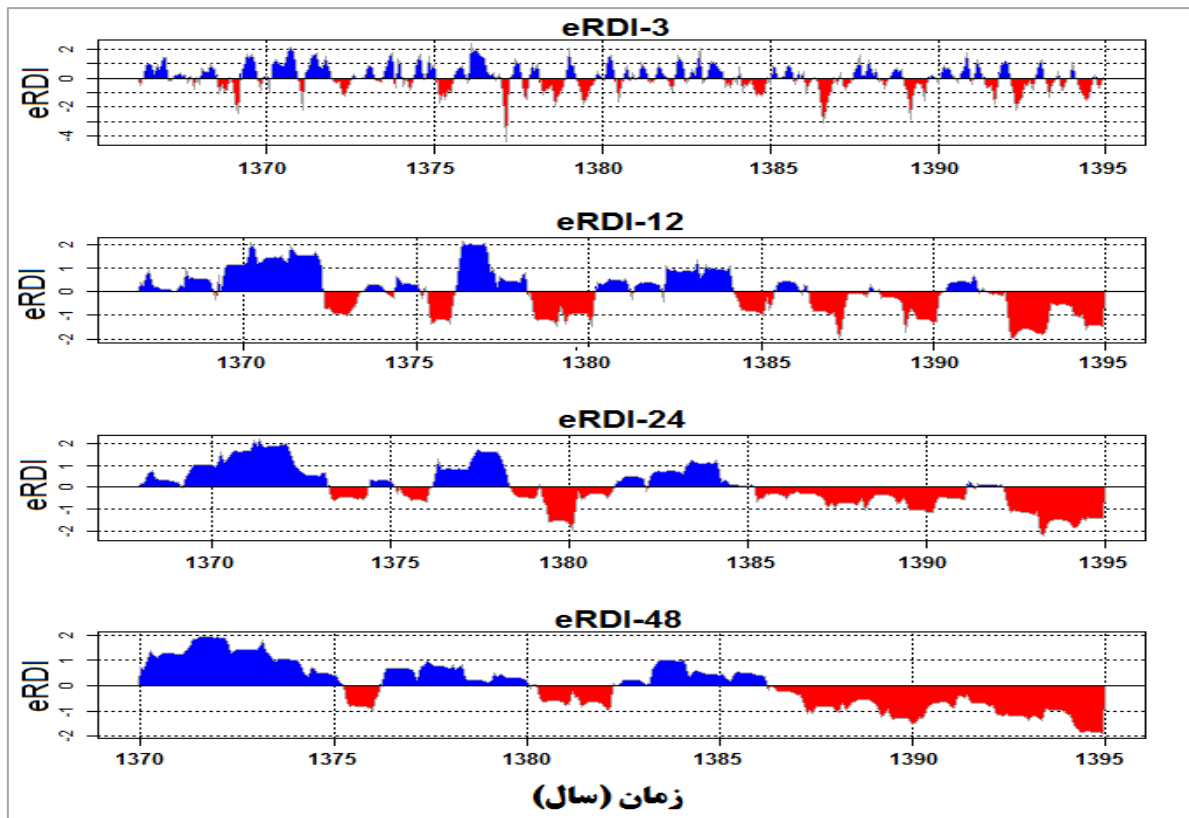
شکل ۴- نتایج پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص SPEI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه

مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۵، وضعیت خشکسالی هواشناسی بر مبنای شاخص RDI در بازه زمانی ۳ ماهه بصورت دوره‌های کوتاه مدت خشک و مرطوب است که نسبت به دوره‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه از مقادیر بیش‌تری برخوردارند. به عبارتی دوره‌های خشکی با شدت بیش‌تر و دوام کم‌تر در بازه کوتاه مدت ۳ ماهه روی داده است. کم‌ترین مقدار RDI معادل $-۳/۹۵$ است که مترادف با بیش‌ترین شدت خشکسالی است و مانند SPI سه ماهه مربوط به سال آبی ۱۳۷۷-۷۸ می‌باشد، هر چند که از نظر قدر مطلق عددی از SPI سه ماهه مقدار آن کم‌تر است ($-۴/۵۵$ = SPI سه ماهه). به‌طور کلی در دراز مدت دوره‌های مرطوب کاهش یافته و وضعیت کلی منطقه رو به خشکسالی است. به‌طوری که در سال‌های پایانی دوره در مقیاس‌های طولانی مدت ۴۸ ماهه اثری از دوره‌های مرطوب ملاحظه نمی‌شود که بیانگر وضعیت خشکسالی هواشناسی در سال‌های اخیر است. بیش‌ترین شدت خشکسالی و طولانی‌ترین دوره خشک مربوط به مقیاس ۴۸ ماهه و مربوط به سال‌های پایان دوره است. دوره‌ی دارای بیش‌ترین کمبود ($۹۱/۶۴$) که در واقع بیش‌ترین وخامت را از نظر خشکسالی دارد و بیش‌ترین تداوم را دارا می‌باشد؛ در مقیاس ۴۸ ماهه و از سال ۱۳۸۴-۸۵ آغاز شده و تا پایان دوره ادامه دارد و در سال‌های آخر وضعیت خشکسالی از نظر، شدت، وخامت و مقدار کمبود به اوج خود رسیده است (شکل ۵).

وضعیت خشکسالی هواشناسی با توجه به شاخص eRDI مشابه با شاخص RDI است (شکل‌های ۵ و ۶)، ولی از نظر مقادیر در حد خیلی جزئی مقادیر بیش‌تری را گزارش داده است. تشابه وضعیت خشکسالی در شاخص‌های RDI و eRDI نشان می‌دهد استفاده از مقادیر بارش یا بارش مؤثر در محدوده مورد مطالعه نقش چندانی در تعیین کمی خشکسالی نداشته که ممکن است به خشک بودن منطقه و وقوع بارش‌های اندک مربوط باشد.



شکل ۵- نتایج پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص RDI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه



شکل ۶- نتایج پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص eRDI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه



۳-۳ وضعیت همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی مختلف

نتایج حاصل از همبستگی شاخص‌های هواشناسی SPI، SPEI، RDI و eRDI در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ماهه و همچنین مقیاس‌های فصلی و سالانه در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج، بین شاخص‌های RDI و eRDI در همه بازه‌های مورد بررسی همبستگی کامل در سطح ۰/۹۹۹ وجود دارد. بر اساس نتایج بررسی مقادیر همبستگی، در مقیاس زمانی ۳ تا ۴۸ ماه، بین شاخص‌های RDI و eRDI با شاخص SPI همبستگی قابل توجهی وجود دارد که با طولانی شدن مقیاس زمانی، این مقادیر تا حدی افزایش یافته، به طوری که از مقدار ۰/۶۲ در مقیاس ۳ ماهه، به میزان ۰/۹۰ در مقیاس ۴۸ ماهه رسیده است (جدول ۲). بیش‌ترین مقدار همبستگی شاخص‌های RDI و eRDI با شاخص SPEI مربوط به مقیاس زمانی ۴۸ ماهه و کم‌ترین مقدار مربوط به بازه ۳ ماهه می‌باشد. همچنین مقادیر همبستگی بین دو شاخص SPI و SPEI در همه مقیاس‌های زمانی ۳ تا ۴۸ ماهه نسبت به سایر شاخص‌ها کم‌تر بوده و در مقیاس ۳ ماهه حدود ۰/۶۲ بوده که با طولانی شدن دوره زمانی به تدریج افزایش یافته و در مقیاس ۴۸ ماهه با مقدار ۰/۹۰ قوی‌ترین همبستگی را با یکدیگر دارند.

جدول ۲- مقادیر ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص‌های هواشناسی

شاخص	مقیاس زمانی			
	۳ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه	۴۸ ماهه
خشکسالی				
SPI & SPEI	۰/۶۲***	۰/۷۶***	۰/۸۱***	۰/۹۰***
SPI & RDI	۰/۹۸***	۰/۹۲***	۰/۹۳***	۰/۹۴***
SPI & eRDI	۰/۹۸***	۰/۹۲***	۰/۹۲***	۰/۹۳***
SPEI & RDI	۰/۶۵***	۰/۷۲***	۰/۷۶***	۰/۸۳***
SPEI & eRDI	۰/۶۵***	۰/۷۲***	۰/۷۶***	۰/۸۲***
RDI & eRDI	۱***	۱***	۱***	۱***

۴- نتیجه‌گیری

نتایج همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی در مقیاس‌های مختلف نشان داد که شاخص‌های RDI و eRDI در همه مقیاس‌های زمانی مختلف با یکدیگر همبستگی کامل دارند و با شاخص SPI نیز از همبستگی قابل قبولی برخوردار می‌باشند که مقدار همبستگی این دو با شاخص SPI در مقیاس‌های کوتاه‌تر بیشتر است. این نتیجه با نتایج (اسدی زارچ et al, 2011) که بیان می‌دارند همبستگی در مقیاس‌های ۳، ۹ و ۱۲ ماهه بیشتر است مطابقت دارد. ولی الگوی وضعیت خشکسالی با توجه به شاخص SPEI در اغلب موارد با شاخص‌های RDI، SPEI و eRDI متفاوت بوده و تنها در مقیاس ۳ ماهه زمستان بدلیل کاهش اختلاف مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل که مبنای اولیه در محاسبات این شاخص می‌باشد؛ همبستگی بهتری دارند و با کاهش مقادیر بارش همبستگی کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج (مصطفی‌زاده & ذبیحی، 2016) که بیان داشتند در بهار و تابستان که تبخیر و تعرق بیش‌تر است همبستگی SPEI و SPI کاهش می‌یابد و نیز (هاتفی et al, 2016)، که نشان دادند در مناطق کم باران (مانند محدوده مورد مطالعه) تفاوت در نتایج شاخص‌های RDI و SPEI، SPI و RDI کاملاً مشهود است مطابقت دارد. همچنین با مطالعه (غزنوی et al, 2019) که نشان دادند با کاهش بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک همبستگی شاخص SPEI با سایر شاخص‌ها



کم‌تر می‌شود، نیز مطابقت دارد. با توجه به نتایج این بخش از پژوهش می‌توان بیان نمود که در منطقه خشک و نیمه‌خشک کاشمر و بردسکن، که تبخیر و تعرق چندین برابر بارش سالانه است، بهتر است از شاخص SPEI در مقایسه با شاخص‌های SPI و RDI در پایش خشکسالی هواشناسی استفاده شود. بررسی دوره‌های تداوم خشکسالی هواشناسی، نشان داد در تمامی بازه‌های زمانی مورد بررسی، شاخص SPEI دوره‌های خشک را دارای تداوم طولانی‌تری دانسته است که این نتیجه با نتایج (مصطفی‌زاده & ذبیحی، 2016) که SPEI را دارای تداوم طولانی‌تر نسبت به SPI می‌داند را تأیید می‌کند. هم‌چنین با توجه به اهمیت بسیار زیاد تبخیر و تعرق در وقوع پدیده خشکسالی، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک (از جمله دشت کاشمر و بردسکن) بهتر است در پایش خشکسالی هواشناسی در این مناطق از شاخص‌های مبتنی بر تبخیر و تعرق استفاده شود. از طرف دیگر با توجه به تشابه رفتاری بسیار زیاد شاخص‌های RDI و eRDI با شاخص SPI به نظر می‌رسد که این دو شاخص در منطقه مورد مطالعه نمی‌توانند به خوبی اثر تبخیر و تعرق در خشکسالی را نشان دهند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود در پایش خشکسالی هواشناسی در منطقه مورد مطالعه از شاخص SPEI استفاده شود. با توجه به همبستگی کامل شاخص‌های RDI و eRDI با یکدیگر و در تمامی مقیاس‌های زمانی در منطقه مورد مطالعه و با در نظر گرفتن برآورد ساده‌تر مقادیر RDI در مقایسه با مقادیر eRDI، به نظر می‌رسد که در منطقه مورد مطالعه نیازی به برآورد شاخص eRDI نمی‌باشد. پیشنهاد می‌شود تشابه رفتاری این دو شاخص در سایر مناطق مورد بررسی بیش‌تر قرار گیرد.

مراجع

- حدادی، ح و حیدری، ح. (۲۰۱۵). آشکارسازی اثر نوسانات بارش بر روان‌آب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۶۲ - ۲۴۷ : ۵۸
- خوش‌گفتار، م.، آخوندزاده هنزائی، م. و خسروی، ا. (۲۰۱۹). مقایسه روش‌های ARIMA و شبکه عصبی در مدل‌سازی و پایش وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دوری (مطالعه موردی: شهر اراک). فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. ۲۸(۱۰۹)، ۱۸۵-۱۹۷
- درگاهیان، ف.، لطفی نسب اصل، س و خسروشاهی، م. (۲۰۲۰). بررسی ویژگی‌های خشکسالی حوضه آبخیز هنديجان - جراحی با استفاده از زمین‌آمار. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۱۰(۳۷)، ۱۳-۲۸.
- سبحانی، ب.، غفاری گیلانده، ع. و گلدوست، اکبر (۲۰۱۵). پایش خشکسالی در استان اردبیل با استفاده از شاخص SEPI توسعه یافته براساس منطق فازی. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۵(۳۶)، ۵۱-۷۲
- سیلاخوری، ا.، اونق، م.، مساعدی، ا.، بابائیان، ا. و سلمان‌ماهینی، ع. (۲۰۱۹). کاربرد داده‌های بازتحلیل و دیده‌بانی جهت مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: شهرستان اسفراین-سبزوار)، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۵): ۲۵۴-۲۶۸.
- غزنوی، م و مساعدی، ا. (۲۰۲۰). ارزیابی خصوصیات آماری خشکسالی بر مبنای مدل زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال در مناطق مختلف آب و هوایی کشور. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۲)، ۱۰۱-۱۱۷
- غزنوی، م.، مساعدی، ا. و قبائی‌سوق، م. (۲۰۱۹). بررسی تأثیر شرایط اقلیمی بر ماندگاری وضعیت خشکسالی در محدوده شش ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور. هفتمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آبخیز باران، تهران، اول و دوم اسفند ماه، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، انجمن سیستم‌های سطوح آبخیز باران.



- کریمی، و و اکبری‌نوده‌هی، د. (۲۰۱۹). مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در استان مازندران. نیوار ۴۳(۱۰۶): ۸۳-۷۳، (۱۰۷)
- مبین، م. ح.، زارعی، ز. و سودائی‌زاده ح. (۲۰۱۹). بررسی و ارزیابی برخی از ویژگی‌های شدت خشکسالی‌های آب و هوایی در گام‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های هواشناسی کرمان و شیراز، مجله مخاطرات علوم طبیعی و محیطی، ۱۹(۸)، ۱۰۳-۱۲۲.
- مصطفی‌زاده، ر. و ذبیحی، م. (۲۰۱۶). تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۳۳-۶۴۳.
- منتصری، م. و امیرعطایی، ب. (۲۰۱۵). پیش‌بینی استوکستیک احتمالات وقوع خشکسالی (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۵(۱)، ۵۱-۶۳.
- هاتفی، ع.، مساعدی، ا. و جبار نوقابی، م. (۲۰۱۶). نقش تبخیر و تعرق در پایش خشکسالی هواشناسی در چند ناحیه اقلیمی کشور، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۲)، ۱-۲۱.
- یوسفی، م.، انصاری، ح.، مساعدی، ا. و صمدی، س. ز. (۲۰۱۷). بررسی همبستگی بین سه شاخص خشکسالی با تعدادی از پارامترهای آب و هوایی در چند نمونه اقلیمی ایران، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۳): ۱۳۴-۱۹۷.

Asadi Zarch, M., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Dastorani, M.T, and Kousari, M.R. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*. 25(13), 3485–3504.

Li, Q., He, P., He, Y., Han, X., Zeng, T., Lu, G. and Wang, H. 2020, Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis, *Atmospheric Research*, 234, 104743)

Lloyd-Hughes B., and Saunders M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal Climatology*, 22: 1571–1592.

Spinoni, j. Naumann, G. Vogt, j. Barbosa, P. (2015), The biggest drought events in Europe from 1950 - 2012, *Journal of hydrology: Regional*, 3: 509-524.

Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K., 2016. Response to comment on ‘Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)’. *International Journal of Climatology*, 36(4): 2132–2138.

Tian, L., Yuan, S, and Quiring, S.M, 2018. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the southcentral United States, *Agricultural and Forest Meteorology* 249: 107–119

Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G., 2017. An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought. *Environmental Processes*. 4 (1):137–148.

Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water resources management*, 21(5), 821–833.

Tsakiris, G. And Vangelis, H. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11

Vicente-Serrano S.M., Beguería S., and López-Moreno J.I. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23(7):1696-1718

Zehtabian, G.H., Karimi K., Nakhaee nezhad fard S., Mirdashtvan M. and Khosravi H., 2013, Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in South Khorasan province in Iran. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 9: 981-992.



Study of performance of some meteorological drought indicators in a semi-arid region (Case study: Kashmar and Bardaskan plains)

Somaye Rajabzade¹, Abolfazl Mosaedi², Mohammad Ghabaei Sough³

- 1-Graduated of Science and Engineering watershed, Ferdowsi University of Mashhad, Razavi Khorasan, Iran.
2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Razavi Khorasan, Iran.
3- Dr, Iranian Water Resources Management Company, Tehran, Iran

Abstract

different indices have been developed to quantify the drought phenomena and have been used in different regions. this study is conducted to study the drought situation and compare the efficiency of the SPI, SPEI, RDI and eRDI and selecting a suitable climatic index for the study area. monthly data of 3 stations close to the area were used to compute the expected indexes on time scale 3, 12, 2 and 48 months and the drought and dry period features such as intensity, duration and continuity of the drought were determined by each of the indicators and were analyzed and analyzed in the continuation of correlation and correlation of indexes. based on the obtained results, between the meteorological indexes, RDIindexe and eRDI indexe have the same performance and are correlated with each other, and the SPEI index has more intensity and more continuity in most of the time scales investigated.)

Keywords: drought, SPEI, RDI, eRDI, Kashmar