

ارزیابی عملکرد شاخص‌های SZI_{snow} و SMRI در پایش خشکسالی هیدرولوژی حوضه‌های برفی با استفاده از GLDAS

فاطمه افشاری پور^۱، محمدرضا شریفی^{۲*} و علی معتمدی^۳

چکیده

شاخص‌های خشکسالی برفی برای پایش خشکسالی در حوضه‌های برفی، استفاده می‌شوند. شاخص SZI_{snow} تاکنون صرفاً در مقیاس قاره‌ای و شاخص SMRI، در مقیاس حوضه‌ای محاسبه شده‌اند. همچنین برای مقایسه عملکرد دو شاخص در یک حوضه برفی معین، نیاز به داشتن یک معیار است. تحقیق حاضر، ضمن محاسبه شاخص SZI_{snow} در مقیاس حوضه‌ای، نسبت Fbench را به عنوان ابزاری برای مقایسه دو شاخص SMRI و SZI_{snow} معرفی کرده است. برای این منظور در حوضه آبریز دز با مساحت ۲۳۲۲۹ کیلومتر مربع، ابتدا با استفاده از GLDAS اقدام به محاسبه هریک از شاخص‌های SMRI و SZI_{snow} در مقیاس زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه در دوره ۲۴ ساله (۱۹۸۲ تا ۲۰۰۶) و سپس مقایسه آن‌ها توسط معیار Fbench شد. نتایج نشان داد، کاربرد شاخص خشکسالی برفی، تحت تأثیر گام‌های زمانی مختلف، متفاوت است. به طوری که در گام زمانی ۳ ماهه به دلیل مثبت شدن Fbench_{SMRI} در ۶۷ درصد ماه‌های سال و متناظر با ماه‌های انباشت و سپس ذوب برف، شاخص SMRI در مقایسه با SZI_{snow} با مثبت شدن Fbench _{SZI_{snow}} به میزان ۱۷ درصد، پایش واقعی تری نسبت به شاخص SSI به دست آمد. این در حالی است که در گام زمانی ۶ ماهه، با وجود برتری مجدد SMRI با مثبت شدن Fbench_{SMRI} به میزان ۵۰ درصد، نسبت به SZI_{snow} با مثبت شدن Fbench_{SMRI} به مقدار ۸ درصد، عملکرد SSI، پایش واقعی تری از وضعیت خشکی به دست آمد. در نهایت، در گام زمانی ۱۲ ماهه، به دلیل منفی شدن ۱۰۰ درصد مقادیر Fbench_{SMRI} و Fbench _{SZI_{snow}} ، شاخص SSI به دلیل تطابق بیشتر با ماه‌های ذوب شامل آوریل، ژوئن و ژوئیه، به عنوان شاخص مناسب برای پایش خشکسالی هیدرولوژی به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی برفی، SZI_{snow} ، SMRI، Fbench، پایگاه GLDAS.

ارجاع: افشاری پور، ف. شریفی، م. ر. و معتمدی، ع. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد شاخص‌های SZI_{snow} و SMRI در پایش خشکسالی هیدرولوژی حوضه‌های برفی با استفاده از GLDAS. نشریه پژوهش آب ایران. ۵۴: ۱۰۷-۹۷. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2024.14819.2613>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- سازمان آب و برق خوزستان.

* نویسنده مسئول: mshaifi@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳

مقدمه

خشکسالی برفی، یک مفهوم جدید برای کمبود بارش برف یا تسریع ذوب برف به دلیل گرم شدن هواست که به تحقیقات گسترده، به‌ویژه در مناطق برفی نیاز دارد (Huang et al., 2024, Wang et al., 2024, Huning and AghaKouchak, 2020). پایش خشکسالی در حوضه‌های برفی، مستلزم استفاده از شاخص‌های ویژه‌ای، با عنوان شاخص‌های خشکسالی برفی است (Pederson et al., 2011; Barnett et al., 2005). شاخص‌های خشکسالی برفی، برای ارزیابی تأثیر ذخایر برف پشته بر منابع آب و اکوسیستم‌ها استفاده می‌شوند (Ludlum, 1978; Wiesnet, 1981). تاکنون شاخص‌های محدودی برای پایش خشکسالی برف توسعه داده شده‌است. از جمله شاخص‌های SWSI (Doesken et al., 1991)،¹ SMRI (Zhang et al., 2019) و (Staudinger et al., 2014)² SZI_{snow} مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang et al., 2019). Staudinger et al. (2014) برای نشان دادن صحت عملکرد شاخص خشکسالی برفی SMRI، از نظر پایش واقعی‌تر خشکسالی در حوضه‌های برفی مورد مطالعه آن‌ها، در مقایسه با شاخص متداول SSI، از معیاری با عنوان Fbench (Schaeffli and Gupta, 2007) استفاده کردند. تحقیقات نشان می‌دهد، شاخص‌های خشکسالی برفی در مقیاس‌های مکانی مختلف شامل مقیاس حوضه‌ای و قاره‌ای استفاده شده‌اند (Tian et al., 2021; Zhang et al., 2019)؛ برای نمونه، Staudinger et al. (2014) در مقیاس حوضه‌ای با مساحت‌های ۲۴ تا ۳۵۲ کیلومترمربع، اقدام به توسعه SMRI کردند. این درحالی‌ست که Zhang et al. (2019) در مطالعه‌ای به توسعه شاخص جدید SZI_{snow}، در مقیاس قاره‌ای اقدام کردند. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان، توصیه به ارزیابی کاربرد شاخص مزبور، در مقیاس حوضه‌ای کردند. به‌منظور محاسبه شاخص SZI_{snow}، برخلاف شاخص SMRI که صرفاً متکی به بارش کل و درصد برف است، از متغیرهای زیادی از جمله تبخیر و تعرق، تبخیر از خاک لخت، رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، رواناب ذوب برف و رطوبت خاک استفاده می‌شود (Tian et al., 2021; Zhang et al., 2019).

(Zhang et al., 2019). از پایگاه اطلاعاتی داده جهانی³ GLDAS برای تعیین مقادیر متغیرهای مورد نیاز در محاسبه شاخص SZIsnow استفاده کردند (Chen et al., 2013; Rodell et al., 2004; Wang et al., 2011). از طرف دیگر، تحقیقاتی در رابطه با ارزیابی خشکسالی برفی نیز صورت گرفته است؛ این درحالی‌ست که از شاخصی با عنوان شاخص خشکسالی برفی استفاده نکردند؛ برای نمونه، Li et al. (2024) در مطالعه‌ای، یک روش ارزیابی با استفاده از محصولات آب معادل برف، برای بررسی رخداد خشکسالی برفی در چین، از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ ارائه کردند. آن‌ها شدیدترین خشکسالی برف، در دهه ۱۹۸۰ که تا سال ۲۰۰۹ ادامه داشت را نشان دادند. همچنین آن‌ها، توزیع خشکسالی برف را در مناطق مختلف چین ارزیابی کردند و نشان دادند مناطق کم‌ارتفاع دارای بیشترین نسبت متوسط سالانه خشکسالی است؛ درحالی‌که مناطق با ارتفاع بالا دارای بیشترین خشکسالی شدید است که در میان مناطق بررسی‌شده، سین‌کیانگ شمالی، بیشترین خشکسالی برف را دارد. در مطالعه دیگر، Wang et al. (2024) تخمینی برای شاخص استاندارد SWE (NSWEI)، با ترکیب تئوری کاپولا، تحت سناریوهای مختلف، برای دوره‌های بازگشت متفاوت، رودخانه تاریم در چین، ارائه کردند تا پیامدهای خشکسالی برف را ارزیابی کنند؛ علاوه‌براین، از مدل جنگل تصادفی (RF) برای پیش‌بینی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی استفاده کردند و نشان دادند: ۱- NSWEI در توصیف خشکسالی برف معقول‌تر از معیارهای مورد استفاده در مطالعات قبلی است، ۲- محتمل‌ترین خشکسالی‌ها که در دوره بازگشت کمتر از ۵۰ سال رخ می‌دهد، متعلق به سناریوی خشکسالی متوسط است، ۳- یک الگوی متضاد در توزیع خشکسالی برف مشاهده شده است، ۴- افزایش خطرات خشکسالی برف در جنوب رودخانه مورد مطالعه، به‌طور کلی با کاهش رطوبت نسبی و افزایش تابش خورشیدی ایجاد می‌شود؛ بنابراین، در مطالعه حاضر که صرفاً پایش خشکسالی، توسط شاخص‌های برفی است، نمی‌توان از روش‌های مزبور استفاده کرد. با توجه به تفاوت احتمالی عملکرد دو شاخص خشکسالی برفی SMRI و SZI_{snow} در یک حوضه مشخص، به‌نظر می‌رسد مقایسه دو شاخص مزبور و

1- Standardized Melt and Rainfall Index

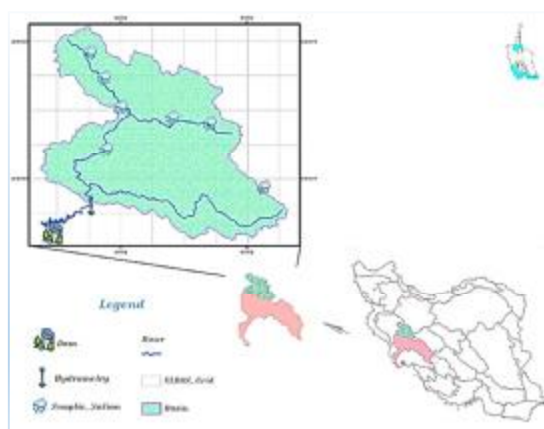
2- Standardized Moisture Anomaly Index

3- Global land data assimilation system

معادل برف (Snow depth water equivalent)، ذوب برف، رواناب حاصل از ذوب برف (Khorram and Sharifi, 2020) و تبخیر را در صورت کمبود داده، ارائه می‌کند (Rodell et al., 2004). به دلیل تغییرات مکانی ویژگی‌های برفی، شامل عمق و آب معادل برف، تحقیقات متنوعی برای شبیه‌سازی مقادیر مزبور، در نقاط فاقد آمار صورت گرفته است (Sharifi et al., 2007). در مطالعه حاضر، از نسخه ۲-GLDAS مدل نوا که دارای مشخصات قدرت تفکیک زمانی یک ژانویه ۱۹۴۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۰ و قدرت تفکیک مکانی یک و ۲۵ درجه است، استفاده شد (Fang et al., 2009).

جدول ۱- نام و مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و

نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
سینوپتیک			
فریدونشهر	۲۴۹۰	۵۰/۱۲۷۲	۳۲/۹۴
الیگودرز	۲۰۲۲/۱	۴۹/۷۰۳۲۴۱	۳۳/۴۰۷۹۲۸
ازنا	۱۸۷۱/۸	۴۹/۴۰۸۰۸۵	۳۳/۴۴۷۲۲۸
بروجرد	۱۶۲۹	۴۸/۷۵۷۷۰۶	۳۳/۹۱۴۷۴
درود	۱۲۲/۳	۴۹/۰۰۴۴۴	۳۳/۵۲۳۶۱۹
سپیددشت	۱۰۲۱	۴۸/۸۸۴۴۰۲	۳۳/۲۱۷۳۰۲
سیلاخور	۱۴۹۶/۹	۴۸/۸۶۹۴۲	۳۳/۷۳۴۸۵
هیدرومتری			
تله زنگ	۶۳۹	۴۸/۷۶۷۵	۳۲/۸۲۱۶۶



شکل ۱- حوضه آبریز دز و ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری و شبکه‌بندی GLDAS

انتخاب شاخص برتر، ضمن اینکه به عنوان یک ضرورت مطرح است، مستلزم محاسبه شاخص SZI_{snow} که قبل از این، صرفاً در مقیاس قاره‌ای برآورد شده، در قالب نوآوری این تحقیق، در مقیاس حوضه‌ای است. همچنین برای مقایسه و ارزیابی مزبور، نیاز به داشتن یک معیار است که با توجه به سابقه استفاده از نسبت F_{bench} که قبل از این، صرفاً به عنوان معیاری برای ارزیابی ضرورت استفاده از شاخص SMRI در حوضه‌های برفی، به کار رفته، به عنوان نوآوری دیگر این تحقیق، برای مقایسه عملکرد دو شاخص SMRI و SZI_{snow} ، استفاده شده است؛ از این رو، در تحقیق حاضر، ضمن محاسبه هر دو شاخص مورد مطالعه، با استفاده از پایگاه اطلاعاتی GLDAS در حوضه آبریز دز در ایستگاه تله زنگ، با استفاده از نسبت F_{bench} به مقایسه و ارزیابی دو شاخص پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دز، بخشی از ارتفاعات زاگرس میانی است. این حوضه، در محدوده عرض جغرافیایی ۱۵ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۱۱ درجه و ۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۱۳ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۱۱ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی، در جنوب غربی ایران واقع شده است. محدوده مورد مطالعه، حوضه آبریز دز، با مساحت ۲۳۲۲۹ کیلومتر مربع و میانگین ارتفاع حوضه از سطح دریا ۲۲۱۲ متر و نسبت برف به کل بارش ۲۰/۶۴ درصد است. در جدول ۱، مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری آورده شده است. جانمایی ایستگاه‌های مزبور در شکل ۱ نمایش داده شده است. دوره زمانی مورد مطالعه، حد فاصل سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۶ است. داده‌های ایستگاه‌های مزبور، همگی از سایت سازمان هواشناسی ایران (<https://data.irimo.ir/>)، به دست آمده است.

محصولات GLDAS

GLDAS سیستم تحلیل و شبیه‌سازی زمین، در پوشش جهانی است که از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی زمینی، با کاربرد مدل‌سازی پیشرفته سطح زمین و تکنیک همانندسازی داده‌ها، یک سری از داده‌های وضعیت سطح زمین نظیر رطوبت خاک، دمای سطح، آب

شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (SSI)

شاخص SPI توسط McKee *et al.* (1993) به منظور پایش خشکسالی هواشناسی ابداع شد. تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت معادله (۱) است:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

که x مقدار متغیر، α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس توزیع و $T(x)$ تابع گاما برازش داده شده است. Y پارامتر تابع گاما می‌باشد.

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

برای محاسبه شاخص SPI ابتدا توزیع احتمالی گاما به سری زمانی بارش با گام زمانی معین شامل ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، با ترکیب داده‌های بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک که در جدول ۱ ارائه شده است، با استفاده از روش تیسن، برازش داده می‌شود. در نهایت، سری‌های زمانی ارتفاع بارندگی از بارش منطقه‌ای (P_{ij}) به دست آمد. که i سال هیدرولوژیک و j ماه مربوط به سال هیدرولوژیک است. اساس این سری‌ها بر پایه معادله (۳) است.

$$R_{i,k} = \sum P_{ij} \quad (3)$$

$$i=1,2,\dots,j=1,2,\dots,12,\dots,k=3,6,12$$

R_{ik} ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مبنای (k) برای مثال در $k=3$ ارتفاع بارش تجمعی در سه ماه اول سال آبی مربوط به سال هیدرولوژیکی i و دوره مبنای k است. در نهایت شاخص SPI بر اساس معادله (۴) محاسبه شد:

$$I_{i,k} = \frac{R_{ik} - R_k}{SR.k} R_k \quad (3)$$

$$i=1,2,\dots,k=3,6,12$$

SP_k و SR_k به ترتیب میانگین مجموع ارتفاع بارش تجمعی و انحراف معیار ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مبنای k است (McKee *et al.*, 1993). در تحقیق حاضر، شاخص SSI مشابه SPI است، با این تفاوت که در معادلات بالا، به جای بارش از دبی ایستگاه تله‌زنگ، باهمان توزیع گاما استفاده شد.

شاخص SMRI

محاسبه شاخص SMRI که برای تحلیل تأثیر ذوب برف و بارش بر رویدادهای سیلاب، خشکسالی و منابع آب استفاده می‌شود، می‌توان از معادلات زیر استفاده کرد (Staudinger *et al.*, 2014). ابتدا، دو پارامتر مورد نیاز برای محاسبه شاخص SMRI استخراج می‌شود:

رواناب حاصل از ذوب برف (RO_{sm}) و بارش ($precipitation$) از محصولات GLDAS-2 استخراج می‌شود. سپس، برای هر دوره زمانی k که می‌تواند ۳، ۶ یا ۱۲ ماه باشد و برای هر سال هیدرولوژیک i و هر ماه j ، مجموع رواناب حاصل از ذوب برف ($RO_{i,k}$) و مجموع بارش ($R_{i,k}$) در حوضه مورد مطالعه محاسبه می‌شود:

$$R_{i,k} = \sum Rainfall_{ij}$$

$$RO_{i,k} = \sum RO_{smij} \quad (5)$$

$$i=1,2,\dots,j=1,2,\dots,12,\dots,k=3,6,12$$

در اینجا، Q_{ik} و R_{ik} به ترتیب ذوب برف تجمعی و بارش تجمعی برای دوره مبنای k است. سپس، با استفاده از میانگین مجموع ذوب برف تجمعی (RO_k)، انحراف معیار ذوب برف تجمعی (SRO_k)، میانگین مجموع بارش تجمعی (R_k) و انحراف معیار بارش (SR_k) برای دوره مبنای k ، شاخص SMRI برای هر سال هیدرولوژیک i و هر دوره زمانی k به شکل رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$SMRI_{i,k} = \frac{kOR - kiOR}{kORS} \quad (6)$$

$$i=1,2,\dots,k=3,6,12$$

در اینجا، RO_k ، SRO_k ، R_k و SR_k به ترتیب میانگین مجموع ذوب برف تجمعی، انحراف معیار ذوب برف تجمعی، میانگین مجموع بارش تجمعی و انحراف معیار بارش برای دوره مبنای k است.

شاخص SZIsnow

Zhang *et al.* (2015) شاخص SZI را توسعه دادند تا آغاز، پایان و شدت یک رویداد خشکسالی چندساله را در مقیاس‌های زمانی مختلف، با استفاده از شبیه‌سازی یک مدل سطح زمین (LSM) تعیین کنند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات SZI با شواهد خشکسالی مشاهده شده مطابقت بیشتری نسبت به SPEI در مناطق با تنش آبی دارد؛ بنابراین نقطه ضعف SZI این بود که در مناطق برفی، عملکرد خوبی را نشان نمی‌داد؛ از این رو، Zhang *et al.* (2019) شاخص مزبور را به نام شاخص SZI_{snow} تحت تأثیر ویژگی‌های برفی توسعه دادند.

پارامترهای اصلی برای محاسبه شاخص مزبور، شامل رواناب کل حوضه (RO)، رواناب بالقوه (PRO)، تبخیر-تعرق (ET)، تبخیر-تعرق بالقوه (PET)، نفوذ خاک (R)، نفوذ خاک بالقوه (PR)، افت رطوبت خاک (L) و افت رطوبت خاک بالقوه (PL) هستند (Tian *et al.*, 2021).

$$Fbench = 1 - \frac{\sum [xSSI(t) - xSMRI(t)]^2}{\sum (xSSI(t) - xSPI(t))^2} \quad (7)$$

(xSSI(t)) شاخص خشکسالی هیدرولوژی با گام زمانی مشخص، برای کل سری زمانی شاخص‌ها (۱۹۸۲-۲۰۰۶) محاسبه شدند. همه شاخص‌ها برای دوره‌های تجميع مختلف (۳، ۶ و ۱۲ ماه) از سال آبی میلادی ماه اکتبر محاسبه شدند، برای مثال SMRI-6 برای SMRI محاسبه شده براساس دوره تجميع ۶ ماهه قبل از آن است.

نتایج و بحث

Fbench شاخص‌های SMRI و SZI_{snow}

جدول ۳ مقادیر Fbench به‌ازای هریک از دو شاخص SMRI و SZI_{snow} و در گام‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، آورده شده است. Fbench_{SMRI} در گام زمانی ۳ ماهه، ماه‌های اکتبر، نوامبر، مارس و آوریل، مقادیر منفی و در مابقی ماه‌ها مقادیر مثبت شدند. به‌این‌ترتیب، در ۶۷ درصد از تعداد ماه‌ها، مقادیر Fbench مثبت به‌دست آمد. این درحالی‌ست که Fbench_{SZI_{snow}} در گام زمانی ۳ ماهه، صرفاً در دو ماه ژانویه و فوریه، دارای مقادیر مثبت ۰/۴ و ۰/۳۲ به‌دست آمد. به‌عبارت‌دیگر صرفاً در ۱۷ درصد از مواقع، Fbench مثبت به‌دست آمد. از آن‌جایی که مقادیر مثبت‌تر Fbench، حاکی از انطباق بیشتر مقدار شاخص خشکسالی برفی با شاخص SSI بوده و بیانگر کارایی شاخص خشکسالی برفی به‌جای شاخص خشکسالی هیدرولوژی، به‌عنوان مبنای میزان خشکسالی، است، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص خشکسالی برفی SMRI در مقایسه با شاخص SZI_{snow}، در گام زمانی ۳ ماهه، وضعیت خشکسالی در حوضه برفی مورد مطالعه را بهتر نشان می‌دهد. همچنین در گام زمانی ۶ ماهه ملاحظه می‌شود که شاخص SMRI با داشتن ۵۰ درصد تطبیق با مقادیر مثبت Fbench در مقایسه با شاخص SZI_{snow} با ۸ درصد تطبیق با مقادیر مثبت Fbench، نمایانگر واقعی‌تری از وضعیت رواناب حوضه، به‌عنوان معیاری برای خشکسالی است.

در گام زمانی ۱۲ ماهه، همان‌طور که مقادیر Fbench مربوط به هر دو شاخص SMRI و SZI_{snow} نشان می‌دهد، در همه موارد مقادیر Fbench منفی به‌دست آمده است. به‌این‌معنی که در پایش خشکسالی با گام زمانی ۱۲ ماهه، ضرورتی به استفاده از شاخص خشکسالی برفی نبوده و

Zhang et al, 2019). شاخص SZI_{snow} توسط پارامترهای مذکور، پس از پردازش داده‌های GLDAS-2، از طریق استانداردسازی شاخص ناهنجاری رطوبت برف Z_{snow} برآورد می‌شود. Z_{snow}، اختلاف بارش کل (P) و بارش محاسبه شده ($\hat{P}_{snow}$) است. برای این منظور از مقایسه برازش چهار توزیع احتمالاتی پیرسون نوع سه، لگ-لجستیک، لگ‌نرمال و لجستیک برای استانداردسازی Z_{snow} استفاده شد (Zhang et al., 2019). برای اطلاع از جزئیات محاسبه شاخص Z_{snow} به مقاله (Tian et al., 2021) مراجعه شود.

طبقه‌بندی خشکسالی در شاخص‌های SSI، SPI، SMRI و SZI_{snow} در جدول ۲ نشان داده شده است (Tian et al., 2021; Zhang et al, 2019).

جدول ۲- مقادیر آستانه استاندارد شده برای طبقه‌بندی خشکسالی و رطوبت SZI_{snow}، SPI، SMRI، SSI

طبقه‌بندی	مقدار آستانه شاخص‌های SZI _{snow} ، SMRI، SSI و SPI
خشکسالی حاد	$\alpha < -2$
خشکسالی شدید	$-2 \leq \alpha < -1/5$
خشکسالی متوسط	$-1/5 \leq \alpha < -1$
خشکسالی خفیف	$-1 \leq \alpha < -0/5$
نرمال	$-0/5 \leq \alpha < 0/5$

Fbench

Fbench معیار توسعه داده شده توسط Schaeffli & Gupta (2007) است. آن‌ها برای نشان دادن اینکه استفاده از شاخص خشکسالی برفی به‌جای شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SSI برای نمایاندن خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه‌های برفی، دارای برتری است، اقدام به توسعه معیار مزبور کردند. مثبت بودن Fbench، حاکی از مناسب‌تر بودن شاخص خشکسالی برفی نسبت به شاخص خشکسالی غیربرفی SSI، برای نمایاندن خشکسالی در حوضه‌های برفی است. این درحالی‌ست که منفی شدن مقدار Fbench، حاکی از اختلاف زیاد شاخص خشکسالی برفی با شاخص SSI و در نتیجه عدم ضرورت جایگزینی شاخص خشکسالی SSI، با شاخص خشکسالی برفی است. معادله ۷، نحوه محاسبه Fbench را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقادیر استاندارد Fbench در شاخص‌های SMRI و

SZI_{snow} در مراحل زمانی ۳ ماهه، ۶ ماهه و ۱۲ ماهه

۳ ماه	Fbench	
	SMRI	SZI _{snow}
Oct	-۰/۶۱۶	-۰/۰۷۴
Nov	-۰/۶۱۲	-۰/۲۹۰
Dec	-۰/۵۳۹	-۰/۱۲۲
Jan	-۰/۸۶۴	-۰/۴۰۰
Feb	-۰/۴۸۷	-۰/۳۲۲
Mar	-۰/۲۸۲	-۰/۱۷۹
Apr	-۰/۵۱۴	-۰/۰۸۴
May	-۰/۵۳۹	-۰/۰۱۸
Jun	-۰/۳۱۱	-۰/۰۷۷
Jul	-۰/۱۸۶	-۰/۰۸۴
Aug	-۰/۰۸۴	-۰/۱۸۲
Sep	-۰/۰۵۹	-۰/۵۰۵
۶ ماه	Percent	Percent
	%۶۷	%۱۷
Oct	-۰/۰۱۸	-۰/۰۵۳
Nov	-۰/۴۵۱	-۰/۲۲۶
Dec	-۰/۱۴۵	-۰/۹۶
Jan	-۰/۴۵۳	-۰/۰۷۶
Feb	-۰/۲۸۳	-۰/۱۲۶
Mar	-۰/۰۷۸	-۰/۲۰۵
Apr	-۰/۳۸۰	-۰/۰۸۷
May	-۰/۰۴۰	-۰/۵۲۸
Jun	-۰/۰۱۳	-۰/۰۶۸
Jul	-۰/۱۲۷	-۰/۰۱۶
Aug	-۰/۱۸۰	-۰/۱۲۴
Sep	-۰/۰۰۶	-۰/۰۴۲
۱۲ ماه	%۵۰	%۸
Oct	-۱/۶۴۳	-۰/۴۰۹
Nov	-۲/۰۶۲	-۰/۵۶۶
Dec	-۲/۰۷۳	-۰/۵۴۳
Jan	-۱/۷۳۳	-۰/۵۳۳
Feb	-۱/۶۸۳	-۰/۵۸۸
Mar	-۱/۶۷۴	-۰/۷۰۹
Apr	-۱/۱۸۲	-۰/۷۰۵
May	-۱/۹۳۲	-۰/۶۸۷
Jun	-۱/۷۸۷	-۰/۶۰۵
Jul	-۲/۰۶۴	-۰/۵۹۵
Aug	-۲/۰۹۷	-۰/۴۷۴
Sep	-۱/۹۳۴	-۰/۰۴۱
	%۰	%۰

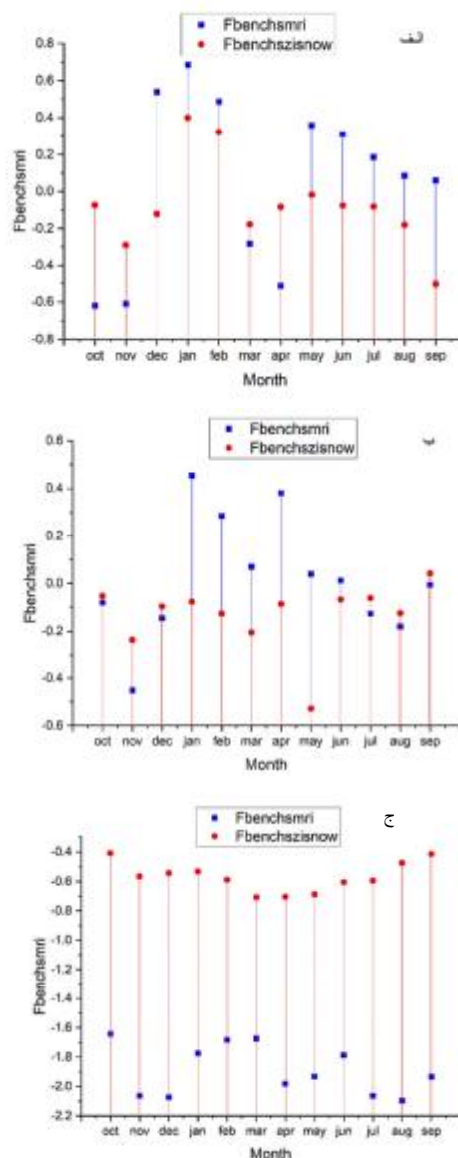
استفاده از شاخص معمولی SSI کفایت می‌کند. به نظر می‌رسد با افزایش طول گام زمانی از ۳ به ۶ و سپس به ۱۲ ماه، فرصت لازم برای ذوب‌شدن برف انباشته و مشارکت آن در تولید رواناب و در نهایت جریان آبراهه‌ای، ایجاد خواهد شد. به این ترتیب تأثیر تأخیری برف انباشته، بر رواناب و ایجاد آثار خشکی ظاهری، که پایش آن با شاخص خاصی با عنوان شاخص خشکسالی، می‌بایست انجام گیرد، کمتر خواهد شد. تا جایی که در گام زمانی ۱۲ ماهه، ضرورتی به استفاده از شاخص خشکسالی برفی، در گام مزبور، نخواهد بود. با این حال، از آنجایی که مقادیر Fbench متعلق به SZI_{snow}، در مقایسه با مقادیر متناظر در شاخص SMRI، بزرگ‌تر و فاصله کمتری با صفر دارند؛ از این رو می‌توان نتیجه گرفت در گام زمانی ۱۲ ماهه، شاخص SZI_{snow}، در مقایسه با شاخص SMRI و برخلاف دو گام زمانی ۳ و ۶ ماهه، قابلیت بهتری در پایش خشکسالی محدوده مورد مطالعه، نشان داده است. به منظور بهتر نشان دادن مقایسه کارایی دو شاخص SMRI و SZI_{snow} در پایش خشکسالی، مقادیر Fbench دو شاخص، به تفکیک گام‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۲ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در گام‌های ۳ و ۶ ماهه، در تعداد ماه‌های بیشتری، مقادیر Fbench_{SMRI}، نسبت به مقادیر Fbench_{SZI_{snow}}، دارای مقادیر بزرگ‌تر هستند. به طوری که در ۸ ماه از ۱۲ ماه سال، بزرگ‌تر بودن دو مقدار مزبور، در گام زمانی ۳ ماهه و ۶ ماه از ۱۲ ماه، در گام زمانی ۶ ماهه، قابل مشاهده است. با وجود تساوی تعداد ماه‌هایی که در آن‌ها Fbench_{SMRI}، از Fbench_{SZI_{snow}}، بیشتر است، با تعداد ماه‌هایی که برعکس، تعداد Fbench_{SZI_{snow}}، از Fbench_{SMRI}، بیشتر است، به دلیل نزدیک بودن مقادیر دو Fbench در ماه‌های اکتبر، دسامبر، ژوئیه، اوت و سپتامبر که در آن‌ها Fbench_{SZI_{snow}}، اندکی بیشتر از Fbench_{SMRI} هستند، با اندکی اغماض، می‌توان گفت در اکثر ماه‌ها، مقادیر Fbench_{SMRI}، در مقایسه با Fbench_{SZI_{snow}}، بیشتر است؛ از این رو، به استناد نمودار ۲، می‌توان برتری شاخص SMRI را نسبت به شاخص SZI_{snow}، در گام زمانی ۶ ماهه، در نمایاندن خشکسالی، مشاهده کرد.

شد. نمودار مندرج در شکل ۲، با نشان دادن بیشتر بودن مقادیر $F_{bench_{szisnow}}$ نسبت به مقادیر $F_{bench_{SMRI}}$ برتری مزبور را در گام زمانی ۱۲ ماهه، به وضوح نشان می‌دهد.

نسبت برف به کل بارش در حوضه

به منظور بررسی کارایی هریک از دو شاخص مورد مطالعه، درخصوص میزان انطباق هریک با شرایط واقعی، اقدام به مقایسه مقادیر هریک از دو شاخص با مقادیر حاصل از نسبت عمق برف به عمق بارش کل و همچنین مقادیر F_{bench} شد. همچنین، نمودار مقادیر SSI ، به تفکیک هریک از گام‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۳، انطباق $F_{bench_{SMRI}}$ با نمودار تغییرات نسبت برفی به بارش کل در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه که بیشترین سهم برفی را نسبت به سایر ماه‌ها، دارند، مشاهده می‌شود. به طوری که مقادیر مثبت $F_{bench_{SMRI}}$ عمدتاً در ماه‌هایی که دارای سهم برفی بیشتری دارند، مشاهده می‌شود. این درحالی‌ست که مقادیر کوچک و همچنین منفی $F_{bench_{SMRI}}$ مربوط به ماه‌هایی با نسبت برف به بارش کل، صفر یا اندک است. انطباق مزبور و همچنین انطباق مقادیر SSI با مقادیر نسبت برف به بارش کل به طوری که مقادیر مثبت آن تقریباً همزمان با زمان‌های انباشت برف است، بیان‌کننده تعبیر فیزیکی F_{bench} به عنوان معیاری که دربرگیرنده سه متغیر $SMRI$ ، SSI و SPI است، بوده و برای نشان دادن ضرورت نمایاندن وضعیت خشکی حوضه‌های برفی با شاخص خشکسالی برفی، به جای شاخص خشکسالی SSI است. همچنین ملاحظه می‌شود که مقادیر مثبت شاخص خشکسالی $SMRI$ که نشان از وضعیت تر دارد، مربوط به ماه‌های انباشت برف و بعد از آن‌ها شامل ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، مه و ژوئن است. این درحالی‌ست که در نمودار SSI ، در ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه که مصادف با ماه‌های ذوب برف هستند، دارای مقادیر نزدیک به صفر است. حال آنکه مقادیر $SMRI$ در ماه‌های ذوب، حاکی از وضعیت مرطوب است؛ از این رو، ملاحظه می‌شود که $SMRI$ در مقایسه با SSI ، نمایه واقعی‌تری از وضعیت خشکی هیدرولوژیکی حوضه است. از سویی دیگر، در گام زمانی سه ماهه به منظور مقایسه کارایی $SZIsnow$ با



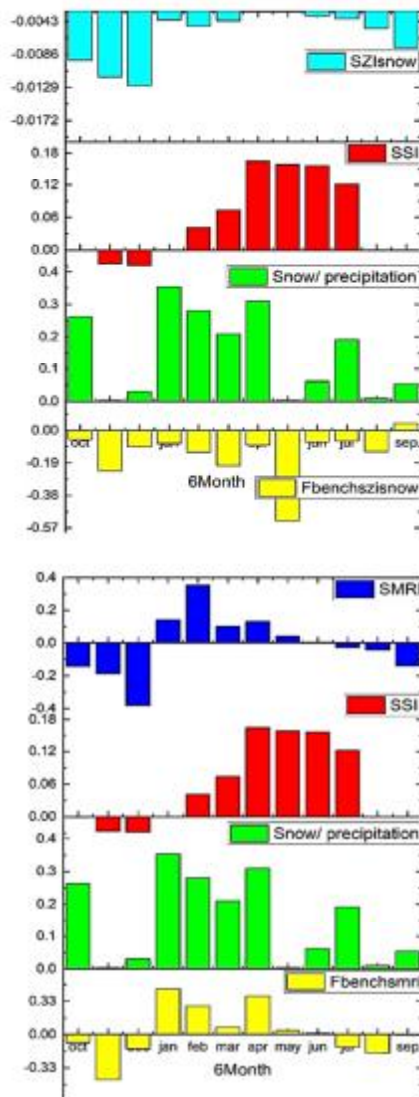
شکل ۲- مقایسه دو شاخص برفی $SMRI$ و SZI_{snow} ، از طریق شاخص F_{bench} در گام زمانی ۳ ماهه (الف)، ۶ ماهه (ب) و ۱۲ ماهه (ج)

شکل ۲، برتری شاخص SZI_{snow} در مقایسه با شاخص $SMRI$ در گام زمانی ۱۲ ماه را به دلیل بیشتر بودن مقادیر $F_{bench_{szisnow}}$ نسبت به مقادیر $F_{bench_{SMRI}}$ در همه ماه‌ها، نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه شد، مقادیر F_{bench} مربوط به هر دو شاخص $SMRI$ و SZI_{snow} ، منفی به دست آمده‌اند؛ از این رو مقایسه عملکرد دو شاخص از نظر ملاک F_{bench} ، براساس قدر مطلق مقادیر F_{bench} و اینکه کمتر بودن مقدار F_{bench} ، حاکی از برتری عملکرد شاخص در پایش خشکسالی است، بحث

SMRI، نمودار SZIsnow با نمودارهای SSI، نسبت برف به کل بارش و Fbench_{SZIsnow} به‌طور یک‌جا در شکل ۳، با هم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌دلیل عدم تبعیت تغییرات SZIsnow از نسبت برف به عمق بارش کل و در نتیجه عدم انطباق با شرایط واقعی، این شاخص در ماه‌های انباشت برف و همچنین ماه‌های ذوب برف دارای مقادیر منفی که نشانه خشکی است، می‌باشد؛ از این‌رو، شاخص SZIsnow، در گام زمانی سه ماهه، بیانگر وضعیت خشکی مطابق با واقعیت نیست. عدم کارایی شاخص SZIsnow را می‌توان در منفی‌بودن مقادیر Fbench_{SZIsnow} مربوط به ماه‌های انباشت برف و همچنین ذوب برف، ملاحظه کرد. به این ترتیب در مقیاس زمانی سه‌ماهه، شاخص SZIsnow در مقایسه با شاخص SMRI، فاقد کارایی لازم برای پایش خشکی، است. شکل ۴، ارزیابی و مقایسه هریک از شاخص‌های SMRI و SZIsnow را به تفکیک و در گام زمانی شش‌ماهه، نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، انطباق تغییرات Fbench_{SMRI} با تغییرات نسبت برف به بارش کل، در مقایسه با مورد مشابه در گام زمانی سه‌ماهه، کمتر است؛ به‌طوری‌که علی‌رغم وجود برف در ماه‌های اکتبر، نوامبر، ژوئن، ژوئیه و اوت که می‌بایست منجر به مقادیر مثبت Fbench_{SMRI} شود، ملاحظه می‌شود که شاخص اخیر دارای مقادیر منفی است. لیکن در ماه‌های انباشت برف شامل ژانویه، فوریه، مارچ و آوریل، مقادیر Fbench_{SMRI} مثبت هستند؛ از این‌رو می‌توان گفت ضرورت جایگزینی شاخص خشکسالی SSI با شاخص SMRI، در مقایسه با گام زمانی سه‌ماهه، کمتر است. از طرفی، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقایسه تطابق تغییرات SSI با مقادیر نسبت برف به بارش کل، در مقایسه با SMRI و نسبت برف به بارش، حاکی از انطباق بیشتر SSI با نسبت برف به بارش کل است؛ به‌طوری‌که در ماه‌های ذوب شامل ژوئن، ژوئیه و اوت مقادیر SSI مثبت بوده، حال آنکه SMRI دارای مقادیر منفی است. به عبارت دیگر ضمن تأیید کارکرد نسبت Fbench به عنوان معیاری برای میزان کارایی شاخص خشکسالی برفی، می‌توان نتیجه گرفت در گام زمانی شش‌ماهه، استفاده از شاخص خشکسالی SSI برای پایش خشکسالی حوضه برفی، در مقایسه با استفاده از شاخص SMRI، دارای اولویت است. از سویی دیگر در شکل ۴، مقایسه مقادیر Fbench، SZIsnow و SSI با

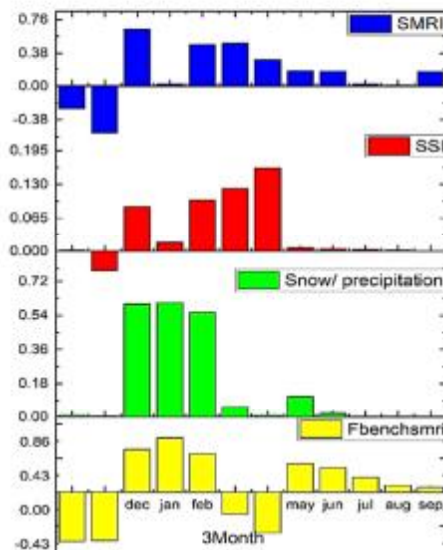
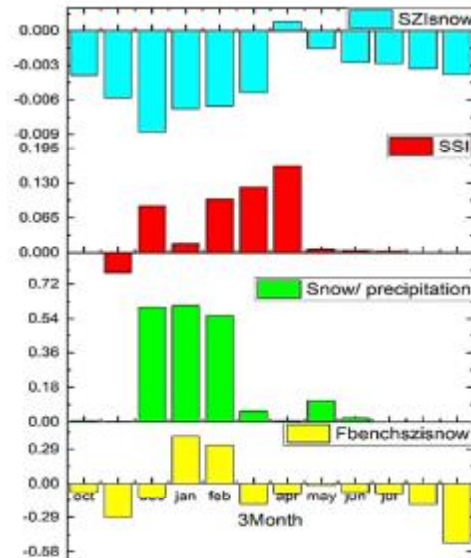
مقادیر نسبت برف به بارش کل نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود اولاً مقادیر Fbench_{SZIsnow} در همه ماه‌هایی که مصادف با انباشت برف هستند، برخلاف انتظار که می‌بایست دارای مقادیر مثبت باشد، دارای مقادیر منفی است؛ از این‌رو، مقادیر SZIsnow نیز بدون تبعیت از تغییرات انباشت و سپس ذوب برف، مقادیری منفی به‌دست آمده‌اند. این درحالی است که SSI در ماه‌های ذوب برف شامل مارس، آوریل، مه و ژوئن دارای مقادیر مثبت که بیانگر وضعیت مرطوب است، می‌باشد. به این ترتیب در گام زمانی شش‌ماهه، مشابه ارزیابی SMRI، شاخص مناسب برای پایش خشکسالی هیدرولوژی SSI است. مقایسه شاخص‌های SMRI و SZIsnow نشان می‌دهد که با وجود کارکرد واقعی‌تر SSI در پایش خشکسالی با گام زمانی شش‌ماهه نسبت به هر دو شاخص مزبور کارکرد SMRI در مقایسه با کارکرد SZIsnow، در گام زمانی مذکور، واقعی‌تر بوده است. همانند گام‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه، هریک از نمودارهای تغییرات SMRI و SZIsnow، به‌طور مجزا، با نمودارهای SSI، نسبت برف به کل بارش و Fbench مربوط به هر شاخص، در گام زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر Fbench_{SMRI} با وجود انباشت برف در همه ماه‌ها که در نمودار نسبت برف به بارش کل نشان داده شده، دارای مقادیر منفی است. به این معنا که شاخص خشکسالی غالب برای نمایاندن خشکی در گام زمانی ۱۲ ماهه، شاخص SSI است. نتیجه اخیر، در مقایسه SSI با نمودار مقادیر نسبت برف به بارش کل نیز ملاحظه می‌شود؛ به‌طوری‌که متناسب با همه ماه‌ها که شامل انباشت برف هستند و سپس منتهی به ذوب برف می‌شوند، مقادیر SSI، مثبت به‌دست آمده‌است. همچنین SMRI، با وجود مثبت‌بودن در ماه‌های متناظر با ماه‌های ذوب شامل آوریل، مه و ژوئن، به‌دلیل منفی‌شدن Fbench_{SMRI} و همچنین تطابق بیشتر SSI با مقادیر نسبت برف به بارش کل، فاقد قابلیت جایگزینی برای SSI است. از سویی دیگر، در ارزیابی SZIsnow، ملاحظه می‌شود همه مقادیر آن حتی در ماه‌های ذوب برف، منفی به‌دست آمده است. همچنین همه مقادیر Fbench_{SZIsnow}، منفی به‌دست آمده است. این درحالی است که مقادیر نسبت برف به بارش کل در همه ماه‌ها، به‌جز ژوئیه، دارای مقادیر بیشتر از صفر

است. از طرفی شاخص SSI مشابه با نمودار نسبت برف به بارش کل، دارای مقادیر مثبت است؛ از این رو در گام ۱۲ ماهه، شاخص پایش خشکسالی، همان SSI است.



شکل ۴- مقایسه شاخص‌های SZIsnow و SMRI براساس SSI. نسبت برف به بارش کل و Fbench به‌ازای گام زمانی گام زمانی شش‌ماهه

بنابراین، عملکرد شاخص SZIsnow، به‌عنوان یک شاخص جدید برفی، نسبت به SMRI، در حوضه مورد مطالعه، ضعیف‌تر به‌دست آمد. این درحالی‌است که در تحقیقات انجام‌شده توسط Zhang et al., (2019) و Tian et al., (2021)، شاخص SZIsnow در مقایسه با شاخص‌های خشکسالی برفی SWSI و SWI، در مقیاس قاره‌ای، به‌عنوان شاخص برتر معرفی و پایش واقعی‌تری از خشکسالی را نشان داد؛ بنابراین به نظر می‌رسد عملکرد شاخص SZIsnow تحت‌تأثیر محدوده مورد مطالعه و وسعت مکانی، نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی برف، متفاوت باشد.



شکل ۳- مقایسه شاخص‌های SZIsnow و SMRI براساس SSI. نسبت برف به بارش کل و Fbench به‌ازای گام زمانی گام زمانی ۳ ماهه

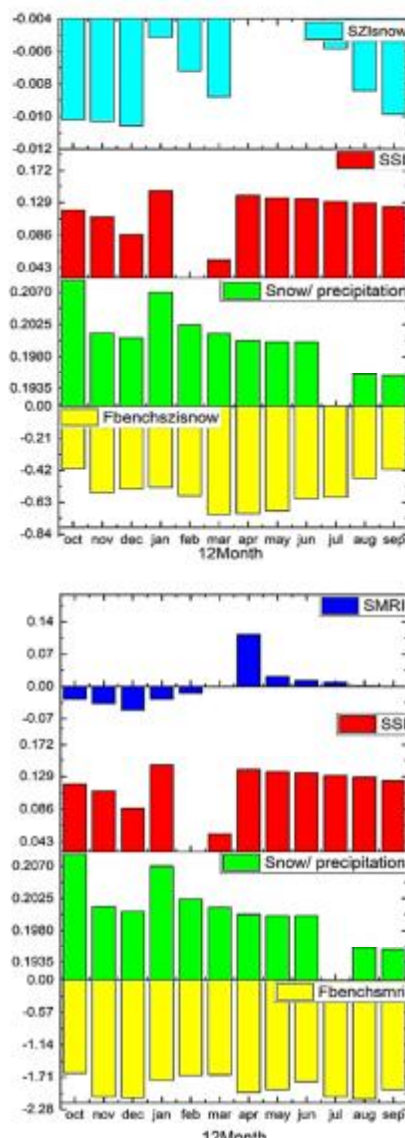
شاخص معمول SSI، برتری دارد. این در حالی‌ست که با افزایش گام زمانی، شاخص SSI، قابلیت بهتری برای نمایاندن وضعیت خشکی داشت. در همه گام‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، شاخص SMRI در مقایسه با $SZIsnow$ ، با توجه به تغییرات ماهانه نسبت برف به بارش کل حوضه، پایش واقعی‌تری از خشکسالی را نشان داد. هرچند در گام زمانی ۱۲ ماهه، اختلاف کمتر مقادیر $Fbench_{SZIsnow}$ نسبت به صفر که مبین مثبت‌تربودن آن است، در مقایسه با بیش‌تربودن اختلاف مزبور بین $Fbench_{SMRI}$ و صفر، حاکی از برتری SZIsnow نسبت به SMRI است. با این حال، عملکرد شاخص $SZIsnow$ به‌عنوان یک شاخص جدید برفی نسبت به SMRI در حوضه مورد مطالعه، ضعیف‌تر به‌دست‌آمد؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد عملکرد شاخص $SZIsnow$ تحت‌تأثیر محدوده مورد مطالعه و وسعت مکانی، نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی برف، متفاوت باشد؛ از این‌رو توصیه می‌شود به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد شاخص $SZIsnow$ محاسبه آن در حوضه‌های دیگر و مقایسه با دیگر شاخص‌های برفی، مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

در انجام این تحقیق از سازمان آب و برق خوزستان، به‌واسطه فراهم آوردن برخی اطلاعات مورد نیاز، قدردانی می‌شود. همچنین، نویسندگان از حمایت مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز، (شماره پژوهانه: SCU.WH1402.26878) کمال تشکر را دارند.

منابع

1. Barnett T. P. Adam J. C. and Lettenmaier D. P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066): 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>.
2. Doesken N. J. McKee T. B. and Kleist J. D. 1991. Development of a surface water supply index for the western United States, final report 91-3, Dep. of Atmos. Sci., Colo. State Univ., Fort Collins, Colo.
3. Fang F. and Oosterlee C. W. 2009. A novel pricing method for European options based on Fourier-cosine series expansions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 31(2): 826-848. <https://doi.org/10.1137/080718061>.
4. Huang Y. Jiang Y. Jiang B. Bailey R. T. Masud B. Smerdon B. and Faramarzi M.



شکل ۵ - مقایسه شاخص‌های SMRI و SZIsnow براساس SSI، نسبت برف به بارش کل و $Fbench$ به‌ازای گام زمانی گام زمانی ۱۲ ماهه

نتیجه‌گیری

عملکرد دو شاخص خشکسالی برفی SMRI و $SZIsnow$ ، در مقیاس حوضه آبریز و تحت وضعیت انباشت و ذوب برف، متفاوت به‌دست‌آمد. با توجه به تأثیر برف انباشته بر تأخیر در دبی جریان‌یافته در رودخانه، برای ارزیابی کارکرد شاخص توسعه‌یافته خشکسالی برفی، از اختلاف مقادیر آن با مقادیر متناظر آن در شاخص SSI و در قالب معیاری با عنوان $Fbench$ استفاده می‌شود. نتایج نشان داد در گام‌های زمانی کوتاه‌تر نظیر گام ۳ ماهه، استفاده از شاخص خشکسالی برفی SMRI، در مقایسه با استفاده از

15. Tian L. Zhang B. Q. and Wu P. 2021. A global drought dataset of standardized moisture anomaly index incorporating snow dynamics (SZISnow) and its application in identifying large-scale drought events. *Earth Syst. Sci. Data*, 14: 2259–2278. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2259-2022>.
16. Wang B. and Lan C. Q. 2011. Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga *Neochloris oleoabundans* in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent. *Bioresour. Technol.*, 102(10): 5639–5644. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.054>
17. Wiesnet D. 1981. Winter snow drought. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union*, 62(14): 137–137. <https://doi.org/10.1029/EO062i014p00137-04>.
18. Zhang B. Xia Y. Huning L. S. Wei J. Wang G. and AghaKouchak A. 2019. A framework for global multicategory, and, multiscale, drought characterization accounting for snow processes. *Water Resources Research*, 55, <https://doi.org/10.1029/2019WR025529>.
19. Zhang B. Q. Zhao X. N. Jin J. M. and Wu P. T. 2015. Development and evaluation of a physically based multiscale drought index: The standardized moisture anomaly index. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 120(11): 575–588. <https://doi.org/10.1002/2015JD023772>.
20. Wang Z. Huang S. Mu Z. Leng G. Duan W. Ling H. and Peng J. 2024. Relative humidity and solar radiation exacerbate snow drought risk in the headstreams of the Tarim River. *Atmospheric Research*, 297: 107091. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107091>.
21. Khorram M. and Sharifi M. R. 2020. Evaluation of SRM model performance under the influence of different months of snow melting (case study: Doab Samsami watershed). *Iranian Water Research*, 14(1): 109–117. (In Persian).
2024. Modelling impacts of climate change on snow drought, groundwater drought, and their feedback mechanism in a snow-dominated watershed in western Canada. *Journal of Hydrology*, 131342.
5. Huning L. S. & AghaKouchak A. 2020. Global snowdrought hotspots and characteristics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33): 19753–19759. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915921117>.
6. Pederson G. T. Gray S. T. Woodhouse C. A. Betancourt J. L. Fagre D. B. Littell J. S. and Graumlich L. J. 2011. The unusual nature of recent snowpack declines in the North American Cordillera. *science*, 333(6040): 332–335.
7. Ludlum D. M. 1978. The snowfall season of 1976. *Weatherwise*, 31(1): 20–46. <https://doi.org/10.1080/00431672.1978.9931847>.
8. Li Y. Huang X. Ma Y. Feng Q. and Liang T. 2024. Snow Drought Patterns and Their Spatiotemporal Heterogeneity in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 2029–2036. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3344763>
9. McKee T. B. Doesken N. J. and Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scale. In *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, USA, 17–22 January 1993; American Meteorological Society: Boston, MA, USA; pp. 179–184.
10. Rodell M. Houser P. R. Jambor U. E. A. Gottschalk J. Mitchell K. Meng C. J. and Toll D. 2004. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society*, 85(3): 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.
11. Staudinger M. Stahl K. and Seibert J. 2014. A drought index accounting for snow. *Water Resour.* 50: 7861–7872. <https://doi.org/10.1002/2013WR015143>.
12. Schaeffli B. and Gupta H. V. 2007. Do Nash values have value?. *Hydrological processes*, 21: 2075–2080.
13. Sharifi M. R. Akhoond-Ali A. M. Porhemmat J. and Mohammadi J. 2007. Investigating the effect of height, direction and steepness of slope on snow depth in Samsami basin. *Iran Water Resources Research*, 3(3): 69–79. (In Persian).
14. Chen X. and Yan G. Y. 2013. Novel human lncRNA–disease association inference based on lncRNA expression profiles. *Bioinformatics*, 29(20): 2617–2624.

