



تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال

پوهنځیار فضل الحق حسنی^۱، پوهاند صدیق الله رشتین^۲، پوهاند اسدالله رحمتزی^۳^{۱،۲،۳} دپارتمنت هایدرومتیورولوژی، پوهنځی زمین شناسی، پوهنتون کابل، کابل، افغانستانایمیل: hass.fazalhaq@gmail.com

چکیده

تغییرات عناصر متیورولوژیکی، به ویژه بارندگی، از مهم ترین ویژگی های سیستم های اتموسفری و هایدرولوژیکی می باشد. خشکسالی به عنوان یکی از خطرناک ترین پدیده های طبیعی، بسته به شدت و دوام خود، می تواند خسارات گسترده ای بالای جامعه و محیط زیست وارد کند؛ از این رو بررسی و ارزیابی آن اهمیت ویژه دارد. این تحقیق با هدف تحلیل خشکسالی در حوزه دریایی شمال و با استفاده از روش های احصائیوی انجام شده است. در این مطالعه شاخص بارندگی معیاری (SPI) به کار رفته و نتایج Normal SPI و Log-Normal SPI با یکدیگر مقایسه شده اند. مبنای تحلیل دیتای بارندگی ۱۳ استیشن در محدوده زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲ بوده است. نتایج نشان می دهد که در این دوره ۸ خشکسالی متوسط و یک خشکسالی شدید رخ داده و دوره های بازگشت خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید به ترتیب ۲-۳، ۱۰-۱۵ و ۲۰-۲۵ سال تخمین گردیده است. از سوی دیگر، کاهش بارندگی ناشی از تغییرات اقلیمی در این حوزه قابل توجه می باشد. **واژه های کلیدی:** بارندگی؛ خشکسالی؛ دوره برگشت؛ منابع آب؛ حوزه دریایی شمال

Assessment of Drought Impacts in the North River Basin

Fazalhaq Hassanzay¹, Sediqullah Reshteen², Asadullah Rahmatzai³^{1,2,3}Hydrometeorology Department, Faculty of Geoscience, Kabul University, Kabul, AfghanistanEmail: hass.fazalhaq@gmail.com

Abstract

Variations in meteorological elements, particularly precipitation, are among the most essential characteristics of atmospheric and hydrological systems. Drought, as one of the most hazardous natural phenomena, can cause extensive negative impacts on society and the environment depending on its intensity and duration; therefore, its assessment is of great importance. This study aims to analyze drought conditions in the North River Basin using statistical approaches. The Standardized Precipitation Index (SPI) was applied, and the Normal and Log-Normal SPI results were compared. The analysis was based on precipitation data from 13 stations spanning 1979–2022. The results indicate that eight moderate drought events and one severe drought event occurred during the study period. Furthermore, the return periods of mild, severe, and extremely severe droughts were estimated at approximately 2–3, 10–15, and 20–25 years, respectively. In addition, a notable decrease in precipitation associated with climate change has been observed in the basin.

Keywords: Precipitation; Drought; Return Period; Water Resources; North River Basin

مقدمه

الحمد لله رب العلمین و الصلوة والسلام علی سید المرسلین و علی اله و اصحابه اجمعین، اما بعد. خشکسالی به عنوان یک امتحان و آزمایش الهی در قرآن کریم آمده است. چنانچه خداوند متعال می‌فرماید: "وَلَقَدْ أَخَذْنَا آلَ فِرْعَوْنَ بِالسِّنِينَ وَنَقْصٍ مِّنَ الثَّمَرَاتِ لَعَلَّهُمْ يَذَّكَّرُونَ" (الأعراف، آیه: ۱۳۰). ترجمه: "و یقیناً ما خاندان فرعون را به سال‌های پیاپی خشکسالی و کمبود میوه‌ها و محصولات گرفتار ساختیم، تا شاید پند بگیرند و به هوش آیند". در این آیه مبارکه اشاره به قحطی و کمبود منابع آب به عنوان تنبیه و آزمایش الهی آمده است. در احادیث نبوی نیز موضوع آب و مدیریت آن اهمیت ویژه‌ای دارد. پیامبر اکرم (صلی الله علیه و سلم) در حدیثی فرمودند: "النَّاسُ شُرَكَاءُ فِي ثَلَاثٍ: فِي الْكَلَالِ، وَالْمَاءِ، وَالنَّارِ" (سنن أبی داود، حدیث ۳۴۷۷). ترجمه: "مردم در سه چیز شریک‌اند: در چراگاه، در آب، و در آتش". این حدیث مبارک در واقع بیانگر حق عمومی مردم در دسترسی به آب است و بر ضرورت مدیریت عادلانه آن تأکید می‌کند. در هنگام خشکسالی نیز سنت استسقاء یا نماز طلب باران توسط پیامبر (صلی الله علیه و سلم) برای درخواست رحمت الهی توصیه شده است، چنانکه انس بن مالک (رض) روایت می‌کند: "أَصَابَ النَّاسَ قَحْطٌ فِي زَمَنِ النَّبِيِّ فَبَيْنَا هُوَ يَخْطُبُ قَامَ رَجُلٌ فَقَالَ: يَا رَسُولَ اللَّهِ، هَلَكَ الثَّمَالُ وَجَاعَ الْعِبَالُ، فَادْعُ اللَّهَ لَنَا، فَرَفَعَ يَدَيْهِ وَدَعَا" (صحيح البخاری، حدیث ۱۰۱۴). ترجمه: "در زمان پیامبر صلی‌الله‌علیه‌وسلم مردم دچار خشکسالی شدند. روزی که آن حضرت (صلی الله علیه و سلم) خطبه می‌خواند، مردی برخاست و گفت: ای رسول خدا! مال‌ها از بین رفت و خانواده‌ها گرسنه شدند؛ برای ما از خداوند دعا کن. پس پیامبر صلی‌الله‌علیه‌وسلم دستان خود را بلند کرد و دعا نمود". به‌صورت کلی خشکسالی یکی از مهم‌ترین و پایدارترین چالش‌های محیط‌زیستی و اقلیمی در افغانستان به‌شمار می‌رود، به‌ویژه در حوزه‌های آبی که تغذیه آن‌ها وابسته به بارندگی فصلی، ذوب برف و جریان آب سطحی است. یکی از این مناطق، حوزه دریایی شمال است که با وجود موقعیت جغرافیایی خاص، به شدت از کاهش منابع آبی در سال‌های اخیر رنج می‌برد. عوامل متعددی از جمله تغییرات اقلیمی، افزایش درجه حرارت، کاهش بارندگی، استفاده غیراصولی از منابع آب، و فقدان مدیریت علمی و نهادی مؤثر، دست به دست هم داده‌اند تا شرایط خشکسالی در این منطقه به وضعیتی بحرانی تبدیل شود (Qutbudin et al., 2019؛ رشتین و صافی، ۱۳۹۳). دیتاهای اقلیمی و مطالعات میدانی اخیر نشان می‌دهند که در دهه گذشته، شدت و تکرار خشکسالی‌ها در حوزه دریایی شمال افزایش یافته است (Shokory et al., 2023). این روند نه تنها منابع آب سطحی چون دریاها و جویبارها

را کاهش داده، بلکه بالای بیلاتس آب‌های زیرزمینی نیز اثرات منفی وارد کرده است (رشتین و صافی، ۱۴۰۳).

در طول سال‌های گذشته، افغانستان به صورت متناوب تحت تأثیر خشک‌سالی‌های شدید قرار گرفته که منجر به مهاجرت، ناامنی غذایی و کاهش توان اقتصادی جوامع محلی شده (IMPACT Initiatives, 2024). مناطق شمال کشور، به ویژه بخش‌هایی از ولایات بلخ، جوزجان، سرپل و فاریاب، که در حوزه دریایی شمال واقع‌اند، با چالش‌های مضاعف مواجه‌اند؛ زیرا هم‌زمان با کاهش منابع طبیعی، زیربنای آبی مانند شبکه‌های قنات و کاریزهای سنتی و آبیاری محلی نیز فرسوده و ناکارآمد شده‌اند (Aini, 2007). در کنار این مسائل، پروژه‌های جدیدی مانند کانال قوش‌تپه، با هدف توسعه زراعت، بدون ارزیابی دقیق تأثیرات محیط‌زیستی و هایدرولوژیکی، بالای پیچیدگی این بحران افزوده‌اند (Rahmani, 2024; Wikipedia, 2025).

این تحقیق از دیتای مشاهداتی هواشناسی و هایدرومتئورولوژیکی برای تحلیل خشکسالی استفاده می‌کند و می‌کوشد با ترکیب دیتاها و تحلیل نهادی، تصویری جامع از بحران فعلی ارائه دهد. مطالعات گذشته، چه در سطح ملی و چه بین‌المللی، بستر مناسبی برای این تحقیق فراهم کرده‌اند. به طور مثال، رشتین و صافی (۱۳۹۳) در تحقیق خویش که در مجله علوم طبیعی پوهنتون کابل به چاپ رسیده، به بررسی روند خشکسالی و کاهش جریان در حوزه دریایی کابل پرداختند و نشان دادند که استفاده از مدل‌های احصایوی سری زمانی برای پیش‌بینی وضعیت آینده مؤثر است. آنان تأکید داشتند که "پیش‌بینی دقیق خشکسالی، زمینه‌ساز مدیریت بهینه منابع آب می‌شود" (۱۳۹۳). در همین راستا، رشتین (۱۳۹۷) در تحلیل بارندگی استیشن جلال‌آباد نیز کاهش اوسط بارندگی سالانه و تغییر زمان‌بندی بارندگی را از عوامل مؤثر در وقوع خشکسالی ذکر می‌کند. یافته‌های وی تأکیدی بر نیاز به مدل‌سازی دقیق بارندگی در سایر حوزه‌های دریایی نیز دارد. نتایج مذکور برای این تحقیق اهمیت ویژه‌ای دارد، چرا که از همین روش‌ها برای تحلیل حوزه دریایی شمال استفاده می‌گردد.

از منظر بین‌المللی، تحقیق (Qutbudin et al., 2019) با استفاده از شاخص SPI و SPEI الگوهای فصلی خشکسالی را در سراسر افغانستان تحلیل کرد و تأکید نمود که الگوهای اقلیمی به شدت در حال تغییر بوده و شدت خشکسالی‌ها خصوصاً در تابستان و خزان رو به افزایش است. همچنین (Shokory et al., 2023) در مطالعه‌ای جامع نشان دادند که منابع آب افغانستان عمدتاً به ذوب برف و یخچال‌ها وابسته‌اند، و کاهش چشمگیر توده‌های یخچالی در سال‌های آینده می‌تواند ظرفیت ذخایر آبی را در سطح ملی کاهش دهد، خصوصاً در مناطقی چون شمال کشور که تأمین آب از هندوکش و پامیر می‌آید.

در این میان، مسائل نهادی و مدیریتی نیز در شدت یافتن خشکسالی نقش مهمی داشته‌اند (UNDP, 2017) با مدل‌سازی اقلیمی در حوزه کابل، نشان دادند که با سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، میزان جریان آب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین بر ضرورت ایجاد نهادهای هماهنگ‌کننده در مدیریت بحران تأکید دارند. این یافته‌ها قابل‌تعمیم به حوزه دریایی شمال نیز هستند، زیرا ساختار مدیریتی در آنجا نیز با پراگندگی و ضعف مواجه است. در نهایت (Rahmani, 2024) در مقاله‌ای منتشرشده در *Journal of Natural Science Review* به بررسی راهکارهای کاهش فشار خشکسالی در شمال افغانستان پرداختند. آن‌ها استفاده از آبیاری هوشمند، استفاده مجدد آب، و حمایت از مدیریت عرفی منابع آب را از راهکارهای کلیدی دانسته‌اند که در پالیسی‌سازی‌های محلی باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

تمامی این مطالعات نشان می‌دهند که خشکسالی پدیده‌ای چندلایه است که تنها با نگاهی همه‌جانبه قابل مدیریت خواهد بود. به همین دلیل، تحقیق حاضر نه تنها بالای تحلیل‌های اقلیمی و هایدرولوژیکی متمرکز است، بلکه ساختار نهادی و ظرفیت‌های اجتماعی و محلی مرتبط را نیز مورد توجه قرار می‌دهد. با توجه به اهمیت استراتژیک حوزه دریایی شمال برای تأمین آب، امنیت غذایی و حفظ تعادل محیط‌زیستی، تحقیق حاضر با اهداف مشخص ذیل عملی گردیده است: اول، تحلیل کمی اثرات خشکسالی بالای مؤلفه‌های اصلی سیستم هایدرولوژیکی منطقه شامل بارندگی؛ دوم، ارزیابی روندهای تغییر اقلیمی در طول فاصله زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲؛ سوم، شناسایی ظرفیت‌ها و محدودیت‌های موجود در ساختار مدیریت منابع آب در حوزه دریایی شمال و ارائه راهکارهای بهبود آن.

روش تحقیق

به‌صورت عموم دیتا و معلومات هایدرومتئورولوژیکی پارامتر بارندگی که در این تحقیق استفاده گردیده است، از وزارت انرژی و آب برای ۱۳ استیشن حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ دریافت گردیده، تحلیل شده است.

روش علمی که جهت تحلیل و بررسی خشکسالی در بیشترین مناطق جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد و توسط سازمان‌های معتبر جهانی همچون (WMO^۱) نیز مورد اعتبار قرار گرفته است، در مطالعه فعلی به‌کار برده شده است.

^۱ World Meteorological Organization (WMO)

برای تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال از شاخص بارندگی معیاری شده SPI (Standardized Precipitation Index) استفاده شده است (Mozafari Gholam Ali et al., 2011). هم‌چنان مواردی که در طی این مطالعه براساس نتایج SPI مطالعه و بررسی گردیده است، قرار ذیل می‌باشند.

۱. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_1.
۲. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_3.
۳. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_6.
۴. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_9.
۵. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_12.
۶. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس Normal SPI.
۷. تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس Log-Normal SPI.

حوزه دریایی شمال در شمال کشور واقع شده است که مساحت آن حدوداً ۷۰۹۰۱ کیلومتر مربع است و ۱۰،۹۸ فیصد مساحت مجموعی افغانستان را تشکیل می‌دهد. دشت شورتیبه که حدوداً ۵۸۸۰ کیلومتر مربع مساحت این حوزه که ۰،۹۱ فیصد مساحت تمامی کشور را احتوا میکند، ساحات غیر زهکشی یا Non-Drainage Area را تشکیل می‌دهد.

جدول ۱: معلومات کلی حوزه دریایی شمال (تیم کاری بانک جهانی، ۲۰۲۱)

حوزه دریایی شمال						
زمین زراعتی		نفوس			مساحت	
سهم در	مساحت کلی	تراکم نفوس در	سهم در	تعداد	سهم در	مساحت کلی
کیلومتر	مربع	هر کیلومتر	نفوس	(نفر)	کیلومتر	مربع
مربع	مربع	مربع	کلی	کشور	کلی کشور	%
زراعتی کشور	%		%			
۱۵،۲۵	۲۳۷۸	۱۴۶،۳۷	۱۳،۴۵	۲۷۸۳۰۳۳	۱۰،۹۸	۷۰۹۰۱

نقشه حوزه دریایی شمال در شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱: نقشه حوزه دریایی شمال، (طرز العمل چهارچوب مدیریت منابع آب در حوزه‌های دریایی، ۱۳۹۰).

مشخصات کامل استیشن های حوزه دریایی شمال که دیتای آنها برای تحلیل فعلی به کار برده شده است، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات استیشن های حوزه دریایی شمال (وزارت آب و انرژی)

شماره	استیشن	دریا	حوزه دریایی	حوزه دریایی فرعی	ولایت	کوآرדיنات		ارتفاع از سطح بحر
						عرض البلد	طول البلد	
1	Nazdik-i-Keshandeh	Sof	North River Basin	Sari Pul	SAR-I- PUL	36.18889166	65.95523888	765m
2	Pul-i-Baraq	Balkh	North River Basin	Balkhab	BALKH	36.21815833	66.90438055	647m
3	Rabat-i-Bala	Balkh	North River Basin	Balkhab	BALKH	36.58361111	66.95785833	434m
4	Tang-i-Tashqurghan	Khulm	North River Basin	Khulm	BALKH	36.65864444	67.695	516m
5	Doshqadam	Balkh	North River Basin	Balkhab	BAMYAN	34.97474166	66.52648333	2241m
6	Nazdik-i-Nayak	Balkh	North River Basin	Balkhab	BAMYAN	34.74330277	66.99443611	2613m
7	Dawlatabad	Shirin Tagab	North River Basin	Shirin Tagab	FARYAB	36.41794444	64.88334444	404m
8	Khesht Pul	Shirin Tagab	North River Basin	Shirin Tagab	FARYAB	35.96016111	64.89872222	781m
9	Qaisar	Qaisar	North River Basin	Shirin Tagab	FARYAB	35.67954166	64.31897222	1292m
10	Dara-i-Zhwandon	Khulm	North River Basin	Khulm	SAMANGA N	36.16701678	68.07238584	1440m
11	Sayad	Khul	North River Basin	Khulm	SAMANGA N	36.53728611	67.81178333	715m
12	Asiabad	Sar-i-pul	North River Basin	Sari Pul	SAR-I- PUL	36.18889167	65.95523889	657m
13	Nazdik-i-Sar-i-Pul	Shorab	North River Basin	Sari Pul	SAR-I- PUL	36.1583	66.10251944	760m

شاخص بارندگی معیاری شده

یکی از شاخص‌هایی که اکثر کشورهای جهان به منظور مطالعه خشکسالی از آن استفاده نموده‌اند، شاخص بارندگی معیاری شده یا SPI می‌باشد (Wang et al., 2021). مزیت این شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها در آنست که محاسبه آن ساده بوده و یگانه پارامتر اقلیمی مورد نیاز آن عنصر بارندگی می‌باشد (McKee et al., 1995). این شاخص برای بار اول در سال ۱۹۹۵ م توسط مکی (McKee) و همکارانش ارائه شد. شاخص بارندگی معیاری شده بر اساس تفاوت باران نسبت به حد اوسط برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیاری بدست می‌آید. تنها فکتور مؤثر در محاسبه آن، عنصر بارنده‌گی می‌باشد (Nadi & Shiukhy Soqanloo, 2023).

شاخص SPI را میتوان در مقیاس‌های زمانی ۱-۳-۶-۹-۱۲-۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد. نقطه قوت این شاخص در این است که بر اساس آن میتوان ابعاد و معیار خشکسالی را برای هر دوره زمانی تعیین کرد. بنابراین، طبق این شاخص، علاوه بر شدت خشکسالی، مدت آنرا نیز تعیین و تثبیت میتوانیم (McKee et al., 1995; Pieper et al., 2020).

شاخص بارنده‌گی معیاری شده طبق احتمال باران برای هر دوره زمانی می‌باشد. این شاخص به منظور هشدار اولیه و دوام شدت خشکسالی اهمیت زیاد دارد. با استفاده از آن، نه تنها انحراف و وقوع خشکسالی، بلکه شدت، مدت و سایر ویژه‌گی‌های آن نیز واضح میگردد.

بر اساس این شاخص، خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار SPI بصورت دومدار منفی (۱-) یا کمتر از آن باشد و خشکسالی زمانی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد. باید گفت، مقادیر SPI علاوه بر تثبیت و نشان دادن، بزرگی، شدت، مدت، تناوب و دوام دوره و سایر ویژه‌گی‌های خشکسالی، به عین شکل خصوصیات ترسالی را نیز با تمام ویژه‌گی‌های آن نشان میدهد (Mozafari, 2011).

جدول ۳: طبقه بندی شاخص SPI (Sidiqi et al., 2023)

شماره	SPI	وضعیت یا طبقه بندی
۱	۲ تا ۳	بینهایت (بسیار زیاد) مرطوب
۲	۱.۵۰ تا ۱.۹۹	مرطوب متوسط
۳	۱ تا ۱.۴۹	نسبتاً مرطوب
۴	۰.۹۹ تا -۰.۹۹	خشکی و تری نزدیک به نورمال
۵	۱ تا -۱.۴۹	نسبتاً خشک
۶	-۱.۵ تا -۱.۹۹	بسیار خشک
۷	۱ تا -۳	بینهایت (بسیار زیاد) خشک

با در نظر داشت جدول ۳، تقسیمات شاخص SPI برای دوره های خشکسالی و ترسالی به ترتیب در جداول ۴ و ۵ آورده شده است:

جدول ۴: طبقه بندی دوره های خشکسالی به اساس شاخص SPI (Sidiqi et al., 2023)

شماره	SPI	وضعیت یا طبقه بندی
۱	۰ الی -۰٫۹	خشکسالی ضعیف یا نزدیک به نورمال
۲	-۰٫۴۹ تا -۱٫۴۹	خشکسالی متوسط
۳	-۱٫۵۰ تا -۱٫۹۹	خشکسالی شدید
۴	کوچکتر از -۲	خشکسالی بسیار شدید

جدول ۵: طبقه بندی دوره های ترسالی به اساس شاخص SPI (Sidiqi et al., 2023)

شماره	SPI	وضعیت یا طبقه بندی
۱	۰ تا ۰٫۹۹	مرطوب نزدیک به نورمال
۲	۱ تا ۱٫۴۹	مرطوب متوسط
۳	۱٫۵۰ تا ۱٫۹۹	بسیار مرطوب
۴	۲ تا ۳	بینهایت (بسیار زیاد) مرطوب

شاخص بارندگی استاندارد برای اولین بار به منظور تحلیل شرایط خشکسالی و تشخیص کمبود بارندگی ارائه شده است. تغییر پذیری (SPI) Standard Precipitation index باعث می شود که در مقیاس های کوتاه مدت برای اهداف زراعتی و در مقیاس های بلند مدت برای اهداف هایدرولوژیکی مانند منابع آب زیرزمینی، جریان دریاها و منابع سطحی استفاده شود (Reshteen et al., 2024). در محاسبه ذریعه شاخص خشکسالی SPI نیاز است تا در قدم نخست انحراف معیاری بارندگی همان دوره را که قرار است خشکسالی آن بررسی و محاسبه شود، بدست بیاوریم. انحراف معیاری، در واقعیت عبارت از اصولی است که به کمک آن میتوان اندازه گسترش (پراگنده گی) و انحرافات ارقام پارامترهای مختلف را از اوسط بدست بیاوریم. فورمول آن قرار ذیل است (McKee et al., 1995):

$$S = \sqrt{\left\{ \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \right\}} \quad (1)$$

در رابطه (۱):

S = انحراف معیاری دیتای بارندگی برای فاصله زمانی تعیین شده.

x = بارندگی مشاهده شده (واقعی).

x = اوسط بارندگی برای فاصله زمانی معین و تعیین شده.

n = تعداد سال های که مورد محاسبه قرار گرفته است.

زمانی که انحراف معیاری را بدست آوردیم بعد از جهت تثبیت خشکسالی و ترسالی و سایر ویژگی های آنها از شاخص SPI استفاده مینماییم که فورمول آن قرار ذیل است (Hinis & Geyikli, 2023):

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \quad (2)$$

در رابطه (۲):

SPI = شاخص بارندگی معیاری شده.

x_i = میزان بارندگی ۱۲ ماهه (یک سال) طی یک فاصله زمانی معین.

$\bar{x}$ = اوسط بارندگی برای فاصله زمانی تعیین شده.

S_x = انحراف معیاری دیتای بارندگی برای فاصله زمانی تعیین شده.

یافته‌ها

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_1

تحلیل SPI_1 در واقع به معنای تحلیل شاخص بارندگی معیاری شده در مقیاس یک‌ماهه است. این تحلیل نشان می‌دهد که بارندگی در یک ماه گذشته چقدر از اوسط بلندمدت همان ماه در سال‌های گذشته (مثلاً ۳۰ سال قبل) انحراف داشته است. تحلیل SPI_1 برای بررسی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بسیار مفید است. همچنان تحلیل مذکور معمولاً برای تحلیل اثرات خشکسالی بالای محصولات زودرس، علفزارها و منابع آب آشامیدنی سطحی استفاده می‌شود. علاوه بر آن، در مدیریت زراعت فصلی، هشدار زودهنگام خشکسالی و تصمیم‌گیری اضطراری نقش اساسی دارد (Sidiqi et al., 2023). طبق نتایج تحلیل SPI_1 در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ حدوداً ۲۱ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن یک سال خشکسالی بسیار شدید، ۲ سال خشکسالی شدید، ۴ سال خشکسالی متوسط و ۱۴ سال خشکسالی نورمال بوده است.

جدول ۶: سال‌های که بر اساس نتایج SPI_1 وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان میدهد

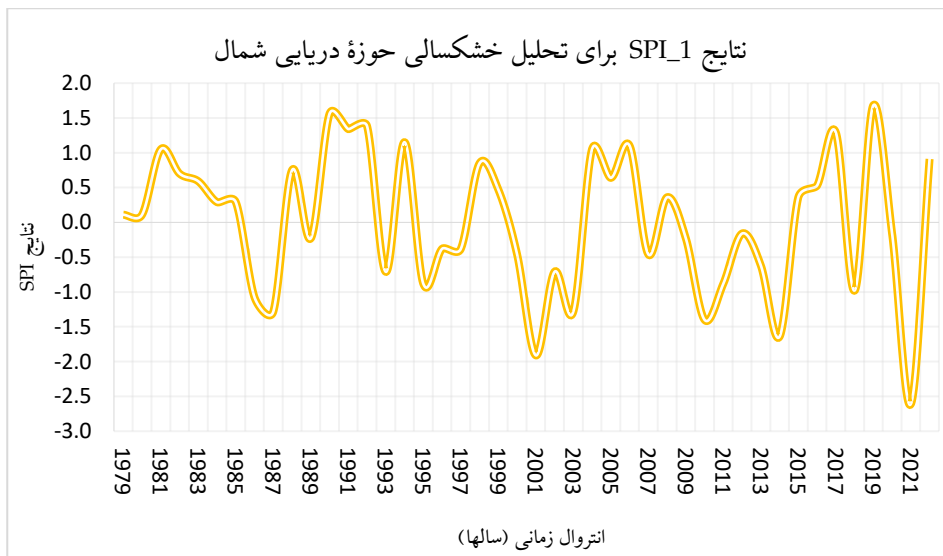
شماره	سال‌های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_1	شدت خشکسالی واقع شده
۱	y_1986	18.4	-1.08	خشکسالی متوسط
۲	y_1987	20.3	-1.28	خشکسالی متوسط
۳	y_1989	19.6	-0.23	خشکسالی نورمال

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_1	شدت خشکسالی واقع شده
۴	y_1993	23.5	-0.71	خشکسالی نورمال
۵	y_1995	20	-0.88	خشکسالی نورمال
۶	y_1996	21.6	-0.38	خشکسالی نورمال
۷	y_1997	22.3	-0.38	خشکسالی نورمال
۸	y_2000	9.0	-0.46	خشکسالی نورمال
۹	y_2001	8.2	-1.91	خشکسالی شدید
۱۰	y_2002	12.6	-0.71	خشکسالی نورمال
۱۱	y_2003	17.4	-1.28	خشکسالی متوسط
۱۲	y_2007	20.7	-0.46	خشکسالی نورمال
۱۳	y_2009	25.7	-0.23	خشکسالی نورمال
۱۴	y_2010	19.8	-1.4	خشکسالی متوسط
۱۵	y_2011	19.6	-0.88	خشکسالی نورمال
۱۶	y_2012	24.5	-0.16	خشکسالی نورمال
۱۷	y_2013	17.1	-0.62	خشکسالی نورمال
۱۸	y_2014	21.3	-1.64	خشکسالی شدید
۱۹	y_2018	16.9	-0.98	خشکسالی نورمال
۲۰	y_2020	23.1	-0.16	خشکسالی نورمال
۲۱	y_2021	12.3	-2.61	خشکسالی بسیار شدید

براساس نتایج جدول ۶، تنها سال ۲۰۲۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است. همچنان بر مبنای محاسبات SPI_1، از مجموعه دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲) که ۴۴ سال می باشد؛ ۴۸٪ آن در حوزه دریایی شمال همراه با خشکسالی می باشد. از مطالعه دوره بازگشت خشکسالی براساس نتایج SPI_1 دریافت میشود که خشکسالی نورمال بعد از هر ۳ سال، خشکسالی متوسط بعد از هر ۱۱ سال، خشکسالی شدید بعد از هر ۲۲ سال و خشکسالی بسیار شدید بعد از هر ۴۴ سال طی محدوده حوزه دریایی مذکور دوباره بازگشت نموده و اتفاق می افتد.

برعلاوه از بررسی احتمال وقوع خشکسالی طی ۱۰۰ سال آینده براساس نتایج SPI_1 بدست آمده است که خشکسالی نورمال ۳۲ بار، خشکسالی متوسط ۹ بار، خشکسالی شدید ۵ بار و خشکسالی بسیار شدید ۲ بار به وقوع خواهد پیوست.

طبق شکل ۲، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۲۱ سال خشکسالی و ۲۳ سال دیگر ترسالی با شدت‌های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده میشود که مرطوب‌ترین سال طی این محدوده زمانی سال ۲۰۱۹ با قیمت $SPI_1 = 1.7$ و خشک‌ترین سال نیز عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_1 = -2.6$ میباشد.



شکل ۲: نتایج SPI_1 برای حوزه دریایی شمال طی سال‌های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_3

تحلیل SPI_3 در واقع به معنای تحلیل شاخص بارندگی معیارشده (Standardized Precipitation Index) در مقیاس زمانی سه‌ماهه است. این تحلیل بررسی می‌کند که میزان بارندگی در طول سه ماه گذشته (برای مثال: مارچ تا می) تا چه حد از اوسط بلندمدت همان سه ماه (مارچ تا می در طی مثلاً ۳۰ سال گذشته) انحراف دارد. در این تحلیل اوسط و انحراف معیاری بر اساس مجموع بارندگی در سه‌ماهه محاسبه می‌شود. تحلیل SPI_3 برای بررسی خشکسالی‌های فصلی خاصاً در مناطق زراعتی بسیار مناسب است. همچنان تأثیر تحلیل مذکور معمولاً بالای محصولات فصلی، منابع آبهای زراعتی، مرتع‌ها و منابع آبهای سطحی قابل مشاهده است. علاوه بر آن، در مناطق وابسته به بارندگی‌های بهاری یا زمستانی، شاخص SPI_3 ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی عملکرد زراعت یا مدیریت منابع آب است (Sidiqi et al., 2023).

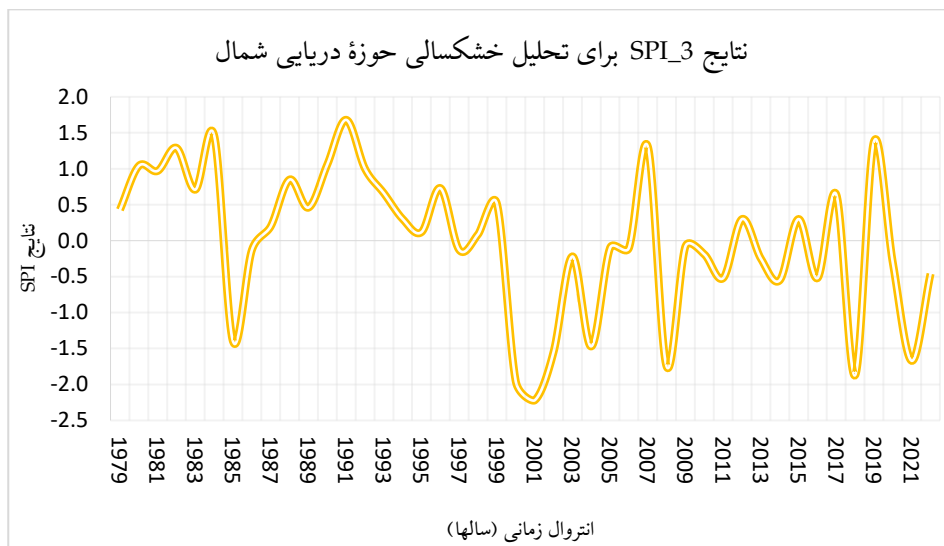
در مناطق همانند افغانستان، تحلیل SPI_3 برای فصل‌های بحرانی مانند بهار (مارچ-می) یا تابستان (جون-اگست) در مناطق زراعتی شمال و غرب، وسایل کلیدی برای پیش‌بینی و مقابله با خشکسالی به شمار می‌رود (Sidiqi et al., 2023).

طبق نتایج تحلیل SPI_3 در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ نیز حدوداً ۲۱ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن یک سال خشکسالی بسیار شدید، ۵ سال خشکسالی شدید، ۲ سال خشکسالی متوسط و ۱۳ سال خشکسالی نورمال بوده است. جدول ۷: سال‌های که بر اساس نتایج SPI_3 وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان می‌دهد.

شماره	سال‌های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_3	شدت خشکسالی واقع شده
۱	y_1985	17.3	-1.4	خشکسالی متوسط
۲	y_1986	18.4	-0.13	خشکسالی نورمال
۳	y_1997	22.3	-0.13	خشکسالی نورمال
۴	y_2000	9.0	-1.96	خشکسالی شدید
۵	y_2001	8.2	-2.22	خشکسالی بسیار شدید
۶	y_2002	12.6	-1.55	خشکسالی شدید
۷	y_2003	17.4	-0.22	خشکسالی نورمال
۸	y_2004	12.5	-1.47	خشکسالی متوسط
۹	y_2005	16.1	-0.1	خشکسالی شدید
۱۰	y_2006	17.0	-0.1	خشکسالی نورمال
۱۱	y_2008	13.5	-1.75	خشکسالی شدید
۱۲	y_2009	25.7	-0.08	خشکسالی نورمال
۱۳	y_2010	19.8	-0.19	خشکسالی نورمال
۱۴	y_2011	19.6	-0.52	خشکسالی نورمال
۱۵	y_2013	17.1	-0.25	خشکسالی نورمال
۱۶	y_2014	21.3	-0.55	خشکسالی نورمال
۱۷	y_2016	19.7	-0.52	خشکسالی نورمال
۱۸	y_2018	16.9	-1.87	خشکسالی شدید
۱۹	y_2020	23.1	-0.31	خشکسالی نورمال
۲۰	y_2021	12.3	-1.67	خشکسالی شدید
۲۱	y_2022	20.3	-0.46	خشکسالی بسیار شدید

براساس نتایج جدول ۷، تنها سال ۲۰۰۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است. همچنان بر مبنای محاسبات SPI_3 ، از مجموعه دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲) که ۴۴ سال می‌باشد؛ ۴۸٪ آن در حوزه دریایی شمال همراه با خشکسالی می‌باشد. از مطالعه دوره بازگشت خشکسالی براساس نتایج SPI_3 دریافت می‌شود که خشکسالی نورمال بعد از هر ۳ سال، خشکسالی متوسط بعد از هر ۲۲ سال، خشکسالی شدید بعد از هر ۹ سال و خشکسالی بسیار شدید بعد از هر ۴۴ سال طی محدوده حوزه دریایی مذکور دوباره بازگشت نموده و اتفاق می‌افتد.

برعلاوه از بررسی احتمال وقوع خشکسالی طی ۱۰۰ سال آینده براساس نتایج SPI_3 بدست آمده است که خشکسالی نورمال ۳۰ بار، خشکسالی متوسط ۵ بار، خشکسالی شدید ۱۱ بار و خشکسالی بسیار شدید ۲ بار به وقوع خواهد پیوست.



شکل ۳: نتایج SPI_3 برای حوزه دریایی شمال طی سال‌های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

طبق شکل ۳، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۲۱ سال خشکسالی و ۲۳ سال دیگر ترسالی با شدت‌های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده می‌شود که مرطوب‌ترین سال طی این محدوده زمانی سال ۱۹۹۱ با قیمت $SPI_3 = 1.7$ و خشک‌ترین سال نیز همانند نتیجه SPI_1 عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_3 = -2.2$ می‌باشد.

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_6

تحلیل SPI_6 در واقع به معنای تحلیل شاخص بارندگی معیاری شده در مقیاس شش ماهه است. این تحلیل نشان می‌دهد که مقدار بارندگی در شش ماه اخیر (مثلاً از جنوری تا جون)، نسبت به اوسط

تاریخی همان شش ماه در طول سال‌های گذشته (مثلاً ۳۰ سال)، چه اندازه انحراف از حالت نورمال دارد. در این تحلیل اوسط و انحراف معیاری بر اساس مجموع بارندگی در مقیاس شش ماهه محاسبه می‌شود. تحلیل SPI_6 بررسی وضعیت آبی میان‌مدت را ممکن می‌سازد. همچنان مدیریت منابع آب زیرزمینی، ذخایر بندها، آبیاری زراعت‌های نیمه‌دائمی (مانند باغات، کشت دوم یا برنج) بسیار مفید است. علاوه بر آن، اثرات خشکسالی پایدار در فاصله نیم‌ساله خاصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند افغانستان را بخوبی آشکار می‌سازد (Sidiqi et al., 2023).

در مناطق مثل افغانستان، که فصل‌های بارندگی و خشکسالی به‌صورت شش‌ماهه توزیع می‌شوند (مثلاً زمستان - بهار بارندگی و تابستان - خزان خشک)، تحلیل SPI_6 نشان می‌دهد که آیا دوره‌ی بارندگی کافی بوده است یا خیر.

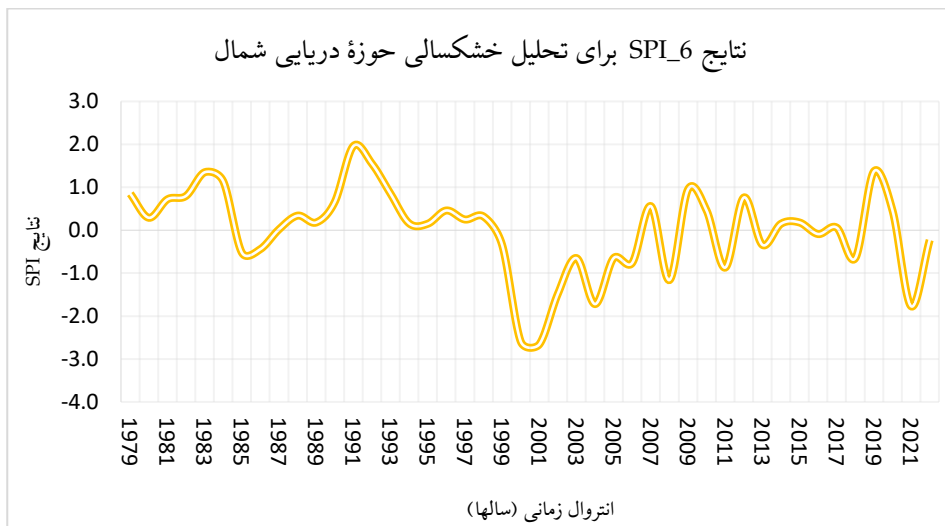
طبق نتایج تحلیل SPI_6 در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ حدوداً ۱۸ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن ۲ سال خشکسالی بسیار شدید، ۲ سال خشکسالی شدید، ۲ سال خشکسالی متوسط و ۱۲ سال خشکسالی نورمال بوده است.

جدول ۸: سال‌های که بر اساس نتایج SPI_6 وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان می‌دهد

شماره	سال‌های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_6	شدت خشکسالی واقع شده
۱	y_1985	17.3	-0.52	خشکسالی نورمال
۲	y_1986	18.4	-0.44	خشکسالی نورمال
۳	y_1987	20.3	0.02	خشکسالی نورمال
۴	y_1999	18.9	-0.34	خشکسالی نورمال
۵	y_2000	9.0	-2.59	خشکسالی بسیار شدید
۶	y_2001	8.2	-2.66	خشکسالی بسیار شدید
۷	y_2002	12.6	-1.48	خشکسالی متوسط
۸	y_2003	17.4	-0.65	خشکسالی نورمال
۹	y_2004	12.5	-1.72	خشکسالی شدید
۱۰	y_2005	16.1	-0.65	خشکسالی نورمال
۱۱	y_2006	17.0	-0.76	خشکسالی نورمال
۱۲	y_2008	13.5	-1.16	خشکسالی متوسط
۱۳	y_2011	19.6	-0.87	خشکسالی نورمال
۱۴	y_2013	17.1	-0.34	خشکسالی نورمال

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_6	شدت خشکسالی واقع شده
۱۵	y_2016	19.7	-0.09	خشکسالی نورمال
۱۶	y_2018	16.9	-0.65	خشکسالی نورمال
۱۷	y_2021	12.3	-1.77	خشکسالی شدید
۱۸	y_2022	20.3	-0.23	خشکسالی نورمال

براساس نتایج جدول ۸، تنها سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است. همچنان بر مبنای محاسبات SPI_6، از مجموعه دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲) که ۴۴ سال می باشد؛ ۴۱٪ آن در حوزه دریایی شمال همراه با خشکسالی می باشد. از مطالعه دوره بازگشت خشکسالی براساس نتایج SPI_6 دریافت میشود که خشکسالی نورمال بعد از هر ۴ سال، خشکسالی متوسط بعد از هر ۲۲ سال، خشکسالی شدید بعد از هر ۲۲ سال و خشکسالی بسیار شدید نیز بعد از هر ۲۲ سال طی محدوده حوزه دریایی مذکور دوباره بازگشت نموده و اتفاق می افتد. بر علاوه از بررسی احتمال وقوع خشکسالی طی ۱۰۰ سال آینده براساس نتایج SPI_6 بدست آمده است که خشکسالی نورمال ۲۷ بار، خشکسالی متوسط ۵ بار، خشکسالی شدید ۵ بار و خشکسالی بسیار شدید نیز ۵ بار به وقوع خواهد پیوست.



شکل ۴: نتایج SPI_6 برای حوزه دریایی شمال طی سال های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

طبق شکل ۴، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۱۸ سال خشکسالی و ۲۶ سال دیگر ترسالی با شدت های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده میشود که مرطوب ترین

سال طی ای محدوده زمانی سال ۱۹۹۱ با قیمت $SPI_6 = 2$ و خشک ترین سال نیز عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_6 = -2.7$ میباشد.

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_9

تحلیل SPI_9 به معنای تحلیل شاخص بارندگی معیارشده در مقیاس زمانی نه ماهه است. این تحلیل نشان می دهد که طی ۹ ماه گذشته، وضعیت بارندگی چگونه بوده و تا چه حد از حالت نورمال فاصله دارد. این تحلیل نشان دهنده انحراف مقدار تجمعی بارندگی در ۹ ماه اخیر از اوسط تاریخی همان ۹ ماه در دوره بلندمدت (مثلاً ۳۰ سال) است. از این تحلیل برای بررسی مدیریت منابع آبی زیرزمینی و بندها غرض دانستن افت یا افزایش تجمعی آب طی فصول پیاپی استفاده به عمل می آید. تحلیل SPI_9 برای بررسی تأخیر در خشکسالی یا ترسالی خاصاً وقتی خشکسالی تدریجی در حال افزایش است، استفاده به عمل می آید. همچنان تحلیل مذکور برای پلان گذاری زراعتی بلندمدت به منظور بررسی تأثیر بالای کشت های چندفصله یا باغداری استفاده می گردد. علاوه بر آن، در بررسی تغییرات اقلیمی و دانستن پیوستگی دوره های خشک یا مرطوب نقش اساسی دارد (Sidiqi et al., 2023).

به صورت کلی، تحلیل SPI_9 ابزاری مناسب برای درک روندهای خشکسالی یا ترسالی در فاصله است که معمولاً بیش از یک فصل را در بر می گیرد (مثلاً بهار، تابستان و بخشی از خزان). این تحلیل به پلان گذاران و تصمیم گیران کمک می کند تا تأثیرات پیاپی بارندگی کم یا زیاد را بالای منابع آبی و زراعت بهتر بفهمند.

طبق نتایج تحلیل SPI_9 در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ حدوداً ۱۹ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن ۲ سال خشکسالی بسیار شدید، ۳ سال خشکسالی شدید، ۲ سال خشکسالی متوسط و ۱۲ سال خشکسالی نورمال بوده است.

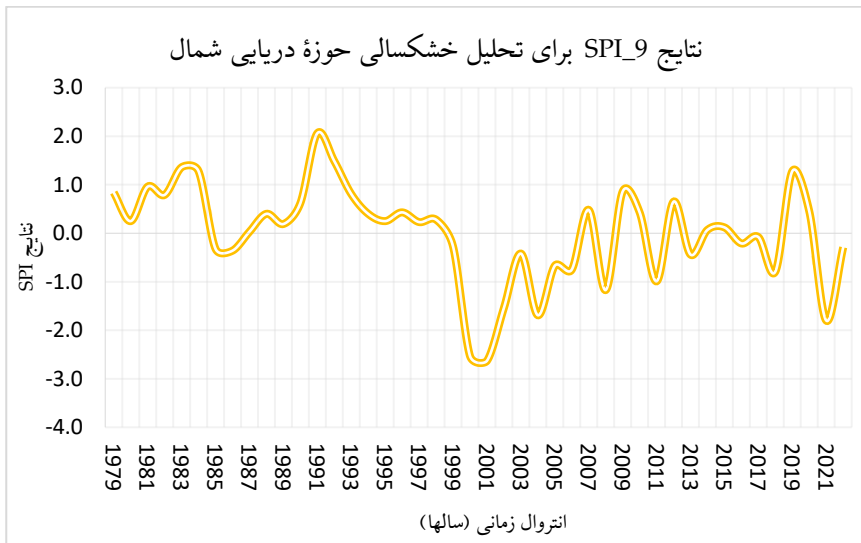
جدول ۹: سال های که بر اساس نتایج SPI_9 وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان می دهد

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_9	شدت خشکسالی واقع شده
۱	y_1985	17.3	-0.32	خشکسالی نورمال
۲	y_1986	18.4	-0.36	خشکسالی نورمال
۳	y_1987	20.3	0.03	خشکسالی نورمال
۴	y_1999	18.9	-0.27	خشکسالی نورمال
۵	y_2000	9.0	-2.53	خشکسالی بسیار شدید

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_9	شدت خشکسالی واقع شده
۶	y_2001	8.2	-2.63	خشکسالی بسیار شدید
۷	y_2002	12.6	-1.54	خشکسالی شدید
۸	y_2003	17.4	-0.42	خشکسالی نورمال
۹	y_2004	12.5	-1.69	خشکسالی شدید
۱۰	y_2005	16.1	-0.67	خشکسالی نورمال
۱۱	y_2006	17.0	-0.75	خشکسالی نورمال
۱۲	y_2008	13.5	-1.17	خشکسالی متوسط
۱۳	y_2011	19.6	-0.99	خشکسالی متوسط
۱۴	y_2013	17.1	-0.44	خشکسالی نورمال
۱۵	y_2016	19.7	-0.21	خشکسالی نورمال
۱۶	y_2017	18.5	-0.08	خشکسالی نورمال
۱۷	y_2018	16.9	-0.79	خشکسالی نورمال
۱۸	y_2021	12.3	-1.8	خشکسالی شدید
۱۹	y_2022	20.3	-0.29	خشکسالی نورمال

براساس نتایج جدول ۹، تنها سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است. همچنان بر مبنای محاسبات SPI_9، از مجموعه دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲) که ۴۴ سال می باشد؛ ۴۳٪ آن در حوزه دریایی شمال همراه با خشکسالی می باشد. از مطالعه دوره بازگشت خشکسالی براساس نتایج SPI_9 دریافت میشود که خشکسالی نورمال بعد از هر ۴ سال، خشکسالی متوسط بعد از هر ۲۲ سال، خشکسالی شدید بعد از هر ۱۵ سال و خشکسالی بسیار شدید بعد از هر ۲۲ سال طی محدوده حوزه دریایی مذکور دوباره بازگشت نموده و اتفاق می افتد.

برعلاوه از بررسی احتمال وقوع خشکسالی طی ۱۰۰ سال آینده براساس نتایج SPI_9 بدست آمده است که خشکسالی نورمال ۲۷ بار، خشکسالی متوسط ۵ بار، خشکسالی شدید ۷ بار و خشکسالی بسیار شدید ۵ بار به وقوع خواهد پیوست.



شکل ۵: نتایج SPI_9 برای حوزه دریایی شمال طی سال های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

طبق شکل ۵، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۱۹ سال خشکسالی و ۲۵ سال دیگر ترسالی با شدت های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده میشود که مرطوب ترین سال طی ای محدوده زمانی همانند نتایج SPI_3 و SPI_6 سال ۱۹۹۱ با قیمت $SPI_9 = 2.1$ و خشک ترین سال نیز عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_9 = -2.6$ میباشد.

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس SPI_12

تحلیل SPI_12 به معنای تحلیل شاخص بارندگی معیاری شده در مقیاس ۱۲ ماهه (یک ساله) است. این شاخص بررسی می کند که میزان بارندگی در ۱۲ ماه گذشته نسبت به اوسط تاریخی همان فاصله (در سال های گذشته) چقدر نورمال بوده یا دچار انحراف شده است. این تحلیل مقدار انحراف تجمعی بارندگی ۱۲ ماه اخیر را از مقدار اوسط تاریخی همان فاصله نشان می دهد. SPI_12 شاخص بلندمدت است که به طور خاص برای بررسی اثرات بلندمدت خشکسالی یا ترسالی بالای منابع آبهای زیرزمینی، آب مخازن و بندها، زراعت چندفصلی یا دایمی و شرایط هیدرولوژیکی عمومی به کار می رود. تحلیل SPI_12 برای مدیریت منابع آب در سطح ملی غرض ارزیابی منابع بندها، قنات ها و آب های زیرزمینی به گونه وسیع استفاده میشود. همچنان تحلیل مذکور در پلان گذاری های اقلیمی به منظور تشخیص سال های خشک یا مرطوب استفاده می شود. علاوه بر آن، در مطالعات هیدرولوژیکی غرض تحلیل تأثیرات کم آبی بالای ذخایر و ایکوسیستم ها نقش اساسی دارد. برعلاوه

بررسی خطر خشکسالی شدید از دید امنیت غذایی و توسعه پایدار، مورد بعدی است که میتوان توسط تحلیل SPI_12 به صورت همه جانبه انجام داد (Sidiqi et al., 2023).

به صورت کلی تحلیل SPI_12، یکی از کامل ترین و معتبرترین شاخص ها برای ارزیابی خشکسالی یا ترسالی سالانه است. این شاخص برای مناطقی مانند افغانستان، که بارندگی اغلب فقط در چند ماه خاص به وقوع می پیوندد، بسیار مهم است؛ چون با یک نگاه می توان شرایط آبی تمام سال را تحلیل کرد.

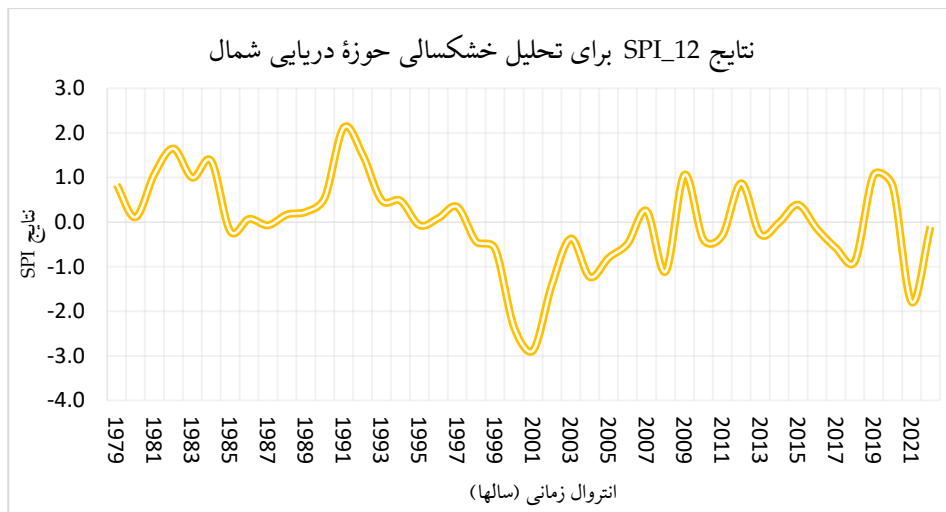
طبق نتایج تحلیل SPI_12 در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ حدوداً ۲۲ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن ۲ سال خشکسالی بسیار شدید، یک سال خشکسالی شدید، ۳ سال خشکسالی متوسط و ۱۶ سال خشکسالی نورمال بوده است.

جدول ۱۰: سال های که بر اساس نتایج SPI_12 وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان می دهد

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_12	شدت خشکسالی واقع شده
۱	y_1985	17.3	-0.2	خشکسالی نورمال
۲	y_1987	20.3	-0.07	خشکسالی نورمال
۳	y_1995	20.0	-0.07	خشکسالی نورمال
۴	y_1998	19.3	-0.44	خشکسالی نورمال
۵	y_1999	18.9	-0.6	خشکسالی نورمال
۶	y_2000	9.0	-2.36	خشکسالی بسیار شدید
۷	y_2001	8.2	-2.88	خشکسالی بسیار شدید
۸	y_2002	12.6	-1.4	خشکسالی متوسط
۹	y_2003	17.4	-0.37	خشکسالی نورمال
۱۰	y_2004	12.5	-1.23	خشکسالی متوسط
۱۱	y_2005	16.1	-0.8	خشکسالی نورمال
۱۲	y_2006	17.0	-0.48	خشکسالی نورمال
۱۳	y_2008	13.5	-1.11	خشکسالی متوسط
۱۴	y_2010	19.8	-0.39	خشکسالی نورمال
۱۵	y_2011	19.6	-0.3	خشکسالی نورمال
۱۶	y_2013	17.1	-0.27	خشکسالی نورمال
۱۷	y_2014	21.3	-0.01	خشکسالی نورمال

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص SPI_12	شدت خشکسالی واقع شده
۱۸	y_2016	19.7	-0.15	خشکسالی نورمال
۱۹	y_2017	18.5	-0.58	خشکسالی نورمال
۲۰	y_2018	16.9	-0.88	خشکسالی نورمال
۲۱	y_2021	12.3	-1.79	خشکسالی شدید
۲۲	y_2022	20.3	-0.1	خشکسالی نورمال

براساس نتایج جدول ۱۰، تنها سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۰۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است. همچنان بر مبنای محاسبات SPI_12، از مجموعه دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲) که ۴۴ سال می باشد؛ ۵۰٪ آن در حوزه دریایی شمال همراه با خشکسالی می باشد. از مطالعه دوره بازگشت خشکسالی براساس نتایج SPI_12 دریافت میشود که خشکسالی نورمال بعد از هر ۳ سال، خشکسالی متوسط بعد از هر ۱۵ سال، خشکسالی شدید بعد از هر ۴۴ سال و خشکسالی بسیار شدید بعد از هر ۲۲ سال طی محدوده حوزه دریایی مذکور دوباره بازگشت نموده و اتفاق می افتد.



شکل ۶: نتایج SPI_12 برای حوزه دریایی شمال طی سال های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

برعلاوه از بررسی احتمال وقوع خشکسالی طی ۱۰۰ سال آینده براساس نتایج SPI_12 بدست آمده است که خشکسالی نورمال ۳۶ بار، خشکسالی متوسط ۷ بار، خشکسالی شدید ۲ بار و خشکسالی بسیار شدید ۵ بار به وقوع خواهد پیوست.

طبق شکل ۶، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۲۲ سال خشکسالی و ۲۲ سال دیگر نیز ترسالی با شدت‌های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده میشود که مرطوب‌ترین سال طی ای محدوده زمانی همانند نتایج SPI_3 ، SPI_6 و SPI_9 سال ۱۹۹۱ با قیمت $SPI_{12} = 2.1$ و خشک‌ترین سال نیز عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_{12} = -2.9$ میباشد.

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس Normal SPI

تحلیل Normal SPI نشان می‌دهد که مقدار بارندگی اخیر نسبت به اوسط تاریخی چقدر انحراف معیاری بالاتر یا پایین‌تر دارد. در واقع، SPI یک معیاری سازی آماری از دیتاهای بارندگی است، که نتیجه آن عددی است که نورمال شده و بدون واحد می‌باشد. این روش امکان مقایسه خشکسالی یا ترسالی در مناطق مختلف و فاصله‌های زمانی متفاوت را فراهم می‌سازد. اگر نتیجه فورمول نزدیک به صفر باشد، نشانه‌دهنده شرایط نورمال است؛ اگر منفی شدید باشد، نشانه خشکسالی (هر چه منفی‌تر، خشکسالی شدیدتر) و اگر مثبت بالا باشد، نشانه ترسالی (هر چه مثبت‌تر، ترسالی شدیدتر) را نشان میدهد (Sidiqi et al., 2023).

در روش معیاری بین‌المللی SPI ، دیتاهای بارندگی معمولاً به توزیع گامبل یا گاما پروسس می‌شوند و سپس به توزیع نورمال تبدیل می‌شوند. اما فورمول Normal SPI فرض می‌کند که دیتاها پیشاپیش نورمال هستند، و نیاز به پروسس توزیع خاص ندارد.

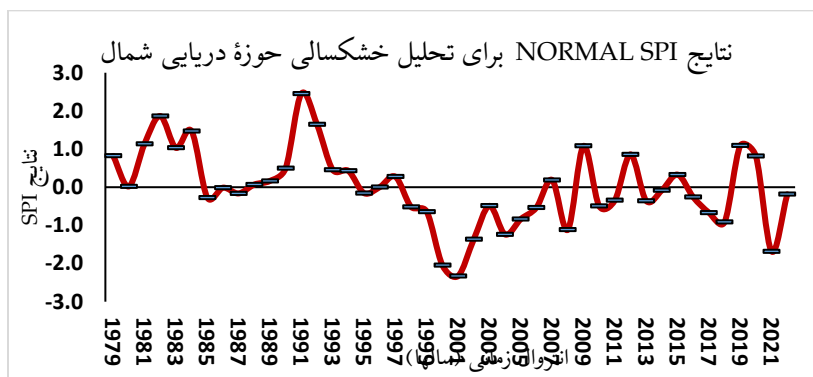
طبق نتایج تحلیل Normal SPI در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ حدوداً ۲۲ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن ۲ سال خشکسالی بسیار شدید، یک سال خشکسالی شدید، ۳ سال خشکسالی متوسط و ۱۶ سال خشکسالی نورمال بوده است.

جدول ۱۱: سال‌های که بر اساس نتایج Normal SPI وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان می‌دهد

شماره	سال‌های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص Normal SPI	شدت خشکسالی واقع شده
۱	y_ 1985	17.3	-0.3	خشکسالی نورمال
۲	y_ 1987	20.3	-0.2	خشکسالی نورمال
۳	y_ 1995	20.0	-0.2	خشکسالی نورمال
۴	y_ 1998	19.3	-0.5	خشکسالی نورمال
۵	y_ 1999	18.9	-0.6	خشکسالی نورمال
۶	y_ 2000	9.0	-2.0	خشکسالی بسیار شدید

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص Normal SPI	شدت خشکسالی واقع شده
۷	y_ 2001	8.2	-2.3	خشکسالی بسیار شدید
۸	y_ 2002	12.6	-1.4	خشکسالی متوسط
۹	y_ 2003	17.4	-0.5	خشکسالی نورمال
۱۰	y_ 2004	12.5	-1.2	خشکسالی متوسط
۱۱	y_ 2005	16.1	-0.8	خشکسالی نورمال
۱۲	y_ 2006	17.0	-0.5	خشکسالی نورمال
۱۳	y_ 2008	13.5	-1.1	خشکسالی متوسط
۱۴	y_ 2010	19.8	-0.5	خشکسالی نورمال
۱۵	y_ 2011	19.6	-0.3	خشکسالی نورمال
۱۶	y_ 2013	17.1	-0.4	خشکسالی نورمال
۱۷	y_ 2014	21.3	-0.1	خشکسالی نورمال
۱۸	y_ 2016	19.7	-0.3	خشکسالی نورمال
۱۹	y_ 2017	18.5	-0.7	خشکسالی نورمال
۲۰	y_ 2018	16.9	-0.9	خشکسالی نورمال
۲۱	y_ 2021	12.3	-1.7	خشکسالی شدید
۲۲	y_ 2022	20.3	-0.2	خشکسالی نورمال

براساس نتایج جدول ۱۱، تنها سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۰۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است.



شکل ۷: نتایج Normal SPI برای حوزه دریایی شمال طی سال های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

طبق شکل ۷، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۲۲ سال خشکسالی و ۲۲ سال دیگر نیز ترسالی با شدت های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده میشود که مرطوب

ترین سال طی ای محدوده زمانی همانند نتایج SPI_3 ، SPI_6 ، SPI_9 و SPI_{12} سال ۱۹۹۱ با قیمت $SPI_{12} = 2.5$ و خشک ترین سال نیز عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_{12} = -2.3$ می‌باشد.

تحلیل و ارزیابی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال بر اساس Log-Normal SPI

تحلیل Log-Normal SPI به معنای محاسبه شاخص بارندگی معیاری شده (SPI) است، اما با فرض اینکه دیتای بارندگی از توزیع لوگاریتمی نورمال (Log-Normal distribution) پیروی می‌کنند، نه از توزیع نورمال یا گاما. در این نوع تحلیل، دیتای بارندگی خام ابتدا با لوگاریتم تبدیل می‌شوند (برای نورمال سازی آن‌ها) و سپس SPI با استفاده از اوسط و انحراف معیاری لوگاریتم دیتاها محاسبه می‌گردد (Sidiqi et al., 2023):

$$Log - Normal SPI = \frac{(\ln(x_i) - X')}{SD} \quad (3)$$

به دلیل اینکه؛ بارندگی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک (از جمله افغانستان) دارای توزیع نورمال نیست، بلکه دارای کشیدگی (skewed) به سمت راست است، دیتاها دارای واریانس زیاد و صفرهای متعدد هستند که در این حالت، فرض نورمال یا گاما ممکن است دقت پایین داشته باشد، پس برای دیتاهایی با این ویژگی‌ها، تبدیل لوگاریتمی باعث نورمال سازی دیتاها می‌شود و تحلیل SPI بر مبنای توزیع Log-Normal دقیق‌تر و منطقی‌تر خواهد بود.

به صورت کلی، Log-Normal SPI یک نسخه اصلاح شده از شاخص SPI است که برای تحلیل بارندگی در مناطق با دیتاهای غیرنورمال، پراگندگی زیاد یا صفرهای زیاد کاربرد دارد. این روش با تبدیل لوگاریتمی، دیتاها را نورمال می‌سازد و سپس تحلیل انجام می‌دهد.

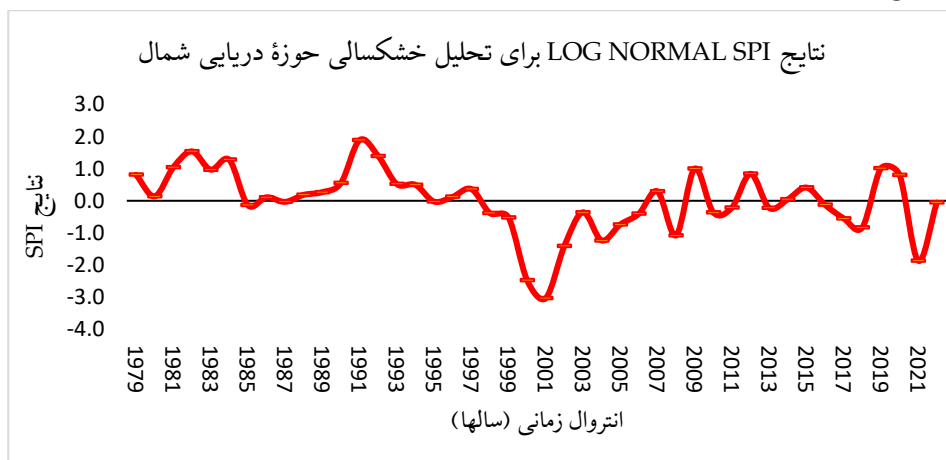
طبق نتایج تحلیل Log-Normal SPI در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ حدوداً ۱۹ سال خشکسالی به وقوع پیوسته است که از جمع آن ۲ سال خشکسالی بسیار شدید، یک سال خشکسالی شدید، ۳ سال خشکسالی متوسط و ۱۳ سال خشکسالی نورمال بوده است.

جدول ۱۲: سال‌های که بر اساس نتایج Log-Normal SPI وقوع خشکسالی را در حوزه دریایی شمال نشان می‌دهد

شماره	سال‌های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص Log-Normal SPI	شدت خشکسالی واقع شده
۱	۱۹۸۵	۱۷.۳	-۰.۱	خشکسالی نورمال
۲	۱۹۹۸	۱۹.۳	-۰.۴	خشکسالی نورمال
۳	۱۹۹۹	۱۸.۹	-۰.۵	خشکسالی نورمال

شماره	سال های خشکسالی	مقدار بارندگی متوسط سالانه به ملی متر	قیمت محاسبه شده شاخص Log-Normal SPI	شدت خشکسالی واقع شده
۴	2000	9.0	-2.5	خشکسالی بسیار شدید
۵	2001	8.2	-3.0	خشکسالی بسیار شدید
۶	2002	12.6	-1.4	خشکسالی متوسط
۷	2003	17.4	-0.4	خشکسالی نورمال
۸	2004	12.5	-1.2	خشکسالی متوسط
۹	2005	16.1	-0.7	خشکسالی نورمال
۱۰	2006	17.0	-0.4	خشکسالی نورمال
۱۱	2008	13.5	-1.1	خشکسالی متوسط
۱۲	2010	19.8	-0.4	خشکسالی نورمال
۱۳	2011	19.6	-0.2	خشکسالی نورمال
۱۴	2013	17.1	-0.2	خشکسالی نورمال
۱۵	2016	19.7	-0.1	خشکسالی نورمال
۱۶	2017	18.5	-0.5	خشکسالی نورمال
۱۷	2018	16.9	-0.8	خشکسالی نورمال
۱۸	2021	12.3	-1.9	خشکسالی شدید
۱۹	2022	20.3	-0.1	خشکسالی نورمال

براساس نتایج جدول ۱۲، تنها سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ خشکسالی بسیار شدید در حوزه دریایی شمال به وقوع پیوسته است.

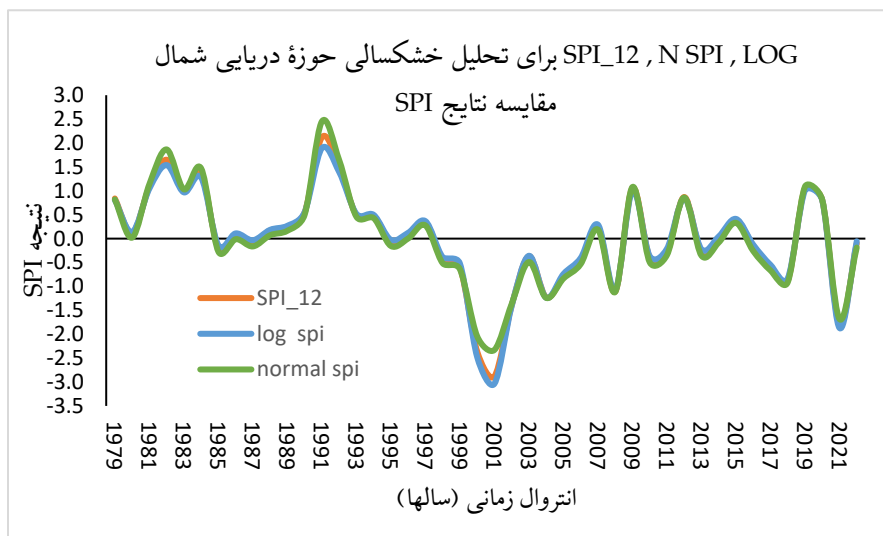


شکل ۸: نتایج Log-Normal SPI برای حوزه دریایی شمال طی سال های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

طبق شکل ۸، از مجموع ۴۴ سال دوره تحلیل (۱۹۷۹-۲۰۲۲)؛ ۱۹ سال خشکسالی و ۲۵ سال دیگر نیز ترسالی با شدت‌های متفاوت در حوزه دریایی شمال واقع گردیده است. دیده می‌شود که مرطوب‌ترین سال طی ای محدودده زمانی همانند نتایج SPI_3 ، SPI_6 ، SPI_9 و SPI_{12} سال ۱۹۹۱ با قیمت $SPI_{12} = 1.9$ و خشک‌ترین سال نیز عبارت از سال ۲۰۰۱ با قیمت $SPI_{12} = -3$ می‌باشد.

مقایسه نتایج SPI_{12} ، SPI_{12} و $LOG\ NORMAL\ SPI$ برای بررسی اثرات خشکسالی در حوزه دریایی شمال طی فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲

برای تحلیل دقیق‌تر خشکسالی در حوزه دریایی شمال، سه روش مختلف محاسبه شاخص SPI براساس دیتاهای بارندگی سالانه مورد استفاده قرار گرفت: SPI_{12} (با معیار گامای مرجع)، Normal SPI (با فرض نورمال بودن مستقیم دیتاها)، و $Log-Normal\ SPI$ (با تبدیل لوگاریتمی دیتاها برای نورمال‌سازی).



شکل ۹: مقایسه نتایج سه روش مختلف محاسبه شاخص SPI برای حوزه دریایی شمال طی سال‌های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

شکل ۹ روند تغییرات سه شاخص مهم خشکسالی (SPI_{12} ، Normal SPI و $Log-Normal\ SPI$) را در فاصله زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲ برای حوزه دریایی شمال نشان می‌دهد. این گراف به صورت سالانه نوسانات شاخص‌ها را نسبت به شرایط نورمال نشان می‌دهد، به گونه‌ای که مقادیر منفی بیانگر شرایط خشکسالی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده شرایط ترسالی می‌باشند. در این گراف:

- خط نارنجی نشان‌دهنده SPI_{12} است که بر اساس تحلیل توزیع گاما محاسبه شده است.

- خط آبی نشان‌دهنده Log-Normal SPI است که با لوگاریتم‌سازی دیتاها به منظور نورمال‌سازی دقیق‌تر تهیه گردیده است.
 - خط سبز معرف Normal SPI است که با فرض توزیع نورمال مستقیم محاسبه شده است.
- نکات کلیدی که از تحلیل و مقایسه گراف فوق میتوان بدست آورد:

پوشش نوسانات مشابه بین شاخص‌ها

هر سه شاخص روند کلی مشابهی از لحاظ شنا سایی سال‌های خشک و مرطوب نشان می‌دهند. خاصاً سال‌های خشک مانند ۲۰۰۱، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ به‌طور واضح در تمام شاخص‌ها به‌عنوان خشکسالی شدید ثبت شده‌اند.

اختلاف در شدت انحراف

در برخی سال‌ها، خاصاً سال‌های با بارندگی بسیار کم یا بسیار زیاد، مقدار Log SPI (آبی‌رنگ) اندکی شدت بیشتری در نمایش خشکسالی یا ترسالی نسبت به SPI₁₂ نشان می‌دهد. این موضوع ناشی از حساسیت بیشتر توزیع Log-Normal به دیتاهای غیر نورمال است.

یکنواختی در شرایط نورمال

در سال‌هایی با بارندگی نزدیک به اوسط (مثلاً بین ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۰ و بین ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳)، مقدار هر سه شاخص تقریباً به یکدیگر نزدیک است. این نشان می‌دهد که در شرایط با نوسانات کم، تفاوت در نتایج روش‌های SPI کمتر می‌شود.

۱. دقت بیشتر Log-Normal SPI برای دیتاهای غیر نورمال:

در سال‌هایی که دیتاهای بارندگی پراگندگی بالایی داشته‌اند یا شامل مقادیر صفر/ بسیار پایین بوده‌اند (مثل ۲۰۰۱ یا ۲۰۲۲)، Log-Normal SPI انحراف شدیدتری را نشان داده است که به لحاظ آماری علامه از کارآیی بهتر آن در تحلیل خشکسالی واقعی دارد.

شکل ۹ به‌خوبی نشان می‌دهد که؛ هر سه روش تحلیلی قابل‌استفاده‌اند و روند کلی را به‌درستی تشخیص می‌دهند. همچنان در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند حوزه دریایی شمال افغانستان، روش Log-Normal SPI دقت بیشتری در نمایش واقعی شدت خشکسالی دارد، خاصاً در شرایط بحرانی. برعلاوه، استفاده ترکیبی از شاخص‌ها به محققین کمک می‌کند تا با تحلیل مقایسه‌ای به تفسیر دقیق‌تری از خشکسالی و ترسالی سالانه برسند.

جدول ۱۳: مقایسه نتایج سه روش مختلف محاسبه شاخص SPI برای حوزه دریایی شمال طی سال‌های (۱۹۷۹-۲۰۲۲)

شماره	سال‌های خشکسالی	SPI_12	شدت خشکسالی SPI_12	Normal SPI	شدت خشکسالی Normal SPI	Log-Normal SPI	شدت خشکسالی Log-Normal SPI
۱	۱۹۸۵	-۰.۲	خشکسالی نورمال	-۰.۳	خشکسالی نورمال	-۰.۱	خشکسالی نورمال
۲	۱۹۹۸	-۰.۴	خشکسالی نورمال	-۰.۵	خشکسالی نورمال	-۰.۴	خشکسالی نورمال
۳	۱۹۹۹	-۰.۶	خشکسالی نورمال	-۰.۶	خشکسالی نورمال	-۰.۵	خشکسالی نورمال
۴	۲۰۰۰	-۲.۴	خشکسالی بسیار شدید	-۲.۰	خشکسالی بسیار شدید	-۲.۵	خشکسالی بسیار شدید
۵	۲۰۰۱	-۲.۹	خشکسالی بسیار شدید	-۲.۳	خشکسالی بسیار شدید	-۳.۰	خشکسالی بسیار شدید
۶	۲۰۰۲	-۱.۴	خشکسالی متوسط	-۱.۴	خشکسالی متوسط	-۱.۴	خشکسالی متوسط
۷	۲۰۰۳	-۰.۴	خشکسالی نورمال	-۰.۵	خشکسالی نورمال	-۰.۴	خشکسالی نورمال
۸	۲۰۰۴	-۱.۲	خشکسالی متوسط	-۱.۲	خشکسالی متوسط	-۱.۲	خشکسالی متوسط
۹	۲۰۰۵	-۰.۸	خشکسالی نورمال	-۰.۸	خشکسالی نورمال	-۰.۷	خشکسالی نورمال
۱۰	۲۰۰۶	-۰.۵	خشکسالی نورمال	-۰.۵	خشکسالی نورمال	-۰.۴	خشکسالی نورمال
۱۱	۲۰۰۸	-۱.۱	خشکسالی متوسط	-۱.۱	خشکسالی متوسط	-۱.۱	خشکسالی متوسط
۱۲	۲۰۱۰	-۰.۴	خشکسالی نورمال	-۰.۵	خشکسالی نورمال	-۰.۴	خشکسالی نورمال
۱۳	۲۰۱۱	-۰.۳	خشکسالی نورمال	-۰.۳	خشکسالی نورمال	-۰.۲	خشکسالی نورمال
۱۴	۲۰۱۳	-۰.۳	خشکسالی نورمال	-۰.۴	خشکسالی نورمال	-۰.۲	خشکسالی نورمال
۱۵	۲۰۱۶	-۰.۲	خشکسالی نورمال	-۰.۳	خشکسالی نورمال	-۰.۱	خشکسالی نورمال
۱۶	۲۰۱۷	-۰.۶	خشکسالی نورمال	-۰.۷	خشکسالی نورمال	-۰.۵	خشکسالی نورمال
۱۷	۲۰۱۸	-۰.۹	خشکسالی نورمال	-۰.۹	خشکسالی نورمال	-۰.۸	خشکسالی نورمال
۱۸	۲۰۲۱	-۱.۸	خشکسالی شدید	-۱.۷	خشکسالی شدید	-۱.۹	خشکسالی شدید
۱۹	۲۰۲۲	-۰.۱	خشکسالی نورمال	-۰.۲	خشکسالی نورمال	-۰.۱	خشکسالی نورمال

براساس نتایج جدول ۱۳، در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، هر سه شاخص خشکسالی بسیار شدید و سال ۲۰۲۱ را خشکسالی شدید گزارش کرده‌اند، که بیانگر بحران آبی شدید در حوزه دریایی شمال است.

بحث و مناقشه

هدف صریح مقاله، تحلیل و ارزیابی خشکسالی در حوزه دریایی شمال با استفاده از شاخص‌های معیاری بارندگی (SPI) و مقایسه‌ی روش‌های توزیع (Normal vs Log-Normal) در فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ بود؛ لذا هر یک از نتایج ارائه شده مستقیم با این هدف و سؤالات تحقیق مرتبط است. دیتاهای ۱۳ استیشن و فاصله زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۲ مبنای همه‌ی محاسبات و نتیجه‌گیری‌هاست که امکان برآورد دوره، شدت، مدت و تناوب خشکسالی‌ها را فراهم کرده است.

یافته‌ی اصلی نشان می‌دهد که طی دوره مطالعه، حوزه دریایی مذکور چندین دوره خشکسالی با شدت‌های مختلف را تجربه نموده است (مثلاً وقوع چند دوره متوسط و چند دوره بسیار شدید در سال‌های مشخص مانند ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ براساس شاخص‌های بلندمدت). این الگو از منظر علمی با کاهش تجمع بارندگی و تغییر توزیع فصلی بارندگی همخوانی دارد؛ کاهش بارندگی تجمعی منجر به کاهش تغذیه منابع آبهای سطحی و زیرزمینی و در نتیجه آشکار شدن خشکسالی‌های هایدرولوژیکی می‌شود. مقیاس زمانی SPI بسیار مؤثر است یعنی شاخص‌های کوتاه‌مدت (SPI-1، SPI-3) خشکسالی‌های زراعتی و کم‌آبی سریع را آشکار می‌کنند، در حالی که شاخص‌های بلندمدت (SPI-6، SPI-9، SPI-12) بالای تضعیف ذخایر آبی و اثرات هایدرولوژیکی بلندمدت دلالت دارند. این تفکیک زمانی در دیتاها به وضوح مشاهده شده است که نشان می‌دهد اثرات و پیامدها برای بخش‌های مختلف (زراعت، تامین آب شرب، مخازن) متفاوت و زمان‌مند است.

برآوردهای دوره بازگشت نشان می‌دهد که خشکسالی‌های متوسط تقریباً هر ۲-۳ سال و خشکسالی‌های شدید در حدود ۱۰-۱۵ سال رخ می‌دهند؛ این ارقام نشان می‌دهد وقوع خشکسالی در مقیاس متوسط نسبتاً رایج است و خطر بلندمدت وقایع بسیار شدید همچنان وجود دارد. از منظر علمی، این اعداد با استفاده از توزیع‌های احصایوی بر روی سری زمانی محاسبه شده‌اند و حساسیت آن‌ها به طول فاصله دیتا و روش تحلیل توزیع باید در نظر گرفته شود. در دیتاهای حوزه مذکور، توزیع بارندگی‌ها اغلب skewness مثبت و تعداد مقادیر صفر یا نزدیک به صفر وجود دارد؛ در این شرایط Log-Normal SPI حساسیت و دقت بیشتری در شناسایی خشکسالی‌های با شدت بالا نشان داده است. بنابراین تفسیر علمی این است که انتخاب تابع توزیع مناسب برای تبدیل دیتاهای بارندگی، تأثیر مستقیمی بالای شناسایی وقایع شدید و اندازه‌گیری شدت دارد؛ در نتیجه برای دیتاهای دارای توزیع نامتقارن، Log-Normal یا توزیعات متناسب با skewness توصیه می‌شود.

نتایج این مطالعه با تحقیقات ملی و منطقه‌ای پیشین که روند افزایش تکرار و شدت خشکسالی را در شمال افغانستان نشان داده‌اند، سازگاری دارد. تحقیقات مانند Qutbudin et al. (۲۰۱۹) و Shokory et al. (۲۰۲۳) تغییرپذیری اقلیمی و افزایش تکرار خشکسالی را گزارش کرده‌اند؛ مطالعه‌ی حاضر نیز همین جهت‌گیری را تأیید می‌کند اما اعداد دوره بازگشت و سال‌های پیک خشکسالی ممکن است به دلیل تفاوت در فاصله زمانی، تراکم استیشن‌ها و مقیاس تحلیل کمی متفاوت باشند. برخی مطالعات از شاخص‌های ترکیبی (SPEI، ترکیب SPI با درجه حرارت) یا دیتاهای ماهواره‌ای برای پوشش فضایی قوی‌تر استفاده کرده‌اند؛ این امر باعث می‌شود برآوردهای فضایی و روندهای بلندمدت گرمایش و

تبخیر احتمالی بهتر مشخص گردد. مطالعه‌ی حاضر با تمرکز بر دیتاهای مشاهداتی و مقایسه توزیعات احصایوی در SPI نشان می‌دهد که انتخاب روش احصایوی می‌تواند تفاوت قابل توجهی در تشخیص شدت وقایع ایجاد کند؛ این تفاوت روش شناختی گاهی علت ناسازگاری‌های عددی میان مطالعات مختلف است.

استفاده از طول دوره‌ی نسبتاً بلند ۱۹۷۹-۲۰۲۲ و تحلیل چندمقیاسی SPI (۱،۳،۶،۹،۱۲) امکان تفکیک پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت را فراهم کرده و مقایسه‌ی سه روش توزیع، بینشی مهم درباره‌ی حساسیت روش شناختی ارائه می‌دهد. به صورت کلی یافته‌ها نشان می‌دهند که حوزه‌ی دریایی شمال در دهه‌های گذشته هم تکرارپذیری و هم شدت خشکسالی را تجربه کرده است؛ انتخاب روش احصایوی (خاصتاً استفاده از Log-Normal برای دیتاهای دارای skewness) بالای شناسایی وقایع شدید تأثیر دارد؛ و پیامدهای اجتماعی-اقتصادی و نیاز به تقویت سازوکارهای مدیریتی واضح است. نتایج با مطالعات پیشین هم‌راستا هستند اما تفاوت‌های عددی عمدتاً ناشی از تفاوت در روش و مقیاس دیتاها است. بر این اساس، هم تقویت بانک معلومات و دیتاها و هم تلفیق روش‌ها برای مطالعات بعدی و پالیسی‌سازی پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

خشکسالی در حوزه‌ی دریایی شمال افغانستان در چند دهه گذشته به یکی از پدیده‌های پیچیده، پایدار و تأثیرگذار بالای ساختار محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی این منطقه تبدیل گردیده است. این تحقیق با استفاده از دیتای ۱۳ استیشن هایدرومتئورولوژیکی در فاصله‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲ و استفاده از شاخص‌های مختلف SPI (شامل SPI_1، SPI_3، SPI_6، SPI_9، SPI_12)، به تحلیل چندلایه این پدیده پرداخته است. بر اساس یافته‌های اصلی، حوزه‌ی دریایی شمال طی دوره تحلیل با مجموع ۲۲ سال خشکسالی مواجه بوده که در میان آن‌ها، سالهای به‌عنوان خشکسالی شدید و حتی بسیار شدید نیز شامل می‌باشد. سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ از جمله سال‌هایی بودند که در اکثر شاخص‌ها به‌عنوان دوره‌های بسیار شدید خشکسالی ثبت شده‌اند، به‌خصوص زمانی که شاخص SPI_6 و SPI_12 به حد پایین‌تر از -۲٫۵ رسیده‌اند.

این خشکسالی‌ها باعث کاهش بارندگی تجمعی، افت جریان‌های سطحی، تأثیر بالای منابع آبهای زیرزمینی و اختلال در بیلاتس آبی منطقه گردیده‌اند. تحلیل دوره‌های برگشت نیز نشان داد که خشکسالی‌های متوسط تقریباً هر ۲ تا ۳ سال، خشکسالی‌های شدید هر ۱۰ تا ۱۵ سال و خشکسالی‌های بسیار شدید هر ۲۰ تا ۲۵ سال احتمال وقوع دارند. نکته مهم این است که در بیش از ۵۰٪ سال‌های

مورد تحلیل، درجاتی از خشکسالی در یکی از شاخص‌ها به ثبت رسیده که این خود نشانه‌ای از وضعیت شکننده آبی حوزه دریایی شمال می‌باشد.

در بخش دیگری از تحقیق، مقایسه میان SPI گامای معیاری، Normal SPI و Log-Normal SPI نیز انجام شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که در حالی که هر سه روش توانایی شناسایی الگوهای خشکسالی را دارند، اما شاخص Log-Normal خاصیت در شناسایی شدت‌های بالای خشکسالی دقت و حساسیت بیشتری از خود نشان داده است. همچنین نتایج نشان داد که مدل‌های زمانی با مقیاس‌های طولانی‌تر (SPI_12، SPI_9) در تحلیل اثرات بلندمدت و پلان‌گذاری منابع آب، بهتر عمل می‌کنند، در حالی که مدل‌هایی چون SPI_1 و SPI_3 برای هشدارهای زودهنگام در بخش زراعت و آب آشامیدنی مؤثرتر می‌باشند.

از دید شرایط محیط زیستی، خشکسالی‌ها باعث تضعیف جریان‌های دائمی و فصلی، کاهش منابع آب سطحی و آسیب به کاریزها و کانال‌های سنتی گردیده‌اند. تأثیرات اجتماعی و اقتصادی از جمله مهاجرت‌های فصلی، افزایش فقر، کاهش تولیدات زراعتی و امنیت غذایی را در پی داشته‌اند. این تحقیق همچنین روشن ساخته که ضعف ساختارهای نهادی، پراکندگی مسئولیت‌ها، و عدم موجودیت سیستم‌های کارآمد و همه جانبه هشدار حوادث شدید متیورولوژیکی و مدیریت منابع آب، بحران وقوع خشکسالی را در این حوزه دریایی تشدید کرده است.

نکته کلیدی دیگر این است که استفاده وسیع، گسترده و ناسازگار از منابع آبی بدون در نظر گرفتن توان محیطی، همراه با تغییرات اقلیمی و افزایش درجه حرارت، باعث شده که منابع آبی حوزه دریایی شمال در وضعیت بسیار شکننده‌ای قرار گیرد. تحلیل پیش‌بینی‌های احصایوی نشان می‌دهد که بدون مداخله‌های جدی مدیریتی و نهادی، در دهه‌های آینده با احتمال افزایش شدت و تکرار خشکسالی‌ها روبه‌رو خواهیم بود.

در مجموع، این تحقیق به صورت دقیق، چندجانبه و با استفاده از تکنیک‌های احصایوی، تصویر واضحی از وضعیت خشکسالی را در حوزه دریایی شمال ارائه می‌دهد. یافته‌ها بیانگر آن‌اند که برای کاهش آسیب‌ها، نه تنها باید به ارزیابی دقیق وضعیت منابع آبی پرداخت، بلکه پلان‌گذاری‌های ساختاری، مدیریتی و نهادی نیز باید در اولویت قرار گیرند. تحلیل سری‌های زمانی، مدل‌های SPI و تلفیق آن با تحلیل فضایی و نهادی، وسایل مناسبی برای تصمیم‌گیری آگاهانه در زمینه مقابله با بحران خشکسالی در آینده خواهند بود.

پیشنهادهای

۱. ایجاد سیستم یکپارچه و همه جانبه هشدار خشکسالی براساس شاخص SPI و تحلیل فضایی GIS برای اطلاع‌رسانی زود هنگام به جوامع آسیب‌پذیر حوزه دریایی شمال.
۲. بازنگری در مدیریت منابع آبی عرفی (کاریزها، جوی‌ها، کانال‌ها) با تلفیق آن با تکنالوژی‌های نوین برای کاهش اتلاف منابع آبی.
۳. تقویت نهادهای محلی مدیریت آب و ایجاد هماهنگی میان نهادهای مسئول در سطح حوزه دریایی، حوزه‌های فرعی دریایی، ولایت‌ها و ولسوالی‌ها.
۴. سرمایه‌گذاری در احیای زیربنای ذخیره‌سازی آب مانند بندهای کوچک و متوسط در مناطق کوهستانی و خشک حوزه دریایی مذکور.
۵. کاربرد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و هوشمند در زراعت جهت کاهش وابستگی به آب سطحی و افزایش بهره‌وری آن.
۶. آموزش و آگاهی‌دهی به زارعین، دهاقین و مالداران در خصوص اثرات خشکسالی و راهکارهای سازگاری با آن. همچنان روش‌های صرفه جویی و عدم اسراف در استفاده آب، از طریق مساجد و موعظه‌های علمای کرام.
۷. تدوین پالیسی‌های اقلیمی با دیدگاه پیش‌گیرانه بر اساس مطالعات سری زمانی و تحلیل‌های احصایوی خشکسالی در سطح حوزه‌های فرعی دریایی.
۸. توسعه و بهبود بانک دیتاهای اقلیمی-هیدرولوژیکی پایدار برای تحلیل بلندمدت خشکسالی در سایر حوزه‌های دریایی کشور.
۹. تقویت همکاری‌های منطقه‌ای با کشورهای هم‌جوار جهت مدیریت منابع مشترک آب در شرایط خشک و تحت نورمال آبی.
۱۰. گنجاندن آموزش مقابله و سازگاری با تغییر اقلیم و خشکسالی در نصاب تعلیمی مکاتب، مدارس و نهادهای تحصیلات عالی کشور به منظور بلندبردن سطح آگاهی عامه در برابر این حوادث.

سیاس‌گذاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از همکاران ژورنال علوم طبیعی معاونیت تحقیقات و نوآوری پوهنتون کابل، مسؤولین تدویر "کنفرانس ملی پایداری محیط‌زیستی، مدیریت حوادث و منابع طبیعی"، همکاران علمی و افرادی که به‌گونه‌ای مستقیم یا غیرمستقیم در انجام این تحقیق، جمع‌آوری دیتا،

تحلیل نتایج و بهبود کیفیت علمی مقاله همکاری و حمایت نموده‌اند، صمیمانه سپاس‌گزاری نمایند. همچنین از داوران گرامی که با نظرات سازنده‌ی خود در ارتقای سطح علمی این مقاله نقش داشته‌اند، قدردانی می‌شود. برعلاوه، از وزارت آب و افغانستان برای دراختیار گذاشتن دیتای مورد نیاز تحقیق صمیمانه تشکری به عمل می‌آید.

سهم نویسندگان

پوهنیار فضل الحق حسنی (نویسنده اول) مسئول تهیه چارچوب تحقیق، جمع‌آوری دیتا، تحلیل نتایج و نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله بوده است. پوهاند صدیق الله رشتین (نویسنده دوم) در توسعه روش تحقیق، تحلیل علمی یافته‌ها و بازبینی محتوای مقاله مشارکت داشته است. پوهاند اسدالله رحمتزی (نویسنده سوم) در ویرایش نهایی، انسجام علمی متن و بررسی انتقادی مقاله سهم فعال داشته است. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید نموده‌اند.

تضاد منافع

بدین وسیله نویسندگان تأیید می‌نمایند که در انجام این تحقیق هیچ‌گونه تضاد منافع علمی، مالی یا شخصی که بتواند بالای نتایج یا تفسیر یافته‌های این مقاله تأثیرگذار باشد، وجود نداشته است.

منابع

- تیم کاری بانگ جهانی. (2021). هوا، اقلیم و منابع آب در افغانستان، اطلس خدمات ملی هایدرولوژی و هواشناسی. بانگ جهانی.
- رشتین، ص. و صافی، ع. (۱۴۰۳). د اوبو مدیریت او کارۍ فرصتونه. *Journal of Natural Sciences – Kabul University*, 7(4), 71–88. <https://doi.org/10.62810/jns.v7i4.75>
- رشتین، ص. (۱۳۹۷). رژیم بارندگی/استیشن جلال آباد. *مجله علوم طبیعی پوهنتون کابل*.
- رشتین، ص و صافی، ع. (۱۳۹۳). پیش بینی خشکسالی در حوزه دریایی کابل. *مجله علوم طبیعی پوهنتون کابل*.
- طرزالعمل چهارچوب مدیریت منابع آب در حوزه های دریائی. (۱۳۹۰). وزارت انرژی و آب.
- Hinis, M. A., & Geyikli, M. S. (2023). Accuracy Evaluation of Standardized Precipitation Index (SPI) Estimation under Conventional Assumption in Yeşilirmak, Kızılırmak, and Konya Closed Basins, Turkey. *Advances in Meteorology*, 2023, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2023/5142965>
- IMPACT Initiatives. (2024). *Key Insights on the impact of repeated droughts on Water, Food Security, and Displacement*. [Link](#)
- McKee, T., B., D., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society*, 233–236. [Link](#)
- Mozafari Gholam Ali, Khosravi Younes, Abbasi Esmaeil, & Tavakoli Fatemeh. (2011). Assessment of Geostatistical Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices. *World Applied Sciences Journal*, 15(4), 474–482. [Link](#)
- Nadi, M., & Shiukhy Soqanloo, S. (2023). Modification of standardized precipitation index in different climates of Iran. *Meteorological Applications*, 30(5). <https://doi.org/10.1002/met.2155>
- Pieper, P., Düsterhus, A., & Baehr, J. (2020). A universal Standardized Precipitation Index candidate distribution function for observations and simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(9), 4541–4565. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4541-2020>
- Qutbudin, I., Shiru, M. S., Sharafati, A., Ahmed, K., Al-Ansari, N., Yaseen, Z. M., Shahid, S., & Wang, X. (2019). Seasonal Drought Pattern Changes Due to Climate Variability: Case Study in Afghanistan. *Water*, 11(5), 1096. <https://doi.org/10.3390/w11051096>
- Rahmani, H. (2024). Innovative Approaches for Afghanistan's Agricultural Water Management. *Journal of Natural Science Review*, 2(Special.Issue), 64–71. <https://doi.org/10.62810/jnsr.v2iSpecial.Issue.116>
- Reshteen, S., Rahmatzai, A., & Safi, A. G. (2024). Urban Water Crisis in Kabul City: Key Challenges and Solutions. *Journal of Natural Science Review*, 2(3), 138–150. <https://doi.org/10.62810/jnsr.v2i3.51>
- Shokory, J. A. N., Schaeffli, B., & Lane, S. N. (2023). Water resources of Afghanistan and related hazards under rapid climate warming: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 68(3), 507–525. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2159411>

- Sidiqi, M., Kasiviswanathan, K. S., Scheytt, T., & Devaraj, S. (2023). Assessment of Meteorological Drought under the Climate Change in the Kabul River Basin, Afghanistan. *Atmosphere*, 14(3), 570. <https://doi.org/10.3390/atmos14030570>
- UNDP. (2017). *Climate Change Scenarios for Agriculture of Afghanistan, Climate Change Adaptation Project*. [Link](#)
- Wang, W., Wang, J., & Romanowicz, R. (2021). Uncertainty in SPI Calculation and its Impact on Drought Assessment in Different Climate Regions over China. *Journal of Hydrometeorology*. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0256.1>
- Water conservation in Afghanistan* / Abdullah Aini. (2007). Afghanistan Centre at Kabul University. https://doi.org/10.29171/azu_acku_pamphlet_hd1698_a3_a565_2007
- Wikipedia. (2025). Qosh Tepa Canal. In *Wikipedia – The Free Encyclopedia*.