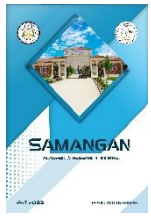
Samangan Scientific and Research Journal

https://researchsparker.edu.af/index.php/SARJ

DOI: 10.64226/sarj.v3i02.14

e-ISSN:3105-1715

ISSN: 3006-8835



Spatiotemporal Analysis of Drought and Vegetation Changes in Northern Afghanistan (2000–2023)

Abdul Baser Qasimi[1],* and Samiullah Khaksar[1]

[1] Department of Geography, Faculty of Education, Samangan University, Aybak, Samangan, Afghanistan

* *Corresponding author:* Qasimi.abdul.a@gmail.com

Suggested citation: Qasimi, A. B., & Khaksar, S. (2026). Spatiotemporal analysis of drought and vegetation changes in northern Afghanistan (2000–2023). Samangan Academic and Research Journal 3(2), 67-90.

Keywords

Drought;
standardized precipitation evapotranspiration index;
enhanced vegetation index;
remote sensing;
Google Earth Engine;
northern Afghanistan.

Research

Received:2025-07-17

Revised: 2026-08-11

Accepted:2026-08-11

Published:2026-10-19

Abstract

Drought in northern Afghanistan is associated with declining water availability, reduced agricultural production, and pressure on rural livelihoods. However, the scarcity of regular ground observations complicates long-term monitoring. This study analyzed the spatiotemporal patterns of drought and vegetation change across Balkh, Jawzjan, Sar-e Pol, and Samangan provinces from 2000 to 2023. Monthly standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) data at 1-, 3-, 6-, and 12-month accumulation scales and 16-day enhanced vegetation index (EVI) observations from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) were processed in Google Earth Engine and the Arc Geographic Information System (ArcGIS). For interannual comparison, regional annual means were computed, and relationships were evaluated with Pearson's correlation coefficient (r) across 24 paired years using two-tailed probability values (p). Drought patterns differed by accumulation scale: short-term SPEI emphasized monthly variability, whereas 6- and 12-month SPEI more clearly represented event persistence. The years 2001, 2008, 2011, 2018, and 2021 were prominent dry periods at multiple scales. Long-term spatial patterns indicated relatively drier conditions in Jawzjan, northern Balkh, and northwestern Sar-e Pol, and relatively wetter conditions in Samangan and the southern parts of the study area. Strong vegetation cover occupied only a small proportion of the region, with the lowest EVI values in 2001 and 2008. All EVI–SPEI correlations were positive but statistically nonsignificant; the largest coefficient occurred for the 12-month SPEI ($r = 0.213$, $p = 0.317$). Some dry years coincided with reduced EVI, but the analysis did not establish a causal or uniform vegetation response to drought. The findings highlight the need for seasonal and lagged analyses, field validation, and explicit separation of irrigation and land-use effects.

مجلهٔ علمی-تحقیقی سمنگان
https://researchsparker.edu.af/index.php/SARJ
DOI: 10.64226/sarj.v3i02.14
e-ISSN: 3105-1715
ISSN: 3006-8835



تحلیل زمانی–مکانی خشکسالی و تغییرات پوشش گیاهی در شمال افغانستان (۲۰۰۰–۲۰۲۳)

عبدالبصیر قاسمی[1,*]، سمیع‌الله خاکسار[1]

[1] دیپارتمنت جغرافیا، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون سمنگان، ایبک، سمنگان، افغانستان

* نویسندهٔ مسئول: qasimi.abdul.a@gmail.com

مرجع‌دهی

قاسمی، ع. ب.، و خاکسار، س. (۱۴۰۵). تحلیل زمانی–مکانی خشکسالی و تغییرات پوشش گیاهی در شمال افغانستان (۲۰۰۰–۲۰۲۳). مجلهٔ علمی-تحقیقی سمنگان، ۳(۲)، ۹۰-۶۷.

کلمات کلیدی

خشکسالی؛ شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق (SPEI)؛ شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی (EVI)؛ سنجش‌ازدور؛ گوگل ارث انجین؛ شمال افغانستان.

چکیده

خشکسالی با کاهش منابع آب، افت تولیدات زراعتی و فشار بر معیشت روستایی پیوند دارد؛ اما کمبود مشاهدات منظم زمینی، پایش درازمدت آن را دشوار ساخته است. این تحقیق الگوهای زمانی–مکانی خشکسالی و تغییرات پوشش گیاهی را در چهار ولایت شمال افغانستان—بلخ، جوزجان، سرپل و سمنگان—طی سال‌های ۲۰۰۰–۲۰۲۳ بررسی کرد. داده‌های ماهانهٔ شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق (SPEI) در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ماهه و داده‌های شانزده‌روزهٔ شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی (EVI)، محصول سنجندهٔ طیف‌سنج تصویربرداری با تفکیک متوسط (MODIS)، در گوگل ارث انجین و نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) پردازش شدند. برای مقایسهٔ بین‌ساله، اوسط سالانهٔ هر شاخص در منطقهٔ مطالعه محاسبه شد؛ سپس رابطهٔ آن‌ها با ضریب همبستگی پیرسون (r) در ۲۴ جفت سالانه آزمون و مقدار احتمال دوطرفه (p) گزارش گردید. نتایج نشان داد که خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف به‌صورت یکسان ظاهر نمی‌شود: شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق در مقیاس کوتاه‌مدت نوسانات ماهانه را برجسته می‌کند، درحالی‌که مقیاس‌های شش‌ماهه و دوازده‌ماههٔ آن تداوم رویدادها را بهتر نشان می‌دهند. سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ در چند مقیاس از دوره‌های خشک برجسته بودند. الگوی مکانی درازمدت، شرایط خشک‌تر را در جوزجان، شمال بلخ و شمال‌غرب سرپل و وضعیت نسبتاً مرطوب‌تر را در سمنگان و بخش‌های جنوبی محدوده نشان داد. سهم پوشش گیاهی قوی در کل دوره اندک بود و کمترین مقادیر شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ ثبت شد. تمام همبستگی‌های میان شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی و شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق مثبت، اما از نظر آماری نامعنادار بودند؛ بیشترین رابطه مربوط به مقیاس دوازده‌ماههٔ شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق بود (r=۰,۲۱۳، p=۰,۳۱۷). بنابراین، برخی سال‌های خشک با افت شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی هم‌زمان بوده‌اند؛ بااین‌حال، داده‌های این تحقیق رابطهٔ علّی یا پاسخ یکنواخت پوشش گیاهی به خشکسالی را اثبات نمی‌کنند. یافته‌ها بر ضرورت تحلیل فصلی، درنظرگرفتن تأخیر زمانی، اعتبارسنجی زمینی و تفکیک نقش آبیاری و تغییرات کاربری زمین تأکید می‌کنند.

۱. مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای چندبعدی و تدریجی است که با کاهش غیرعادی دسترسی به آب نسبت به شرایط معمول یک منطقه شناخته می‌شود. این پدیده ممکن است با کمبود بارندگی آغاز شود و از طریق افزایش تبخیر، کاهش رطوبت خاک، افت جریان‌های سطحی و فشار بر منابع آب زیرزمینی گسترش یابد. برخلاف مخاطرات ناگهانی، آغاز و پایان خشکسالی معمولاً آشکار نیست و آثار آن در مقیاس‌های زمانی متفاوت ظاهر می‌شود؛ ازاین‌رو، یک دورهٔ کوتاه خشک می‌تواند مرحلهٔ حساس رشد گیاه را متأثر سازد، درحالی‌که کمبود چندفصلی یا چندساله ممکن است ذخایر آب، مراتع، تولید علوفه و معیشت جوامع را تحت فشار قرار دهد. بنابراین، تفسیر خشکسالی نباید تنها بر یک ماه، یک فصل یا یک شاخص استوار باشد (Bhaga et al., ۲۰۲۰; Mishra & Singh, ۲۰۱۰; Vicente-Serrano et al., ۲۰۱۰; Zargar et al., ۲۰۱۱).

افغانستان به سبب اقلیم خشک و نیمه‌خشک، ناهمواری شدید و وابستگی بخشی از تولیدات زراعتی به بارندگی و ذوب برف در برابر خشکسالی حساس است. بارندگی کشور از نظر مکانی و فصلی ناهمگون است و بخش مهم آن در زمستان و بهار رخ می‌دهد (Suryavanshi et al., ۲۰۲۲). در شمال افغانستان، مجاورت دشت‌های زراعتی بلخ، جوزجان و سرپل با نواحی کوهستانی و نیمه‌کوهستانی سمنگان و جنوب سرپل سبب می‌شود دسترسی به آب، ارتفاع، نوع زمین و سیستم کشت در فاصله‌های نسبتاً کوتاه تغییر کند. در نتیجه، یک رویداد اقلیمی می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی در پوشش گیاهی و تولید زراعتی ایجاد کند.

پیامدهای خشکسالی تنها به کاهش یک متغیر اقلیمی محدود نیست. در مناطق زراعتی، کاهش رطوبت می‌تواند زمان کشت، سطح زیر کشت، عملکرد محصول و تقاضا برای آبیاری را تغییر دهد و در مراتع تولید علوفه و ظرفیت چرا را کاهش دهد. در سطح خانوار نیز راهبردهای سازگاری به دسترسی به منابع، معلومات، اعتبار و امکانات محلی وابسته است (Aliyar et al., ۲۰۲۲). همچنین، ارزیابی حوضه‌های آبریز افغانستان نشان داده است که پایداری منابع آب در برابر خشکسالی میان حوضه‌ها یکسان نیست (Dost & Kasiviswanathan, ۲۰۲۳). بنابراین، شناخت زمان، شدت و توزیع مکانی خشکسالی برای برنامه‌ریزی زراعت، مدیریت آب و کاهش خطر اهمیت مستقیم دارد.

برای پایش چندمقیاسی خشکسالی، شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق (SPEI) مناسب است؛ زیرا اثر هم‌زمان بارندگی و تقاضای تبخیری را در پنجره‌های تجمعی مختلف بازتاب می‌دهد. مقیاس‌های یک و سه‌ماهه به نوسانات کوتاه و شرایط فصلی حساس‌ترند، درحالی‌که مقیاس‌های شش و دوازده‌ماهه کمبود یا مازاد انباشته را بهتر نشان می‌دهند (Beguería et al., ۲۰۱٤; Vicente-Serrano et al., ۲۰۱۰). ازاین‌رو، مقایسهٔ چند مقیاس می‌تواند میان شوک‌های کوتاه‌مدت و خشکسالی‌های پایدار تمایز ایجاد کند.

واکنش پوشش گیاهی به شرایط اقلیمی را می‌توان با شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی (EVI) بررسی کرد. این شاخص با استفاده از باندهای مادون‌سرخ نزدیک، سرخ و آبی، بخشی از اثر پس‌زمینهٔ خاک و پراکندگی

جوی را تعدیل می‌کند (Huete et al., ۲۰۰۲) و محصول MOD۱۳A۱ آن را با دورهٔ ۱۶روزه و تفکیک ۵۰۰ متر فراهم می‌سازد (Didan, ۲۰۲۱). بااین‌حال، پاسخ EVI به خشکسالی به نوع اقلیم، اکوسیستم، آبیاری، زمان کشت و برداشت، خاک، ارتفاع و تغییر کاربری وابسته است (Rhee et al., ۲۰۱۰; Vicente-Serrano et al., ۲۰۱۳). بنابراین، ترکیب SPEI و EVI برای بررسی هم‌زمان فشار اقلیمی و پاسخ پوشش گیاهی مفید است، اما به‌تنهایی رابطهٔ علّی را ثابت نمی‌کند.

پیشینهٔ تحقیق در افغانستان نیز بر همین پیچیدگی تأکید دارد. محمد و همکاران (۲۰۱۷) خشکسالی را در یک منطقهٔ متکی به برف بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی مناطق بر تعریف و تداوم رویداد اثر می‌گذارد. قطب‌الدین و همکاران (۲۰۱۹) تغییرات فصلی خشکسالی افغانستان را مطالعه کرده‌اند و تفاوت میان فصل‌ها و نواحی را برجسته ساخته‌اند. روستا و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و عوامل هواشناسی، پاسخ متفاوت پوشش گیاهی را در حوضه‌های افغانستان نشان داده‌اند. در مقیاس حوضهٔ شمالی نیز محمود و همکاران (۱۴۰۱) با داده‌های MODIS و بارندگی، تغییرات EVI، دمای سطح زمین و شرایط خشکسالی را طی سال‌های ۲۰۰۱–۲۰۲۰ تحلیل کرده‌اند و همبستگی پاسخ پوشش گیاهی با بارندگی و درجه حرارت را گزارش داده‌اند. این مطالعات از یک‌سو قابلیت داده‌های ماهواره‌ای را نشان داده‌اند و از سوی دیگر روشن ساخته‌اند که نتیجهٔ ملی یا یک حوضه را نمی‌توان بدون بررسی محلی به تمام شمال افغانستان تعمیم داد.

پیشینهٔ جدیدتر دامنهٔ زمانی و روش‌های مقایسه را گسترش داده است. چن و همکاران (۲۰۲٤) پاسخ پوشش گیاهی افغانستان به خشکسالی را در چند مقیاس زمانی و با ترکیب تصاویر ماهواره‌ای درازمدت و داده‌های هواشناسی بررسی کرده‌اند و ناهمگونی مکانی و زمانی پاسخ را نشان داده‌اند. جمالزی و همکاران (۲۰۲۵) با شاخص بارندگی استانداردشده (SPI) و SPEI، خشکسالی هواشناسی افغانستان را برای دورهٔ ۱۹۷۴–۲۰۲۳ ارزیابی کرده‌اند؛ درحالی‌که صمیم و همکاران (۲۰۲۵) رابطهٔ SPEI را با تولید محصول و جریان دریا در مقیاس ملی مطالعه کرده‌اند. این تحقیقات ضرورت مقایسهٔ چند مقیاس و چند پیامد را تقویت کرده‌اند، اما به‌دلیل تفاوت دورهٔ تحلیل، تفکیک داده و واحد مکانی، جای تحلیل متمرکز چهار ولایت شمالی را نمی‌گیرند.

مطالعات بیرون از افغانستان نیز نشان داده‌اند که مقیاس زمانی شاخص، فصل رشد و نوع پوشش بر نتیجهٔ تحلیل اثر می‌گذارند. کائو و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات خشکسالی و اثر آن بر پوشش گیاهی شمال‌غرب چین را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بررسی کرده‌اند. مهرآور و همکاران (۲۰۲۱) با ترکیب چند متغیر ماهواره‌ای در محیط گوگل ارث انجین نشان داده‌اند که ادغام اطلاعات درجه حرارت، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و بارندگی می‌تواند تصویری کامل‌تر از خشکسالی فراهم سازد. سندیپ و همکاران (۲۰۲۱) نیز در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک هند از داده‌های زمانی CHIRPS و MODIS برای پایش خشکسالی زراعتی استفاده کرده‌اند. وجه مشترک این تحقیقات آن است که هیچ شاخص منفردی تمام ابعاد خشکسالی را نمایش نمی‌دهد و رابطهٔ پوشش گیاهی با شرایط اقلیمی باید متناسب با فصل، مقیاس و نوع زمین تفسیر شود.

در افغانستان، تحقیقات جدیدتر علاوه بر توصیف رخدادهای تاریخی، به کاربرد اطلاعات اقلیمی برای آمادگی زراعتی توجه کرده‌اند. شوکلا و همکاران (۲۰۲٤) ارتباط نوسان جنوبی ال‌نینو (ENSO) را با دورنمای خشکسالی و پیامدهای زراعتی افغانستان بررسی کرده‌اند. این رویکرد برای هشدار زودهنگام مهم است؛ بااین‌حال، تحلیل حاضر ماهیت پیش‌بینی ندارد و بر بازسازی و مقایسهٔ الگوهای مشاهده‌شده تمرکز می‌کند. همچنین، به‌دلیل محدودیت داده‌های زمینی و اختلاف تفکیک میان SPEI و EVI، نتایج باید به‌عنوان روابط مکانی–زمانی، نه برآورد قطعی علت و معلول، تفسیر شوند.

با وجود این پیشینه، تحلیل هم‌زمان چهار مقیاس SPEI و EVI برای مجموع ولایات بلخ، جوزجان، سرپل و سمنگان در دورهٔ کامل ۲۰۰۰–۲۰۲۳ محدود است. افزون بر آن، در برخی مطالعات، توصیف هم‌زمانی خشکسالی و کاهش پوشش گیاهی با ادعای اثر مستقیم درهم آمیخته است و روش تطبیق مکانی–زمانی شاخص‌ها نیز به‌روشنی بیان نشده است. تحقیق حاضر برای پاسخ‌گویی به این شکاف سه هدف را دنبال می‌کند: نخست، شناسایی تفاوت الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی در مقیاس‌های ۱، ۳، ٦ و ۱۲ماهه؛ دوم، توصیف تغییرات EVI و توزیع طبقات پوشش گیاهی؛ و سوم، آزمون رابطهٔ خطی میان اوسط سالانهٔ EVI و هر مقیاس SPEI. بر این اساس، پرسش‌های تحقیق عبارت‌اند از: کدام سال‌ها و کدام بخش‌های منطقه خشک‌تر بوده‌اند؟ تغییرات پوشش گیاهی در دورهٔ مطالعه چگونه توزیع شده است؟ آیا میان اوسط سالانهٔ EVI و SPEI رابطهٔ آماری معناداری وجود دارد؟

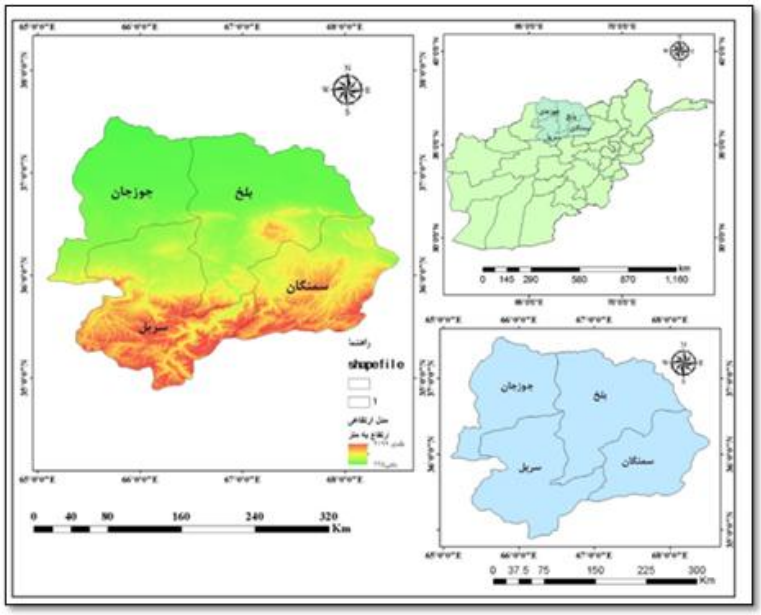
۲. مواد و روش تحقیق

۲.۱. منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مطالعه شامل ولایات بلخ، جوزجان، سرپل و سمنگان در شمال افغانستان است و تقریباً میان ۵۰°۳۴′ تا ۳۲°۳۷′ عرض شمالی و ٦۵°۰٦′ تا ٦۸°۳۳′ طول شرقی قرار دارد. مساحت اداری گزارش‌شده برای این محدوده حدود ۵۷٬۳۰۱ کیلومترمربع است. مرز شمالی منطقه به دشت‌های نزدیک دریای آمو می‌رسد و ارتفاع به‌سوی جنوب، به‌ویژه در سرپل و سمنگان، افزایش می‌یابد. بر پایهٔ مدل ارتفاعی استفاده‌شده، ارتفاع از حدود ۲۳۵ متر در دشت‌های شمالی تا بیش از ۴٬۰۰۰ متر در کوهستان‌های جنوبی تغییر می‌کند. این گرادیان ارتفاعی سبب تفاوت محسوس در درجه حرارت، زمان ذوب برف، مقدار و نوع بارندگی، طول فصل رشد و دسترسی به آب می‌شود.

جوزجان و شمال بلخ عمدتاً دشت‌های کم‌ارتفاع، خشک و نیمه‌خشک‌اند؛ درحالی‌که جنوب بلخ، جنوب سرپل و بخش بزرگی از سمنگان ناهموارتر است. زمین‌های زراعتی آبی همراه با سکونتگاه‌های بزرگ بیشتر در دشت‌ها و دره‌ها، به‌ویژه پیرامون شبکه‌های آبی، متمرکز شده‌اند؛ کشت للمی و مراتع نیز در نواحی مرتفع‌تر و دامنه‌ها گسترش دارد. این ناهمگونی طبیعی و انسانی در تفسیر EVI اهمیت دارد، زیرا مقدار پایین شاخص در دشت بیابانی، کوهستان سنگی یا زمین زراعتی برداشت‌شده لزوماً معنای یکسانی ندارد. به همین ترتیب،

مقدار SPEI یک سلول ۰,۵ درجه ممکن است چند نوع زمین با ارتفاع‌های متفاوت را هم‌زمان نمایندگی کند. شکل ۱ موقعیت، حدود اداری و توپوگرافی منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت، حدود اداری و توپوگرافی منطقهٔ مورد مطالعه.

۲.۲. داده‌ها

این تحقیق با رویکرد کمّی، گذشته‌نگر و مبتنی بر تحلیل سری‌های زمانی–مکانی انجام شد. دورهٔ تحلیل از جنوری ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۳ بود و در مجموع ۲۴ سال را پوشش داد. داده‌های اصلی شامل شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق (SPEI) ماهانه، شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی (EVI) شانزده‌روزه، مدل ارتفاعی رقومی (DEM) و مرز اداری چهار ولایت بود. داده‌های شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق در چهار پنجرهٔ تجمعی ۱، ۳، ٦ و ۱۲ماهه تحلیل شدند؛ شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی برای هر سال تلخیص شد و مدل ارتفاعی رقومی برای نمایش ناهمواری‌ها و کمک به تفسیر تفاوت‌های شمال و جنوب به کار رفت. مدل ارتفاعی از مأموریت توپوگرافی راداری شاتل (SRTM) سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) اخذ شد (Farr et al., ۲۰۰۷). گورلیک و همکاران (۲۰۱۷) گوگل ارث انجین را برای تحلیل مجموعه‌های بزرگ داده‌های جغرافیایی و سنجش‌ازدور معرفی کرده‌اند؛ پردازش مجموعه‌های زمانی و تلخیص مکانی این تحقیق نیز در همین محیط ابری انجام شد. مشخصات منابع، تفکیک و کاربرد هر داده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در تحقیق.

داده	محصول/منبع	تفکیک زمانی و مکانی	دورهٔ استفاده	کاربرد
SPEI	SPEIbase v.۲,۱۰ (Beguería et al., ۲۰۲٤)	ماهانه؛ ۰,۵ درجه	۲۰۰۰–۲۰۲۳	تحلیل خشکسالی در مقیاس‌های ۱، ۳، ٦ و ۱۲ماهه
EVI	MODIS/Terra MOD۱۳A۱ v٦,۱ (Didan, ۲۰۲۱)	۱٦روزه؛ ۵۰۰ متر	۲۰۰۰–۲۰۲۳	محاسبهٔ اوسط سالانه و طبقات پوشش گیاهی
DEM	SRTM/USGS	یک‌بار؛ ۳۰ متر	ثابت	نمایش توپوگرافی و موقعیت مکانی
مرز اداری	لایهٔ چهار ولایت	برداری	ثابت	برش داده‌ها و تلخیص منطقه‌ای

۲.۳. آماده‌سازی و تحلیل شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق (SPEI)

داده‌های پایگاه SPEIbase به مرز چهار ولایت محدود و سلسله‌های ماهانه برای مقیاس‌های ۱، ۳، ٦ و ۱۲ماهه استخراج شدند. محاسبهٔ شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق از تراز اقلیمی ماهانه آغاز می‌شود که در معادلهٔ (۱) نشان داده شده است. در این معادله، D_i تراز اقلیمی در ماه i، P_i مقدار بارش و PET_i تبخیر و تعرق مرجع است. پس از برازش توزیع احتمالی مناسب و استانداردسازی، مقادیر شاخص با اوسط نزدیک صفر به دست می‌آیند. انتخاب توزیع، روش برازش و برآورد تبخیر و تعرق مرجع می‌تواند بر مقدار نهایی شاخص اثر بگذارد؛ ازاین‌رو، استفاده از نسخهٔ مستند پایگاه و گزارش روشن مقیاس زمانی برای بازتولید تحلیل ضروری است (Beguería et al., ۲۰۱٤; Vicente-Serrano et al., ۲۰۱۰). مقدار صفر شرایط نزدیک به معمول، مقادیر منفی کمبود رطوبتی و مقادیر مثبت شرایط مرطوب‌تر را نشان می‌دهند. چون شاخص بدون واحد است، تمام اعداد این مقاله به‌صورت مقدار شاخص گزارش شده‌اند.

$$D_i = P_i - PET_i \qquad (1)$$

برای تفسیر سلسله‌های زمانی، حدود متداول شدت در جدول ۲ به کار رفتند. مقادیر میان −۱ و ۱ به‌عنوان شرایط نزدیک به معمول، مقادیر کمتر از −۱ به‌عنوان آغاز خشکسالی متوسط و مقادیر کمتر از −۲ به‌عنوان خشکسالی بسیار شدید در نظر گرفته شدند. این حدود برای تحلیل رخدادهای ماهانه و تجمعی استفاده شدند. بااین‌حال، نقشه‌های موجود در فایل مبنا با سه ردهٔ نسبی «خشک‌تر»، «میانی» و «مرطوب‌تر» نسبت به اوسط درازمدت هر پیکسل تولید شده‌اند. بنابراین، رنگ نارنجی نقشه‌ها به این معنا نیست که در تمام ۲۴ سال، مقدار SPEI آن ناحیه همواره کمتر از −۱,۵ بوده است؛ بلکه نشان می‌دهد اوسط آن ناحیه در مقایسه با سایر بخش‌های محدودهٔ مطالعه خشک‌تر بوده است. این تفکیک از نسبت‌دادن شدت یک رویداد ماهانه به نقشهٔ اوسط درازمدت جلوگیری می‌کند.

جدول ۲. حدود متداول تفسیر شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق برای رخدادهای زمانی.

محدودهٔ شاخص SPEI	طبقهٔ اقلیمی
۲ یا بیشتر	بسیار مرطوب
۱,۵ تا ۱,۹۹	مرطوب شدید
۱ تا ۱,۴۹	مرطوب متوسط
۰,۹۹– تا ۰,۹۹	نزدیک به معمول
۱– تا ۱,۴۹–	خشکسالی متوسط
۱,۵– تا ۱,۹۹–	خشکسالی شدید
۲– یا کمتر	خشکسالی بسیار شدید

۲.۴. آماده‌سازی و تحلیل شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی (EVI)

محصول MOD۱۳A۱ مقدار شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی را به‌صورت آماده در فاصلهٔ زمانی ۱۶روزه و تفکیک مکانی ۵۰۰ متر فراهم می‌کند. در منطق نظری شاخص، بازتاب مادون‌سرخ نزدیک (NIR)، بازتاب باند سرخ (RED) و بازتاب باند آبی (BLUE) پیش از محاسبه تعریف می‌شوند. رابطهٔ استاندارد این شاخص در معادلهٔ (۲) ارائه شده است؛ ضرایب ۲,۵، ۶ و ۷,۵ برای تقویت سیگنال پوشش گیاهی، کاهش اثر پس‌زمینهٔ خاک و تعدیل بخشی از اثر ذرات جوی طراحی شده‌اند (Huete et al., ۲۰۰۲). در تحلیل حاضر، مقدار مقیاس محصول اعمال و اوسط مشاهدات معتبر موجود در هر سال برای محدودهٔ مطالعه محاسبه شد.

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR - RED}{NIR + 6RED - 7.5BLUE + 1} \qquad (۲)$$

برای نمایش مکانی، شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی به سه طبقهٔ فاقد یا بسیار کم‌پوشش (کمتر از ۰,۱)، پوشش ضعیف (۰,۱ تا کمتر از ۰,۲) و پوشش قوی (۰,۲ و بیشتر) تقسیم شد. این طبقات برای مقایسهٔ نسبی سال‌ها و نواحی استفاده شدند و نباید به‌عنوان طبقه‌بندی کاربری زمین تلقی شوند. برای مثال، مقدار کمتر از ۰,۱ ممکن است بیابان، سنگ، خاک برهنه، زمین برداشت‌شده یا پیکسل نامعتبر را دربر گیرد. همچنین، مقدار بالاتر از ۰,۲ حضور پوشش سبز بیشتر را نشان می‌دهد، اما نوع گیاه یا آبی و للمی بودن زمین را مشخص نمی‌کند.

در نسخهٔ اولیه، مجموع مساحت سه طبقهٔ EVI در بیشتر سال‌ها حدود ۶۸٬۸۶۰ کیلومترمربع بود؛ درحالی‌که مساحت اداری منطقه حدود ۵۷٬۳۰۱ کیلومترمربع گزارش شده است. ازاین‌رو، تا زمانی که مراحل محاسبه با کنترل دقیق دوباره اجرا نشوند، ارقام مساحت بر حسب کیلومترمربع اعتبار کافی ندارند. بنابراین، برای حفظ روند زمانی داده‌ها و جلوگیری از گزارش مقادیر احتمالاً نادرست، سهم نسبی هر طبقهٔ EVI از مجموع پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شدهٔ همان سال، به‌جای مساحت مطلق، مبنای تحلیل و مقایسه قرار گرفت. این درصدها الگوی نسبی را حفظ می‌کنند؛ اما برای برآورد قطعی مساحت، محاسبه باید در یک سیستم مختصات مساوی‌المساحت و با کنترل دقیق مرز تکرار شود.

۲.۵. تطبیق مکانی–زمانی و تحلیل آماری

تفکیک مکانی SPEI تقریباً ۰٫۵ درجه و تفکیک EVI برابر با ۵۰۰ متر است؛ بنابراین، بازنمونه‌برداری مستقیم یکی بر شبکهٔ دیگری می‌توانست دقتی ظاهری ایجاد کند که با دقت واقعی داده‌ها سازگار نیست. برای تحلیل همبستگی، ابتدا اوسط منطقه‌ای هر شاخص برای هر سال محاسبه شد. سپس برای دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳، بیست‌وچهار جفت مشاهدهٔ سالانه میان EVI و هر یک از مقیاس‌های SPEI تشکیل گردید. این تصمیم، واحد تحلیل را «سال–منطقه» تعریف می‌کند و از مقایسهٔ هزاران پیکسل EVI با شمار محدودی سلول بزرگ SPEI جلوگیری می‌نماید. پیامد این روش آن است که تفاوت‌های درون‌ولایتی در ضریب همبستگی نهایی بازتاب نمی‌یابند.

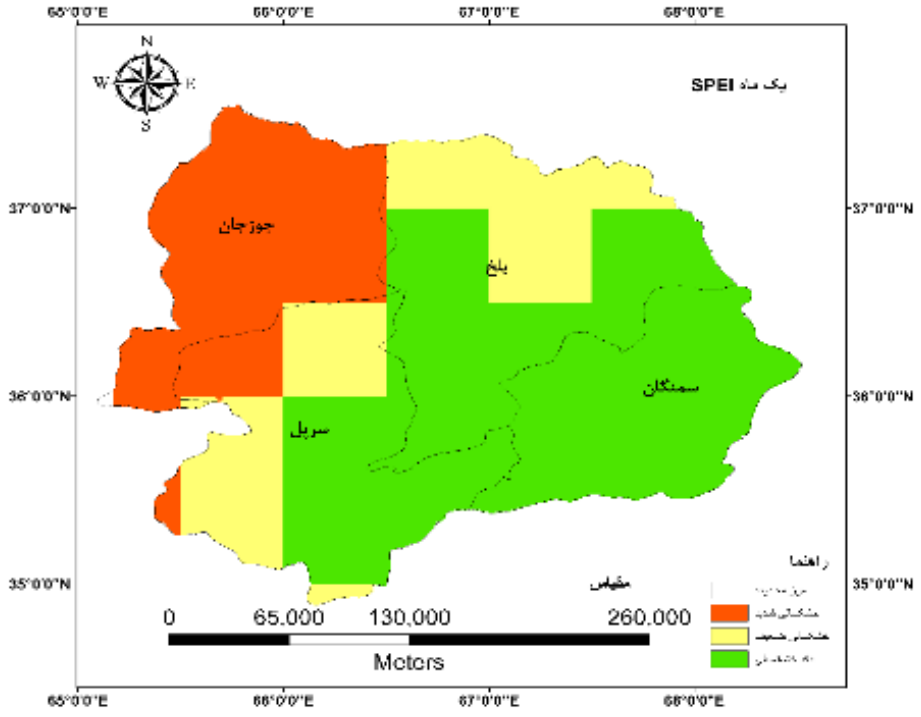
ضریب همبستگی پیرسون (r) مطابق معادلهٔ (۳) برای سنجش رابطهٔ خطی هم‌زمان محاسبه شد؛ در این رابطه، x_i و y_i مشاهدات جفت‌شدهٔ سالانه و $\bar{x}$ و $\bar{y}$ اوسط آن‌ها هستند. مقدار احتمال دوطرفه (p) برای آزمون تفاوت ضریب از صفر گزارش شد. با اندازهٔ نمونهٔ ۲۴، درجهٔ آزادی (df) برابر با ۲۲ بود و سطح تصمیم‌گیری ۰٫۰۵ در نظر گرفته شد. مقدار مثبت r نشان می‌دهد که سال‌های مرطوب‌تر، به‌طور متوسط، با شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی بیشتر همراه بوده‌اند؛ مقدار منفی بیانگر الگوی معکوس است و مقدار نزدیک به صفر، رابطهٔ خطی ضعیف را نشان می‌دهد. در این مقاله، واژهٔ «معنادار» تنها زمانی به کار می‌رود که $p<0.05$ باشد. آزمون حاضر اثر تأخیر چندماهه، تفاوت فصل رشد، خودهمبستگی زمانی و رابطهٔ علّی را نمی‌سنجد. همچنین، چون آزمون من–کندال یا شیب سن اجرا نشده است، تغییرات مشاهده‌شده «نوسان» توصیف می‌شوند و به‌عنوان روند آماری قطعی گزارش نمی‌گردند.

$$r = \frac{\Sigma (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\Sigma(x_i - \underline{x})^2 \, \Sigma(y_i - \underline{y})^2}} \qquad (۳)$$

۳. نتایج

۳.۱. نتایج شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق در مقیاس یک‌ماهه

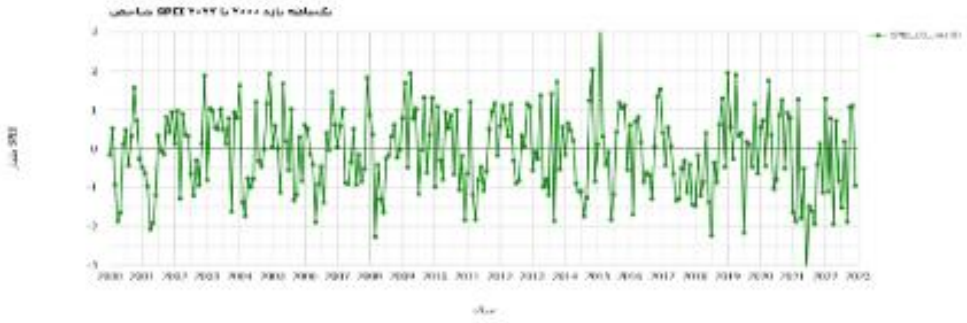
نقشهٔ اوسط درازمدت SPEI یک‌ماهه نشان می‌دهد که جوزجان و بخش‌هایی از شمال‌غرب سرپل در ردهٔ خشک‌تر نسبی قرار گرفته‌اند. بخش شمالی بلخ و قسمت‌هایی از سرپل در ردهٔ میانی‌اند، درحالی‌که جنوب بلخ، جنوب‌شرق سرپل و بیشتر سمنگان نسبتاً مرطوب‌تر ظاهر شده‌اند. این نقشه برای تشخیص تفاوت عمومی میان شمال‌غرب و جنوب منطقه مفید است، اما نباید به‌عنوان نقشهٔ شدت یک ماه معین تفسیر شود؛ زیرا از اوسط کل دورهٔ ۲۴ساله ساخته شده است. همچنین، شکل پله‌ای مرزها بازتاب شبکهٔ درشت SPEI است و مرز واقعی خشکسالی را در سطح ولسوالی نمایش نمی‌دهد.



شکل ۲. الگوی نسبی اوسط درازمدت شاخص استانداردشدهٔ بارش-تبخیر و تعرق یک‌ماهه.

سلسلهٔ زمانی SPEI–1 بیشترین نوسان را در میان چهار مقیاس داشت. در سال ۲۰۰۰، چند ماه زمستان و بهار خشک بودند و اپریل به حدود –۱,۸۶ رسید. در سال ۲۰۰۱، خشکی در بخش بزرگی از سال ادامه یافت و اپریل مقدار حدود –۲,۰۷ را ثبت کرد. سال ۲۰۰۸ نیز یکی از دوره‌های برجسته بود و مارچ به حدود –۲,۲۳ رسید. پس از آن، رخدادهای کوتاه ولی شدید در دسامبر ۲۰۱۰، اپریل ۲۰۱۱، سپتامبر ۲۰۱۳ و آگوست ۲۰۱۴ دیده شد. این پراکندگی نشان می‌دهد که حتی در سال‌هایی که اوسط سالانه نزدیک به معمول است، یک یا چند ماه می‌تواند برای زراعت و مراتع تنش‌زا باشد.

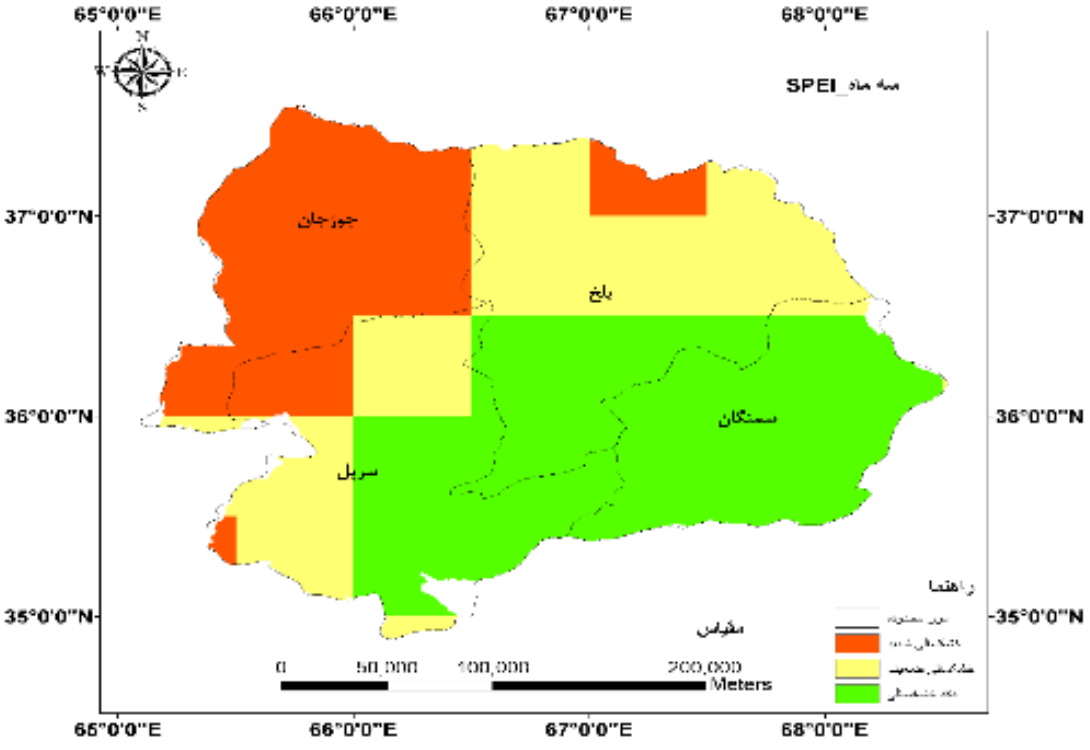
شدیدترین نوسانات نیمهٔ دوم دوره در جولای ۲۰۱۸ و جون ۲۰۲۱ با مقادیر حدود –۲,۲۴ مشاهده شد. سال ۲۰۲۱ در چند فصل ماه‌های خشک داشت و به همین دلیل در مقیاس‌های بلندتر نیز برجسته شد. در مقابل، نوامبر ۲۰۱۴ و اپریل ۲۰۱۵ مقادیر مرطوب قابل‌توجه داشتند و اپریل ۲۰۱۵ به نزدیک +۳ رسید. این تغییر سریع از ماه‌های خشک به مرطوب نشان می‌دهد SPEI–1 برای تشخیص شروع و پایان کوتاه‌مدت مناسب است، اما یک مقدار منفرد نمی‌تواند تداوم خشکسالی را نمایندگی کند. داده‌های ۲۰۲۳ نیز در سلسله حضور دارند، ولی در میان شدیدترین رخدادهای ماهانهٔ کل دوره قرار نگرفتند.



شکل ۳. تغییرات زمانی شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق یک‌ماهه در دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳.

۳.۲. نتایج شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق در مقیاس سه‌ماهه

در نقشهٔ SPEI سه‌ماهه، منطقهٔ خشک‌تر نسبت به نقشهٔ یک‌ماهه پیوستگی بیشتری دارد. جوزجان، بخشی از شمال بلخ و قسمت کوچکی از شمال‌غرب سرپل در ردهٔ خشک‌تر نسبی قرار گرفتند. نواحی میانی در شمال و مرکز بلخ، شمال و غرب سرپل و بخش کوچکی از سمنگان ظاهر شدند؛ درحالی‌که بیشتر سمنگان و قسمت‌های جنوبی بلخ و سرپل نسبتاً مرطوب‌تر بودند. افزایش پیوستگی مکانی منطقی است، زیرا پنجرهٔ سه‌ماهه اثر یک ماه بسیار خشک یا بسیار مرطوب را با دو ماه مجاور ترکیب می‌کند.



شکل ۴. الگوی نسبی اوسط درازمدت شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق سه‌ماهه.

از نظر زمانی، خشکسالی سال ۲۰۰۰ از اواخر زمستان تا تابستان ادامه داشت و جون مقدار حدود –۱٫۸۸ را نشان داد. در سال ۲۰۰۱، چند ماه پی‌درپی در زمستان، بهار و تابستان خشک بودند و جون به حدود –۲٫۲۷ رسید. سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ نیز دوره‌های فصلی منفی داشتند. در این مقیاس، سال ۲۰۰۹ تقریباً بدون خشکسالی برجسته بود و این تفاوت با SPEI–1 نشان می‌دهد بعضی ماه‌های خشک منفرد پس از تجمیع سه‌ماهه تداوم کافی ندارند.

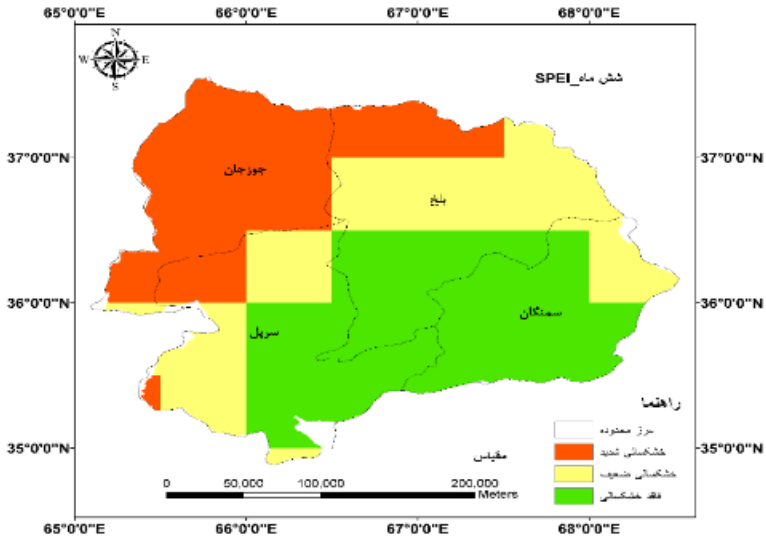
در سال ۲۰۱۴، خشکی از زمستان تا تابستان و اوایل خزان امتداد یافت و سپتامبر به حدود –۱٫۸۳ رسید. سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ نیز چند ماه متوالی منفی داشتند. روشن‌ترین رویداد در ۲۰۲۱ رخ داد: تقریباً تمام سال زیر شرایط خشک قرار گرفت و آگوست با مقدار حدود –۲٫۷۶ شدیدترین مقدار این مقیاس بود. در ۲۰۲۲ نیز خشکی از پایان زمستان تا خزان دیده شد، اما شدت آن کمتر از ۲۰۲۱ بود. شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق سه‌ماهه ازاین‌رو برای بررسی شرایط فصلی و فصل رشد مناسب‌تر از SPEI–1 است، زیرا شوک‌های منفرد را تعدیل و دوره‌های چندماهه را برجسته می‌کند.



شکل ۵. تغییرات زمانی شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق سه‌ماهه در دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳.

۳.۳. نتایج شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق در مقیاس شش‌ماهه

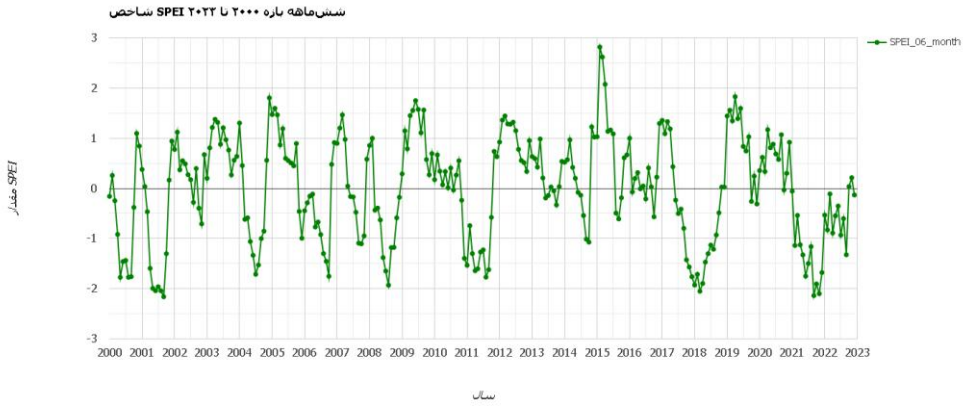
الگوی مکانی SPEI شش‌ماهه نیز شمال‌غرب منطقه را خشک‌تر نشان می‌دهد، اما ردهٔ میانی در بلخ و سرپل گسترش بیشتری دارد. تقریباً تمام جوزجان و نوار شمالی بلخ در ردهٔ خشک‌تر، بخش‌های مرکزی و شمالی بلخ و سرپل در ردهٔ میانی، و بیشتر سمنگان و جنوب محدوده در ردهٔ مرطوب‌تر نسبی قرار دارند. شباهت این نقشه با SPEI سه‌ماهه نشان می‌دهد تفاوت شمال‌غرب و جنوب تنها حاصل یک یا دو ماه منفرد نیست و در تجمع میان‌فصلی نیز باقی می‌ماند.



شکل ٦. الگوی نسبی اوسط درازمدت شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق شش‌ماهه.

سلسلهٔ شش‌ماهه دوره‌های پایدار را واضح‌تر کرد. در ۲۰۰۰ بیشتر ماه‌ها منفی بودند و در ۲۰۰۱ خشکی از بهار تا خزان ادامه یافت؛ سپتامبر ۲۰۰۱ به حدود –۲,۱٦ رسید. سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰٦ و ۲۰۰۸ نیز دوره‌های چندماهه داشتند و در ۲۰۰۸ تقریباً تمام سال، به‌جز بخش کوتاهی از زمستان، زیر شرایط خشک قرار گرفت. در ۲۰۱۱ خشکسالی از اواخر زمستان تا اوایل خزان ادامه یافت. در مقابل، سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ در این مقیاس فاقد دورهٔ خشک برجسته بودند.

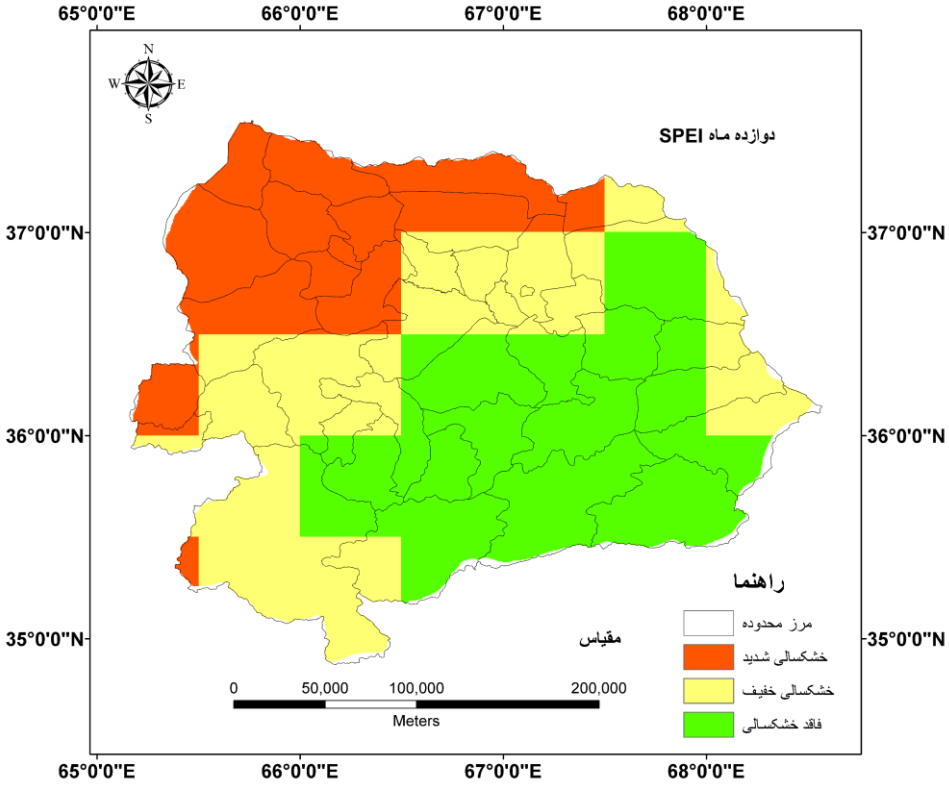
در نیمهٔ دوم دوره، ۲۰۱۷ به خشکی پایان سال منتهی شد و ۲۰۱۸ از اواخر زمستان تا خزان دورهٔ منفی پیوسته داشت؛ مارچ ۲۰۱۸ حدود –۲,۰۵ بود. سال ۲۰۲۱ شدیدترین تداوم را نشان داد و تمام ماه‌ها منفی بودند؛ سپتامبر حدود –۲,۱۴ ثبت شد. در ۲۰۲۲ نیز خشکی در زمستان، بهار، تابستان و بخش‌هایی از خزان ادامه یافت، هرچند شدت آن از ۲۰۲۱ کمتر بود. ترسالی برجستهٔ فبروری ۲۰۱۵ با مقدار حدود +۲,۸۲ نمونه‌ای است که نشان می‌دهد یک دورهٔ مرطوب انباشته چگونه در مقیاس شش‌ماهه ظاهر می‌شود.



شکل ۷. تغییرات زمانی شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق شش‌ماهه در دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳.

۳.۴. نتایج شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق در مقیاس دوازده‌ماهه

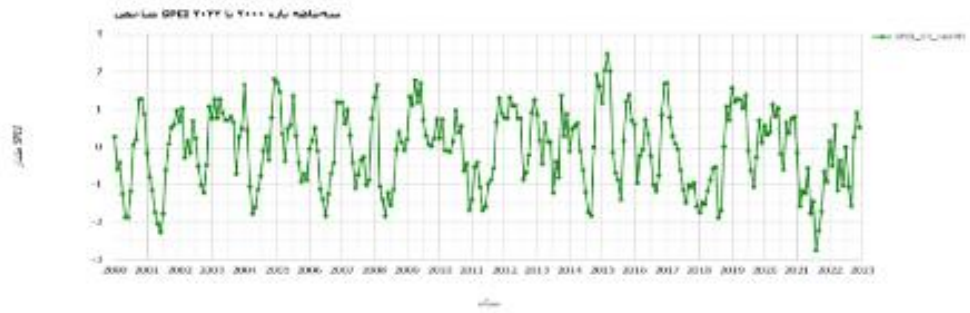
نقشهٔ SPEI دوازده‌ماهه پایدارترین تصویر مکانی را ارائه می‌کند. جوزجان، نوار شمالی بلخ و بخش کوچکی از غرب سرپل خشک‌تر از اوسط منطقه‌اند. بخش‌های مرکزی بلخ و شمال و غرب سرپل در ردهٔ میانی قرار دارند؛ درحالی‌که سمنگان، جنوب بلخ و جنوب‌شرق سرپل نسبتاً مرطوب‌ترند. با وجود این، اصطلاح «مرطوب‌تر» در این نقشه نسبی است و به معنای نبود خشکسالی در تمام ماه‌های دورهٔ ۲۴ساله نیست. هر یک از این نواحی می‌توانند در سالی مشخص مقدار منفی شدید داشته باشند.



شکل ۸. الگوی نسبی اوسط درازمدت شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق دوازده‌ماهه.

در آغاز دوره، سال ۲۰۰۰ به‌جز فبروری عمدتاً منفی بود و ۲۰۰۱ در تمام ماه‌ها خشکسالی داشت؛ اکتوبر ۲۰۰۱ به حدود –۱,۷۶ رسید. اثر انباشته در ۲۰۰۴، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ نیز مشاهده شد، اما بین این دوره‌ها ماه‌ها یا سال‌هایی نزدیک به معمول قرار داشت. سال ۲۰۱۱ در تمام ماه‌ها منفی بود و سپتامبر حدود –۱,۶۹ را ثبت کرد. در مقابل، سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ در این مقیاس خشکسالی برجسته‌ای نشان ندادند.

سال ۲۰۱۸ یکی از روشن‌ترین دوره‌های درازمدت بود؛ تمام ماه‌ها مقدار منفی داشتند و اپریل به حدود –۲,۱۰ رسید. پس از یک بهبود نسبی در ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، خشکی در ۲۰۲۱ دوباره انباشته شد و به ۲۰۲۲ امتداد یافت. دسامبر ۲۰۲۱ حدود –۲,۰۵ و مارچ ۲۰۲۲ حدود –۱,۵۷ بود. مقایسهٔ این سلسله با SPEI–1 نشان می‌دهد مقیاس دوازده‌ماهه نوسان‌های سریع را حذف و کمبود پایدار را برجسته می‌کند؛ ازاین‌رو، برای توصیف وضعیت انباشته مفید است، ولی زمان دقیق شروع شوک ماهانه را با تأخیر نشان می‌دهد.



شکل ۹. تغییرات زمانی شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق دوازده‌ماهه در دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳.

مقایسهٔ چهار مقیاس نشان داد سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ در بیش از یک پنجرهٔ تجمعی برجسته‌اند و بنابراین برای بررسی تفصیلی پیامدهای زراعتی و منابع آب اهمیت بیشتری دارند. در مقابل، بعضی رخدادها تنها در مقیاس کوتاه دیده شدند و پس از تجمیع از شدت افتادند. جدول ۳ مهم‌ترین رویداد و کارکرد تفسیری هر مقیاس را خلاصه می‌کند.

جدول ۳. خلاصهٔ رویدادهای برجستهٔ خشکسالی در چهار مقیاس زمانی.

مقیاس	رویداد شاخص	سال‌های خشک برجسته	برداشت اصلی
۱–SPEI	حدود −۲٫۲۴؛ جولای ۲۰۱۸ و جون ۲۰۲۱	۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱	حساس به نوسان ماهانه و شروع سریع
۳–SPEI	حدود −۲٫۷۶؛ آگوست ۲۰۲۱	۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱	مناسب برای خشکسالی فصلی
۶–SPEI	حدود −۲٫۱۶؛ سپتامبر ۲۰۰۱	۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱	نمایش تداوم میان‌فصلی
۱۲–SPEI	حدود −۲٫۱۰؛ اپریل ۲۰۱۸	۲۰۰۰–۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱–۲۰۲۲	نمایش کمبود انباشته و درازمدت

۳.۵. تغییرات شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی

نقشه‌های سالانهٔ EVI سه الگوی پایدار را نشان دادند. نخست، پوشش قوی به‌صورت لکه‌ای در مسیر رودخانه‌ها، پیرامون شهرها، دشت‌های دارای آبیاری و برخی زمین‌های زراعتی متمرکز است و بخش کوچکی از کل منطقه را تشکیل می‌دهد. دوم، پوشش ضعیف در بخش بزرگی از دشت‌ها و دامنه‌ها گسترش دارد. سوم، نواحی فاقد پوشش گیاهی یا دارای پوشش بسیار کم، عمدتاً در شمال جوزجان و بلخ، بخش‌های صحرایی و برخی نواحی کوهستانی جنوب سرپل و سمنگان مشاهده می‌شوند. با توجه به تفاوت‌های طبیعی میان محیط‌های بیابانی، کوهستانی و اراضی زراعتی، طبقات EVI بیش از آن‌که برای ارزیابی یکسان تمام نواحی مناسب باشند، برای بررسی و مقایسهٔ تغییرات زمانی پوشش گیاهی در هر مکان کاربرد دارند.

شکل ۱۰. تغییرات سالانهٔ طبقات شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی و اوسط دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳.

از نظر زمانی، کاهش آشکار پوشش گیاهی در ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ مشاهده شد و ۲۰۰۸ ضعیف‌ترین وضعیت را داشت. در مقابل، ۲۰۰۹، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ نسبتاً سبزتر بودند. بخشی از این تغییرات با دوره‌های خشکسالی SPEI هم‌زمان است؛ برای نمونه، افت‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۸ در بیش از یک مقیاس خشکسالی نیز برجسته‌اند. بااین‌حال، تطابق کامل وجود ندارد. سال ۲۰۲۳ در EVI کاهش داشت، اما در خلاصهٔ رخدادهای شدید SPEI در همهٔ مقیاس‌ها برجسته نبود. این ناهم‌زمانی می‌تواند به زمان کشت و برداشت، آبیاری، تغییر کاربری، بارندگی فصل قبل یا محدودیت روش اوسط سالانه مرتبط باشد.

برای پرهیز از گزارش مساحت مطلق ناسازگار، جدول ۴ سهم نسبی طبقات را برای سال‌های منتخب نشان می‌دهد. در اوسط دوره، ۵۳٫۰٪ پیکسل‌ها در طبقهٔ پوشش ضعیف، ۴۵٫۶٪ در طبقهٔ فاقد یا بسیار کم‌پوشش و ۱٫۴٪ در طبقهٔ پوشش قوی قرار داشتند. در ۲۰۰۸، سهم طبقهٔ فاقد یا بسیار کم‌پوشش به ۸۸٫۸٪ رسید و پوشش قوی به ۰٫۴٪ کاهش یافت. در ۲۰۱۵، پوشش ضعیف ۵۸٫۸٪ و پوشش قوی ۲٫۷٪ بود؛ در نتیجه مجموع پیکسل‌های دارای EVI حداقل ۰٫۱ به ۶۱٫۵٪ رسید. تفاوت ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ دامنه زیاد تغییرات بین‌ساله را نشان می‌دهد.

جدول ۴. سهم نسبی طبقات پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۰–۲۰۲۳.

سال	فاقد/بسیار کم‌پوشش (%)	پوشش ضعیف (%)	پوشش قوی (%)
۲۰۰۰	۵۴٫۶	۴۴٫۵	۰٫۹
۲۰۰۱	۷۲٫۲	۲۷٫۴	۰٫۵
۲۰۰۸	۸۸٫۸	۱۰٫۸	۰٫۴
۲۰۱۱	۶۵٫۷	۳۳٫۵	۰٫۸
۲۰۱۵	۳۸٫۴	۵۸٫۸	۲٫۷
۲۰۱۸	۶۳٫۲	۳۵٫۴	۱٫۴
۲۰۲۱	۵۲٫۵	۴۶٫۰	۱٫۵
۲۰۲۳	۶۲٫۹	۳۵٫۷	۱٫۴
اوسط دوره	۴۵٫۶	۵۳٫۰	۱٫۴

۳.۶. همبستگی خطی پیرسون میان شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق و شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی

ضرایب همبستگی در هر چهار مقیاس مثبت بودند؛ یعنی سال‌هایی که اوسط SPEI بالاتری داشتند، به‌طور متوسط EVI بیشتری نیز نشان دادند. با افزایش پنجرهٔ تجمعی، r از ۰٫۰۶۲ برای SPEI یک‌ماهه به ۰٫۰۹۷، ۰٫۱۴۹ و ۰٫۲۱۳ برای مقیاس‌های سه، شش و دوازده‌ماهه افزایش یافت. این الگو از نظر جهت با انتظار نظری

سازگار است و ممکن است نشان دهد اوسط سالانهٔ پوشش گیاهی به شرایط انباشته حساس‌تر از شوک‌های منفرد ماهانه است.

با وجود افزایش ضریب، هیچ‌یک از روابط در سطح ۰,۰۵ معنادار نبودند. مقدار p از ۰,۷۷۴ در مقیاس یک‌ماهه تا ۰,۳۱۷ در مقیاس دوازده‌ماهه تغییر کرد و در همهٔ موارد بسیار بزرگ‌تر از ۰,۰۵ بود. بنابراین، فرض نبود رابطهٔ خطی را نمی‌توان رد کرد. به بیان ساده، داده‌های ۲۴ساله گرایشی مثبت اما ضعیف را نشان می‌دهند و شواهد کافی برای ادعای رابطهٔ مستقیم و ثابت میان SPEI و EVI فراهم نمی‌کنند. این نتیجه همچنین نشان می‌دهد که گزارش پیشینِ همبستگی منفی یا نسبت‌دادن «بیشترین رابطه» به مقیاس شش‌ماهه نادرست بوده است؛ بیشترین ضریب به مقیاس دوازده‌ماهه تعلق دارد.

جدول ۵. همبستگی پیرسون میان اوسط سالانهٔ شاخص بهبودیافتهٔ پوشش گیاهی و شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق.

مقیاس شاخص (SPEI)	r	p (دوطرفه)	تفسیر
یک‌ماهه	۰,۰۶۲	۰,۷۷۴	بسیار ضعیف؛ نامعنادار
سه‌ماهه	۰,۰۹۷	۰,۶۵۱	بسیار ضعیف؛ نامعنادار
شش‌ماهه	۰,۱۴۹	۰,۴۸۷	ضعیف؛ نامعنادار
دوازده‌ماهه	۰,۲۱۳	۰,۳۱۷	ضعیف؛ نامعنادار

نزدیک‌بودن ضرایب به صفر به معنای بی‌اهمیت‌بودن خشکسالی برای پوشش گیاهی نیست. اوسط سالانه می‌تواند پاسخ فصلی یا تأخیری را پنهان کند؛ مثلاً بارندگی زمستان و بهار ممکن است چند هفته بعد در EVI ظاهر شود، درحالی‌که اوسط هم‌زمان سالانه این توالی را از بین می‌برد. افزون بر آن، آبیاری و تفاوت نوع پوشش می‌تواند پاسخ مناطق را در جهت‌های مختلف تغییر دهد و پس از اوسط‌گیری منطقه‌ای رابطهٔ کلی را کاهش دهد. ازاین‌رو، نتیجهٔ آماری حاضر باید محدود به رابطهٔ خطی هم‌زمان در سطح سال–منطقه تفسیر شود.

۴. بحث

۴,۱. مقیاس زمانی و تداوم خشکسالی

مهم‌ترین نتیجهٔ روش‌شناختی تحقیق آن است که انتخاب مقیاس زمانی، تصویر متفاوتی از یک دورهٔ اقلیمی ایجاد می‌کند. شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق یک‌ماهه آغاز سریع و شوک‌های کوتاه را نشان داد؛ شاخص استانداردشدهٔ بارش–تبخیر و تعرق سه‌ماهه دوره‌های فصلی را پیوسته‌تر ساخت؛ و مقیاس‌های شش و دوازده‌ماهه کمبود انباشته را برجسته کردند. بنابراین، هیچ‌یک از مقیاس‌ها به‌طور مطلق «دقیق‌تر» از دیگری نیست. مناسب‌بودن هر مقیاس به پرسش بستگی دارد: برای تصمیم‌های کوتاه‌مدت زراعتی، مقیاس یک یا

سه‌ماهه اطلاعات سریع‌تری می‌دهد؛ برای بررسی فشار انباشته بر ذخایر و شرایط سالانه، مقیاس‌های شش و دوازده‌ماهه مناسب‌ترند. این برداشت با پژوهش‌هایی سازگار است که خشکسالی افغانستان را پدیده‌ای چندمقیاسی و از نظر فصلی متغیر معرفی کرده‌اند (Muhammad et al., ۲۰۱۷; Qutbudin et al., ۲۰۱۹).

هم‌زمانی سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ در چند مقیاس اهمیت دارد. هنگامی که یک سال فقط در SPEI–1 منفی است، ممکن است مسئله به چند ماه محدود باشد؛ اما تکرار علامت و شدت منفی در SPEI–3، SPEI–6 و SPEI–12 نشان می‌دهد کمبود رطوبتی در زمان انباشته شده است. سال ۲۰۲۱ روشن‌ترین مثال پایان دوره بود: خشکی از مقیاس کوتاه به بلند منتقل شد و در ۲۰۲۲ نیز اثر انباشته باقی ماند. از سوی دیگر، دورهٔ مرطوب ۲۰۱۵ در چند پنجرهٔ زمانی ظاهر شد و نشان داد تداوم شرایط مرطوب می‌تواند خشکسالی پیشین را موقتاً تعدیل کند. تحقیق شوکلا و همکاران (۲۰۲٤) نیز نشان می‌دهد که تغییرپذیری بزرگ‌مقیاس اقلیمی برای دورنمای خشکسالی و پیامدهای زراعتی افغانستان مهم است؛ بااین‌حال، تحقیق حاضر فقط الگوی تاریخی را توصیف می‌کند و مدل پیش‌بینی ارائه نمی‌دهد.

٤,۲. الگوی مکانی خشکسالی

تمرکز خشکی نسبی در جوزجان، شمال بلخ و شمال‌غرب سرپل از تفاوت پایدار شمال‌غرب با مناطق مرتفع‌تر جنوب حکایت دارد. دشت‌های کم‌ارتفاع شمال معمولاً بارندگی کمتر، درجه حرارت بالاتر و تقاضای تبخیری بیشتری دارند؛ در مقابل، ارتفاع و دریافت برف در جنوب می‌تواند شرایط متفاوتی ایجاد کند. بااین‌حال، تفکیک ۰,۵ درجهٔ SPEI سبب می‌شود هر سلول مساحتی بزرگ و ناهمگون را نمایندگی کند. مرزهای چهارگوش و تیز نقشه‌ها در واقع مرز سلول داده‌اند، نه مرز طبیعی خشکسالی. بنابراین، نقشه‌های این مقاله برای مقایسهٔ چهار ولایت و شناسایی نواحی عمومی مناسب‌اند، اما برای انتخاب مزرعه، روستا یا ولسوالی هدف کافی نیستند. برای تصمیم‌گیری محلی، داده‌های اقلیمی با تفکیک بالاتر، تصحیح توپوگرافی و اعتبارسنجی ایستگاهی لازم است.

٤,۳. پاسخ پوشش گیاهی و مقایسه با مطالعات پیشین

الگوی EVI نیز منطق مکانی قابل انتظار داشت: پوشش قوی در مسیر آب، نواحی آبی و زمین‌های زراعتی متمرکز و پوشش بسیار کم در دشت‌های خشک و ارتفاعات سنگی گسترده بود. افت EVI در ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۸ با خشکسالی‌های برجستهٔ SPEI هم‌زمان شد و با نتایج محمود و همکاران (۱۴۰۱) در حوضهٔ شمالی افغانستان سازگار است. روستا و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان دادند پاسخ پوشش گیاهی افغانستان میان حوضه‌ها و سال‌ها تفاوت دارد. بااین‌حال، تطابق ناقص سال‌ها یادآور می‌شود که EVI مستقیماً «نقشهٔ خشکسالی» نیست. آبیاری می‌تواند پوشش سبز را در سال خشک حفظ کند؛ برداشت زودهنگام یا تغییر کشت می‌تواند EVI را در سال نسبتاً مرطوب کاهش دهد؛ و اوسط سالانه ممکن است اوج فصل رشد را با ماه‌های بدون پوشش مخلوط سازد.

افزایش r از ۰,۰۶۲ در SPEI–1 به ۰,۲۱۳ در SPEI–12 از نظر جهت نشان می‌دهد شرایط انباشته احتمالاً با اوسط سالانهٔ پوشش گیاهی ارتباط بیشتری از نوسانات منفرد ماهانه دارد. بااین‌حال، تمام ضرایب ضعیف و نامعنادارند و نباید به‌عنوان اثبات این فرض تفسیر شوند. کائو و همکاران (۲۰۲۱) و سندیپ و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی با فصل، مقیاس و نوع اکوسیستم تغییر می‌کند. مهرآور و همکاران (۲۰۲۱) نیز بر ارزش ترکیب چند متغیر ماهواره‌ای تأکید کرده‌اند. این تفسیر با یافته‌های چندمقیاسی جدید افغانستان نیز سازگار است که تفاوت پاسخ پوشش گیاهی را در مقیاس‌های زمانی و نواحی مختلف برجسته می‌کند (Chen et al., ۲۰۲٤). در منطقهٔ حاضر، ادغام بارندگی، رطوبت خاک، دمای سطح زمین، نوع کشت و آبیاری می‌تواند بخش بیشتری از تغییر EVI را توضیح دهد. در نتیجه، ضریب ضعیف به معنای بی‌اثر بودن خشکسالی نیست؛ بلکه نشان می‌دهد مدل بسیار ساده سالانه برای جداکردن این اثر از سایر عوامل کافی نیست.

٤,٤. ملاحظات آماری

از نظر آماری، اندازهٔ نمونهٔ ۲۴ساله قدرت محدودی برای آشکارسازی یک رابطهٔ کوچک دارد. افزون بر آن، مشاهدات سالانه ممکن است استقلال کامل نداشته باشند، زیرا خشکسالی یک سال می‌تواند بر ذخیرهٔ آب و پوشش گیاهی سال بعد اثر بگذارد. تحلیل حاضر خودهمبستگی زمانی را مدل نکرد و برای چهار مقیاس آزمون جداگانه انجام داد. ازاین‌رو، گزارش مقدار دقیق r و p و پرهیز از واژهٔ «معنادار» ضروری بود. تحلیل آینده می‌تواند با همبستگی متقاطع و تأخیرهای صفر تا شش‌ماه، مدل‌های سری زمانی و تفکیک فصل رشد بررسی کند که آیا EVI با فاصلهٔ زمانی مشخصی به SPEI پاسخ می‌دهد. جداکردن اراضی آبی، للمی، مراتع و پوشش طبیعی نیز مانع خنثی‌شدن پاسخ‌های متفاوت در اوسط منطقه‌ای خواهد شد.

٤,٥. پیامدهای کاربردی و محدودیت‌ها

یافته‌ها زمانی کاربرد عملی دارند که در مقیاس متناسب با داده‌ها تفسیر شوند. تکرار خشکی در شمال‌غرب منطقه می‌تواند این نواحی را برای تقویت شبکهٔ پایش، جمع‌آوری داده‌های زمینی و ارزیابی‌های زراعتی در اولویت قرار دهد. سال‌هایی که در چند مقیاس خشکسالی برجسته‌اند نیز می‌توانند برای بررسی عمیق‌تر عملکرد محصول، تغییر سطح زیر کشت، قیمت‌ها و راهبردهای سازگاری خانوار انتخاب شوند. این جهت‌گیری با اهمیت عوامل اقتصادی و نهادی در سازگاری خانوارهای زراعتی افغانستان هم‌خوان است (Aliyar et al., ۲۰۲۲). همچنین، تفاوت میان حوضه‌ها و پایداری منابع آب که دوست و کاسیویسواناتان (۲۰۲۳) گزارش کرده‌اند، نشان می‌دهد که یافته‌های اقلیمی باید همراه با اطلاعات منابع آب و شیوهٔ مدیریت محلی تفسیر شوند.

این تحقیق پنج محدودیت اصلی دارد. نخست، شبکهٔ SPEI برای تحلیل در سطح ولسوالی بسیار درشت است. دوم، اوسط سالانه رابطهٔ فصلی و تأخیر زمانی را پنهان می‌کند. سوم، اعتبارسنجی منظم با ایستگاه‌های هواشناسی و مشاهدات مزرعه‌ای انجام نشده است. چهارم، اختلاف میان مجموع مساحت طبقات EVI و

مساحت اداری، گزارش معتبر مساحت بر حسب کیلومترمربع را ناممکن ساخت؛ ازاین‌رو، تنها درصدهای نسبی قابل استفاده بودند. پنجم، آزمون رسمی روند، مانند من–کندال و شیب سن، اجرا نشده است. در نتیجه، مقاله تغییرات و رویدادها را توصیف می‌کند، نه روند قطعی، اثر علّی، پیش‌بینی آینده یا مقدار مستقیم کمبود آب. بیان روشن این محدودیت‌ها اعتبار یافته‌ها را افزایش می‌دهد و مسیر بازاجرای دقیق‌تر تحلیل را مشخص می‌سازد.

۵. نتیجه‌گیری

تحلیل دورهٔ ۲۰۰۰–۲۰۲۳ نشان داد که الگوی خشکسالی در شمال افغانستان به مقیاس زمانی وابسته است: SPEI یک‌ماهه نوسانات کوتاه‌مدت، SPEI سه‌ماهه شرایط فصلی و مقیاس‌های شش و دوازده‌ماهه کمبود انباشته را بهتر بازتاب دادند. سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ در چند مقیاس برجسته بودند. الگوی مکانی نیز جوزجان، شمال بلخ و شمال‌غرب سرپل را در مقایسه با بیشتر بخش‌های سمنگان و نواحی جنوبی منطقه خشک‌تر نشان داد. کاهش EVI در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۸ با بخشی از این دوره‌های خشک هم‌زمان بود؛ بااین‌حال، همبستگی پیرسون میان اوسط سالانهٔ EVI و SPEI در هیچ مقیاسی معنادار نبود و بیشترین ضریب در مقیاس دوازده‌ماهه به دست آمد (r=۰٫۲۱۳، p=۰٫۳۱۷). بنابراین، یافته‌ها تنها از یک ارتباط مثبت و ضعیف پشتیبانی می‌کنند و برای اثبات اثر علّی مستقیم خشکسالی بر پوشش گیاهی کافی نیستند. محدودیت تفکیک مکانی SPEI و استفاده از اوسط سالانه، همراه با نقش آبیاری، نوع زمین، زمان کشت و برداشت، خاک، ارتفاع و تغییر کاربری، باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند.

برای تکمیل این تحقیق، پیشنهاد می‌شود رابطهٔ ماهانهٔ SPEI و EVI با تأخیرهای صفر تا شش‌ماه و به‌طور جداگانه برای فصل رشد آزمون شود. همچنین، اراضی آبی، للمی، مراتع و پوشش طبیعی جداگانه تحلیل و نتایج با داده‌های ایستگاهی، مشاهدات زمینی و آمار تولیدات زراعتی اعتبارسنجی شوند. مساحت طبقات EVI نیز باید در یک سیستم مختصات مساوی‌المساحت دوباره محاسبه و با مساحت رسمی مرزها کنترل شود. در صورتی که هدف سنجش روند باشد، آزمون من–کندال و شیب سن همراه با ارزیابی خودهمبستگی و معناداری آماری اجرا گردد.

منابع

محمود، سیدعبدالروف، روستا، ایمان، و مزیدی، احمد (۱۴۰۱). بررسی پایداری روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از سنجش‌از دور (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز شمالی افغانستان). جغرافیا و پایداری محیط، ۱۲(۲)، ۱۷–۳۵. https://doi.org/10.22126/ges.2022.7416.2496

Aliyar, Q., Zulfiqar, F., Datta, A., Kuwornu, J. K. M., & Shrestha, S. (2022). Drought perception and field-level adaptation strategies of farming households in drought-prone areas of Afghanistan. International Journal of Disaster Risk Reduction, 72, 102862. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102862

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. International Journal of Climatology, 34(10), 3001–3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig-Gracia, F., & Latorre Garcés, B. (2024). SPEIbase v.2.10 [Data set]. Digital.CSIC. https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/16497

Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., & Shoko, C. (2020). Impacts of climate variability and drought on surface water resources in sub-Saharan Africa using remote sensing: A review. Remote Sensing, 12(24), 4184. https://doi.org/10.3390/rs12244184

Cao, S., He, Y., Zhang, L., Chen, Y., Yang, W., Yao, S., & Sun, Q. (2021). Spatiotemporal characteristics of drought and its impact on vegetation in the vegetation region of Northwest China. Ecological Indicators, 133, 108420. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108420

Chen, Y., Taylor, P., Cuddy, S. M., Wahid, S., Penton, D., & Karim, F. (2024). Inferring vegetation response to drought at multiscale from long-term satellite imagery and meteorological data in Afghanistan. Ecological Indicators, 158, 111567. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111567

Didan, K. (2021). MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 500 m SIN grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.061

Dost, R., & Kasiviswanathan, K. S. (2023). Quantification of water resource sustainability in response to drought risk assessment for Afghanistan river basins. Natural Resources Research, 32(1), 235–256. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10129-5

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45(2), RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1–2), 195–213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Jamalzi, A. R., Rahman, G., Akhtar, F., Ikram, Q. D., & Kwon, H.-H. (2025). Spatiotemporal assessment and trend analysis of meteorological drought in Afghanistan (1974–2023) using SPI and SPEI indices. Journal of Hydrology: Regional Studies, 61, 102711. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102711

Mehravar, S., Amani, M., Moghimi, A., Dadrass Javan, F., Samadzadegan, F., Ghorbanian, A., Stein, A., Mohammadzadeh, A., & Mirmazloumi, S. M. (2021). Temperature–vegetation–soil moisture–precipitation drought index (TVMPDI): 21-year drought monitoring in Iran using satellite imagery within Google Earth Engine. Advances in Space Research, 68(11), 4573–4593. https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.041

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391(1–2), 202–216. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Muhammad, A., Kumar Jha, S., & Rasmussen, P. F. (2017). Drought characterization for a snow-dominated region of Afghanistan. Journal of Hydrologic Engineering, 22(8), 05017014. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001543

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

Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. Remote Sensing of Environment, 114(12), 2875–2887. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005

Rousta, I., Ólafsson, H., Moniruzzaman, M., Zhang, H., Liou, Y.-A., Mushore, T. D., & Gupta, A. (2020). Impacts of drought on vegetation assessed by vegetation indices and meteorological factors in Afghanistan. Remote Sensing, 12(15), 2433. https://doi.org/10.3390/rs12152433

Samim, A. T., Lee, H. S., Hussainzada, W., Bhanage, V., & Nayyer, F. (2025). Comprehensive drought assessment based on the SPEI and its impact on crop production and streamflow in Afghanistan. Journal of Hydrology: Regional Studies, 62, 102893. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102893

Sandeep, P., Obi Reddy, G. P., Jegankumar, R., & Arun Kumar, K. C. (2021). Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets. Ecological Indicators, 121, 107033. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107033

Shukla, S., Zaheer, F., Hoell, A., Anderson, W., Jayanthi, H., Husak, G., Lee, D., Barker, B., Pervez, S., Slinski, K., Justice, C., Rowland, J., McNally, A. L., Budde, M., & Verdin, J. (2024). ENSO-based outlook of droughts and agricultural outcomes in Afghanistan. Weather and Climate Extremes, 45, 100697. https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100697

Suryavanshi, S., Joshi, N., Maurya, H. K., Gupta, D., & Sharma, K. K. (2022). Understanding precipitation characteristics of Afghanistan at provincial scale. Theoretical and Applied Climatology, 150, 1775–1791. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04257-4

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 23(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., &

Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110(1), 52–57. https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. Environmental Reviews, 19, 333–349. https://doi.org/10.1139/a11-013

© Qasimi and Khaksar, 2025. This work is distributed under CC BY-SA 4.0: Creative Commons BY-SA 4.0