Golestan University

Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 25, Spring 2026

Evaluation and spatial-temporal analysis of drought in Golestan Province

Mostafa Yelghei[1], **Hossein Mohammadi**[2]

[1] Master's student in Climatology, Environmental Climatology, Tehran, Iran, Email: mostafa.yelghei@ut.ac.ir
[2] Professor of Physical Geography, Climatology, Tehran, Iran, Email: hmmohammadi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2026-2-16
Accepted: 2026-4-20

Keywords:
Golestan province
Climate
Drought
SPEI
SPI

ABSTRACT

Drought is one of the most important climate hazards with widespread impacts on water resources, agriculture, and livelihoods of communities. Understanding its temporal and seasonal patterns in sensitive areas, especially in unstable climates, is of great importance. The aim of this study is to investigate and compare the monthly, seasonal, and annual trends of the SPI and SPEI drought indices in Golestan province over the long-term period from 1950 to 2024 and analyze their structural differences in reflecting the moisture conditions of the region. In this study, precipitation and potential evapotranspiration data were obtained from the ERA5 database with a spatial resolution of 0.1×0.1 degrees, and then the monthly, seasonal, and annual trends and fluctuations of these indices were estimated, plotted, and analyzed using the IDW and Hotspot interpolation methods with Arcmap. The results showed that the SPI index experienced a significant decrease in spring and early summer, and its values reached less than -3 in some months. In contrast, the SPEI index showed more balanced fluctuations around zero.This difference indicates that the SPEI index, by considering thermal components, provides a more accurate analysis of the moisture status of the region. The findings indicate that the combined use of SPI and SPEI indices can be effective in more comprehensive monitoring and analysis of drought. It is also suggested that the study of these indices should be pursued at local scales and by considering other environmental factors.

Cite this article: Yelghei, M., Mohammadi, H. (2026). Drought monitoring based on the Standardized Precipitation-Evaporation Index SPEI under the influence of climate change and the XGBoost algorithm. Journal of the Climate Change research, 7 (25), 85-103.

©The author(s)

Publisher: Golestan University
DOI: 10.30488/ccr.2026.576352.1325

نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی

فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال هفتم/ شماره مسلسل بیست و پنجم/ بهار ۱۴۰۵ / صفحات: ۱۰۳-۸۵

ارزیابی و تحلیل زمانی– مکانی خشکسالی در استان گلستان

مصطفی یلقی[۱]، حسین محمدی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی‌ارشد اقلیم‌شناسی، گرایش اقلیم‌شناسی محیطی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: mostafa.yelghei@ut.ac.ir

[۲] استاد جغرافیای طبیعی، اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: hmmohammadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۳۱

واژه‌های کلیدی:
استان گلستان
اقلیم
خشکسالی
شاخصSPEI
شاخص SPI

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی با اثرات گسترده بر منابع آب، کشاورزی و معیشت جوامع است. درک الگوی زمانی و فصلی آن در مناطق حساس، به‌ویژه در اقلیم‌های ناپایدار، از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه روند ماهانه، فصلی و سالانه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در استان گلستان طی بازه بلندمدت ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ و تحلیل تفاوت‌های ساختاری آن‌ها در بازتاب شرایط رطوبتی منطقه می‌باشد. در این مطالعه، داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل با تفکیک مکانی ۰٫۱×۰٫۱ درجه از پایگاه ERA5 اخذ و سپس روند و نوسانات ماهانه، فصلی و سالانه این شاخص‌ها با روش درون‌یابی IDW و Hotspot با Arcmap برآورد، ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص SPI در فصل بهار و اوایل تابستان با کاهش چشمگیری مواجه شده و مقادیر آن در برخی ماه‌ها به کمتر از ۳- رسیده است. در مقابل، شاخص SPEI نوسانات متعادل‌تری حول مقدار صفر نشان داده است. این تفاوت حاکی از آن است که شاخص SPEI با در نظر گرفتن مؤلفه‌های حرارتی، تحلیل دقیق‌تری از وضعیت رطوبتی منطقه ارائه می‌دهد. یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده توأم از شاخص‌های SPI و SPEI می‌تواند در پایش و تحلیل جامع‌تر خشکسالی مؤثر واقع شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد بررسی این شاخص‌ها در مقیاس‌های محلی و با در نظر گرفتن سایر عوامل محیطی پیگیری شود.

استناد: یلقی، مصطفی؛ محمدی، حسین (۱۴۰۵). ارزیابی و تحلیل زمانی- مکانی خشکسالی در استان گلستان. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۵)، ۱۰۳-۸۵.

DOI: 10.30488/ccr.2026.576352.1325

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.

مقدمه

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی، از بلایای طبیعی خاموش و تدریجی است که آثار اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای دارد. این پدیده، برخلاف سیلاب یا زلزله، به‌صورت تدریجی رخ می‌دهد اما پیامدهای آن می‌تواند به‌مراتب مخرب‌تر و پایدارتر باشد(Wilhite & Glantz, 1985). تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، به افزایش شدت، تداوم و طول دوره‌های خشکسالی در بسیاری از مناطق جهان منجر شده‌اند(IPCC, 2021). به‌ویژه، تشدید چرخه هیدرولوژیک و افزایش تبخیر و تعرق ناشی از گرمایش جهانی، نقش مؤثری در وقوع خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر داشته است(Trenberth et al., 2014). از دیدگاه علمی، خشکسالی عموماً از سه منظر قابل بررسی است: رویکرد اقلیمی – هواشناسی که این رویکرد بر پایه تحلیل داده‌های بارش و دما و استفاده از شاخص‌های هواشناسی استوار است(McKee et al., 1993). شاخص SPI به‌عنوان یک ابزار استاندارد، تنها بر اساس بارش عمل می‌کند. در مقابل، شاخص SPEI با افزودن مؤلفه تبخیر و تعرق، برای مناطق تحت تأثیر گرمایش جهانی مناسب‌تر است (Vicente-Serrano et al., 2010). رویکرد فضایی – مکانی که در این رویکرد، توزیع جغرافیایی خشکسالی بررسی می‌شود. مطالعاتی نظیر (Gümüş, 2023) نشان می‌دهند که روش‌های درون‌یابی مانند IDW و کریجینگ قادرند الگوهای مکانی خشکسالی را با دقت نمایش دهند و مناطق بحرانی را شناسایی کنند؛ و رویکرد تغییرات اقلیمی که پژوهش‌های جدید بر پیوند مستقیم خشکسالی با تغییرات اقلیمی تأکید دارند (Spinoni et al., 2014). در بازه ۱۹۵۱–۲۰۱۰ افزایش شدت و تداوم خشکسالی در مناطق خشک نیمکره شمالی را گزارش کرده‌اند. همچنین (Zarch et al., 2015) روند افزایشی خشکسالی‌های شدید را در دهه‌های اخیر تأیید نموده‌اند.در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی در دهه‌های اخیر منجر به تشدید الگوهای حدی از جمله افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها در بسیاری از مناطق جهان شده است (IPCC, 2021). روند افزایشی دما و تغییرات الگوی بارش، کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی و افزایش فشار بر بخش‌های کشاورزی و اکوسیستم‌ها را در پی داشته است (Trenberth et al., 2014). استان گلستان با اقلیم متنوع و وابستگی شدید به منابع آب، در برابر تغییرات اقلیمی و خشکسالی بسیار آسیب‌پذیر است (ناظری و همکاران، ۱۳۹۸) و گزارش‌های اخیر حاکی از تغییرات محسوس بارش و دما و وقوع خشکسالی‌های متوالی با اثرات مستقیم بر تولیدات کشاورزی و منابع آبی منطقه است (رمضانی و همکاران، ۱۴۰۰). با این حال، مطالعات داخلی غالباً به‌صورت مقطعی یا با تمرکز بر یک شاخص و بدون در نظر گرفتن ابعاد فضایی و خوشه‌بندی مناطق بحرانی انجام شده‌اند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به وابستگی اقتصاد استان به کشاورزی، تحلیل جامع الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی برای کاهش خسارات و تدوین راهبردهای سازگاری ضروری است (ناظری و همکاران، ۱۳۹۸). این پژوهش با هدف پوشش این خلأ، در پی پاسخ به دو پرسش کلیدی است: ۱) روند زمانی و تغییرات شدت خشکسالی در استان گلستان چه الگویی داشته است؟ ۲) الگوی مکانی و توزیع خوشه‌های فضایی خشکسالی چگونه است و مناطق بحرانی در کدام نواحی متمرکز هستند؟

مطالعات داخلی و خارجی متعدد و مشابهی به بررسی روند خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی پرداخته‌اند. در ایران، (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۰) در مطالعه‌ای به بررسی وضعیت خشکسالی استان گلستان با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI)[1] پرداختند. آن‌ها با تحلیل داده‌های بارندگی ۲۵ ساله (۱۹۷۵-۲۰۰۰) ۲۲ ایستگاه منتخب و با کمک نرم‌افزارهای Excel و ArcGIS، نقشه‌های شدت خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه تهیه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که

1. Drought
2. Standardized Precipitation Index

وسعت خشکسالی با افزایش مقیاس زمانی کاهش یافته و شدت خشکسالی از غرب به شرق استان گلستان کاهش می‌یابد. این مطالعه بر قابلیت شاخص SPI در پایش خشکسالی و حساسیت بیشتر مناطق مرکزی و غربی استان به این پدیده تأکید کرد. (اختری و همکاران ۱۳۸۵) در مطالعه‌ای به تحلیل مکانی و تهیه نقشه‌های خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI و EDI در استان تهران پرداختند. آن‌ها متغیر مکانی بودن این شاخص‌ها را بررسی کرده و سپس روش‌های زمین‌آماری شامل کریجینگ، کوکریجینگ، TPSS و میانگین متحرک وزن‌دار (WMA) را برای تحلیل مکانی با استفاده از داده‌های بارندگی ۴۳ ایستگاه در یک دوره ۳۰ ساله (۱۳۴۸-۱۳۷۹) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که هرچند کریجینگ دقیق‌ترین روش بود، اما WMA نیز دقت کافی و سرعت عمل بالایی برای استفاده در سیستم‌های پایش فعال خشکسالی ارائه می‌دهد. این مطالعه بر اهمیت روش تحلیل مکانی در کنار شاخص خشکسالی برای اعلام وضعیت آن تأکید کرد. (فتحنیا و همکاران، ۱۳۹۶) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی احتمال تکرار دوره‌های خشکسالی و اثر آن بر پوشش گیاهی در استان گلستان پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های ایستگاه گرگان (۲۰۰۰-۱۹۸۰)، روند بارش را با آزمون‌های میانگین متحرک و من‌کندال بررسی کرده و دوره‌های خشکسالی را با شاخص SPI استخراج نمودند. همچنین، با تصاویر NOAA-AVHRR و زنجیره مارکوف، نوسانات و احتمال گذر طبقات پوشش گیاهی را تحت تأثیر روند بارش بررسی کردند. نتایج نشان داد که دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت (مثل ۱۹۸۶-۱۹۸۲ و ۲۰۱۰-۲۰۰۵) منجر به کاهش مساحت پوشش گیاهی نیمه‌متراکم شده و احتمال تبدیل زمین‌های با پوشش گیاهی ضعیف به مناطق فاقد پوشش گیاهی بالا است. (مساعدی و همکاران، ۱۳۸۷) در مطالعه‌ای به پایش خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان پرداختند. آن‌ها با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) و آمار بارندگی ۲۴ ایستگاه با طول دوره آماری ۲۹ سال، وضعیت خشکسالی را در محدوده هر ایستگاه و در هر سال آبی تعیین کردند. سپس با کمک نرم‌افزار Surfer 8.0 نقشه‌های وضعیت خشکسالی سالیانه را تهیه نمودند. نتایج نشان داد که نوسانات وضعیت رطوبتی در استان بسیار زیاد است و خشکسالی در مناطق مرزی و نوار ساحلی دریای کاسپین شدیدتر می‌باشد، ضمن اینکه زمان شروع و خاتمه خشکسالی در مناطق مختلف استان متفاوت است. (عیوضی و همکاران، ۱۳۸۷) در مطالعه‌ای به بررسی فراوانی و تداوم شرایط مختلف بارش و خشکسالی در استان گلستان پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های بارندگی سالانه ۲۷ ایستگاه طی یک دوره آماری ۲۵ ساله (۱۳۶۱-۱۳۸۶)، مقادیر وضعیت رطوبتی را با شاخص SPI محاسبه کرده و به ۷ طبقه رطوبتی دسته‌بندی نمودند. همچنین، تداوم‌های ۱ تا بیش از ۵ سال را برای هر طبقه بررسی کردند. نتایج نشان داد که شرایط نرمال دارای فراوانی و تداوم بیشتری نسبت به خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها است و خشکسالی‌ها و ترسالی‌های رخ داده در استان غالباً در وضعیت متوسط بوده‌اند. این مطالعه بر این نکته تأکید کرد که ماندگاری در شرایط نرمال طولانی‌تر است، در حالی که خشکسالی و ترسالی تداوم کوتاه‌تری دارند. (خانی و همکاران، ۱۴۰۰) با استفاده از شاخص SPEI و تحلیل فضایی در استان خوزستان، تمرکز خشکسالی‌های شدید را در نواحی جنوبی گزارش کرده و نقش تبخیر بالا در تشدید خشکسالی را تأیید نمودند. (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با شاخص SPI در استان فارس نشان دادند که روند خشکسالی در دو دهه اخیر به‌شدت افزایشی بوده و کانون خشکسالی در نواحی مرکزی استان است. همچنین، (کاظمی و همکاران، ۱۴۰۱) به بررسی ۳۰ ساله داده‌های بارش در شمال ایران پرداخته و به این نتیجه رسیدند که روند بارش کاهشی و وقوع خشکسالی‌های متوالی در ارتباط مستقیم با تغییرات دما است. در مطالعات بین‌المللی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است (Li et al., 2022)

با استفاده از شاخص SPEI[۲] تحلیل خوشه‌های فضایی (Getis-Ord Gi*) در آسیای مرکزی نشان دادند که مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل افزایش دما، خوشه‌های خشکسالی شدیدتری را تجربه می‌کنند. در پژوهشی مهم با معرفی شاخص SPEI تأکید کردند که این شاخص به دلیل لحاظ کردن تبخیر و تعرق نسبت به SPI حساسیت بیشتری به تغییرات اقلیمی دارد. (Hao & Singh, 2015) در مروری جامع بر مطالعات خشکسالی جهانی، ارتباط مستقیم گرمایش اقلیمی با تشدید خشکسالی‌های بلندمدت را تأیید کردند. (Zarch et al., 2015) نیز با استفاده از داده‌های جهانی شاخص SPEI دادند که روند خشکسالی در نیم‌کره شمالی طی ۵۰ سال گذشته افزایش چشمگیری داشته است. در منطقه خاورمیانه، (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2018) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص SPEIنشان دادند که تغییرات کاربری اراضی و افزایش دما دو عامل اصلی افزایش شدت خشکسالی‌های اخیر بوده است. از طرفی دیگر، (Spinoni et al., 2014) یک مطالعه جهانی بر روی فراوانی، مدت و شدت خشکسالی انجام دادند و روندهای مکانی و زمانی آن را در بازه ۶۰ ساله (۱۹۵۱–۲۰۱۰) از شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف زمانی (۳، ۶ و ۱۲ ماهه) و مجموعه داده‌های جهانی بارش (GPCC و CRU) استفاده کردند و نتایج را به‌صورت نقشه‌های پهنه‌بندی شده در ArcGIS تحلیل کردند و نتایج نشان داد که فراوانی و شدت خشکسالی در نیمکره شمالی (به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک مثل آسیای مرکزی و مدیترانه) به‌طور معناداری افزایش یافته و این روند با گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی مرتبط است. همچنین دوره‌های خشکسالی طولانی‌تر و شدیدتر از دهه ۸۰ میلادی به بعد مشهود بوده است.

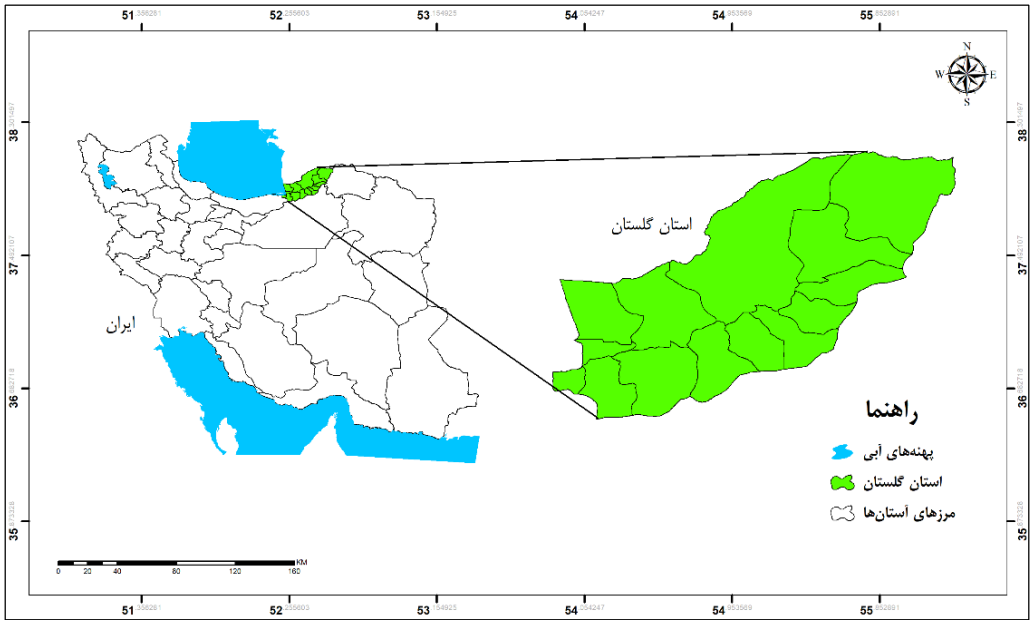
محدوده مورد مطالعه: استان گلستان از استان‌های شمالی ایران است. بزرگ‌ترین و
پرجمعیت‌ترین شهر آن گرگان است. این استان در سال ۱۴۰۳ برابر با ۱,۹۸ میلیون نفر جمعیت داشته است. همچنین این استان، در محدوده جغرافیایی ۵۴ تا ۵۶ درجه طول شرقی و ۳۶ تا ۳۸ درجه عرض شمالی و در بین استان‌های مازندران، سمنان و خراسان شمالی قرار دارد. ابن استان با ترکمنستان نیز همجوار بوده و حدود ۳۴۸ کیلومتر مرز خاکی و ۹۰ کیلومتر مرز آبی دارد. این استان به دلیل جایگاه جغرافیایی ویژه خود از آب و هوای گوناگونی برخوردار است. بخشی از رشته‌کوه البرز شرقی از غرب به سوی شرق استان کشیده شده که گرایش زیادی به سوی شمال شرقی دارد و رفته‌رفته از بلندی کوه‌های آن کاسته می‌شود. میزان بارندگی در استان گلستان هر چند از دو استان شمالی مازندران و گیلان کم‌تر است، اما نسبت به استان‌های دیگر بسیار بهتر است و میانگین بارش سالانه آن ۳ برابر میانگین بارش سالانه کشور است. مجموع حجم آب‌های سطحی و زیرزمینی استان بیش از ۲۴۰۰ میلیون متر مکعب است که ۵۲ درصد آن را آب‌های سطحی و ۴۸ درصد آن را آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهند. آب‌های سطحی در بیش از ۴۰ شاخه رود جاری هستند که بیش‌تر آن‌ها از جنوب به شمال و از شرق به غرب جریان دارند. رود اترک، گرگان‌رود و رود قره‌سو، سه رود مهم استان گلستان هستند (شکل ۱).

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی و با رویکرد کمی طراحی و اجرا شده است که هدف اصلی آن تحلیل جامع الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی در استان گلستان طی دوره‌ی بلندمدت ۲۰۲۴–۱۹۵۰ با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI است. مراحل روش‌شناختی این مطالعه به ترتیب شامل گردآوری و پیش‌پردازش داده‌های اقلیمی از پایگاه ERA5-Land، محاسبه‌ی استانداردشده شاخص‌های خشکسالی در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه، پهنه‌بندی مکانی با روش‌های درون‌یابی IDW و تحلیل‌های فضایی مبتنی بر Hotspot (Getis-Ord Gi*) در محیط ArcGIS و در نهایت تحلیل روندهای زمانی و خوشه‌های معنادار خشکسالی با

1. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

استفاده از روش‌های آماری و ترسیمی بوده است. رویکرد کمی به‌کار رفته مبتنی بر پردازش عددی داده‌ها و استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی بوده که در ادامه، داده‌ها و روش‌های تحقیق به تفصیل و با ذکر مبانی علمی هر بخش ارائه خواهد شد.



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی شهر گنبدکاووس (منبع: یلقی، ۱۴۰۴)

داده‌های مورد استفاده: داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل بارش ماهانه و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) با دوره زمانی ۷۵ ساله (۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴) بوده که از پایگاه ERA5-Land وابسته به Copernicus Climate Data Store با وضوح مکانی ۰٫۱°×۰٫۱° با وضوح اصلی ۹ کیلومتر بوده و تا حدود ۲٫۸۹ متر (۲۸۹ سانتی‌متر) از عمق خاک را پوشش می‌دادند، استخراج شده‌اند (جدول ۱) (Muñoz Sabater, 2019; Copernicus Climate Change Service, 2022). این داده‌ها در قالب NetCDF ارائه شده و پیش‌پردازش آن‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Panoply (برای استخراج و بازبینی ساختار داده‌ای)، ArcMap (برای یکپارچه‌سازی و جغرافیایی سازی لایه‌ها) و Excel (برای سازماندهی و کنترل کیفی مقادیر) انجام شده است. به منظور قابلیت مقایسه و محاسبات یکسان، تمامی پارامترها به واحد میلی‌متر تبدیل و یکسان‌سازی شدند. دقت مکانی بالا و پوشش زمانی پیوسته این داده‌ها، امکان تحلیل تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی را با جزئیات قابل توجهی فراهم نموده است.

جدول ۱: مشخصات داده‌های اخذ شده از پایگاه ECMWF

		داده‌های میانگین ماهانه ERA5-Land
۱	نوع داده	شبکه‌بندی شده
۲	نمایش	شبکه طول و عرض جغرافیایی منظم
۳	پوشش افقی	جهانی
۴	وضوح افقی	۰٫۱° × ۰٫۱°، وضوح اصلی ۹ کیلومتر
۵	پوشش عمودی	۲ متر بالاتر از سطح زمین تا عمق خاک ۲۸۹ سانتی‌متر
۶	وضوح زمانی	ماهانه

روش‌های محاسبه شاخص‌های خشکسالی: در این مطالعه از دو شاخص استاندارد خشکسالی شامل شاخص استاندارد بارش (SPI) و شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) استفاده شده است. شاخص SPI تنها بر اساس بارش محاسبه می‌شود و انحراف بارش از میانگین بلندمدت را نشان می‌دهد. فرمول آن به صورت زیر است:

$$\frac{\bar{P}-P_i}{P^{\sigma}} = SPI \qquad (۱)$$

P_i: بارش انباشته در مقیاس زمانی مورد نظر
$\bar{P}$: میانگین بارش در همان ماه یا فصل طی کل دوره آماری
P^{σ}: انحراف معیار بارش

شاخص SPEI علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) را نیز در نظر می‌گیرد و بنابراین تراز آبی (P - PET) را منعکس می‌کند. فرمول آن به این شکل است:

$$\frac{\overline{(P-PET)}-{}_i(P-PET)}{(P-PET)^{\sigma}} = SPEI \qquad (۲)$$

${}_i(P-PET)$: تراز آبی ماهانه
$\overline{(P-PET)}$: میانگین تراز آبی در همان ماه طی کل دوره
$(P-PET)^{\sigma}$: انحراف معیار تراز آبی

این شاخص برای مناطق گرم و تحت تأثیر تغییرات اقلیمی مناسب‌تر است.

فرآیند محاسبه مشابه SPI است، با این تفاوت که به‌جای بارش، در این شاخص از تراز آبی (بارش منهای تبخیر و تعرق) استفاده می‌شود. استفاده از SPEI امکان بررسی تأثیر دما و تبخیر و تعرق و در نتیجه حساسیت بیشتر به تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کند. همچنین، بر اساس محاسبات این دو شاخص (SPI و SPEI)، مقادیر هر دو شاخص بر اساس طبقه‌بندی استاندارد جهانی به هفت سطح از «ترسالی شدید» تا «خشکسالی شدید» دسته‌بندی شد (جدول ۲). مقادیر هر دو شاخص SPI و SPEI یکسان بوده و تفاوتی ندارند.

جدول ۲- طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI

ردیف	مقدار شاخص	وضعیت خشکسالی یا ترسالی
۱	بیشتر از ۲	ترسالی شدید
۲	۱/۵ تا ۲	ترسالی متوسط
۳	۱ تا ۱/۵	ترسالی کم
۴	۱- تا ۱	نرمال
۵	۱/۵- تا ۱-	خشکسالی کم
۶	۲- تا ۱/۵-	خشکسالی متوسط
۷	کمتر از ۲	خشکسالی شدید

روش‌های تحلیل مکانی: برای نمایش توزیع فضایی خشکسالی در سطح استان گلستان، از روش درون‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) محیط ArcGIS استفاده شد. این روش با توجه به فاصله‌ی نقاط مجاور و ارزش آن‌ها، سطحی پیوسته از مقادیر خشکسالی را تولید می‌کند و امکان شناسایی الگوهای مکانی خشکسالی و ترسالی را در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه فراهم می‌سازد. همچنین، به منظور شناسایی خوشه‌های معنادار فضایی خشکسالی و ترسالی و تشخیص نواحی بحرانی، از تحلیل فضایی Hotspot (Getis-Ord Gi*) بهره گرفته شد. این روش بر اساس محاسبه‌ی آماره‌ی Z-Score و P-Value، نواحی با تمرکز بالا (Hotspot) و پایین (Coldspot) مقادیر خشکسالی را مشخص می‌کند. بدین ترتیب، مناطق با خشکسالی شدید و پایدار (مقادیر منفی معنادار) و مناطق دارای ترسالی مداوم (مقادیر مثبت معنادار) به‌صورت کمی و مبتنی بر خودهمبستگی فضایی شناسایی و پهنه‌بندی شدند.

روش‌های تحلیل زمانی و ترسیم نمودارها: روند تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه‌ی شاخص‌های SPI و

SPEI با استفاده نرم‌افزار ArcGIS و نمودارهای خطی (برای نمایش تغییرات پیوسته‌ی زمانی و مقایسه مقادیر دو شاخص مختلف) در نرم‌افزار Excel ترسیم و مورد تحلیل کیفی و کمی قرار گرفت. این تحلیل‌های فضایی و آماری به تعیین پایایی روندهای مشاهده شده و اطمینان از نتایج حاصل از نمودارها کمک شایانی می‌نماید.

کاربرد همزمان شاخص‌های SPI و SPEI: با توجه به تفاوت ماهیت دو شاخص SPI و SPEI، کاربرد همزمان آن‌ها در این تحقیق قابل توجیه است. شاخص SPI صرفاً مبتنی بر بارش بوده و نمایه مناسبی برای خشکسالی هواشناسی (ناشی از کمبود بارش) است. در مقابل، شاخص SPEI علاوه بر بارش، اثر دما و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) را نیز لحاظ می‌کند و بنابراین نمایه مناسبی برای خشکسالی کشاورزی (مرتبط با تراز آبی و تنش رطوبتی گیاه) خواهد بود. به دلیل نقش تعدیل‌کننده دما و تبخیر در شاخص SPEI، انتظار می‌رود که واکنش این شاخص به کاهش بارش نسبت به شاخص SPI بهتر و تعدیل‌یافته‌تر باشد. لذا کاربرد هر روش با هدف خاص خود توجیه‌پذیر است و استفاده توأم از این دو شاخص امکان تحلیل جامع‌تری از خشکسالی (هواشناسی و کشاورزی) را فراهم می‌کند.

مقایسه روش‌ها و نکات کلیدی: SPI: این شاخص از ساختاری ساده و مستقیم برخوردار است که تنها بر اساس داده‌های بارش محاسبه می‌شود. از این رو، برای شناسایی دوره‌های کم‌بارشی و خشکسالی‌های ناشی از آن بسیار مناسب است. با این حال، به دلیل عدم در نظرگیری متغیرهای حرارتی مانند دما و تبخیر و تعرق، ممکن است در شرایط تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، شدت خشکسالی را به‌طور کامل منعکس نکند. SPEI: این شاخص با تلفیق دو پارامتر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، تصویری واقعی‌تر از تراز آبی منطقه ارائه می‌دهد. این شاخص به دلیل لحاظ کردن اثر دما و تبخیر، برای شرایط تغییر اقلیم و مناطق گرم مناسب‌تر بوده و حساسیت بیشتری به نوسانات آب و هوایی نشان می‌دهد.

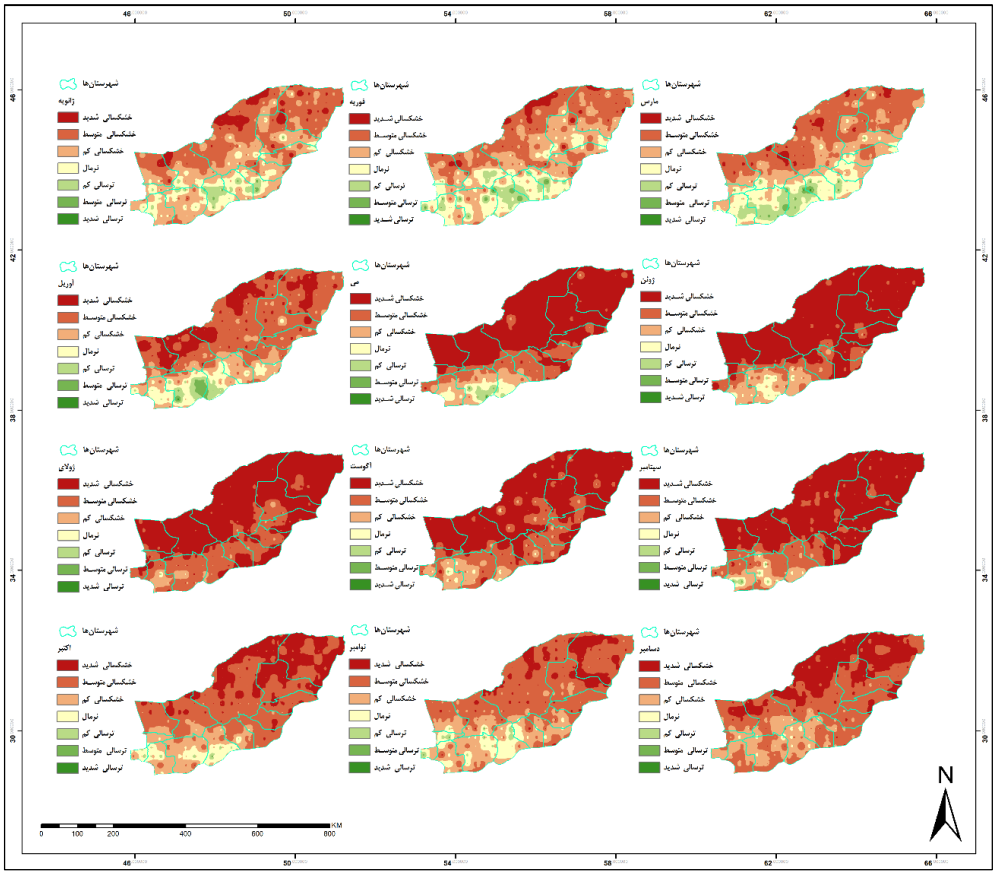
IDW: روش درون‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله، یک تکنیک سریع و پیوسته برای تولید سطحی یکپارچه از داده‌های نقطه‌ای است. این روش به دلیل سادگی محاسبات و توانایی نمایش الگوهای پهنه‌ای خشکسالی، برای نمایش فضایی تغییرات مکانی خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی مناسب است.

Hotspot Analysis: این روش تحلیلی مبتنی بر خود همبستگی فضایی است که با محاسبه آماره Getis-Ord Gi* و سطوح معناداری (P-Value) امکان شناسایی خوشه‌های بحرانی خشکسالی و ترسالی را فراهم می‌کند. این تحلیل نه‌تنها مناطق با خشکسالی شدید (Hotspot) را مشخص می‌کند، بلکه نواحی با ترسالی پایدار (Coldspot) را نیز شناسایی کرده و به درک الگوهای فضایی خشکسالی در سطح منطقه کمک شایانی می‌نماید.

یافته‌های پژوهش

بررسی روند تغییرات خشکسالی در استان گلستان طی بازه زمانی گسترده ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از دو شاخص معتبر SPI و SPEI، حاکی از نوسانات محسوسی در شدت، تداوم و گستره مکانی این پدیده در سطح استان است.

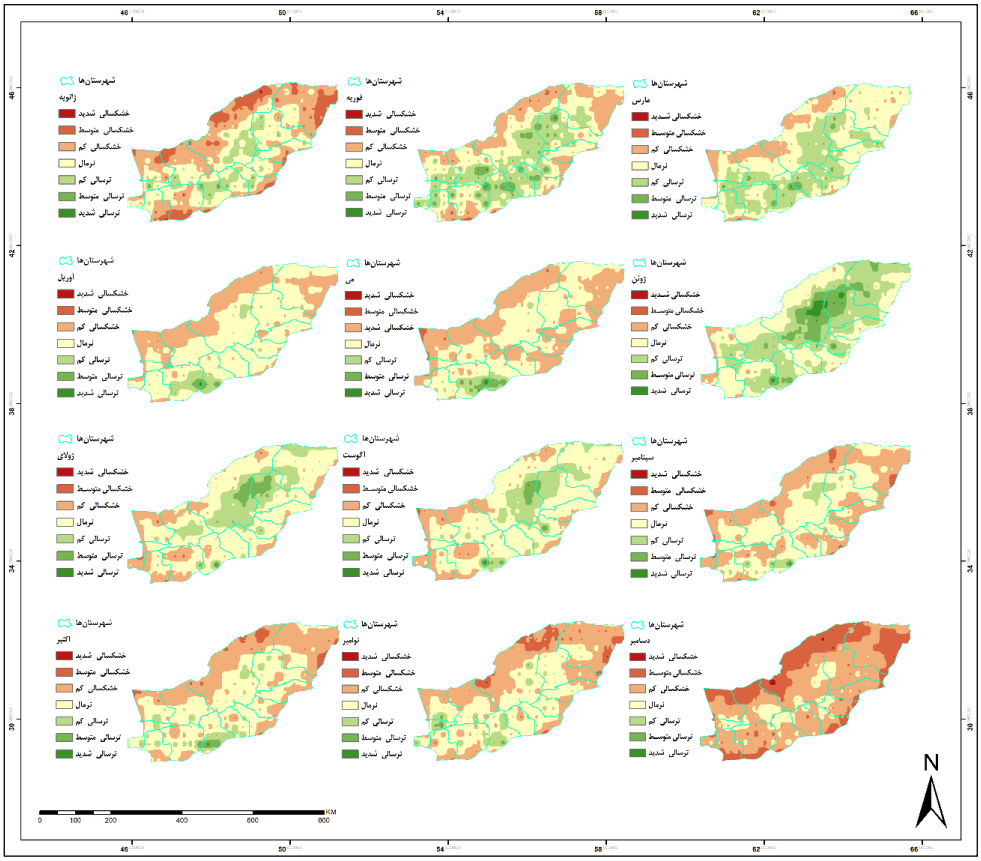
نتایج اولیه نشان می‌دهد که خشکسالی در این منطقه دارای الگوی مکانی ناهمگن بوده و توزیع آن در سطح استان یکنواخت نمی‌باشد؛ به طوری که تفاوت‌های قابل‌توجهی بین نواحی مختلف از نظر فراوانی و شدت خشکسالی مشاهده می‌شود. در بازه بلندمدت ۷۵ ساله، برخی مناطق به‌ویژه در بخش‌های شمالی، شمال‌شرقی و شرقی استان روندی فزاینده به سمت تشدید و طولانی‌تر شدن دوره‌های خشکسالی را تجربه کرده‌اند، در حالی که نواحی جنوبی و جنوب‌غربی در مقایسه با دیگر نقاط استان، شرایط نرمال تا مرطوب‌تری را حفظ نموده‌اند. این ناهمگونی مکانی می‌تواند متأثر از عواملی مانند اختلاف ارتفاع، دوری یا نزدیکی به منابع رطوبتی (مانند دریای کاسپین)، تغییرات محلی دما و ویژگی‌های توپوگرافی باشد.



شکل ۲: نقشه ماهانه خشکسالی با شاخص SPI در استان گلستان (منبع: نگارندگان)

بررسی مجموعه‌ای از نقشه‌های ماهانه در شکل ۲ نشان می‌دهد که خشکسالی، به ویژه در سطوح متوسط تا بسیار شدید (رنگ‌های نارنجی تا قرمز تیره)، پدیده‌ای غالب در استان گلستان است و تقریباً در تمام طول سال بر بخش‌های وسیعی از استان تأثیر می‌گذارد. این امر حاکی از یک کمبود بارش انباشته درازمدت است که در اکثر ماه‌ها قابل مشاهده است و نشان‌دهنده شرایط اقلیمی خشک‌تر از نرمال در طول دوره مورد مطالعه می‌باشد. اگرچه خشکسالی به‌طور کلی در اکثر ماه‌ها وجود دارد، اما شدت و گستردگی آن به وضوح در فصول گرم و خشک سال (بهار پایانی و تابستان) به اوج خود می‌رسد. به طور مشخص، از ماه می تا سپتامبر، غالبیت مطلق رنگ‌های قرمز و قرمز تیره در سراسر استان، نشان‌دهنده وضعیت خشکسالی شدید تا بسیار شدید است. این دوره، بحرانی‌ترین زمان از نظر کمبود بارش و تنش آبی در استان تلقی می‌شود. در مقابل، با شروع فصول سرد و پربارش (پاییز و زمستان)، اگرچه ممکن است مناطق غربی و جنوب‌غربی استان اندکی بهبود یافته و خشکسالی خفیف یا شرایط نزدیک به نرمال را تجربه کنند، اما خشکسالی متوسط تا شدید همچنان در بخش‌های مرکزی، شمالی و شرقی استان پایدار مانده که بیانگر عدم کفایت بارش‌های فصلی برای جبران کامل کمبودها در این مناطق است.

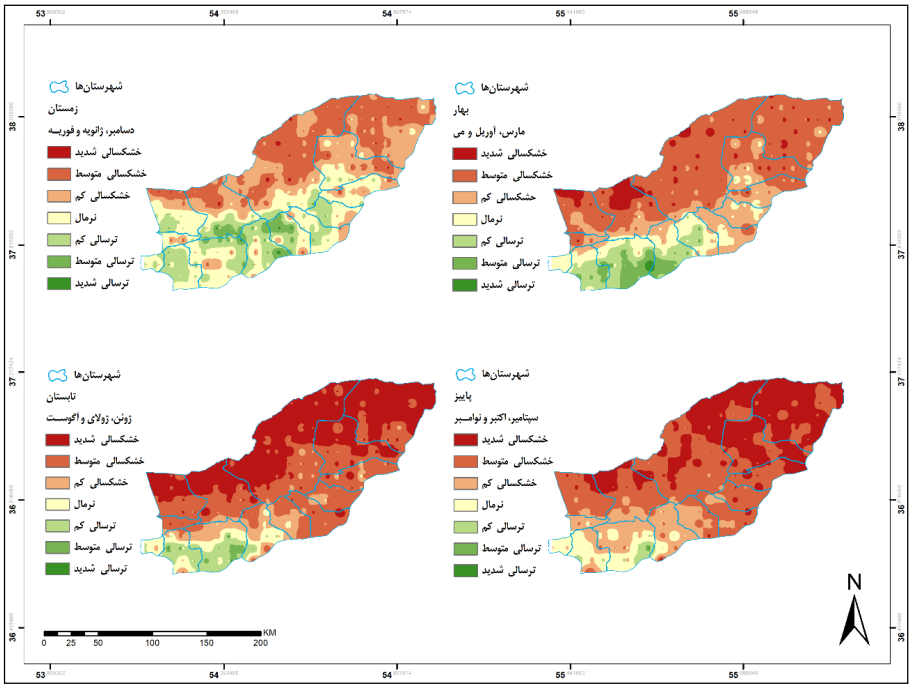
به‌طورکلی، تحلیل میانگین بلندمدت شاخص SPI ماهانه نشان می‌دهد که استان گلستان در بازه ۷۵ ساله مورد مطالعه با یک خشکسالی مزمن و ساختاری مواجه بوده است. این خشکسالی الگوی فصلی مشخصی دارد که در فصول گرم تشدید شده و به اوج خود می‌رسد و همچنین دارای یک الگوی مکانی ثابت است که مناطق مرکزی، شمالی و شرقی که شامل شهرستان‌های گنبدکاووس، مراوه‌تپه و آق‌قلا هستند را آسیب پذیرترین نواحی می‌سازد.



شکل ۳: نقشه ماهانه خشکسالی با شاخص SPEI در استان گلستان (منبع: نگارندگان)

نقشه میانگین شاخص استاندارد بارش – تبخیر و تعرق (SPEI) در مقیاس ماهانه، که توزیع فضایی شرایط خشکسالی و ترسالی را برای یک دوره بلندمدت ۷۵ ساله (۱۹۵۰-۲۰۲۴) با ابعاد متفاوتی از تراز آبی منطقه را با لحاظ کردن تأثیر دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در استان گلستان نشان می‌دهد (شکل ۳).

بررسی تغییرات ماهانه شاخص SPEI طی دوره آماری ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ در شکل ۳ نشان می‌دهد که الگوی خشکسالی استان گلستان در طول سال دارای نوساناتی بوده است. در ماه‌های ابتدایی سال (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر مناطق استان، به‌ویژه نواحی مرکزی و جنوب‌غربی مانند شهرستان‌های گرگان، علی‌آباد و کردکوی، شرایط نرمال تا مرطوب را تجربه کرده‌اند و تنها بخش‌های محدودی از شرق، جنوب‌شرق و شمال استان مانند مراوه‌تپه، گنبدکاووس و آق‌قلا با خشکسالی خفیف تا متوسط مواجه بوده‌اند. در ماه‌های آوریل و می، گستره خشکسالی خفیف تا متوسط در مناطق مرکزی و شرقی از جمله گنبدکاووس و مینودشت به نسبت سه ماه قبلی افزایش یافته است. در ماه ژوئن، برخلاف افزایش تدریجی دما، پهنه خشکسالی در استان کمتر شده و به حداقل شدت خود رسیده و شرایط ترسالی در قسمت مرکزی استان، به‌ویژه در علی‌آباد، گنبدکاووس و کلاله بیشتر شده، اما خشکسالی خفیفی در قسمت غربی استان، به‌ویژه حاشیه‌های دریای کاسپین نظیر بندرترکمن و گمیشان دیده می‌شود. همانطور که نمایان است، دوباره در ماه ژولای مشاهده می‌شود که میزان خشکسالی در قسمت‌های غربی استان از جمله کردکوی و بندرگز گسترش پیدا کرده و از میزان ترسالی در قسمت مرکزی استان نسبت به ماه قبلی خود کاسته شده، تا در نهایت در ماه دسامبر که بیشترین میزان خشکسالی قابل مشاهده است، استان گلستان آنچنان از شرایط ترسالی برخوردار نبوده و تنها بخش‌های کوچکی از مرکز استان در حالت نرمال تا ترسالی متوسط و دیگر نواحی، به‌ویژه شمال و شرق استان شامل آق‌قلا، گنبدکاووس و مراوه‌تپه در خشکسالی قابل‌توجهی قرار دارند.

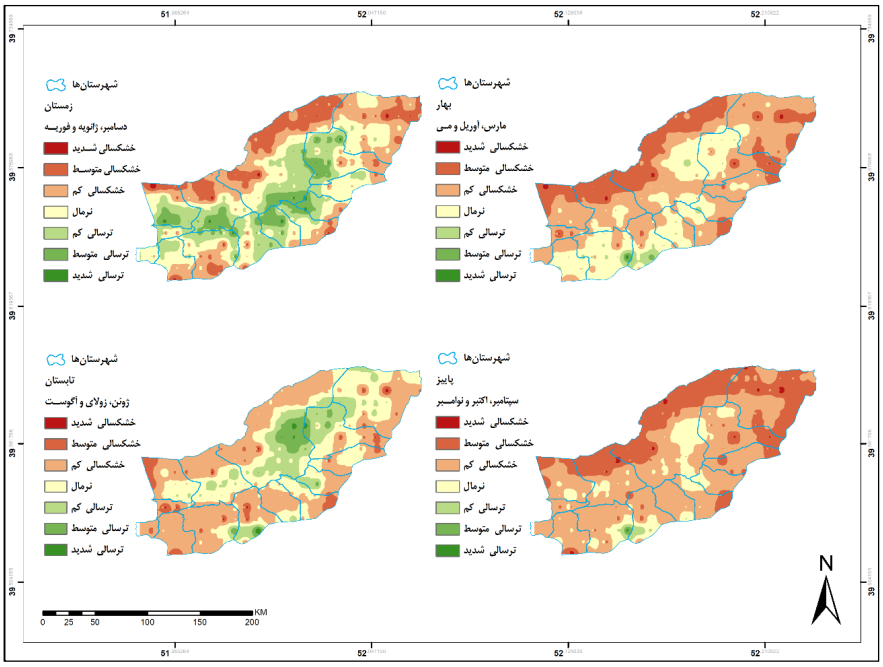


شکل ۴: نقشه فصلی خشکسالی شاخص SPI استان گلستان (منبع: نگارندگان)

این تغییرات در شاخص SPEI نشان می‌دهد که مشاهده ترسالی در برخی ماه‌های تابستان در حالی‌که زمستان همان سال با خشکسالی همراه بوده است، ناشی از تأثیر متفاوت توزیع زمانی بارش و نقش تراز آبی در این شاخص است. در تابستان می‌تواند بارش‌های سنگین بهاره و ذخیره رطوبت خاک باعث افزایش تراز آبی و مقادیر مثبت SPEI شده و حتی دما و تبخیر و تعرق بالای این فصل نتوانسته اثر غالب بارش‌های پیشین را خنثی کند؛ موضوعی که به «اثر حافظه رطوبتی»[1] شاخص‌های تجمعی اشاره دارد. در مقابل، در زمستان که تبخیر و تعرق پتانسیل بسیار پایین است، هرگونه کاهش بارش نسبت به مقادیر نرمال مستقیماً موجب کاهش تراز آبی و ثبت مقادیر منفی SPEI شده است. علاوه بر این، تغییرات اقلیمی و جابه‌جایی زمانی بارش‌ها، به‌ویژه افزایش بارش‌های همرفتی در بهار و اوایل تابستان، می‌تواند دلیل دیگری برای وقوع ترسالی‌های تابستانه و خشکسالی زمستانه در برخی سال‌ها باشد.

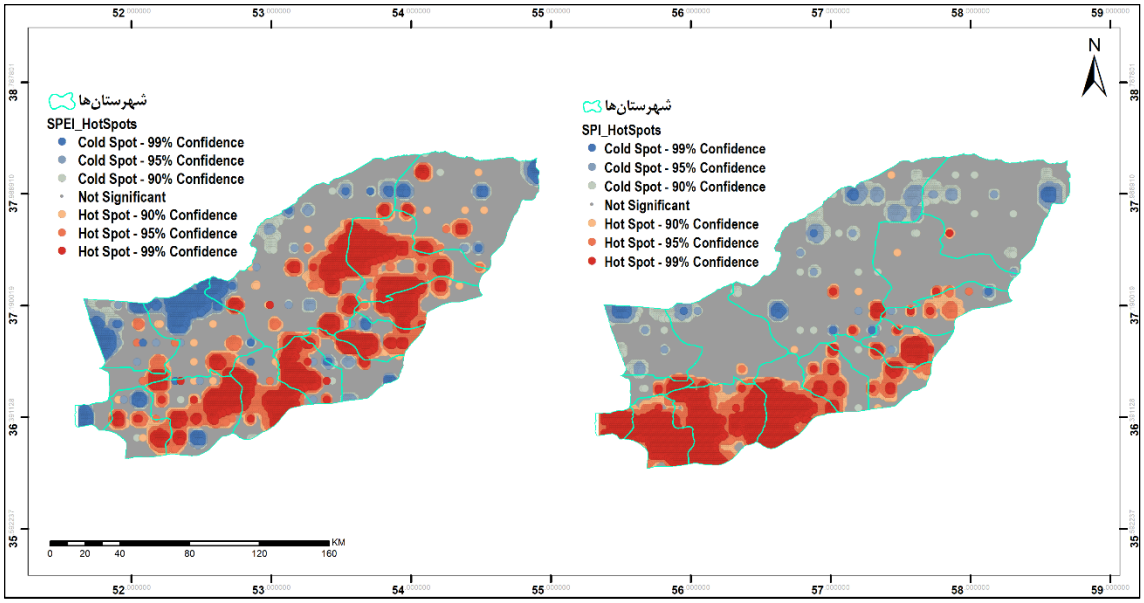
در شکل ۴، نقشه‌های فصلی شاخص SPI در بازه (۲۰۲۴-۱۹۵۰) نشان می‌دهد که استان گلستان در فصل تابستان (ژوئن، ژولای و آگوست) بیشترین شدت و گستره خشکسالی را تجربه کرده است، به‌ویژه در شهرستان‌های گنبدکاووس، آق‌قلا، گمیشان، مراوه‌تپه و کلاله که با خشکسالی متوسط تا شدید مواجه بوده‌اند. در فصل پاییز، هرچند از شدت خشکسالی کاسته شده، اما مناطق شرقی و شمال‌شرقی استان مانند کلاله، مراوه‌تپه، آق‌قلا و گنبدکاووس همچنان شرایط خشکسالی متوسط تا شدید را داشته‌اند، در حالی‌که نواحی جنوب‌غربی از جمله علی‌آباد، گرگان، کردکوی و بندرگز در وضعیت نرمال یا ترسالی کم قرار گرفته‌اند. زمستان، مطلوب‌ترین فصل از نظر رطوبت بوده و بیشتر نواحی غربی و مرکزی نظیر گرگان، کردکوی و علی‌آباد شرایط نرمال تا ترسالی شدید را تجربه کرده‌اند. این الگوی فصلی می‌تواند بر اهمیت مدیریت هوشمند منابع آب در فصول گرم، به‌ویژه تابستان و پاییز، تأکید دارد. در فصل بهار نیز خشکسالی به نسبت زمستان افزایش یافته و مناطقی از شرق و مرکز استان، مانند گنبدکاووس، مراوه‌تپه و آق‌قلا درگیر خشکسالی خفیف تا متوسط بوده‌اند؛ اما کماکان شرایط ترسالی متوسطی در قسمت جنوب‌غربی استان دیده می‌شود.

۱. اثر حافظه رطوبتی به این معنی است که وضعیت رطوبتی یک منطقه در یک بازه زمانی، تحت تأثیر مستقیم بارش‌های جاری و همچنین رطوبت ذخیره شده از دوره‌های قبل است.



شکل ۵: نقشه فصلی خشکسالی شاخص SPEI استان گلستان (منبع: نگارندگان)

در شکل ۵، نقشه‌های فصلی شاخص SPEI در بازه ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ بیانگر یک الگوی فصلی مشخص در استان گلستان است. در فصل زمستان، بیشتر نواحی مرزی شمالی استان به‌ویژه مراوه‌تپه، آق‌قلا و بخش‌های شمالی گنبدکاووس دچار خشکسالی متوسط تا شدید بوده‌اند، در حالی‌که مناطق مرکزی مانند بخش‌های جنوبی گنبدکاووس و آق‌قلا، بخش‌های شمالی مینودشت، آزادشهر، رامیان، گرگان و قسمت مرکزی گمیشان شرایط نرمال تا ترسالی متوسط را تجربه کرده‌اند. فصل‌های بهار و پاییز الگوی تقریبا مشابهی را نشان می‌دهند؛ در هر دو فصل، قسمت‌های مرزی شمال، شرق و مرکز استان دارای خشکسالی کم تا متوسط بوده و تنها قسمت محدودی از جنوب استان در شهرستان علی‌آباد و گرگان ترسالی کم تا متوسط را تجربه کرده‌اند. اما بصورت کلی، گستره خشکسالی در استان در فصل پاییز بیشتر از فصل بهار بوده است. در فصل تابستان نیز می‌توان الگوی متفاوتی را مشاهده کرد، به طوری که بیشتر گسترده ترسالی در قسمت مرکزی گنبدکاووس بوده و کماکان قسمت شمالی استان و همچنین قسمت‌های غربی و جنوب‌غربی استان از جمله شهرستان‌های گرگان، کردکوی، بندرترکمن و گمیشان خشکسالی کم تا متوسط را تجربه کرده‌اند. الگوی فصلی شاخص SPEI مشابه نقشه‌های ماهانه شکل ۳ است و نشان‌دهنده حساسیت بالای آن به دما و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) در کنار شرایط اقلیمی و توپوگرافی استان است. برخلاف شاخص SPI که تنها به بارش وابسته است، SPEI با در نظر گرفتن اثر ترکیبی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، تفاوت‌های آشکاری در فصول مختلف نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، اختلاف این الگو با شاخص SPI، نشان‌دهنده تفاوت پاسخ SPEI نسبت به سایر شاخص‌ها و نقش مؤثر دما و تبخیر و تعرق در تراز آبی منطقه است. در فصول پاییز، زمستان و بهار، کاهش بارش به‌ویژه در مناطق مرزی شمالی موجب خشکسالی متوسط تا شدید شده، در حالی که نواحی مرکزی با بارش بیشتر و شرایط اوروگرافیک مساعد، وضعیت نرمال تا ترسالی را به ویژه در زمستان حفظ کرده‌اند. اما در تابستان، به‌دلیل بارش‌های سنگین و اثر حافظه رطوبتی، مناطق مرزی با وجود تبخیر و تعرق بالا، وضعیت نسبتا نرمال‌تری دارند و نواحی مرکزی نیز به خصوص قسمت مرکزی گنبدکاووس، همچنان ترسالی را تجربه کرده‌اند.

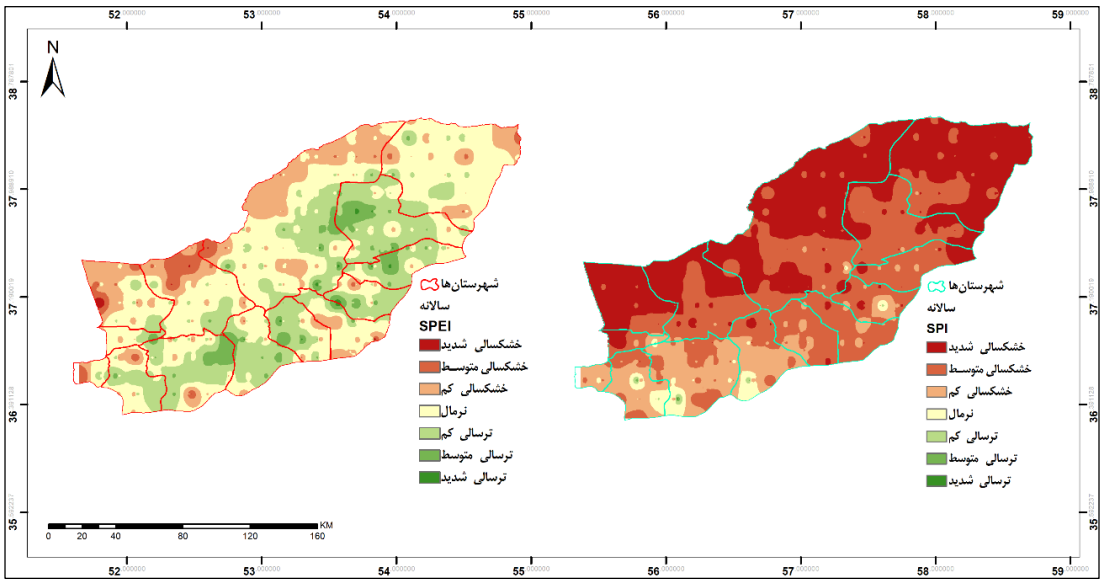


شکل ۶: نقشه سالانه شاخص SPI با روش Hotspot استان گلستان (منبع: نگارندگان)

شکل ۶، نتایج تحلیل فضایی ۷۵ ساله شاخص SPI و SPEI را با روش Hotspot نشان می‌دهد. این نقشه از روش تحلیل فضایی Hotspot برای شناسایی کانون‌های خشکسالی (آبی) و ترسالی (قرمز) در کل دوره سالانه استفاده می‌کند. در نقشه SPI، مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی استان، به ویژه شهرستان‌های علی‌آباد، گرگان، کردکوی و بندرگز و بخش‌هایی از رامیان و مینودشت و آزادشهر در طول ۷۵ سال دارای ترسالی با اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ بوده‌اند. این نشان می‌دهد که این مناطق به طور پیوسته در طول سال‌های مورد مطالعه، با ترسالی‌های متوسط تا شدید مواجه بوده‌اند. در مقابل، نقاط آبی Coldspot که نشان‌دهنده خشکسالی هستند، محدوده‌هایی کوچک در شمال، شمال‌غربی، شرق و غرب استان، مانند شهرستان‌های مراوه‌تپه، گنبدکاووس، آق‌قلا، بندرترکمن و بندرگز مشاهده می‌شوند. به‌طور کلی، شهرستان‌های واقع در جنوب و جنوب‌غربی ترسالی و شهرستان‌های واقع در شمال، شرق، شمال‌غرب و غرب استان خشکسالی را تجربه کرده‌اند.

نقشه سالانه شاخص SPEI نیز نشان می‌دهد که الگوی مشابهی با SPI دارد. قسمت‌های مرکزی، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی استان به ویژه در شهرستان‌های گنبدکاووس، کلاله، مینودشت، رامیان، علی‌آباد و گرگان پهنه‌های ترسالی با اطمینان بالا (۹۹٪ و ۹۵٪) وجود دارند. از طرفی، بیشترین و شدیدترین گستره خشکسالی در قسمت غربی و شمال‌غرب استان به‌خصوص شهرستان‌های آق‌قلا و گمیشان و لکه‌های جزئی نیز در شهرستان‌های کردکوی، بندرگز و گرگان نیز مشاهده می‌شود.

به طور کلی، بر اساس نقشه‌های شکل ۶، در منطقه مورد مطالعه به ویژه بخش‌های جنوب‌شرقی، مرکزی و جنوب‌غربی، در طول این ۷۵ سال (۱۹۵۰-۲۰۲۴) کانون‌های غالب ترسالی را با شاخص SPEI تجربه می‌کنند که نشان‌دهنده شرایط نسبتاً مرطوب و پربارش در این قسمت از استان است، در حالی که قسمت‌های شمالی، شمال‌غربی و غرب استان در طی این سال‌ها دارای شرایطی نرمال و در برخی از موارد دارای خشکسالی شدیدی بوده است.



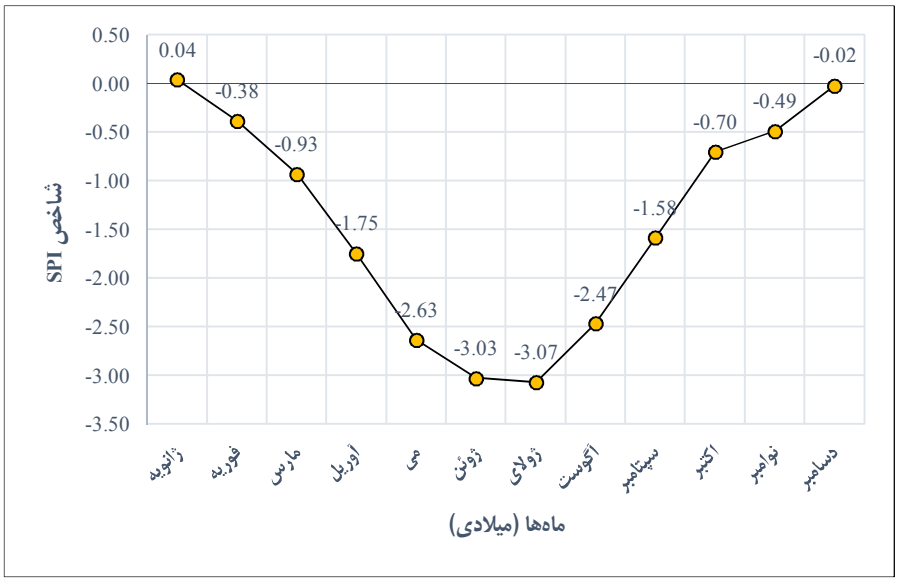
شکل ۷- نقشه سالانه شاخص‌های SPI و SPEI استان گلستان (منبع: نگارندگان)

در شکل ۷، مقایسه الگوی مکانی دو شاخص سالانه نشان می‌دهد که استان گلستان در بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ الگوی متفاوتی از خشکسالی و ترسالی را در این دو شاخص تجربه کرده است. نقشه سالانه شاخص SPI (سمت راست) نشان می‌دهد که تقریباً تمام بخش‌های استان، به‌ویژه مناطق شرقی، شمال، شمال‌شرقی و بخش‌هایی از مرکز استان و همچنین نوار ساحلی دریای کاسپین، با خشکسالی متوسط تا شدید مواجه بوده‌اند و تنها لکه‌های محدودی در جنوب و جنوب‌غربی استان شامل شهرستان‌های علی‌آباد، گرگان و کردکوی شرایط نرمال تا ترسالی کم را تجربه کرده‌اند. این الگو نشان‌دهنده وابستگی بالای SPI به تغییرات مستقیم بارش و کمبود بارش سالانه در بخش اعظم استان است. در مقابل، نقشه سالانه شاخص SPEI (سمت چپ) الگوی متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که بخش‌های قابل‌توجهی از مرکز و جنوب استان در محدوده نرمال تا ترسالی متوسط قرار دارند و تنها بخش‌هایی از شمال، غرب و شمال‌غرب و همچنین برخی نقاط شرقی استان ار جمله شهرستان‌های مراوه‌تپه، گنبدکاووس، آق‌قلا و گمیشان با خشکسالی کم تا متوسط مواجه‌اند. این تفاوت بیانگر حساسیت SPEI به تراز آبی (بارش – تبخیر و تعرق پتانسیل) است (شکل ۸)؛ یعنی مناطقی که با وجود بارش نسبتاً کم اما تبخیر و تعرق کمتری داشته‌اند، وضعیت نرمال تا مرطوب را تجربه کرده‌اند. به‌طور کلی، نتایج این مقایسه نشان می‌دهد در حالی‌که SPI وضعیت بارش خام استان را بازتاب داده و گستره خشکسالی را بیشتر نشان داده است، SPEI اثر دما و تبخیر و تعرق را نیز لحاظ کرده و تصویر واقعی‌تری از تراز رطوبتی استان ارائه می‌دهد. به همین دلیل، برخی مناطق مرکزی و جنوبی که در SPI خشکسالی ثبت شده‌اند، در SPEI شرایط نرمال تا ترسالی را تجربه کرده‌اند؛ زیرا تبخیر و تعرق کمتر یا اثر حافظه رطوبتی ناشی از بارش‌های فصلی باعث بهبود تراز آبی در این مناطق شده است.

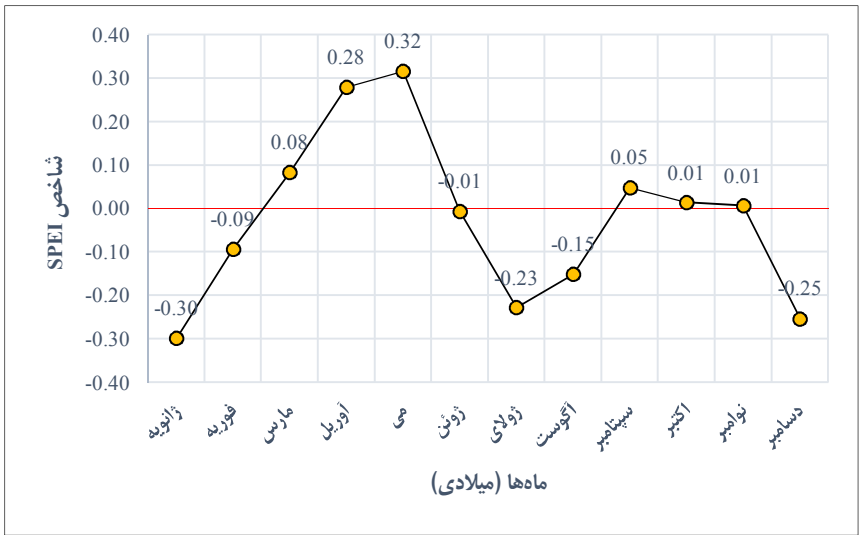
نمودار شاخص استاندارد بارش (SPI) در بازه بلندمدت در شکل ۹، نشان‌دهنده یک روند فصلی مشخص از نظر خشکسالی در استان گلستان است. در این نمودار، ماه ژانویه با مقدار ۰,۰۴ تنها ماهی است که مقدار آن مثبت و شرایط نرمالی داشته است. مقادیر شاخص از ماه دوم سال کاهش قابل‌توجهی داشته و در بازه ماه‌های می تا ژولای (ماه‌های ۵ تا ۷) به کمینه خود در حدود ۳,۰- می‌رسد که بیانگر وقوع خشکسالی شدید تا بسیار شدید در این بازه زمانی است. پس از آن، شاخص روند افزایشی داشته و در ماه‌های پایانی سال به محدوده نزدیک صفر باز

می‌گردد. این الگوی ماهانه گویای آن است کـه اسـتان گلستان به‌طور میانگین در نیمه نخست سال به‌ویژه در فصـل بهـار و اوایـل تابسـتان، بیشـتر در معـرض کم‌بارشی‌های شدید قرار داشـته و در نیمـه دوم سـال شرایط نسبتاً متعادل‌تری تجربه مـی‌شـود امـا شـرایط خشکسالی همچنان برقرار است. این روند می‌توانـد بـا ویژگی‌های اقلیمی منطقه، مانند تابستان‌های خشک و زمستان‌های نسبتا پربارش، هم‌راستا باشد.

بنابراین می‌توان گفت که نمودار شاخص SPI در شکل ۸ نشان می‌دهد که تغییرات SPI به فصل مورد نظر و همچنین میزان بارش وابسته است. این شکل نشان می‌دهد که در فصول گرم سال زمانی که بارش به حداقل میزان خود رسیده، شاخص SPI نیز به منفی‌ترین حالت خود رسیده است؛ زیرا همانطور که گفته شد، این شاخص برای ارزیابی خشکسالی، صرفا بارش منطقه را لحاظ می‌کند و این نمودار به‌خوبی گویای این واقعیت است که کمبود بارش به افزایش وقوع خشکسالی در منطقه منجر شده است زیرا که بجز ماه ژانویه که عددی مثبت (۰,۰۴) دارد، باقی ماه‌ها اعدادی منفی گرفته‌اند. بنابراین با اطمینان می‌توان گفت که در استان گلستان به لحاظ شاخص SPI خشکسالی در حال رخ دادن است.



شکل ۸: نمودار ماهانه بلندمدت (۱۹۵۰-۲۰۲۴) شاخص SPI استان گلستان (منبع: نگارندگان)



شکل ۹: نمودار ماهانه بلندمدت (۱۹۵۰-۲۰۲۴) شاخص SPEI استان گلستان (منبع: نگارندگان)

نمودار شکل ۹، شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) در بازه زمانی مورد نظر، رفتار متفاوتی نسبت به SPI نشان می‌دهد که ناشی از تأثیرپذیری این شاخص از هر دو مؤلفه بارندگی و دمای هوا (از طریق تبخیر و تعرق بالقوه) است. مقادیر شاخص SPEI در اغلب ماه‌ها نوسانات محدودی را نشان می‌دهند و عمدتاً حول مقدار صفر قرار دارند. بیشینه مثبت شاخص در ماه‌های مارس تا می (ماه‌های ۳ تا ۵) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده شرایط نرمال تا نسبتاً مرطوب در این بازه است. با این حال، در ماه‌های ابتدایی و پایانی سال، به‌ویژه در ژانویه و دسامبر (ماه‌های ۱ و ۱۲)، شاخص کاهش یافته و به محدوده منفی (حدود ۰,۲- تا ۰,۳-) می‌رسد که بیانگر تمایل به شرایط خشک در این زمان است. این نتایج نشان می‌دهد که با لحاظ تبخیر و تعرق، شدت و گستره خشکسالی در برخی ماه‌ها تعدیل می‌شود و نقش دمای هوا در تشدید یا تضعیف شرایط رطوبتی منطقه حائز اهمیت است. اما لازم به ذکر است که بازه مقادیر شاخص SPEI بسیار کوچک‌تر از بازه مقادیر شاخص SPI است و شاخص SPI خشکسالی را شدیدتر نشان می‌دهد.

بحث

یافته‌های این پژوهش در خصوص تحلیل ماهانه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI طی دوره بلندمدت ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ در استان گلستان، الگوی فصلی مشخصی از وقوع خشکسالی را نشان داد. مقایسه نقشه‌های SPI و SPEI نشان داد که شاخص SPIخشکسالی را در بیشتر مناطق استان (به‌ویژه شمال، شرق و غرب) با شدت بیشتر نشان می‌دهد، در حالی که شاخص SPEI با در نظر گرفتن تأثیر دما و تبخیر، مناطق مرکزی و جنوب‌غربی را در شرایط نزدیک به نرمال یا حتی ترسالی نمایش می‌دهد. این تفاوت ناشی از تأثیر تعدیل‌کننده‌ی تبخیر و تعرق کمتر در برخی مناطق است. بنابراین، استفاده توأم از هر دو شاخص می‌تواند تصویر کامل‌تری از وضعیت خشکسالی ارائه دهد. اما به‌صورت جزئی‌تر، بر اساس نتایج به‌دست آمده، شاخص SPI، با تأکید صرف بر بارندگی، بیشترین شدت خشکسالی را در ماه‌های اردیبهشت تا تیر ثبت کرده است. این یافته با نتایج (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۰) هم‌راستا است که در مطالعه خود در استان گلستان، بیشترین شدت خشکسالی را در ماه‌های میانی سال و در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۹ ماهه گزارش کرده‌اند. همچنین، نتایج این مطالعه، همسو با پژوهش (رمضانی و همکاران، ۱۴۰۰) که تغییرات دما و الگوی بارش در استان گلستان را یکی از عوامل اصلی تشدید خشکسالی در دهه‌های اخیر دانسته‌اند. از سوی دیگر، شاخص SPEI که اثرات تبخیر و تعرق پتانسیل را در کنار بارش لحاظ می‌کند، در بسیاری از ماه‌ها مقادیر نزدیک به صفر و نوسانات نرم‌تری را نشان داده است. این الگو، بیانگر تعدیل شدت خشکسالی با در نظر گرفتن مؤلفه‌های حرارتی است. چنین رفتاری در شاخص SPEI با یافته‌های (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰) در استان خوزستان نیز مطابقت دارد که در آن تأثیر مستقیم دما بر شدت و گسترش خشکسالی تأیید شده است. همچنین، در مطالعه (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۹) در استان فارس نیز، کاهش بارش در کنار افزایش دما به‌عنوان دو عامل هم‌زمان مؤثر بر خشکسالی فصلی شناسایی شده‌اند که مشابه نتایج این پژوهش است. در سطح بین‌المللی نیز یافته‌های حاضر با نتایج پژوهش‌های (Vicente-Serrano et al., 2010) و (Hao & Singh, 2015) هم‌خوانی دارد که شاخص SPEI را شاخصی حساس و مناسب برای مناطق تحت تأثیر گرمایش جهانی معرفی کرده‌اند. به‌طور خاص، Vicente-Serrano نشان می‌دهد که SPEI به دلیل لحاظ‌کردن تبخیر و تعرق، تحلیل کامل‌تری از شرایط خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌دهد. این نکته در پژوهش حاضر نیز به وضوح دیده شد. در مجموع، یافته‌های این تحقیق ضمن تأیید بسیاری از مطالعات داخلی و خارجی، بر این نکته تأکید دارد که خشکسالی در استان گلستان پدیده‌ای چندعلتی بوده و تحلیل آن بدون توجه به پارامترهای حرارتی، تصویری ناقص از واقعیت خواهد بود. استفاده هم‌زمان

از شاخص‌های SPI و SPEI می‌تواند دیدگاهی جامع‌تر برای پایش و مدیریت خشکسالی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای فراهم سازد.

به‌طورکلی، در نقشه‌های تهیه‌شده نیز آشکار شد که در ماه‌های مشابه، شاخص SPI گستره وسیع‌تری از خشکسالی شدید را نشان می‌دهد، در حالی که شاخص SPEI به دلیل لحاظ کردن اثر تعدیل‌کننده دما و تبخیر، شدت کمتری از خشکسالی را در همان بازه زمانی ثبت کرده است. این امر تأکیدکننده آن است که کاربرد هر یک از این دو شاخص بسته به هدف (پایش خشکسالی هواشناسی یا کشاورزی) متفاوت بوده و استفاده توأم آن‌ها تصویر واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بررسی روند ماهانه و بلندمدت شاخص‌های SPI و SPEI در استان گلستان طی بازه ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که خشکسالی در این منطقه از الگوی فصلی و زمانی مشخصی پیروی می‌کند. شاخص SPI که تنها بر پایه بارش استوار است، کاهش چشمگیر رطوبت را در ماه‌های اردیبهشت تا تیر نشان داده و بیانگر وقوع خشکسالی متوسط تا شدید در این بازه است. در مقابل، شاخص SPEI با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل، نوسانات نرم‌تری داشته و تحلیل واقع‌بینانه‌تری از شرایط رطوبتی ارائه می‌دهد. این یافته، نقش تعیین‌کننده دما و مؤلفه‌های حرارتی را در تشدید یا تضعیف خشکسالی برجسته می‌سازد. تحلیل مقایسه‌ای این دو شاخص نشان می‌دهد که اتکای صرف به بارش، به‌ویژه در مناطق با تبخیر بالا و تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، می‌تواند به برداشت‌های ناقص و سیاست‌گذاری نادرست منجر شود. بنابراین، استفاده هم‌زمان از SPEI در کنار SPI، رویکردی مناسب برای پایش جامع‌تر خشکسالی است. همچنین، خشکسالی در استان گلستان، به‌ویژه در فصول گرم سال، از شدت و گستردگی بالایی برخوردار بوده و در نواحی شمال و شمال‌شرق به شکل ساختاری و پایدار بروز یافته است. بر این اساس، پایش مستمر خشکسالی در مقیاس‌های محلی و فصلی، بهره‌گیری از شاخص‌های چندمتغیره و تحلیل هم‌زمان پارامترهایی مانند دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی، گامی اساسی در تدوین راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آب است. به‌طور کلی، SPEI به دلیل لحاظ کردن مؤلفه‌های حرارتی در شرایط تغییر اقلیم دقت بالاتری دارد، در حالی که SPI برای پایش کم‌بارشی‌های کوتاه‌مدت مناسب‌تر است. همچنین روش تحلیل Hotspot در این تحقیق به‌عنوان ابزار قدرتمندی در شناسایی کانون‌های بحرانی خشکسالی عمل کرده است.

منابع

۱. بذرافشان، ام‌البنین؛ محسنی‌ساروی، محسن؛ ملکیان، آرش و معینی، ابوالفضل. (۱۳۹۰). بررسی وضعیت خشکسالی استان گلستان با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI). تحقیقات مرتع و بیابان ایران ۱۸ (۳)، ۴۰۷-۳۹۵.

۲. حسینی، محمدرضا؛ احمدی، جواد؛ و کریمی، امیر. (۱۳۹۷). تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص‌های اقلیمی در منطقه شمال شرق ایران. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۲)، ۱۳۵–۱۵۲.

۳. حسینی، ناصر؛ احمدی، رضا و صادقی، حامد. (۱۳۹۷). بررسی خشکسالی با شاخص SPI در مناطق خشک ایران. پژوهش‌های منابع طبیعی ایران، ۵ (۲)، ۳۳-۴۹.

۴. خانی، محمد؛ احمدی، رضا و رضایی، پروانه. (۱۴۰۰). تحلیل فضایی خشکسالی با شاخص SPEI در استان خوزستان. پژوهش‌های اقلیمی ایران، ۱۲ (۲)، ۴۵-۶۰.

۵. رمضانی، حسین؛ رحیمی، فاطمه؛ و عباسی، کامران. (۱۴۰۰). تحلیل روند تغییرات دما و بارندگی و اثر آن بر وقوع خشکسالی در استان گلستان. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۲(۱)، ۴۵–۶۳.

۶. رمضانی، سعید. (۱۴۰۰). تغییرات اقلیمی و خشکسالی در استان گلستان؛ تحلیل سالانه بارش و دما. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۵(۳)، ۱۰۲-۱۱۸.

۷. عیوضی، معصومه؛ مساعدی، ابوالفضل؛ مفتاح‌هلقی، مهدی و حسام، موسی. (۱۳۸۷). بررسی فراوانی و تداوم شرایط مختلف بارش و خشکسالی در استان گلستان. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، مدیریت پایدار بلایای طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. (مقاله کنفرانس).

۸. فتح‌نیا، امان‌اله؛ رجایی, برزو و فرزانه. (۱۳۹۶). پیش‌بینی احتمال تکرار دوره‌های خشکسالی و اثر آن بر پوشش گیاهی در استان گلستان. جغرافیا و برنامه‌ریزی, ۲۱(۶۰), ۱۷۹-۱۹۶.

۹. کاظمی، فرهاد؛ رضایی، علی و اکبری، پرویز. (۱۴۰۱). روند بارش و خشکسالی در شمال ایران طی ۳۰ سال. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۴)، ۷۵-۹۲.

۱۰. مساعدی، ابوالفضل؛ خلیلی‌زاده، مجتبی و محمدی استادکلایه، امین. (۱۳۸۷). پایش خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۲)، ۱۲۲-۱۱۵.

۱۱. میرزایی، علیرضا؛ کریمی، مهدی و حسینی، ناصر. (۱۳۹۹). بررسی روند SPI در استان فارس بر اساس نرمال بلندمدت. علوم زمین ایران، ۸ (۱)، ۲۳-۳۸.

۱۲. ناظری، مجید؛ احمدپور، رضا و محمدی، حسین. (۱۳۹۸). تحلیل اثر تغییرات اقلیمی بر منابع آبی استان گلستان. پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۲ (۴)، ۱۵-۳۲.

۱۳. ناظری، مرتضی؛ یوسفی، علی؛ و ملکی، رضا. (۱۳۹۸). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی استان گلستان با استفاده از مدل‌سازی اقلیمی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۲۳(۴)، ۷۸–۹۲.

۱۴. یلقی، مصطفی. (۱۴۰۴). *تغییرات محیطی سطح آبی سد گلستان و تأثیر بارش در آن با استفاده از سنجش از دور*. دهمین همایش بین‌المللی دانش و فناوری علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران، تهران. (مقاله کنفرانس).

15. Copernicus Climate Change Service (C3S) (2022): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
16. Gümüş, V. (2023). Geostatistical evaluation of drought using different interpolation techniques and drought indices: A case study of the Seyhan Basin (Turkey). *Environment, Development and Sustainability. Advance online publication.*
17. Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology, 527*, 668–678.
18. Hosseini, M. R., Ahmadi, J., & Karimi, A. (2018). Drought analysis using climatic indices in the northeast region of Iran. *Quarterly Journal of Physical Geography Research*, *50*(2), 135–152. [In Persian].
19. Hosseini, N., Ahmadi, R., & Sadeghi, H. (2018). Drought assessment using SPI index in arid regions of Iran. *Iranian Journal of Natural Resources Research*, *5*(2), 33–49. [In Persian].
20. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.*
21. Khani, M., Ahmadi, R., & Rezaei, P. (2021). Spatial analysis of drought using the SPEI index in Khuzestan Province. *Iranian Climatology Research*, *12*(2), 45–60. [In Persian].
22. Li, L., et al. (2022). Development and application of high-resolution SPEI drought dataset for Central Asia. *Scientific Data, 9*, Article 145.
23. Mirzaei, A., Karimi, M., & Hosseini, N. (2020). Trend analysis of SPI in Fars Province based on long-term normals. *Iranian Journal of Earth Sciences*, *8*(1), 23–38. [In Persian].
24. Mosaedi, A., Khalilizadeh, M., & Mohammadi Ostadkalaye, A. (2008). Monitoring meteorological drought at the provincial scale of Golestan. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, *15*(2), 115–122. [In Persian].
25. Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
26. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 179–183.
27. Nazeri, M., Ahmadpour, R., & Mohammadi, H. (2019). Analysis of the impact of climate change on water resources in Golestan Province. *Geographical Research*, *32*(4), 15–32. [In Persian].

28. Nazeri, M., Yousefi, A., & Maleki, R. (2019). Investigating the impacts of climate change on water resources in Golestan Province using climate modeling. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, *23*(4), 78– 92. [In Persian].
29. Rahimzadeh-Bajgiran, P., et al. (2018). Assessing drought patterns and land-use change impacts in the Middle East using SPEI and remote sensing. *Journal of Arid Environments, 159*, 87–98.
30. Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. V. (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology, 34*(8), 2792–2804.
31. Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). *Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, 4(1), 17–22.*
32. 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.
33. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International, 10*(3), 111–120.
34. Zarch, M. A., et al. (2015). Interdecadal variation of climatic drought in the Northern Hemisphere. *International Journal of Climatology, 35*(6), 1475–1488.