



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 27, Autumn 2026



A Comparative Assessment of Remote Sensing Indices for Monitoring Agricultural Drought in the Jazmourian Basin Focusing on Lagged Response to Precipitation

Jabbar Rezaie^{1*}, Masoud Jalali², Hossein Asakereh³, Peyman Mahmoudi⁴,
Mohammad Darnd⁵

¹ (Corresponding Author) PhD Student, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: jabarrazaie@znu.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: mjalali@znu.ac.ir

³ Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran

⁵ Professor, Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received: 2026-05-23

Revised: : 2026-08-20

Accepted: 2026-08-23

Keywords:

Agricultural drought
Remote sensing
VSDI index
Precipitation time-lag
Jazmourian basin
TRMM satellite

ABSTRACT

Agricultural drought remains a fundamental challenge in arid and semi-arid ecosystems such as the Jazmourian basin. This study was conducted to comparatively evaluate the performance of four advanced remote sensing indices (VHI, VDI, VSDI, and TVDI) for monitoring agricultural drought in this region, with a specific emphasis on their lagged response to precipitation. To this end, MODIS satellite products and TRMM gridded precipitation data were utilized over a 22-year period (2001–2022), focusing on the critical month of April. The relationship between these indices and six cumulative and non-cumulative precipitation scenarios was assessed using Spearman's rank correlation. The results revealed that the Visible and Shortwave Infrared Drought Index (VSDI) exhibited an exceptional correlation coefficient ($\rho=0.90$, $p<0.01$) with the two-month cumulative precipitation (March and April), demonstrating superior monitoring capability due to its simultaneous sensitivity to soil and vegetation moisture. Subsequently, the Vegetation Drought Index (VDI) ranked second by effectively reflecting longer-term moisture memory ($\rho=0.81$ for four-month precipitation). In contrast, the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) showed no significant correlation with any precipitation scenarios due to its instantaneous thermal nature, rendering it an ineffective tool for this specific purpose. Based on the findings, the implementation of VSDI as the primary operational core, supported by VDI as a supplementary index, is strongly recommended for establishing agricultural drought early warning systems in southeastern Iran.

Cite this article: Rezaie, J., Jalali, M., Asakereh, H., Mahmoudi, P., Darnd, M. (2026). A Comparative Assessment of Remote Sensing Indices for Monitoring Agricultural Drought in the Jazmourian Basin Focusing on Lagged Response to Precipitation. *Journal of the Climate Change research*, 7 (27), 1-23.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: 10.30488/ccr.2026.582826.1336



ارزیابی تطبیقی کارایی شاخص‌های سنجش از دور در پایش خشکسالی کشاورزی حوضه آبریز جازموریان با رویکرد پاسخ تأخیری به بارش

جبار رضایی^۱، مسعود جلالی^۲، حسین عساکره^۳، پیمان محمودی^۴، محمد دارند^۵

^۱ (نویسنده مسئول) دانشجوی دکتری گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: jabarrazaie@znu.ac.ir

^۲ استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: mjalali@znu.ac.ir

^۳ استاد گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: asakereh@znu.ac.ir

^۴ دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، رایانامه: p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

^۵ استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، رایانامه: m.darand@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱ واژه‌های کلیدی: خشکسالی کشاورزی، سنجش از دور، شاخص VSDI، پاسخ تأخیری بارش، حوضه جازموریان، ماهواره TRMM	خشکسالی کشاورزی از چالش‌های بنیادین اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک نظیر حوضه آبریز جازموریان است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی کارایی چهار شاخص پیشرفته سنجش از دور (VSDI، VDI، VHI و TVDI) در پایش خشکسالی این منطقه، با تأکید بر پاسخ تأخیری آن‌ها به بارش انجام شد. بدین منظور، از محصولات ماهواره‌ای MODIS داده‌های شبکه‌بندی شده بارش TRMM طی یک دوره ۲۲ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲) برای ماه بحرانی آوریل استفاده گردید. ارتباط شاخص‌ها با شش سناریوی بارش تجمعی و غیرتجمعی از طریق آزمون همبستگی اسپیرمن ارزیابی شد. نتایج نشان داد که شاخص وضعیت خشکسالی ترکیبی VSDI با ثبت ضریب همبستگی استثنایی ($P < 0.01$, $\rho = 0.90$) نسبت به بارش تجمعی دوماهه (مارس و آوریل)، بالاترین کارایی را در پایش خشکسالی نشان می‌دهد که این امر ناشی از حساسیت هم‌زمان آن به رطوبت خاک و گیاه است. پس از آن، شاخص VDI به دلیل بازتاب حافظه رطوبتی بلندمدت‌تر ($\rho = 0.81$) برای بارش چهارماهه در جایگاه دوم قرار گرفت. در مقابل، شاخص TVDI به دلیل ماهیت حرارتی و لحظه‌ای، هیچ‌گونه همبستگی معناداری با سناریوهای بارشی نشان نداد و ابزاری ناکارآمد ارزیابی شد. بر اساس یافته‌ها، استفاده از شاخص VSDI به‌عنوان ابزار اصلی و VDI به‌عنوان شاخص مکمل جهت استقرار سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی در جنوب شرق ایران قویاً پیشنهاد می‌گردد.

استناد: رضایی، جبار؛ جلالی، مسعود؛ عساکره، حسین؛ محمودی، پیمان؛ دارند، محمد (۱۴۰۵). ارزیابی تطبیقی کارایی شاخص‌های سنجش از دور در پایش خشکسالی کشاورزی حوضه آبریز جازموریان با رویکرد پاسخ تأخیری به بارش. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۷)، ۲۳-۱.



مقدمه

خشکسالی، به عنوان یک پدیده خزنده‌ی اقلیمی و یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی، پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک جهان دارد. در این میان، خشکسالی کشاورزی که نتیجه مستقیم ناهنجاری در تعادل میان تامین آب و هدررفت آن از طریق تبخیر و تعرق است، از اهمیتی حیاتی برخوردار است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ کائو و همکاران، ۲۰۱۹). این نوع خشکسالی دقیقاً زمانی شکل می‌گیرد که در فاصله زمانی بین دو رخداد بارندگی، ذخیره رطوبتی در ناحیه توسعه ریشه، برای زنده‌مانی و پویایی محصولات کشاورزی کفایت نکند (المندرا-مارتین و همکاران، ۲۰۲۱). به بیان دیگر، نقطه آغازین بحران زمانی است که رطوبت قابل دسترس خاک به سطحی تقلیل یابد که منجر به تنش فیزیولوژیک و پژمردگی گیاه گردد.

در طول نیم قرن گذشته، تلاش‌های بسیاری برای کمی‌سازی این پدیده صورت گرفته است. شاخص‌های کلاسیک متعددی نظیر شاخص کفایت رطوبت^۱ (MAI)، شاخص ناهنجاری کفایت رطوبت^۲ (DMAI) و شاخص رطوبت محصول^۳ (CMI) (پالمر، ۱۹۶۸) توسعه یافته‌اند که عمدتاً بر داده‌های ایستگاهی هواشناسی استوارند. با این حال، ماهیت نقطه‌ای بودن داده‌های ایستگاهی و پراکنش نامناسب مکانی آن‌ها، به‌ویژه در مناطق وسیع و کم‌جمعیت بیابانی، کارایی این شاخص‌ها را در پایش دقیق و پیوسته خشکسالی‌های کشاورزی با چالش مواجه کرده است.

ظهور فناوری سنجش از دور با ارائه دیدبانی‌های پیوسته زمانی و مکانی، پارادایم جدیدی را در مطالعات خشکسالی رقم زد. محققان دریافتند که ترکیب باندهای طیفی مختلف می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از وضعیت سلامت گیاه و رطوبت خاک ارائه دهد. شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۴ (NDVI) به عنوان پیشگام این مسیر (کوگان، ۱۹۹۵ الف)، اگرچه

انقلابی در این حوزه بود، اما محدودیت‌هایی نظیر اشباع در تراکم‌های بالا و حساسیت به اثر پس‌زمینه خاک را نشان داد. این محدودیت‌ها منجر به توسعه نسل جدیدی از شاخص‌های ترکیبی گردید که با تلفیق اطلاعات پوشش گیاهی و دمای سطح زمین^۵ (LST)، سعی در ارائه تصویری واقعی‌تر از تنش رطوبتی دارند.

از میان انبوه شاخص‌های توسعه یافته، چهار شاخص کلیدی وجود دارند که علیرغم پتانسیل نظری بالا، کمتر در یک مطالعه تطبیقی جامع در مناطق خشک ایران مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته‌اند. نخست، شاخص سلامتی پوشش گیاهی^۶ (VHI) پیشنهادی کوگان (۱۹۹۵ ب) است که بر فرض رابطه منفی بین پوشش گیاهی و دما استوار است و تاکنون در بسیاری از نقاط جهان از جمله چین و لبنان کارایی خود را اثبات کرده است (یان و همکاران، ۲۰۱۶؛ غالب و همکاران، ۲۰۱۵). دوم، شاخص خشکسالی پوشش گیاهی^۷ (VDI) است که توسط سان و همکاران (۲۰۱۳) به عنوان شکل ارتقاء یافته VHI معرفی شد و مدعی ارائه همبستگی منفی پایدارتری میان NDVI و دماست. سوم، شاخص خشکسالی مادون قرمز موج کوتاه و مرئی^۸ (VSDI) (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳ الف) است که با بهره‌گیری از باندهای مادون قرمز، حساسیت بالاتری نسبت به رطوبت خاک نشان داده و در مطالعاتی در آمریکا و چین برتری آن نسبت به شاخص‌های رایج گزارش شده است. و نهایتاً شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی^۹ (TVDI) (سندھولت و همکاران، ۲۰۰۲) که بر پایه فضای مثلثی/دوونقه‌ای دما-گیاه بنا نهاده شده و در برآورد رطوبت خاک دقت بالایی دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۴).

حوزه آبریز جازموریان در جنوب شرق ایران، به عنوان یکی از شکننده‌ترین اکوسیستم‌های کشور، آزمایشگاهی طبیعی برای آزمون این شاخص‌هاست. مرور دقیق پیشینه تحقیق در این حوزه نشان‌دهنده

5. Land Surface Temperature

6. Vegetation Health Index

7. Vegetation Drought Index

8. Visible and Shortwave Infrared Drought Index

9. Temperature Vegetation Dryness Index

1. Moisture Adequacy Index

2. Deviation of Moisture Adequacy Index

3. Crop Moisture Index

4. Normalized Difference Vegetation Index

ماهواره‌ای اثبات کردند که محصول ماموریت اندازه‌گیری بارش‌های مناطق استوایی^۵ (TRMM) با ضریب همبستگی بسیار قوی (۰/۸۸)، دقیق‌ترین جایگزین برای داده‌های زمینی در این حوزه است و می‌تواند مبنای قابل اتکایی برای مطالعات هیدرولوژیکی باشد.

با واکاوی عمیق مطالعات پیشین، نوآوری و ضرورت پژوهش حاضر در چند محور اساسی نمایان می‌شود: نخست اینکه تاکنون هیچ مطالعه‌ای در حوزه جازموریان به طور همزمان و در یک بستر تطبیقی، کارایی چهار شاخص پیشرفته VDI، VHI، TVDI و VSDI را مورد سنجش قرار نداده است. اکثر مطالعات یا بر VHI متمرکز بوده‌اند یا از شاخص‌های ساده‌تر استفاده کرده‌اند. این در حالی است که شاخص‌هایی مانند VDI و VSDI که مدعی رفع محدودیت‌های شاخص‌های پیشین هستند، در این اقلیم خاص کمتر محک خورده‌اند. دوم، با توجه به یافته‌های اکبری ازیرانی (۱۴۰۱) مبنی بر ناکارآمدی شاخص‌های صرفاً مبتنی بر آب یا گیاه در مناطق کم‌پوشش، رویکرد این پژوهش در استفاده از شاخص‌های ترکیبی (دما-گیاه و مادون قرمز) می‌تواند گامی رو به جلو برای غلبه بر این محدودیت باشد. سوم و مهم‌تر از همه، روش اعتبارسنجی در این تحقیق است. برخلاف روش‌های معمول که صرفاً از داده‌های ایستگاهی پراکنده استفاده می‌کنند، این پژوهش با استناد به یافته‌های سلیمانی ساردو و همکاران (۱۳۹۸)، از داده‌های شبکه‌بندی شده بارش ماهواره TRMM به عنوان متغیر مستقل استفاده می‌کند تا واکنش‌پذیری شاخص‌های سنجش از دور را نه تنها در زمان همزمان، بلکه با لحاظ نمودن تاخیرهای زمانی مورد ارزیابی دقیق قرار دهد.

لذا، هدف اصلی این پژوهش پاسخ به این پرسش کلیدی است که در شرایط اقلیمی ویژه و پیچیده حوزه آبریز جازموریان، کدام یک از شاخص‌های VHI، VSDI، یا TVDI بالاترین حساسیت و

خلاءهای مطالعاتی آشکاری است. اگرچه مطالعات ارزشمندی در این منطقه صورت گرفته، اما اکثریت آن‌ها یا بر شاخص‌های هواشناسی متمرکز بوده‌اند یا از شاخص‌های سنجش از دور به صورت منفرد استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، لطفی نسب اصل و همکاران (۱۳۹۷الف؛ ۱۳۹۷ب) با بررسی ۳۰ ساله داده‌های ایستگاهی و استفاده از شاخص‌هایی نظیر شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI) و شاخص Z چینی^۲ (CZI)، تمرکز خشکسالی‌ها را در نواحی جنوب شرقی حوزه تایید کردند و نشان دادند که روش کوکرجینگ بهترین روش برای پهنه‌بندی این ویژگی هاست. اسکندری دامنه و همکاران (۱۳۹۸) نیز با تلفیق SPI و NDVI دریافتند که واکنش پوشش گیاهی به کمبود بارش در سراسر حوزه یکسان نیست و تحت تاثیر عوامل محلی قرار دارد. همچنین اکبری ازیرانی (۱۴۰۱) تلاش نمود با استفاده از شاخص‌های آبی همچون شاخص تفاضل نرمال شده آب^۳ (NDWI) و شاخص تفاضل نرمال شده آب اصلاح شده^۴ (MNDWI) ناهنجاری‌های رطوبت خاک را پایش کند، اما نتایج نشان داد که این شاخص‌ها به دلیل فقر پوشش گیاهی منطقه، عملکرد مناسبی نداشتند؛ یافته‌ای که ضرورت استفاده از شاخص‌های پیچیده‌تر و ترکیبی (مانند VSDI یا TVDI) را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

از سوی دیگر، سلیمانی ساردو و زارعی (۱۳۹۸) در منطقه رودبار جنوب، تنها به استفاده از شاخص VHI اکتفا کردند و اگرچه همبستگی آن را با SPI شش ماهه تایید نمودند، اما جای خالی مقایسه این شاخص با دیگر شاخص‌های نوری-حرارتی در مطالعه آن‌ها احساس می‌شود. نکته بسیار حائز اهمیت در مطالعات جازموریان، چالش کمبود و پراکنش نامناسب ایستگاه‌های زمینی است. پژوهش کلیدی سلیمانی ساردو و همکاران (۱۳۹۸) راهکار این چالش را ارائه کرده است؛ آن‌ها با ارزیابی دقیق محصولات بارش

1. Standardized Precipitation Index

2. China Z-Index

3. Normalized Difference Water Index

4. Modified Normalized Difference Water Index

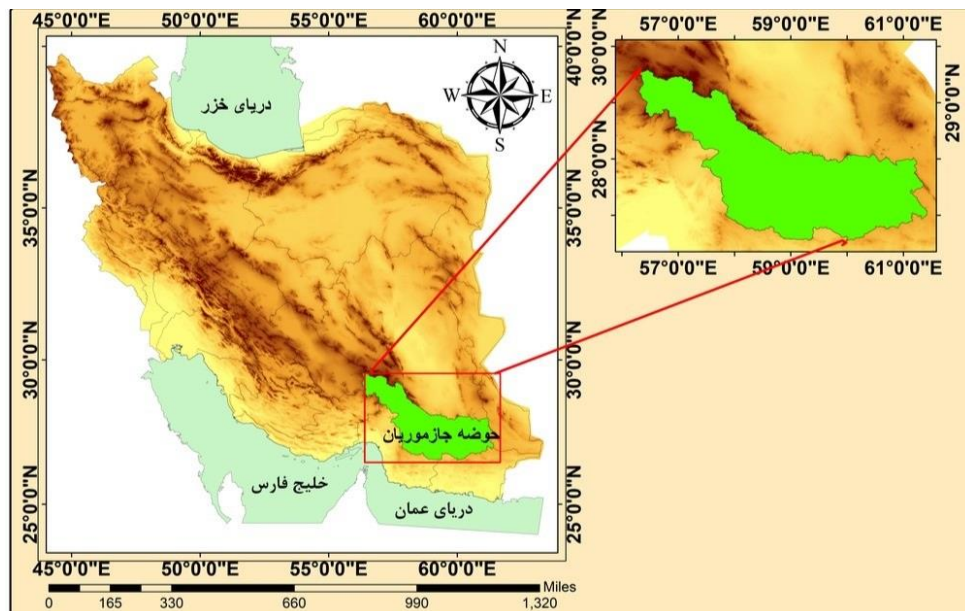
5. Tropical Rainfall Measuring Mission

دقیق‌ترین واکنش را نسبت به نوسانات بارش (به عنوان محرک اصلی خشکسالی کشاورزی) از خود نشان می‌دهند؟ بدین منظور، تغییرپذیری این شاخص‌ها برای ماه آوریل (به عنوان ماهی بحرانی در تقویم زراعی منطقه) طی دوره آماری ۲۲ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۲) محاسبه و همبستگی آن‌ها با داده‌های بارش TRMM با در نظر گرفتن تاخیرهای زمانی مختلف تحلیل خواهد شد تا بهترین شاخص برای استقرار یک سامانه پایش خشکسالی کارآمد در جنوب شرق ایران معرفی گردد.

داده‌ها و روش‌شناسی

معرفی منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز جازموریان

با وسعتی بالغ بر ۶۹۶۰۰ کیلومترمربع، یکی از حوضه‌های آبریز مهم و در عین حال شکننده در جنوب شرق ایران است که از نظر موقعیت جغرافیایی بین عرض‌های شمالی ۲۶° تا ۲۹° و طول‌های شرقی ۵۶° تا ۶۱° محصور شده است (شکل ۱). این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی، بین دو استان کرمان (نیمه غربی با مساحت تقریبی ۳۵۶۰۰ کیلومترمربع) و سیستان و بلوچستان (نیمه شرقی با مساحت تقریبی ۳۴۰۰۰ کیلومترمربع) مشترک است. دشت‌های حاصلخیز جیرفت، فاریاب و رودبار جنوب در بخش غربی و دشت‌های ایرانشهر، بمپور و دلگان در بخش شرقی، کانون‌های اصلی فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه محسوب می‌شوند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز جازموریان در جنوب شرق ایران

از منظر هیدرولوژیکی، جازموریان یک حوضه آبریز بسته است که تمامی رواناب‌های سطحی آن نهایتاً به تالاب (هامون) جازموریان در پست‌ترین نقطه مرکزی حوضه تخلیه می‌شوند. دو شریان حیاتی این حوضه، رودخانه‌های دائمی هلیل‌رود و بمپور هستند که نقش اصلی زهکشی حوضه را بر عهده دارند. رژیم هیدرولوژیکی این رودخانه‌ها به شدت متأثر از ذوب برف در ارتفاعات (به‌ویژه کوه شاه با ارتفاع ۴۴۰۰ متر) و بارش‌های رگباری است.

اقلیم منطقه، بر اساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی، در زمره اقلیم‌های خشک و بیابانی قرار می‌گیرد. این منطقه از نظر توپوگرافی، دامنه ارتفاعی چشمگیری دارد؛ به گونه‌ای که ارتفاع آن از حدود ۳۵۰ متر در چاله جازموریان تا نزدیک به ۴۴۰۰ متر در نواحی کوهستانی متغیر است. از مهم‌ترین ویژگی‌های اقلیمی منطقه می‌توان به بارش محدود، گرمای شدید و نرخ بالای تبخیر - تعرق اشاره کرد که در برخی نواحی به بیش از ۴۵۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. با این حال،

تأثیر رطوبتی دریای عمان و ورود توده‌های هوای مرطوب از این پهنه آبی، شرایط اقلیمی ویژه‌ای را در منطقه ایجاد کرده است که آن را از حوضه‌های مرکزی ایران متمایز می‌سازد. پوشش اراضی منطقه نیز تنوعی از اراضی زراعی، مراتع فقیر، پهنه‌های ماسه‌ای و اراضی بایر را شامل می‌شود.

داده‌های مورد استفاده: در این پژوهش، به‌منظور پایش خشکسالی کشاورزی و ارزیابی شاخص‌ها، از مجموعه داده‌های سنجنش از دور در بازه زمانی ۲۲ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲) استفاده شد. تمرکز زمانی مطالعه بر ماه آوریل قرار دارد؛ چراکه در تقویم زراعی منطقه، این ماه مصادف با انتهای فصل رشد و اوج پوشش گیاهی است و هرگونه تنش رطوبتی در این زمان، بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی محصول خواهد داشت.

داده‌های سنجنده MODIS: برای محاسبه شاخص‌های چهارگانه، از محصولات مختلف سنجنده MODIS (نصب شده بر ماهواره Terra) استفاده گردید:

- **داده‌های پوشش گیاهی:** از محصول MOD13C2 با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۵ درجه (حدود ۵۶۰۰ متر) به صورت ماهانه برای استخراج شاخص NDVI و NDWI استفاده شد (LP DAAC, ۲۰۲۴a).
- **داده‌های دمای سطح زمین (LST):** از محصول MOD11C3 با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۵ درجه برای استخراج دمای روز و شب استفاده گردید (LP DAAC, ۲۰۲۴b).
- **داده‌های بازتاب سطحی:** برای محاسبه شاخص VSDI که نیازمند باندهای طیفی خاص (Blue, Red, SWIR) است، از محصول MOD09A1 (کامپوزیت ۸ روزه با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر) استفاده شد (LP DAAC, ۲۰۲۴c). بدین منظور، تصاویر مربوط به نیمه دوم آوریل (اوج سبزی‌نگی) انتخاب شدند. جهت همسان‌سازی مکانی با سایر داده‌ها، مقادیر بازتاب طیفی محصول MOD09A1 با استفاده از روش میانگین‌گیری پیکسلی به ابعاد

پیکسل منطبق با محصول MOD13C2 (حدود ۵۶۰۰ متر) بازنمونه‌برداری شدند. استفاده از این روش موجب می‌شود تا با میانگین‌گیری منطقی از پیکسل‌های با تفکیک بالاتر، نوسانات و نویزهای محلی کاهش یافته و سیگنال‌های طیفی کلان‌مقیاس در باندهای حساس به رطوبت (مانند Red و SWIR) برای پایش منطقه‌ای خشکسالی به خوبی حفظ شوند. بالاترین میزان همبستگی به‌دست‌آمده برای شاخص VSDI با داده‌های بارش در این مطالعه، کارایی این همسان‌سازی را در حفظ کیفیت داده‌های طیفی تأیید می‌کند.

داده‌های بارش (TRMM): به‌منظور اعتبارسنجی شاخص‌ها و تحلیل واکنش آن‌ها به بارش، از داده‌های ماهواره‌ای TRMM استفاده شد. محصول مورد استفاده، TRMM-3B43 نسخه ۷ است که تخمین بارش ماهانه را با تلفیق داده‌های راداری، مایکروویو و ایستگاه‌های زمینی با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه ارائه می‌دهد (TRMM, ۲۰۱۱). این محصول به دلیل دقت بالا در مناطق خشک و همبستگی مناسب با داده‌های زمینی (سلیمانی ساردو و همکاران، ۱۳۹۸)، به عنوان داده مبنا در نظر گرفته شد.

روش‌شناسی و محاسبه شاخص‌ها: پس از پیش‌پردازش تصاویر (شامل تصحیحات هندسی، رادیومتری و همسان‌سازی مکانی)، چهار شاخص خشکسالی به شرح زیر محاسبه گردیدند:

شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI): این شاخص که توسط کوگان (۱۹۹۵) معرفی شد، بر پایه ترکیب دو مؤلفه وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و وضعیت دمایی (TCI) استوار است. فرض بنیادین VHI وجود رابطه منفی بین دمای سطح زمین و سلامت گیاه در شرایط تنش آبی است (کوگان، ۱۹۹۵؛ سینگ و همکاران، ۲۰۰۳).

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100 \quad (1)$$

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \times 100 \quad (2)$$

$$VHI = 0.5 \times VCI + 0.5 \times TCI \quad (3)$$

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر شاخص خشکسالی پوشش گیاهی (VDI)

مقادیر شاخص (VDI)	طبقات خشکسالی
≤ 13	خشکسالی بسیار شدید
≤ 22	خشکسالی شدید
≤ 32	خشکسالی متوسط
≤ 41	خشکسالی خفیف
> 41	بدون خشکسالی

شاخص خشکسالی مرئی و مادون قرمز موج کوتاه (VSDI): شاخص VSDI (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳) برخلاف دو شاخص قبلی، صرفاً بر پایه باندهای انعکاسی (بدون دخالت دما) عمل می‌کند و برای مناطق با پوشش گیاهی تنک و ابرها مناسب است. این شاخص از سه باند آبی (Blue)، قرمز (Red) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) بهره می‌برد:

$$VSDI = 1 - [(SWIR - Blue) + (Red - Blue)] \quad (7)$$

در این رابطه، باند آبی به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و انحراف باندهای SWIR و Red (که حساسیت بالایی به رطوبت دارند) نسبت به آن سنجیده می‌شود. مقادیر پایین‌تر VSDI نشان‌دهنده خشکسالی شدیدتر است. بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۳)، مقادیر این شاخص را می‌توان برای تفکیک سطوح آبی/برفی و همچنین ارزیابی شدت خشکسالی در طبقات مختلف دسته‌بندی کرد (جدول ۳).

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر شاخص خشکسالی مرئی و مادون قرمز موج کوتاه (VSDI)

مقادیر VSDI	طبقات خشکسالی
< 0.64	خشکسالی شدید/استثنایی
≥ 0.64	خشکسالی شدید
≥ 0.68	خشکسالی متوسط
≥ 0.71	خشکسالی غیرطبیعی / خشکی ملایم
≥ 0.75	بدون خشکسالی / نرمال
> 1	آب / برف

در این روابط، $NDVI_{max/min}$ و $LST_{max/min}$ به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل تاریخی برای هر پیکسل در طول دوره آماری هستند. ضریب ۰/۵ نشان‌دهنده سهم برابر شرایط رطوبتی و دمایی در برآورد خشکسالی است. مقادیر محاسبه شده برای شاخص VHI بر اساس جدول ۱ در طبقات مختلف خشکسالی دسته‌بندی می‌شوند.

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)

مقادیر VHI	طبقات خشکسالی
≤ 10	خشکسالی بسیار شدید
≤ 20	خشکسالی شدید
≤ 30	خشکسالی متوسط
≤ 40	خشکسالی خفیف
> 40	بدون خشکسالی

شاخص خشکسالی پوشش گیاهی (VDI): این شاخص توسط سان و همکاران (۲۰۱۳) به عنوان نسخه ارتقاء یافته VHI معرفی شد. تفاوت اصلی آن در استفاده از NDWI به جای NDVI و استفاده از اختلاف دمای شب و روز (ΔLST) به جای میانگین دما است (گائو، ۱۹۹۶). این تغییرات باعث پایداری بیشتر رابطه منفی بین گیاه و دما می‌شود (گو و همکاران، ۲۰۰۷).

$$WCI = \frac{NDWI_i - NDWI_{min}}{NDWI_{max} - NDWI_{min}} \times 100 \quad (4)$$

$$\Delta TCI = \frac{\Delta LST_{max} - \Delta LST_i}{\Delta LST_{max} - \Delta LST_{min}} \times 100 \quad (5)$$

$$VDI = 0.5 \times WCI + 0.5 \times \Delta TCI \quad (6)$$

که در آن WCI شاخص شرایط آب و ΔTCI شاخص شرایط اختلاف دمای کشاورزی است. مقادیر محاسبه شده VDI بر اساس جدول ۲ در پنج طبقه خشکسالی دسته‌بندی می‌شوند (سان و همکاران، ۲۰۱۳).

شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی (TVDI): این شاخص بر اساس فضای فیزیکی مثلثی/ذوزنقه‌ای شکل گرفته بین NDVI و LST تعریف می‌شود (سندھولت و همکاران، ۲۰۰۲). در این فضا، لبه بالایی نشان‌دهنده محدودیت آب و لبه پایینی نشان‌دهنده دسترسی نامحدود به آب است. TVDI موقعیت هر پیکسل را نسبت به این دو لبه می‌سنجد:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (۸)$$

که در آن:

$$LST_{max} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (۹)$$

$$LST_{min} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (۱۰)$$

ضرایب a و b از طریق رگرسیون خطی روی نمودار پراکنش $NDVI - LST$ برای هر ماه استخراج می‌شوند. مقادیر TVDI بین ۰ (مرطوب) تا ۱ (خشک) متغیر است. بر اساس مطالعات کائو و همکاران، ۲۰۱۴، مقادیر این شاخص برای ارزیابی شدت خشکسالی مطابق جدول ۴ طبقه‌بندی می‌شود.

جدول ۴- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی (TVDI)

مقادیر TVDI	طبقات خشکسالی
≤ 0.2	بسیار مرطوب
$0.2 - 0.4$	مرطوب
$0.4 - 0.6$	نرمال / طبیعی
$0.6 - 0.8$	خشک
$0.8 - 1$	بسیار خشک

تحلیل آماری و ارزیابی تأخیر زمانی: یکی از بخش‌های مهم در روش‌شناسی این پژوهش، ارزیابی پاسخ زمانی شاخص‌های خشکسالی به نوسانات بارش است. با توجه به اینکه تأثیر کمبود بارش بر پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی اغلب با تأخیر و به صورت تجمعی ظاهر می‌شود، ضریب همبستگی (اسپیرمن) میانگین مقادیر شاخص‌های خشکسالی کشاورزی (در ماه آوریل) و میانگین داده‌های بارش در سطح کل حوضه، در شش سناریوی زمانی مختلف محاسبه شد.

این سناریوها بر اساس دوره‌های تجمعی و غیرتجمعی بارش به شرح زیر تعریف شدند:

- **سناریوی اول:** همبستگی بارش غیرتجمعی ماه آوریل با شاخص‌های خشکسالی ماه آوریل.
- **سناریوی دوم:** همبستگی بارش تجمعی دو ماهه (مارس و آوریل) با شاخص‌های خشکسالی ماه آوریل.
- **سناریوی سوم:** همبستگی بارش تجمعی سه‌ماهه (فوریه، مارس و آوریل) با شاخص‌های خشکسالی ماه آوریل.
- **سناریوی چهارم:** همبستگی بارش تجمعی چهارماهه (ژانویه، فوریه، مارس و آوریل) با شاخص‌های خشکسالی ماه آوریل.
- **سناریوی پنجم:** همبستگی بارش تجمعی دو ماهه پیشین (فوریه و مارس) با شاخص‌های خشکسالی ماه آوریل.
- **سناریوی ششم:** همبستگی بارش تجمعی سه‌ماهه پیشین (ژانویه، فوریه و مارس) با شاخص‌های خشکسالی ماه آوریل.

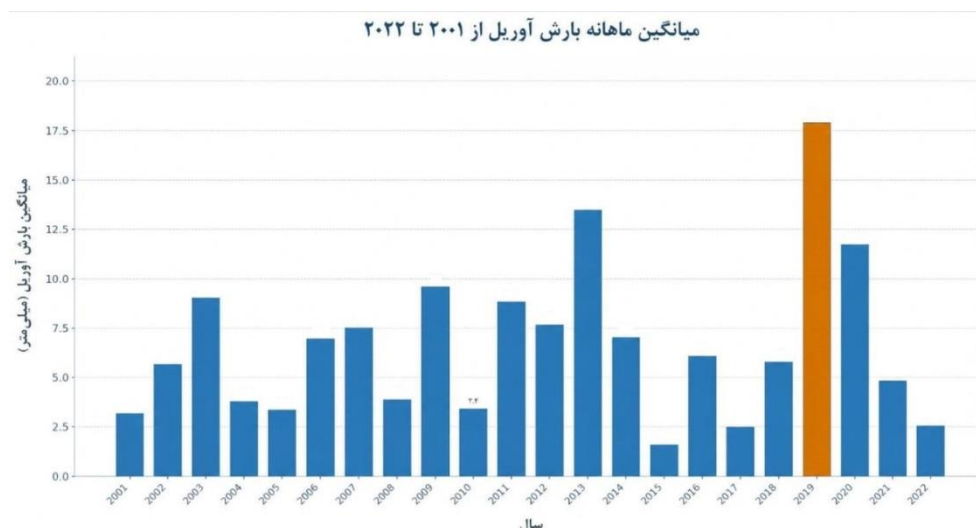
لازم به ذکر است که جهت جلوگیری از بروز همبستگی‌های کاذب ناشی از نوسانات فصلی، تحلیل سری زمانی صرفاً بر روی داده‌های متناظر ماه آوریل در یک دوره ۲۲ ساله (به صورت سری گسسته سالانه) انجام شد تا اثر تغییرات درون‌سالی خنثی گردد. همچنین، از آنجا که شاخص‌های مورد استفاده (مانند VHI و VDI) بر اساس مقادیر اکسترمم تاریخی خود به طور ذاتی نرمال‌سازی و مقیاس‌بندی شده‌اند، نیازی به پیش‌پردازش‌های ثانویه روی مقادیر شاخص‌ها نبود. برای سنجش ارتباط میان این متغیرها، از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (آزمون ناپارامتریک) استفاده شد؛ زیرا این آزمون پیش‌فرض توزیع نرمال داده‌ها را نیاز نداشته و در برابر نوسانات شدید بین‌سالی بارش و روندهای یکنواخت هیدرواقليمی، از پایایی آماری بالاتری نسبت به روش‌های پارامتریک (نظیر پیرسون) برخوردار است.

این تحلیل براساس سری زمانی میانگین بارش و شاخص‌های خشکسالی در سطح کل حوضه انجام شد.

هدف از این بررسی، ارزیابی حساسیت هر شاخص نسبت به دوره‌های مختلف انباشت بارش و شناسایی شاخصی است که بالاترین همبستگی را با الگوی بارش (به عنوان محرک اصلی خشکسالی) نشان می‌دهد، تا در نهایت کارآمدترین شاخص برای پایش خشکسالی حوضه جازموریان معرفی گردد.

نتایج

بررسی تغییرات زمانی بارش آوریل در حوضه جازموریان: پیش از ارزیابی کارایی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور، بررسی روند تغییرات بارش ماه آوریل به عنوان مهم‌ترین متغیر اقلیمی تأثیرگذار بر شرایط رطوبتی حوضه، حائز اهمیت است. شکل ۲ تغییرات میانگین بارش ماه آوریل را طی دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲) نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار تغییرات میانگین بارش ماه آوریل در حوضه آبریز جازموریان طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲

خشکسالی شدید ۲۶/۷٪ از مساحت منطقه را در بر گرفتند (مجموعاً بیش از ۹۱٪ درگیری). در این سال، سهم طبقه بدون خشکسالی تنها ۰/۶۴٪ بود. با بهبود شرایط رطوبتی در سال‌های بعد، مساحت طبقات خشکسالی کاهش یافت. در سال‌های نسبتاً مرطوب مانند ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، شاخص VDI به ترتیب ۶۸/۴٪ و ۶۷/۷٪ از مساحت حوضه را در طبقه بدون خشکسالی طبقه‌بندی کرد و سهم طبقه خشکسالی

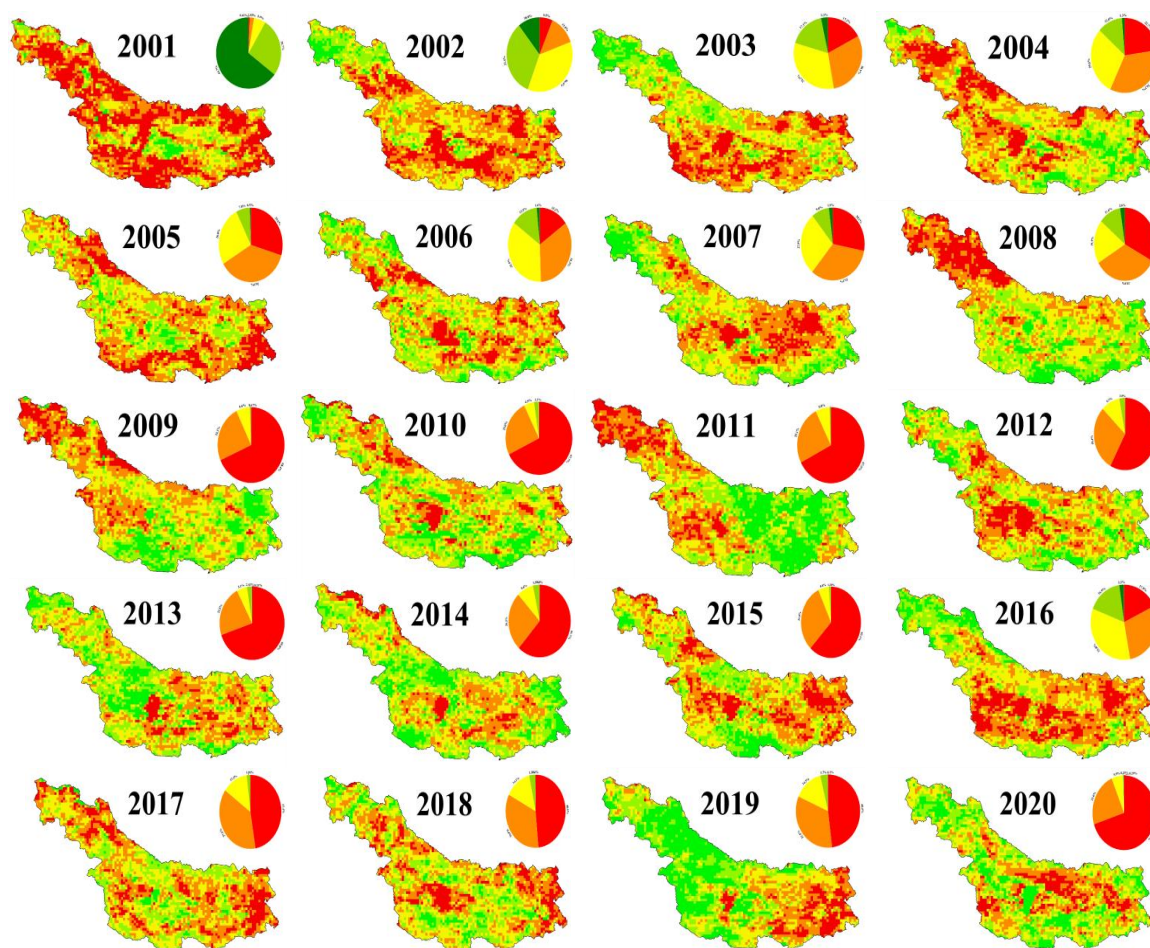
تحلیل شاخص خشکسالی گیاهی (VDI): بررسی تغییرات زمانی مساحت تحت تأثیر طبقات مختلف خشکسالی بر اساس شاخص VDI طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در حوضه آبریز جازموریان (شکل ۳)، نشان‌دهنده نوسانات شدید و گسترده‌ی بالایی خشکسالی در سال‌های خشک است. در سال ۲۰۰۱، بخش اعظم حوضه تحت سیطره خشکسالی قرار داشت؛ به‌طوری‌که خشکسالی بسیار شدید ۶۴/۷٪ و

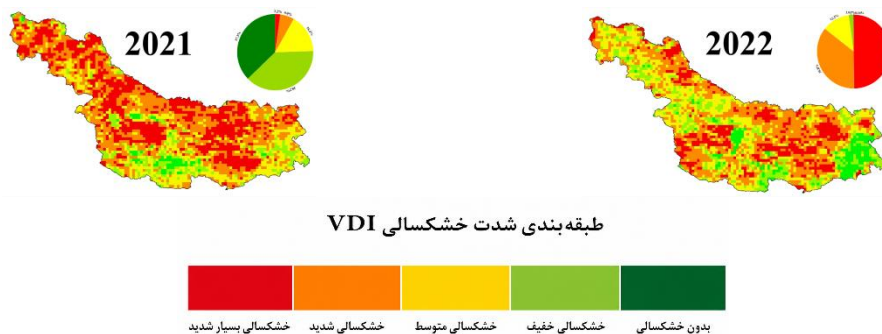
هستند ($P < 0.05$). قوی‌ترین همبستگی در سناریوی بارش تجمعی چهارماهه (ژانویه تا آوریل) با ضریب اسپیرمن $\rho = 0.81$ و سطح معناداری بسیار قوی ($P < 0.01$) به دست آمد.

دومین همبستگی قدرتمند مربوط به سناریوی بارش تجمعی سه‌ماهه (فوریه تا آوریل) با ضریب $\rho = 0.79$ ($P < 0.01$) بود. سایر بازه‌های تجمعی شامل ماه‌های ژانویه تا مارس ($\rho = 0.74$ و $P < 0.01$)، فوریه و مارس ($\rho = 0.66$ و $P < 0.01$) و مارس و آوریل ($\rho = 0.62$ و $P < 0.05$) نیز همبستگی‌های بالا و معناداری را ثبت کردند. کمترین میزان همبستگی در این ارزیابی، مربوط به بارش مقطعی و غیرتجمعی ماه آوریل بود که ضریب آن $\rho = 0.50$ ($P < 0.05$) محاسبه گردید.

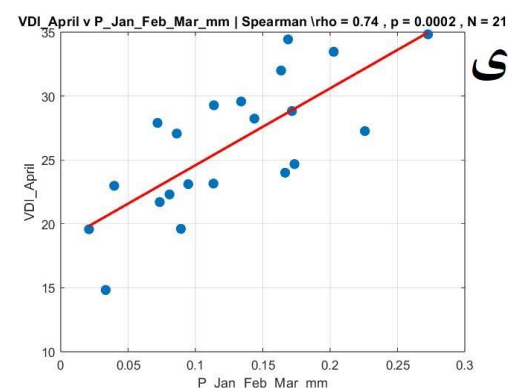
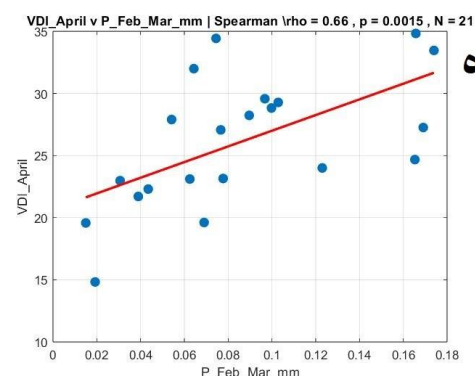
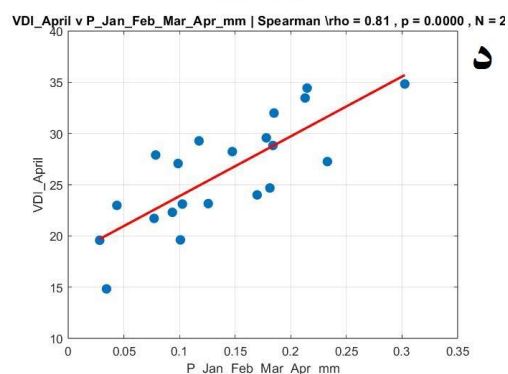
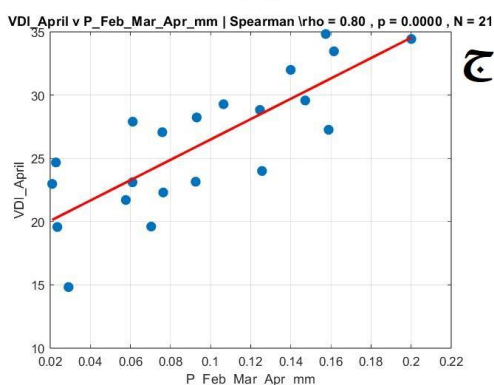
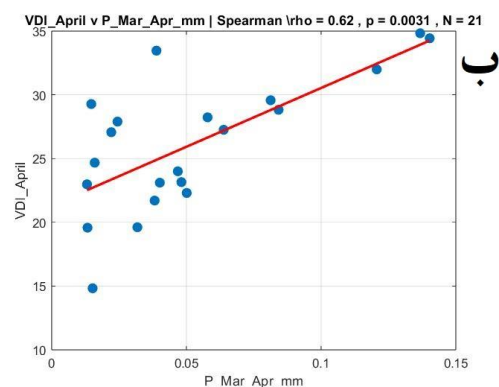
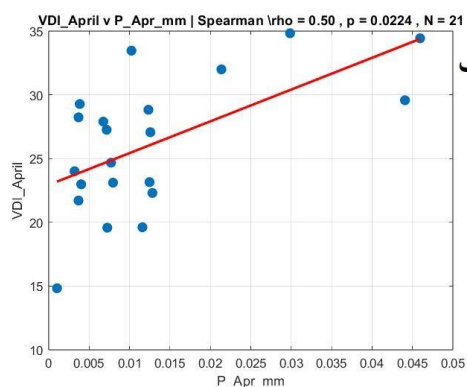
بسیار شدید به صفر رسید. این روند نوسانی در دهه اخیر نیز ادامه داشت؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۰، طبقه بدون خشکسالی حدود ۷۰٪ از حوضه را پوشش داد. با این حال، در سال خشک ۲۰۲۱، بار دیگر خشکسالی بر حوضه غالب شد و طبقات خشکسالی بسیار شدید و شدید به ترتیب ۳۷٪ و ۳۸٪ (مجموعاً بیش از ۷۵٪) از مساحت حوضه را به خود اختصاص دادند و سهم طبقه بدون خشکسالی به تنها ۲٪ تنزل یافت.

به‌منظور ارزیابی کمی حساسیت شاخص VDI به نوسانات بارندگی، همبستگی میانگین حوضه‌ای این شاخص در ماه آوریل با بارش‌های تجمعی در شش سناریوی زمانی مختلف مورد آزمون قرار گرفت (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که تمامی ضرایب همبستگی اسپیرمن در سطح اطمینان ۹۵٪ مثبت و معنادار





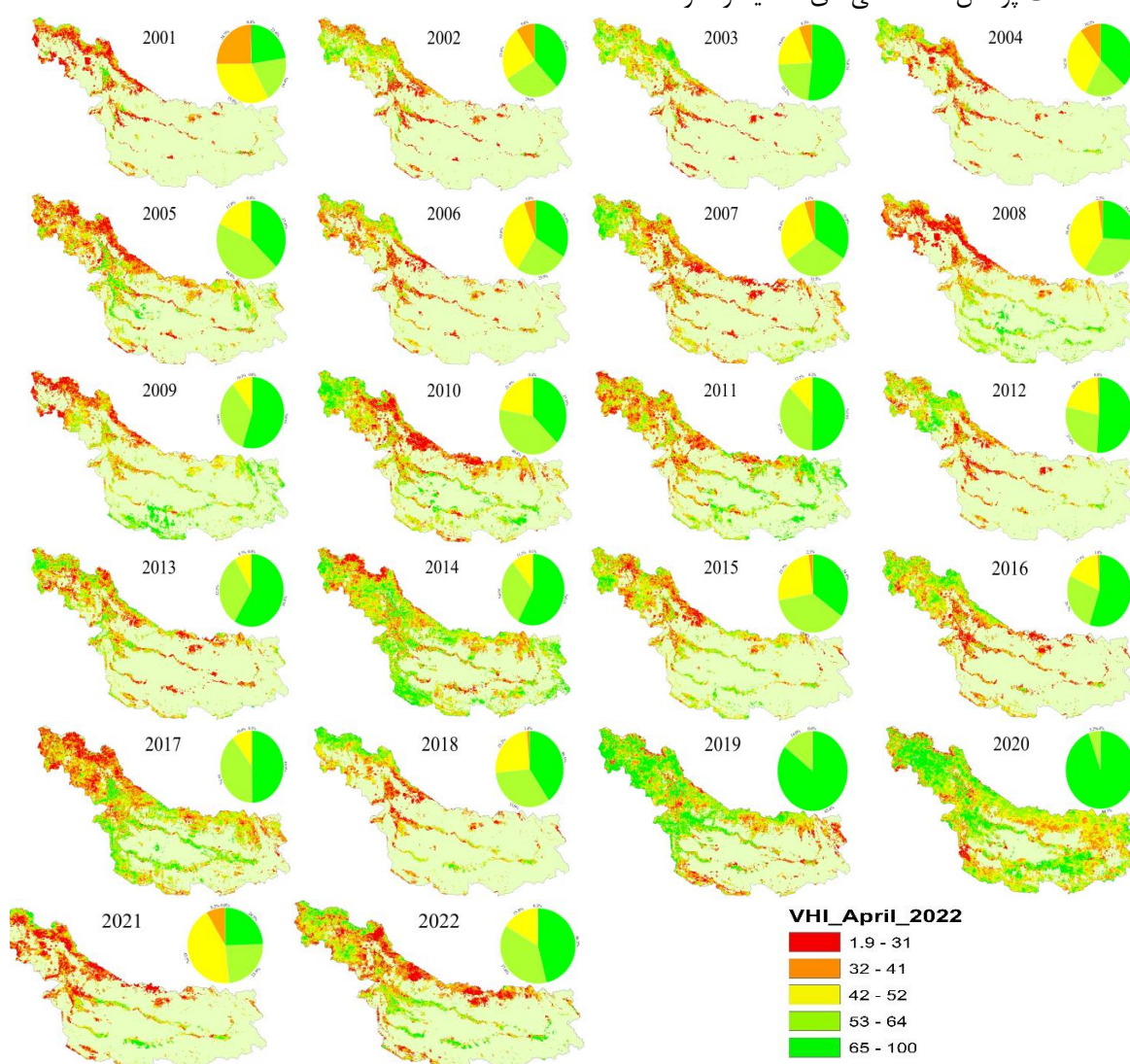
شکل ۳- توزیع مکانی-زمانی وضعیت خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز جازموریان براساس شاخص خشکسالی گیاهی (VDI) در ماه آوریل طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲. نمودارهای دایره‌ای در هر پنل، درصد مساحت اختصاص یافته به هر یک از طبقات شدت خشکسالی را در همان سال نشان می‌دهند.



شکل ۴- تحلیل همبستگی میانگین حوضه‌ای شاخص خشکسالی گیاهی (VDI) ماه آوریل با بارش‌های تجمعی در شش سناریوی زمانی طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲. نمودارهای پانل (الف) تا (و) به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی با بارش‌های: (الف) آوریل، (ب) مارس و آوریل، (ج) فوریه تا آوریل، (د) ژانویه تا آوریل، (ه) فوریه و مارس، و (و) ژانویه تا مارس هستند.

بود. این روند در سال خشک ۲۰۲۱ نیز با شدت بیشتری تکرار شد؛ به‌طوری‌که خشکسالی متوسط به تنهایی ۴۳/۴٪ از حوضه را در بر گرفت و سهم طبقه بدون خشکسالی به ۲۴/۴٪ تقلیل یافت. در نقطه مقابل، در سال‌های پربارش نظیر ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، وضعیت سلامت پوشش گیاهی بهبودی چشمگیر را تجربه کرد؛ به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۲۰، شرایط بدون خشکسالی بر ۹۴/۴٪ از کل مساحت حوضه حاکم شد و سهم طبقات خشکسالی شدید و بسیار شدید به صفر رسید.

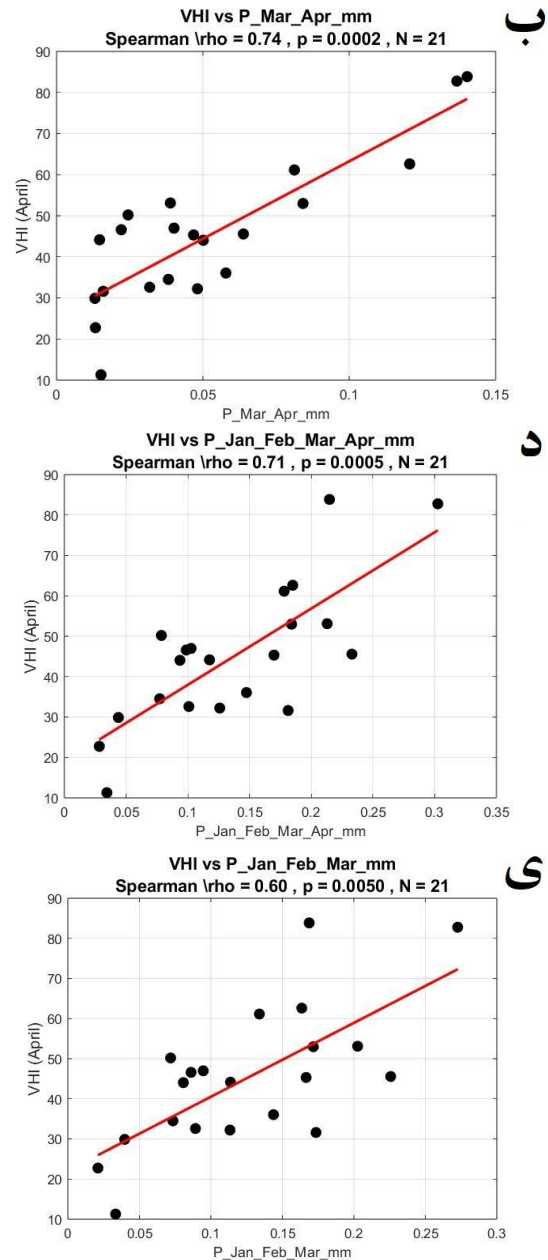
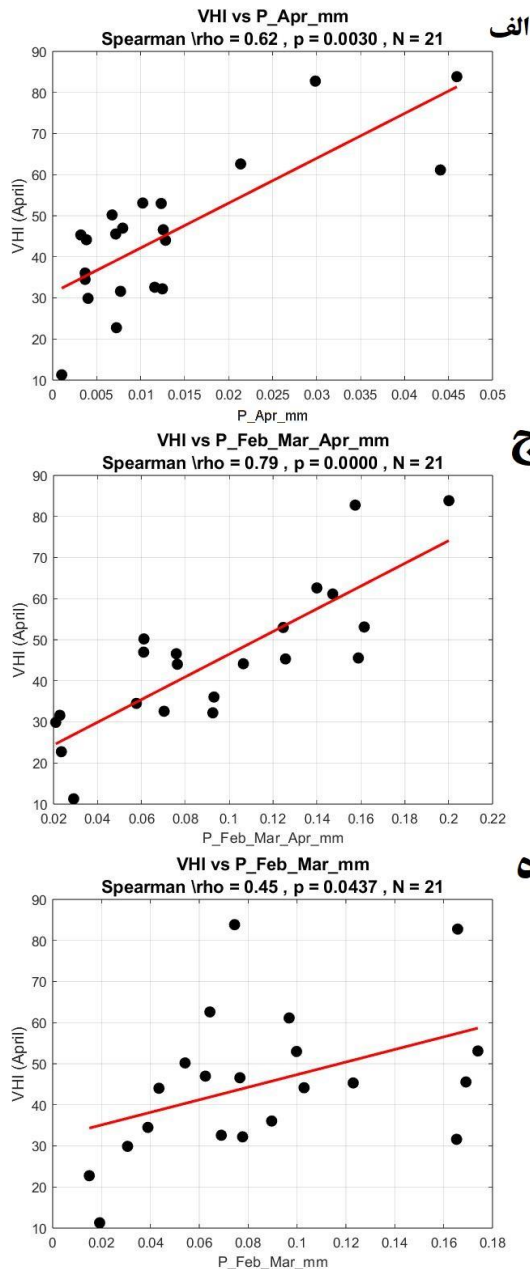
تحلیل شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI):
بررسی توزیع مکانی-زمانی وضعیت خشکسالی کشاورزی بر اساس شاخص VHI در حوضه آبریز جازموریان طی ماه آوریل سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ (شکل ۵) نشان‌دهنده نوسانات قابل‌توجه در مساحت تحت تأثیر طبقات مختلف خشکسالی است. در سال‌های خشک، بخش عمده‌ای از حوضه درگیر درجات مختلف تنش رطوبتی بوده است؛ به‌عنوان نمونه در سال ۲۰۰۱، تنها ۲۲/۵٪ از مساحت حوضه در وضعیت بدون خشکسالی قرار داشت و بیش از ۵۷٪ منطقه تحت پوشش خشکسالی‌های شدید و متوسط



شکل ۵- توزیع مکانی-زمانی وضعیت خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز جازموریان بر اساس شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) در ماه آوریل طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲. نمودارهای دایره‌ای در هر پنل، درصد مساحت اختصاص‌یافته به هر یک از طبقات شدت خشکسالی را در همان سال نشان می‌دهند.

ارتباطات ارزیابی شده، مثبت و از نظر آماری معنادار ($P < 0.05$) هستند. بالاترین میزان همبستگی در سناریوی بارش تجمعی سه‌ماهه (فوریه، مارس و آوریل) با ضریب اسپیرمن $\rho = 0.79$ و در سطح معناداری بسیار قوی ($P < 0.05$) به ثبت رسید.

به‌منظور ارزیابی کمی ارتباط میان سلامت پوشش گیاهی و دریافت رطوبت، همبستگی میانگین حوضه‌ای شاخص VHI در ماه آوریل با مقادیر بارش در شش سناریوی زمانی مختلف مورد آزمون قرار گرفت (شکل ۶). نتایج نشان می‌دهد که تمامی



شکل ۶- تحلیل همبستگی میانگین حوضه‌ای شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) ماه آوریل با بارش‌های تجمعی در شش سناریوی زمانی طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲. نمودارهای پانل نشان‌دهنده همبستگی با متغیرهای بارشی از جمله بارش آوریل، مجموع فوریه تا آوریل، و ژانویه تا آوریل (با بالاترین همبستگی $\rho = 0.81$) هستند.

مشاهده شده ضعیف بوده و هیچ‌یک از آن‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) معنادار نیستند. بالاترین میزان همبستگی مربوط به سناریوی بارش تجمعی چهارماهه (ژانویه تا آوریل) است که با ضریب همبستگی اسپیرمن $\rho = 0.39$ و مقدار ($P > 0.05$) (غیرمعنادار) به دست آمد.

سایر سناریوهای تجمعی نیز ارتباط آماری ضعیف و غیرمعناداری را به ثبت رساندند؛ از جمله بارش تجمعی سه‌ماهه فوریه تا آوریل ($\rho = 0.28$) و $P > 0.05$ ، بارش تجمعی دوماهه فوریه و مارس ($\rho = 0.24$ و $P > 0.05$) و بارش تجمعی دوماهه مارس و آوریل ($\rho = 0.23$ و $P > 0.05$). کمترین میزان همبستگی نیز در سناریوی بارش غیرتجمعی مقطعی ماه آوریل با $\rho = 0.06$ ($P < 0.05$) و بارش تجمعی سه‌ماهه ژانویه تا مارس با $\rho = 0.07$ ($P < 0.05$) مشاهده گردید.

تحلیل شاخص وضعیت خشکسالی ترکیبی

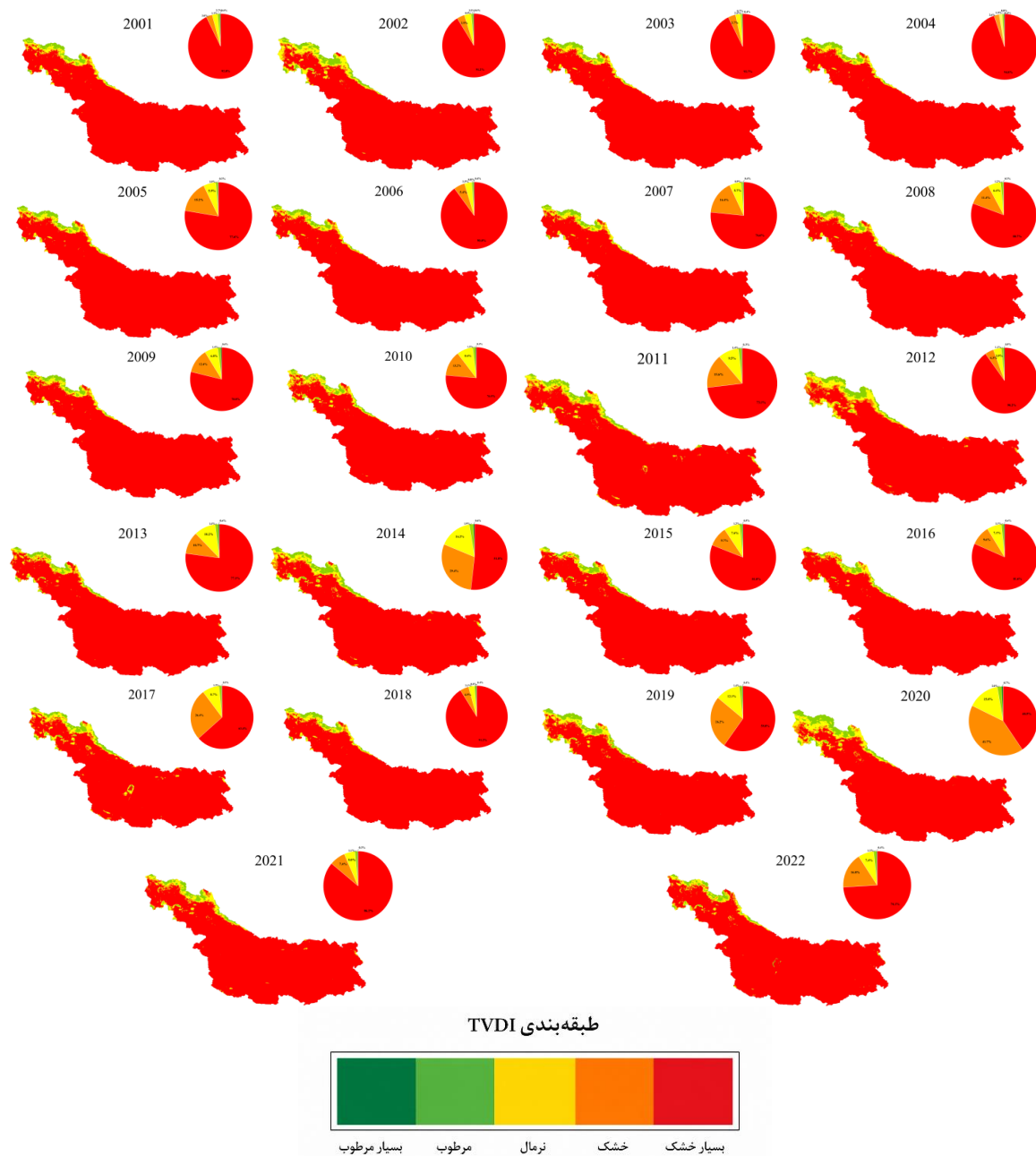
(VSDI): بررسی الگوی مکانی-زمانی طبقات شاخص VSDI در ماه آوریل طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ (شکل ۹)، نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه در گستره طبقات مختلف خشکسالی است. تحلیل داده‌های مساحت حوضه نشان می‌دهد که طبقه خشکسالی بسیار شدید در اکثر سال‌های مورد مطالعه، بخش غالب حوضه را در بر گرفته است؛ به‌طوری‌که بیشترین گستره این طبقه در سال‌های ۲۰۱۴ (۵۶/۴٪)، ۲۰۱۶ (۵۶/۱٪) و ۲۰۱۹ (۵۵/۴٪) ثبت شده است. از سوی دیگر، کمترین سهم این طبقه در سال‌های ۲۰۲۱ (۳۰/۷٪) و ۲۰۱۸ (۳۳/۱٪) مشاهده شد که در این سال‌ها، سهم طبقات خشکسالی شدید و متوسط افزایش یافته است. طبقه فاقد خشکسالی/رطوبت در تمام طول دوره آماری سهم بسیار ناچیزی از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است و بیشترین مقادیر آن تنها در سال‌های ۲۰۱۱ (۳٪)، ۲۰۰۸ (۲/۹٪) و ۲۰۰۵ (۲/۹٪) به ثبت رسیده است.

پس از آن، سناریوی تجمعی دوماهه (مارس و آوریل) با ضریب $\rho = 0.73$ ($P < 0.01$) و سناریوی تجمعی چهارماهه (ژانویه تا آوریل) با $\rho = 0.70$ ($P < 0.01$) بیشترین تطابق را با تغییرات VHI نشان دادند. همبستگی شاخص VHI با بارش غیرتجمعی و مقطعی ماه آوریل معادل $\rho = 0.62$ ($P < 0.05$) محاسبه گردید. از سوی دیگر، کمترین میزان همبستگی در میان سناریوهای مورد بررسی، مربوط به بارش تجمعی دوماهه فوریه و مارس (بدون احتساب بارش آوریل) بود که ضریب آن $\rho = 0.44$ ($P < 0.05$) به دست آمد.

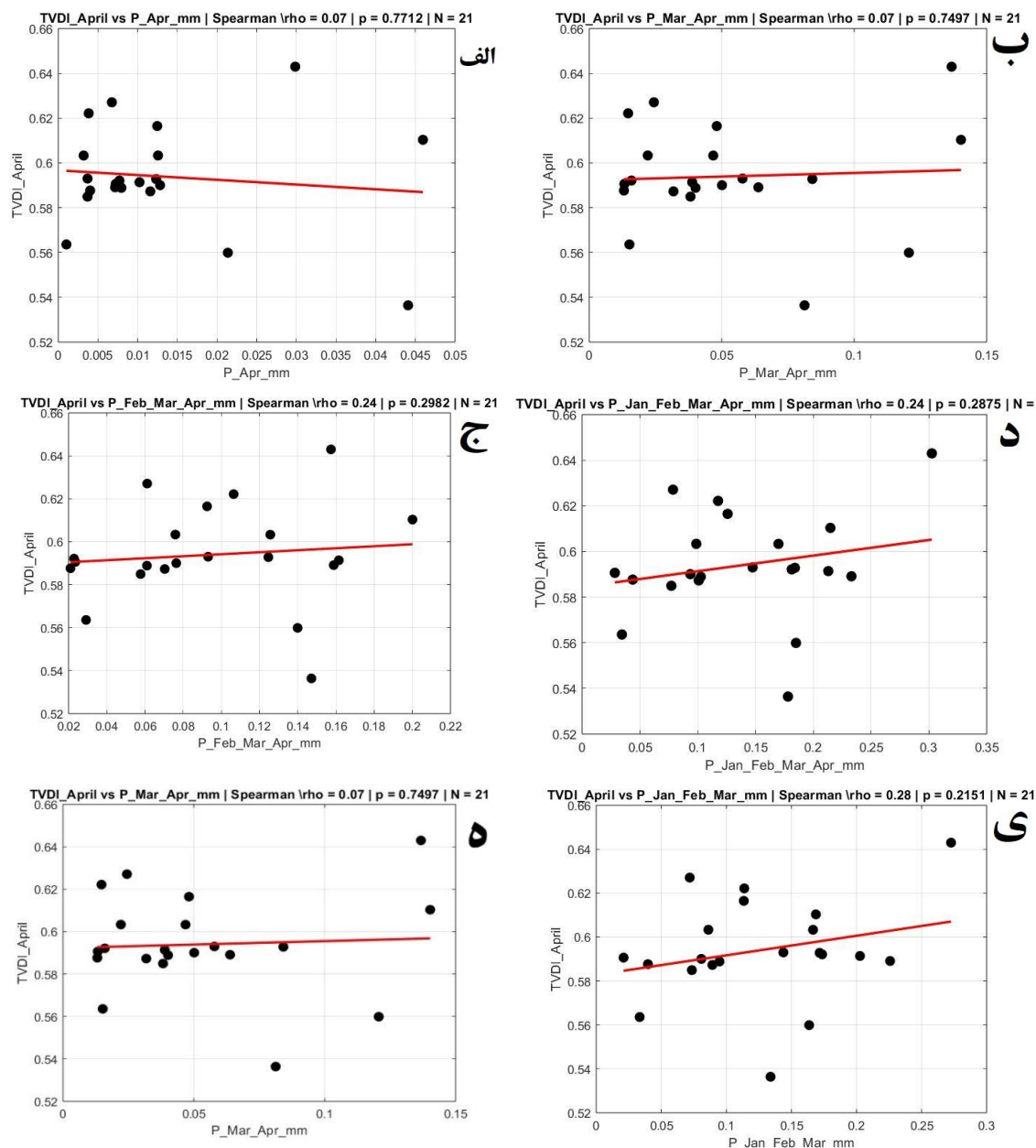
تحلیل شاخص خشکسالی دمای پوشش گیاهی

(TVDI): بررسی توزیع مکانی-زمانی طبقات شاخص TVDI در ماه آوریل طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در حوضه جازموریان (شکل ۷)، حاکی از غلبه مطلق شرایط خشکسالی بسیار شدید در تمامی سال‌های مورد مطالعه است. تحلیل داده‌های مساحت تحت پوشش نشان می‌دهد که حتی در سال‌هایی که سایر شاخص‌ها وضعیت مرطوب‌تری را گزارش کرده‌اند (نظیر سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۹ و ۲۰۲۰)، گستره طبقه خشکسالی بسیار شدید همچنان در سطح بالایی قرار داشته و به ترتیب ۸۶/۱٪، ۸۶/۷٪ و ۸۸/۳٪ از کل مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است. در سال‌های خشک‌تر نظیر ۲۰۰۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸، سهم این طبقه بحرانی به بیش از ۹۴٪ (بالاترین میزان در سال ۲۰۰۳ معادل ۹۴/۴٪) افزایش یافته است. در مقابل، طبقه رطوبت بسیار شدید در تمام طول دوره آماری نوسانات بسیار ناچیزی داشته و بیشترین میزان پوشش آن تنها معادل ۳/۹۸٪ (در سال ۲۰۰۵) و ۳/۹۳٪ (در سال ۲۰۲۰) ثبت شده است.

به‌منظور ارزیابی پاسخ شاخص TVDI به بیلان رطوبتی حوضه، همبستگی میانگین این شاخص در ماه آوریل با مقادیر بارش در شش سناریوی تجمعی و غیرتجمعی محاسبه گردید (شکل ۸). نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد که تمامی همبستگی‌های



شکل ۷- الگوی مکانی-زمانی شدت خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز جازموریان بر اساس شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی (TVDI) در ماه آوریل طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲. نقشه‌ها تغییرات شدت خشکسالی را در پنج طبقه (مرطوب تا بسیار خشک) نمایش می‌دهند و نمودارهای دایره‌ای، درصد مساحت هر طبقه را در همان سال نشان می‌دهند.



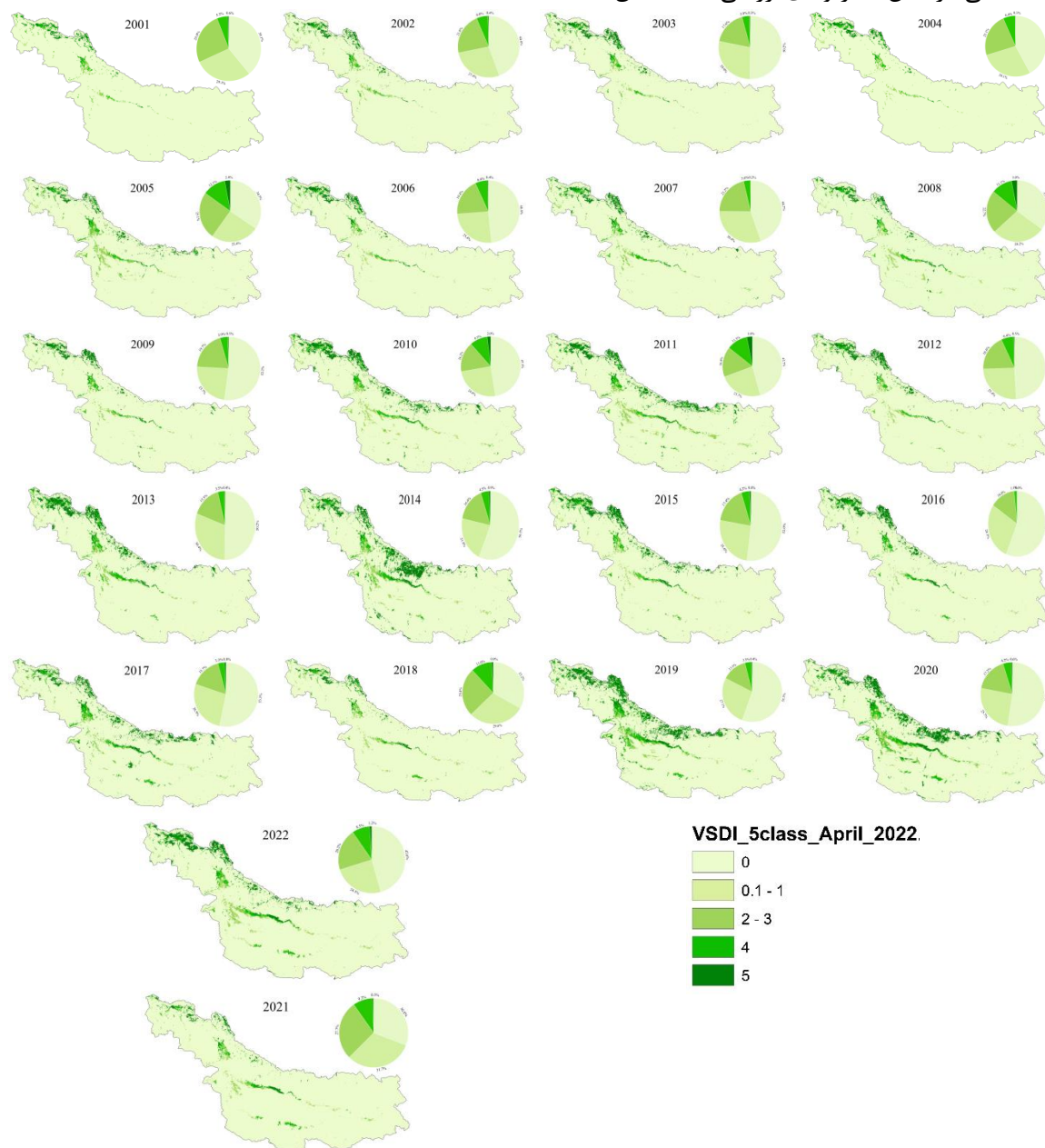
شکل ۸- تحلیل همبستگی شاخص خشکسالی دمای پوشش گیاهی (TVDI) با بارش‌های تجمعی در شش سناریوی زمانی (۲۰۲۱-۲۰۲۲). نتایج نشان‌دهنده همبستگی‌های ضعیف و عدم معناداری آماری است که ماهیت حرارتی و لحظه‌ای این شاخص را در مقابل حافظه رطوبتی تایید می‌کند.

بالاترین میزان همبستگی با اختلاف قابل توجه، مربوط به سناریوی بارش تجمعی دوماهه (مارس و آوریل) است که ضریب همبستگی آن برابر با $\rho = 0.90$ و در سطح بالایی معنادار ($P < 0.01$) به دست آمد. پس از آن، سناریوهای بارش تجمعی چهارماهه (ژانویه تا آوریل) با $\rho = 0.75$ ($P < 0.01$) و سه‌ماهه (فوریه تا آوریل) با $\rho = 0.73$ ($P < 0.01$)

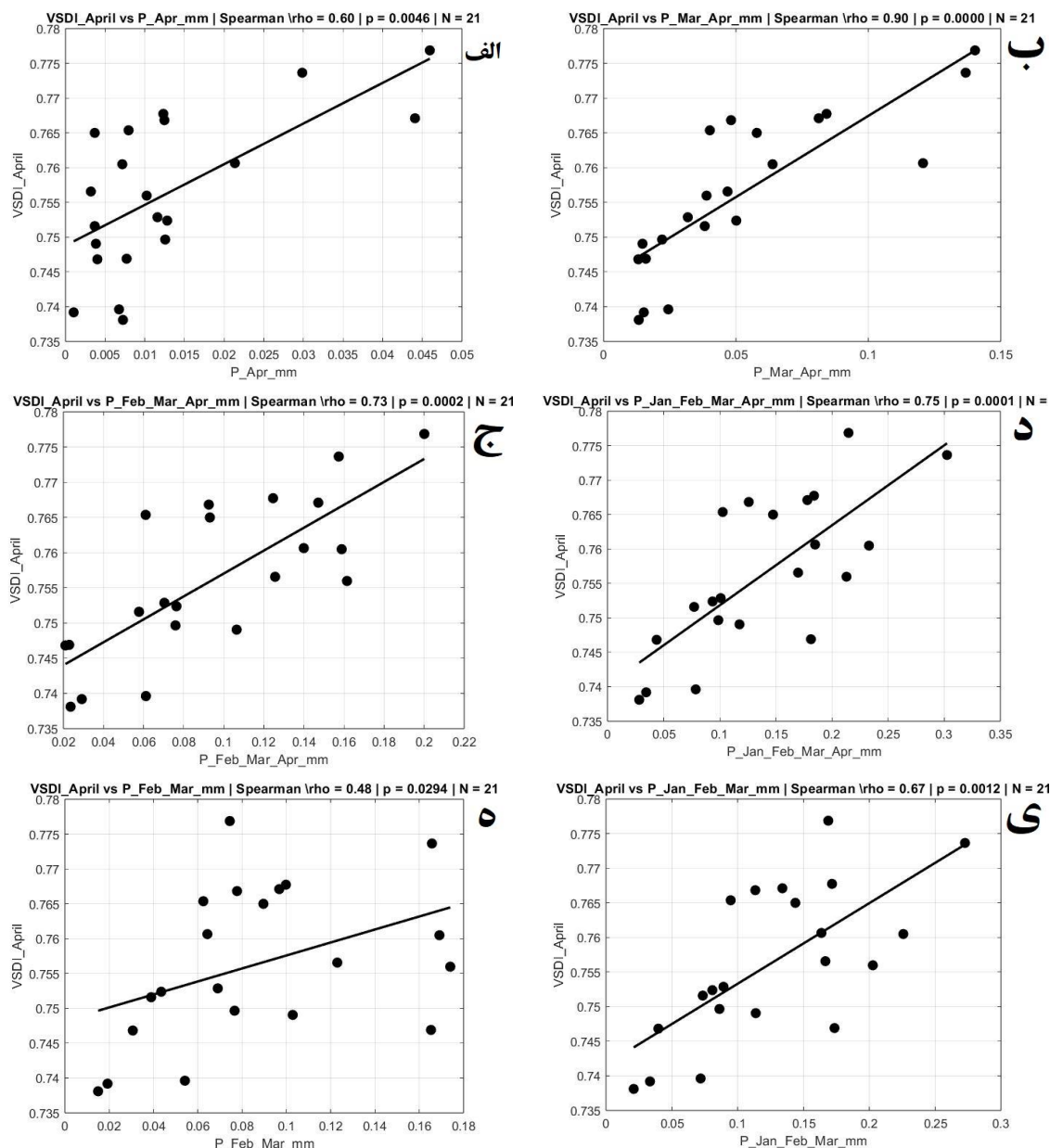
به منظور ارزیابی ارتباط شاخص VSDI با مقادیر بارش، همبستگی اسپیرمن میانگین حوضه‌ای این شاخص در ماه آوریل با شش سناریوی بارش تجمعی و غیرتجمعی محاسبه گردید (شکل ۱۰). نتایج حاکی از آن است که همبستگی این شاخص با تمامی سناریوهای بارشی مثبت و در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است ($P < 0.05$).

بارش تجمعی دوماهه فوریه و مارس با ضریب $\rho = 0.47$ ($P < 0.05$) بود که با وجود کاهش مقدار ضریب، همچنان از نظر آماری معنادار ارزیابی می‌گردد.

در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، همبستگی بارش تجمعی سه‌ماهه ژانویه تا مارس برابر با $\rho = 0.67$ ($P < 0.01$) و بارش غیرتجمعی ماه آوریل برابر با $\rho = 0.60$ ($P < 0.05$) ثبت شد. ضعیف‌ترین همبستگی در میان سناریوهای ارزیابی‌شده، متعلق به



شکل ۹- الگوی مکانی-زمانی شدت خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز جازموریان بر اساس شاخص VSDI در ماه آوریل طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲. نقشه‌ها تغییرات شدت خشکسالی را در پنج طبقه (از بدون خشکسالی تا خشکسالی بسیار شدید) نمایش می‌دهند و نمودارهای دایره‌ای، درصد مساحت هر طبقه را در همان سال نشان می‌دهند.



شکل ۱۰- تحلیل همبستگی شاخص وضعیت خشکسالی ترکیبی (VSDI) با بارش‌های تجمعی در شش سناریوی زمانی (۲۰۲۲-۲۰۱۱). نتایج حاکی از همبستگی فوق‌العاده قوی (بیش از ۹۰٪) با بارش‌های تجمعی مارس-آوریل است که این شاخص را به بهترین ابزار پایش در حوضه جازموریان تبدیل می‌کند.

حساسیت و مبانی فیزیکی این شاخص‌ها در شرایط اقلیمی منحصربه‌فرد منطقه مورد مطالعه نشان داد و به پرسش اصلی پژوهش پاسخی روشن ارائه نمود. یافته کلیدی این مطالعه، عملکرد فوق‌العاده شاخص وضعیت خشکسالی ترکیبی (VSDI) بود که با ضریب همبستگی اسپیرمن $\rho = 0.90$ با بارش تجمعی دوماه مارس و آوریل، ارتباطی بسیار قوی و معنادار

بحث

این پژوهش با هدف ارزیابی تطبیقی و اعتبارسنجی چهار شاخص سنجش از دوری پیشرفته (VSDI, TVDI, VHI, VDI) در پایش خشکسالی کشاورزی حوضه آبریز جازموریان، به تحلیل پاسخ‌دهی آن‌ها به نوسانات بارش در بازه‌های زمانی مختلف پرداخت. نتایج به‌دست‌آمده، تمایز آشکاری در کارایی،

را به ثبت رساند. این همبستگی قدرتمند، که با اختلاف قابل توجهی بالاتر از سایر شاخص‌ها قرار گرفت، VSDI را به عنوان قابل‌اعتمادترین ابزار برای پایش خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز جازموریان معرفی می‌کند. برتری VSDI ریشه در ساختار مفهومی و فیزیکی آن دارد. همان‌گونه که ژانگ و همکاران (۲۰۱۳a) تشریح کرده‌اند، این شاخص با بهره‌گیری از باندهای مادون قرمز موج کوتاه (SWIR)، قرمز (Red) و آبی (Blue)، به‌طور همزمان به رطوبت موجود در پوشش گیاهی و لایه‌های سطحی خاک حساس است. باند SWIR به دلیل حساسیت بالا به محتوای آب، سیگنال رطوبتی کل لندفرم (خاک و گیاه) را منعکس می‌کند، در حالی که باندهای قرمز و آبی به عنوان مبنای تفکیک این سیگنال عمل می‌کنند. این ویژگی در اکوسیستمی مانند جازموریان که بخش وسیعی از آن را اراضی بایر یا با پوشش گیاهی پراکنده تشکیل می‌دهد، یک مزیت تعیین‌کننده است. برخلاف شاخص‌هایی که عمدتاً بر سلامت پوشش گیاهی متمرکز هستند، VSDI قادر است تنش رطوبتی را حتی پیش از بروز علائم آن در گیاه و مستقیماً از طریق کاهش رطوبت خاک آشکار سازد. همبستگی حداکثری آن با بارش دوماهه مارس و آوریل نیز این فرضیه را تقویت می‌کند؛ بارش‌های این دوره مستقیماً ذخیره رطوبتی خاک را در آستانه فصل رشد و در حساس‌ترین زمان، تأمین می‌کنند و VSDI با دقت بالایی این بیلان آبی کوتاه‌مدت اما حیاتی را رصد می‌نماید. این یافته با نتایج ژانگ و همکاران (۲۰۱۳b) که VSDI را به عنوان یک شاخص قوی و غیرحساس به اثرات پوشش ابر معرفی کردند، همخوانی دارد و کارایی آن را در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیش از پیش تأیید می‌کند.

در بررسی سایر شاخص‌ها، VDI و VHI نیز همبستگی‌های قوی و معناداری با بارش‌های تجمعی نشان دادند، اما اوج حساسیت آن‌ها در بازه‌های زمانی طولانی‌تر (سه‌ماهه و چهارماهه) مشاهده شد. شاخص VDI با ضریب $p = 0.81$ در برابر بارش تجمعی ژانویه تا آوریل و VHI با ضریب $p = 0.79$ در برابر

بارش فوریه تا آوریل، عملکرد مطلوبی از خود به نمایش گذاشتند. این تأخیر زمانی در پاسخ‌دهی، کاملاً منطبق بر مبانی نظری این دو شاخص است. هر دو شاخص به‌شدت به وضعیت سلامت پوشش گیاهی وابسته‌اند و تغییرات فیزیولوژیک گیاه در پاسخ به تنش یا بهبود رطوبتی، یک فرآیند تدریجی و تجمعی است. به عبارت دیگر، این شاخص‌ها حافظه بلندمدت اکوسیستم را در واکنش به بیلان آبی ماه‌های گذشته منعکس می‌کنند. با این حال، مقایسه این دو نشان می‌دهد که VDI اندکی بر VHI برتری دارد. این برتری را می‌توان به دو عامل نسبت داد: نخست، استفاده VDI از شاخص NDWI به جای NDVI. همان‌طور که گو و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند، NDWI به دلیل استفاده از باندهای مادون قرمز، حساسیت سریع‌تر و دقیق‌تری به محتوای آب درون برگ‌ها دارد. دوم، VDI از تفاوت دمای روز و شب بهره می‌برد که به گفته سان و همکاران (۲۰۱۳)، همبستگی پایدارتر و منفی‌تری با رطوبت خاک برقرار می‌کند. یافته‌های این پژوهش، ادعای سان و همکاران (۲۰۱۳) مبنی بر اینکه VDI شکل ارتقایافته VHI با عدم قطعیت کمتر است را در شرایط حوضه جازموریان تأیید می‌کند. با این وجود، عملکرد هر دو شاخص در مقایسه با VSDI ضعیف‌تر بود که این امر محدودیت اتکای صرف به سیگنال‌های گیاهی در مناطق با پوشش گیاهی ناهمگون و پراکنده را آشکار می‌سازد؛ یافته‌ای که با مشاهدات اکبری‌زیرانی (۱۴۰۱) مبنی بر ناکارآمدی شاخص‌های صرفاً گیاهی در این حوضه همسو است.

در نقطه مقابل سه شاخص دیگر، شاخص TVDI هیچ‌گونه همبستگی معناداری با هیچ‌یک از سناریوهای بارشی نشان نداد ($P < 0.05$). تحلیل زمانی-مکانی این شاخص نیز نشان داد که در تقریباً تمام سال‌های دوره آماری، صرف‌نظر از مرطوب یا خشک بودن سال، بیش از ۸۶ درصد از مساحت حوضه در طبقه خشکسالی بسیار شدید طبقه‌بندی شده است. این ناکارآمدی مطلق، ریشه در ماهیت فیزیکی و لحظه‌ای این شاخص دارد. TVDI که بر

دلیل ماهیت آنی و تأثیرپذیری شدید از دمای بالای محیط در مناطق بیابانی، برای پایش روند تجمعی خشکسالی کشاورزی در این منطقه ناکارآمد ارزیابی شدند.

این پژوهش با پر کردن خلأ مطالعاتی موجود در زمینه مقایسه همزمان شاخص‌های پیشرفته نوری-حرارتی در جنوب شرق ایران و استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای (*TRMM*) برای اعتبارسنجی تاخیری، راهکاری عملی برای استقرار یک سامانه پایش خشکسالی کارآمد ارائه می‌دهد. با این وجود، این مطالعه با محدودیت‌هایی نیز همراه بوده است؛ از جمله تمرکز مقطعی بر ماه آوریل و اتکای صرف به داده‌های بارش ماهواره‌ای به دلیل کمبود ایستگاه‌های زمینی متراکم و داده‌های میدانی رطوبت خاک در این حوضه وسیع. این محدودیت داده‌های زمینی، چالش‌هایی را برای اعتبارسنجی گسترده نتایج با روش‌های کلاسیک و استاندارد هواشناسی (نظیر شاخص‌های *SPI* یا *SPEI* ایستگاهی) ایجاد کرده است. اگرچه انتخاب ماه آوریل با منطق فنولوژیکی منطقه توجیه می‌شود، اما فقدان داده‌های پیوسته میدانی، امکان کالیبراسیون مطلق شاخص‌ها را محدود می‌سازد. در چشم‌انداز مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود در صورت دسترسی به آمار هواشناسی دقیق‌تر، نتایج با روش‌های سنتی ایستگاهی تطبیق داده شده و کارایی این شاخص‌ها در سایر فصول سال نیز ارزیابی گردد و نتایج با داده‌های میدانی رطوبت خاک و عملکرد محصول اعتبارسنجی شود. همچنین، تلفیق این شاخص‌های سنجش از دوری با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری عمیق و هوش مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت خشکسالی کشاورزی، می‌تواند گام مهمی در ارتقای سامانه‌های هشدار سریع در حوضه جازموریان باشد. در نهایت، بر اساس یافته‌های این مطالعه، مؤکداً به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب منطقه پیشنهاد می‌شود که برای توسعه سامانه‌های عملیاتی پایش، شاخص *VSDI* را به‌عنوان هسته اصلی و شاخص *VDI* را به‌عنوان ابزار مکمل در دستور کار قرار دهند.

اساس فضای مثلثی دما-گیاه و تعریف لبه خشک و لبه تر عمل می‌کند، یک تصویر آنی از وضعیت تبخیر و تعرق و تنش حرارتی سطح زمین در لحظه تصویربرداری ارائه می‌دهد. این شاخص برای برآورد رطوبت سطحی خاک در یک بازه زمانی کوتاه بسیار کارآمد است، اما برای پایش پدیده تجمعی و خزنده‌ای مانند خشکسالی کشاورزی که ماحصل کمبود بارش طی هفته‌ها و ماه‌هاست، ابزار مناسبی محسوب نمی‌شود. در اقلیم بیابانی جازموریان، شدت تابش خورشیدی و دمای بالای هوا در ماه آوریل باعث می‌شود که سطح زمین در اکثر مواقع به لبه خشک نزدیک باشد، حتی اگر در لایه‌های عمیق‌تر خاک رطوبت کافی ناشی از بارش‌های زمستانه وجود داشته باشد. در نتیجه، *TVDI* قادر به تفکیک اثرات حافظه رطوبتی نبوده و سیگنال آن تحت سلطه شرایط حرارتی آنی قرار می‌گیرد که این امر منجر به اشباع شدن شاخص در طبقه بسیار شدید و عدم کارایی کامل آن برای اهداف این پژوهش شده است.

نتیجه‌گیری

ارزیابی تطبیقی انجام شده در این پژوهش به‌روشنی نشان داد که در شرایط اقلیمی شکننده و با پوشش گیاهی ناهمگون حوضه آبریز جازموریان، شاخص‌های سنجش از دور واکنش‌های کاملاً متفاوتی به نوسانات رطوبتی نشان می‌دهند. یافته کلیدی این مطالعه اثبات برتری مطلق شاخص وضعیت خشکسالی ترکیبی (*VSDI*) بود. این شاخص به دلیل حساسیت همزمان به رطوبت خاک و پوشش گیاهی و همچنین پاسخ‌دهی سریع و بسیار قوی (با ضریب همبستگی فراتر از ۰/۹۰) به بارش‌های حیاتی پیش از فصل رشد (مارس و آوریل)، کارآمدترین و دقیق‌ترین ابزار برای پایش خشکسالی کشاورزی در این اکوسیستم خشک ارزیابی گردید. پس از آن، شاخص *VDI* به دلیل انعکاس حافظه رطوبتی بلندمدت‌تر، به‌عنوان یک ابزار قابل‌اتکا برای ارزیابی اثرات تجمعی خشکسالی بر سلامت پوشش گیاهی در رتبه دوم قرار گرفت. در مقابل، شاخص‌های حرارتی لحظه‌ای نظیر *TVDI* به

می‌شود کارایی این شاخص‌ها در سایر فصول سال نیز ارزیابی شده و نتایج با داده‌های میدانی رطوبت خاک و عملکرد محصول اعتبارسنجی گردد. همچنین، تلفیق این شاخص‌های سنجش از دوری با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری عمیق و هوش مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت خشکسالی کشاورزی، می‌تواند گام مهمی در ارتقای سامانه‌های هشدار سریع در حوضه جازموریان باشد. در نهایت، بر اساس یافته‌های این مطالعه، مؤکداً به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب منطقه پیشنهاد می‌شود که برای توسعه سامانه‌های عملیاتی پایش، شاخص *VSDI* را به‌عنوان هسته اصلی و شاخص *VDI* را به‌عنوان ابزار مکمل در دستور کار قرار دهند.

این پژوهش با پر کردن خلأ مطالعاتی موجود در زمینه مقایسه همزمان شاخص‌های پیشرفته نوری-حرارتی در جنوب شرق ایران و استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای (TRMM) برای اعتبارسنجی تاخیری، راهکاری عملی برای استقرار یک سامانه پایش خشکسالی کارآمد ارائه می‌دهد. با این وجود، این مطالعه با محدودیت‌هایی نیز همراه بوده است؛ از جمله تمرکز مقطعی بر ماه آوریل و اتکای صرف به داده‌های بارش ماهواره‌ای به دلیل کمبود ایستگاه‌های زمینی متراکم و داده‌های میدانی رطوبت خاک در این حوضه وسیع. اگرچه انتخاب ماه آوریل با منطق فنولوژیکی منطقه توجیه می‌شود، اما فقدان داده‌های پیوسته میدانی، امکان کالیبراسیون مطلق شاخص‌ها را محدود می‌سازد. در چشم‌انداز مطالعات آتی، پیشنهاد

منابع

۱. اسکندری دامنه، هادی، حامد اسکندری دامنه، حسن خسروی و حمید غلامی (۱۳۹۸). تحلیل و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI (مطالعه موردی: حوضه غرب تالاب جازموریان). مرتع، ۱۳(۳): ۴۷۵-۴۶۱.
۲. اکبری ازیرانی، طیبه (۱۴۰۱). آشکارسازی و تحلیل روند خشکسالی حوضه آبریز جازموریان در ارتباط با شاخص‌های جوی-اقیانوسی. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱): ۱-۱۶.
۳. سلیمانی ساردو، مجتبی و مهدی زارعی (۱۳۹۸). پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مقایسه با شاخص هواشناسی SPI در دوره‌های کوتاه مدت (مطالعه موردی: حوزه آبخیز جازموریان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۰(۲۰): ۲۶۱-۲۵۰.
۴. لطفی نسب اصل، سکینه، محمد خسروشاهی، زهرا سعیدی فرو و فاطمه درگاهیان (۱۳۹۷الف). تحلیل روند تغییرات بارندگی و ارزیابی خشکسالی‌های حوضه آبخیز جازموریان با استفاده از روش‌های روندیابی و شاخص‌های بهینه. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۵(۴): ۹۴۳-۹۲۳.
۵. لطفی نسب اصل، سکینه، آزاده گوهردوست و محمد خسروشاهی (۱۳۹۷ب). ارزیابی و کاربرد زمین آمار در شناسایی و تحلیل ویژگی‌های خشکسالی حوضه جازموریان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۹(۱۸): ۲۵-۱۲.
6. Almendra-Martín L., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Benito-Verdugo P., & Herrero-Jiménez C.M. (2021). Agricultural Drought Trends on the Iberian Peninsula: An Analysis Using Modeled and Reanalysis Soil Moisture Products. Atmosphere. 12(2):236. <https://doi.org/10.3390/atmos12020236>
7. Cao, Y., Chen, S., Wang, L., Zhu, B., Lu, T., Yu, Y. (2019). An Agricultural Drought Index for Assessing Droughts Using a Water Balance Method: A Case Study in Jilin Province, Northeast China. Remote Sens., 11, 1066. <https://doi.org/10.3390/rs11091066>
8. Gao, B. C. (1996). NDWI—a Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

9. Ghaleb, F., Mario, M., & Sandra, A. (2015). Regional Landsat-Based Drought Monitoring from 1982 to 2014. *Climate*, 3(3), 563–577. Retrieved from <http://doi.org/10.3390/cli3030563>
10. Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06407. <http://doi.org/10.1029/2006GL029127>
11. Kogan, F.N. (1995a). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 76(5), pp 655–668. DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2.
12. Kogan, F. N. (1995b). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), pp 91–100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
13. LP DAAC. (2024a). *MOD13C2 Version 6: MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>
14. LP DAAC. (2024b). *MOD11C3 Version 6: MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/>
15. LP DAAC. (2024c). *MOD09A1 Version 6: MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09a1v006/>
16. Palmer, W. C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 21(4), pp 156–161. <https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>.
17. Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213–224. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
18. Singh, R. P., Roy, S., & Kogan, F. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22), 4393–4402. <http://doi.org/10.1080/0143116031000084323>
19. Sun, H., Zhao, X., Chen, Y., Gong, A., & Yang, J. (2013). A new agricultural drought monitoring index combining MODIS NDWI and daynight land surface temperatures: a case study in China. *International Journal of Remote Sensing*, 34(24), 8986–9001. <http://doi.org/10.1080/01431161.2013.860659>
20. TRMM. (2011). *TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree × 0.25 degree (TRMM_3B43 v7)*. NASA GES DISC. https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B43_7/summary
21. Wang, Qi, S., Niu, Z., & Wang, J. (2004). Evaluating soil moisture status in China using the temperaturevegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5), 671–679. Retrieved from <http://doi.org/10.5589/m04-029>
22. Yan, Wu, B., Boken, V. K., Chang, S., & Yang, L. (2016). A drought monitoring operational system for China using satellite data: design and evaluation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 264–277. Retrieved from <http://doi.org/10.1080/19475705.2014.895964>
23. Zhang, Hong, Y., Qin, Q., & Liu, L. (2013a). VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), 4585–4609. <http://doi.org/10.1080/01431161.2013.779046>

24. Zhang, Hong, Y., Qin, Q., & Zhu, L. (2013b). Evaluation of the visible and shortwave infrared drought index in China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 4(2), 68–76. <http://doi.org/10.1007/s13753-013-0008-8>
25. Zhang, Y., Wu, Z., Singh, V .P., Lin, Q., Ning, S., Zhou, Y., Jin, J., Zhou, R., & Ma, Q., (2023). Agricultural drought characteristics in a typical plain region considering irrigation, crop growth, and water demand impacts. *Agricultural Water Management*, 282(C): 108266.