Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.14, Issue 43, March 2025

Performance evaluation of composite remote sensing indices in drought assessment (case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran)

Elham Babaei[1], Mohammad Amin Asadi[2*], Seyed Zeinolabedin Hosseini[3], Salah Shahmoradi[4]

1. M.A of Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran.
2. *Corresponding Author*, Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran
3. Associate professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran
4. M.A of RS & GIS, Geography group, Yazd University, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 13 September 2024
Revised: 14 November 2024
Accepted: 04 December 2024

Keywords:
Drought, Chaharmahal and Bakhtiari, Remote sensing composite drought indices, MODIS, CDI.

ABSTRACT

Drought is a significant natural disaster that requires monitoring to control and minimize its damages. In addition to climate-based drought indices, remote sensing drought monitoring indices are widely used today, especially in regions with limited climate data. These indices utilize satellite images and provide valuable information, resulting in relatively good performance. Furthermore, composite drought indicators are relatively new and multi-variable indices that combine remote sensing indicators for monitoring drought. Studies have shown that the effectiveness of these indicators can also be influenced by the study region. Given the importance of evaluating the performance of new methods in monitoring drought, this study compared the performance of a composite drought monitoring index, CDI, with the VCI, TCI, VHI, and PCI in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. CDI is a combination of VCI, TCI, and PCI. The values of the indices were compared with the SPI for the period of 2001-2020, with a time lag of 0 to 8 months by calculating the determination coefficient. For each index, the lag time that provided the highest R2 was identified. Precipitation data from 19 rain gauge stations in the study area were used to calculate the SPI on 3 and 6-month time scales. The results showed that the CDI presents by far the highest correlation with SPI values. The coefficient of determination for the VCI on a 6-month time scale with a 3-month time lag was on average 0.30. For the TCI, the average R2 is 0.50 in both the 3 and 6-month time scales without a time lag. The average R2 for the VHI on a 6-month time scale with a 2-month time lag was 0.41. The average coefficient of determination for the PCI index on a 3-month time scale without a time lag was just 0.32. The CDI index provided the best performance, with an average R2 of 0.73 in both the 3 and 6-month time scales without a time lag. While VCI, TCI, and PCI individually showed weak matching with the SPI, combining them into the CDI resulted in a significant correlation with the SPI.

Cite this article: Babaei, E., Asadi Zarch, M. A., Hosseini, S. Z., & Shahmoradi, S. (2025). Performance evaluation of composite remote sensing indices in drought assessment (case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). Journal of Natural Environmental Hazards, 14(43), 155-180. DOI: 10.22111/jneh.2024.49797.2067

© Mohammad Amin Asadi
Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2024.49797.2067

* Corresponding Author Email: amin.asadi@yazd.ac.ir

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir
مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۳، پیاپی ۱، بهار ۱۴۰۴

بررسی عملکرد ترکیبی شاخص‌های سنجش از دوری در برآورد خشکسالی (منطقه مورد مطالعه: استان چهارمحال و بختیاری)

الهام بابائی[۱]، محمدامین اسدی[۲*]، سید زین العابدین حسینی[۳]، صلاح شاهمرادی[۴]

۱. کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
۲. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد (نویسنده مسئول)
۳. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
۴. کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه یزد

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

واژه‌های کلیدی:
خشکسالی، چهارمحال و بختیاری، شاخص‌های ترکیبی سنجش از دوری خشکسالی ، سنجنده مودیس.

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که برآورد و پایش صحیح آن تاثیر زیادی بر مدیریت و کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده دارد. امروزه علاوه بر شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر داده‌های اقلیمی، شاخص‌های سنجش‌ازدوری خشکسالی نیز به‌طور گسترده به‌خصوص در مناطقی که با کمبود داده‌های اقلیمی مواجه هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به دسترسی مناسب به تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات قابل‌توجه ارائه‌شده توسط این تصاویر، این شاخص‌ها عملکرد نسبتا مناسبی را ارائه می‌دهند. همچنین، شاخص‌های ترکیبی سنجش‌ازدوری شاخص‌های نسبتا جدید و چندمتغیره‌ای هستند که برای پایش خشکسالی، تلفیقی از شاخص‌های سنجش‌ازدوری را در نظر می‌گیرند. مطالعات نشان داده است اثربخشی این شاخص‌ها می‌تواند تحت تاثیر منطقه مورد مطالعه نیز قرار گیرد. با توجه به اهمیت ارزیابی کارآیی روش‌های نوین در پایش خشکسالی، عملکرد شاخص ترکیبی سنجش‌ازدور CDI با شاخص‌های سنجش‌ازدوری VCI، TCI، VHI و PCI در استان چهارمحال و بختیاری مقایسه گردید. شاخص CDI ترکیبی از شاخص‌های VCI، TCI و PCI می‌باشد. بدین منظور مقادیر شاخص‌های یادشده با مقادیر شاخص خشکسالی اقلیمی SPI در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۱ و با درنظرگرفتن تاخیر زمانی ۰ تا ۸ ماه از طریق محاسبه ضریب تعیین مقایسه شدند. برای هر شاخص تاخیر زمانی که بالاترین ضریب تعیین را ارائه نمود، مشخص شد. برای محاسبه SPI، از داده‌های بارش ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی منطقه مطالعه در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه استفاده شد. نتایج نشان داد شاخص ترکیبی CDI با اختلاف قابل‌توجه بیشترین تطابق را با مقادیر SPI ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج، بالاترین ضریب تعیین برای شاخص VCI در مقیاس زمانی شش ماهه با تاخیر زمانی ۳ ماه به‌طور میانگین برابر ۰،۳۰ می‌باشد. برای شاخص TCI، مقدار R2 میانگین برابر ۰،۵۰ در هر دو مقیاس سه و شش ماهه و بدون تاخیر زمانی می‌باشد. R2 میانگین برای شاخص VHI در مقیاس شش ماهه با تاخیر دو ماه برابر ۰،۴۱ محاسبه شد. ضریب تعیین میانگین برای PCI در مقیاس سه ماهه و بدون تاخیر زمانی برابر ۰،۳۲ به دست آمد. در نهایت شاخص CDI عملکرد بسیار بهتری را ارائه کرد. مقادیر R2 میانگین در هر دو مقیاس زمانی سه و شش ماهه و بدون تاخیر زمانی برابر ۰،۸۳ به‌دست آمد. بنابراین، درحالی‌که هر یک از سه شاخص VCI، TCI و PCI به‌صورت مجزا تطابق نسبتا ضعیفی را با SPI ارائه کردند، تلفیق آنها در قالب شاخص CDI تطابق قابل‌توجهی را با SPI ارائه کرد.

استناد: بابایی, الهام, اسدی, محمد امین, حسینی, سید زین العابدین, شاهمرادی, صلاح. (۱۴۰۴). بررسی عملکرد شاخص های سنجش از دوری ترکیبی در برآورد خشکسالی (منطقه مورد مطالعه: استان چهارمحال و بختیاری). مخاطرات محیط طبیعی ، ۱۴(۴۳)، ۱۵۵-۱۸۰.
DOI: 10.22111/jneh.2024.49797.2067

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان
© الهام بابائی، محمدامین اسدی*، سید زین العابدین حسینی، صلاح شاهمرادی.

*- محمدامین اسدی (نویسنده مسئول)
Email: amin.asadi@yazd.ac.ir

مقدمه

زندگی بشر در طول تاریخ و در سراسر دنیا همواره در معرض انواع مخاطرات طبیعی قرار داشته است که بخشی از این خطرات و حوادث ناشی از فرآیندهای آب و هوایی است و در این میان خشکسالی از اهمیت و گستردگی قابل-ملاحظه‌ای برخوردار است (اوریمولوی[1] و همکاران، ۲۰۲۲). خشکسالی وضعیتی عادی و مستمر از اقلیم است که معمولاً در کل مناطق اقلیمی از مرطوب تا خشک اتفاق می‌افتد (آلت[2]، ۲۰۲۰)؛ ولی ویژگی‌های آن از یک ناحیه یا اکوسیستم به ناحیه یا اکوسیستم دیگر کاملاً متفاوت است. پیامدها و فراوانی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه-خشک بیشتر آشکار می‌شود (ترابی حقیقی[3] و همکاران، ۲۰۲۰). خشکسالی به‌عنوان کاهش آب در دسترس نسبت به میانگین بلندمدت درنظر گرفته می‌شود. وقوع خشکسالی باعث کاهش رطوبت خاک، کاهش جریانات آب سطحی و زیر قشری و درنتیجه تضعیف دریاچه‌ها و مخازن، کاهش تغذیه و منابع آب زیرزمینی می‌شود (پروازه[4] و همکاران، ۲۰۲۱). اثرات مستقیم خشکسالی بیشتر به مشخصه‌های اقلیمی و اکولوژیکی ارتباط دارند، درحالی‌که، اثرات غیرمستقیم خشکسالی که پهناورتر و نامحسوس‌تر هستند، به آسیب‌های اجتماعی و اقتصادی آن ارتباط دارند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸). خشکسالی یک پدیده آرام و خزشی است و بر عکس سیل که زمان آغاز و پایان و همچنین گستره جغرافیایی وقوع آن کاملا مشخص است، توصیف زمانی و مکانی بسیار دشواری دارد.

مابین وقوع خشکسالی‌های پیاپی و پدیده تغییر اقلیم رابطه تنگاتنگی وجود دارد. بنابراین، درک اثرات تغییر اقلیم بر وقوع خشکسالی برای مدیریت جامع منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است (اسدی زارچ[5]، ۲۰۲۲). تغییر اقلیم باعث تغییر در میزان انرژی و تبادل آن در سیستم اقلیم می‌شود. به همین علت بر روی چرخه هیدرولوژی تاثیر شدیدی می‌گذارد. گرم شدن و افزایش دمای کره زمین موجب افزایش تبخیر و زیاد شدن تراکم بخار آب در جو می-شود. درنتیجه مقدار و الگوهای زمانی - مکانی بارش اعم از برف و باران تغییر می‌کند (ماینا و کومار[6]، ۲۰۲۳). براساس پژوهش‌های انجام‌شده، افزایش میزان دما به‌طور بالقوه توانایی تغییر در چرخه آب را داراست و درنتیجه ناهنجاری‌های هیدرواقلیمی همچون خشکسالی را شدت می‌بخشد (پراتاپ و مارکونیس[7]، ۲۰۲۲). یا به‌عبارتی، وقوع خشکسالی بر اثر کاهش در مقدار بارش یا افزایش تبخیر و تعرق اتفاق می‌افتد (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۹). در مجموع طبق گزارش IPCC، دیدگاه‌های مختلف پیش‌بینی تغییر اقلیم در آینده، نگرانی‌های زیادی را درخصوص اثر افزایش گرمایش زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای بر منابع آب کشورهای خشک و نیمه‌خشک مطرح نموده است. این دیدگاه‌ها نشانگر خشک‌تر شدن وضعیت اقلیمی خاورمیانه ازجمله ایران است. بر این اساس انتظار می‌رود که در سال ۲۰۵۰، ایران با کاهش ۲۰ الی ۲۵ درصدی بارش مواجه گردد (کرمی، ۱۳۹۵).

تخمین خشکسالی به‌عنوان یکی از استراتژی‌های مقابله با این پدیده طبیعی و کم کردن ردپاهای مخرب آن امری است که در دهه‌های اخیر توجه کارشناسان هواشناسی و کشاورزی را به خود جلب کرده است و تلاش‌های مختلفی برای ارزیابی و پیش‌بینی این پدیده توسط سازمان‌های مرتبط صورت گرفته است. برای بررسی کمی و کیفی پدیده

1 Orimoloye
2 Ault
3 Torabi Haghighi
4 Parvaze
5 Asadi Zarch
6 Maina & Kumar
7 Pratap & Markonis

خشکسالی از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود. هیچ کدام از شاخص‌ها به‌طور ماهیتی برتر از بقیه نیستند، بلکه هر کدام برای راهبرد مخصوص خود می‌تواند مناسب‌تر از دیگر شاخص‌ها باشد. یک شاخص خشکسالی زمانی کارا است که قادر باشد پایش کمی، ساده و روشنی از ویژگی‌های اصلی خشکسالی یعنی تداوم، شدت، فراوانی و سطح درگیر با خشکسالی را آشکار سازد (ژانگ[1] و همکاران، ۲۰۲۴).

در دهه‌های قبل کاوش‌های گوناگونی برای وصف کردن پدیده خشکسالی و متوجه شدن الگوی بارندگی فصول خشک در زمان و مکان برای روبرو شدن با وضعیت خشکسالی به کمک شاخص‌های خشکسالی انجام گردیده است. به‌طورکلی پیش‌تر برای ارزیابی کمی و کیفی پدیده خشکسالی، از شاخص‌های اقلیمی خشکسالی متفاوتی استفاده می‌شد که می‌توان به شاخص دهک‌های بارندگی (DPI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص درصد نرمال بارش (PNPI)، شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI)، شاخص بارش موثر (SPI)، شاخص رطوبت زراعی (CMI)، شاخص خشکسالی احیایی (RDI) و شاخص ناهنجاری‌های بارندگی (RAI) اشاره کرد که به کمک داده‌های آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی ایستگاه‌های زمینی محاسبه می‌شوند و هر کدام به متغییرها و تغییرات آب‌وهوایی حساسیت‌های مختلفی دارند. اما این شاخص‌ها به دلیل کمبود داده‌های ایستگاه‌های زمینی اغلب با محدودیت مواجه هستند و توانایی آن‌ها در پایش و ارزیابی نزدیک به زمان واقعی این پدیده کم است (آلاهکون و ادیریسینگه[2]، ۲۰۲۲).

برخی از شاخص‌های خشکسالی تک‌متغیره هستند، مانند SPI که فقط بر اساس بارش می‌باشد. درحالی‌که برخی دیگر دومتغیره هستند، مانند شاخص تبخیر و تعرق استانداردشده بارش (SPEI) که بر اساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشد. همچنین شاخص‌های خشکسالی چندمتغیره نیز مانند شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) وجود دارد (غزاله[3] و همکاران، ۲۰۲۱). شاخص‌های منفرد (تک‌متغیره) برای نقاط خاص و هدف و کاربردی معین، تا میزان زیادی بهتر هستند؛ اما نمایش جامعی از خصوصیت‌های خشکسالی به‌عنوان یک پدیده پیچیده هواشناسی نمایان نمی‌کنند. به همین دلیل تلاش‌هایی برای پیشرفت شاخص‌های چندمتغیره بر پایه ترکیب شاخص‌های گوناگون خشکسالی یا معرف‌های گوناگون خشکسالی جهت ارائه نمایشی جامع از وضعیت و خصوصیت‌های خشکسالی، از سال‌های قبل شروع شده و در حال حاضر نیز ادامه دارد.

تشخیص شروع و شدت خشکسالی در بیشتر مناطق جهان به دلیل تعداد ناکافی ایستگاه‌های هواشناسی برای محققان یک معضل می‌باشد. بااین‌حال، داده‌های سنجش‌ازدوری مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با ارائه یک روش سریع و اقتصادی برای ارائه داده‌های مورد نیاز، تا حدی مشکل را حل کرده است (غزاله و همکاران، ۲۰۲۱). در دهه‌های اخیر فناوری سنجش‌ازدور به دلیل جمع‌آوری داده‌های مکانی در مقیاس بزرگ و به روز بودن و بهره جستن از فن‌های طیفی، به‌طور گسترده در پژوهش‌های پایش خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص‌های VCI، TCI، PCI و NDVI به‌عنوان شاخص‌های اولیه سنجش‌ازدوری معرفی شدند که بر اساس پاسخ طیفی متفاوت عوارض سطح زمین عمل می‌کنند. در سال‌های اخیر محققین با تلاش زیاد سعی کردند تا با ترکیب مولفه‌های مختلف مانند بارش،

1 Zhang
2 Alahacoon & Edirisinghe
3 Ghazala

دمای سطح زمین، سلامت پوشش گیاهی و نظیر آن، شاخص‌های سنجش‌ازدوری را ارتقا داده و شاخص‌های ترکیبی سنجش‌ازدوری با عملکرد بهتر نسبت به یک شاخص منفرد را ارائه دهند. توسعه شاخص‌های ترکیبی خشکسالی در دو مرحله اصلی انجام می‌گیرد:

۱) تعیین متغیرها یا شاخص‌های ورودی (سنجش‌ازدوری، اقلیمی، هیدرولوژیکی و ...) جهت ترکیب و ایجاد شاخص تلفیقی جدید،

۲) وزن‌دهی هر یک از متغیرها یا شاخص‌های ورودی انتخاب‌شده بر اساس اهمیت هر یک به نحوی که مجموع اوزان اختصاص یافته برابر با یک باشد.

شاخص‌های تلفیقی خشکسالی به‌طور جامع همه اشکال فیزیکی خشکسالی را از طریق انتخاب متغیرهای مرتبط به هر نوع خشکسالی شامل می‌شود. بااین‌حال، اثربخشی این شاخص‌ها با توجه به پایش خشکسالی وابسته به منطقه است و بسیاری از این شاخص‌ها ممکن است برای درک نقش تک متغیرها در شکل‌گیری خشکسالی کافی نباشند (لیو[1] و همکاران، ۲۰۲۰). شاخص CDI ازجمله این شاخص‌های ترکیبی خشکسالی چندمتغیره می‌باشد (خدائی و همکاران، ۱۳۹۴). شاخص CDI مورد استفاده در این مطالعه بر اساس سه مجموعه داده است که توسط سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) توسعه یافته است (بایسا[2] و همکاران، ۲۰۱۹؛ بالینت[3] و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش برای محاسبه CDI از داده‌های بارش، NDVI و دمای سطح زمین استفاده می‌شود.

نظری‌پور (۱۳۹۴) به توسعه یک شاخص ترکیبی چندمتغیره بر پایه تحلیل مؤلفه مبنا برای ارزیابی خشکسالی‌های آب – هواشناختی در حوضه سد پیشین در جنوب شرق ایران پرداخت. نتایج نشان داد شاخص ترکیبی خشکسالی تعریف‌شده یک رویکرد عینی و واضح برای توصیف شدت خشکسالی‌های تلفیقی فراهم می‌کند و به خوبی قادر به نمایش گذاشتن رفتار خشکسالی‌های آب – هواشناختی محدوده مورد مطالعه می‌باشد. زارع بیدکی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تلفیق داده‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور، خشکسالی در دشت یزد - اردکان را پهنه‌بندی کردند. شاخص SPI با استفاده از مقادیر بارش، شاخص SAVI با استفاده از تصاویر لندست و شاخص تلفیقی IDI با استفاده از دما، بارش و شاخص SAVI محاسبه شد. نتایج بیانگر کارآیی شاخص تلفیقی مورد استفاده در پایش خشکسالی در منطقه مورد مطالعه بود. نظری‌پور و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی با استفاده از شاخص‌های تلفیقی خشکسالی در حوضه رودخانه سرباز پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌شناسی شاخص تلفیقی خشکسالی موررد استفاده، یک رویکرد عینی و واضح را برای توصیف شدت خشکسالی فراهم می‌کند.

کاظم‌پور چورسی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی و ارزیابی داده‌های سنجش‌ازدور در پایش خشکسالی حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای مطلوب ارائه‌شده، امکان پیش‌بینی و برآورد منطقه‌ای پدیده خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف فصل رشد یا طی فصل رشد به-صورت مطلوب وجود دارد. پژوهش‌های دو[4] و همکاران (۲۰۱۳)، شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۱)، رضایی مقدم و

1 Liu
2 Baisa
3 Balint
4 Du

همکاران (۱۳۸۹) و جهانبخش و همکاران (۱۳۸۹) نیز نشان داده که بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای روش مطلوبی برای ارزیابی خشکسالی در نقاط گوناگون کشور است که با نتایج این مطالعه نیز همخوانی دارد. لیو[1] و همکاران (۲۰۲۰) برای نظارت بر خشکسالی مناطق خشک در شمال چین شاخص ترکیبی خشکسالی را با استفاده از ادغام بارش حاصل از داده TRMM، رطوبت خاک از GLDAS-2.1، دمای سطح زمین (LST) از تصاویر ماهواره MODIS و شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) از ماه سپتامبر ۲۰۱۷ به بعد را به کار بردند. تحلیل‌های همبستگی پیرسون بین شاخص‌های خشکسالی سنجش‌ازدوری و شاخص SPEI، در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان داد تطابق بین MCDI و SPEI بیشتر از سایر شاخص‌ها و SPEI بود. بنابراین، MCDI به‌عنوان یک روش و شاخص موثر برای نظارت بر خشکسالی در سراسر استان شاندونگ و مناطق مشابه توصیه شد.

بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، ایران طی سال‌های اخیر دچار خشکسالی‌های پیاپی بوده است و با کمبود شدید منابع آبی مواجه می‌باشد (طباطبایی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳). استان چهارمحال و بختیاری با وجود اینکه مساحت نسبتا کمی از کشور را داراست، اما حدود ۱۰ درصد از منابع آب کشور را در خود جای داده که همین موضوع اهمیت پایش وضعیت خشکسالی را در این استان را دوچندان می‌نماید (محیط اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۹). بنابراین، این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد شاخص‌های ترکیبی سنجش‌ازدوری در شناسایی و تخمین خشکسالی در منطقه چهارمحال و بختیاری انجام شد. بر اساس مرور منابع انجام‌شده، مطالعه مشابهی در منابع یافت نشد.

داده‌ها

در این قسمت ابتدا داده‌های مورد استفاده معرفی شده و سپس چگونگی محاسبه شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده در این مقاله تشریح شده است. در ادامه نحوه محاسبه شاخص ترکیبی CDI ارائه شده است.

منطقه مورد مطالعه

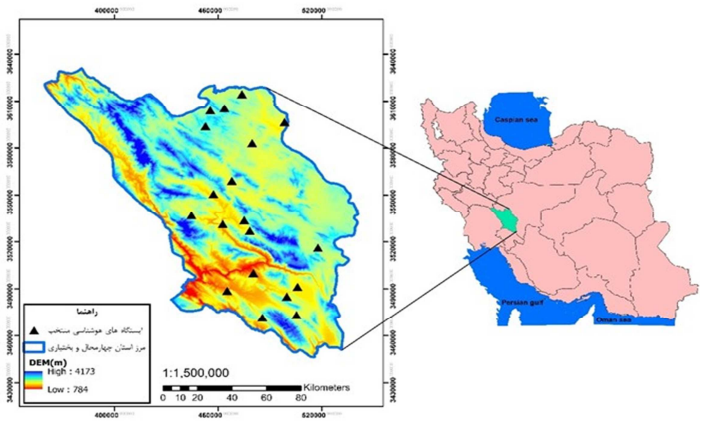
استان چهارمحال و بختیاری با مساحت حدودی ۱۶۴۲۱ کیلومتر مربع حدفاصل ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این استان در ناحیه مرکزی کوه‌های زاگرس بین پیش کوه‌های داخلی و استان اصفهان قرار گرفته است. از شمال و شرق به استان اصفهان، ازغرب به استان خوزستان، از جنوب به استان کهگیلویه و بویراحمد و از شمال غرب به استان لرستان محصور شده است. استان چهارمحال و بختیاری با متوسط ارتفاع ۲۱۵۳ متر از دیدگاه توپوگرافی، یک پهنه مرتفع کوهستانی می‌باشد. زردکوه با ارتفاع ۴۲۲۱ متر در شمال غرب، بلندترین نقطه استان و کم ارتفاع‌ترین نقطه آن در قسمت‌های جنوب غربی، در نقطه خروج کارون با ارتفاع حدودی ۸۰۰ متر می‌باشد. به دلیل کوهستانی بودن استان و با توجه به این که دما هوا ناشی از ارتفاع هر منطقه است، اقلیم‌های حرارتی مختلفی در استان حکم‌فرماست. متوسط دمای ثبت‌شده در ایستگاه‌های موجود در استان نشان می‌دهد که لردگان گرم‌ترین و شهرکرد سردترین شهرستان استان می‌باشد. در این استان، عموماً تیرماه گرم‌ترین و دی‌ماه سردترین ماه سال است. نوع بارش در مناطق مرتفع غالباً به‌صورت برف است و وجود ارتفاعات پوشیده از برف یکی از ویژگی‌های اقلیمی این استان است. بارش‌ها از

[1] Liu

مهرماه آغاز و در دی به بیشترین حد خود می‌رسد و از این زمان تا اردیبهشت به تدریج کاهش پیدا می‌کند (خلیلی فرد و کرکه آبادی، ۱۳۹۷). نقشه موقعیت استان چهارمحال و بختیاری در کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.

ایستگاه‌های هواشناسی

در این مطالعه از داده‌های بارش ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری در دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ (۲۰ سال) برای محاسبه شاخص SPI استفاده شده است. نقشه موقعیت ایستگاه های مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی

تعیین دوره آماری و داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش داده‌های بارش ماهیانه ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده استان چهارمحال و بختیاری برای محاسبه شاخص SPI مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، در محاسبه شاخص‌های سنجش‌ازدوری از داده‌های شاخص تفاضل نرمال‌شدهٔ پوشش گیاهی (NDVI) و داده‌های دمای سطح زمین (LST) از ماهواره MODIS و داده‌های بارندگی سری B43۳ ماهواره TRMM استفاده شده است. همان‌گونه که بیان گردید، طول دوره آماری استفاده‌شده در این پژوهش از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ به مدت ۲۰ سال درنظر گرفته شده است.

جدول ۱: محصولات سنجش‌ازدور ماهواره‌ای مورد استفاده در این مطالعه

ماهواره	محصول	نوع داده	قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک مکانی
Terra(MODIS)	MOD13A3	NDVI	ماهانه	۱×۱ کیلومتر
Terra(MODIS)	MOD11A2	LST	۸ روزه	۱×۱ کیلومتر
TRMM	TRMM 3B43	Precipitation	ماهانه	۰,۲۵×۰,۲۵ درجه

شاخص بارش استانداردشده (SPI)

مک‌کی[1] و همکاران (۱۹۹۳) شاخص SPI را به منظور ارزیابی خشکسالی هواشناسی ایالت کلرادوی آمریکا پیشنهاد دادند. برای به‌دست آوردن این شاخص در مرحله اول با برازش توزیع گاما بر آمارهای بارش ماهانه یا حاصل جمع بارش در هر گستره زمانی مورد نظر، تابع احتمال تجمعی آن را حساب کرده و سپس با انتقال آن به توزیع تجمعی نرمال استانداردشده، مقادیر شاخص SPI حاصل می‌شود. از مزیت‌های این روش ارزیابی خشکسالی در واحدهای زمانی متفاوت است. تعداد زیادی از برنامه‌ریزان و طراحان در حوزه خشکسالی، چند کاره بودن شاخص SPI را بسیار مفید وصف می‌کنند (جی و پترز[2]، ۲۰۰۳). در این مطالعه، برای محاسبه SPI از برازش مقادیر بارش به توزیع گاما استفاده شده است (اسدی زارچ و همکاران، ۲۰۱۵). نحوه طبقه‌بندی خشکسالی توسط شاخص SPI در جدول ۲ ارائه شده است. در این مطالعه SPI به‌صورت سری‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه محاسبه شده است.

جدول ۲: طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص SPI (لیوادا و آسیماکوپولوس[3]، ۲۰۰۷)

مقدار شاخص SPI	طبقه‌بندی خشکسالی
۲ و بیشتر از آن	به شدت مرطوب
۱/۵ تا ۱/۹۹	خیلی مرطوب
۱/۰۰ تا ۱/۴۹	نسبتا مرطوب
۰ تا ۰/۹۹	مرطوب ملایم
۰/۹۹- تا ۰	خشکسالی ملایم
۱/۰۰- تا ۱/۴۹-	نسبتا خشک
۱/۵۰- تا ۱/۹۹-	خیلی خشک
۲/۰۰- و کمتر از آن	به شدت خشک

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

این شاخص در سال ۱۹۹۵ توسط کوگان ارائه شد که به واسطه گستره‌ای از مقادیر NDVI بلندمدت، ارزیابی و نرمال شد (کوگان[4]، ۱۹۹۵). این رویه، درصد مقدار شرایط غالب تغییرات پوشش گیاهی را نمایان می‌کند. گستره این شاخص از ۰ تا ۱ می‌باشد که مقادیر کم، وضعیت استرس و تنش گیاهی، مقادیر وسط، وضعیت متوسط و مقادیر بالا وضعیت مطلوب را ارائه می‌دهد (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۵). در این مطالعه، مقادیر VCI بر اساس درصد درنظر گرفته شده است. این شاخص طبق رابطه ۳ به‌دست می‌آید که در آن، VCI شاخص وضعیت پوشش گیاهی، $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ به‌ترتیب میانگین حداکثر و میانگین حداقل بلندمدت و $NDVI_i$ مقدار $NDVI$ در گام زمانی i برای هر پیکسل است. جدول ۳ طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس این شاخص را نمایش می‌دهد.

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 \quad (۳)$$

[1] McKee
[2] Ji & Peters
[3] Livada & Assimakopoulos
[4] Kogan

جدول ۳ : طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص VCI (کوکونوری[1] و همکاران، ۲۰۲۰)

وضعیت خشکسالی	مقدار شاخص VCI
خشکسالی بسیار شدید	$VCI < 10$
خشکسالی شدید	$10 < VCI < 20$
خشکسالی متوسط	$20 < VCI < 30$
خشکسالی خفیف	$30 < VCI < 40$
بدون خشکسالی	$VCI \geq 40$

شاخص وضعیت دمایی (TCI)

این شاخص نیز توسط کوگان در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است که برای تشخیص رویداد خشکسالی وابسته به درجه حرارت، تشریح شده است. با پدیده خشکسالی، رطوبت خاک کاسته می‌شود که در نتیجه تنش حرارتی سطح زمین را به همراه دارد. بنابراین، مقدار LST [2]در سال‌های خشکسالی بیشتر برآورد می‌شود. الگوریتم محاسباتی این شاخص مشابه با شاخص VCI می باشد؛ ولی معادله آن برای بازتاب پاسخ حرارتی پوشش گیاهی تشریح شده است که از رابطه ۴ به‌دست می‌آید که در این رابطه TCI شاخص وضعیت دما، LST_{max} و LST_{min} به‌ترتیب میانگین حداکثر و میانگین حداقل بلندمدت و LST_i مقدار LST در گام زمانی i برای هر پیکسل می‌باشد. جدول ۴ طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس این شاخص را نمایش می‌دهد.

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (۴)$$

جدول ۴ : طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص TCI (زو[3] و همکاران، ۲۰۲۰)

وضعیت خشکسالی	مقدار شاخص TCI
خشکسالی بسیار شدید	$TCI < 10$
خشکسالی شدید	$10 < TCI < 20$
خشکسالی متوسط	$20 < TCI < 30$
خشکسالی خفیف	$30 < TCI < 40$
بدون خشکسالی	$TCI \geq 40$

شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)

شاخص VHI در واقع شاخص ترکیبی VCI و TCI است که نتیجه پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح کره زمین را در ارزیابی خشکسالی نمایان می‌کند. این شاخص از رابطه ۵ به‌دست می‌آید که در آن VHI شاخص سلامت گیاه و VCI و TCI هم به‌ترتیب شاخص وضعیت گیاه و دما می‌باشد (کوگان و همکاران، ۲۰۰۴). جدول ۵ طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس این شاخص را نمایش می‌دهد.

$$VHI = 0.5(VCI) + 0.5(TCI) \quad (۵)$$

[1] Kukunuri
[2] Land Surface Temperature
[3] Zou

جدول ۵ : طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص VHI (کوگان و همکاران، ۲۰۰۴)

وضعیت خشکسالی	مقدار شاخص VHI
خشکسالی بسیار شدید	VHI < 10
خشکسالی شدید	10 < VHI < 20
خشکسالی متوسط	20 < VHI < 30
خشکسالی خفیف	30 < VHI < 40
بدون خشکسالی	VHI ≥ 40

شاخص وضعیت بارندگی (PCI)

داده‌های بارش TRMM مستقیماً با شاخص‌های VCI و TCI امکان تجزیه‌وتحلیل ندارند؛ بنابراین از شاخص PCI استفاده می‌کنیم. شاخص وضعیت بارش برای تشخیص کسری بارندگی و خشکسالی استفاده می‌شود. این شاخص از رابطه ۶ محاسبه می‌شود که در آن، $TRMM_i$ و $TRMM_{max}$ و $TRMM_{min}$ به‌ترتیب مقادیر بارش هر پیکسل، حداکثر و حداقل آن در ماه i در طول دوره آماری می‌باشد (دو[1] و همکاران، ۲۰۱۳). جدول ۶ طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص PCI را نمایش می‌دهد.

$$PCI = \frac{TRMM_i - TRMM_{min}}{TRMM_{max} - TRMM_{min}} \quad (۶)$$

جدول ۶ : طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص PCI (دو و همکاران، ۲۰۱۳)

وضعیت خشکسالی	مقدار شاخص PCI
خشکسالی بسیار شدید	PCI < 10
خشکسالی شدید	10 < PCI < 20
خشکسالی متوسط	20 < PCI < 30
خشکسالی خفیف	30 < PCI < 40
بدون خشکسالی	PCI ≥ 40

شاخص ترکیبی خشکسالی (CDI)

برای محاسبه CDI از داده‌های بارش، NDVI و دمای هوا طبق رابطه ۷ استفاده می‌شود. در این رابطه CDI_i شاخص ترکیبی خشکسالی برای بازه زمانی i می‌باشد. همچنین PCI_i، TCI_i و VCI_i به‌ترتیب نشان‌دهنده مقادیر شاخص وضعیت بارندگی، شاخص وضعیت دما و شاخص وضعیت پوشش گیاهی ماهانه هستند. W وزن هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده CDI می‌باشد. مقدار W برای PCI_i، TCI_i و VCI_i به‌ترتیب ۰,۵، ۰,۲۵ و ۰,۲۵ است (العدیله[2] و همکاران، ۲۰۱۹؛ البکری[3] و همکاران، ۲۰۱۹).

$$CDI_i = (W_{PCI} \times PCI_i) + (W_{TCI} \times TCI_i) + (W_{VCI} \times VCI_i) \quad (۷)$$

[1] Du
[2] Al Adaileh
[3] Al-Bakri

تفسیر مقادیر CDI و طبقه‌بندی مربوط به آن در جدول ۷ آمده است. در این مطالعه مقادیر شاخص PCI برای بارش، مقادیر شاخص TCI برای دما و درنهایت مقادیر شاخص VCI به‌عنوان پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفتند. شاخص CDI کمبود بارش، تنش حرارتی خاک و وضعیت رشد پوشش گیاهی را در فرآیند خشکسالی ترکیب می‌کند و از این جهت برای پایش جامع خشکسالی مناسب می‌باشد.

جدول ۷ : طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص CDI (بالینت و همکاران، ۲۰۱۳)

وضعیت خشکسالی	مقدار شاخص CDI
خشکسالی بسیار شدید	$CDI < 0.4$
خشکسالی شدید	$0.4 < CDI < 0.6$
خشکسالی متوسط	$0.6 < CDI < 0.8$
خشکسالی ملایم	$0.8 < CDI < 1$
بدون خشکسالی	$CDI > 1$

رابطه بین شاخص‌های سنجش‌ازدوری و SPI

در این مطالعه ضریب تعیین بین داده‌های SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه و با تاخیر زمانی ۰ تا ۸ ماه محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. برای هر شاخص، تاخیر زمانی که بالاترین مقدار ضریب تعیین را ارائه نمود، در محاسبات به‌عنوان ضریب تعیین شاخص مربوطه درنظر گرفته شد. برای کاهش نوسانات موقتی در مقادیر شاخص‌ها و در نتیجه بهتر نشان داده شدن همبستگی بین شاخص‌ها، شاخص‌ها در مقیاس زمانی سه و شش ماهه (میانگین متحرک سه و شش ماهه) با هم مقایسه شدند.

مقایسه مقادیر شاخص‌های سنجش‌ازدوری در موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی با مقادیر SPI

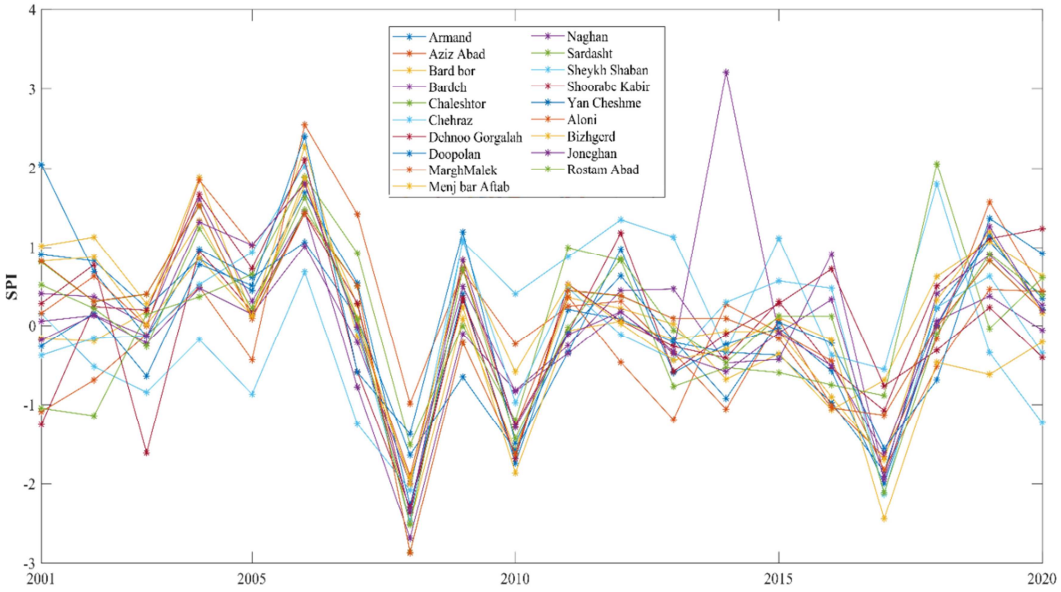
تراکم ایستگاه‌های مورد مطالعه نسبتا پایین است. همچنین، استان چهارمحال بختیاری شدیدا کوهستانی است و مقادیر بارش با تغییر ارتفاع تغییر می‌کنند. بنابراین، تهیه نقشه پهنه‌بندی بارش با توجه به موارد یادشده برای این مطالعه مناسب به نظر نمی‌رسد. در این مرحله، با درنظرگرفتن نقشه‌های خروجی هر یک از شاخص‌های سنجش-ازدوری در محیط ArcGis و وارد کردن مختصات ایستگاه‌های هواشناسی، مقادیر شاخص‌های سنجش‌ازدوری در پیکسل قرار گرفته در موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی استخراج شد. این فرایند برای تمام ماه‌های دوره آماری تکرار شد. بنابراین، مقادیر هر شاخص سنجش‌ازدوری برای موقعیت مکانی هر کدام از ایستگاه‌ها و برای هر یک از ماه‌های دوره آماری به‌دست آمد. در نهایت ۱۹ (تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی) سری زمانی با مقیاس یک ماهه (سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ به مدت ۲۰ سال یا ۲۴۰ ماه) برای هریک از شاخص‌ها به‌دست آمد. از هر کدام از سری-های زمانی یک ماهه از طریق میانگین متحرک‌گیری، سری زمانی ۳ ماهه و نیز سری زمانی ۶ ماهه استخراج گردید. در مرحله آخر، تطابق هر یک از این سری زمانی‌های ۳ ماهه و ۶ ماهه در مکان هر ایستگاه با سری‌های ۳ و ۶ ماهه SPI ایستگاه مربوطه از طریق محاسبه ضریب تعیین بررسی شد.

نتایج و بحث

در این بخش، منتخب نتایج حاصل از کاربرد شاخص SPI و همچنین شاخص‌های سنجش‌ازدوری VCI، TCI، VHI، PCI و شاخص ترکیبی CDI را در پایش خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری در طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ ارائه گردیده است.

نتایج شاخص SPI

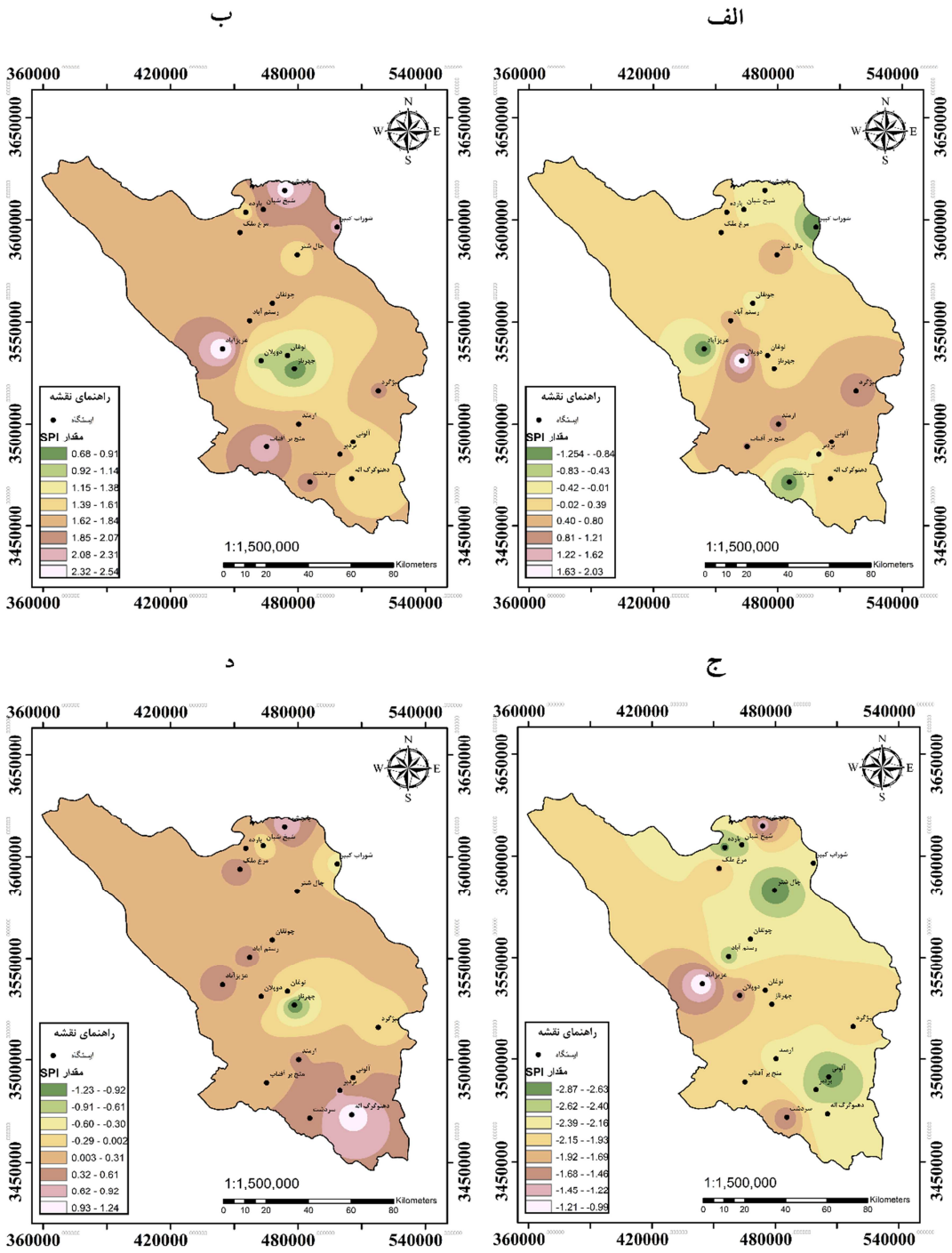
شاخص SPI با استفاده از داده‌های بارش برای ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه شد. مقادیر شدت خشکسالی به‌دست‌آمده بر اساس شاخص SPI، برای ایستگاه‌های منتخب در مقیاس سالانه، در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، اگرچه مقادیر شدت خشکسالی در سال‌های مختلف در اکثر ایستگاه‌ها نسبتا متفاوت است؛ اما روند کلی وقوع خشکسالی و ترسالی‌ها در بیشتر ایستگاه‌ها تا حدی مشابه است. برای مثال، در سال ۲۰۰۸ اکثر ایستگاه‌ها درجاتی از خشکسالی را تجربه کرده‌اند.



شکل۲: مقادیر SPI سالانه برای ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب منطقه مورد مطالعه

پس از محاسبه شاخص خشکسالی SPI برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، با کمک نرم‌افزار ArcGis اقدام به پهنه‌بندی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش درون‌یابی IDW گردید. در روش IDW، برای هر یک از نقاط اندازه‌گیری وزنی بر اساس رابطه بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می‌گیرد. سپس این اوزان توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شود. به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش می‌دهد و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تری بین نقاط همجوار توزیع می‌کنند (عظیمی و همکاران،۱۳۹۶). در شکل ۳ نتایج حاصل از پهنه‌بندی خشکسالی برای چهار سال (۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰) آورده شده است. با

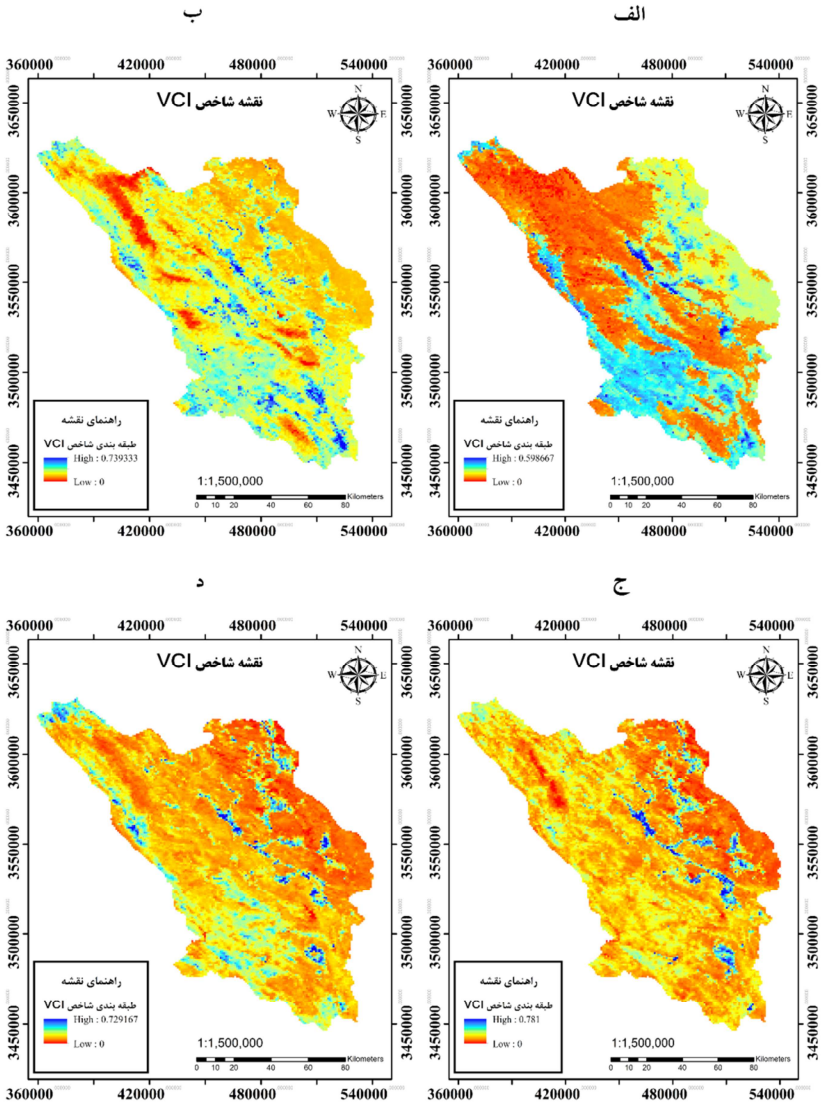
توجه به نتایج SPI، در طول دوره آماری مورد مطالعه، سال ۲۰۰۶ به‌عنوان مرطوب‌ترین و سال ۲۰۰۸ به‌عنوان خشک‌ترین سال تعیین شدند.



شکل ۳: نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI برای الف: سال ۲۰۰۱، ب: سال ۲۰۰۶، ج: سال ۲۰۰۸ و د: سال ۲۰۲۰

نتایج شاخص VCI

همان‌گونه که اشاره گردید، این شاخص وضعیت پوشش گیاهی را بر حسب $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ در طول یک ماه محاسبه می‌کند که برحسب درصد بیان می‌شود. مطالعات زیادی نشان می‌دهد که این شاخص نسبت به شاخص NDVI نتایج بهتری را برای ارزیابی میزان بارندگی، به‌خصوص در مناطقی که از نظر جغرافیایی غیرهمگون هستند، نشان می‌دهد (تنکابیل و گاماژ، ۲۰۰۴). شکل ۴ تغییرات شاخص VCI در ماه‌های مختلف از سال‌های متفاوت از دوره مورد مطالعه (۲۰۲۰-۲۰۰۱) را در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

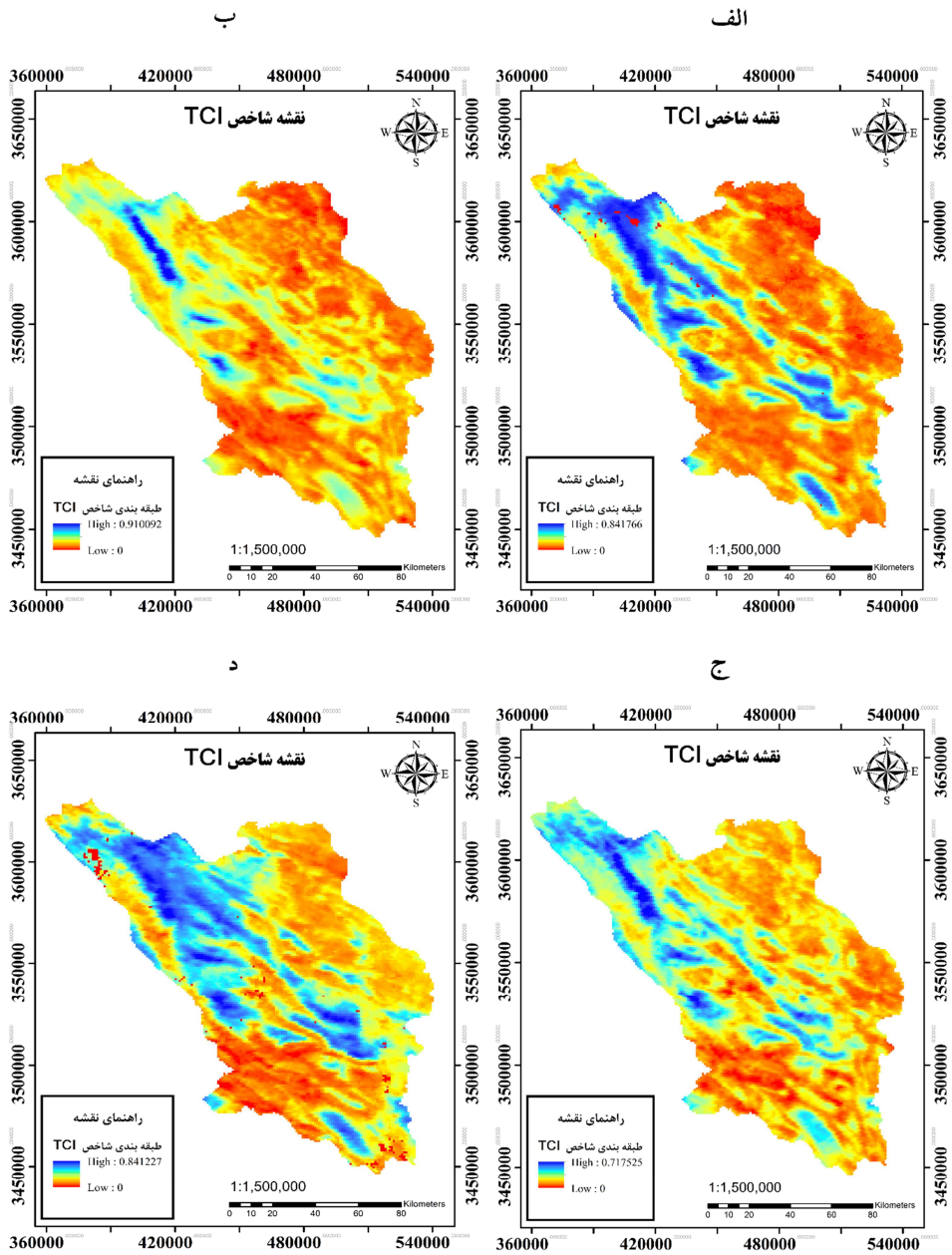


شکل ۴: نقشه شاخص VCI برای الف: ژانویه ۲۰۰۱، ب:آوریل ۲۰۰۴، ج: ۷ژوئیه ۲۰۰۷ و د: اکتبر ۲۰۱۰

همان‌طورکه شکل ۴ نشان می‌دهد، وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص VCI در ماه‌های ارائه‌شده دارای تغییراتی هست که این تغییرات با توجه به فصل رویش و توپوگرافی منطقه پدید می‌آیند. بررسی نقشه‌های ماهانه شاخص VCI برای دوره مطالعه نشان داد وضعیت پوشش گیاهی بر اساس این شاخص در مناطق مرتفع در ماه‌های ژانویه و فوریه به لحاظ فصل سرما و وجود پوشش برف در مناطق کوهستانی و در نتیجه دیده نشدن پوشش گیاهی، ضعیف برآورد شده است. در ماه‌های مارس تا ژوئن با فرارسیدن فصل رویش گیاهان، در اغلب نقاط منطقه مورد نظر، شرایط پوششی مطلوب‌تری مشاهده می‌شود. با فرارسیدن فصل تابستان و کاهش بارندگی در ماه‌های ژوئیه تا سپتامبر، مساحت زیادی از حوضه با کاهش پوشش گیاهی مواجه می‌شود.

نتایج محاسبات شاخص TCI

شکل ۵ تغییرات شاخص TCI در ماه‌های مختلف از سال‌های متفاوت را در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. همان-گونه که بیان گردید، شاخص TCI بر مبنای دمای سطح زمین است. با توجه به نقشه توپوگرافی منطقه، در ماه‌های ژانویه و فوریه، به‌دلیل پایین بودن دما، وضعیت خشکسالی بر اساس این شاخص نرمال است. در ادامه با فرارسیدن تابستان و گرم شدن هوا، وضعیت خشکسالی تغییر می‌کند. بر اساس نتایج در ماه اوت، مساحت زیادی از منطقه مطالعاتی در معرض خشکسالی می‌باشد که با نتایج SPI همخوانی دارد.

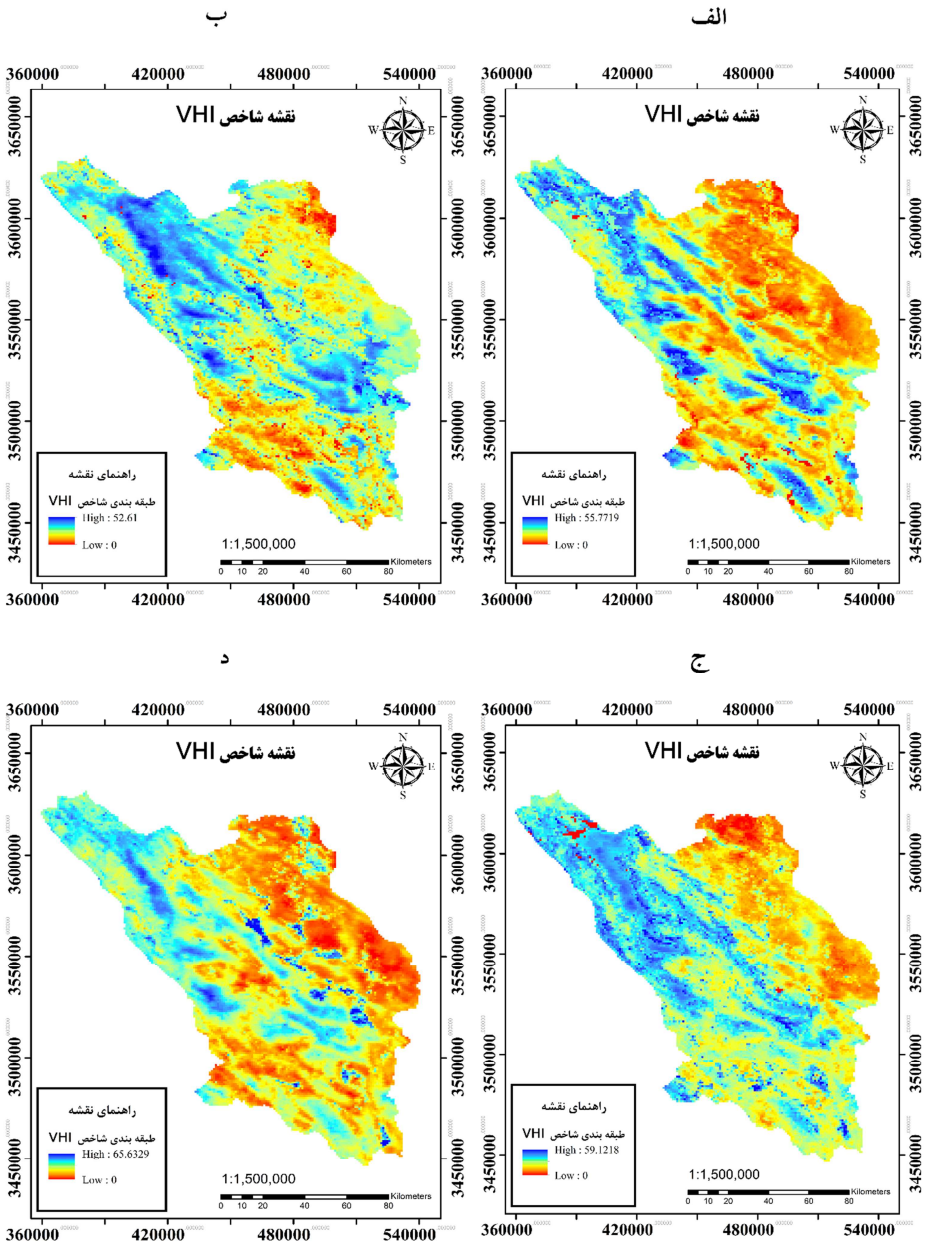


شکل ۵: نقشه شاخص TCI برای الف: مارس ۲۰۰۳، ب: ژوئن ۲۰۰۶ ، ج: سپتامبر ۲۰۰۹ و د: دسامبر ۲۰۱۲

نتایج محاسبات شاخص VHI

شاخص VHI شاخصی است که از ترکیب شاخص‌های VCI و TCI برای نمایه تنش خشکسالی به‌کار می‌رود. به عبارت دیگر این شاخص اثرات ترکیبی پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین را در ارزیابی خشکسالی ارائه می-دهد. شکل ۶ تغییرات شاخص VHI در ماه‌های مختلف از سال‌های متفاوت را در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

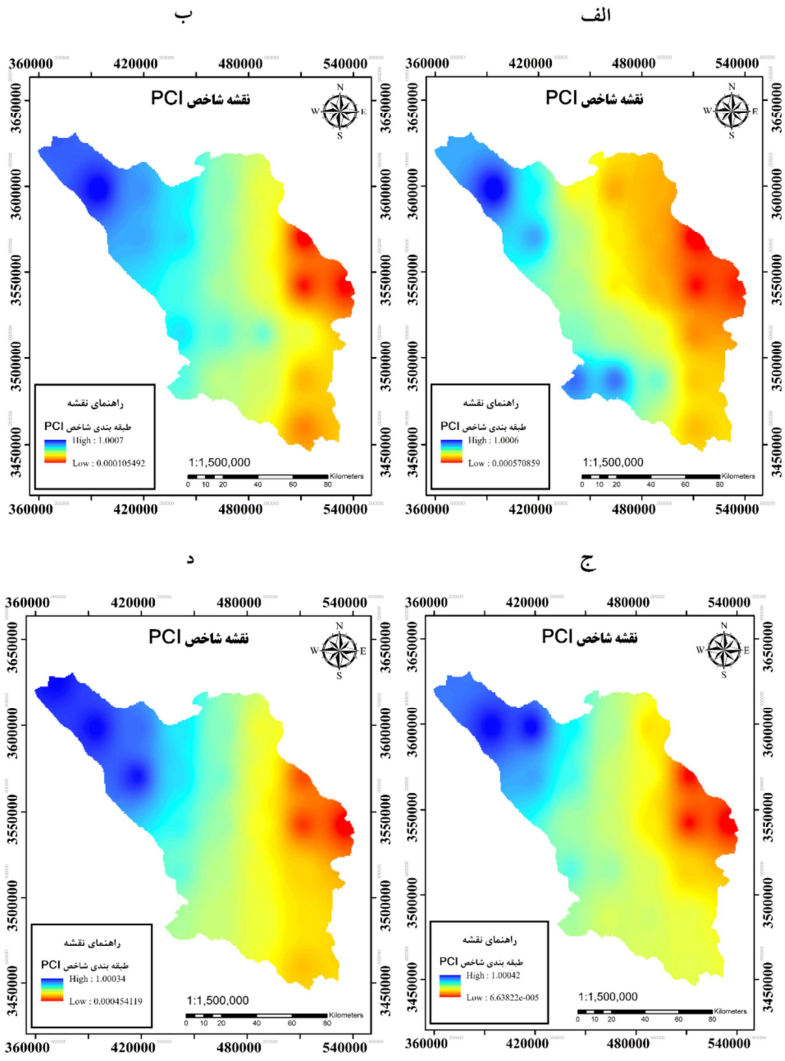
با مقایسه نتایج این شاخص با مقادیر شاخص SPI می‌توان مشاهده کرد که این شاخص در شناسایی رخدادهای خشکسالی، نتایج مطلوب‌تری را نسبت به دو شاخص TCI و VCI ارائه می‌دهد. بر اساس نقشه‌های شاخص VHI، هر چه از فصل‌های زمستان و بهار به فصل‌های تابستان و پاییز پیش می‌رویم، مناطق با وضعیت خشکسالی شدید، مساحت بیشتری را فرا می‌گیرد. در ماه‌های آپریل و می برای مساحت زیادی از حوزه، خشکسالی متوسط و یا بدون خشکسالی قابل‌مشاهده است.



شکل ۶: نقشه شاخص VHI برای الف: نوامبر ۲۰۱۱، ب: فوریه ۲۰۱۴، ج: مه ۲۰۱۷و د: آگوست ۲۰۲۰

نتایج محاسبات شاخص PCI

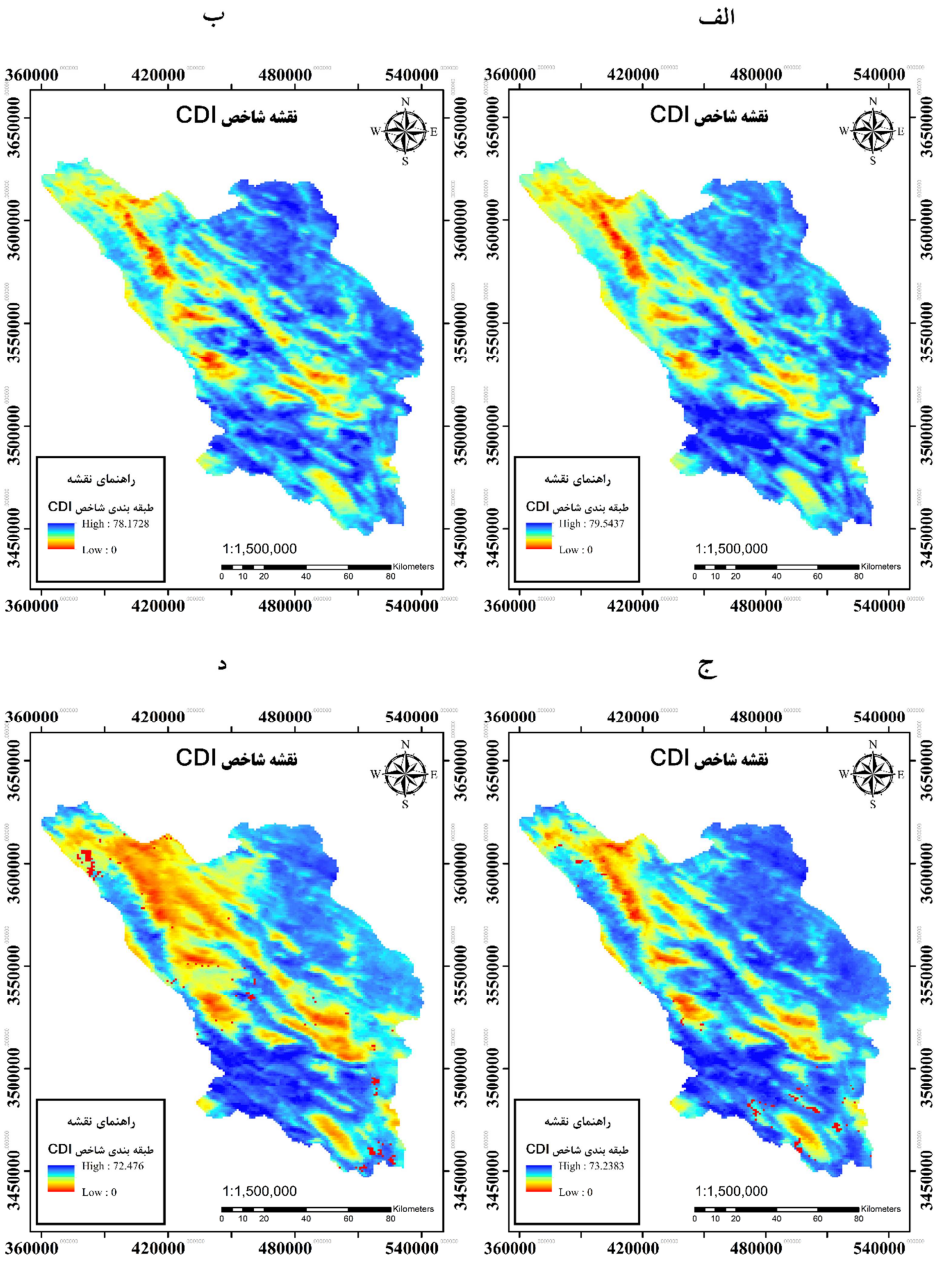
همان‌طورکه اشاره شد، داده‌های بارش TRMM مستقیماً با شاخص‌های VCI و TCI امکان تجزیه‌وتحلیل ندارند؛ بنابراین از شاخص PCI استفاده می‌کنیم. شکل ۷ تغییرات شاخص PCI در ماه‌های مختلف از سال‌های متفاوت را در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه شاخص PCI براساس داده‌های بارش TRMM است، پیش‌بینی می‌گردد نسبت به سایر شاخص‌های مطرح‌شده، عملکرد بهتری در تشخیص کمبود بارندگی و وقوع خشکسالی را ارائه دهد. نقشه‌های شاخص PCI برای دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد در ماه‌های می و اکتبر که مصادف با بارش های بهاری و پاییزی می‌باشد، شرایط بارندگی مطلوب و در اکثر منطقه مورد مطالعه بارندگی اتفاق افتاده است. در فصل تابستان، در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست، در برخی از منطق بارندگی اتفاق افتاده است. به همین دلیل نقشه شاخص PCI برای این ماه‌ها، شرایط بارندگی نامطلوب و خشکسالی با درجه بالاتر را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نقشه شاخص PCI برای– الف: ژانویه ۲۰۱۳، ب: فوریه ۲۰۱۴، ج: مارس ۲۰۱۵ و د: آوریل ۲۰۱۶.

نتایج محاسبات شاخص ترکیبی سنجش‌ازدوری CDI

شاخص ترکیبی CDI از داده‌های NDVI، بارش و دمای هوا استفاده می‌کند. بنابراین شاخص CDI بر اساس ترکیبی از سه مجموعه داده است. بنابراین خشکسالی منطقه را بر اساس تاثیر ترکیبی سه شاخص PCI، VCI و TCI نشان می دهد و در نتیجه نتایج آن با شاخص SPI همخوانی بیشتری نسبت به شاخص‌های منفرد دارد. شکل ۸ تغییرات شاخص CDI در ماه‌های مختلف از سال‌های متفاوت را در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد.



شکل ۸: نقشه شاخص CDI برای– الف: سپتامبر ۲۰۰۹، ب: اکتبر ۲۰۱۰، ج: نوامبر ۲۰۱۱ و د: دسامبر ۲۰۱۲.

مقایسه مقادیر SPI و شاخص‌های سنجش از دوری

در این مطالعه ضریب تعیین بین داده‌های SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه محاسبه گردید. با توجه به احتمال تاخیر در پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات خشکسالی، نتایج همبستگی بین SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری با تاخیر زمانی ۰ تا ۸ ماه محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج بررسی ضریب تعیین بین شاخص SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری ارائه شده است. برای هر شاخص، تاخیر زمانی که بالاترین مقدار ضریب تعیین را ارائه نمود، در محاسبات به‌عنوان ضریب تعیین شاخص مربوطه درنظر گرفته شد.

مقایسه SPI و VCI

مقادیر ضریب تعیین بین دو شاخص SPI و VCI با درنظرگرفتن زمان تاخیر چهار ماه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که ضرایب تعیین بین دو شاخص SPI و VCI در مقیاس شش‌ماهه نسبت به مقیاس سه‌ماهه در اکثر ایستگاه‌ها بیشتر است. البته با توجه به کاهش نوسانات در مقیاس شش‌ماهه نسبت به مقیاس سه‌ماهه، بالاتر بودن ضریب تعیین برای داده‌های شش‌ماهه قابل‌پیش‌بینی می‌باشد. نتایج نشان داد میزان تطابق در زمان تاخیر چهار ماه نسبت به سایر تاخیرهای زمانی، بالاتر می‌باشد. همچنین، نتایج بیانگر این است شاخص SPI و VCI با یکدیگر تشابه زیادی ندارند. در زیر نتایج دو دوره بررسی که دارای ضرایب تعیین بالاتری بودند، به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۸: ضریب تعیین بین مقادیر SPI و VCI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه با تاخیر زمانی ۴ ماه

ردیف	نام ایستگاه	سه ماهه	شش ماهه
۱	ارمند	۰,۴۸۲۸	۰,۵۴۹۰
۲	عزیز آباد	۰,۴۲۴۶	۰,۵۳۷۲
۳	بردبر	۰,۴۴۴۵	۰,۴۵۲۷
۴	بارده	۰,۰۸۰۰	۰,۱۴۳۰
۵	چالشتر	۰,۱۹۴۷	۰,۱۸۸۹
۶	چهراز	۰,۲۰۳۱	۰,۲۶۰۳
۷	دهنو گرگ اله	۰,۴۴۶۲	۰,۴۸۹۸
۸	دوپلان	۰,۱۹۵۴	۰,۱۹۰۷
۹	مرغملک	۰,۱۰۲۹	۰,۱۴۲۴
۱۰	منج بر آفتاب	۰,۱۸۵۵	۰,۱۵۶۵
۱۱	ناغان	۰,۲۳۸۰	۰,۳۱۹۵
۱۲	سردشت	۰,۳۰۲۶	۰,۳۳۰۶
۱۳	شیخ شبان	۰,۱۵۸۱	۰,۲۰۳۷
۱۴	شوراب کبیر	۰,۱۳۱۰	۰,۱۳۷۵
۱۵	یان چشمه	۰,۰۵۷۰	۰,۰۹۱۷
۱۶	آلونی	۰,۲۳۰۹	۰,۲۳۸۰
۱۷	بیژگرد	۰,۲۳۴۲	۰,۲۸۲۸
۱۸	جونقان	۰,۲۴۴۹	۰,۲۵۸۵
۱۹	رستم آباد میانگین	۰,۵۱۶۲	۰,۶۵۷۲
		۰,۲۵۶	۰,۲۹۶

مقایسه SPI و TCI

جدول ۹ مقادیر ضریب تعیین بین دو شاخص SPI و TCI با درنظرگرفتن زمان تاخیر یک ماه را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد تطابق بین SPI و TCI در اکثر ایستگاه‌ها نسبت به میزان تطابق موجود بین مقادیر SPI و VCI بیشتر است. بر اساس نتایج، به‌طور میانگین ضریب تعیین بین مقادیر SPI و TCI در محل ایستگاه‌های باران‌سنجی نزدیک به ۰,۵۰ می‌باشد.

جدول ۹: ضریب تعیین بین داده‌های SPI و TCI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه با تاخیر زمانی ۱ ماه

ردیف	نام ایستگاه	سه ماهه	شش ماهه
۱	ارمند	۰,۶۹۱۷	۰,۷۴۷۵
۲	عزیز آباد	۰,۶۳۷۱	۰,۶۵۹۰
۳	بردبر	۰,۷۱۴۸	۰,۷۴۱۹
۴	بارده	۰,۴۲۵۹	۰,۳۹۸۷
۵	چالشتر	۰,۴۰۳۳	۰,۳۶۸۹
۶	چهراز	۰,۵۷۸۲	۰,۴۹۳۹
۷	دهنو گرگ اله	۰,۶۹۳۴	۰,۶۹۳۸
۸	دوپلان	۰,۵۴۵۳	۰,۵۳۸۵
۹	مرغملک	۰,۶۳۸۴	۰,۶۷۵۶
۱۰	منج بر آفتاب	۰,۵۵۴۳	۰,۵۷۴۴
۱۱	ناغان	۰,۴۸۲۹	۰,۴۹۳۲
۱۲	سردشت	۰,۷۱۸۷	۰,۷۳۹۵
۱۳	شیخ شبان	۰,۴۷۴۷	۰,۴۷۹۴
۱۴	شوراب کبیر	۰,۴۵۱۶	۰,۴۱۵۸
۱۵	یان چشمه	۰,۴۱۱۱	۰,۳۹۱۸
۱۶	آلونی	۰,۰۰۷۹	۰,۰۱۷۱
۱۷	بیژگرد	۰,۲۲۹۵	۰,۲۳۴۱
۱۸	جونقان	۰,۱۸۴۸	۰,۱۸۶۶
۱۹	رستم آباد	۰,۵۹۰۸	۰,۶۰۵۰
	میانگین	۰,۴۹۶	۰,۴۹۸

مقایسه SPI و VHI

جدول ۱۰ نتایج ضریب تعیین بین SPI و VHI مربوط به تاخیرهای زمانی ۲ ماه که دارای ضرایب تعیین بالاتری نسبت به سایر تاخیرهای زمانی بود را به نمایش گذاشته است. همان‌گونه‌که جدول نشان می‌دهد میزان تطابق نسبت به SPI و TCI به‌خصوص برای مقیاس زمانی سه ماهه به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.

جدول ۱۰: ضریب تعیین بین داده‌های SPI و VHI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه با تاخیر زمانی ۲ ماه

ردیف	نام ایستگاه	سه ماهه	شش ماهه
۱	ارمند	۰,۵۵۸۴	۰,۶۵۸۶
۲	عزیز آباد	۰,۶۰۴۲	۰,۶۶۷۹
۳	بردبر	۰,۵۶۰۱	۰,۶۵۳۸
۴	بارده	۰,۲۱۰۸	۰,۲۲۶۳
۵	چالشتر	۰,۱۸۱۹	۰,۱۷۳۳
۶	چهراز	۰,۴۹۴۰	۰,۵۱۳۳
۷	دهنو گرگ اله	۰,۶۰۳۹	۰,۶۶۵۳
۸	دوپلان	۰,۳۴۸۹	۰,۴۱۲۵
۹	مرغملک	۰,۴۹۲۴	۰,۵۵۸۱
۱۰	منج بر آفتاب	۰,۳۷۱۱	۰,۳۹۶۶
۱۱	ناغان	۰,۲۹۷۵	۰,۳۵۲۷
۱۲	سردشت	۰,۴۸۱۲	۰,۵۴۷۲
۱۳	شیخ شبان	۰,۲۶۸۸	۰,۲۹۷۴
۱۴	شوراب کبیر	۰,۱۹۰۰	۰,۱۹۸۵
۱۵	یان چشمه	۰,۱۳۲۳	۰,۱۵۴۷
۱۶	آلونی	۰,۰۶۳۶	۰,۰۷۹۴
۱۷	بیژگرد	۰,۲۵۰۱	۰,۲۵۸۳
۱۸	جونقان	۰,۲۵۸۰	۰,۲۷۳۹
۱۹	رستم آباد	۰,۶۰۶۴	۰,۷۱۸۲
	میانگین	۰,۳۶۷	۰,۴۱۱

مقایسه SPI و PCI

نتایج ضریب تعیین بین SPI و PCI مربوط به تاخیرهای زمانی ۰ (بدون تاخیر زمانی) که دارای ضرایب تعیین بالاتری نسبت به سایر تاخیرهای زمانی بود، در جدول ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه‌که نتایج نشان می‌دهد ضریب تعیین بین مقادیر SPI و PCI نسبتا پایین می‌باشد. نکته قابل‌توجه اینکه بر خلاف سایر شاخص‌های سنجش-ازدوری مورد مطالعه، مقدار R^2 مربوط به مقیاس زمانی سه ماه از شش ماهه بیشتر می‌باشد.

جدول ۱۱: ضریب تعیین بین داده‌های SPI و PCI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه بدون تاخیر زمانی

ردیف	نام ایستگاه	سه ماهه	شش ماهه
۱	ارمند	۰,۵۶۳۷	۰,۵۱۱۲
۲	عزیز آباد	۰,۴۹۲۲	۰,۴۴۴۹
۳	بردبر	۰,۵۳۳۷	۰,۴۹۷۱
۴	بارده	۰,۰۰۶۹	۰,۰۰۱
۵	چالشتر	۰,۰۲۸۵	۰,۰۲۹۶
۶	چهراز	۰,۵۰۰۴	۰,۴۶۳۸
۷	دهنو گرگ اله	۰,۴۴۱۷	۰,۴۱۳۶
۸	دوپلان	۰,۵۱۱۸	۰,۵۱۵۷
۹	مرغملک	۰,۱۰۷۸	۰,۱۰۵۱
۱۰	منج بر آفتاب	۰,۵۱۸۳	۰,۴۷۵۸
۱۱	ناغان	۰,۴۴۳۲	۰,۴۲۳۶
۱۲	سردشت	۰,۶۰۵۳	۰,۵۶۱۰
۱۳	شیخ شبان	۰,۰۴۲۹	۰,۰۵۰۰
۱۴	شوراب کبیر	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۱۱
۱۵	یان چشمه	۰,۰۰۳۹	۰,۰۰۱۲
۱۶	آلونی	۰,۴۰۴۹	۰,۳۷۱۷

۱۷	بیژگرد	۰,۲۳۵۷	۰,۲۰۰۶
۱۸	جونقان	۰,۲۶۹۸	۰,۲۶۱۶
۱۹	رستم آباد	۰,۴۰۹۱	۰,۴۰۸۱
	میانگین	۰,۳۲۲	۰,۳۰۲

ارتباط بین SPI و شاخص ترکیبی سنجش‌ازدوری CDI

جداول ۱۲ و ۱۳ مقادیر R^2 بین SPI و CDI مربوط به تاخیرهای زمانی ۰ (بدون تاخیر زمانی) و ۶ ماه را که دارای ضرایب تعیین بالاتری نسبت به سایر تاخیرهای زمانی بودند، به‌ترتیب به نمایش گذاشته‌اند. همان‌گونه‌که جداول نشان می‌دهد، مقادیر R^2 مربوط به داده‌های شاخص ترکیبی سنجش‌ازدوری CDI بدون درنظرگرفتن تاخیر زمانی به‌صورت قابل‌توجهی بالاتر از مقادیر ضریب تعیین مربوط به CDI با تاخیر زمانی ۶ ماهه می‌باشد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت شاخص CDI کارآیی نسبتا مناسبی را جهت پایش خشکسالی در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. عربی و محمدی (۱۴۰۰) نیز در مطالعه‌ای به ارزیابی عملکرد شاخص‌های PCI، TCI، VCI و شاخص ترکیبی SDCI در کشور ایران پرداختند. نتایج نشان داد همبستگی شاخص ترکیبی مورد مطالعه با شاخص SPEI از سایر شاخص-های سنجش‌ازدوری بالاتر بود.

جدول ۱۲: ضریب تعیین بین داده‌های SPI و CDI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه بدون تاخیر زمانی

ردیف	نام ایستگاه	سه ماهه	شش ماهه
۱	ارمند	۰,۷۵۸۷	۰,۷۴۴۴
۲	عزیز آباد	۰,۷۳۹۲	۰,۷۵۳۴
۳	بردبر	۰,۸۳۶۰	۰,۸۳۷۴
۴	بارده	۰,۵۷۰۲	۰,۵۶۳۰
۵	چالشتر	۰,۸۰۳۳	۰,۷۸۹۶
۶	چهراز	۰,۷۰۵۷	۰,۷۰۲۷
۷	دهنو گرگ اله	۰,۸۰۳۵	۰,۷۹۷۵
۸	دوپلان	۰,۷۸۴۱	۰,۷۷۹۶
۹	مرغملک	۰,۷۴۱۹	۰,۷۷۳۹
۱۰	منج بر آفتاب	۰,۶۸۷۵	۰,۶۵۹۸
۱۱	ناغان	۰,۶۹۹۱	۰,۶۹۰۶
۱۲	سردشت	۰,۸۳۲۹	۰,۸۴۶۵
۱۳	شیخ شبان	۰,۶۵۴۴	۰,۶۶۰۴
۱۴	شوراب کبیر	۰,۵۹۹۴	۰,۶۱۳۲
۱۵	یان چشمه	۰,۶۵۲۸	۰,۶۵۳۳
۱۶	آلونی	۰,۸۱۴۰	۰,۸۰۱۶
۱۷	بیژگرد	۰,۶۲۲۸	۰,۶۴۸۰
۱۸	جونقان	۰,۷۴۶۵	۰,۷۶۰۷
۱۹	رستم آباد	۰,۸۲۰۸	۰,۸۱۸۳
	میانگین	۰,۷۳۰	۰,۷۳۱

جدول ۱۳: ضریب تعیین بین داده‌های SPI و CDI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه با تاخیر زمانی ۶ ماه

ردیف	نام ایستگاه	سه ماهه	شش ماهه
۱	ارمند	۰,۶۵۹۹	۰,۶۵۲۹
۲	عزیز آباد	۰,۶۵۹۹	۰,۶۷۰۳
۳	بردبر	۰,۰۷۲۵۳	۰,۷۵۱۷
۴	بارده	۰,۵۱۸۹	۰,۵۰۵۴
۵	چالشتر	۰,۷۱۵۲	۰,۷۰۴۱
۶	چهراز	۰,۶۲۹۲	۰,۶۲۰۵
۷	دهنو گرگ اله	۰,۷۱۶۵	۰,۷۱۳۱
۸	دوپلان	۰,۶۶۵۳	۰,۶۸۰۱
۹	مرغملک	۰,۶۵۷۶	۰,۶۳۲۳
۱۰	منج بر آفتاب	۰,۶۰۳۳	۰,۵۸۶۵
۱۱	ناغان	۰,۶۱۸۶	۰,۶۱۲۹
۱۲	سردشت	۰,۷۱۴۹	۰,۷۴۳۴
۱۳	شیخ شبان	۰,۵۷۰۵	۰,۵۵۴۸
۱۴	شوراب کبیر	۰,۵۳۶۵	۰,۵۴۷۷
۱۵	یان چشمه	۰,۵۷۸۲	۰,۵۷۶۲
۱۶	آلونی	۰,۶۵۱۸	۰,۶۴۳۲
۱۷	بیژگرد	۰,۵۵۲۵	۰,۵۰۸۹
۱۸	جونقان	۰,۶۳۷۱	۰,۶۲۴۵
۱۹	رستم آباد	۰,۶۸۸۹	۰,۶۹۳۵
	میانگین	۰,۶۳۷	۰,۶۳۳

نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد شاخص ترکیبی سنجش‌ازدور CDI با کارآیی شاخص‌های سنجش‌ازدوری VCI، TCI، VHI و PCI در پایش خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری مقایسه گردید. شاخص‌های VCI و TCI از محصولات NDVI و LST از ماهواره MODIS و PCI توسط یک محصول از TRMM محاسبه شدند. شاخص ترکیبی CDI کمبود بارش، تنش حرارتی خاک و وضعیت رشد پوشش گیاهی را از طریق تلفیق شاخص‌های PCI، TCI و VCI را در شناسایی رخدادهای خشکسالی در نظر می‌گیرد. جهت ارزیابی عملکرد شاخص‌های VCI، TCI، VHI و PCI و شاخص ترکیبی CDI، مقادیر این شاخص‌ها با مقادیر شاخص SPI در محل ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱ از طریق محاسبه ضریب تعیین مقایسه شدند. برای کاهش نوسانات موقتی در مقادیر شاخص‌ها و در نتیجه بهتر نشان داده شدن میزان تطابق بین شاخص‌های اشاره‌شده، شاخص‌ها در مقیاس زمانی سه و شش‌ماهه (میانگین متحرک سه و شش‌ماهه) با هم مقایسه شدند. با توجه به احتمال تاخیر در پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی، زمان تاخیر ۰ (بدون تاخیر زمانی) تا ۸ ماه نیز در محاسبات در نظر گرفته شد و مقادیر R^2 برای هر کدام از زمان تاخیرهای درنظرگرفته‌شده به‌صورت جداگانه محاسبه شد.

نتایج نشان داد عملکرد شاخص ترکیبی CDI به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایر شاخص‌های مورد مطالعه می‌باشد. بر اساس نتایج، بالاترین ضریب تعیین برای شاخص‌های VCI، PCI و VHI به‌طور میانگین به‌ترتیب برابر ۰,۳۰، ۰,۳۲ و ۰,۴۱ می‌باشد. این مقدار برای شاخص TCI برابر ۰,۵۰ است. درحالی‌که شاخص CDI، R^2 میانگین ۰,۸۳ را نشان داد. بنابراین، در شرایطی که امکان محاسبه این شاخص جهت پایش خشکسالی وجود دارد، استفاده از آن نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدوری اشاره‌شده، اولویت دارد. از بین شاخص‌های سنجش‌ازدوری VCI، TCI، VHI و PCI، شاخص TCI عملکرد بهتری را ارائه داد. به‌طورکلی، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص ترکیبی CDI، جایگزین نسبتا مناسبی برای شاخص‌های اقلیمی جهت ارزیابی خشکسالی، به‌خصوص در حوزه‌هایی که با کمبود داده مواجه هستند، می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد عملکرد شاخص CDI با سایر شاخص‌های ترکیبی سنجش‌ازدوری نیز مقایسه گردد.

منابع

ارجمندی، زهره؛ اسدی زارچ، محمد امین؛ حسینی، سید زین‌العابدین؛ اختصاصی، محمدرضا. (۱۴۰۱). پیش‌بینی خشکسالی در مناطق خشک با استفاده از مدل‌های جهانی اقلیم (مطالعه موردی: استان یزد)، مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۰(۳۲)، ۹۷-۱۱۲. ۲۰۲۱,۱۰,۳۲,۵۱DEEJ./۲۲۰۵۲،۱۰

خدائی، مهسا؛ شاد، روزبه؛ مقصودی، یاسر. (۱۳۹۴). معرفی شاخص‌های ماهوارهای خشکسالی و ارزیابی عملکرد آنها، همایش ملی مهندسی عمران و پژوهش‌های نیاز محور، مشهد. ۴۶۱۲۴۵https://civilica.com/doc/

خلیلی فرد، رامین؛ کرکه آبادی، زینب. (۱۳۹۷). بررسی اقلیم، زمین‌شناسی، شیب و عوامل محیطی در شهر شهرکرد و اطراف آن با توجه به نقشه‌های جغرافیایی، کنفرانس بین‌المللی امنیت، پیشرفت و توسعه پایدار مناطق مرزی، سرزمینی و کلان‌شهرها، راه‌کارها و چالش‌ها با محوریت پدافند غیر عامل و مدیریت بحران، تهران، https://civilica.com/doc/876098

دماوندی، علی اکبر؛ رحیمی، محمد؛ یزدانی، محمدرضا؛ نوروزی، علی اکبر. (۱۳۹۵). پایش مکانی خشکسالی کشاورزی از طریق سری‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST داده‌های MODIS (مطالعه موردی: استان مرکزی)، اطلاعات جغرافیایی، ۲۵(۹۹)، ۱۱۵-۱۲۶. /fa۲۵۳۱۵۸https://sid.ir/paper

زارع بیدکی، رفعت؛ یزدان دوست، امید؛ رحیمیان، محمدحسن؛ قرهی، نسرین. (۱۴۰۱). تلفیق اطلاعات اقلیمی و سنجش‌ازدور در شاخص تلفیقی خشکسالی، به منظور پهنه‌بندی خشکسالی در دشت یزد - اردکان، مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی, ۲(۱), ۳۶-۴۸. doi: 0.22034/emj.2022.252719

شفیعی، بهمن؛ برقی، حمید؛ قنبری، یوسف. (۱۳۹۸). بررسی اثرات خشکسالی بر وضعیت اقتصادی، اجتماعی و محیطی نواحی روستایی از دید سرپرست خانوار (مطالعه موردی دهستان حسن آباد در شهرستان اسلام آباد غرب)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۱۹(۵۵)، ۱۷۳-۱۹۱. -fa.html۳۰۳۵-۱http://jgs.khu.ac.ir/article-

شهبازی، خسرو؛ حشمتی، مسیب؛ سعیدی فر، زهرا. (۱۳۹۹). بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی و خطر بیابان‌زایی در استان کرمانشاه، مدیریت بیابان، ۸(۱۶)، ۱۸۳-۲۰۰. ۲۴۳۱۳۶،۲۰۲۱JDMAL./۲۲۰۳۴،۱۰

طباطبایی زاده، منیرالسادات؛ هادیان، فاطمه؛ حسینی، سید زین‌العابدین؛ برخورداری، جلال؛ خسروی، حسن. (۱۳۹۳). بررسی سازگاری گیاهان مناطق بیابانی نسبت به تغییرات بارندگی با استفاده از شاخص گیاهی NDVI (مطالعه موردی: دشت اردکان-عقدا)، اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۵(۱)، ۲۳-۳۶. /۹۸۳۴۴۰https://sanad.iau.ir/Journal/nei/Article

عربی، زهرا؛ محمدی، شاهین. (۱۴۰۰). پایش مکانی- زمانی الگوی خشکسالی با استفاده از محصولات ماهواره‌ای در کشور ایران در طول دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸، مخاطرات محیط طبیعی، /۲۰۲۱,۳۴۷۸۵,۱۶۷۹jneh.۲۲۱۱۱،۱۰https://doi.org

عظیمی، سجاد؛ خوش روش، مجتبی؛ قلعه نویی، محمدامین؛ پیروزی نژاد، سجاد. (۱۳۹۶). ارزیابی شاخص SPI جهت پهنه‌بندی شدت خشکسالی با مقایسه سه روش درون‌یابی Ordinary Kriging، IDW و Spline (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، https://civilica.com/doc/661411.

کاظم‌پور چورسی، سیما؛ عرفانیان، مهدی؛ عبادی نهاری، زهرا. (۱۳۹۸). ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای MODIS و TRMM در پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، ۳۰(۲ (پیاپی ۷۴))، ۱۷-۳۳. https://doi.org/۱۰,۲۲۱۰۸/gep.۲۰۱۹,۱۱۵۳۸۱,۱۱۱۵

کرمی، عزت اله. (۱۳۹۵). تغییر اقلیم، خشکسالی و تنگدستی در ایران: نگاهی به آینده، پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱(۱)، ۶۳-۸۰. https://doi.org/۱۰,۲۲۰۴۷/srjasnr.۲۰۱۶,۱۱۰۵۳۲

محیط اصفهانی، پوریا؛ سلطانی کوپایی، سعید؛ مدرس، رضا؛ پورمنافی، سعید. (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص خشکسالی چندمتغیره MSDI و پایش خشکسالی هواشناسی - کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۴(۳)، ۳۳-۴۷. https://sid.ir/paper/۳۸۹۸۵۸en/

مصطفی‌زاده، رئوف؛ ذبیحی، محسن. (۱۳۹۵). تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان)، فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۳۳-۶۴۳. https://doi.org/۱۰,۲۲۰۵۹/jesphys.۲۰۱۶,۵۷۸۸۱/

نظری پور، حمید. (۱۳۹۴). توسعه یک شاخص ترکیبی چندمتغیره بر پایه تحلیل مؤلفه مبنا برای ارزیابی خشکسالی‌های آب – هواشناختی در جنوب‌شرق ایران (مطالعه موردی: حوضه سد پیشین)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴(۳)، ۹۱-۱۱۲. doi: 10.22067/geo.v4i3.31626

نظری‌پور، حمید؛ کریمی، زهرا؛ صداقت، مهدی. (۱۳۹۵). ارزیابی خشکسالی هیدرو - متئورولوژیکی برپایه شاخص تلفیقی خشکسالی و پیش‌بینی آن با زنجیره مارکوف در حوضه رودخانه سرباز (جنوب شرق ایران). علوم آب و خاک; ۲۰ (۷۵) :۱۵۱-۱۶۹. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3282-fa.html

نظری‌پور، حمید؛ کریمی، زهرا؛ صداقت، مهدی. (۱۳۹۵). ارزیابی خشکسالی هیدرو - متئورولوژیکی برپایه شاخص تلفیقی خشکسالی و پیش‌بینی آن با زنجیره مارکوف در حوضه رودخانه سرباز (جنوب شرق ایران). علوم آب و خاک; ۲۰ (۷۵) :۱۵۱-۱۶۹. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3282-fa.html

Abramowitz, M., Stegun, I.A., (1968); Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables (Vol. 55), Courier Corporation.

Alahacoon, N., Edirisinghe, M. (2022); A comprehensive assessment of remote sensing and traditionally based drought monitoring indices at global and regional scale. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 13(1), 762-799. https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2044394

Al Adaileh, H., Al Qinna, M., Barta, K., Al-Karablieh, E., Rakonczai, J., Alobeiaat, A., (2019). A Drought Adaptation Management System for Groundwater Resources Based on Combined Drought Index and Vulnerability Analysis. Earth Systems and Environment, 3, 445–461. https://doi.org/10.1007/s41748-019-00118-9.

Al-Bakri, J. T., Alnaimat, M. J., Al-Karablieh, E., & Qaryouti, E. A. (2019). Assessment of combined drought index and mapping of drought vulnerability in Jordan. International Journal of Engine Research Application, 9(3), 59-68. DOI:10.9790/9622-0903015967.

Asadi Zarch, MA., (2022); Past and Future Global Drought Assessment. Water Resources Management, 36, 5259-5276. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03304-z

Asadi Zarch, M.A., Sivakumar, B., Sharma, A., (2015); Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI), Journal of Hydrology, 526, 183-195. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071

Ault, T. R. (2020); On the essentials of drought in a changing climate. Science, 368(6488), 256-260. https://doi.org/10.1126/science.aaz5492

Balint, Z., Mutua, F., Muchiri, P., Omuto, C. T. (2013); Monitoring drought with the combined drought index in Kenya, In Developments in earth surface processes (Vol. 16, pp. 341-356). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00023-2

Bayissa, Y. A., Tadesse, T., Svoboda, M., Wardlow, B., Poulsen, C., Swigart, J., Van Andel, S. J. (2019); Developing a satellite-based combined drought indicator to monitor agricultural drought: A case study for Ethiopia, GIScience & Remote Sensing, 56(5), 718-748. https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1552508

Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y. (2013); A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, 245-253. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010

Ghazala, Q., Shahina, T., Shahzada, A., Muhammad, L., (2021); Evaluation of a composite drought index to identify seasonal drought and its associated atmospheric dynamics in Northern Punjab, Pakistan, Journal of Arid Environments, 185, 104332. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104332.

Ji, L., Peters, A. J. (2003); Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, Remote sensing of Environment, 87(1), 85-98. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3

Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., Tsooj, S. (2004); Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices, International Journal of Remote Sensing, 25(14), 2889-2896. https://doi.org/10.1080/01431160410001697619

Kogan, F. N. (1995); Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection, Advances in space research, 15(11), 91-100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T

Kukunuri, A. N. J., Murugan, D., Singh, D. (2020); Variance-based fusion of VCI and TCI for efficient classification of agriculture drought using MODIS data, Geocarto International, 37(10), 2871–2892. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1837256

Liu, Q., Zhang, S., Zhang, H., Bai, Y., Zhang, J. (2020); Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. Science of the total environment, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134585

Livada, I., Assimakopoulos, V. (2007); Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI), Theor. Appl. Climatol, 89, 143–153 (2007). https://doi.org/10.1007/s00704-005-0227-z

Maina, F. Z., Kumar, S. V. (2023); diverging trends in rain-on-snow over High Mountain Asia. Earth's Future, 11(3), e2022EF003009. https://doi.org/10.1029/2022EF003009

McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993); The relationship of drought frequency and duration to time scales, In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

Orimoloye, I. R., Belle, J. A., Orimoloye, Y. M., Olusola, A. O., Ololade, O. O. (2022); Drought: A common environmental disaster, Atmosphere, 13(1), 111. https://doi.org/10.3390/atmos13010111

Parvaze, S., Kumar, R., Khan, J. N., & Parvaze, S. (2023); Climate change, drought, and water resources. In Integrated Drought Management, Volume 1 (pp. 541-568). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003276555

Pratap, S., Markonis, Y. (2022); The response of the hydrological cycle to temperature changes in recent and distant climatic history, Progress in Earth and Planetary Science, 9(1), 30. https://doi.org/10.1186/s40645-022-00489-0

Torabi Haghighi, A., Abou Zaki, N., Rossi, P. M., Noori, R., Hekmatzadeh, A. A., Saremi, H., Kløve, B. (2020); Unsustainability syndrome from meteorological to agricultural drought in arid and semi-arid regions. Water, 12(3), 838. https://doi.org/10.3390/w12030838

Zhang, R., Shangguan, W., Liu, J., Dong, W., & Wu, D. (2024); Assessing meteorological and agricultural drought characteristics and drought propagation in Guangdong, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 51, 101611. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101611

Zou, L., Cao, S., Sanchez-Azofeifa, A. (2020); Evaluating the utility of various drought indices to monitor meteorological drought in Tropical Dry Forests, Int J Biometeorol, 64, 701–711, https://doi.org/10.1007/s00484-019-01858-z.

University of Sistan and Baluchestan
Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

References

References (in Persian)

Arabi, Z., & Mohammadi, S. (2021); Monitoring Spatio-temporal pattern of drought using multi-satellite data during the period 2000-2018 (Case study: Iran), Journal of Natural Environmental Hazards,10(30),83-104, https://doi.org/10.22111/jneh.2021.34785.1679 [In Persian]

Arjmandi, Z., Asadi Zarch, M. A., Seyed Zeynalabedin, H., & Mohammad Reza, E. (2022); Forecasting Drought in Arid Regions Using Global Climate Models: A Case Study of Yazd Province, Iran. Desert Ecosystem Engineering, 10(32), 97-112. 10.22052/DEEJ.2021.10.32.51 [In Persian]

Azimi, S., Khosh Ravesh, M., Ghale Noee, M.A., Pirouzi Nezhad, S. (2017); Evaluation of SPI index for drought severity zoning by comparing three interpolation methods Ordinary Kriging, IDW and Spline (case study: Razavi Khorasan province), The second national hydrology conference of Iran, Shahrekord. https://civilica.com/doc/661411 [In Persian]

Damavandi, A., A., Rahimi, M., Yazdani, M., R., Noroozi, A., A., (2016); Spatial Monitoring of Agricultural Drought through Time Series of NDVI and LST indices of MODIS data (Case study: Markazi Province), Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 25(99), 115-126. https://sid.ir/paper/253158/en [In Persian]

Karami, E., (2016); Climate Change, Drought and Poverty in Iran: A Perspective of Future, Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 1(1), 63-80. https://doi.org/10.22047/srjasnr.2016.110532 [In Persian]

Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., Ebadi Nehari, Z., (2019); Evaluation of MODIS and TRMM Satellite Data for Drought Monitoring in the Urmia Lake Basin, Journal of Geography and Environmental Planning, 30(2), 17-34. https://doi.org/10.22108/gep.2019.115381.1115 [In Persian]

Khalil Fard, R., Karke Abadi, Z., (2019), Reviews of climate, geology, slope and environmental factors in Shahrekord city and its surroundings according to geographic maps, International Conference on Security, Progress and Sustainable Development of Border Regions, Territories and Metropolises, Solutions and Challenges with a focus on passive defense and crisis management, Tehran. https://civilica.com/doc/876098 [In Persian]

Khodaei, M., Shad, R., Maghsoudi, Y., (2015); Introducing drought satellite indicators and evaluating their performance, National Conference on Civil Engineering and Needs-Based Research, Mashhad. https://civilica.com/doc/461245 [In Persian]

Mohit Esdahani, P., Soltani, S., Modarres, R., Pourmanafi, S., (2020); Assessment of Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) and Meteoro-Agricultural Drought Monitoring in Chaharmahal and Bakhtiari Province. Water And Soil Science (Journal of Science And Technology of Agriculture And Natural Resources), 24(3), 33-47. https://sid.ir/paper/389858/en [In Persian]

Mostafazadeh, R., Zabihi, M., (2016); Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province), Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 42, No. 3, P. 13. https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.57881 [In Persian]

Nazaripour, H. (2015). Development of a New Comprehensive Multivariate Aggregate Drought Index (ADI) based on Principal Component Analysis (PCA) for Hydro-Meteorological Droughts Assessment in the Southeast of Iran (Case Study: Pishin Dam Basin). Journal of Geography and Environmental Hazards, 4(3), 91-112. doi: 10.22067/geo.v4i3.31626 [In Persian]

Nazaripour, H., Karimi, Z., Sedaghat, M., (2016); Hydro-Meteorological Drought Assessment Based on Aggregate Drought Index (ADI) and its prediction with Markov Chain in Sarbaz River Basin (Southeast of Iran). jwss 2016; 20 (75) :151-169. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3282-en.html [In Persian]

Shafii, B., Barghi, H., Ghanbari, Y., (2019); The study of drought effects on the economic, social and environmental conditions of rural areas from the viewpoint of heads of households, Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 19 (55):173-191. http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3035-fa.html [In Persian]

Shahbazi, K., Heshmati, M., Saeedifar, Z., (2021); Investigating the Effect of Climate Change on Drought and Desertification Risk in Kermanshah Province, Journal of Desert Management, 8 (16), 183-200, 10.22034/JDMAL.2021.243136 [In Persian]

Tabatabaii Zadeh, M., Hadian, F., Hosseini, S.Z., Barkhordari, J., Khosravi, H., (2014); Investigation of arid vegetation compatibility toward precipitation variation with NDVI index (a case study, Ardakan-Aghda plain), Journal of Natural Ecosystems of Iran, 5(1), 23-36. https://sanad.iau.ir/Journal/nei/Article/983440 [In Persian]

Zare Bidaki, R., Yazdandoost, O., Rahimian, M. H., Gharahi, N., (2022); Combining climate information and remote sensing in the integrated drought index, for zoning of drought the Yazd-Ardakan plain. Management of Natural Ecosystems, 2(1), 36-48. doi: 10.22034/emj.2022.252719 [In Persian]

References (in English)

Abramowitz, M., Stegun, I.A., (1968); Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables (Vol. 55), Courier Corporation.

Alahacoon, N., Edirisinghe, M. (2022); A comprehensive assessment of remote sensing and traditionally based drought monitoring indices at global and regional scale. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 13(1), 762-799. https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2044394

Al Adaileh, H., Al Qinna, M., Barta, K., Al-Karablieh, E., Rakonczai, J., Alobeiaat, A., (2019). A Drought Adaptation Management System for Groundwater Resources Based on Combined Drought Index and Vulnerability Analysis. Earth Systems and Environment, 3, 445–461. https://doi.org/10.1007/s41748-019-00118-9.

Al-Bakri, J. T., Alnaimat, M. J., Al-Karablieh, E., & Qaryouti, E. A. (2019). Assessment of combined drought index and mapping of drought vulnerability in Jordan. International Journal of Engine Research Application, 9(3), 59-68. DOI:10.9790/9622-0903015967.

Asadi Zarch, MA., (2022); Past and Future Global Drought Assessment. Water Resources Management, 36, 5259-5276. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03304-z

Asadi Zarch, M.A., Sivakumar, B., Sharma, A., (2015); Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI), Journal of Hydrology, 526, 183-195. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071

Ault, T. R. (2020); On the essentials of drought in a changing climate. Science, 368(6488), 256-260. https://doi.org/10.1126/science.aaz5492

Balint, Z., Mutua, F., Muchiri, P., Omuto, C. T. (2013); Monitoring drought with the combined drought index in Kenya, In Developments in earth surface processes (Vol. 16, pp. 341-356). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00023-2

Bayissa, Y. A., Tadesse, T., Svoboda, M., Wardlow, B., Poulsen, C., Swigart, J., Van Andel, S. J. (2019); Developing a satellite-based combined drought indicator to monitor agricultural drought: A case study for Ethiopia, GIScience & Remote Sensing, 56(5), 718-748. https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1552508

Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y. (2013); A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, 245-253. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010

Ghazala, Q., Shahina, T., Shahzada, A., Muhammad, L., (2021); Evaluation of a composite drought index to identify seasonal drought and its associated atmospheric dynamics in Northern Punjab, Pakistan, Journal of Arid Environments, 185, 104332. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104332.

Ji, L., Peters, A. J. (2003); Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, Remote sensing of Environment, 87(1), 85-98. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3

Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., Tsooj, S. (2004); Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices, International Journal of Remote Sensing, 25(14), 2889-2896. https://doi.org/10.1080/01431160410001697619

Kogan, F. N. (1995); Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection, Advances in space research, 15(11), 91-100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T

Kukunuri, A. N. J., Murugan, D., Singh, D. (2020); Variance-based fusion of VCI and TCI for efficient classification of agriculture drought using MODIS data, Geocarto International, 37(10), 2871–2892. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1837256

Liu, Q., Zhang, S., Zhang, H., Bai, Y., Zhang, J. (2020); Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. Science of the total environment, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134585

Livada, I., Assimakopoulos, V. (2007); Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI), Theor. Appl. Climatol, 89, 143–153 (2007). https://doi.org/10.1007/s00704-005-0227-z

Maina, F. Z., Kumar, S. V. (2023); diverging trends in rain-on-snow over High Mountain Asia. Earth's Future, 11(3), e2022EF003009. https://doi.org/10.1029/2022EF003009

McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993); The relationship of drought frequency and duration to time scales, In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

Orimoloye, I. R., Belle, J. A., Orimoloye, Y. M., Olusola, A. O., Ololade, O. O. (2022); Drought: A common environmental disaster, Atmosphere, 13(1), 111. https://doi.org/10.3390/atmos13010111

Parvaze, S., Kumar, R., Khan, J. N., & Parvaze, S. (2023); Climate change, drought, and water resources. In Integrated Drought Management, Volume 1 (pp. 541-568). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003276555

Pratap, S., Markonis, Y. (2022); The response of the hydrological cycle to temperature changes in recent and distant climatic history, Progress in Earth and Planetary Science, 9(1), 30. https://doi.org/10.1186/s40645-022-00489-0

Torabi Haghighi, A., Abou Zaki, N., Rossi, P. M., Noori, R., Hekmatzadeh, A. A., Saremi, H., Kløve, B. (2020); Unsustainability syndrome from meteorological to agricultural drought in arid and semi-arid regions. Water, 12(3), 838. https://doi.org/10.3390/w12030838

Zhang, R., Shangguan, W., Liu, J., Dong, W., & Wu, D. (2024); Assessing meteorological and agricultural drought characteristics and drought propagation in Guangdong, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 51, 101611. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101611

Zou, L., Cao, S., Sanchez-Azofeifa, A. (2020); Evaluating the utility of various drought indices to monitor meteorological drought in Tropical Dry Forests, Int J Biometeorol, 64, 701–711, https://doi.org/10.1007/s00484-019-01858-z.