

## پایش زمانی - مکانی خشک‌سالی اقلیمی بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی VCI و SPI

- محسن رضوی پاشاییگ<sup>۱</sup>، رقیه قاسم پور\*<sup>۲</sup>، کریم امینی نیا<sup>۳</sup>، سید مهدی ثاقبیان<sup>۴</sup>
- ۱- دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر.  
۲- گروه آب دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی استانبول، استانبول، ترکیه.  
۳- گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر.  
۴- گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر.

### چکیده

خشک‌سالی به عنوان یک بلای طبیعی خزنده از جمله مخاطرات اصلی است که بر کشاورزی، امنیت غذایی و معیشت کلی جمعیت در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. با توجه به اثرات مستقیم و غیرمستقیمی که خشک‌سالی بر منابع آب و متعاقب آن بر تاسیسات زیر بنایی وارد می‌آورد، مطالعه زمانی و مکانی این پدیده برای کاهش اثرات نامطلوب آن بسیار مهم می‌باشد. با استفاده از دانش سنجش از دور می‌توان خشک‌سالی را از طریق اثراتی که بر روی گیاهان دارد، مطالعه و به نتایج دقیق‌تری دست یافت. هدف از این تحقیق، بررسی زمانی و مکانی پدیده خشک‌سالی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای و همچنین شاخص شرایط گیاهی VCI است. بدین منظور، از شاخص‌های SPI و VCI محاسبه شده در بازه زمانی ۱۳۷۳-۱۳۹۵ استفاده شد. این دو متغیر در دو زمان (به جهت مقایسه شرایط) خشک‌سالی و ترسالی مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت شناسایی مناطق همگن از نظر خشک‌سالی، پهنه‌بندی منطقه بر اساس داده‌های زمینی و ماهواره‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که در طی دوره آماری، منطقه مطالعاتی با طبقات مختلفی از خشک‌سالی مواجه شده است، اما بیشتر ایستگاه‌ها دارای شرایط خشک‌سالی خفیف و متوسط می‌باشند. بر اساس شاخص‌های SPI و VCI مشاهده شد که سال ۱۳۸۶ خشک‌ترین و سال ۱۳۸۸ مرطوب‌ترین سال‌ها می‌باشند. نتایج پهنه‌بندی منطقه نشان داد که نواحی جنوبی استان بیشتر مستعد خشک‌سالی بوده و فراوانی وقوع خشک‌سالی شدید در مناطق جنوبی استان محتمل‌تر است. همچنین، روند تغییرات شاخص SPI برحسب شیب خط شن و مقدار من کندال به صورت مثبت به دست آمد. بطور کلی، مشخص گردید که شاخص شرایط گیاهی VCI جهت تعیین سال‌های خشک و تر روش بسیار مناسبی بوده و تطابق خوبی با نتایج شاخص SPI دارد. لذا، در مناطقی که ایستگاه‌های هواشناسی به صورت پراکنده بوده و یا اصلاً وجود ندارد می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد خشک‌سالی استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: تغییرات زمانی - مکانی، تصاویر ماهواره‌ای، خشک‌سالی، SPI, VCI.

## مقدمه

خشک‌سالی یکی از مهم‌ترین حوادث طبیعی تأثیرگذار بر بخش کشاورزی و منابع آب می‌باشد. این پدیده به‌عنوان پدیده ناگوار آب و هوایی به‌طور مستقیم جوامع را از طریق تغییرات در دسترس به منابع آب تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mokarram et al., 2021). خشک‌سالی هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی را به همراه داشته و خساراتی که به آن نسبت داده می‌شود به‌صورت غیرمنتظره‌ای رو به افزایش است. انسان با تمام پیشرفت‌های علمی و فنی هنوز نتوانسته زمان و محل وقوع خشک‌سالی‌های شدید را به‌طور دقیق مشخص نماید (Kikon and Deka, 2022). خشک‌سالی و بحران‌های ناشی از آن، از مشکلات عمده مناطق مختلف کشورمان است که گستره پهنای از سرزمین ما را در بر می‌گیرد. پدیده خشک‌سالی، پدیده‌ای پیچیده با اثرات متفاوت است. لذا، از شاخص‌هایی برای تعیین شدت و وسعت خشک‌سالی استفاده می‌شود. بیشتر شاخص‌هایی که در این زمینه به‌کار گرفته می‌شوند، بر اساس معیارهای هواشناسی استوار بوده و متغیرهایی مانند میزان رطوبت خاک، دما و یا به‌خصوص میزان بارش را مورد بررسی قرار می‌دهند (Jehanzaib et al., 2020). بارش از مهم‌ترین پارامترهایی است که در محاسبات شاخص‌های خشک‌سالی استفاده می‌شود. بر این اساس هرگاه بارش طی یک دوره زمانی متوالی زیر حالت نرمال قرار گیرد خشک‌سالی رخ می‌دهد. مک کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ تعریف تازه‌ای از خشک‌سالی تحت عنوان نمایه بارش استاندارد شده یا SPI ارائه نمودند و معتقد بودند که این نمایه بی‌بعد بوده و در هر مقیاس زمانی و مکانی قابل اجرا است (Mirabbasi et al., 2013). از آنجایی که ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش پراکنده بوده و دسترسی به اندازه‌گیری‌های بارش معمولاً با تاخیر زمانی همراه است، از این رو وجود روش‌های دیگری برای بررسی خشک‌سالی ضروری است. در این راستا اطلاعات ماهواره‌ای و سنجنش از دور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با فراهم شدن داده‌های ماهواره‌ای متفاوت و فراگیر شدن استفاده از آن‌ها، امکان مطالعه خشک‌سالی با استفاده از این تکنولوژی فراهم شده است. با استفاده از روش‌های سنجنش از دور می‌توان خشک‌سالی را از طریق اثراتی که بر روی گیاهان و کشاورزی دارد، مطالعه نمود و در نتیجه به نتایج دقیق‌تری برای مدل‌سازی خشک‌سالی دست یافت (Abdulrazzaq et al., 2019). در حال حاضر، تصاویر

ماهواره‌ای به‌طور منظم و با دقت تفکیک مکانی بالا، از سطح زمین تهیه می‌شوند و می‌توانند شرایط نظم و گستردگی فضایی را فراهم کنند. از مزایای استفاده از سنجنش از دور نسبت به روش‌های هواشناسی می‌توان به افزایش نقاط نمونه‌برداری، سطح پوشش وسیع‌تر، قدرت تفکیک زمانی بالاتر و هزینه کم‌تر اشاره کرد (Rhee et al., 2010). تاکنون مطالعات زیادی در مورد پایش زمانی و مکانی خشک‌سالی صورت گرفته است. ادیب و گرجی‌زاده (۱۳۹۵) در تحقیقی به‌منظور بررسی خشک‌سالی در حوضه آبریز دز از داده‌های بارندگی سالانه ایستگاه‌های تنگ‌پنج و تله‌زنگ سد دز طی یک دوره آماری مشترک ۱۷ ساله استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشترین وقوع خشک‌سالی شدید براساس شاخص‌های PNI، ZSI، MCZI مربوط به ایستگاه تله زنگ می‌باشد. مقیمی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شاخص RDI یک‌ماهه و مدل زنجیره مارکوف شدت حالت‌های مختلف خشک‌سالی و وقوع حالت‌های مورد انتظار در استان فارس را بررسی کردند. نتیجه نشان داد که احتمال انتقال به حالت نرمال بیشتر از دیگر حالت‌ها می‌باشد. ترابی پوده و همکاران (۱۳۹۷) به تخمین شاخص بارش استاندارد ۲۱ ماهه چهار ایستگاه باران سنجنی در استان لرستان با استفاده از مدل شبکه عصبی موجک پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این روش می‌تواند در زمینه تخمین خشک‌سالی موثر بوده و به نوبه خود برای تسهیل توسعه و پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریتی جهت جلوگیری از ایجاد خشک‌سالی مفید باشد. سیرداس و سن (Sirdas and Sen, 2003) با تحلیل مکانی - زمانی خشک‌سالی در منطقه Trakya در ترکیه جهت بررسی شدت، مدت و فراوانی و سطح درگیر خشک‌سالی با استفاده از روش آماری Run و z-score برای تعیین ویژگی‌های خشک‌سالی و از روش میان‌یابی kriging جهت تحلیل فضایی برای ترسیم نقشه توانستند به این نتیجه دست یابند که بین مدت و بزرگی خشک‌سالی ارتباط وجود دارد. فیشر و همکاران (Fisher et al., 2013) از نمایه دبی استاندارد شده در مقیاس دو ساله برای تحلیل خشک‌سالی‌ها در ۶ حوضه جنوب چین استفاده نمودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که برخی از حوضه‌ها یک دوره خشک‌سالی را تجربه کرده‌اند که بیشتر شامل حوضه‌های شمالی در جنوب چین می‌باشند. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشک‌سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش

فصل زراعی اتیوپی پرداختند. نتایج نشان داد که ارتفاعات مرکزی و بخش شمالغربی اتیوپی که شامل زمین‌های زراعی است، دارای روند کاهشی در مقدار بارش و پوشش گیاهی است. بنتو و همکاران (Bento et al, 2020) با استفاده از شاخص‌های SPI، VCI، TCI و شاخص سلامت گیاه (VHI) به ارزیابی خشکسالی در دنیا پرداختند و بیان نمودند که با استفاده از شاخص‌های اشاره شده می‌توان دوره‌های خشکسالی شدید در اراضی خشک را بهتر شناسایی کرد. همان‌طور که اشاره شد از مهم‌ترین پارامترهایی که در محاسبات شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد بارش است. بر این اساس هرگاه بارش طی یک دوره زمانی متوالی زیر حالت نرمال قرار گیرد خشکسالی رخ می‌دهد. از آنجایی که ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش پراکنده بوده و دسترسی به اندازه‌گیری‌های بارش معمولاً با تأخیر زمانی همراه است، از این‌رو وجود روش‌های دیگری برای بررسی خشکسالی ضروری است. در این راستا اطلاعات ماهواره‌ای و سنجش از دور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. یکی از روش‌های مناسب در ارزیابی و تحلیل خشکسالی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص VCI می‌باشد. از آنجا که ارزیابی و پیش‌خشکسالی می‌تواند تا حدود زیادی مسئولان را در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اجرایی یاری نماید، هدف اصلی این تحقیق بررسی زمانی و مکانی خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است. بنابراین، از دو شاخص SPI و VCI در ارزیابی و تحلیل خشکسالی‌های استان آذربایجان شرقی طی بازه زمانی (۱۳۷۳-۱۳۹۵) استفاده گردید و روند تغییرات خشکسالی در این دوره و کارایی شاخص‌های یاد شده مورد بررسی قرار گرفت. جهت ارزیابی کارایی داده‌های ماهواره‌ای، پس از استخراج داده‌های بارش مقادیر SPI محاسبه گردید و نتایج با شاخص SPI به‌دست آمده از داده‌های زمینی مقایسه شد. همچنین، با پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی بر اساس داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مناطق همگن از نظر خشکسالی شناسایی گردید.

## مواد و روش‌ها

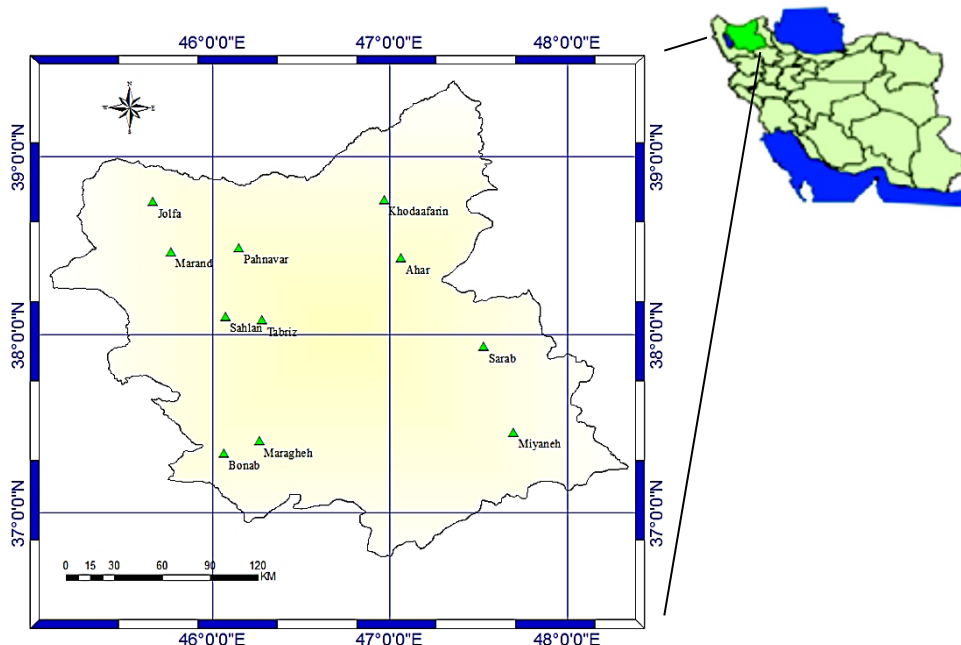
### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه استان آذربایجان شرقی می‌باشد. این استان در مختصات ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۴

از شاخص‌های TCI، VCI و SPI استفاده شده است. نتایج نشان داد که شاخص VCI و سنجنده MODIS می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در ارزیابی خشکسالی باشند. مددی و همکاران (۱۳۹۵) برای پیش‌خشکسالی در حوضه مرزی غرب (شامل استان‌های ایلام، کرمانشاه، کردستان و لرستان)، با استفاده از داده‌های هواشناسی (شامل ۳۰ ایستگاه سینوپتیک و کلیماتولوژی)، اقدام به ارزیابی داده‌های ماهانه ماهواره TRMM(3B43) کردند. پس از ارزیابی دقت و صحت داده‌های ماهانه ماهواره، برآورد مقدار خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بارش ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بین شاخص SPI حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و ایستگاه‌های زمینی در همه مقیاس‌های بررسی شده ارتباط نزدیکی موجود است و سال ۲۰۰۸ به عنوان سال کم باران معرفی شد. شریفی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS و داده‌های بارش رستری ماهانه CHIRPS در محدوده استان همدان به تحلیل اثر خشکسالی بر پارامترهای فنولوژی (شامل ماکزیمم مقدار NDVI، دامنه و مقادیر پایه) شاخص گیاهی NDVI پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خشکسالی بر پارامترهای فنولوژیکی شاخص گیاهی تأثیر مستقیم دارد. ژیانگ و همکاران (Xiang-Hu et al., 2013) با استفاده از تصاویر TRMM تفاوت بین بارش TRMM و ایستگاه‌های باران‌سنج را در دو مقیاس روزانه و ماهانه، در حوضه Xinjiang طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۳ بررسی کردند. لی و همکاران (Li et al., 2013) به تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهانه ماهواره TRMM پرداختند و سیر تغییرات شدت خشکسالی را طی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ بررسی کردند. یان و همکاران (Yan et al., 2013) داده‌های بارش ماهانه TRMM با داده‌های زمینی بارش ۴۰ ایستگاه در حوضه Hai، برای دوره آماری ۱۹۹۸-۲۰۱۰ مقایسه کردند و نشان دادند که همبستگی بسیار بالایی بین این دو منبع داده برقرار می‌باشد، سپس از این مقادیر بارش به‌عنوان ورودی برای محاسبه شاخص استاندارد بارش استفاده نمودند، نتایج نشان داد که شاخص استاندارد در مقیاس سه‌ماهه بهترین خروجی را نمایش می‌دهد. لیو و مولونالم (Liou and Mulualem, 2019) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مربوط به شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و دمای سطح زمین، به ارزیابی الگوهای خشکسالی در طول

سهلان، پهناور، میانه، کلبر، مرند و بناب می‌باشد. از مهم‌ترین عوارض توپوگرافیک این منطقه می‌توان به وجود کوهستان سهند و رشته‌کوه‌های ارسباران و میشو اشاره کرد. همچنین دشت‌های تبریز، سراب و اهر مهم‌ترین مناطق پست ارتفاعی استان را تشکیل می‌دهند.

دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. در شکل ۱، موقعیت استان آذربایجان شرقی در نقشه ایران و پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی نشان داده شده است. منطقه مورد مطالعه دارای یازده ایستگاه سینوپتیک شامل ایستگاه‌های اهر، سراب، تبریز، جلفا، مراغه،



شکل ۱- نقشه استان آذربایجان شرقی و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

(بارش بیشتر از حال نرمال) به کار رفته و این امکان را به تحلیل‌گر می‌دهد که شدت، مدت، فراوانی و زمان شروع و خاتمه خشک‌سالی‌ها را شناسایی کند. از آنجا که این شاخص بدون بعد می‌باشد از آن می‌توان برای مقایسه اطلاعات مناطق مختلف و همچنین برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی استفاده نمود. فرمول شاخص SPI به صورت زیر می‌تواند بیان شود که در آن P بارش، P\* میانگین بارش و  $\sigma_P$  انحراف معیار بارندگی است.

$$SPI = \frac{P - P^*}{\sigma_P} \quad (1)$$

#### شاخص شرایط پوشش گیاهی VCI

شاخص VCI نشان می‌دهد که چگونه NDVI ماه جاری به NDVI محاسبه‌شده از طریق ثبت داده‌های درازمدت نزدیک می‌شود.

$$VCI = \frac{(NDVI_i - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه فوق NDVI<sub>max</sub> و NDVI<sub>min</sub> از طریق داده‌های ثبت‌شده درازمدت (به عنوان مثال ۲۳ ساله) برای ماه مورد

#### شاخص استاندارد شده بارش (SPI)

شاخص استاندارد شده بارش روشی است که برای اولین بار توسط مک‌کی و همکاران (Mckee et al., 1993) معرفی گردید. روش SPI توسط اقلیم‌شناسان برای انجام مطالعات بر روی خشک‌سالی‌ها استفاده می‌شود و از ویژگی‌های آن، این است که در هر مقیاس زمانی و مکانی قابلیت تحلیل خشک‌سالی‌ها را دارد. این شاخص اساساً در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه کاربرد دارد. SPI بر اساس احتمال تجمعی بارندگی بوده و توزیع گاما بهترین توزیع برای برازش داده‌ها در این روش می‌باشد به طوری که ابتدا داده‌ها با توزیع احتمال دو پارامتری گاما برازش داده شده و سپس به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد. استفاده از این روش بر روی داده‌های بارندگی منجر به نمایش دقیق و مؤثر آن از طریق تابع ریاضی احتمال تجمعی می‌گردد و به کمک آن می‌توان احتمال بارندگی را حول محور یک مقدار برآورد نمود (Michael, 2007). به عبارت دیگر، این شاخص امکان محاسبه مقادیر کمتر و بیشتر از حالت میانگین را به وجود می‌آورد و جهت پایش خشک‌سالی‌ها (بارش کمتر از حالت نرمال) و ترسالی‌ها

که VCI به صفر درصد نزدیک می‌شود، نشانگر یک ماه بسیار خشک بوده و وقتی که مقدار NDVI به مقدار ماکزیمم آن نزدیک می‌گردد وضعیت خشک‌سالی بهبود می‌یابد. مقادیر کم VCI برای فواصل زمانی متوالی اشاره به طولانی شدن دوره خشک‌سالی دارد (Thenkabail et al., 2004). در جدول ۱ طبقه‌بندی شاخص‌های SPI و VCI آورده شده است.

مطالعه محاسبه می‌شود و I نشان‌دهنده ماه مورد مطالعه در سال جاری می‌باشد. شرایط و وضعیت پوشش گیاهی توسط VCI، به صورت درصد بیان می‌شود. زمانی که مقدار VCI برابر ۱۰۰ باشد مقدار NDVI برای ماه جاری برابر NDVImax (بیشترین مقدار در دوره ۲۳ ساله) می‌باشد. درجه‌های مختلفی از شدت خشک‌سالی با VCI زیر ۴۰ نشان داده می‌شود. زمانی

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص‌های SPI (Kwak et al., 2016) و VCI (Zhao et al., 2022)

وضعیت خشک‌سالی	محدوده	وضعیت خشک‌سالی	محدوده
SPI		VCI	
خشک‌سالی بسیار شدید	$SPI \leq -2$	خشک‌سالی بسیار شدید	$< 10$
خشک‌سالی شدید	$-2 < SPI < -1.5$	خشک‌سالی شدید	$< 20$
خشک‌سالی متوسط	$-1.5 \leq SPI < -1$	خشک‌سالی متوسط	$< 30$
خشک‌سالی خفیف	$-1 \leq SPI < 0$	خشک‌سالی خفیف	$< 40$
ترسالی خفیف	$0 \leq SPI < 1$	ترسالی	$> 40$
ترسالی متوسط	$1 \leq SPI < 1.5$		
ترسالی شدید	$1.5 \leq SPI < 2$		
ترسالی بسیار شدید	$SPI \geq 2$		

به‌طور نرمال توزیع شده و دارای میانگین صفر و انحراف معیار زیر است:

$$(\sigma_{gg})_k = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum d(d-1)(2d+5)]}{18} \quad (5)$$

که در آن  $d$  تعداد دسته‌ها با داده‌های مساوی برای سری مشخصی از داده‌ها مانند داده‌های موجود برای ماه معین (فصل معین) یک ایستگاه در سال‌های مختلف برای متغیرهای مورد بررسی می‌باشد.  $S_{gk}$  به صورت زیر نرمال می‌شود:

$$S'_{gk} = S_{gk} - \text{sgn}(S_{gk}) \quad (6)$$

سپس آماره آزمون  $Z$  استاندارد شده که دارای توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس است، بشرح زیر بدست می‌آید:

$$Z_{gk} = \frac{S'_{gk}}{(\sigma_{gg})_k^{1/2}} \quad (7)$$

فرض صفر (عدم وجود روند در سطح معنی داری  $\alpha$ ) به شرطی که  $-Z_{1-\alpha/2} < Z_{gk} < Z_{1+\alpha/2}$  باشد، پذیرفته می‌شد. مقادیر  $\alpha$  به ترتیب برای متغیر تراز و متغیرهای کیفی ۰.۱ و ۰.۰۵ انتخاب می‌گردند.

### تشخیص روند سری زمانی با روش من‌کنندال (MK)

روش من‌کنندال یکی از روش‌های کلاسیک برای بررسی روند می‌باشد. در این روش، ابتدا داده‌های سری‌های زمانی  $m$  ماه برای  $n$  سال دوره آماری تمام  $t$  ایستگاه تهیه می‌شود. هر داده به صورت  $X_{igk}$  نمایش داده می‌شود، که در آن  $i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) نشان دهنده سال،  $g$  ( $g=1,2,\dots,m$ ) نشان دهنده ماه یا فصل و  $k$  ( $k=1,2,\dots,t$ ) نشان دهنده ایستگاه‌های اندازه‌گیری متغیرهای مورد بررسی می‌باشند. سری داده‌های موجود برای ماه  $g$ ام ایستگاه  $k$ ام به صورت  $\{X_{1gk}, X_{2gk}, X_{3gk}, \dots, X_{ngk}\}$  نمایش داده می‌شود. آماره آزمون من‌کنندال برای سری داده‌ها  $(S_{gk})$ ، که مجموع علامت‌های تفاضلات متوالی مشاهدات می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{gk} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_{jgk} - X_{igk}), \quad \forall 1 \leq i < j \leq n \quad (3)$$

$\text{sgn}(\theta)$  تابع علامت بوده که به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

من و کنندال نشان دادند که وقتی  $n \geq 10$  باشد، آماره  $S$  تقریباً

## روند کلی در نظر گرفته شده در تحقیق

در ابتدا، با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی مقدار شاخص SPI محاسبه شد و با استفاده از این مقادیر تغییرات مکانی شاخص SPI با استفاده از پهنه‌بندی برای منطقه انتخابی بررسی گردید. در گام بعدی تحقیق، شاخص SPI با استفاده از داده‌های بارشی که از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌گردند محاسبه شده و کارایی داده‌های بارش ماهواره‌ای در محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های ماهانه بارش برای ایستگاه‌های مد نظر برای دوره زمانی ۲۰۱۶-۱۹۹۹ با استفاده از ماهواره TRMM استخراج گردید و برای این کار از سامانه Google Earth Engine استفاده شد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های ماهانه (میلادی) بارش با کد 3B43 است که پس از فراخوانی تصاویر ماهواره‌ای، در سامانه Google Earth Engine با کدنویسی مورد پردازش قرار گرفته و مقادیر بارش بر اساس موقعیت ایستگاه مد نظر، استخراج گردید. با استفاده از این داده‌ها مقدار SPI سالیانه ایستگاه‌ها محاسبه شد و بر اساس میانگین شاخص SPI به پهنه‌بندی منطقه پرداخته شد.

در ادامه به بررسی کارایی شاخص VCI در تعیین سال‌های خشک و تر پرداخته شد. با دانستن سال‌های خشک و تر داده‌های مربوط به این سال‌ها از تصاویر ماهواره‌ای استخراج گردید. داده‌های دورسنجی مورد استفاده شامل داده‌های سنجنده MODIS از سری تصاویر ماهواره TERRA می‌باشد. در این تحقیق از محصولات شانزده روزه شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده استفاده گردید.

## نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج به دست آمده از خشک‌سالی اقلیمی مستخرج از داده‌های اخذ شده از ایستگاه‌های هواشناسی به صورت سری زمانی ارائه شده و سپس با تعیین سال‌های خشک‌سالی و ترسالی، نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی برای منطقه رسم شده و به ارزیابی این نقشه‌ها پرداخته می‌شود. در نهایت، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای کل منطقه و سال‌های خشک‌سالی و ترسالی شاخص VCI محاسبه شده و نتایج مقایسه می‌گردد.

## نتایج حاصل از تحلیل خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از

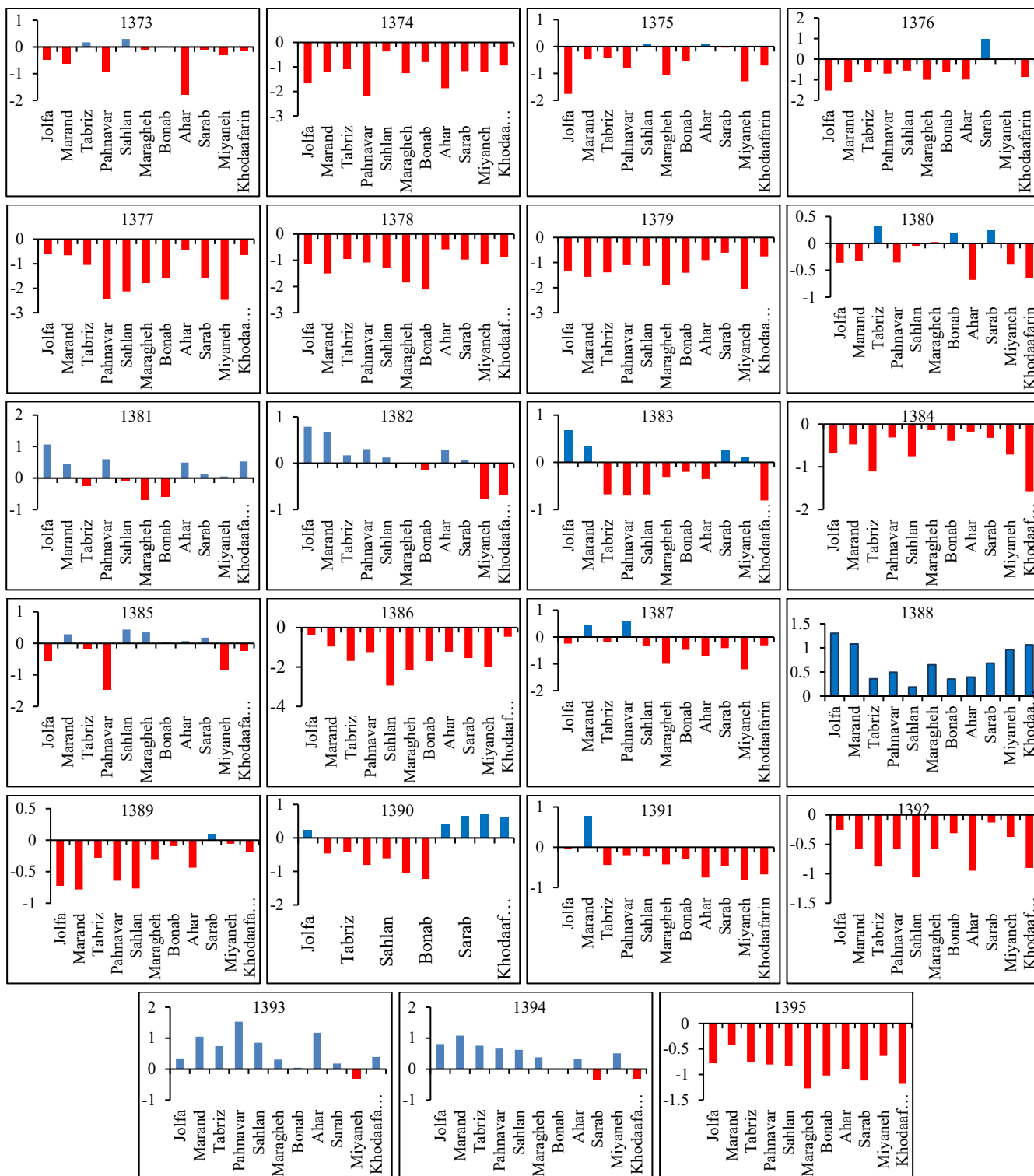
## داده‌های زمینی

با استفاده از نرم‌افزار DIP مقادیر سری زمانی شاخص SPI سالانه برای تمامی ایستگاه به دست آمد. در شکل ۲ نمودار شاخص SPI برای دوره ۲۳ ساله نشان داده شده است. زمانی که شاخص بارش استاندارد شده دارای توالی‌های منفی باشد؛ خشک‌سالی رخ می‌دهد. زمانی که مقادیر آن برابر با منفی یک و یا کمتر شود، خشک‌سالی تشدید می‌یابد. با مثبت شدن شاخص بارش استاندارد شده دوره خشک‌سالی خاتمه می‌یابد. مطابق با شکل ۲ مشاهده می‌گردد که در طی سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۷۹، ۱۳۸۳-۱۳۸۴، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹-۱۳۹۲ و ۱۳۹۵ سطوح مختلفی از خشک‌سالی در منطقه رخ داده است. اما بیشتر آن‌ها در شرایط خشک‌سالی خفیف و متوسط ( $-1.5 < SPI < 0$ ) قرار دارند. خشک‌سالی شدیدی نیز در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۶ مشاهده شد. همانطور که دیده می‌شود سال ۱۳۸۸ سال ترسالی بوده و مقادیر شاخص SPI برای تمامی ایستگاه‌ها بالای صفر قرار دارد. با بررسی شدت خشک‌سالی هر دوره می‌توان مقایسه کمی از شدت خشک‌سالی در ایستگاه‌ها و نواحی متفاوتی داشت. برای مثال تقریباً تمامی ایستگاه‌ها بیشترین تداوم خشک‌سالی را طی دوره خشک‌سالی ۱۳۷۳-۱۳۸۰ تجربه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ایستگاه‌های جنوبی مانند میانه، مراغه، بناب و سراب بیشتر پدیده خشک‌سالی را تجربه کرده‌اند.

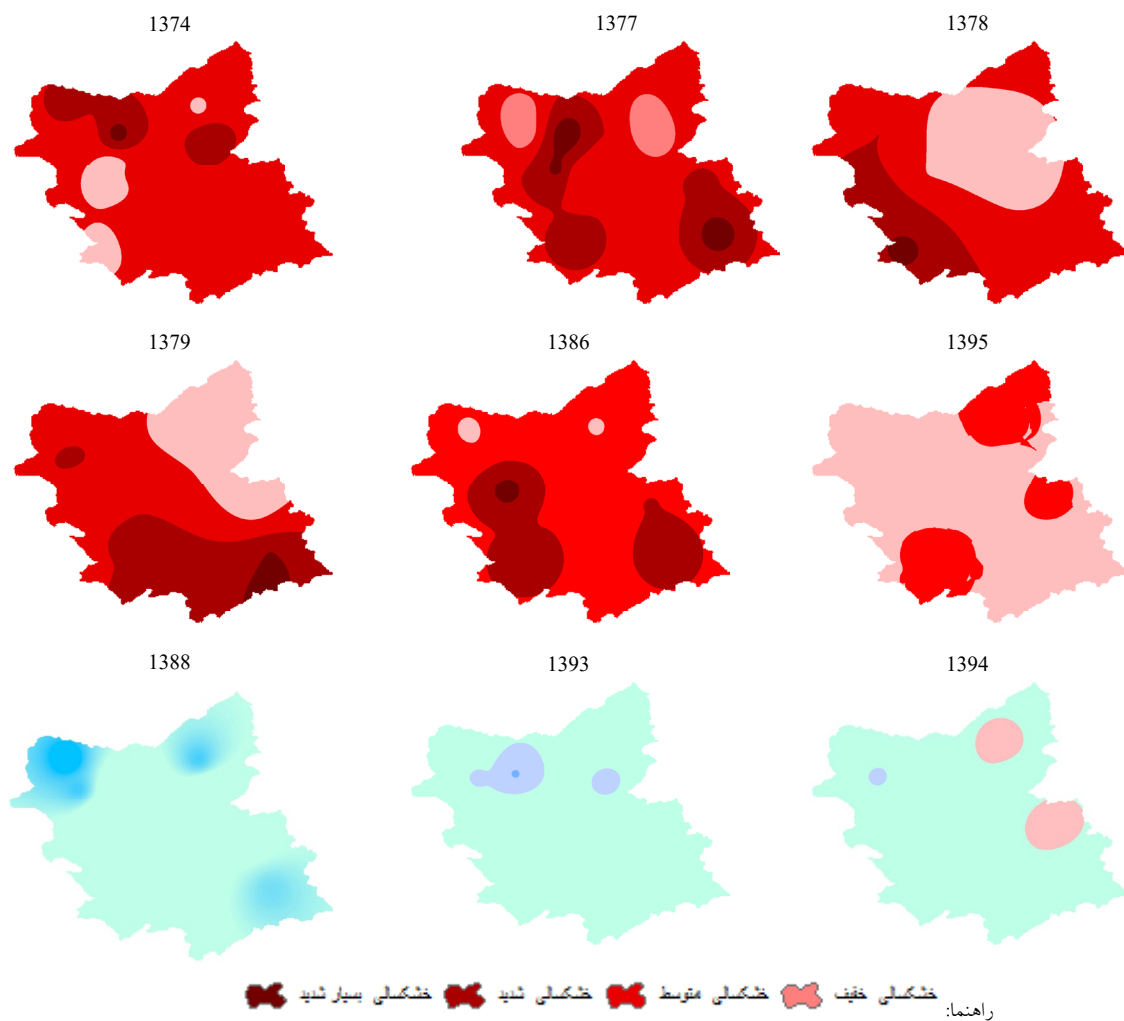
مطابق با نتایج مشاهده شد که در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۷۹، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۵ در استان خشک‌سالی با درجات مختلف اتفاق افتاده است. با این حال، اکثر مناطق شرایط خشک‌سالی خفیف و متوسط را تجربه کرده‌اند. در سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ نیز در اکثر مناطق ترسالی مشاهده می‌شود. در شکل (۳) پهنه‌بندی سال‌های خشک و تر نشان داده شده است. کلیه ایستگاه‌های منطقه در سال ۱۳۸۸ وضعیت ترسالی خفیف و متوسط را دارا هستند. با توجه به نتایج به دست آمده سال ۱۳۸۶ به عنوان خشک‌ترین و سال ۱۳۸۸ به عنوان مرطوب‌ترین سال‌ها انتخاب شدند. در شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی فراوانی وقوع خشک‌سالی در منطقه مطالعاتی در طی دوره آماری ۱۳۷۳-۱۳۹۵ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود در بازه زمانی انتخاب شده مناطق مختلف استان، بیشتر وقوع خشک‌سالی خفیف و متوسط را تجربه کرده‌اند. با این حال،

مشاهده می‌شود. فراوانی وقوع خشک‌سالی در میان مناطق انتخابی برای شهرهای خداآفرین، میانه و مراغه بیشترین مقدار را دارد.

برخی مناطق استان چندین بار دچار خشک‌سالی شدید و بسیار شدید شده‌اند که بیشتر شامل مناطق جنوب شرقی و جنوب-غربی منطقه مطالعاتی مانند شهرهای میانه، بناب و مراغه است. در قسمت‌های شمالی استان وقوع خشک‌سالی خفیف بیشتر



شکل ۲- الف) نمودار شاخص SPI سالیانه برای ایستگاه‌های منتخب



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI برای سال‌های خشک‌سالی و ترسالی

### مقایسه نتایج به دست آمده با شاخص خشک‌سالی

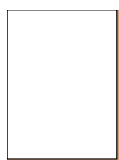
#### مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای

در این بخش، پس از استخراج داده‌های بارش حاصل از ماهواره TRMM برای بازه زمانی مورد نظر همبستگی آن‌ها با داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه سری زمانی بارش ماهانه با میانگین بلندمدت نشان داد که منطقه منتخب دچار خشک‌سالی‌های مکرر بوده است. همبستگی بین داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای ایستگاه تبریز برای نمونه در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، بین داده‌های زمینی و ماهواره‌ای همبستگی خوبی وجود دارد و نتایج داده‌های ماهواره‌ای TRMM به نتایج ایستگاه زمینی نزدیک است (با

در ادامه نحوه تغییرات شاخص خشک‌سالی SPI مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل روند شدت خشک‌سالی از آزمون منکنال استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۲ و شکل ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله، مشاهده می‌شود که تغییرات روند خشک‌سالی برحسب شیب خط‌شن و مقدار منکنال به صورت مثبت بوده و ایستگاه‌های جلفا، مرند، پهناور و میانه دارای روند معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند. در شکل ۵ (ب) نقشه پهنه‌بندی شیب سن برای کل منطقه ترسیم شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که شیب این خط در بخش شمال غرب منطقه دارای بیشترین مقدار است.

زمینی است. جهت بررسی میزان انطباق داده‌های زمینی و ماهواره‌ای از سه معیار ارزیابی ( $R$ ) ضریب همبستگی بین مقادیر SPI سالیانه به‌دست آمده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای، ( $DC$ ) ضریب تبیین و ( $RMSE$ ) جذر میانگین مربعات خطاها استفاده گردید. مطابق با شکل ۶(ج)، ملاحظه می‌شود که تقریباً ۷۰٪ ایستگاه‌ها دارای مقادیر  $R$  بالای ۰/۸ و تقریباً ۶۰٪ ایستگاه‌ها دارای مقادیر  $DC$  بین ۰/۷ تا ۰/۹ می‌باشند که بیانگر همبستگی نسبتاً خوب بین نتایج داده‌های ماهواره‌ای و زمینی برای اکثر ایستگاه‌ها است. بیشترین مقدار برای ضریب همبستگی و کمترین مقدار برای معیار خطا برای ایستگاه‌های واقع در جنوب‌غرب که دارای خشکسالی شدیدتری هستند به دست آمد. لذا، به نظر می‌رسد که در مناطق با کمبود داده می‌توان با موفقیت از داده‌های بارشی ماهواره‌ای جهت بررسی خشکسالی استفاده کرد.

داشتن مقدار ضریب همبستگی ( $R=0/94$ ). در ادامه مقدار SPI سالیانه ایستگاه‌ها محاسبه شد و بر اساس میانگین شاخص SPI به پایش زمانی و مکانی خشکسالی منطقه پرداخته شد. در شکل ۶(ب) نقشه پهنه‌بندی استان بر اساس میانگین سالیانه شاخص خشکسالی با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای ترسیم گردیده است. بر اساس داده‌های زمینی مشاهده می‌شود که در طی دوره مطالعاتی تمام بخش‌های استان دچار خشکسالی شده است. قسمت‌های جنوبی دارای خشکسالی شدیدتری بوده و قسمت‌های شمالی به‌ویژه شمال‌غرب، خشکسالی خفیف‌تری را در طول دوره مطالعاتی تجربه کرده‌اند. بر اساس داده‌های ماهواره‌ای نیز مشاهده می‌گردد مناطق جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی منطقه مطالعاتی خشکسالی شدیدتری را تجربه کرده‌اند و در قسمت‌های شمالی استان وقوع خشکسالی خفیف مشاهده می‌شود. این نتایج مطابق با نتایج به‌دست آمده برای شاخص SPI مستخرج از داده‌های



خشکسالی خفیف



خشکسالی متوسط



خشکسالی شدید

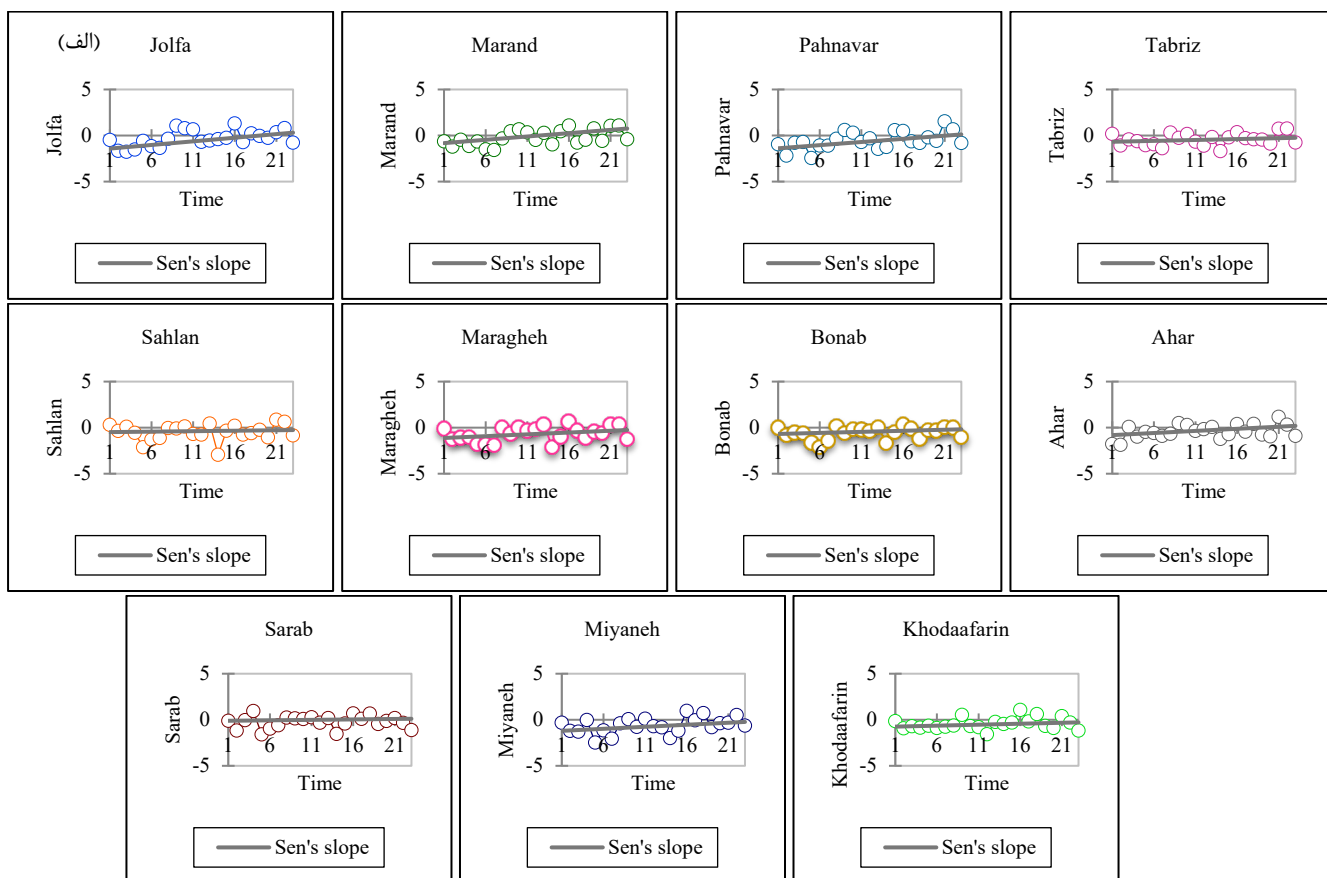


خشکسالی بسیار شدید

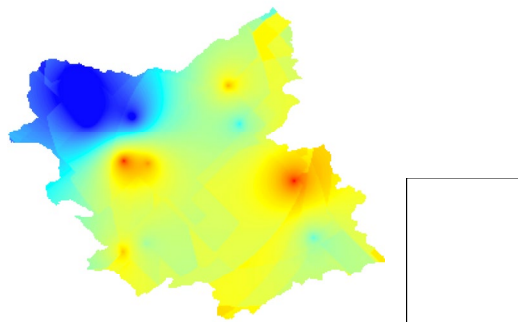
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی فراوانی وقوع خشکسالی‌های مختلف در طی دوره آماری مورد مطالعه

جدول ۲- تجزیه و تحلیل روند زمانی خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها با روش منکندال برای ایستگاه‌های منتخب

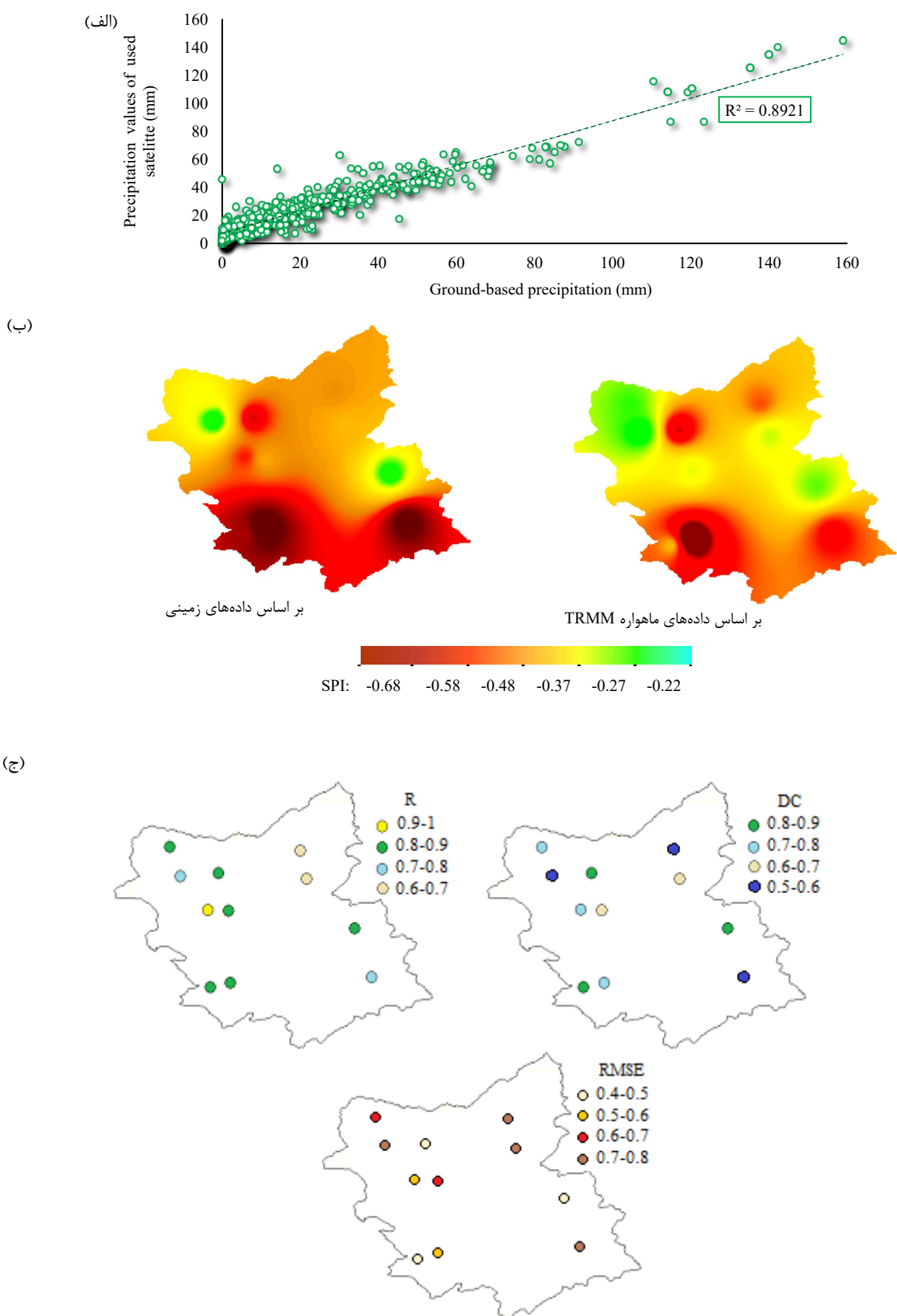
ایستگاه	شیب سن	p-value	معنادار	Z
Jolfa	0.079	< 0.0001	*	2.377
Marand	0.072	< 0.0001	*	2.535
Tabriz	0.020	0.011		0.898
Pahnavar	0.068	< 0.0001	*	2.220
Sahlan	0.010	0.419		0.264
Maragheh	0.039	0.000		1.215
Bonab	0.023	0.001		1.162
Ahar	0.046	0.000		1.532
Sarab	0.010	0.419		0.264
Miyaneh	0.044	< 0.0001	*	1.690
Khodaafarin	0.021	0.003		1.109



(ب)



شکل ۵- شیب خط روند خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها (الف): برای ایستگاه‌ها برحسب زمان و (ب) برای کل منطقه مطالعاتی



شکل ۶- (الف): همبستگی بین داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای ایستگاه تبریز. (ب): نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI برای مقدار متوسط سالیانه با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای و (ج): بررسی همبستگی بین نتایج حاصل از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای

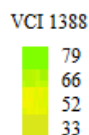
در ادامه به بررسی کارایی شاخص VCI در تعیین سال‌های خشک و تر پرداخته شده است. با دانستن سال‌های خشک (۱۳۸۶) و تر (۱۳۸۸) داده‌های مربوط به این سال‌ها از تصاویر ماهواره‌ای استخراج گردید. ابتدا مقادیر NDVI محاسبه شد سپس، با استفاده از فرمول (۱) مقادیر VCI برای کل ایستگاه-ها به دست آمد. نتایج حاصله در جدول ۳ و شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سال ۱۳۸۶ برای کلیه ایستگاه‌های انتخابی مقدار شاخص VCI کمتر از ۴۰ درصد به دست آمده و کل منطقه شرایط خشک‌سالی را تجربه کرده است. این نتایج با نتایج حاصل از شاخص SPI مستخرج از داده‌های زمینی همخوانی نسبتاً خوبی داشته و بیانگر کارایی این شاخص در تخمین خشک‌سالی متأثر از کمبود بارش در این سال می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج، سال ۱۳۸۸ با مقادیر بالای VCI (مقادیر بالاتر از ۴۰ گویای

در ادامه به بررسی کارایی شاخص VCI در تعیین سال‌های خشک و تر پرداخته شده است. با دانستن سال‌های خشک (۱۳۸۶) و تر (۱۳۸۸) داده‌های مربوط به این سال‌ها از تصاویر ماهواره‌ای استخراج گردید. ابتدا مقادیر NDVI محاسبه شد سپس، با استفاده از فرمول (۱) مقادیر VCI برای کل ایستگاه-ها به دست آمد. نتایج حاصله در جدول ۳ و شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سال ۱۳۸۶ برای کلیه ایستگاه‌های انتخابی مقدار شاخص VCI کمتر از ۴۰ درصد به دست آمده و کل منطقه شرایط خشک‌سالی را تجربه کرده است. این نتایج با نتایج حاصل از شاخص SPI مستخرج از داده‌های زمینی همخوانی نسبتاً خوبی داشته و بیانگر کارایی این شاخص در تخمین خشک‌سالی متأثر از کمبود بارش در این سال می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج، سال ۱۳۸۸ با مقادیر بالای VCI (مقادیر بالاتر از ۴۰ گویای

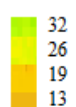
جدول ۳- مقادیر استخراج شده از شاخص VCI در ایستگاه‌های مورد مطالعه در منطقه مطالعاتی

ایستگاه	شاخص VCI		ایستگاه	شاخص VCI	
	1386	1388		1386	1388
Jolfa	31	70	Bonab	15	80
Marand	26	65	Ahar	29	43
Tabriz	22	46	Sarab	20	39
Pahnavar	27	64	Miyaneh	13	53
Sahlan	23	44	Khodaafarin	33	42
Maragheh	19	46			

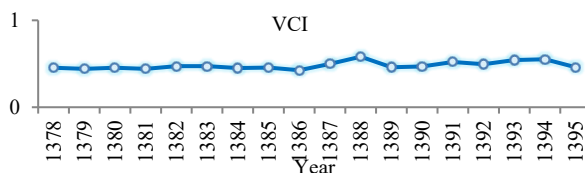
(الف)



VCI 1386



(ب)



شکل ۷- (الف): نقشه میانگین سالانه شاخص VCI برای سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸، و (ب): نمودار تغییرات مقادیر میانگین شاخص

VCI در دوره مورد مطالعه

## نتیجه‌گیری

خشک‌سالی یکی از بلاهای طبیعی است که به دلیل تاثیر قابل ملاحظه‌ای که در زمینه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد، زندگی انسان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق، با استفاده از دو شاخص SPI و VCI که مبتنی بر داده‌های زمینی و ماهواره‌ای می‌باشند به بررسی خشک‌سالی استان آذربایجان شرقی طی دوره آماری ۱۳۷۳-۱۳۹۵ پرداخته شده است. در این راستا داده‌های مربوط به بارش ۱۱ ایستگاه در منطقه که دارای آمار کاملی بودند جهت محاسبه شاخص SPI به کار برده شد. همچنین از تصاویر ماهواره‌ای مقدار شاخص SPI و شاخص شرایط گیاهی به دست آمد و نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طورکلی نتایج نشان داد که طی سال‌های مورد مطالعه به جز سال ۱۳۸۸ استان با شدت‌های متفاوتی از خشک‌سالی مواجه بوده و اغلب نواحی استان آذربایجان شرقی با خشک‌سالی خفیف و متوسط روبرو شده است. در سال‌های ۱۳۷۴، ۱۳۷۹-۱۳۷۷، ۱۳۸۴، ۱۳۸۶، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵ کل استان شرایط خشک‌سالی را تجربه کرده و فقط در سال ۱۳۸۸ تمامی ایستگاه‌ها شرایط ترسالی را داشته‌اند. در بقیه سال‌ها مقادیر SPI دارای مقادیر مثبت و منفی بوده و طبقات مختلفی از خشک‌سالی و ترسالی را تجربه کرده‌اند. نتایج پهنه‌بندی منطقه بر اساس مقادیر میانگین شاخص SPI سالیانه نشان داد که نواحی جنوبی استان اغلب شرایط بحرانی‌تری از نظر خشک‌سالی دارند. همچنین، مشاهده گردید که فراوانی وقوع خشک‌سالی خفیف بیشتر در مناطق شمالی استان و وقوع خشک‌سالی شدید بیشتر در مناطق جنوبی استان محتمل‌تر می‌باشد. بررسی روند تغییرات شاخص SPI سالیانه برحسب شیب خط شن و مقدار منکندال نشان داد که تغییرات شاخص SPI به‌صورت مثبت بوده و ایستگاه‌های جلفا، مرند، پنهانور و میانه دارای روند معناداری هستند. بررسی شاخص VCI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نیز نشان داد که در طی دوره مطالعاتی سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار این شاخص بوده و بنابراین این سال‌ها خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال‌ها می‌باشند. در سال ۱۳۸۶ برای کلیه ایستگاه‌های انتخابی مقدار شاخص VCI کمتر از ۴۰ درصد به‌دست آمد و مشخص گردید که کل منطقه شرایط

خشک‌سالی را تجربه کرده است. همچنین، سال ۱۳۸۸ با مقادیر VCI بالاتر از ۴۰ بیان‌گر شرایط ترسالی بود. این نتایج با نتایج حاصل از شاخص SPI مستخرج از داده‌های زمینی همخوانی نسبتاً خوبی را از لحاظ تعیین سال‌های خشک و تر نشان داد و کارایی شاخص VCI را در تخمین خشک‌سالی متاثر از کمبود بارش به اثبات رساند. همچنین همبستگی مناسبی بین نتایج حاصل از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مشاهده گردید. در پژوهش رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۴) نیز شاخص VCI به عنوان یک روش مناسب در بررسی وضعیت خشک‌سالی منطقه معرفی شده است. در مطالعه کاظم‌پور و همکاران (۱۳۹۸) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای روش مناسبی جهت تحلیل خشک‌سالی عنوان شده است. همچنین اسمعیلی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی کارایی شاخص‌های SPI، TCI و VCI در تعیین خشک‌سالی شهرستان داراب پرداختند و بیان کردند که داده‌های ماهواره‌ای همبستگی مناسبی با داده‌های زمینی دارند. با توجه به نتایج این تحقیق و مطالعات پیشین، می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان یک روش مناسب در مناطقی که ایستگاه هواشناسی وجود ندارد، جهت ارزیابی و تحلیل خشک‌سالی استفاده کرد. زیرا تعداد نقاط نمونه‌برداری در تصاویر ماهواره‌ای بسیار بیشتر از تعداد ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشد.

## منابع

۱. ادیب، ا. و ع. گرجی زاده. (۱۳۹۵). بررسی و پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی؛ مطالعه موردی حوضه آبریز دز. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۷، شماره ۲، ص ۱۷۳-۱۸۵.
۲. اسمعیلی، ح.، س.ح. میرموسوی و ا. سهیلی. (۱۴۰۱). تحلیل اثر خشک‌سالی بر پارامترهای فنولوژی شاخص‌های گیاهی با استفاده از سری زمانی تصاویر سنجنده MODIS (مورد مطالعاتی: استان همدان). نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۲، شماره ۲، ص ۱۵۲-۱۶۶.
۳. ترابی پوده، ح.، ر. دهقانی و س. رستمی. (۱۳۹۷). تخمین خشک‌سالی در استان لرستان با استفاده از شبکه‌های

- of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and Planetary Change*, 190, pp.103-118.
12. Fisher, T., M. Gemmer, B. Su and T. Scholten. (2013). Hydrological long-term dry and wet periods in the Xijiang River basin, South China. *Hydrology and Earth system Sciences*, 17, pp.135-148.
  13. Jehanzaib, M., M.N. Sattar, J.H. Lee, T.W. Kim. (2020). Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, pp.7-21.
  14. Kikon, A., P.C. Deka. (2022). Artificial intelligence application in drought assessment, monitoring and forecasting: a review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, pp.1197-1214.
  15. Kwak, J., S. Kim, J. Jung, V.P. Singh, D.R. Lee, H.S. Kim. (2016). Assessment of meteorological drought in Korea under climate change. *Advances in Meteorology*, 2016(1), p.1879024.
  16. Li, J. G., H.X. Ruan, J. R. Li and S.F. Huang. (2010). Application of TRMM precipitation data in meteorological drought monitoring. *Journal of China Hydrology*, 30, pp.43-46 (in Chinese).
  17. Liou, Y. A., G. M. Muluaem. (2019). Spatio-temporal assessment of drought in Ethiopia and the impact of recent intense droughts. *Remote sensing*, 11(15), pp.1828.
  18. Mckee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, M.A, Anaheim, California.
  19. Michael, J. H. (2007). What is drought: drought in dices, climate impacts specialist, national drought mitigation center. <http://Ulysses Atmos, Colostate, Edu/spi.html>.
  20. Mirabbasi, R., E.N. Anagnostou, A. Fakheri-Fard, Y. Dinpashoh, S. Eslamian. (2013). Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*, 492, pp.35-48.
  21. Mokarram, M., H.R. Pourghasemi, M. Hu, H. Zhang. (2021). Determining and forecasting drought susceptibility in southwestern Iran using multi-criteria decision-making (MCDM) coupled with CA-Markov model. *Science of Total Environment*, 781, pp.146703.
  - هوشمند. نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی، دوره ۹، شماره ۳۵، ص ۴۱-۵۲.
  ۴. رضایی بنفشه، م.، ع. رضایی و م. فریدپور. (۱۳۹۴). تحلیل خشک‌سالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی با تاکید بر سنجش از دور و شاخص وضعیت پوشش گیاهی. نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۵، شماره ۱، ص ۱۱۳-۱۲۳.
  ۵. رضایی مقدم، م.، ح. ولیزاده، خ. رستم زاده و ع. رضایی. (۱۳۹۱). ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشک‌سالی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه). نشریه جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۳، ص ۱-۱۶.
  ۶. شریفی، و.، س. احمدی و م. غلام‌نیا. (۱۴۰۰). بررسی سری زمانی خشک‌سالی کشاورزی شهرستان داراب با استفاده از سنجش‌ازدور و سامانه گوگل ارث انجین. نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۰، شماره ۴۰، ص ۱۷۵-۱۹۲.
  ۷. کاظم‌پور چورسی، س.، م. عرفانیان و ز. عبادی نهاری. (۱۳۹۸). ارزیابی داده‌های ماهواره‌ی MODIS و TRMM در پایش خشک‌سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دوره ۷۴، شماره ۲، ص ۱۷-۳۴.
  ۸. مددی، غ.، س. حمزه و ع. نوروزی. (۱۳۹۵). ارزیابی تصاویر ماهواره ای TPMM جهت پایش زمانی و مکانی خشک‌سالی، مطالعه موردی: حوضه مرزی غرب. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۸، شماره ۴، ص ۳۶۲-۳۷۶.
  ۹. مقیمی، م.، ا. کوهی و ع. زارعی. (۱۳۹۷). پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکوف. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۸، شماره ۳، ص ۱۵۳-۱۶۵.
  10. Abdulrazzaq, Z.T., R.H. Hasan, N.A. Aziz. (2019). Integrated TRMM data and standardized precipitation index to monitor the meteorological drought. *Journal of Civil Engineering*, 5(7), pp.1590-1598.
  11. Bento, V. A., C.M. Gouveia, C.C. DaCamara, R. Libonati and I. F. Trigo. (2020). The roles

26. Yan, N., B. Wu, S. Chang and X. Bao. (2014). Evaluation of TRMM Precipitation Product for Meteorological Drought Monitoring in Hai Basin. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 17(1), p. 012093, IOP Publishing.
27. Zhao, X., H. Xia, B. Liu, W. Jiao. (2022). Spatiotemporal comparison of drought in Shaanxi-Gansu-Ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in google earth engine. Remote Sensing, 14(7), p.1570.
22. Rhee, J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. Remote Sensing of Environment, 114, pp.2875–2887.
23. Sirdas, S., Z. Şen (2003). Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey, Journal of Hydrological Sciences, 48(5), pp.809-820.
24. Thenkabail, P. S., E. A. Enclona, M. S. Ashton, C. Legg and J. M. De Dieu. (2004). The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in southwest Asia, International Water Management Institute, PO Box 2075, Colombo, Sri Lanka.
25. Xiang-Hu, L., Q. Zhang and X. u. Chong. (2012). Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang Catchment, Poyang Lake Basin. Journal of Hydrology, 2012(426–427), pp.28–38.