



## Assessment of Remote Sensing Indices for Drought Monitoring Across Different Vegetation Types in Gorgan County

Khalil Ghorbani<sup>1\*</sup>, Esmail Valizadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: [Ghorbani.khalil@gau.ac.ir](mailto:Ghorbani.khalil@gau.ac.ir)

<sup>2</sup>PhD student in the Department of Desert Region Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: [havakalaleh@gmail.com](mailto:havakalaleh@gmail.com)

---

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 2025-04-16  
Accepted: 2025-07-27

**Keywords:**  
Meteorological drought  
Remote sensing  
Climate variability  
MODIS  
Google Earth Engine(GEE)  
Vegetation types

### ABSTRACT

Drought is one of the most complex and challenging climatic hazards, which can also be monitored through satellite imagery. However, the diversity of vegetation types and their varying responses to drought conditions pose significant challenges in this context. Accordingly, the present study investigates the relationship between two meteorological drought indices Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and three satellite based indices Temperature Condition Index (TCI), Vegetation Condition Index (VCI), and Vegetation Health Index (VHI) across three vegetation covers: forest, rangeland, and cropland. The satellite indices were derived from MODIS sensor imagery using coding within the Google Earth Engine (GEE) platform for the period 2000–2023 (24 years). Meteorological drought indices (SPI and SPEI) were calculated annually using data from the Hashemabad meteorological station in Gorgan. The results indicate significant climatic changes in the region due to temperature rise, which has led SPEI an index that incorporates both precipitation and evapotranspiration to depict drier conditions than SPI, along with a significant declining trend. Furthermore, SPEI showed stronger correlations with the satellite based indices compared to SPI. Among the remote sensing indices, TCI exhibited the highest correlation, particularly with SPEI over rangeland areas, reaching a maximum correlation coefficient of 0.77. This finding suggests that TCI is a more suitable tool for drought monitoring. Additionally, the observed increasing trend of VCI in forest areas, despite the ongoing drought conditions in the region, appears to be a consequence of global warming, which has likely extended the vegetation greenness period. In conclusion, satellite-based indices exhibit variable behavior across different vegetation types in response to drought, and their application on an annual scale requires cautious interpretation tailored to the ecological characteristics of each land cover type.

---

**Cite this article:** Ghorbani, Kh., Valizadeh, E. (2025). Assessment of Remote Sensing Indices for Drought Monitoring Across Different Vegetation Types in Gorgan County. *Journal of the Climate Change research*, 6 (24), 25-40.





نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال ششم / شماره مسلسل بیست و سوم / پاییز ۱۴۰۴ / صفحات: ۴۰-۲۵



## ارزیابی شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور در پایش خشکسالی در پوشش‌های گیاهی مختلف در شهرستان گرگان

خلیل قربانی<sup>۱\*</sup>، اسماعیل ولی‌زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: [Ghorbani.khalil@gau.ac.ir](mailto:Ghorbani.khalil@gau.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: [havakalaleh@gmail.com](mailto:havakalaleh@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶</p> <p>واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی خشکسالی ماهواره‌ای تغییر اقلیم MODIS GEE</p>	<p>خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و پرجالش‌ترین مخاطرات اقلیمی است که با تصاویر ماهواره‌ای نیز پایش می‌شود؛ اما تنوع پوشش گیاهی و تأثیرپذیری متفاوت آن‌ها از شرایط خشکسالی از چالش‌های آن می‌باشد. براین‌اساس در پژوهش حاضر، ارتباط بین دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI با ۳ شاخص ماهواره‌ای VCI، TCI و VHI در ۳ پوشش گیاهی جنگلی، مرتع و زراعی بررسی شد تا ضمن شناسایی مناسب‌ترین شاخص خشکسالی هواشناسی، مناسب‌ترین شاخص ماهواره‌ای در پوشش‌های گیاهی مختلف نیز بررسی شود. شاخص‌های ماهواره‌ای از تصاویر سنجنده مودیس با کد نویسی در محیط GEE برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (۲۴ سال) استخراج و شاخص‌های SPI و SPEI نیز از داده‌های ایستگاه هاشم‌آباد گرگان در مقیاس سالانه محاسبه شدند. نتایج نشان داد تغییرات اقلیمی معناداری در منطقه در اثر افزایش دما رخ داده است و این باعث شده تا SPEI که علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق را نیز در برمی‌گیرد شرایط خشک‌تری را نسبت به SPI به تصویر بکشد و همچنین این شاخص روند کاهش معناداری را نیز نشان دهد. SPEI نسبت به SPI همبستگی بالاتری را با شاخص‌های ماهواره‌ای برقرار کرد و از بین شاخص‌های ماهواره‌ای نیز TCI از همبستگی بالاتری با شاخص‌های ماهواره‌ای برخوردار بودند و در این میان بین TCI با SPEI در پوشش مرتعی بالاترین همبستگی، برابر ۷۷ درصد بدست آمد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که شاخص TCI ابزار مناسب‌تری برای پایش خشکسالی می‌باشد. روند افزایشی معنادار VCI در پوشش جنگلی بر خلاف روند خشکسالی در منطقه، ناشی از گرمایش جهانی بوده که باعث افزایش دوره سبزی‌نگی جنگل می‌باشد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های ماهواره‌ای برای پایش خشکسالی رفتار متفاوتی را در پوشش‌های گیاهی مختلف نشان می‌دهند و در مقیاس سالانه باید با احتیاط بیشتری از این شاخص‌ها استفاده کرد.</p>

**استناد:** قربانی، خلیل؛ ولی‌زاده، اسماعیل (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور در پایش خشکسالی در پوشش‌های گیاهی مختلف در شهرستان گرگان. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۴)، ۴۰-۲۵.

DOI: 10.30488/ccr.2025.517417.1281

ناشر: دانشگاه گلستان  
© نویسندگان.



## مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای است که در اثر کمبود بارش طی یک دوره مشخصی رخ می‌دهد و می‌تواند در تمامی اقلیم‌ها رخ دهد. در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که با کمبود بارش و منابع آبی مواجه هستند شرایط خشکسالی اوضاع آن‌ها را وخیم‌تر کرده و اثر خود را بر بخش‌های اجتماعی و اقتصادی جامعه می‌گذارد. خشکسالی با کمبود بارش آغاز می‌شود؛ از این‌رو بیشتر شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر بارش می‌باشند و شناخته‌ترین آن‌ها، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) می‌باشد؛ اما گرمایش جهانی نیز باعث می‌شود تا تبخیر و تعرق بیشتری صورت گیرد و منابع آبی بیشتری را از دسترس خارج کرده و شرایط خشک‌تری را ایجاد کند. از این‌رو شاخص دومتغیره خشکسالی، شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر و تعرق (SPEI<sup>۲</sup>) تعریف شد. رضائی قلعه و قربانی (۱۳۹۷) در تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان نتیجه گرفتند شاخص SPEI دوره طولانی‌تری از خشکسالی و ترسالی و شاخص SPEI وقایع حدی بزرگ‌تری را نسبت به SPEI نشان می‌دهد. به دلیل محدودیت در تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین پراکنش مکانی نامناسب آن‌ها، مشکلاتی در پایش منطقه‌ای خشکسالی وجود دارد. تأثیر خشکسالی بر بازتاب پدیده‌های سطحی، باعث شده تا امکان استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در پایش خشکسالی توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گیرد. پای و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای در کشور چین باهدف پایش پویایی گیاه با استفاده از شاخص‌های VCI<sup>۳</sup>، TCI<sup>۴</sup> و VHI<sup>۵</sup> طی دوره آماری ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۳ انجام دادند و درنهایت دریافتند که رابطه بین TCI و VCI در نواحی مختلف متفاوت است. در توصیف خشکسالی کشاورزی در شمال کشور

اتیوپی توسط موسی و همکاران (۲۰۲۲) بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ از تصاویر سنجنده MODIS<sup>۶</sup> استفاده کردند و نتیجه گرفتند که TCI برخلاف VHI، تنش خشکی نسبتاً بیشتری را نسبت به VCI نشان می‌دهد. ماکسول و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی تأثیرات خشکسالی بر روی اراضی مختلف نتیجه گرفتند که پوشش‌های جنگلی و مرتعی نسبت به اراضی زراعی به‌شدت تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرند. اجاز و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی همبستگی میان شاخص SPEI با شاخص VCI، TCI و VHI در منطقه بسیار خشک صحرای عربستان نتیجه گرفتند شاخص‌های VHI و SPEI همبستگی بهتری دارند و شاخص‌های خشکسالی برای پایش خشکسالی در مناطق فوق خشک مناسب هستند. در بخش مطالعات داخلی نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. به طور مثال آرخ و همکاران (۱۴۰۱) به منظور بررسی کارایی VCI، TCI و VHI در پایش خشکسالی در مناطق مرکزی ایران به این نتیجه رسیدند SPI بالاترین همبستگی را با VCI در سطح ۰/۰۱ دارد براین اساس تصاویر MODIS و شاخص‌های مستخرج از آن قابلیت لازم برای پایش خشکسالی را دارند. منتصری و همکاران (۱۴۰۲) نیز به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و ارتباط آن با شاخص‌های دمایی و وضعیت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای در شهرستان مرودشت نتیجه گرفتند که TCI نسبت به VCI از ضریب همبستگی بالاتری با SPI برخوردار است. در پژوهشی دیگر، سیاسر و همکاران (۱۴۰۳)، در استان گلستان به ارزیابی خشکسالی با استفاده از داده‌های MODIS و مقایسه آن با شاخص SPI پرداختند و نتیجه گرفتند شاخص SPI بیشترین ضریب همبستگی را با شاخص TCI و کمترین همبستگی را با شاخص VHI دارد. باتوجه به مطالب ذکرشده مشخص شد که بیشتر مطالعاتی که در زمینه ارتباط بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای خشکسالی انجام شده است وابسته به پوشش گیاهی خاصی نبوده است؛ بلکه بر

1. Standardized Precipitation Index
2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
3. Vegetation Condition Index
4. Temperature Condition Index
5. Vegetation Health Index

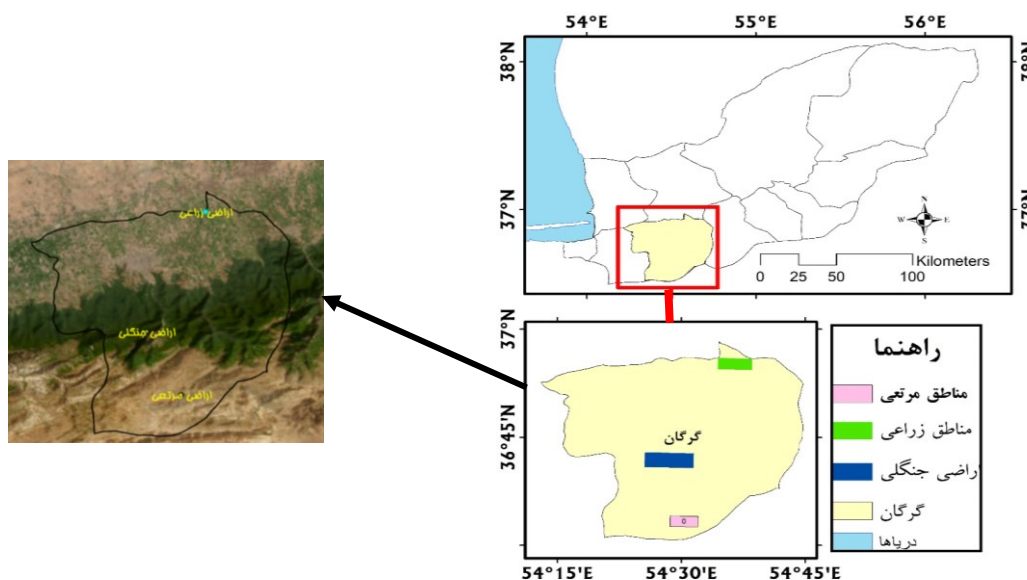
6. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

گلستان، واقع در نوار شمالی ایران به‌عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. بر اساس کامل‌ترین ایستگاه هواشناسی، از داده‌های ایستگاه همدیدی هاشم‌آباد که از یک دوره آماری کامل (۱۳۶۲ تاکنون) برخوردار است استفاده شد. این منطقه با میانگین بارش سالانه ۵۰۶ میلی‌متر و متوسط سالانه دمای ۱۸/۱ درجه سانتی‌گراد دارای اقلیمی نیمه‌خشک بوده اما به دلیل موقعیت این شهرستان در دامنه کوه، بخش‌های جنوبی این شهرستان اقلیم‌های متنوع مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب و مرطوب را شامل می‌شود. زمین‌های زراعی واقع در سرخنکلاته، مراتع منطقه کوهستانی چهارباغ و مناطق جنگلی زیارت به‌عنوان نمونه‌های کاربری اراضی انتخاب شدند (شکل ۱).

اساس موقعیت ایستگاه هواشناسی، داده‌های آن از تصاویر ماهواره‌ای استخراج و شاخص‌های ماهواره‌ای محاسبه شده است در ضمن بیشتر از SPI برای تعریف خشکسالی هواشناسی استفاده شده است در حالی که در پژوهش حاضر علاوه بر انتخاب ۳ پوشش گیاهی مختلف، SPEI نیز برای بیان خشکسالی هواشناسی بکار برده شده و برای سه منطقه زراعی (سرخنکلاته)، مرتعی (چهارباغ) و جنگلی (زیارت) به‌منظور بررسی رخداد خشکسالی با شدت‌های مختلف در هر منطقه، انجام می‌شود.

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: شهرستان گرگان، مرکز استان



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

سنجنده‌ای است که بر روی ماهواره ترا و آکوآ قرار دارد. سنجنده MODIS هر دو روز یک‌بار از تمام سطح زمین تصویربرداری می‌کند و داده‌هایی در ۳۶ باند طیفی اخذ می‌کند. این سنجنده در ۲ باند طیفی تصاویر با قدرت تفکیک اسمی ۲۵۰ متر، در ۴ باند طیفی تصاویری با قدرت تفکیک اسمی ۵۰۰ متر و در ۳ باند دیگر نیز تصاویری با قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر

داده‌ها: در این پژوهش از دو دسته داده استفاده شد. داده‌های هواشناسی بارش و دما که از ایستگاه هاشم‌آباد تهیه شد و دیگری اطلاعات مربوط به باندهای تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS و شاخص‌های ماهواره‌ای که با کدنویسی در محیط گوگل ارث انجین (GEE) برای سال‌های موجود (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳) استخراج شد. MODIS (اسپکترورادیومتر تصویربرداری با قدرت تفکیک متوسط)

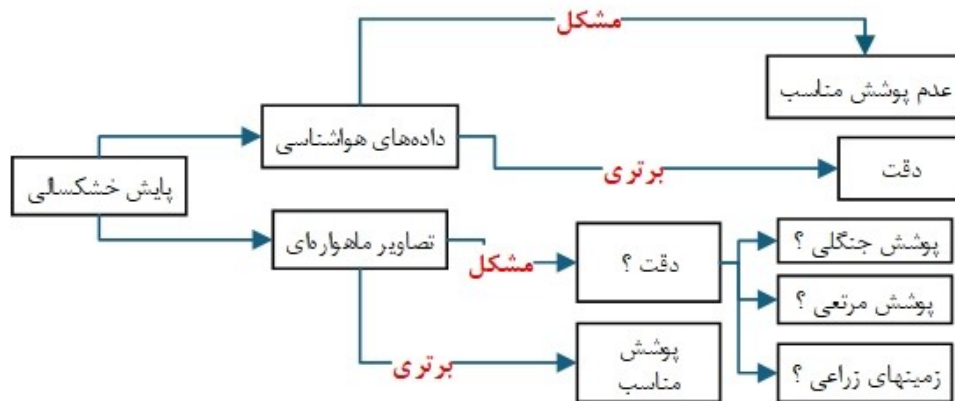
1. Terra
2. Aqua

شاخص‌های خشکسالی بر مبنای داده‌های هواشناسی تعریف می‌شوند، اما عدم پوشش کافی و تراکم نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، از جمله مشکلاتی است که در پایش خشکسالی با تصاویر ماهواره‌ای وجود دارد. پوشش سرتاسری و مناسب تصاویر ماهواره‌ای، امکان پایش خشکسالی با تصاویر ماهواره‌ای را فراهم می‌کند اما با چه دقتی و در پوشش‌های گیاهی مختلف چطور پایش امکان‌پذیر است؟ برای پاسخ دادن به این پرسش، پژوهش، مطابق با شکل (۳) اجرا شد. مراحل انجام این پژوهش به صورت نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است.

برداشت می‌کند. برای بررسی خشکسالی، از محصول MOD13Q1 با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روزه برای تهیه شاخص‌های NDVI و VCI و از محصول MOD11A2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و تفکیک زمانی ۸ روزه برای تهیه شاخص‌های LST و TCI در محیط سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. سپس با استفاده از دو شاخص VCI و TCI، شاخص VHI محاسبه شد.

### روش پژوهش

این پژوهش بر مبنای یک سؤال کلیدی انجام شده که به شکل مفهومی نیز نشان داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲: مدل مفهومی پژوهش (نویسندگان)

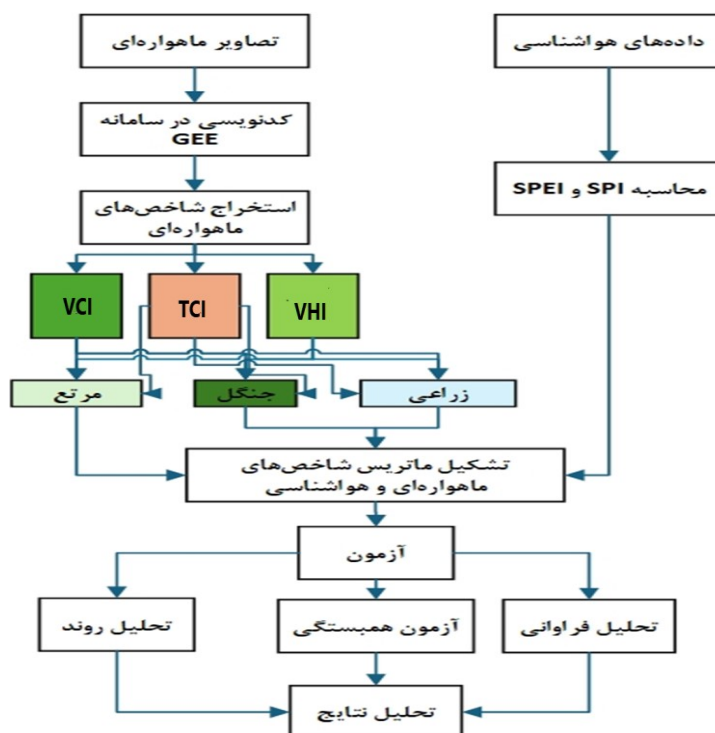
شد. شاخص SPI برای هر منطقه بر اساس بارش‌های طولانی‌مدت آن محاسبه می‌شود. در ابتدا توزیع آماری مناسب، بر آمار بلندمدت بارش‌ها برازش داده می‌شود. برای این منظور سری بارش‌های با مقیاس زمانی مشخص در نظر گرفته شده و توزیع آماری گامای دو پارامتری بر آن‌ها برازش داده می‌شود (ان تیل و گان، ۲۰۰۳). پس از برازش تابع گاما بر داده‌های ایستگاه مورد مطالعه، احتمال تجمعی برای هر رویداد بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. پس از محاسبه، احتمال تجمع به متغیر نرمال استاندارد  $Z$  با میانگین صفر و واریانس ۱ تبدیل می‌گردد که برابر با شاخص SPI در نظر گرفته می‌شود. برای تبدیل احتمال تجمعی گاما به متغیر نرمال استاندارد از روش

محاسبه شاخص‌های خشکسالی: در این پژوهش دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد. به علت مشترک سازی داده‌های زمینی با داده‌های ماهواره‌ای، از داده‌های ماهواره‌ای در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، برای محاسبه شاخص‌های TCI، VCI و VHI استفاده شد که در ادامه به همه آن‌ها پرداخته می‌شود.

**شاخص بارش استاندارد شده (SPI):** بر اساس اختلاف بین مقادیر بارش و میانگین بارش برای یک بازه زمانی مشخص و تقسیم این مقدار بر انحراف معیار بارش، شاخص SPI توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳، ۱۹۹۵) و ادواردز و مک کی (۱۹۹۷) پیشنهاد

گردید (رضائی قلعه و قربانی، ۱۳۹۷).

پیشنهادی آبراموویتز و استگان (۱۹۶۵) جهت تبدیل احتمال تجمعی به متغیر نرمال استاندارد استفاده



شکل ۳: مراحل مورد بررسی در پژوهش (نویسندگان)

ارائه شده است. جهت محاسبه VCI از رابطه ۲ استفاده می‌شود:

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

که در آن  $NDVI_i$  شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی دوره زمانی (i)،  $NDVI_{\max}$  و  $NDVI_{\min}$  به ترتیب میانگین بیشینه و کمینه NDVI برای دوره زمانی (i) است (عبدالعلی زاده و همکاران، ۲۰۲۰). این شاخص وضعیت غالب پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. این شاخص از طریق دامنه‌ای از مقادیر NDVI طولانی‌مدت محاسبه شده و نرمال می‌شود. دامنه مقادیر آن بین صفر تا ۱ قرار دارد، بدین ترتیب که مقادیر کم آن، وضعیت تنش گیاهی، مقادیر میانه، وضعیت متوسط و مقادیر بالای آن، وضعیت بهینه و نرمال را نشان می‌دهد (گیدی و همکاران، ۲۰۱۸).

**شاخص وضعیت دمایی (TCI):** این شاخص به‌عنوان ابزاری مناسب جهت تکمیل شاخص خشکسالی VCI

شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد شده (SPEI): شاخص خشکسالی SPEI توسط ویسنت سرانو (۲۰۱۰) ارائه و بر اساس تفاوت تبخیر و تعرق پتانسیل ( $PET^1$ ) و بارش (P) در ماه مورد نظر (i) طبق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد. (ویسنت سرانو، ۲۰۱۰). مزیت این شاخص نسبت به SPI، در نظر گرفتن اثر تبخیر و تعرق بر خشکسالی می‌باشد. این شاخص در بازه‌های زمانی متفاوت از معادله بیلان آب از روش تورنت وایت استفاده می‌کند (رضائی قلعه و قربانی، ۱۳۹۷).

$$D = P_i - PET_i \quad (1)$$

**شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI):** شاخص وضعیت پوشش گیاهی یا VCI اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کوگان برای بررسی رخداد خشکسالی

$$TCI_i = \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_{min}} \quad (3)$$

که در رابطه فوق  $T_i$  دمای سطح،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب، کمینه و بیشینه دمای سطح زمین برای دوره زمانی (i) در محدوده مورد مطالعه است.

**شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI):** این شاخص نیز توسط کوگان در ۲۰۰۰ بیان شد. این شاخص بر اساس رابطه ۴ از ترکیب شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI) محاسبه می‌شود.

$$VHI = (0.5 \times VCI) + (0.5 \times TCI) \quad (4)$$

از آنجایی که سهم رطوبت و دما در طی چرخه گیاهی به‌طور عادی نامشخص است، سهم VCI و TCI در شاخص VHI برابر در نظر گرفته می‌شود (کوگان، ۲۰۰۰). در ادامه، جدول طبقه‌بندی شدت خشکسالی‌های شاخص‌های مورد بحث، در جدول (۱) و روند انجام مراحل مورد بررسی در پژوهش در شکل (۳) ارائه شده است.

توسط کوگان در سال ۱۹۹۵ برای بررسی بهتر و دقیق‌تر پدیده خشکسالی ارائه شد. روش محاسبه TCI تا حدود زیادی شبیه به VCI است، با این تفاوت که جهت محاسبه آن از دمای درخشندگی یا دمای سطح زمین استفاده می‌شود. بدین ترتیب که در مواقعی که میزان دما به بالاترین میزان خود می‌رسد، میزان خشکسالی نیز به بیش‌ترین مقدار خود خواهد رسید. فرض مهم در این شاخص این است که رخداد خشکسالی باعث کاهش مقدار رطوبت موجود در خاک می‌شود که این امر در نتیجه به وجود آمدن تنش دمایی در سطح زمین و افزایش میزان دمای هوا در سال‌های خشک نسبت به سال‌های نرمال است. مقادیر عددی TCI بین اعداد صفر و یک متغیر است، به طوری که در شرایط رخداد خشکسالی مقدار آن به صفر نزدیک شده و در شرایط ترسالی مقدار آن به یک نزدیک می‌شود. رابطه ۳ نحوه محاسبه TCI را بیان می‌کند (مویزا و گمدا، ۲۰۲۲).

جدول ۱: طبقه‌بندی شدت خشکسالی‌های زمینی و سنجش‌ازدور (زو و همکاران، ۲۰۲۲، ژو و همکاران، ۲۰۲۲)

SPI, SPEI	VCI, TCI, VHI	شدت خشکسالی
< -۲	< ۰/۱	خشکسالی حاد
(-۱/۵) تا (-۱/۹۹)	۰/۱ - ۰/۱۹۹	خشکسالی شدید
(-۱) تا (-۱/۴۹)	۰/۲ - ۰/۲۹۹	خشکسالی متوسط
۰ تا (-۰/۹۹)	۰/۳ - ۰/۳۹۹	خشکسالی ضعیف
۰	۰/۴ - ۰/۴۹۹	نرمال
۰ تا ۰/۹۹	۰/۵ - ۰/۵۹۹	ترسالی ضعیف
۱/۴۹ تا ۱	۰/۶ - ۰/۶۹۹	ترسالی متوسط
۱/۹۹ تا ۱/۵	۰/۷ - ۰/۷۹۹	ترسالی شدید
> ۲	۰/۸ - ۰/۸۹۹	ترسالی حاد

آزمون‌های ناپارامتریک تشخیص روند من - کندال<sup>۱</sup>، آزمون تشخیص جهش پتیت<sup>۲</sup> و شیب سن<sup>۳</sup>: من کندال و پتیت، دو آزمون آماری ناپارامتریک

آزمون‌های آماری: به‌منظور بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و سنجش‌از دور، علاوه بر تحلیل همبستگی و رگرسیون، از آزمون‌های روند و جهش نیز استفاده شد تا هم‌راستایی سری‌های زمانی این شاخص‌ها نیز با هم مقایسه شوند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

1. Mann-Kendal  
2. Pettit  
3. Sen's slope

رگرسیون نداشته باشند از آن حذف می‌شوند. حالت کلی رگرسیون خطی چندمتغیره به صورت رابطه ۵ است که در آن  $Y$  متغیر پیش‌بینی شونده،  $x_1$  تا  $x_n$  متغیرهای پیش‌بینی کننده و  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت معادله هستند (زادهمهر و فرخیان، ۱۳۹۹).

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (5)$$

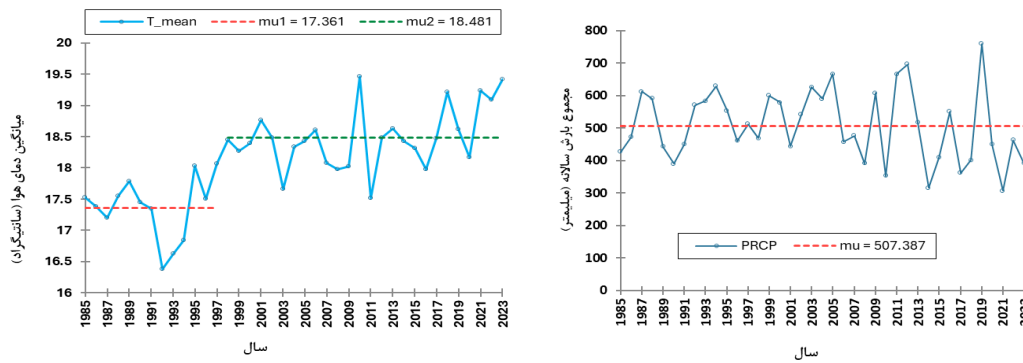
### نتایج و بحث

**بررسی تغییر اقلیم در منطقه:** روند تغییرات پارامترهای هواشناسی شامل بارش و دما به صورت میانگین سالانه دوره آماری با استفاده از آزمون من کندال و پتیت بررسی شد و سپس روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI با شاخص‌های خشکسالی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در سه نوع پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه نیز مورد تحلیل قرار گرفت.

**روند تغییرات پارامترهای هواشناسی:** در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های آماری، از آزمون من-کندال و پتیت به منظور بررسی وجود روند و جهش در خروجی شاخص‌ها به صورت سالانه استفاده شد. نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌ها در دوره آماری باتوجه به جدول (۳) و شکل (۴)، بیانگر این مطلب است که در سطح معناداری ۹۵ درصد، روند افزایشی به همراه جهش برای میانگین دما مشاهده می‌شود که آزمون پتیت نیز وقوع یک جهش در این پارامتر را تأیید می‌کند. شیب سن نیز بیانگر دلالت بر افزایش تدریجی و پیوسته دما در دوره آماری دارد. برای پارامتر بارش، جهش و روند معناداری دیده نمی‌شود. این نتایج بیانگر آن است که افزایش دمای منطقه نسبت به بارش ملموس‌تر بوده و می‌تواند اثرات مستقیم‌تری بر پویایی پوشش گیاهی و بروز خشکسالی‌های زیست‌محیطی داشته باشد.

هستند. آزمون پتیت برای مقایسه میانگین دو نمونه مستقل در زمانی که واریانس این دو نمونه برابر فرض نمی‌شوند، استفاده می‌شود. این آزمون بر پایه رتبه‌بندی است که برای تشخیص نقاط تغییر موجود در یک سری داده استفاده می‌شود. آزمون من کندال نیز ابتدا توسط من ارائه و سپس توسط کندال بسط داده شد (قربانی، ۱۳۹۳). این روش به طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار گرفته می‌شود (لتنمیر و همکاران ۱۹۹۴). عدم وابستگی به توزیع آماری خاص و اثرپذیری ناچیز این روش برای مقادیر حدی از مزایای آن می‌باشد (پارتال و همکاران ۲۰۰۶). فرض صفر این آزمون، نشان از تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری زمانی است و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) نشانه وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. فرضیات و معادلات این آزمون در پژوهش قربانی (۱۳۹۳) اشاره شده است. سن در سال (۱۹۶۸) با توسعه و آنالیز مطالعات آماری که تیل در سال (۱۹۵۰) انجام داده بود روشی ناپارامتری را برای تحلیل سری‌های زمانی معرفی نمود. این روش نیز مانند روش من کندال از اختلاف بین مشاهدات یک سری زمانی استفاده می‌کند. اساس محاسبه روش سن بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی و قضاوت در مورد معناداری شیب به دست آمده در سطوح مختلف است.

**مدل‌سازی رگرسیون خطی:** با استفاده از روش‌های چندمتغیره این امکان فراهم می‌شود که به صورت هم‌زمان به تحلیل و ارتباط بین چند متغیر با هدف مورد نظر پرداخت. در روش رگرسیون، رابطه بین متغیرها به صورت تابعی از متغیر وابسته است که متغیرهای مستقل را پیش‌بینی می‌کند. به منظور وارد کردن متغیرها در رگرسیون می‌توان از روش گام به گام استفاده نمود. در این روش، متغیرهای مستقل یکی یکی به معادله اضافه شده و اگر نقش معناداری در



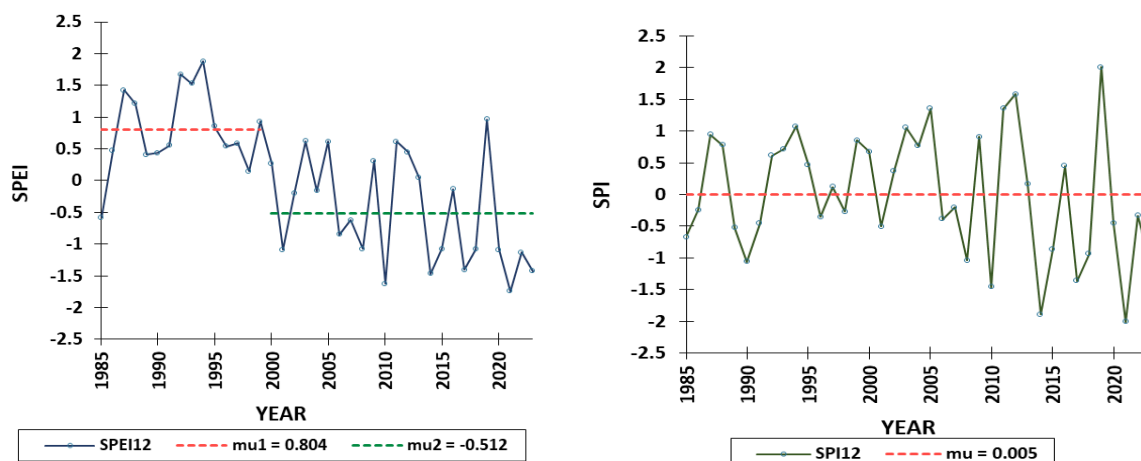
شکل ۴: نمودار روند تغییرات پارامترهای هواشناسی در دوره آماری

جدول ۳: خلاصه نتایج آزمون من‌کندال، پتیت و شیب سن پارامترهای هواشناسی

دوره	P_Value (آزمون من‌کندال)	روند	شیب سن	P_Value (آزمون پتیت)	جهش
بارش	۰/۳۰۴	بدون روند	-۱/۸۷۳	۰/۲۸۵	ندارد
دما	۰/۰۰۰۱>	افزایشی	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰۱>	دارد

هم‌زمان بوده‌اند، گویای نقش فزاینده گرمایش اقلیمی در تشدید خشکسالی‌هاست. انطباق روندهای مشاهده‌شده در SPEI با تغییرات پارامترهای هواشناسی، به‌ویژه برای دما و به‌خصوص بعد از سال ۲۰۰۰ که در شکل (۴) نیز جهش افزایشی آن مشخص است، حاکی از دقت بالای این شاخص در بازتاب شرایط واقعی خشکسالی‌های اقلیمی است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از دو شاخص مذکور، درک جامع‌تری از شدت و روند خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌سازد و می‌تواند در مدیریت منابع آب و سیاست‌گذاری‌های سازگار با تغییر اقلیم، راهگشا باشد. در مجموع شاخص SPEI در تمام شرایط اقلیمی تعداد وقایع خشکسالی بیشتری را نسبت به شاخص SPI نشان می‌دهد و همبستگی بیشتری را با پارامترهای هواشناسی دارد که با مطالعات قربانی و همکاران (۱۳۹۷) همخوانی دارد.

**روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI**  
 روند تغییرات هر دو نمایه برای منطقه مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. تحلیل روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بیانگر نوسانات مشخصی در شدت و فراوانی رخداد خشکسالی در منطقه مورد مطالعه است. شاخص SPI که صرفاً بر پایه بارش طراحی شده، نشان‌دهنده وقوع غالب خشکسالی‌های ضعیف در طول دوره موردبررسی بوده و عدم وقوع خشکسالی‌های شدید در آن تا سال ۲۰۰۰، به ثبات نسبی الگوهای بارشی اشاره دارد. باین‌حال، شیب نزولی در سال‌های اخیر، از تشدید تدریجی خشکسالی‌ها حکایت دارد. شاخص SPEI که متأثر از بارش و تبخیر و تعرق است، نسبت به تنش‌های اقلیمی به‌ویژه دما، حساسیت بالاتری نشان داده است. وقوع خشکسالی‌های متوسط تا شدید در سال‌هایی همچون ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳ که با افزایش دما نیز



شکل ۵: نمودار روند تغییرات نمایه SPI و SPEI در دوره آماری

اقلیمی است و در این میان، شاخص TCI می‌تواند به‌عنوان شاخصی پیش رو در پایش خشکسالی‌های حرارتی در مناطق حساس به گرما در نظر گرفته شود. بررسی شاخص TCI گویای تناسب بیشتر این شاخص با پارامترهای هواشناسی بوده به‌طوری‌که در اکثر سال‌ها با شاخص‌های SPI و SPEI مطابقت قابل‌قبولی در نشان دادن خشکسالی‌ها داشته است که با خروجی پژوهش منتصری و همکاران (۱۴۰۱) و سپاسر و همکاران (۱۴۰۳) و واسی و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

بر اساس شکل (۷)، برای شاخص VCI، در کاربری زراعی، مقدار  $p\_value$  بالاتر از ۰/۰۵ است که نشان می‌دهد روند تغییرات این شاخص در این نوع کاربری از نظر آماری معنادار نیست. اما در کاربری‌های جنگلی و مرتعی، هر دو آزمون من-کندال و پتیت مقدار  $p\_value$  بسیار پایین‌تری را نشان می‌دهند که بیانگر وجود روند معنادار در تغییرات شاخص VCI در مناطق جنگلی و مرتعی است و ممکن است نشان‌دهنده تغییرات جدی‌تر در وضعیت پوشش گیاهی باشد. علی‌رغم مشاهده روند معنادار در شاخص VCI در کاربری جنگلی و مرتعی نمی‌توان این روند را لزوماً به بهبود شرایط رطوبتی نسبت داد. در واقع، افزایش احتمالی VCI ممکن است ناشی از اثرات گرمایش جهانی و افزایش طول دوره سبزی‌نگی باشد که خود منجر به افزایش NDVI و در پی آن VCI

### روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی

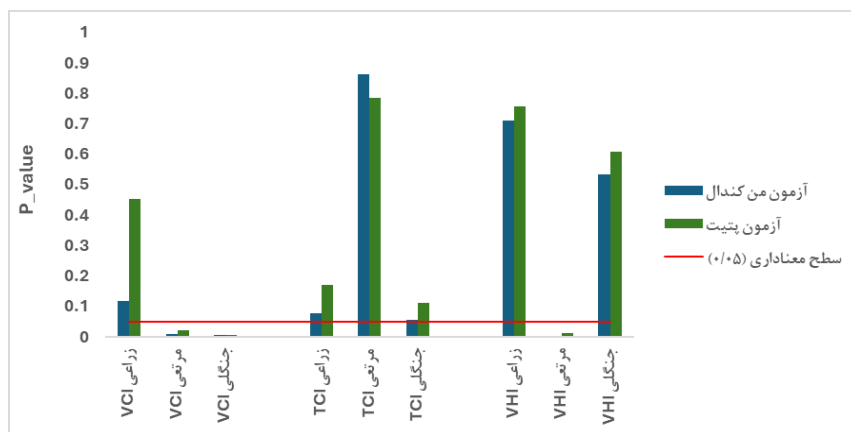
سنجش‌ازدوری: روند خشکسالی در سری زمانی شاخص‌های VCI، TCI و VHI در مناطق مختلف در شکل (۶) ارائه شده است. تحلیل روند شاخص‌های سنجش‌ازدوری مذکور در طول دوره آماری، تفاوت‌های بارزی در حساسیت این شاخص‌ها نسبت به وقوع خشکسالی در کاربری‌های مختلف اراضی نشان می‌دهد. شاخص TCI که مبتنی بر دمای سطح زمین است، بیشترین حساسیت را در شناسایی انواع خشکسالی‌ها داشته و در تمامی سال‌های بررسی شده، وقوع خشکسالی‌هایی با فراوانی بالا را آشکار کرده است. این ویژگی، نقش دمای سطح زمین در شدت و تواتر خشکسالی‌ها را برجسته می‌سازد. در مقابل، شاخص VCI که بر اساس تغییرات پوشش گیاهی طراحی شده، بیشترین تنوع طبقات خشکسالی را در منطقه مرتعی نشان داده است، در حالی که مناطق زراعی و جنگلی واکنش ضعیف‌تری در این شاخص از خود نشان داده‌اند. شاخص VHI که تلفیقی از VCI و TCI است، به‌ویژه در منطقه مرتعی عملکرد نسبتاً قابل‌قبولی داشته، اما به‌طور کلی کمترین حساسیت را نسبت به سایر شاخص‌ها در بازتاب فراوانی و شدت خشکسالی‌ها از خود نشان داده است. نتایج بیانگر آن است که پاسخ شاخص‌های سنجش‌ازدوری به خشکسالی متأثر از نوع کاربری زمین و نوع تنش

دمایی TCI در این مناطق معنادار نیست. در بررسی شاخص VHI، در کاربری مرتعی، آزمون من-کندال مقدار P کمتر از ۰/۰۵ را گزارش کرده، که می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات معنادار در وضعیت کلی سلامت گیاهی در این نواحی باشد.

شده است که با نتایج پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) هم‌راستا بوده و این مسئله بیانگر محدودیت VCI در پایش خشکسالی در مقیاس‌های زمانی سالانه است. بررسی شاخص TCI، در هر سه نوع کاربری، مقادیر p\_value به‌ویژه در آزمون پتیت به‌مراتب بالاتر از آستانه ۰/۰۵ هستند که نشان می‌دهد روند تغییرات



شکل ۶: روند خشکسالی در سری زمانی شاخص‌های VCI، TCI و VHI در مناطق مختلف



شکل ۷: نتایج آزمون‌های تشخیص روند شاخص‌های VCI، TCI و VHI در مناطق مختلف

حاضر دنبال می‌شود، تعیین شاخص مینا، بهینه و نشان‌دهنده وضعیت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه

همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی زمینی و سنجش از دوری: یکی از اهدافی که در مطالعه

آن است که در مناطق نیمه‌خشک، شاخص‌های حرارتی همچون TCI توانایی بیشتری در بازتاب شرایط واقعی خشکسالی دارند، به‌ویژه در پوشش‌های مرتعی که واکنش سریع‌تری به تغییرات دمایی از خود نشان می‌دهند. از این‌رو می‌توان TCI را به‌عنوان شاخص ماهواره‌ای قابل قبول برای پایش خشکسالی در منطقه معرفی کرد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که ضعف همبستگی بین شاخص‌های گیاهی و الگوهای دما و بارش، احتمالاً به تأثیرپذیری پوشش گیاهی از عوامل ثانویه و همچنین بروز تأخیر پاسخ گیاه نسبت به خشکسالی بازمی‌گردد که با یافته‌های سیاسر و همکاران (۱۴۰۳) نیز هم‌راستا است. از سوی دیگر، همبستگی قابل قبول میان شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و شاخص‌های سنجش‌ازدوری نشان می‌دهد که تصاویر ماهواره‌ای از توان تفکیک مکانی و زمانی مناسبی برای پایش خشکسالی برخوردارند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های سلطانی و همکاران (۱۳۹۸) و آرخ‌ی و همکاران (۱۴۰۱) نیز تطابق دارد و بر قابلیت شاخص‌های سنجش‌ازدور در تحلیل شرایط خشکسالی در پوشش‌های گیاهی مختلف تأکید می‌کند.

است که بر اساس شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای TCI، VCI و VHI در کاربری‌های مختلف اراضی طراحی شده باشد. نتایج حاصل از آزمون همبستگی پیرسون در بازه سالانه نشان می‌دهد که شاخص TCI که بر پایه دمای سطح زمین بنا شده، بیشترین همبستگی را با شاخص‌های هواشناسی در مناطق مرتعی و زراعی دارد. بیشینه همبستگی بین SPI و TCI در منطقه مرتعی با ضریب ۰/۶۵ و بین SPEI و TCI نیز در همین منطقه با ضریب ۰/۷۶ مشاهده شده است. همچنین، همبستگی ۰/۸۷ بین دو شاخص SPI و SPEI اعتبار تحلیل‌های صورت گرفته را تأیید می‌کند (جدول ۴). در مقابل، شاخص VCI همبستگی ضعیف‌تری با شاخص‌های زمینی داشته و در برخی موارد حتی همبستگی منفی نشان داده است که این موضوع می‌تواند ناشی از تأخیر واکنش پوشش گیاهی به وقوع خشکسالی یا تأثیرپذیری آن از عوامل غیر هواشناسی همچون بهره‌برداری انسانی، خاک یا بیماری‌های گیاهی باشد. شاخص VHI نیز که ترکیبی از VCI و TCI است، همبستگی متوسطی با شاخص‌های اقلیمی داشته و عملکرد آن در مقایسه با TCI ضعیف‌تر ارزیابی شده است. این یافته‌ها حاکی از

جدول ۴: ضریب همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و ماهواره‌ای در پوشش‌های گیاهی مختلف

دوره	شاخص	VCI			TCI			VHI	
		زراعی	مرتعی	جنگلی	زراعی	مرتعی	جنگلی	مرتعی	جنگلی
سالانه	SPI	۰/۸۷	۰/۴۱	۰/۱۷	-۰/۲	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۴۶	۰/۱۹
	SPEI	-	۰/۲۵	۰/۲۰	-۰/۱۲	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۴۷	۰/۲۹

(۵). پس از محاسبه ماتریس همبستگی و ورود متغیرهای مستقل به نرم‌افزار Minitab، مدل‌هایی با ضرایب همبستگی متفاوت در سه نوع کاربری اراضی استخراج شد. برای شاخص SPI، ضریب همبستگی مدل‌ها در منطقه زراعی بین ۰/۴۰ تا ۰/۶۴، در منطقه مرتعی بین ۰/۶۴ تا ۰/۶۶ و در منطقه جنگلی بین ۰/۴۶ تا ۰/۴۹ گزارش شده است. در مدل‌سازی شاخص SPEI نیز دامنه ضرایب همبستگی از ۰/۴۵ تا ۰/۶۵ در منطقه زراعی، از ۰/۶۶ تا ۰/۷۷ در منطقه مرتعی و از ۰/۴۷ تا ۰/۴۹ در منطقه جنگلی به‌دست

نتایج مدل‌سازی بر اساس رگرسیون چندمتغیره شاخص‌های خشکسالی: به منظور بررسی ارتباط شاخص‌های خشکسالی زمینی با شاخص‌های خشکسالی سنجش‌از دور، به تحلیل مدل رگرسیون چند متغیره و بررسی همبستگی آن‌ها پرداخته شد و نتایج آن در جدول (۵) خلاصه شد. نتایج مدل‌سازی رگرسیون چندمتغیره با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدوری در پیش‌بینی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی زمینی نشان‌دهنده وجود ارتباط آماری معنادار در پوشش‌های گیاهی مختلف است (جدول

کمترین پیچیدگی بر اساس روش گام‌به‌گام از اهمیت بالایی برخوردار است. پس از اجرای رگرسیون چند متغیره با دخالت دادن متغیرهای VCI و VHI در تمامی پوشش‌های گیاهی، فقط متغیر TCI معنادار بود و گام‌های بعدی رگرسیون معنادار نبودند. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت در پوشش‌های مختلف گیاهی در منطقه گرگان شاخص TCI ابزار مناسب‌تری برای پایش خشکسالی می‌باشد.

آمد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های پیش‌بینی در اراضی مرتعی دقت بالاتری دارند، که می‌تواند به واکنش سریع‌تر پوشش مرتعی نسبت به تنش‌های اقلیمی مرتبط باشد. نکته مهم در تحلیل مدل‌ها آن است که افزایش تعداد متغیرها لزوماً منجر به افزایش ضریب همبستگی نمی‌شود، به طوری که مدل‌های بهینه اغلب با تعداد متغیر کمتر اما ضریب همبستگی بالاتر حاصل شده‌اند. از این رو، در فرآیند مدل‌سازی، انتخاب مدل‌هایی با بیشترین قدرت پیش‌بینی و

جدول ۵: مدل رگرسیون چند متغیره با روش گام‌به‌گام

نوع منطقه	معادله	ضریب همبستگی (درصد)
زراعی	$SPI = -3.853 + 8.28 TCI$	۶۵
	$SPEI = -10.68 + 22.59 TCI$	۶۵
مرتعی	$SPI = -5.02 + 11.56 TCI$	۶۶
	$SPEI = -16.09 + 36.85 TCI$	۷۷
جنگلی	$SPI = -3.39 + 7.36 TCI$	۴۶
	$SPEI = -9.69 + 20.82 TCI$	۴۹

معنادار می‌باشد که می‌بایست نشان‌دهنده ترسالی باشد اما با وجود اینکه منطقه به سمت خشک شدن پیش می‌رود و با توجه به شواهد میدانی این افزایش معنادار VCI ناشی از گرم شدن منطقه و کاهش طول دوره خواب گیاه می‌باشد. بر این اساس این شاخص ابزار مناسبی برای پایش خشکسالی نیست. بهترین همبستگی در بین تمام شاخص‌های گیاهی مختلف با شاخص TCI بدست آمد و در بین پوشش‌های گیاهی مختلف نیز پوشش مرتعی رابطه بهتری را با شاخص TCI برقرار کرد. با توجه به تغییرات گرمایی ناشی از تغییر اقلیم در منطقه، شاخص TCI می‌تواند ابزار مناسب‌تری برای پایش خشکسالی باشد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری TCI، VCI و VHI در دوره آماری ۲۴ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۳) برای سه نوع پوشش گیاهی زراعی، مرتعی و جنگلی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. بررسی روند شاخص‌های هواشناسی حاکی از افزایش معنادار دمای منطقه در سال‌های اخیر و در عین حال عدم وجود روند مشخص در بارش بود که این امر نشان‌دهنده تغییر اقلیم دمایی در منطقه می‌باشد. به دلیل کوتاه‌تر بودن دوره تصاویر ماهواره‌ای روند افزایش دما در شاخص TCI معنادار نبود ولی با این وجود از شیب کاهشی برخوردار است. روند شاخص VCI در پوشش جنگلی دارای افزایشی

### منابع

- آرخی، ص؛ بزرگ سواسری، م؛ عمادالدین، س (۱۴۰۱). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش‌ازدور VCI، TCI و VHI در ارزیابی خشکسالی با تصاویر MODIS (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران). جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و سوم، ۱۸۹-۲۲۴.
- سلطانی، میلاد؛ سلطانی، عادل؛ کله‌هوئی، مهین؛ سلیمانی، کریم؛ (۱۳۹۸). پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از تصاویر

- لندست، منطقه مورد مطالعه: شهرستان کرمانشاه، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۰۹، ص ۱۳۸-۱۴۶.
۳. سیاسر، هادی؛ محمدرضاپور، ام‌البنی؛ خدامرادپور، مهرانه. (۱۴۰۳). پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مقایسه با شاخص هواشناسی SPI در دوره‌های کوتاه‌مدت (مطالعه موردی: استان گلستان). جغرافیا و توسعه، شماره ۷۴، ۱۶۶-۱۸۶.
۴. قربانی، خلیل؛ رضایی قلعه، لاله. (۱۳۹۷). تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان. نشریه هواشناسی کشاورزی، جلد ۶، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۷، صص ۳۱-۴۰.
۵. قربانی، خلیل. (۱۳۹۳). الگوی فصلی و مکانی تغییر اقلیم دمای هوا در ایران. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۵)، ۲۵۷-۲۷۰.
۶. منتصری، حسین؛ مردانی، رامین؛ فاضلی، مهدی؛ خلیلی، رضا. (۱۴۰۲). تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و ارتباط آن با شاخص‌های دمایی و وضعیت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای در شهرستان مرودشت. مدل‌سازی و مدیریت آب‌و خاک ۳(۳): ۷۲-۸۹.
۷. زادمهر، حسین؛ فرخیان فیروزی، احمد. (۱۳۹۹). برآورد دمای خاک از داده‌های هواشناسی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین سریع، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۴، تیر ۱۳۹۹.
8. Abdolizadeh, Z., Ghorbani, A., Mostafazadeh, R., & Moameri, M. (2020). Rangeland canopy cover estimation using Landsat oli data and vegetation indices in Sabalan rangelands, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), 1-13. doi:10.1007/s12517-020-5150-1.
9. Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (1965). *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publication, New York.
10. Ahmad, M., Sinclair, C. Werritty, A. (1988). Log-logistic flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 98(3-4): 205-224.
11. Banimahd, S. A., khalili, D. (2012). Comparative analysis of SPI and SPEI meteorological drought indices using parametric and nonparametric correlation tests in selected sites of iran. First National Conference on Sustainable Development Strategies, Natural Disasters Institute Education institute of Mehr Arvand Ministry of the Interior. (In Farsi).
12. Edwards, D.C. and McKee, T.B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Atmospheric Science*.
13. Ejaz, N., Bahrawi, J., Alghamdi, K. M., Rahman, K. U. & Shang, S. (2023). Drought Monitoring Using Landsat Derived Indices and Google Earth Engine Platform: A Case Study from Al-Lith Watershed, Kingdom of Saudi Arabia, *Remote Sensing*, 15(4), 984.
14. Ghorbani, Kh., Kalili, A., Alavipanah, S.K. and Nakhaezadeh, Gh. (2010). Comparative Study of the Meteorological Drought Indices (Spi and Siap) Using Data Mining Method (Case Study of Kermanshah Province). *Journal of Water and Soil*. 24(3): 417-426.
15. Gidey, E., Dikinya, O., Sebego, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2018). Analysis of the long-term agricultural drought onset, cessation, duration, frequency, severity and spatial extent using vegetation health index (VHI) in raya and its environs, Northern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 7(1), 1-18. doi:10.1186/s40068-018-0115-z.
16. Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic Econometrics* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
17. Hamzeh, S., et al. (2017). "Spatio-temporal monitoring of agricultural drought using remotely sensed data (Case study of Markazi province of Iran)." *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 4(3): 53-70.
18. Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679-688.
19. Khalili, R., Montaseri, H., Motaghi, H., & Jalili, M.B. (2021). Water quality assessment of the Talar river in Mazandaran province based on a combination of water quality indicators and multivariate modeling. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 30-47. doi:

- 10.22098/mmws.2021.9322.1033 [In Persian].
20. Khalili, R., Zali, A., & Motaghi, H. (2021). Evaluation of heavy metals in water and sediments of Haraz river, using pollution load index (PLI) and geoaccumulation index (Igeo). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 933-942. [In Persian].
  21. Kogan, F. N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1949– 1964.
  22. Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Wallis, J. R. (1994). Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, 7(4), 586-607.
  23. Maxwell Marumbwa, F., Moses Azong Cho., & Paxie W Chirwa. (2020). An assessment of remote sensing-based drought index over different land cover types in southern Africa, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 41, 2020 - Issue 19.
  24. McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1995). Drought monitoring with Multiple Time scales. In *Proceeding of the Ninth Conference on Applied Climatology*, Dallas, TX, American Meteorological Society. Pp: 233-236.
  25. McKee, T.B.N., Doesken, J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conf. On Applied Climatology*. Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. Pp: 179-184.
  26. Moussa, M.B., Merga, B.B., & Gameda, D.O. (2022). Multiple indices-based assessment of agricultural drought: A case study in Gilgel Gibe Sub-basin, Southern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1), 455-464. doi:10.1007/s00704-022-03962-4.
  27. Ntale, H.K. and Gan, T.Y. (2003). Drought Indices and their application to East Africa. *Int. J. Climatology*, 23(11): 1335-1357.
  28. Partal, T., & Kahya, E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(9), 2011-2026.
  29. Pei, F., Wu, C., Liu, X., Li, X., Yang, K., Zhou, Y., Xia, G., (2018). Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices. *Agricultural and forest meteorology*, 248, 215-227.
  30. Thiel, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. In *Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A* (Vol. 53, pp. 1397-1412).
  31. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
  32. Soleimani Sardo, M. and M. Zarei (2019). "Drought Monitoring Using MODIS Data and Its Comparison with SPI Meteorological Index in Short Periods (Case Study: Jaz\_Murian basin)." *Journal of Watershed Management Research* 10(20): 250-261.
  33. Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería and J. I. López-Moreno. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index- SPEI. *Journal of Climate* 23(7): 1696- 1718.
  34. Wackerly, Dennis; Mendenhall, William; Scheaffer, Richard L. (2008). *Mathematical Statistics with Applications* (7 ed.). Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education. ISBN 0-495-38508-5.
  35. Wu, H., Soh, L.K., Samal, A. and Chen, X.H. 2008. Trend Analysis of Streamflow Drought Events in Nebraska. *Water Resour Manage*, 22: 145-164.
  36. Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2013). Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 10(7), 1133–1145.
  37. Zhao, X., Xia, H., Liu, B. & Jiao, W. (2022). Spatiotemporal comparison of drought in ShaanxiGansu-Ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in google earth engine, *Remote Sensing*, 14(7), 1570.
  38. Zou, Y., Xi, Y., Pan, J., Ahmad, M.I., Zhang, A., Zhang, C., Li, Y., & Zhang, H. (2022). Soy oil and SPI based-oleogels structuring with glycerol monolaurate by emulsion-t empled approach: Preparation, characterization and potential application. *Food Chemistry*, 133767. doi:10.1016/j.foodchem.2022.133767.

