



Comparison of the Efficiency of VHI and VTCI Indices for Agricultural Drought Monitoring in Markazi Province, Iran, Using MODIS Products

Ali Akbar Damavandi ^{1*} 

¹ Departman of Natural Resources, Agricultural Education & Extension Institute, Agricultural Research, Education & Extension Organization, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 31 January 2026

Revised: 10 June 2026

Accepted: 14 June 2026

Available Online:

30 June 2026

Keywords:

Agricultural Drought
Monitoring

MODIS

Normalized Difference
Vegetation Index (NDVI)

Land Surface Temperature
(LST)

Vegetation Health Index
(VHI)

Vegetation Temperature
Condition Index (VTCI)

ABSTRACT

Drought can lead to substantial crop losses and may exacerbate food insecurity and socio-economic tensions. Agricultural production and rangelands in Markazi Province, Iran, are also adversely affected by drought events. In this study, the performance of remote sensing-based indices under drought and wet conditions was evaluated using 15-year MODIS-derived time series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) for August. August was selected because it coincides with peak vegetation cover and maximum thermal stress, enabling a clearer assessment of index performance. Accordingly, the Vegetation Condition Index (VCI) and Temperature Condition Index (TCI) were computed from the 15-year NDVI and LST time series, respectively, and the Vegetation Health Index (VHI) was then derived by assigning equal weights to VCI and TCI. The Vegetation Temperature Condition Index (VTCI) was also calculated by integrating NDVI and LST using an alternative algorithm that accounts for minimum and maximum vegetation thermal conditions. Drought severity maps based on VHI and VTCI were generated for August, and temporal variations in drought severity classes were analyzed over the 15-year period. The results indicated good agreement between VHI and VTCI in representing drought severity across the study years. For validation, the 3-month Standardized Precipitation Index (SPI) ending in August was calculated using data from 36 meteorological stations. Comparison with SPI showed that VHI better captured agricultural drought severity ($R^2=0.67$), likely due to the balanced contribution of vegetation condition and land surface temperature in the VHI formulation. Overall, the findings suggest that remote sensing-based agricultural drought indices can support decision-makers and planners by mitigating the spatial limitations of point-based measurements.

* Corresponding author: Ali Akbar Damavandi

E-mail address: a.damavandi@areeo.ac.ir

How to cite this article: Damavandi, A. A. (2026). Comparison of the Efficiency of VHI and VTCI Indices for Agricultural Drought Monitoring in Markazi Province, Iran, Using MODIS Products. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeoh.2026.97561.1646>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Agricultural drought disrupts plant growth by reducing soil moisture. It occurs when the water demand for evapotranspiration exceeds the available water in the soil. As a natural and recurring phenomenon driven by rainfall variability, agricultural drought leads to delayed planting, reduced growth, and decreased crop yield, ultimately affecting farmers' livelihoods. Monitoring agricultural drought using satellite imagery is an effective method for mitigating its impacts at local and regional scales. In this context, remote sensing has been widely employed for agricultural drought monitoring, leading to the development of indices such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST). NDVI indicates vegetation health and density, but alone it is insufficient for drought detection as it does not reveal initial water stress. LST serves as a complementary measure, reflecting the surface energy balance and plant water stress. The relationship between these two indices—often visualized as a triangular scatter plot—can be negative (when water is the limiting factor) or positive (when sunlight is the limiting factor), depending on the season and regional moisture conditions. To effectively monitor agricultural drought, various composite indices have been developed. Two important examples are the Vegetation Health Index (VHI) and the Vegetation Temperature Condition Index (VTCI). VHI is derived from a simplified, equally weighted combination of NDVI and LST, while VTCI employs a more complex algorithm that targets thermal conditions within specific NDVI ranges. Field studies (e.g., in Bangladesh and Markazi Province, Iran) have confirmed the efficacy of these indices, particularly VHI, in zoning and classifying drought severity from mild to very severe. This research compares the effectiveness of these two indices in monitoring agricultural drought.

Material and Methods

This study was conducted in Markazi Province, Iran. The province covers an area of approximately 29,127 km², has a semi-arid climate, and receives an average annual rainfall of about 290 mm, ranging from 520 mm in Shazand to 177 mm in Delijan. About 75% of the province is mountainous. The data used in this study include meteorological data extracted from monthly rainfall statistics of 36 synoptic and rain gauge stations over a 15-year period (1999–2014). The primary meteorological index used was the Standardized Precipitation Index (SPI) on a 3-month scale. Remote sensing data were obtained from the MODIS sensor onboard the Terra satellite. NDVI was derived from the MOD13Q1 product with a spatial resolution of 250 m and a temporal resolution of 16 days for the months April to September. LST was extracted from the MOD11A2 product with a resolution of 1 km and an 8-day interval for the same period. The remote sensing time-series indices studied included two composite indices based on NDVI and LST for agricultural drought monitoring: (1) the Vegetation Health Index (VHI), obtained from a simple combination of NDVI and LST, which itself comprises the Vegetation Condition Index (VCI)—measuring long-term NDVI changes—and the Temperature Condition Index (TCI)—evaluating long-term LST changes—with VHI calculated as the equally weighted average of VCI and TCI; and (2) the Vegetation Temperature Condition Index (VTCI), which has a more complex algorithm defined based on the relationship between LST and NDVI on a specific date within the study area. In this method, for each NDVI value, a maximum (warm/dry edge) and minimum (cold/wet edge) range of LST is determined, and the temperature position of each pixel within this range is measured. Lower VTCI values indicate more severe drought. The aim of this research is to compare the efficiency of VHI and VTCI in monitoring agricultural drought in Markazi Province.

Results and discussion

This research aimed to monitor agricultural drought in Markazi Province from 2000 to 2014 and compared two major remote sensing indices—the Vegetation Health Index (VHI) and the Vegetation Temperature Condition Index (VTCI)—with the meteorological Standardized Precipitation Index (SPI). The characteristics of the indices are as follows:

SPI was calculated as a ground-based meteorological drought indicator for August at a 3-month scale, using precipitation data from 36 synoptic and rain gauge stations. The extracted SPI values indicated mild to moderate drought conditions in most stations during August. VHI is a composite index derived from VCI and TCI, obtained by normalizing NDVI and LST time series, respectively. This index was calculated using equal weighting of the two sub-indices and classified into five drought intensity classes. The final maps revealed that 2000, 2001, and 2010 were the driest years, while 2003, 2004, 2006, and 2007 had the wettest conditions. VTCI, with a more complex algorithm, operates based on the relationship between LST and NDVI on specific dates. By plotting a scatter diagram of these two variables, the "warm edge" (dry conditions) and "cold edge" (wet conditions) were determined, and the position of each pixel within this spectrum was assessed. This index was also divided into five drought classes. The results indicated that 2000, 2004, 2011, and 2013 experienced the most severe droughts, while 2006, 2010, and 2014 had the least stressful conditions.

Comparison of the indices revealed that VTCI is more sensitive to drought and wetness variations than VHI. This difference stems from their mathematical logic: VHI is derived from a global averaging of NDVI and LST across the entire region, whereas VTCI analyzes temperature variations among pixels with similar NDVI values, making it more detail-oriented. Regression analysis between the satellite-based indices and SPI showed that in August, TCI and VHI had a significant correlation with SPI. In contrast, VTCI did not show a significant relationship with SPI during this month. This finding indicates that, in this specific study, VHI aligns better with the standard meteorological drought index (SPI). For validation, a linear regression model based on TCI and NDVI was developed to predict SPI. Evaluating this model for the year 2015 (outside the study period) using Mean Squared Error (MSE) and Root Mean Squared Error (RMSE) confirmed the model's acceptable accuracy (low error values). This research demonstrated the effectiveness of MODIS satellite imagery and its derived indices (e.g., NDVI and LST) in the spatiotemporal monitoring of agricultural drought in Markazi Province. Although VTCI exhibited higher analytical sensitivity, in this particular case, the composite VHI index was identified as a more suitable tool for monitoring agricultural drought and estimating conditions consistent with precipitation data, due to its significant correlation with the ground-based SPI and its relatively simpler calculation. This approach can address the gap caused by the scarcity of ground stations and enable extensive, timely drought monitoring.

Conclusion

Satellite imagery, particularly products from the MODIS sensor such as NDVI and LST, has high capability for monitoring dynamic phenomena like agricultural drought due to its temporal and spatial continuity. These products require no complex preprocessing and enable the creation of long-term time series, which form the basis for developing composite indices such as VHI and VTCI. This study compared two key composite indices for monitoring agricultural drought in Markazi Province. VHI operates based on the simplified average of vegetation density (NDVI) and land surface temperature (LST). VTCI uses a more complex algorithm and determines drought intensity by identifying the warm edge (dry conditions) and cold edge (wet conditions) in the LST–NDVI relationship. The research findings indicated that in the study area, the performance of VHI in monitoring agricultural drought was superior to that of VTCI. This superiority was demonstrated by a more significant correlation of VHI results with the ground-based SPI. Specifically, VHI maps identified 2000, 2001, and 2010 as the driest years, which aligned better with SPI results that identified 2000 and 2008 as the driest. Furthermore, VHI classified over 56% of the province's area as "no drought," while VTCI placed about 44% of the area in the "moderate drought" category. In conclusion, composite remote sensing indices such as VHI can serve as suitable alternatives to meteorological indices for regional drought monitoring, especially in areas with sparse weather stations, and can assist planners in drought risk management. To improve accuracy, future studies are recommended to incorporate more ground data, consider physiographic factors, and utilize other sensors (e.g., Sentinel and Landsat).



مقایسه کارایی شاخص‌های VHI و VTCI در پایش خشک‌سالی کشاورزی استان مرکزی با استفاده از محصولات MODIS

علی‌اکبر دماوندی^{۱*}

^۱ گروه منابع طبیعی، مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
محصولات کشاورزی و مراتع در استان مرکزی تحت تأثیر خشک‌سالی‌ها قرار می‌گیرند. بنابراین پایش خشک‌سالی کشاورزی با شاخص‌های مناسب از ضروریات است. در این تحقیق برای مقایسه کارایی شاخص‌های سنجش‌ازدوری در ارزیابی خشک‌سالی کشاورزی، سری‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST ۱۵ ساله سنجنده MODIS ماه مرداد در استان مرکزی موردبررسی قرار گرفت. انتخاب ماه مرداد به دلیل اوج پوشش گیاهی و تنش حداکثر درجه حرارت بوده تا تفاوت کارایی شاخص‌های مورد مقایسه آشکارتر گردند. برای این منظور، شاخص VCI و TCI به ترتیب بر اساس سری‌های زمانی ۱۵ ساله NDVI و LST برای ماه مرداد، تولید و در نهایت شاخص VHI و VTCI با دو الگوریتم متفاوت ایجاد گردید. در ادامه نقشه‌های درجات شدت خشک‌سالی این دو شاخص، استخراج و تغییرات شدت طبقات در سری‌های زمانی ۱۵ ساله موردبررسی قرار گرفت. نتایج نقشه‌های حاصل نشان داد که شاخص‌های VHI و VTCI در نمایش شدت‌های خشک‌سالی در سال‌های مورد مطالعه، تطابق خوبی داشتند. برای راستی آزمایی نتایج این دو شاخص، از شاخص SPI سه‌ماهه منتهی به ماه مرداد، استخراج‌شده از ۳۶ ایستگاه هواشناسی استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از شاخص‌های مذکور با شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI، نشان داد که شاخص VHI در ارزیابی شدت خشک‌سالی کشاورزی مؤثرتر بوده است ($R^2=0.67$). دلیل اصلی این امر، دخالت برابر پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین در شاخص VHI است. اندازه‌گیری‌های زمینی تغییرات کمی پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین و نیز تأثیر متغیرهای توپوگرافی منطقه مطالعاتی و نوع کاربری اراضی، به‌منظور مطالعات تکمیلی برای پایش زمانی-مکانی خشک‌سالی، پیشنهاد می‌گردد.	تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴ کلمات کلیدی: پایش خشک‌سالی کشاورزی مودیس (MODIS) شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) دمای سطح زمین (LST) شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) شاخص وضعیت دمایی پوشش گیاهی (VTCI)

مقدمه

خشک‌سالی کشاورزی بر سطح رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد و مانع از رشد گیاه می‌شود. هنگامی که مقدار آب موردنیاز برای تبخیر و تعرق از کل مقدار رطوبت موجود در خاک بیشتر شود، خشک‌سالی رخ می‌دهد (Saxena et al., 2019). خشک‌سالی یک ویژگی طبیعی و تکرارشونده آب‌وهوا است و ویژگی‌ها و همچنین تأثیرات آن از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. تغییرپذیری در میزان بارندگی و توزیع آن منجر به تأخیر در زمان کاشت و رشد ضعیف محصول می‌شود که در نهایت منجر به کاهش تولید محصول می‌شود که به‌شدت بر فرصت‌های معیشتی تأثیر می‌گذارد (AghaKouchak et al., 2015). می‌توان با پایش منظم خشک‌سالی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، اثرات خشک‌سالی را کاهش داد. پایش خشک‌سالی کشاورزی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های اخیر موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته و به‌طور گسترده در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود. برای دستیابی به رشد پایدار در بهره‌وری کشاورزی و بهبود معیشت افراد تحت تأثیر خشک‌سالی، پایش خشک‌سالی کشاورزی، مناسب‌ترین راه برای کاهش مشکلات در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای است (Sultana, Gazi & Mia, 2021). در طول دهه‌های گذشته، سنجنش‌ازدور به‌طور گسترده برای پایش خشک‌سالی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات مختلفی که در سراسر جهان انجام شده است، همبستگی قوی بین شاخص‌های پوشش گیاهی سنجنش‌ازدور و رطوبت خاک را نشان داده‌اند (Pogacar, Znidarsic, Vlahovic, Crepinsek & Susnik, 2022).

از مهم‌ترین روش‌های پایش خشک‌سالی، روش استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است. شاخص‌های خشک‌سالی، سنجنش‌های کمی هستند که سطوح خشک‌سالی را به‌وسیله همانندسازی و تلفیق داده‌ها از یک یا چندین متغیر مانند بارندگی، درجه حرارت و تبخیر و تعرق به یک مقدار عددی واحد توصیف می‌نمایند (Hakimdot, Rastegar, Pourzeidi & Hatami, 2014). در نتیجه یک شاخص خشک‌سالی که تغییرات زمانی و مکانی الگوهای استفاده از آب محصول را توصیف کند برای پایش خشک‌سالی مناسب‌تر است. داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای که از قابلیت‌های خوب مکانی و زمانی برخوردار هستند، می‌توانند به‌عنوان ابزار مناسبی در پایش مکانی - زمانی خشک‌سالی خصوصاً از نوع کشاورزی نقش ایفا نمایند (Hao & Singh, 2015). از سال ۱۹۸۱، داده‌های سنجنده^۱ AVHRR ماهواره‌های سری NOAA^۲ برای تولید شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده^۳ (NDVI) و درجه حرارت سطح زمین^۴ (LST) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تنکابیل و گاماج (Thenkabail & Gamage, 2004) چنین نتیجه گرفتند که شاخص NDVI به‌عنوان شاخص مناسبی برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی است. LST به دلیل اینکه یکی از پارامترهای کلیدی در فیزیک سطح زمین در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی است نیز یک شاخص خوب برای نمایش تعادل انرژی در سطح زمین است. شاخص NDVI به‌تنهایی قابلیت تعیین خشک‌سالی را ندارد چراکه NDVI اصولاً اثر سبزیگی گیاهی را نشان داده و اطلاعاتی از میزان آب در خاک را نمایش نمی‌دهد (Chu, Venevsky, Wu & Wang, 2019). این امر می‌تواند سبب اشتباه در شروع خشک‌سالی گردد. چراکه در زمان شروع خشک‌سالی، گیاه هنوز سبز است ولی آب موجود در گیاه تخلیه شده است. در عوض درجه حرارت سطح زمین (LST) یک مکمل خوب در ارزیابی خشک‌سالی است، زیرا اثر تنش آب را در تاج پوشش گیاهان نشان می‌دهد (Parida, 2006). نمودار پراکنش شاخص پوشش گیاهی - درجه حرارت سطح زمین (شکل ۱) که به‌صورت مثلث است در ارزیابی خشک‌سالی کاربرد مناسبی دارد.

در ادامه تولید و تکامل داده‌های سنجنش‌ازدور، داده‌های سری زمانی LST و NDVI سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب برای تعیین و پایش تغییرات خشک‌سالی کشاورزی تولید شده‌اند (Huang et al., 2020). بر همین اساس، محققین

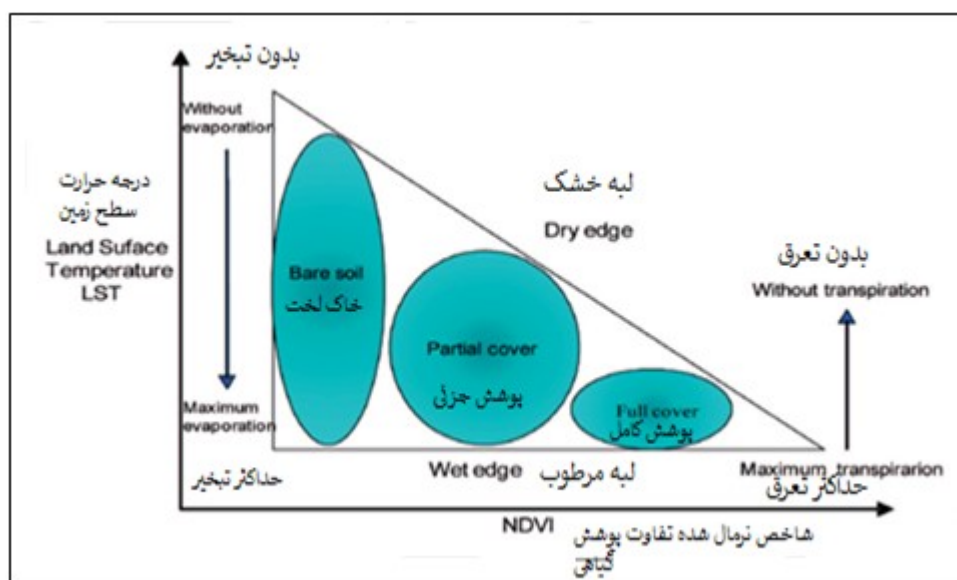
1 - Advanced Very High Resolution Radiometer

2 - National Oceanic and Atmospheric Administration

3 - Normalized Difference Vegetation Index

4 - Land Surface Temperature

مبادرت به ارزیابی و پایش مکانی و زمانی خشک‌سالی با استفاده از سری‌های زمانی NDVI و LST نمودند. حسن و محمودالاسلام (Hassan & Mahmud-ul-islam, 2015) به ارزیابی آسیب‌پذیری خشک‌سالی در شمال غرب بنگلادش با استفاده از تصاویر NDVI و LST سنجنده MODIS پرداختند. ایشان پس از محاسبه شاخص VCI^1 از تصاویر NDVI و شاخص TCI از تصاویر LST، شاخص VHI^2 را برای سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ محاسبه نموده و بر اساس آن خشک‌سالی را در سه طبقه: متوسط، شدید و خیلی شدید طبقه‌بندی نمودند. نتیجه آنکه شاخص VHI برای تعیین مناطق تحت تأثیر خشک‌سالی شاخص مناسبی است.



شکل ۱- ارتباط میان NDVI و LST

Fig.1. NDVI and LST relation (Wang, Li, Gong & Song, 2001)

دماوندی و همکاران (Damavandi, Rahimi, Yazdani & Norouzi, 2016) با استفاده از شاخص وضعیت حرارت پوشش گیاهی^۳ (VTCl) به پایش مکانی خشک‌سالی کشاورزی در استان مرکزی پرداختند. در این پژوهش خشک‌سالی به ۵ طبقه: شدید، متوسط، ملایم، نرمال و مرطوب تقسیم و برای سال‌های مطالعه، مساحت طبقات مذکور استخراج گردید. نتایج نشان داد که طبقه خشک‌سالی متوسط بیشترین فراوانی را در بازه زمانی پروژه داشته است. ارتباط میان NDVI و LST بستگی به فصل سال و شرایط رطوبتی منطقه دارد (Jiao, Tian, Chang, Novick & Wang, 2019a). نتایج یک تحقیق جامع که در خصوص رابطه میان NDVI و LST در قاره آمریکای شمالی در طول فصل رویش انجام شد (آوریل تا سپتامبر) نشان داد وقتی آب عامل محدودکننده برای رشد پوشش گیاهی باشد، رابطه NDVI و LST منفی بوده و در صورتی که تابش خورشید عامل محدودکننده باشد رابطه NDVI و LST مثبت است (Jiao, Wang, Novick & Chang, 2019b).

اثرات تنش خشک‌سالی بر کشاورزی ارتباط نزدیکی با تبخیر و تعرق حقیقی به‌وسیله تاج پوشش‌های گیاهان در دوره رشد دارد. بنابراین شاخص خشک‌سالی که ارتباط نزدیکی با الگوهای آب گیاهان زراعی داشته باشد، نقشی کلیدی را در پایش خشک‌سالی کشاورزی ایفا خواهد کرد (Khalil et al., 2013). شاخص‌های خشک‌سالی زیادی برای تعیین و پایش بهنگام و واقعی گسترش و وسعت خشک‌سالی ایجاد گردیده‌اند. شاخص VHI با استفاده از سری‌های زمان NDVI و LST و با فرض میانگین مساوی (ضریب ۰/۵) به پایش خشک‌سالی می‌پردازد. الگوریتم شاخص VTCl متفاوت بوده و باهدف قرار دادن شرایط حرارتی شاخص NDVI، این پایش

1- Vegetation Condition Index

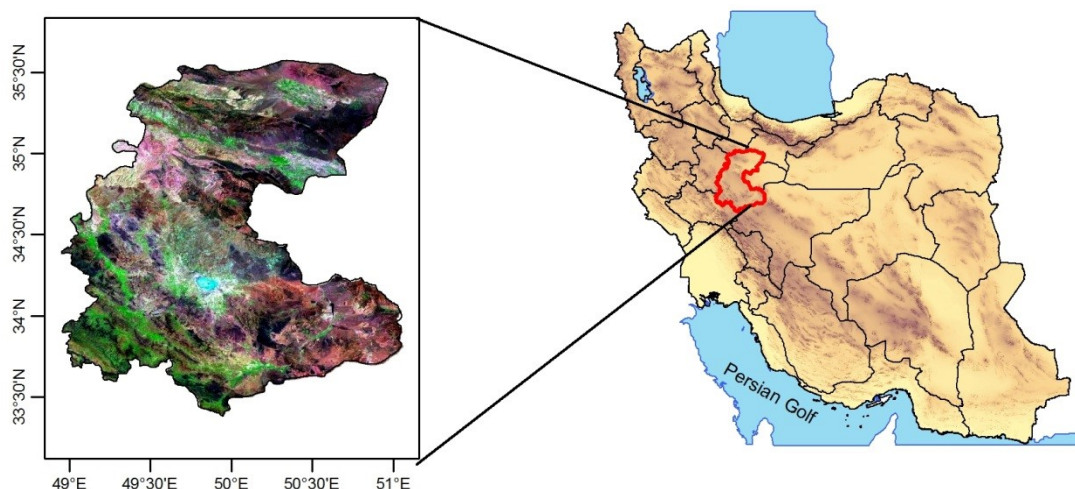
2- Vegetation Health Index

3- Vegetation Temperature Condition Index

را انجام می‌دهد (West, Quinn & Horswell, 2019). هدف این تحقیق مقایسه کارایی این دو شاخص در پایش خشک‌سالی کشاورزی استان مرکزی ایران است.

منطقه مورد مطالعه

استان مرکزی بین عرض‌های جغرافیایی 30° و 33° تا 35° و $35'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی 48° و $57'$ تا 51° و $05'$ شرقی واقع شده است. استان مرکزی از شمال به استان‌های تهران، البرز و قزوین، از غرب به استان همدان، از جنوب به استان لرستان و شرق به استان‌های قم و اصفهان محدود شده است (شکل ۲). مساحت کل آن در حدود ۲۹۱۲۷ کیلومترمربع ($2,912,700$ هکتار) است که حدود $1/85$ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده و چهاردهمین استان کشور از نظر مساحت است. میزان بارندگی نواحی مختلف استان نیز متناسب با کاهش ارتفاع کم می‌شود به طوری که پرباران‌ترین ایستگاه آن، شهرستان شازند با 520 میلی‌متر و کم باران‌ترین ایستگاه آن، دلیجان با 177 میلی‌متر بارندگی و متوسط بارندگی استان نیز حدود 290 میلی‌متر گزارش شده است. حدود 75% از مساحت استان کوهستانی و مابقی آن دشت است. به علت تنوع آب‌وهوا، میزان رطوبت و باران در مناطق مختلف استان یکسان نبوده و از الگوی بارندگی متنوعی برخوردار است.



شکل ۲- منطقه جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.2. Geographic Area of study Area

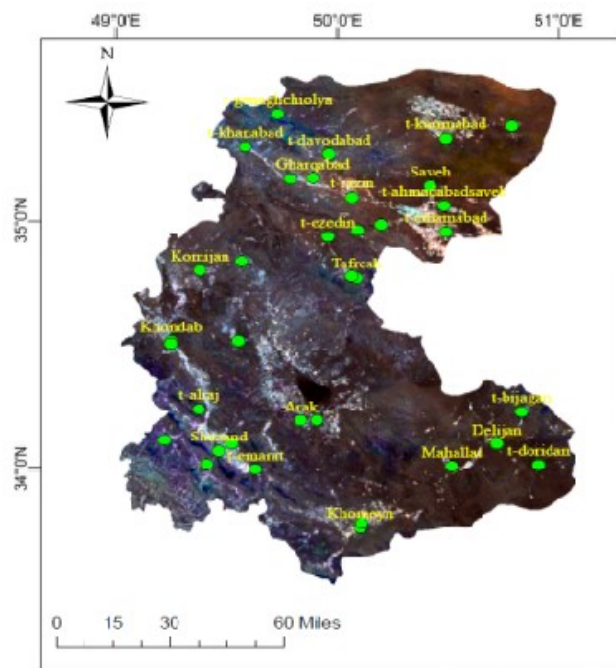
مواد و روش‌ها

داده‌های هواشناسی

در این تحقیق به منظور محاسبه شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI^1 ، آمار بارندگی و سایر پارامترهای هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو تهیه گردید. آمار بارندگی ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک (۱۱ ایستگاه) از سازمان هواشناسی و ایستگاه‌های باران‌سنجی (۲۵ ایستگاه) از شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو تهیه شد (شکل ۳). از میان شاخص‌های هواشناسی موجود، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بنا به ویژگی‌ها و مزایای آن‌ها (پرکاربرد بودن و انعطاف زمانی و مکانی) مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به اینکه برای محاسبه شاخص‌های مذکور نیاز به حداقل ۲۵ سال داده بارش ماهانه است، ایستگاه‌های مذکور از میان تعداد ایستگاه‌های بیشتر و به دلیل دارا بودن حداقل ۲۵ سال آمار بارندگی منتهی به سال ۱۳۹۳ انتخاب شدند. به علت وقوع

1 - Standardized Precipitation Index

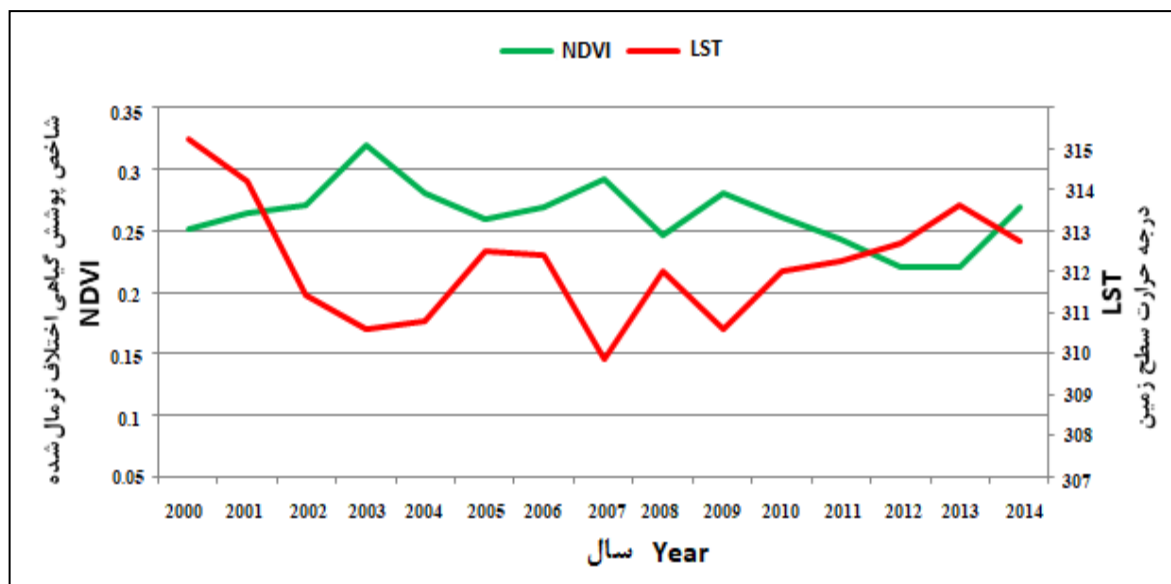
چند خشک‌سالی و ترسالی شدید در بازه ۱۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۳ و نیز یکنواختی الگوریتم محاسبه شاخص‌های سنجش‌ازدوری در این بازه زمانی، از داده‌های سال ۱۳۹۳ به بعد استفاده نشد. در این پژوهش، نظر به تحقیقات صورت گرفته قبلی و نیز وضعیت و شرایط منطقه مورد مطالعه از نظر پوشش گیاهی و وجود داده‌های بارندگی، از شاخص‌های مذکور در بازه‌های زمانی ۳ ماهه استفاده گردید. توضیح اینکه با توجه به قابل‌دسترس بودن اطلاعات ماهواره‌ای سنجنده مودیس از سال ۲۰۰۰ میلادی (۱۳۷۹)، شاخص‌های مورد بحث برای سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ استخراج و مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۳ - موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه
Fig. 3. Position of meteorological stations of study area

داده‌های ماهواره‌ای

به منظور ایجاد سری‌های زمانی NDVI برای ارزیابی خشک‌سالی، محصولات NDVI مربوط به سنجنده MODIS ماهواره Terra با قدرت تفکیک مکانی اسمی ۲۵۰ متر (حقیقی ۲۲۶ متر) و قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روز، سطح ۳ (MOD13Q1) مربوط به مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ از سایت NASA (landsweb) دریافت گردید. پیش‌پردازش‌هایی مانند تصحیح پراکنش مولکولی، جذب ازن و گردوغبار و اصلاح نادیر و زوایای تابش خورشیدی از طریق مدل BRDF1 بر روی این محصول صورت گرفته است. محصول LST نیز از سنجنده MODIS ماهواره Terra با قدرت تفکیک مکانی اسمی ۱ کیلومتر (حقیقی ۸۵۵) و قدرت تفکیک زمانی ۸ روز، سطح ۳ (MOD11A2) برای مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳ دریافت گردید. تصحیحاتی مانند ژئورفرنس کردن، کالیبراسیون تابش، حذف اثر ابر، درجه حرارت اتمسفری و بخار آب بر روی این محصول توسط NASA صورت گرفته است. محصول LST نیز برای مردادماه ۴ عدد بود. شکل ۴ ارتباط میان مقادیر NDVI و LST را در محل ایستگاه‌های سینوپتیک داخل استان مرکزی نشان می‌دهد.



شکل ۴ - ارتباط مقادیر NDVI و LST در منطقه تحقیق در مردادماه سال‌های تحقیق

Fig. 4. Relation of NDVI and LST in research study in August for years of study

شاخص‌های سنجش‌ازدوری پوشش گیاهی

شاخص NDVI به‌عنوان معروف‌ترین شاخص پوشش گیاهی، از طریق سنجش تغییرات جذب تابش کلروفیل گیاهی، برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Thenkabail, Gamage, Nilantha & Vladimir, 2004). در سال‌های اخیر از این شاخص برای تعیین و ارزیابی خشک‌سالی در مناطق مختلف جهان استفاده فراوانی شده است (Liu, Zhu, Pan, Bai & Li, 2018). رابطه این شاخص که نسبت اختلاف طیف مادون قرمز نزدیک و طیف قرمز به مجموع آن‌ها است به شرح رابطه (۱) است:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

در رابطه فوق NIR انعکاس باند ۱ (۶۷۰-۶۲۰ نانومتر) و Red انعکاس باند ۲ (۸۷۶-۸۴۱ نانومتر) سنجنده مودیس است. به دلیل آنکه شاخص NDVI به‌تنهایی قابلیت نمایش خصوصیات خشک‌سالی را دارا نیست، استفاده از شاخص‌های ترکیبی با رویکرد به‌کارگیری سری‌های زمانی NDVI و LST در دهه ۹۰ میلادی مطرح گردید (Ni & Xiaoping, 2015). بر این اساس با توجه به اثرات خشک‌سالی بر پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین، شاخص‌های VCI و TCI مبتنی بر سری‌های زمانی NDVI و LST ایجاد گردیدند. رابطه‌های (۲) و (۳) شاخص‌های ترکیبی VCI و TCI را نشان می‌دهد:

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

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} * 100 \quad (3)$$

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

که در آن $NDVI_{min}$ ، $NDVI_{max}$ و $NDVI_i$ به ترتیب میانگین حداقل طولانی‌مدت، میانگین حداکثر طولانی‌مدت و ماه موردنظر برای هر پیکسل و LST_{min} ، LST_{max} و LST_i به ترتیب میانگین حداقل دمای طولانی‌مدت، میانگین حداکثر دمای

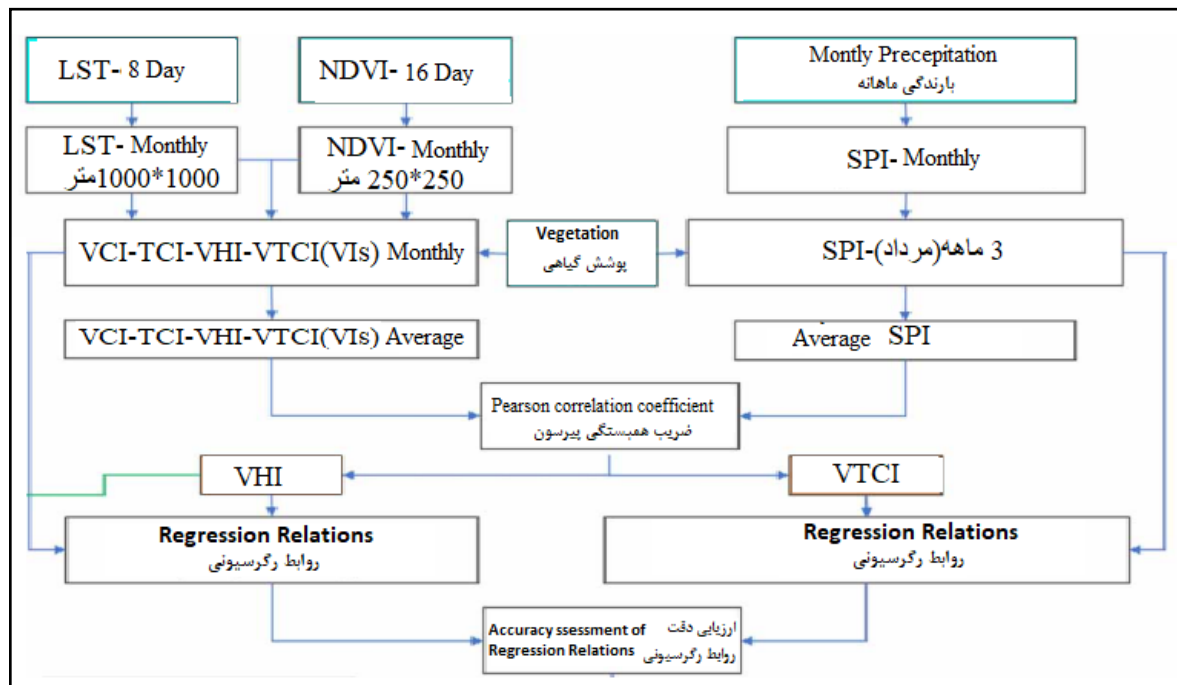
طولانی مدت و دمای سطح زمین در ماه مورد مطالعه است (Zuo et al., 2019). شاخص VCI بر اساس ارتباط میان مقدار واقعی NDVI و مقادیر NDVI در بهترین (NDVI_{max}) و بدترین (NDVI_{min}) شرایط رطوبتی فصل رشد ایجاد گردیده است (Zhao, Li & Li, 2010). این درحالی است که شاخص TCI بر اساس ارتباط میان درجه حرارت واقعی سطح زمین و درجه حرارت شرایط پتانسیل (LST_{min}) و تنش گیاهی (LST_{max}) ایجاد گردیده است (Zhang, Mu & Huang, 2016). شاخص VHI در رابطه (۴) نیز ترکیبی از شاخص های VCI و TCI است که هدف آن دخیل کردن شرایط رطوبت پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین در یک شاخص مجموع است.

$$VTICI = \frac{LST_{NDVI_{max}} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_{max}} - LST_{NDVI_{min}}} \quad (5)$$

$$LST_{NDVI_{max}} = a + bNDVI_i$$

$$LST_{NDVI_{min}} = a' + b'NDVI_i \quad (6)$$

LST_{NDVI.min} و LST_{NDVI.max} به ترتیب محدوده های ماکزیمم و مینیمم دمای سطح زمین با مقادیر NDVI یکسان در منطقه و LST_{NDVI.i} دمای سطح زمین هر پیکسل با شاخص پوشش گیاهی LST_{NDVI} می باشند. ضرایب a، b، a' و b' مربوط به معادلات فوق را می توان از ترسیم نمودار پراکنش دمای سطح زمین در برابر NDVI برای تاریخ های مشخص به دست آورد (Wang et al., 2001). شاخص VTICI نه تنها مرتبط با تغییرات NDVI در منطقه است، بلکه در ارتباط تغییرات LST پیکسل های با مقادیر NDVI بخصوص نیز است. به طور کلی در مقادیر پایین تر VTICI، خشک سالی شدیدتر روی می دهد. LST_{max} مربوط به لبه گرم است جایی که رطوبت خاک در دسترس کمتر بوده و گیاهان تحت شرایط خشک هستند. LST_{min} مرتبط با لبه سرد است، جایی که محدودیت رطوبت برای رشد گیاهان نیست (Damavandi et al., 2016).



شکل ۵ - طرحواره تحقیق

Fig. 5. Rresearch flowchart

نتایج و بحث

شاخص SPI

برای محاسبه شاخص SPI در ماه مرداد سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳ استان مرکزی، از ۱۱ ایستگاه سینوپتیک و ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی استفاده گردید و نمودار تغییرات شاخص SPI برای دوره ۳ ماهه منتهی به مرداد برای ایستگاه‌های مذکور ترسیم گردید (جدول ۱).

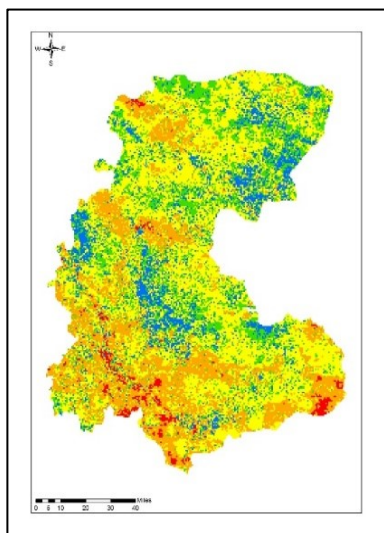
جدول ۱- مقادیر شاخص SPI سه‌ماهه ایستگاه‌ها استان مرکزی برای ماه مرداد

Table 1- Amounts of SPI-3 for Markazi Province stations for month of Mordad

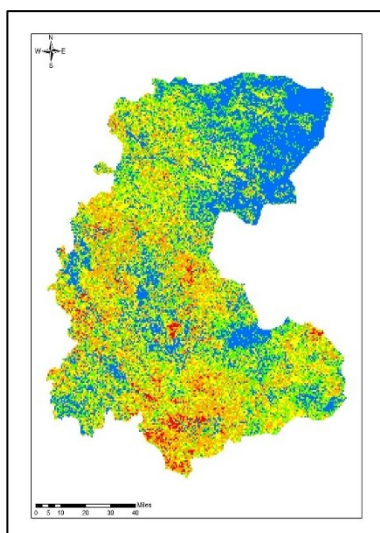
نام ایستگاه Station	SPI-3 Time Scale	نام ایستگاه Station	SPI-3 Time Scale	نام ایستگاه Station Name	SPI-3 Time Scale	نام ایستگاه Station Name	SPI-3 Time Scale
اراک Arak	-0.62	شازند Shazand	0.34	بند عباسی BandAbasi	-1.2	عمارت Emarat	0.36
آشتیان Ashtian	-0.88	تفرش Tafresh	-0.4	رازمین Razin	-1.11	الرج Alraj	-0.39
دلیجان Delijan	-1.19	خمین Khomein	-0.3	قدمگاه Ghadamgah	-0.23	اراقله Araghalah	-0.8
غرق آباد GharghAbad	-0.56	جوشیروان Joshiravan	-0.89	احمدآباد AhmadAbad	-0.76	خان آباد KhanAbad	0.3
خمین Khomein	0.34	ساروق بالا SaroghBala	-0.72	امام آباد EmamAbad	-0.49	بیجان Bijagan	-1.29
خنداب Khondab	-0.08	داودآباد DavodAbad	-1.17	تفرش Tafresh	-0.52	جناقچی علیا JenaghchiOlya	-0.7
کمیجان Komijan	-0.6	مزرعه Mazraeh	-0.17	پیک زرنند PeykZarand	-1.28	دستجان Dastjan	-0.98
محلات Mahalat	0	جلایر Jalayer	-0.89	دوریدان Doridan	-1.1	عزالدین Ezedin	-1.25
ساوه Saveh	-0.57	آستانه Astandeh	0.88	کریم آباد KarimAbad	-0.36	مالک آباد MalekAbad	-0.85

شاخص VHI

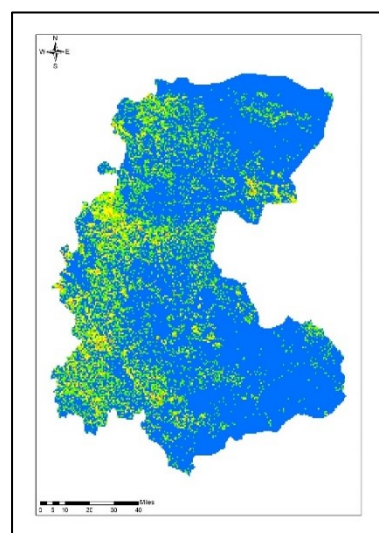
پس از تنظیم NDVI و LST مربوط به مردادماه، فایل مربوط به این ماه در ۱۵ سال مطالعه (۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳) ساخته شد و تصاویر حداقل و حداکثر آن‌ها تولید شد. در ادامه، مطابق رابطه هر یک از شاخص‌های VCI و TCI، تعداد ۱۵ تصویر برای هر یک از این شاخص‌ها تولید شد (برای ۱۵ سال). پس از آن شاخص VHI که حاصل جمع شاخص‌های VCI و TCI است به همین تعداد ایجاد گردید. به منظور تعیین طبقات شدت خشک‌سالی، تصاویر حاصل از VHI به ۵ طبقه شدت خشک‌سالی شامل: خیلی شدید (۱۰-۰)، شدید (۲۰-۱۰)، متوسط (۳۰-۲۰)، ضعیف (۴۰-۳۰) و بدون خشک‌سالی (>۴۰) تقسیم شدند. تصاویر سال‌های با بیشترین و کمترین شدت خشک‌سالی در شکل ۵ نمایش داده شده است. مطابق این نگاره برای مقایسه خشک‌سالی در بین سال‌ها، سال ۱۳۷۹ نسبت به سال‌های دیگر از شدت خشک‌سالی بیشتری برخوردار بوده است. نتایج حاصل از نقشه‌های استخراج‌شده (شکل ۶) آن است که سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ کمترین تنش خشک‌سالی را داشته و سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ دارای شدت خشک‌سالی شدید بوده‌اند.



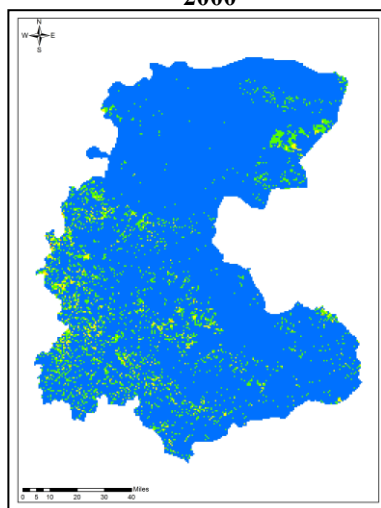
2000



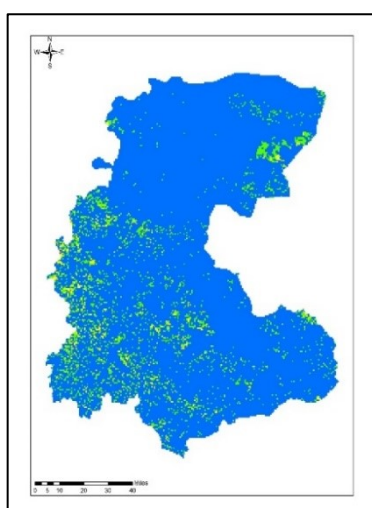
2001



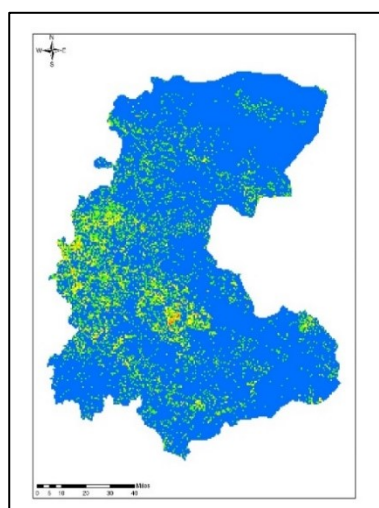
2002



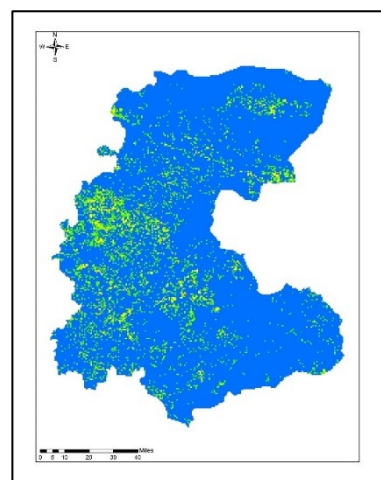
2003



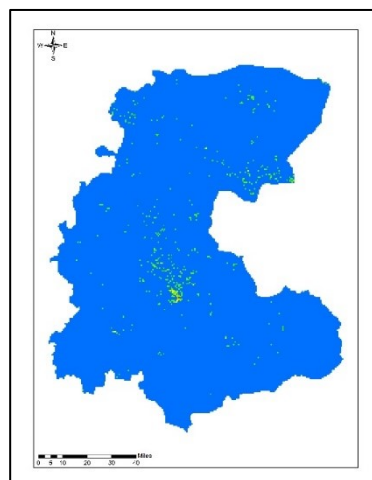
2004



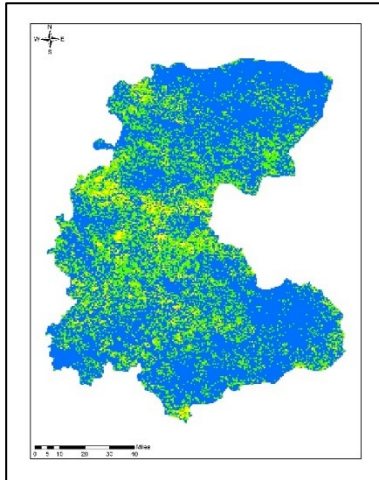
2005



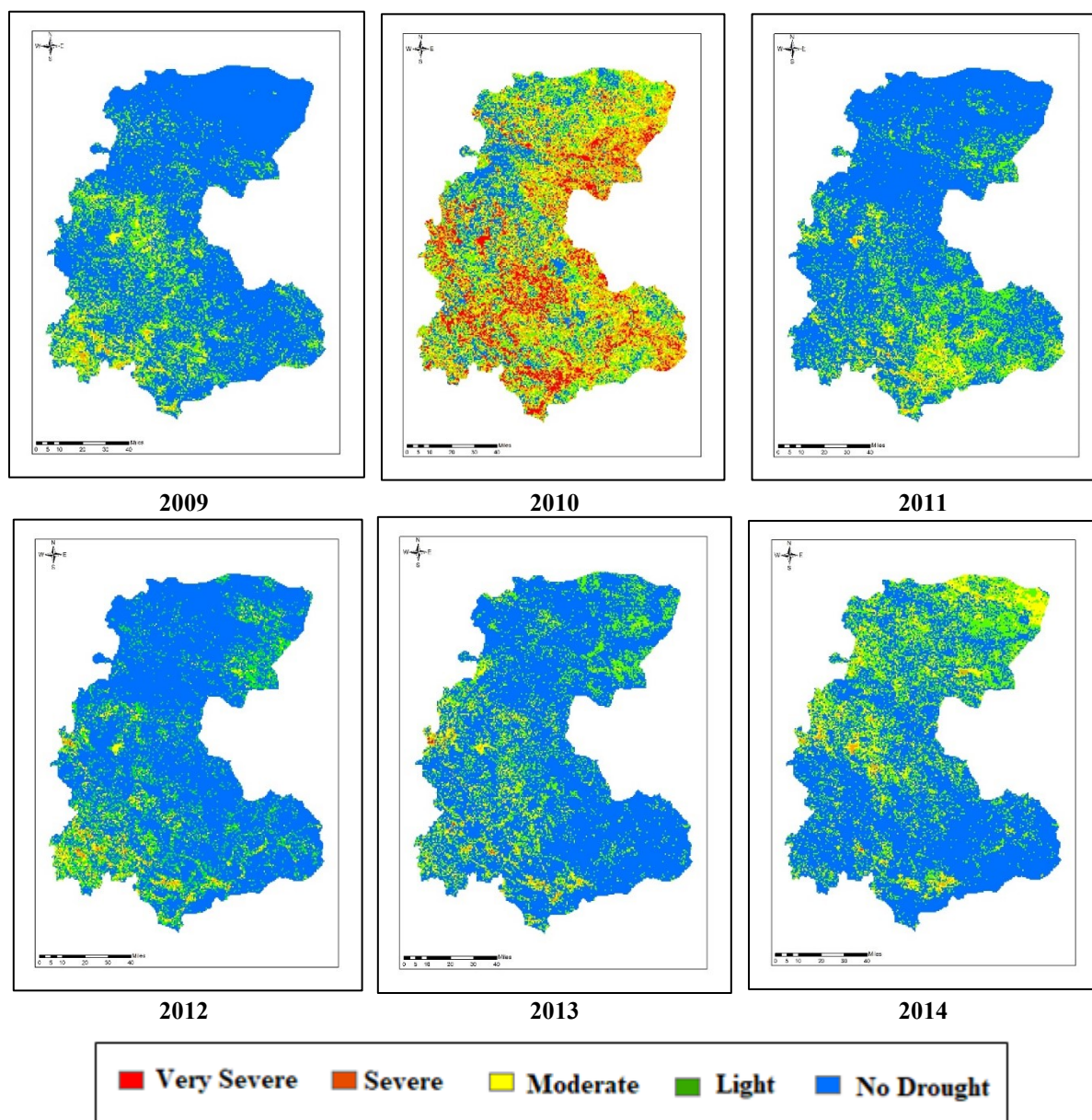
2006



2007



2008



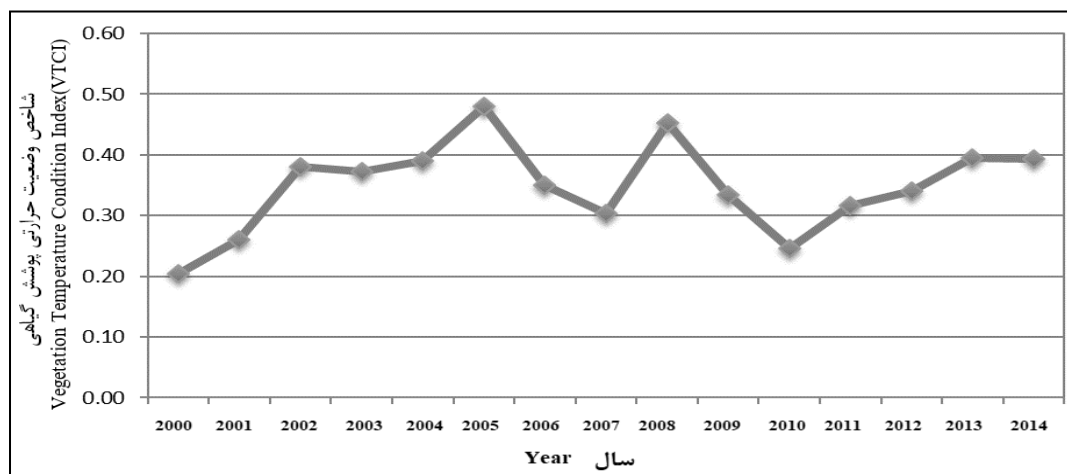
شکل ۶ - نقشه‌های حاصل از شاخص VHI برای مردادماه سال ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳

Fig. 6. Map results from VHI for August from years of 2000 to 2014

شاخص VTCI

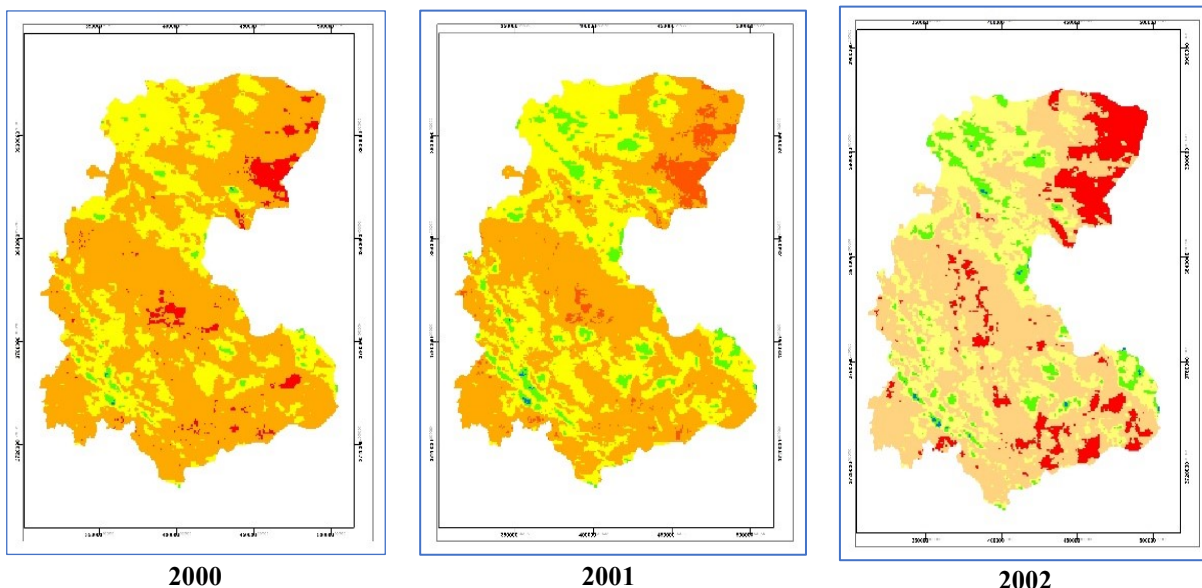
شاخص شرایط حرارتی پوشش گیاهی (VTCI)، شاخصی مبتنی بر به‌کارگیری سری‌های زمانی NDVI و LST است. شاخص VTCI نه‌تنها مرتبط با تغییرات NDVI در منطقه است، بلکه در ارتباط با تغییرات LST پیکسل‌های با مقادیر NDVI بخصوص نیز است (رابطه ۵). به‌طورکلی در مقادیر پایین‌تر VTCI، خشک‌سالی شدیدتر روی می‌دهد. مطالعات و تحقیقات بیانگر آن است که شاخص VTCI در ماه رشدی که تنش خشک‌سالی آن نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر است از دقت بهتری برخوردار است. از طرفی، یکی

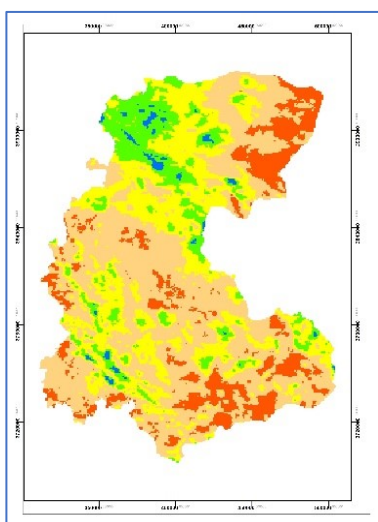
از چالش‌های مهم در پایش خشک‌سالی با رویکرد VTCI، تعیین لبه گرم و سرد است. لبه‌ها می‌توانند از طریق به‌کارگیری نمودار پراکنش ترکیبات مختلف NDVI و LST به دست آیند (رابطه ۶). برای تعیین لبه گرم و سرد در این تحقیق، ابتدا نمودار پراکنش دوبعدی NDVI (محور طول) و LST (محور عرض) صورت گرفت. سپس حداقل و حداکثر مقادیر NDVI و LST تعیین‌شده و جداسازی نقاط بالای لبه گرم (حداکثر) و پایین لبه سرد (حداقل) انجام شد. در ادامه معادله خطی میان NDVI و LST برای لبه گرم و لبه سرد، تشکیل و اجزای رابطه شاخص خشک‌سالی VTCI و درنهایت ایجاد نقشه VTCI مربوط به ماه مرداد (مرداد) و به تعداد سال‌های مطالعه استخراج شد. در انتها پس از ساخت تعداد ۱۵ شاخص VTCI مربوط به مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳، مقادیر ضرایب لبه‌های گرم و سرد هرکدام از سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳ برای مردادماه استخراج گردید و نهایتاً ضریب R^2 برای لبه‌های مذکور استخراج گردید. بالاترین ضرایب R^2 برای لبه‌های گرم وارد مربوط به مردادماه سال ۱۳۸۵، به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۰/۸۶ است و پایین‌ترین مقادیر R^2 مربوط به سال ۱۳۷۹ (به ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۶) است.



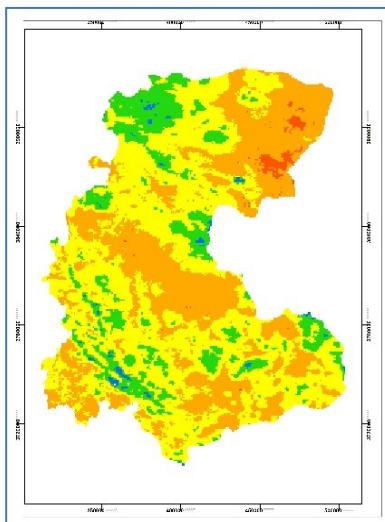
شکل ۷- تغییرات شاخص VTCI در ماه مرداد سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳

Fig. 7. VTCI variations of August from years of 2000 to 2014

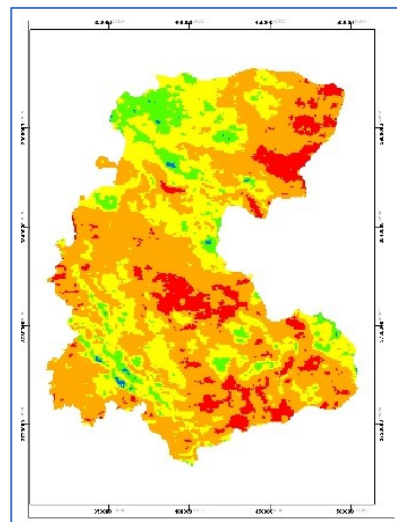




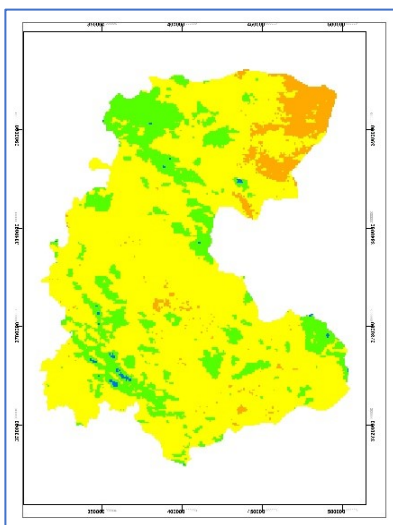
2003



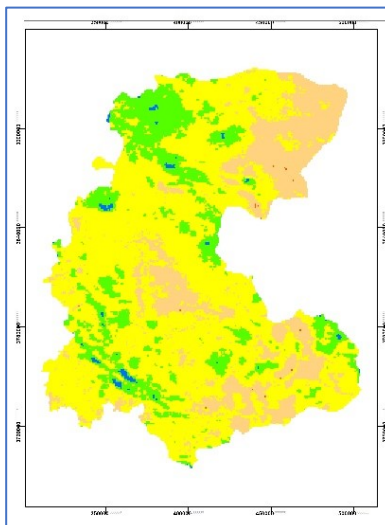
2004



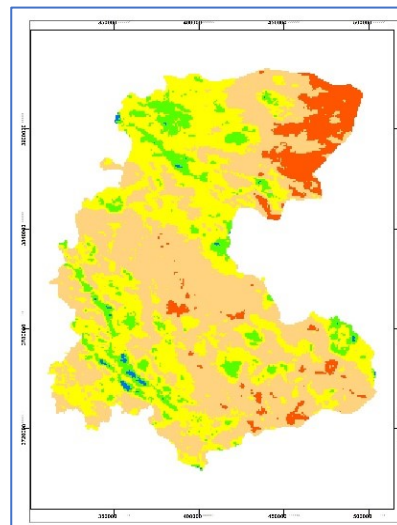
2005



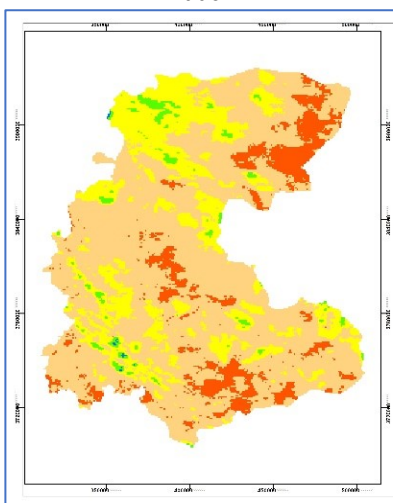
2006



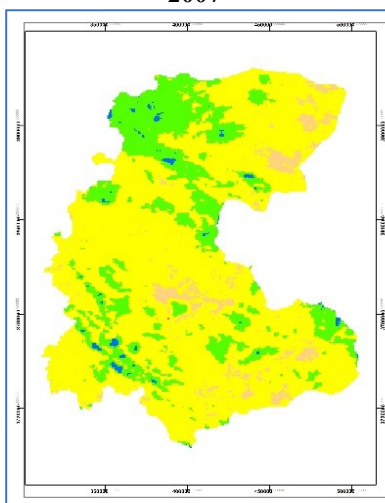
2007



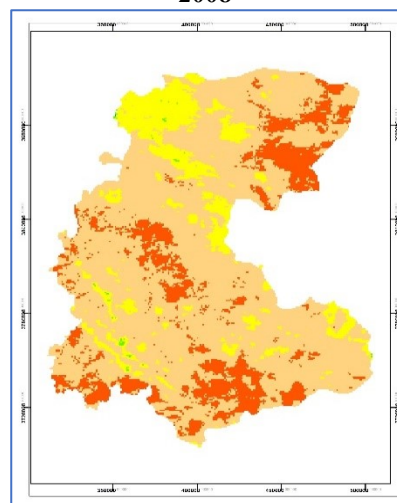
2008



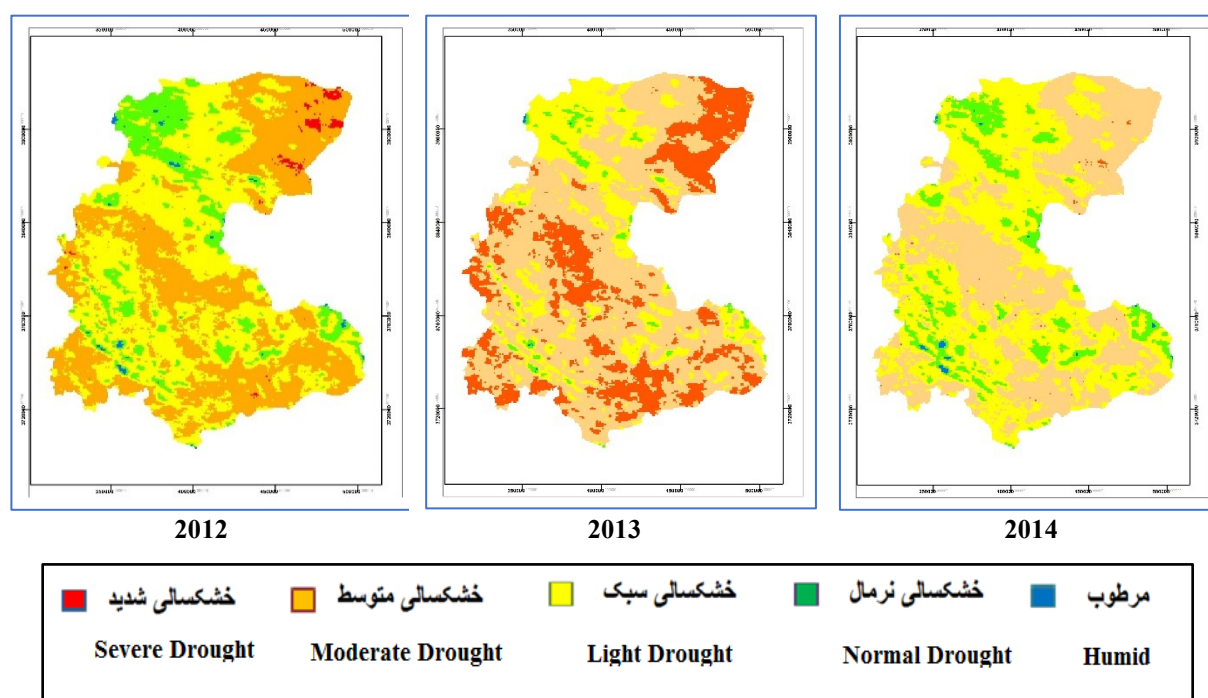
2009



2010



2011



شکل ۸- نقشه‌های حاصل از شاخص VTCI برای ماه مرداد سال ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳

Fig. 8. Maps of VTCI of August from years of 2000 to 2014

بر اساس این طبقه‌بندی، شاخص‌های VTCI مربوط به مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ به ۵ کلاس با طبقات خشک‌سالی شدید، متوسط، ملایم، نرمال و مرطوب تقسیم و نقشه‌های نهایی از نظر وسعت طبقات مذکور مقایسه شدند. با توجه به اینکه غالب مساحت استان مرکزی را اراضی مرتعی و اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهند، تنش ناشی از خشک‌سالی بر روی مراتع و اراضی کشاورزی از طریق شاخص VTCI به‌خوبی قابل‌نمایش است. نتایج بیانگر آن است که سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ کمترین تنش خشک‌سالی را داشته و سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۳، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ دارای شدت خشک‌سالی شدید بوده‌اند.

مقایسه شاخص‌های سنجش‌ازدوری

پس از تولید نقشه‌های شاخص‌های سنجش‌ازدوری، نسبت به استخراج مقادیر کمی شاخص‌های سنجش‌ازدوری NDVI, LST, VCI, TCI, VHI در محل ایستگاه‌های مذکور، مبادرت گردید. بدین‌صورت که تصاویر شاخص‌های سنجش‌ازدوری فوق‌الذکر برای ماه مرداد ۱۵ سال (۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳) به‌صورت لایه گروهی جدا گردید و سپس مقادیر این شاخص‌ها در محل ایستگاه‌های مذکور استخراج گردید (شکل ۵). مطابق نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر NDVI بین ۱ و ۱+، مقادیر LST درجه حرارت در مقیاس کلوین، حدود عدد ۳۰۰، مقادیر شاخص VCI, TCI و VHI بین ۰ تا ۱۰۰ و مقادیر شاخص VTCI بین ۰ تا ۱ است. همان‌طور که بیان شد ایدئال آن است که با افزایش شدت خشک‌سالی در هر نقطه یا منطقه بر میزان درجه حرارت افزوده و از میزان کمیت پوشش گیاهی کاسته گردد. شاخص‌های VCI و TCI نیز حاصل از نرمال شدن شاخص‌های NDVI و LST بوده و بنابراین از قانون مذکور مطابقت می‌نماید. شاخص‌های VHI و VTCI که با الگوریتم‌های متفاوت هر دو عامل تغییرات پوشش گیاهی و درجه حرارت را مدنظر قرار می‌دهند نیز رابطه خطی و مستقیم ولی در مقیاس‌های متفاوت را دارا هستند. جدول ۲ مقادیر کمی استخراج‌شده شاخص‌های بیان‌شده را در مردادماه دوره ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ نشان می‌دهد.

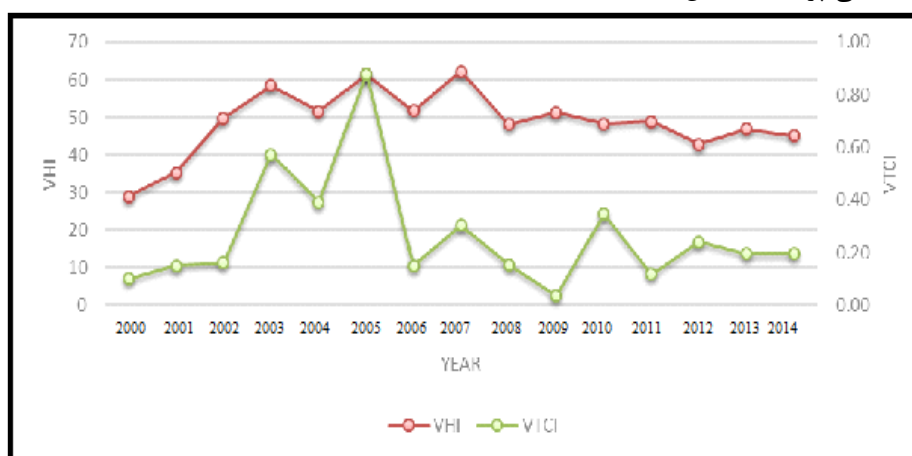
جدول ۲- مقادیر استخراج‌شده شاخص‌های سنجش‌ازدوری در مردادماه برای ایستگاه اراک

Table 2- Remote sensing indices extracted of August for Arak station

year	NDVI	LST	VCI	TCI	VHI	VTCI
1379	0.3	320.4	44	32	37	0.12
1380	0.3	319.0	44	30	51	0.07
1381	0.2	319.9	38	49	61	0.29
1382	0.3	319.6	51	53	44	0.25
1383	0.1	318.3	43	49	34	0.25
1384	0.2	320.0	30	47	70	0.32
1385	0.1	318.2	2	68	50	1.04
1386	0.3	317.1	54	84	65	0.21
1387	0.2	318.8	12	56	43	0.36
1388	0.2	319.6	37	68	41	0.22
1389	0.2	320.8	17	58	35	0.13
1390	0.1	318.8	3	56	33	0.10
1391	0.2	320.3	36	55	39	0.24
1392	0.2	321.9	40	56	78	0.24
1393	0.2	319.5	27	60	45	0.28

مقایسه شاخص‌های VHI و VTCI

مقایسه شاخص‌های VHI و VTCI به‌عنوان شاخص‌های تهیه نقشه شدت خشک‌سالی در ایستگاه‌های منتخب در استان مرکزی نشان می‌دهد که حساسیت شاخص VTCI به تغییرات خشک‌سالی و ترسالی بیشتر از شاخص VHI است که البته علت آن هم به منطق ریاضیاتی تهیه هر کدام از شاخص‌ها برمی‌گردد (جدول ۳). شاخص VHI از ادغام شاخص‌های مبتنی بر شاخص‌های NDVI و LST کل سطح اراضی حاصل می‌گردد در حالی که شاخص VTCI از تغییرات درجه حرارت پیکسل‌های دارای NDVI شبیه به هم ایجاد می‌گردد (جدول ۴). در VHI به‌جز پوشش، سایر عوامل زمینی نیز در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ به‌عنوان سال‌های با خشک‌سالی شدید و سال ۱۳۸۶ به‌عنوان سال دارای ترسالی می‌توان به قیاس دو شاخص مذکور از نظر ارزیابی عملکرد خشک‌سالی پرداخت (شکل ۹).



شکل ۹- مقایسه شاخص‌های VHI و VTCI در ماه مرداد

Fig. 9. Comparison of VHI and VTCI of August

جدول ۳- مساحت طبقات شدت خشک‌سالی در مردادماه بر اساس شاخص VHI (به هکتار)

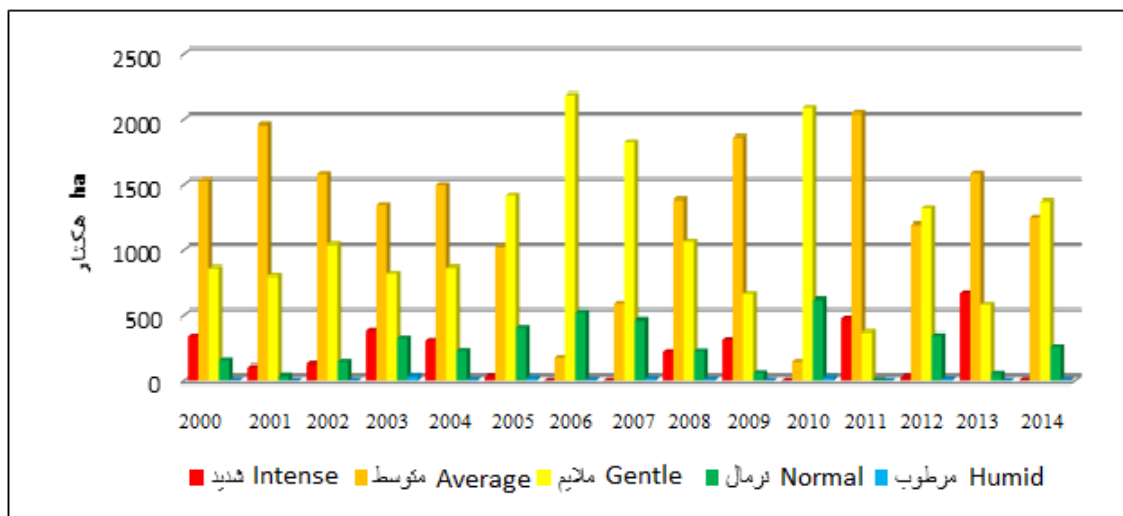
Table 3- Area of drought intensity classes in August for VHI

ماه	خیلی شدید	شدید	متوسط	ملايم	بدون خشک‌سالی
Month	Very Intense	Intense	Moderate	Gentle	No Drought
مرداد	480576	2006444	4424310	6877702	29670697

جدول ۴- مقادير و درصد مساحت طبقات خشک‌سالی به روش VTCI (هکتار)

Table 4- Area of drought intensity classes in August for VTCI

ماه	شدید	متوسط	ملايم	نرمال	مرطوب
Month	Intense	Moderate	Gentle	Normal	Humid
مرداد	2969642	19168643	17266592	3816097	148690



شکل ۱۰- منحنی تغییرات مساحت طبقات شدت خشک‌سالی در سال‌های مختلف با استفاده از VTCI

Fig. 10. The curve of drought intensity area in study years for VTCI

جدول ۵- مقادير شاخص SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری خشک‌سالی مربوط به مردادماه ۱۳۷۹ در ایستگاه‌های استان مرکزی

Table 5- SPI amounts of SPI and remote sensing drought indices for August

ایستگاه	SPI-3	NDVI	LST	VCI	TCI	VHI	VTCI
اراک (س) Arak	-0.7	0.42	320.8	21	31.7	37	0.12
آشتیان (س) Ashtian	-0.3	0.27	316.3	2.6	22.6	13	0.57
دلیجان (س) Delijan	0	0.08	322	21	46.9	23	0.15
غرق‌آباد (س) Gharghabad	-1.6	0.11	318	10.3	42.9	21	0.35
خمین (س) Khomein	-0.7	0.28	320.5	77	23.4	51	0.09
خنداب (س) Khondab	-0.6	0.17	318.9	12.3	38.4	25	0.15
کمیجان (س) Komijan	-0.7	0.28	321.9	21	39.9	20	0.07
محلات (س) Mahalat	-1.2	0.09	319.6	21	39.2	22	0.14
ساوه (س) Saveh	-1.4	0.08	324.7	4	42.1	33	0.4
شازند (س) Shazand	-0.2	0.26	320	74.1	19.7	30	0.33

Tafresh (س) تفرش	-1.4	0.16	317.6	33	31.8	24	0.5
Khomein (ب) خمین	-0.4	0.24	321.7	60.2	40.6	45	0.1
Khondab جوشیروان (ب) Khondab Joshiravan	-0.3	0.3	316.1	21	39	20	0.69
Sarogh Bala (ب) ساروق بالا	-0.1	0.14	318.4	21	32.4	23	0.27
Davod Abad (ب) داودآباد	-0.5	0.11	318.1	21	41.7	21	0.36
Mazraeh Khaton (ب) مزرعه خاتون	-0.8	0.19	320	13.5	23.6	19	0.2
Jalayer (ب) جلایر	-0.4	0.22	319.1	28.5	48.1	39	0.43
Astaneh (ب) آستانه	-0.2	0.3	318.4	10.2	29.6	17	0.51
Band Abasi (ب) بند عباسی	-0.5	0.12	318.9	26.9	51.5	26	0.36
Razin (ب) رازین	-0.6	0.2	319.4	18.2	52.8	26	0.36
Ghadamgah (ب) قدمگاه	0.2	0.14	318.5	21	19.1	10	0.35
AhmadAbad (ب) احمدآباد ساوه Saveh	-0.4	0.13	321.4	32.1	47	63	0.4
EmamAbad (ب) امام‌آباد	-0.1	0.25	317.6	34.2	47.9	43	0.53
Tafresh (ب) تفرش	0.6	-1.4	0.35	319.1	43.3	22.6	13
Peyk Zarand (ب) پیک زرنند	0.5	-2.7	0.16	325.7	21	39	70
Doridan (ب) دوریدان	1	-1.7	0.1	322.6	21	21.8	11
Karimabad (ب) کریم‌آباد	0.6	-1.2	0.13	321.2	28.3	61	38
Emarat (ب) عمارت	0.4	-0.7	0.34	317.8	31.9	19.2	10
Alraj (ب) الرج	1	-1.2	0.11	321.2	21	33.5	17
Araghaleh (ب) اراقله	0.6	-1.5	0.32	315	18	51.7	26
KhanAbad (ب) خان‌آباد	0.7	-1.2	0.36	315	84.5	49.7	75
Bijegan (ب) بیجگان	0.3	-2.4	0.11	316.1	21	33.2	17
Jenaghchi Olya (ب) جناقچی علیا	0.5	-2	0.2	313.8	11.9	41	25
Dastjan (ب) دستجان	0.8	-0.9	0.1	321	1.6	34.2	25
Ezedin (ب) عزالدین	0.5	-2.7	0.09	318.1	21	65.2	33
MalekAbad (ب) مالک‌آباد	0.7	-1.9	0.12	319.3	4	42.2	31

ب: باران‌سنجی Rain gauge

س: سینوپتیک Synoptic

روابط رگرسیونی ماه مرداد

همان‌گونه که در فرضیه اصلی این پژوهش مطرح شد، شاخص‌های سنجش‌ازدوری، کاستی‌های شاخص‌های هواشناسی را از نظر مکانی برطرف می‌کنند. بدین معنی که با پیوستگی که میان پیکسل‌های شاخص سنجش‌ازدوری وجود دارد، در مناطقی که ایستگاه هواشناسی نیست می‌توان از شاخص‌های سنجش‌ازدوری استفاده نمود. با در نظر گرفتن SPI به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های

به عنوان متغیر مستقل (جدول ۵)، روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی این مدل برای شاخص‌های سنجش‌ازدوری مربوط به مردادماه و SPI سه‌ماهه برقرار شد (شکل ۱۰). شاخص‌های TCI و VCI دارای ارتباط معنی‌دار با شاخص SPI سه‌ماهه بوده‌اند. در مردادماه شاخص VTCI نیز جزء شاخص‌های ماهواره‌ای بود که با SPI ارتباط معنی‌داری پیدا نکرده است. در نتیجه با توجه به اینکه TCI از اجزای شاخص VHI است بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شاخص VHI نسبت به شاخص VTCI رابطه معنی‌داری با SPI سه‌ماهه است (جدول ۶).

جدول ۶ - روابط رگرسیونی بین شاخص خشک‌سالی SPI و ماهواره‌ای مرداد

Table 6- linear regression models between drought SPI and remote sensing indices for August

مدل رگرسیون Regression Model	سطح معنی‌داری Significant	R ²	بازه زمانی Time Scale
SPI=-0.555+0.009TCI+0.970NDVI	**	0.67	3-Month

** : در سطح یک درصد * : در سطح پنج درصد

روابط رگرسیونی غیرخطی میان شاخص SPI سه‌ماهه و شاخص‌های سنجش‌ازدوری نیز، تأکید بر ارتباط قوی‌تر شاخص VHI نسبت به VTCI دارد (جدول ۷).

جدول ۷ - روابط رگرسیونی غیرخطی بین شاخص خشک‌سالی SPI و ماهواره‌ای مرداد

Table 7- Non linear regression models between drought SPI and remote sensing indices for August

مدل رگرسیون Regression Model	سطح معنی‌داری Significant	R ² _(ln)	R ² _(sq)	بازه زمانی Time Scale
SPI=0.734+0.427TCI _(ln) +0.233NDVI _(ln) -0.117VHI _(ln)	**	0.37	0.36	3-Month

** : در سطح یک درصد * : در سطح پنج درصد

ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی

در این تحقیق به منظور اعتبار سنجی و ارزیابی صحت مدل‌های رگرسیونی، با توجه به اینکه سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳ به عنوان سال‌های مطالعه انتخاب شدند، اطلاعات سال ۱۳۹۴ (بارندگی ماه مرداد) برای ارزیابی مدل‌های رگرسیون انتخاب شدند. بدین معنی که از روی بارش‌های ماهانه مرداد سال ۱۳۹۴ به همراه بارش ۱۵ سال قبلی ایستگاه‌ها، مبادرت به استخراج مقادیر شاخص SPI ۳ ماهه مذکور در سال ۱۳۹۴ به عنوان مقادیر مشاهده‌شده (واقعی) گردید. سپس بر اساس مدل‌های مربوط، نقشه‌های SPI پیش‌بینی‌شده برای سال ۱۳۹۴ ساخته‌شده و مقادیر این شاخص‌ها برای ایستگاه‌ها استخراج گردید. در پایان مقادیر استخراج‌شده شاخص SPI از بارندگی‌ها (به عنوان مقادیر مشاهده‌شده) با مقادیر SPI حاصل از مدل‌ها در سال ۱۳۹۴ از طریق آماره‌های بررسی صحت (مانند MSE و RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفتند. فرمول این آماره‌ها بر اساس روابط (۷) و (۸) است: با توجه به مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده، دقت هر روش با توجه به معیارهای آماری مجذور میانگین اشتباهات (MSE) و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) انجام شد.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2}{n}} \quad (8)$$

که در آن $z^*(x_i)$ و $z(x_i)$ به ترتیب مقدار برآورد شده، مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر و تعداد داده‌ها است. MSE و RMSE در حالت ایدئال بایستی مساوی صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی قابل توجه آن‌ها به ترتیب نشان‌دهنده برآورد بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی است. به‌طور قطع هر چه مقادیر دو معیار، MSE و RMSE کمتر باشد، صحت روش بیشتر است.

جدول ۸- ارزیابی دقت مدل‌های زمانی

Table 8- Temporal Assessment of Assessment Models

ماه	مقیاس زمانی	معادله	MSE	RMSE
Month	Time Scale	Equation		
August	3-Month	$SPI = -0.555 + 0.009TCI + 0.970NDVI$	0.36	0.6

هر چه مقادیر MSE و RMSE در مدلی کمتر و کوچک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است. بنابراین مقادیر آماره RMSE حاصل از مقایسه مقادیر SPI استخراج‌شده (از داده‌های بارش) و محاسبه‌شده (از مدل‌های رگرسیونی) به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌ها برای ماه‌های فصل رشد نشان می‌دهد که مقادیر مذکور کمتر از میانگین داده‌های مشاهده‌شده بوده که نشان‌دهنده دقت صحت خوب مدل مذکور است (جدول ۸). بر این اساس رابطه خطی میان SPI سه‌ماهه با شاخص‌های سنجش‌ازدوری ماهواره‌ای از مقدار RMSE مدل غیرخطی برخوردار بوده است.

نتیجه‌گیری

اطلاعات ماهواره‌ای به دلیل پیوستگی مکانی و زمانی، از قابلیت بسیار خوبی در پایش پدیده‌های زمینی مانند پوشش گیاهی و درجه حرارت برخوردار هستند. سنجنده MODIS دارای محصولات متنوعی بوده که این محصولات بدون نیاز به انجام پیش‌پردازش‌های هندسی و رادیومتری، امکان استفاده در پژوهش‌ها را دارا هستند. گروه دوم محصولات این سنجنده مربوط به سرزمین (Land Product) می‌باشند. از جمله محصولات این گروه می‌توان به محصول NDVI در قدرت تفکیک مکانی و زمانی متغیر و LST در قدرت تفکیک مکانی و زمانی متفاوت اشاره نمود. شاخص‌های ترکیبی و مبتنی بر سری‌های زمانی خشک‌سالی زیادی توسعه‌یافته‌اند که هر کدام دارای الگوریتم متفاوتی در تعیین شدت خشک‌سالی‌ها هستند. یکی از مهم‌ترین و معروف‌ترین این شاخص‌ها، شاخص سلامت گیاهی (VHI) می‌باشد. الگوریتم این شاخص بر اساس متوسط به‌کارگیری تراکم پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح می‌باشد. با این فرض که در شرایط رخداد خشک‌سالی کشاورزی، از تراکم پوشش گیاهی کاسته و بر میزان درجه حرارت سطح زمین افزوده می‌شود. با این فرض هر چه بر کمیت این شاخص افزوده گردد، از شدت خشک‌سالی کاسته می‌گردد. شاخص ترکیبی دیگر که دارای الگوریتم متفاوتی در تعیین شدت خشک‌سالی با استفاده از NDVI و LST است، شاخص VTCI می‌باشد. الگوریتم این شاخص مبتنی بر تعیین درجه حرارت پوشش گیاهی‌های با حرارت حداکثر و حداقل می‌باشد و از طریق تعیین این لبه‌های گرم و سرد، می‌تواند شدت خشک‌سالی را تعیین نماید. بدین‌صورت که در مقادیر پایین‌تر این شاخص، خشک‌سالی شدیدتر است. بنابراین در این پژوهش دو نوع الگوریتم برای تعیین شدت خشک‌سالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدوری و به‌کارگیری محصولات سنجنده MODIS مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

در رابطه با تعیین شاخص سنجش‌ازدوری مناسب پایش خشک‌سالی کشاورزی، تحقیقات در حال تکامل و توسعه هستند و نتایج کاملاً مشخصی وجود ندارد. بنابراین هیچ‌یک از این شاخص‌ها به‌طور ذاتی نسبت به دیگری برتری ندارند و نمی‌توان عملکرد آن‌ها را در سطح منطقه‌ای دیگر تضمین نمود، تنها می‌توان گفت بعضی از این شاخص‌ها در شرایطی خاص، عملکرد بهتری دارند. نحوه عملکرد هریک از این شاخص‌ها به اقلیم، توپوگرافی، سطح منطقه، نوع پوشش گیاهی و نوع خاک منطقه وابسته است (Viet & Thuy, 2024). بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر، کارایی شاخص VHI نسبت به شاخص VTCI در تعیین شدت‌های خشک‌سالی کشاورزی بهتر است. درواقع شاخص VHI با توجه به در نظر گرفتن الگوریتم دخالت مساوی مقادیر پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین، نسبت به شاخص VTCI که مبتنی بر صرفاً شرایط حرارتی پوشش‌های گیاهی است، عملکرد مناسب‌تری را داشته است. هرچند این دو شاخص در نمایش شدت‌های خشک‌سالی در برخی مهر و موم‌ها، نتایج مشابهی را نشان داده‌اند ولی با مقایسه نتایج حاصل از شاخص‌های مذکور با SPI، نتایج حاصل از شاخص VHI در ارزیابی شدت خشک‌سالی موفق‌تر بوده‌اند. دلیل استفاده از شاخص SPI این است که این شاخص دارای انعطاف مناسب مکانی و زمانی بوده و همچنین از منطق ریاضیاتی و سادگی مناسبی

برخوردار است. بازه زمانی سه ماهه برای شاخص SPI به دلیل در نظر گرفتن شرایط ترسالی-خشکسالی متوسط سه ماهه منجر به مرداد (یعنی ماه های خرداد، تیر و مرداد) که شرایط پوشش گیاهی و حرارتی در حالت حداکثر می باشند، انتخاب گردید. بدین مفهوم که در این سه ماه، هم پوشش گیاهی و هم درجه حرارت سطح زمین واقعیت خود را نشان می دهند.

نتایج این تحقیق نشان می دهد که بر اساس نقشه های حاصل از شاخص VHI، سال های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ کمترین تنش خشکسالی را داشته و سال های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ دارای شدت خشکسالی شدید بوده اند. سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ کمترین تنش خشکسالی را داشته و سال های ۱۳۷۹، ۱۳۸۳، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ دارای شدت خشکسالی شدید برای شاخص VTCI بوده اند. مطابق مقادیر شاخص SPI، سال ۱۳۷۹ و سال ۱۳۸۷ دارای شدیدترین خشکسالی در ۴۰ سال اخیر بوده اند. همچنین سال ۱۳۸۶ نیز به عنوان مرطوب ترین سال در این دوره مطالعاتی بوده است. نتایج حاصل از شاخص SPI، همان گونه که تحلیل های آماری نشان داده اند، تطابق بیشتری با نتایج شاخص VHI داشته اند. همچنین بالاترین مساحت طبقات خشکسالی در نتایج شاخص VHI مربوط به طبقه بدون خشکسالی (۵۶ درصد مساحت استان) و در نتایج شاخص VTCI، مربوط به طبقه متوسط (۴۴ درصد مساحت استان) بوده است.

مطابق نتایج این پژوهش، شاخص های ترکیبی VHI و VTCI حاصل محصولات MODIS از قابلیت بسیار خوبی در نمایش شدت های خشکسالی کشاورزی برخوردار بوده و می توانند جایگزین مناسبی برای شاخص های هواشناسی در برآورد خشکسالی کشاورزی باشند. نقشه های حاصل از شاخص های خشکسالی سنجش از دوری می توانند به تصمیم سازان و تصمیم گیرندگان، در بهبود برنامه های مدیریت خشکسالی کمک نموده و نقش بسزایی را در کاهش آثار خشکسالی داشته باشند. قابلیت های مناسب سنجش از دور در پایش خشکسالی، این امکان را فراهم می کند که بخصوص در مناطقی که تراکم ایستگاه های هواشناسی کم و نامنظم است، امکان ارزیابی خشکسالی ها را فراهم نمایند. این توانایی و امکان زمانی و مکانی، با هزینه و صرف زمان کمتر، به برنامه ریزان در پهنه بندی خشکسالی ها در تعیین مناطق حساس و مستعد خشکسالی و اولویت های مدیریتی در زمینه مدیریت جامع ریسک و بحران کشاورزی و منابع طبیعی کمک زیادی می نماید. نتایج این تحقیق می تواند در واقعی کردن پایش خشکسالی ها و پیش بینی آن ها به محققان و سازمان های دولتی برنامه ریز کمک شایانی نماید.

برای دستیابی به نتایج متقن و دقیق تر و بومی کردن ضرایب شاخص های VHI و VTCI برای کشور، پیشنهاد می گردد اندازه گیری های زمینی تغییرات کمی پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین و نیز تأثیر متغیرهای فیزیوگرافی و کاربری اراضی، به منظور مطالعات تکمیلی برای پایش زمانی-مکانی خشکسالی انجام شود و تأثیر منابع خطا در انجام محاسبات به حداقل برسد. همچنین استفاده از سایر اطلاعات ماهواره ای، مانند سنتینل و لندست نیز پیشنهاد می گردد.

References

- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D. & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452-480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019). NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 650, 2051-2062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115>
- Damavandi, A. A., Rahimi, M., Yazdani, M. R., & Noroozi, A. A. (2016). Spatial Monitoring of Agriculture Drought Using Vegetation Temperature Condition Index (VTCI) from Terra/MODIS Satellite Data-case study: Markazi Province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 7(23), 50-63. [in Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161409_en.html

- Hakimdost, Y., Rastegar, M., Pourzeidi, A., & Hatami, H. (2014). Analysis of the climate drought and its effects on spatial patterns of location in rural settlement (case study villages in Mazandaran province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(3), 61-76. <https://doi.org/10.22067/geo.v3i3.32701>
- Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.031>
- Hassan, M. S., & Mahmud-ul-islam, S. (2015). Drought Vulnerability Assessment in the High Barind Tract of Bangladesh Using MODIS NDVI and Land Surface Temperature (LST) Imageries. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 438, 55-60
- Huang, J., Zhuo, W., Li, Y., Huang, R., Sedano, F., Su, W., ... & Zhang, X. (2020). Comparison of three remotely sensed drought indices for assessing the impact of drought on winter wheat yield. *International Journal of Digital Earth*, 13(4), 504-526. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1542040>
- Jiao, W., Tian, C., Chang, Q., Novick, K. A., & Wang, L. (2019a). A new multi-sensor integrated index for drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.008>
- Jiao, W., Wang, L., Novick, K. A., & Chang, Q. (2019b). A new station-enabled multi-sensor integrated index for drought monitoring. *Journal of Hydrology*, 574, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.037>
- Khalil, A. A., Abdel-Wahab, M. M., Hassanein, M. K., Ouldbdey, B., Katlan, B., & Essa, Y. H. (2013). Drought monitoring over Egypt by using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index. *Nature and Science*, 11(11), 116-122
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y., Bai, J., & Li, S. (2018). Performance of different drought indices for agriculture drought in the North China Plain. *Journal of Arid Land*, 10(4), 507-516. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0005-2>
- Ni, G., & Xiaoping, W. (2015). Advances and developing opportunities in remote sensing of drought. *Journal of Arid Meteorology*, 33(1), 1. <http://www.ghqx.org.cn/EN/Y2015/V33/I1/1>
- Parida, B. R. (2006). *Analysing the effect of severity and duration of Agricultural drought on crop performance using Terra/MODIS Satellite data and Meteorological data*. Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency (NRSA) Department of Space, Dehradun, India.
- Pogačar, T., Žnidaršič, Z., Vlahović, Ž., Črepinšek, Z., & Sušnik, A. (2022). Grassland Model Based Evaluation of Drought Indices: A Case Study from the Slovenian Alpine Region. *Agronomy*, 12(4), 936. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040936>
- Saxena, S., Choudhary, K., Saxena, R., Rabha, A., Tahlani, P., & Ray, S. S. (2019). Comparison of Agricultural situation of India for two years (2017 and 2018) using various drought assessment indicators during south west monsoon season in India. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W6-499-2019>
- Sultana, M. S., Gazi, M. Y., & Mia, M. B. (2021). Multiple indices based agricultural drought assessment in the northwestern part of Bangladesh using geospatial techniques. *Environmental Challenges*, 4, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100120>
- Thenkabail, P. S., & Gamage, M. S. D. N. (2004). *The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia* (Vol. 85). Iwmi.
- Viet, L. V., & Thuy, T. T. T. (2024). Drought sensitivity analysis of meteorological and vegetation indices in Dak Nong, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 15(10), 4968-4988. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.661>
- Wang, P. X., Li, X. W., Gong, J. Y., & Song, C. (2001). Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. In *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)* (Vol. 1, pp. 141-143). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.976083>

- West, H., Quinn, N., & Horswell, M. (2019). Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111291. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291>
- Zhang, J., Mu, Q., & Huang, J. (2016). Assessing the remotely sensed Drought Severity Index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China. *Ecological Indicators*, 63, 296-309. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.062>
- Zhao, G., Li, X., & Li, B. (2010). An Overview on Agricultural Drought Monitoring Methods Based on Land Surface Temperature and Vegetation Index Feature Space. *Res. Soil Water Conserv*, 17, 245–250
- Zuo, D., Cai, S., Xu, Z., Peng, D., Kan, G., Sun, W., & Yang, H. (2019). Assessment of meteorological and agricultural droughts using in-situ observations and remote sensing data. *Agricultural Water Management*, 222, 125-138. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.046>