Vol. 15, No. 3, Autumn 2026, p. 254-276 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97561.1646 OPEN ACCESS

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 (R2=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, 15*(3), 254-276. https://doi.org/10.22067/geoeh.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).

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۲۷۶-۲۵۴

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97561.1646 دسترسی آزاد

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

علی‌اکبر دماوندی [1*]

[1] گروه منابع طبیعی، مؤسسهٔ آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ 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)

چکیده

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 مورد بررسی 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 ۱۵ساله NDVI و LST برای ماه مرداد ، تولید و درنهایت 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 مورد بررسی 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 سه ماهه منتهی به ماه مرداد، استخراج شده 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=۰/۶۷). دلیل اصلی این امر، دخالت برابر پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین در شاخص VHI است. اندازه‌گیری‌های زمینی تغییرات کمّی پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین و نیز تأثیر متغیرهای توپوگرافی منطقه مطالعاتی و نوع کاربری اراضی، به منظور مطالعات تکمیلی برای پایش زمانی- مکانی خشک‌سالی، پیشنهاد می‌گردد.

* نویسنده مسئول: علی‌اکبر دماوندی

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

مقدمه

خشک‌سالی کشاورزی بر سطح رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد و مانع از رشد گیاه می‌شود. هنگامی‌که مقدار آب مورد نیاز 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 قرارگرفته 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، سنجش‌ازدور به‌طور گسترده برای پایش خشک‌سالی کشاورزی مورد استفاده قرارگرفته است. مطالعات مختلفی که در سراسر جهان انجام شده است، همبستگی قوی بین شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش‌ازدور و رطوبت خاک را نشان داده‌اند (Pogacar, Znidarsic, Vlahovic, Crepinsek & Susnik, 2022).

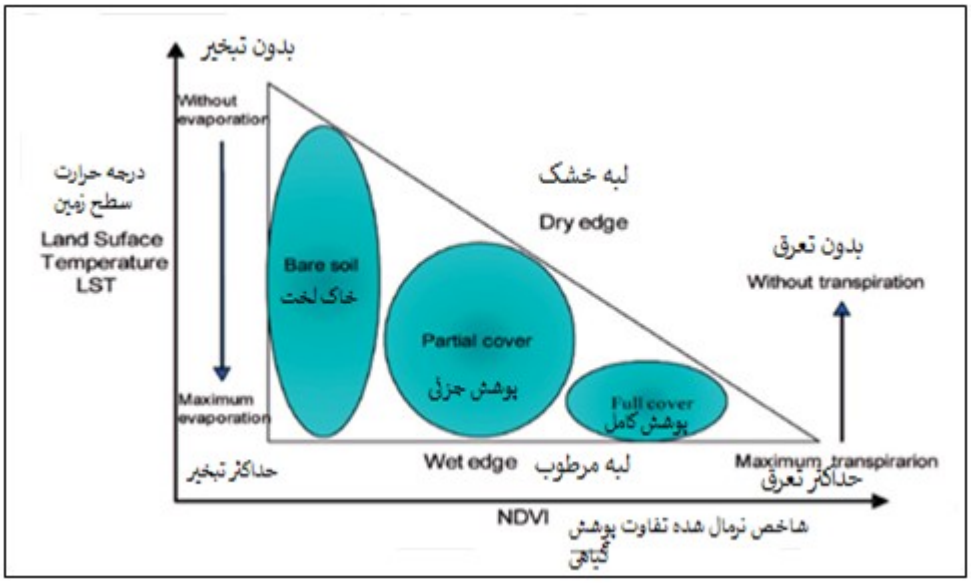
از مهم‌ترین روش‌های پایش خشک‌سالی، روش استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است. شاخص‌های خشک‌سالی، سنجش‌های کمی هستند که سطوح خشک‌سالی را به وسیله همانندسازی و تلفیق داده‌ها از یک یا چندین متغیر مانند بارندگی، درجه حرارت و تبخیر و تعرق به یک مقدار عددی واحد توصیف می‌نمایند (Hakimdost, Rastegar, Pourzeidi & Hatami, 2014). درنتیجه یک شاخص خشک‌سالی که تغییرات زمانی و مکانی الگوهای استفاده از آب محصول را توصیف کند برای پایش خشک‌سالی مناسب‌تر است .داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای که از قابلیت‌های خوب مکانی و زمانی برخوردار هستند، می‌توانند به عنوان ابزار مناسبی در پایش مکانی – زمانی خشک‌سالی خصوصاً از نوع کشاورزی نقش ایفا نمایند (Hao & Singh, 2015). از سال ۱۹۸۱، داده‌های سنجنده AVHRR[1] ماهواره‌های سری NOAA[2] برای تولید شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده[3] (NDVI) و درجه حرارت سطح زمین[4] (LST) مورد استفاده قرارگرفته‌اند.

تنکابیل و گاماج (Thenkabail & Gamage, 2004) چنین نتیجه گرفتند که شاخص NDVI به عنوان 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 به تنهایی قابلیت تعیین خشک‌سالی را ندارد چرا که NDVI اصولاً اثر سبزینگی 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. چرا که در زمان شروع خشک‌سالی، گیاه هنوز سبز است ولی آب موجود در گیاه تخلیه‌شده 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 سنجش‌ازدوری، داده‌های سری زمانی LST و NDVI سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب برای تعیین و پایش تغییرات خشک‌سالی کشاورزی تولیدشده‌اند (Huang et al., 2020). بر همین اساس، محققین

1 - Advanced Very High Resolution Radiometer
2 -National Oceanic and Atmospheric Administration
3 - Normalized Diference Vegetation Index
4 - Land Surface Temperature

مبادرت به ارزیابی و پایش مکانی و زمانی خشک‌سالی با استفاده ازسری‌های 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 ۲۰۰۰،۲۰۰۸ 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[3](VTCI) به پایش مکانی خشک‌سالی کشاورزی در استان مرکزی پرداختند. در این پژوهش خشک‌سالی به ۵ طبقهٔ 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 درصورتی‌که تابش خورشید عامل محدود کننده باشد رابطه NDVI و LST مثبت است (Jiao, Wang, Novick & Chang, 2019b).

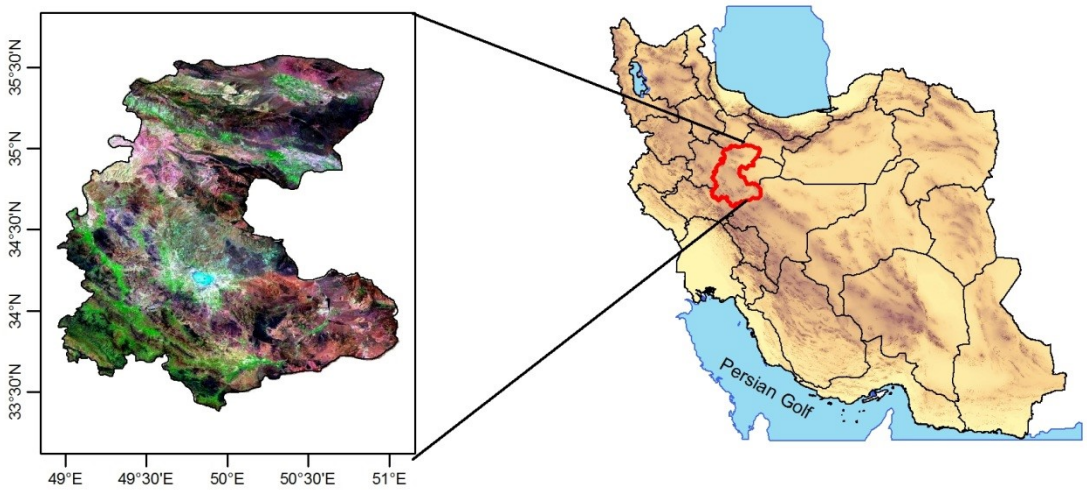
اثرات تنش خشک‌سالی بر کشاورزی ارتباط نزدیکی با تبخیر و تعرق حقیقی به‌وسیله تاج پوشش‌های گیاهان در دوره رشد دارد. بنابراین شاخص خشک‌سالی که ارتباط نزدیکی با الگوهای آب گیاهان زراعی داشته باشد، نقشی کلیدی را در پایش خشک‌سالی کشاورزی ایفا خواهد کرد (Khalil et al., 2013). شاخص‌های خشک‌سالی زیادی برای تعیین و پایش بهنگام و واقعی گسترش و وسعت خشک‌سالی ایجاد گردیده‌اند. شاخص VHI با استفاده ازسری‌های زمان NDVI و LST و با فرض میانگین مساوی (ضریب۰/۵) به پایش خشک‌سالی می‌پردازد. الگوریتم شاخص VTCI 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.

منطقهٔ مورد مطالعه

استان مرکزی بین عرض‌های جغرافیایی ′۳۰ و°۳۳ تا ′۳۵ و°۳۵ شمالی و طول‌های جغرافیایی ′۵۷ و°۴۸ تا ′۰۵ و°۵۱ شرقی واقع‌شده 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 محدودشده است (شکل۲). مساحت کل آن در حدود ۲۹۱۲۷ کیلومتر مربع (۲.۹۱۲.۷۰۰ هکتار) است که حدود ۱/۸۵ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده و چهاردهمین استان کشور ازنظر مساحت است. میزان بارندگی نواحی مختلف استان نیز متناسب با کاهش ارتفاع کم می‌شود به طوری‌که پرباران‌ترین ایستگاه آن، شهرستان شازند با ۵۲۰ میلی‌متر و کم باران‌ترین ایستگاه آن، دلیجان با ۱۷۷ میلی‌متر بارندگی و متوسط بارندگی استان نیز حدود ۲۹۰ میلی‌متر گزارش شده است. حدود ۷۵٪ 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 موردمطالعه

Fig.2. Geographic location of the study area

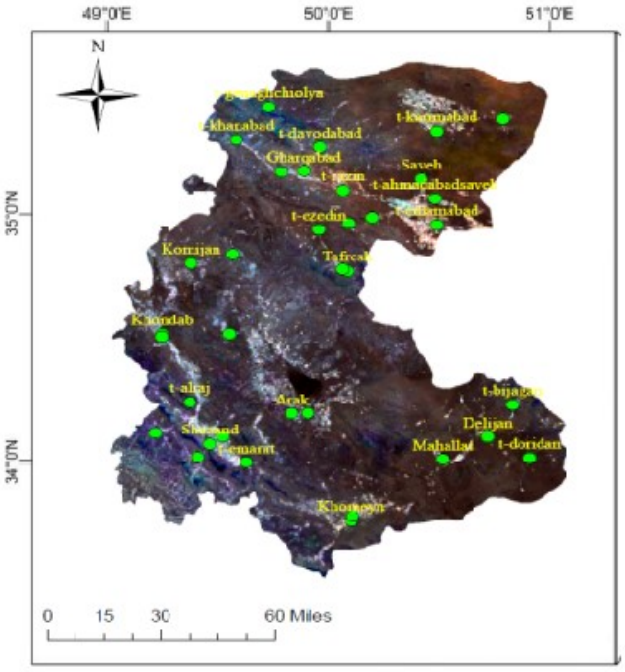
مواد و روش‌ها

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 (شکل۳). از میان شاخص‌های هواشناسی موجود، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بنا به ویژگی‌ها و مزایای آن‌ها (پرکاربرد بودن و انعطاف زمانی و مکانی) مورداستفاده 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

1 - Standardized Precipitation Index

وقوع 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 منطقهٔ 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.



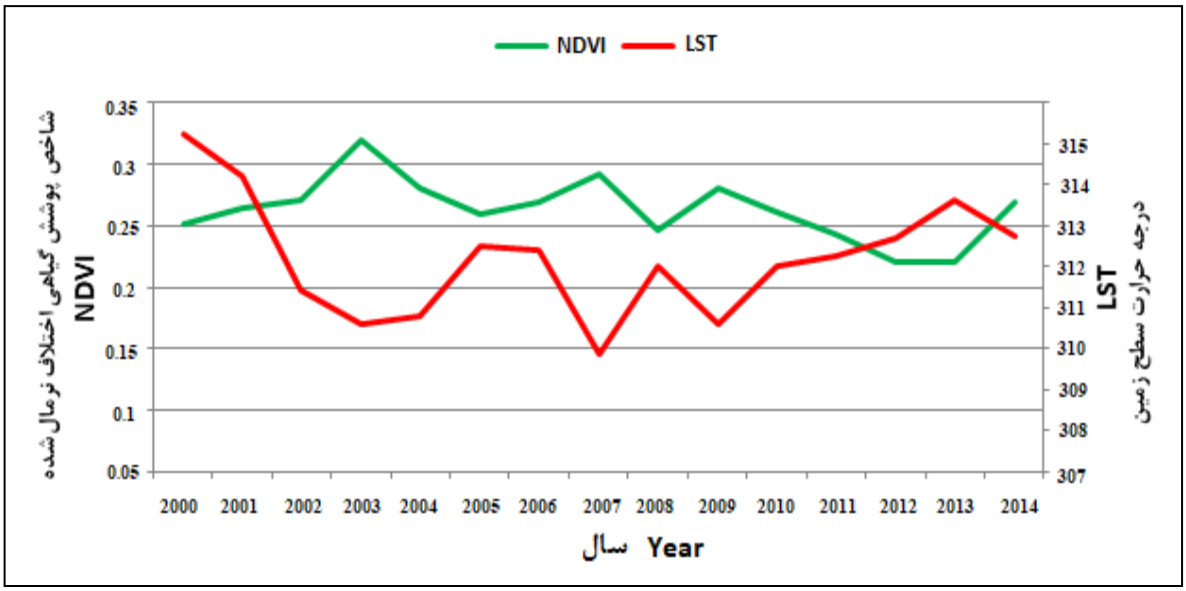
شکل ۳ – موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منطقهٔ مورد مطالعه

Fig. 3. Location of meteorological stations in the study area

داده‌های ماهواره‌ای

به منظور ایجاد سری‌های زمانی NDVI برای ارزیابی خشک‌سالی، محصولات NDVI مربوط به سنجنده MODIS ماهواره Terra باقدرت تفکیک مکانی اسمی ۲۵۰ متر (حقیقی ۲۲۶ متر) و قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روز، سطح ۳ (MOD13Q1) مربوط به مرداد ماه سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ از سایت NASA (ladsweb) 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 باقدرت تفکیک مکانی اسمی ۱ کیلومتر (حقیقی ۸۵۵) و قدرت تفکیک زمانی ۸ روز، سطح ۳ (MOD11A2) برای مرداد ماه 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 مرداد ماه ۴ عدد بود. شکل ۴ ارتباط میان مقادیر NDVI و LST را در محل ایستگاه‌های سینوپتیک داخل استان مرکزی نشان می‌دهد.

1 - Bidirectional Reflectance Distribution Function



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

Fig. 4. Relationship between NDVI and LST values in the study area during August across the study years

شاخص‌های سنجش‌ازدوری پوشش گیاهی

شاخص NDVI به عنوان 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 مادون‌قرمز نزدیک و طیف قرمز به مجموع آن‌ها است به شرح رابطه (۱) است:

$$NDVI=\frac{NIR-\mathrm{Red}}{NIR+\mathrm{Red}} \quad (۱)$$

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:

$$VCI=\frac{NDVI-NDVI_{\min}}{NDVI_{\max}-NDVI_{\min}}*100 \quad (۲)$$

$$TCI=\frac{LST_{\max}-LST_{i}}{LST_{\max}-LST_{\min}}*100 \quad (۳)$$

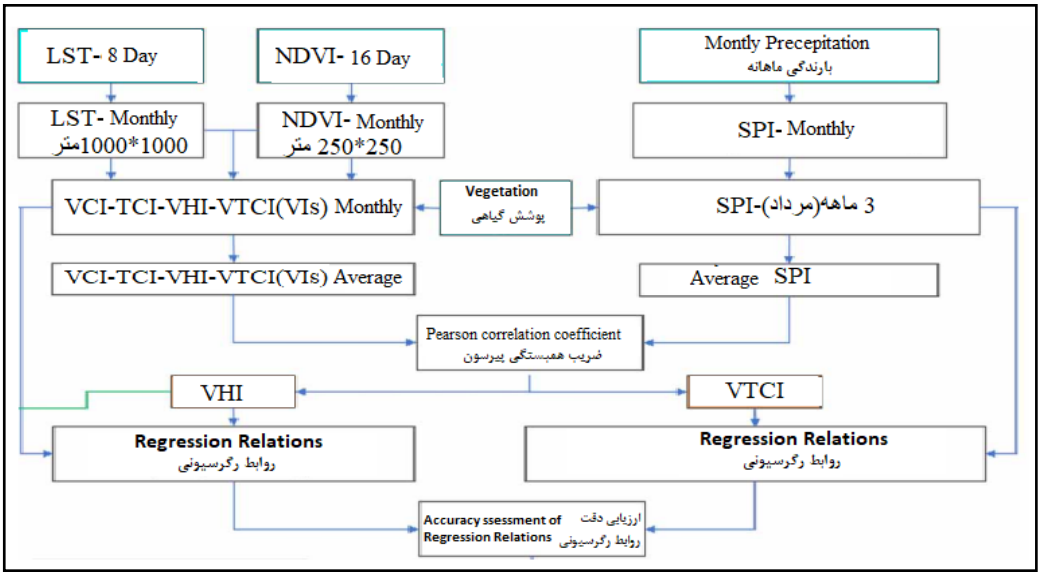
$$VHI=(0.5*VCI)+(0.5*TCI) \quad (۴)$$

که در آن $NDVI_{min}$، $NDVI_{max}$ و NDVIi به ترتیب NDVI میانگین حداقل طولانی‌مدت، میانگین حداکثر طولانی‌مدت و ماه موردنظر برای هر پیکسل و LST_{min}، LST_{max} و LSTi به ترتیب میانگین حداقل دمای طولانی‌مدت، میانگین حداکثر دمای طولانی‌مدت و دمای سطح زمین در ماه موردمطالعه است (Zuo et al., 2019). شاخص VCI بر اساس ارتباط میان مقدار واقعی NDVI و مقادیر NDVI در بهترین ($NDVI_{max}$) و بدترین (NDVImin) 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 (٤) نیز ترکیبی از شاخص‌های VCI و TCI است که هدف آن دخیل کردن شرایط رطوبت پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین در یک شاخص مجموع است.

$$VTCI = \frac{LST_{NDVIi.max} - LST_{NDVIi}}{LST_{NDVIi.max} - LST_{NDVIi.min}} \quad (۵)$$

$$LST_{NDVIi.max} = a + bNDVI_i$$
$$LST_{NDVIi.min} = a' + b' NDVI_i \quad (۶)$$

$LST_{NDVI.max}$ و $LST_{NDVI.min}$ به ترتیب محدوده‌های ماکزیمم و مینیمم دمای سطح زمین با مقادیر NDVI یکسان در منطقه و LST_{NDVIi} دمای سطح زمین هر پیکسل با شاخص پوشش گیاهی LST_{NDVI} می‌باشند. ضرایب a،b و a′،b′ مربوط به معادلات فوق را می‌توان از ترسیم نمودار پراکنش دمای سطح زمین در برابر NDVI برای تاریخ‌های مشخص به دست آورد (Wang et al., 2001). شاخص VTCI نه تنها مرتبط با تغییرات NDVI در منطقه است، بلکه در ارتباط تغییرات LST پیکسل‌های با مقادیر NDVI به‌خصوص نیز است. به طور کلی در مقادیر پایین‌تر VTCI، خشک‌سالی شدیدتر روی می‌دهد. 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. Research 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- Three-month SPI values of stations in Markazi Province for August

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	رازین Razin	-1.11	الرج Alraj	-0.39
دلیجان Delijan	-1.19	خمین Khomein	-0.3	قدمگاه Ghadamgah	-0.23	اراقله Araghaleh	-0.8
غرق‌آباد GharghAbad	-0.56	جوشیروان Joshiravan	-0.89	احمدآباد AhmadAbad	-0.76	خان‌آباد KhanAbad	0.3
خمین Khomein	0.34	ساروق بالا SaroghBala	-0.72	امام‌آباد EmamAbad	-0.49	بیجگان Bijagan	-1.29
خنداب Khondab	-0.08	داودآباد DavodAbad	-1.17	تفرش Tafresh	-0.52	جناقچی‌علیا JenaghchiOlya	-0.7
کمیجان Komijan	-0.6	مزرعه Mazraeh	-0.17	پیک زرند 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 Astaneh	0.88	کریم‌آباد KarimAbad	-0.36	مالک آباد MalekAbad	-0.85

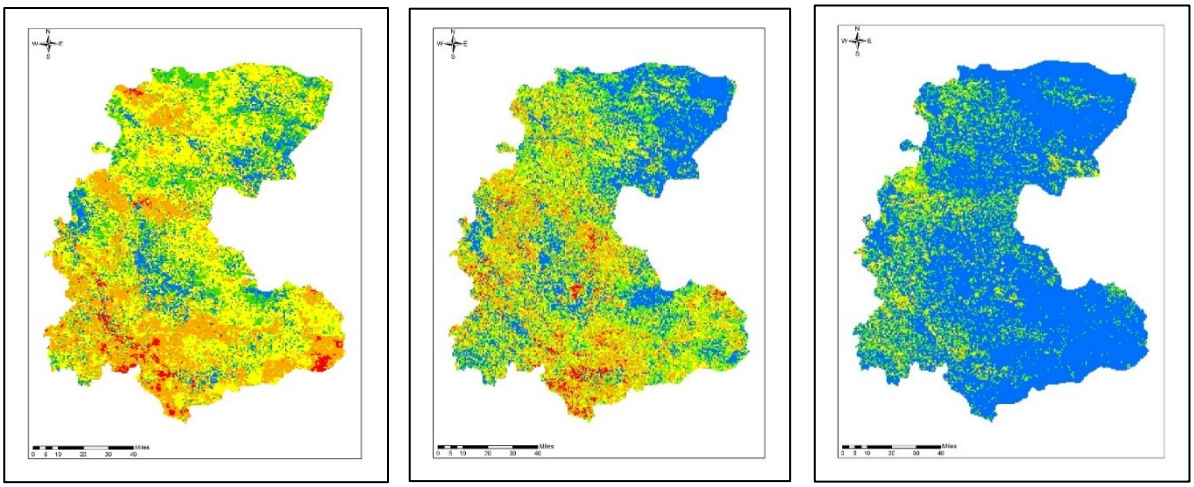
شاخص VHI

پس از تنظیم NDVI و LST مربوط به مرداد ماه، 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 ۱۵تصویر 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 داده‌شده 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 (شکل۶) آن است که سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶کمترین تنش خشک‌سالی را داشته و سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ دارای شدت خشک‌سالی شدید بوده‌اند.

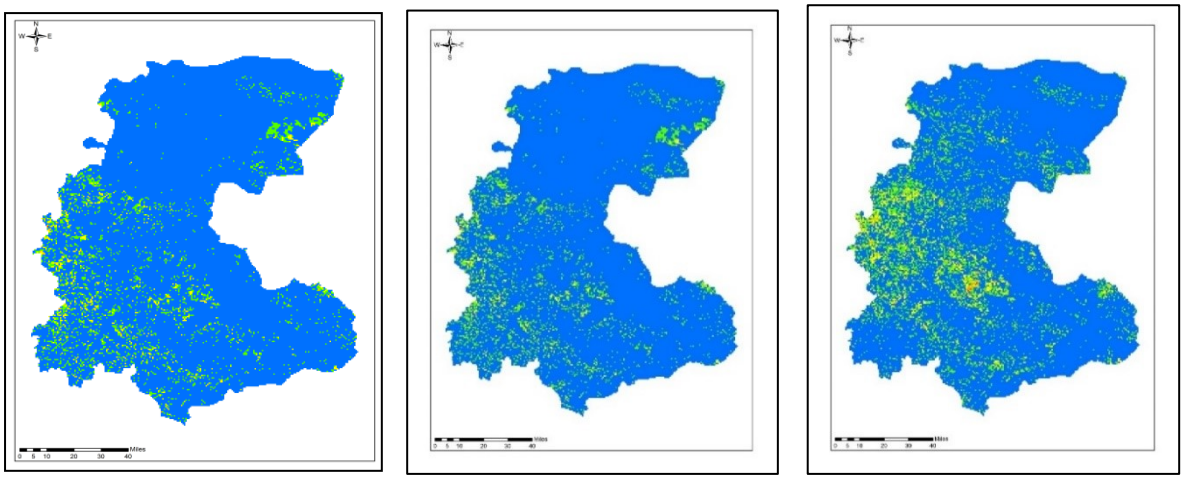
شاخص VTCI

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 به‌خصوص نیز است(رابطه ۵). به طور کلی 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

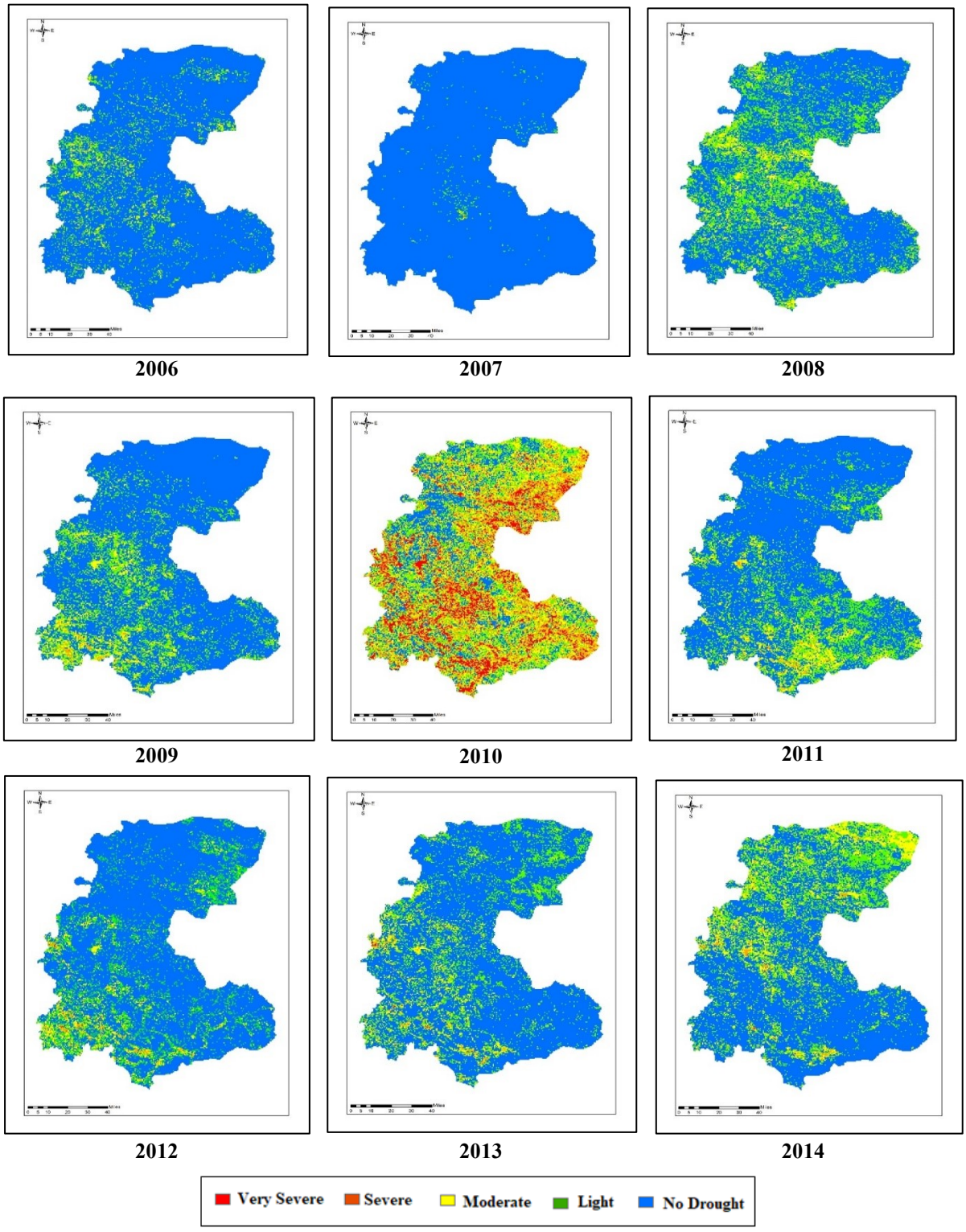
دوبعدی NDVI (محور طول) و LST (محور عرض) صورت گرفت. سپس حداقل و حداکثر مقادیر NDVI و LST تعیین‌شده و جداسازی نقاط بالای لبه گرم (حداکثر) و پایین لبه سرد (حداقل) انجام شد. در ادامه معادله خطی میان NDVI و LST برای لبه گرم و لبه سرد ،تشکیل و اجزای رابطه شاخص خشک‌سالی VTCI و در نهایت ایجاد نقشه VTCI مربوط به ماه مربوط (مرداد) و به تعداد سال‌های مطالعه استخراج شد. در انتها پس از ساخت تعداد ۱۵ شاخص VTCI مربوط به مرداد ماه سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳، مقادیر ضرایب لبه‌های گرم و سرد هرکدام از سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳ برای مرداد ماه استخراج گردید و نهایتاً ضریب R^2 برای لبه‌های مذکور استخراج گردید. بالاترین ضرایب R^2 برای لبه‌های گرم وارد مربوط به مرداد ماه 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 ۰/۰۰۶) است.



2000 2001 2002

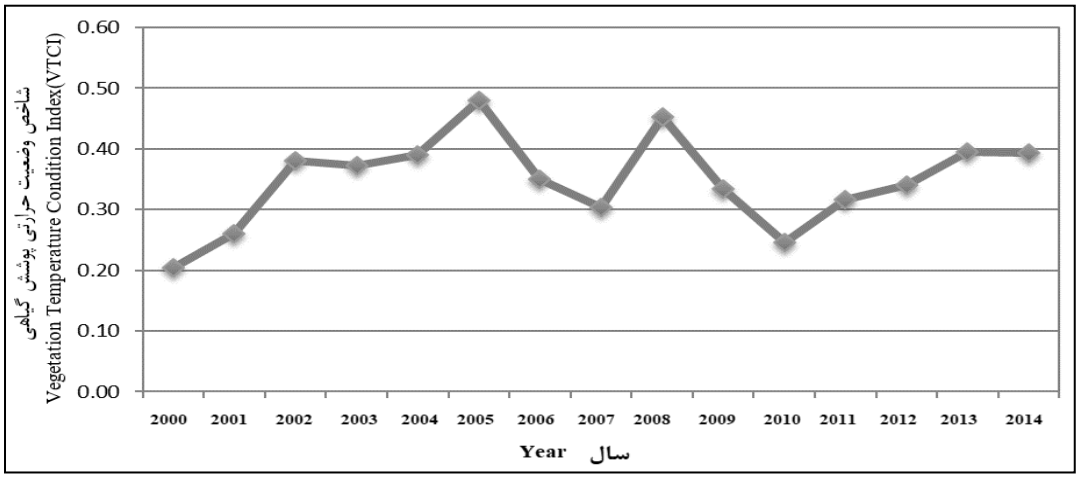


2003 2004 2005



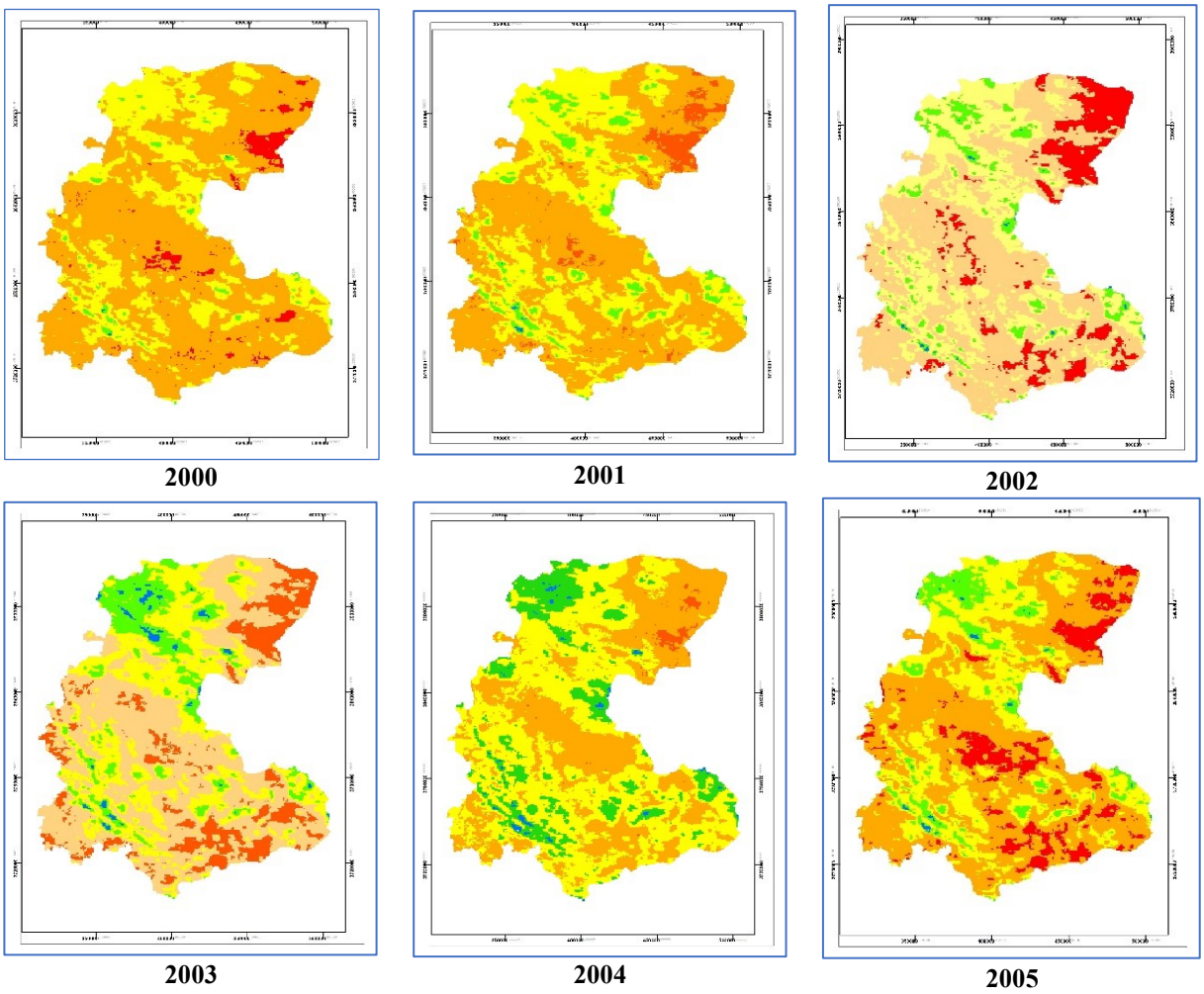
شکل ۶ - نقشه‌های حاصل از شاخص VHI برای مرداد ماه سال ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳

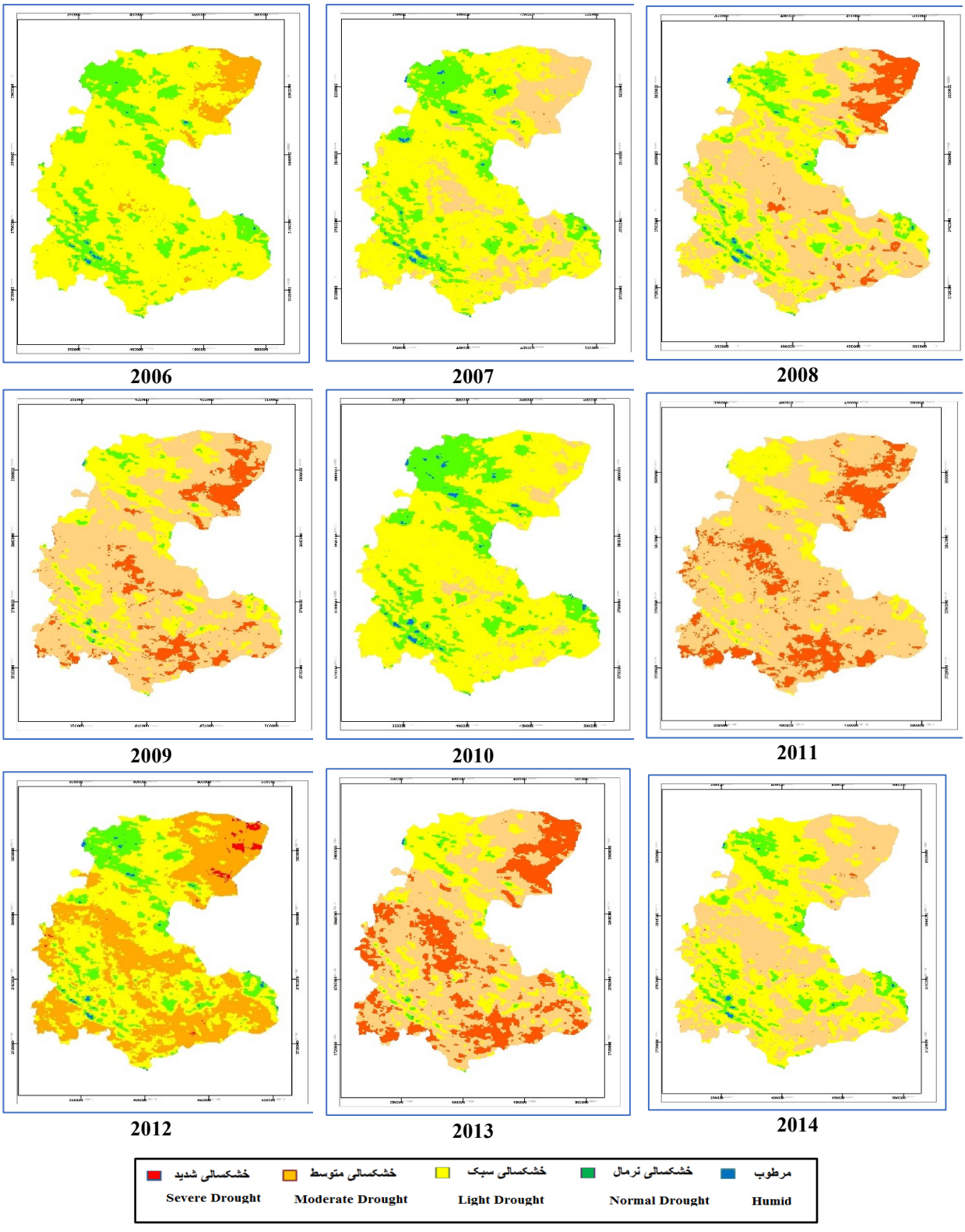
Fig. 6. Spatial distribution of the Vegetation Health Index (VHI) for August (2000–2014)



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

Fig. 7. Temporal variations of the Vegetation Temperature Condition Index (VTCI) in August (2000–2014)





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

Fig. 8. Spatial distribution maps of the Vegetation Temperature Condition Index (VTCI) for August (2000–2014)

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 و VTCI در محل ایستگاه‌های مذکور، مبادرت گردید. بدین صورت 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 به دست آمده، مقادیر NDVI بین ۱+و ۱، مقادیر LST درجه حرارت در مقیاس کلوین ، حدود عدد ۳۰۰ ، مقادیر شاخص TCI،VCI 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 مد نظر قرار می‌دهند نیز رابطه خطی و مستقیم ولی در مقیاس‌های متفاوت را دارا هستند. جدول ۲ مقادیر کمی استخراج شده شاخص‌های بیان شده را در مرداد ماه دوره ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر استخراج شده شاخص‌های سنجش‌ازدوری در مرداد ماه برای ایستگاه اراک

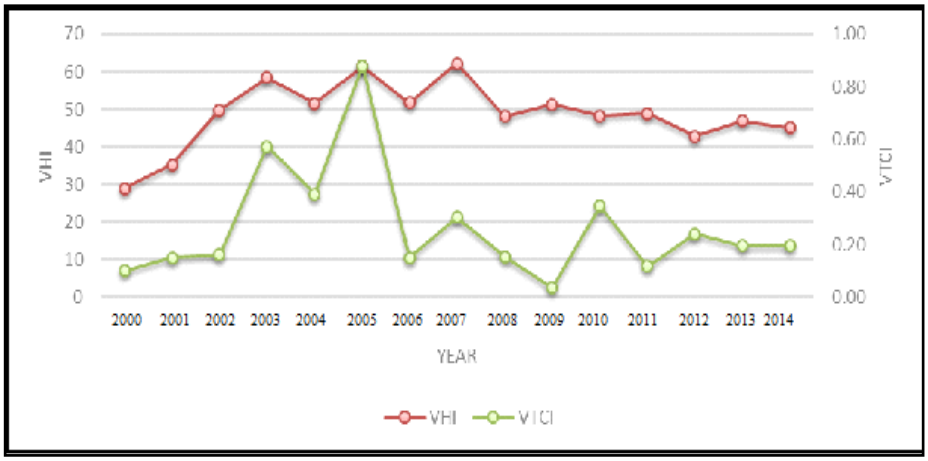
Table 2- Extracted values of remote sensing indices for Arak station in August

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 به عنوان 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 وLST کل سطح اراضی حاصل می‌گردد درحالی‌که 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 به عنوان سال‌های با خشک‌سالی شدید و سال ۱۳۸۶ به عنوان 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 between VHI and VTCI indices in August

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

Table 3- Area of drought severity classes in August based on the Vegetation Health Index (VHI) (in hectares)

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

جدول۴- مقادیر و درصد مساحت طبقات خشک‌سالی به روش VTCI(هکتار)

Table 4- Area and percentage of drought severity classes based on the VTCI method (in hectares)

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

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

Table 5- SPI and remote sensing drought indices values for August 2000 across stations in Markazi Province

ایستگاه	SPI-3	NDVI	LST	VCI	TCI	VHI	VTCI
Arak اراک (س)	-0.7	0.42	320.8	21	31.7	37	0.12
Ashtian آشتیان (س)	-0.3	0.27	316.3	2.6	22.6	13	0.57
Delijan دلیجان (س)	0	0.08	322	21	46.9	23	0.15
Gharghabad غرق‌آباد (س)	-1.6	0.11	318	10.3	42.9	21	0.35
Khomein خمین (س)	-0.7	0.28	320.5	77	23.4	51	0.09
Khondab خنداب (س)	-0.6	0.17	318.9	12.3	38.4	25	0.15
Komijan کمیجان (س)	-0.7	0.28	321.9	21	39.9	20	0.07

Mahalat (س) محلات	-1.2	0.09	319.6	21	39.2	22	0.14
Saveh (س) ساوه	-1.4	0.08	324.7	4	42.1	33	0.4
Shazand (س) شازند	-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 Joshiravan (ب) خنداب جوشیروان	-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
مزرعه خاتون (ب) Mazraeh Khaton	-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 Saveh (ب) احمدآباد ساوه	-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 زرند	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) مالک آباد	0.7	-1.9	0.12	319.3	4	42.2	31

س: سینوپتیک Synoptic ب: باران‌سنجی Rain gauge

روابط رگرسیونی ماه مرداد

همان‌گونه که در فرضیهٔ 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 NDVI،LST،VCI،TCI، VHI و VTCI 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. درنتیجه 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 سه ماهه است (جدول ۶).

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

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

Table 6- Regression relationships between SPI and satellite-derived drought indices in 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

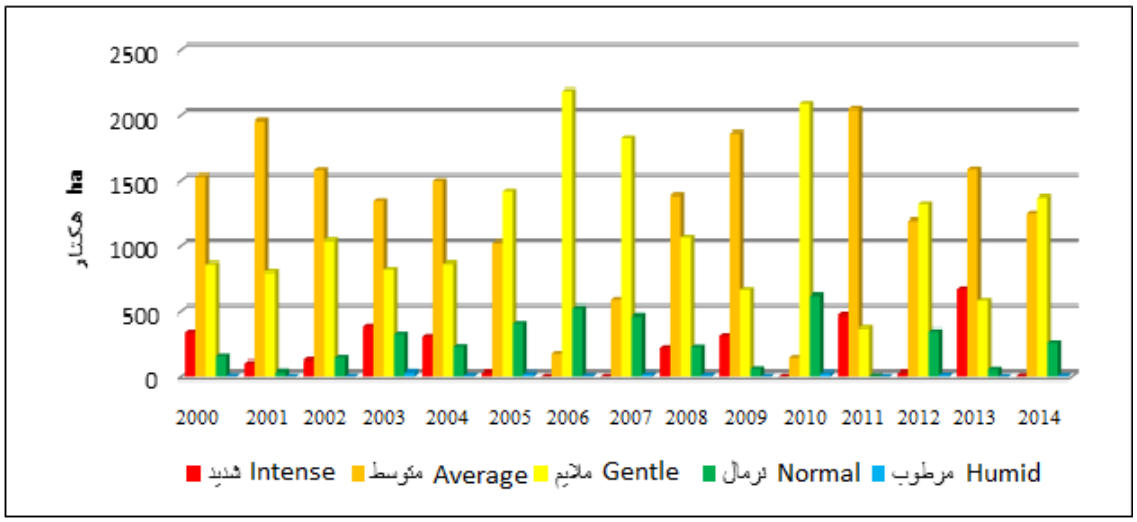
** :در سطح یک درصد *: در سطح پنج درصد

جدول۷- روابط رگرسیونی غیرخطی بین شاخص خشکسالی SPI و ماهواره‌ای مرداد

Table 7- Non-linear regression relationships between SPI and satellite-derived drought indices in August

مدل رگرسیون Regression Model	سطح معنی‌داری Significant	$R^2_{(ln)}$	$R^2_{(sqr)}$	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



شکل۱۰– منحنی تغییرات مساحت طبقات شدت خشکسالی در سال‌های مختلف با استفاده از VTCI

Fig. 10. Temporal trend curves of drought severity class areas using the VTCI across different years

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 مشاهده شده (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 (به‌عنوان مقادیر مشاهده) 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 مشاهده شده و برآورد شده، دقت هر روش با توجه به معیارهای آماری مجذور میانگین اشتباهات (MSE) و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) انجام شد.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i)-z(x_i))^2}{n} \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i)-z(x_i))^2}{n}} \quad (۸)$$

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

جدول ۸- ارزیابی دقت مدل‌های زمانی

Table 8- Accuracy assessment of temporal models

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

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 سه ماهه 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 . ازجمله 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 توسعه یافته‌اند 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 خشکسالی‌کشاورزی 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. هر چند این دو شاخص در نمایش شدت‌های خشک‌سالی در برخی مهروموم‌ها، 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. بازۀ زمانی سه‌ماهه برای شاخص SPI به دلیل در نظر گرفتن شرایط ترسالی- خشکسالی متوسط سه‌ماهه منجر به مرداد (یعنی ماه‌های خرداد،تیر و مرداد) که شرایط پوشش گیاهی و حرارتی در حالت حداکثر می‌باشند، انتخاب گردید. بدین مفهوم که در این سه ماه، هم پوشش گیاهی و هم‌درجه حرارت سطح زمین واقعیت خود را نشان می‌دهند.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بر اساس نقشه‌های حاصل از شاخص VHI، سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶کمترین تنش خشک‌سالی را داشته و سال‌های ۱۳۷۹ ،۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ دارای شدت خشک‌سالی شدید بوده‌اند. سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ کمترین تنش خشک‌سالی را داشته و سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۳،۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ دارای شدت خشک‌سالی شدید برای شاخص VTCI بوده‌اند. مطابق مقادیر شاخص SPI، سال ۱۳۷۹ و سال ۱۳۸۷ دارای شدیدترین خشک‌سالی در ۴۰ سال اخیر بوده‌اند. همچنین سال ۱۳۸۶ نیز به عنوان مرطوب‌ترین سال در این دوره مطالعاتی بوده است. نتایج حاصل از شاخص SPI، همان‌گونه که تحلیل‌های آماری نشان داده‌اند، تطابق بیشتری با نتایج شاخص VHI داشته‌اند. 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، شاخص‌های ترکیبی VHI و VTCIحاصل محصولات MODIS از قابلیت بسیار خوبی در نمایش شدت‌های خشک‌سالی کشاورزی برخوردار بوده و می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در برآورد خشک‌سالی کشاورزی باشند. نقشه‌های حاصل از شاخص‌های خشک‌سالی سنجش‌ازدوری می‌توانند به تصمیم سازان و تصمیم‌گیرندگان، در بهبود برنامه‌های مدیریت خشک‌سالی کمک نموده و نقش بسزایی را در کاهش آثار خشک‌سالی داشته باشند. قابلیت‌های مناسب سنجش‌ازدور در پایش خشک‌سالی، این امکان را فراهم می‌کند که بخصوص در مناطقی که تراکم ایستگاه‌های هواشناسی کم و نامنظم است، امکان ارزیابی خشک‌سالی‌ها را فراهم نمایند. این توانایی و امکان زمانی و مکانی، با هزینه و صرف زمان کمتر، به

برنامه ریزان در پهنه‌بندی خشک‌سالی‌ها در تعیین مناطق حساس و مستعد خشک‌سالی و اولویت‌های مدیریتی در زمینه مدیریت جامع ریسک و بحران کشاورزی و منابع طبیعی کمک زیادی می‌نماید. نتایج این تحقیق می‌تواند در واقعی کردن پایش خشک‌سالی‌ها و پیش‌بینی آن‌ها به محققان و سازمان‌های دولتی برنامه‌ریز کمک شایانی نماید.

برای دستیابی به نتایج متقن و دقیق‌تر و بومی کردن ضرایب شاخص‌های VHI و VTCI برای کشور، پیشنهاد می‌گردد اندازه‌گیری‌های زمینی تغییرات کمّی 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 ماهواره‌ای، مانند سنتینل و لندست نیز پیشنهاد می‌گردد.

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 Con*serv, 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