

Agricultural drought assessment and modeling based on teleconnection patterns using Multiple Linear Regression (case study: Hamadan province)

Atefeh Almasi Nahanji¹ , Shima Nikoo^{2*} , Mohammad Rahimi³ 

1- MSc student of Agricultural Meteorology, Department of Agricultural Meteorology, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.

3- Professor, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.

* Corresponding Author: shimanikoo@semnan.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Drought is one of the most significant natural hazards in arid and semi-arid regions, and its frequency, intensity, and duration have increased due to climate change, leading to widespread impacts on water resources and agricultural production (Wilhite, 2000; Konapala et al., 2020; Loc et al., 2021). Remote sensing techniques, particularly the Temperature–Vegetation Dryness Index (TVDI), have become effective tools for monitoring agricultural drought because of their wide spatial coverage and continuous observation capability (Qin et al., 2021). Furthermore, teleconnection indices, which represent large-scale atmosphere–ocean variability, have been widely used to analyze and predict drought and other climatic variables (McGregor et al., 2017; Li et al., 2022b; Helali et al., 2024). Despite numerous studies on agricultural drought monitoring using remote sensing and teleconnection indices, the spatiotemporal variability of TVDI and its relationship with teleconnection indices in Hamadan Province have not yet been comprehensively investigated. Therefore, this study aims to integrate remote sensing data (TVDI) and teleconnection indices to analyze agricultural drought patterns and develop a multiple linear regression (MLR) model for predicting TVDI in Hamadan Province.

Materials and Methods

The study area is Hamadan province in western Iran with an area of 19,493 square kilometers. The climate of the region is cold semi-arid to very cold semi-arid according to the Extended Demarton method. The average annual temperature is 11.3 °C, and the average annual precipitation of the province is 317.7 mm.

MODIS satellite images were used in this study. These images were composite products of 8-day land surface temperature and 16-day MOD11A2 and MOD13A2 vegetation indices with a spatial resolution of 1 km. The images were extracted for the period 2003 to 2022. All calculations were performed in the Google Earth Engine environment. TVDI was calculated based on Eq1.

$$TVDI = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (1)$$

Where LST is the surface temperature of the pixel in question, $LST_{\max}$ is the maximum NDVI temperature in the corresponding pixel, and $LST_{\min}$ is the minimum temperature corresponding to that NDVI.

The Mann-Kendall method (Mann, 1945; Kendall, 1975) was then used to determine the type of trend, and the Sen method (1968) was used to determine the intensity of the TVDI trend. In addition, the Pearson correlation coefficient was used to evaluate the relationship between TVDI and the teleconnection indices, including NAO, AMO, GlobalSST, MEI, Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4, Niño 4, ONI, PDO, SOI, Sunspot, and TNI. The values of these indices were obtained from their respective official data repositories. Finally, teleconnection indices and time lags with statistically significant correlations ($P < 0.05$) were selected and, based on the absolute value of the correlation coefficient, the variables with the highest correlation with TVDI were considered as candidate variables for modeling. Next, for each city in Hamadan province, the selected variables were entered into a stepwise multiple linear regression model. In this method, the variables were entered into the model in stages, and at each stage, the variable that caused the greatest increase in the coefficient of determination (R^2) was added to the model. Also, variables that became statistically insignificant after the entry of other variables were removed from the model. This process continued until the best combination of independent variables was achieved. Finally, the final MLR model was extracted to estimate TVDI based on the selected teleconnection indices. The model

performance was evaluated using statistical indices including R^2 , root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE).

Results and Discussion

The spatial pattern of agricultural drought in Hamadan province was relatively stable throughout the year, with Famen and Razan counties experiencing the highest TVDI values in all seasons, while Asadabad and, to some extent, Malayer experienced wetter conditions. Also, the increase in TVDI values in the summer season indicates the intensification of soil moisture stress due to increased temperature and evapotranspiration. This indicates that although the severity of drought changes under the influence of seasonal changes, its spatial distribution is mainly a function of relatively constant environmental characteristics such as climate, topography, soil, and land use.

The study of the seasonal TVDI trend in the cities of Hamadan province indicated a significant increase in seasonal and annual drought in the cities of Hamadan province in the period 2003-2022, such that the trend of this index was significant in most seasons with a slope of 0.001 to 0.005 (except for the autumn season with a constant slope of 0.002). Also, the trend of its annual changes was significant in all cities, and its slope varied between 0.002 and 0.003 per year.

Based on the zoning results of this index, the main area of Hamadan province was in the moderate and severe drought categories, and a small part of the province, located around the Alvand Mountain Range and the northern part of the Green Mountain Range (south of Nahavand County), had minor and wet droughts.

The results also showed that AMO had a significant correlation with TVDI at the largest number of time lags compared to other teleconnection indices, while GLOBALSST, NAO, and PDO had a significant correlation only at a few specific time lags. This indicates that multi-decadal fluctuations in the Atlantic Ocean water surface temperature have a lasting, long-term, and gradual effect on the climatic conditions of Hamadan province.

MLR-based modeling was performed between AMO at different time lags (L) and TVDI in 10 counties of Hamadan province. For example, in Asadabad:

$$\text{TVDI Asadabad} = 0.5507 + 0.513(\text{AMO L0}) + 0.467(\text{AMO L3}) + 0.650(\text{AMO L8}) + 0.455(\text{AMO L12})$$

The collinearity between AMO values for time lags with VIF values < 7 was acceptable, and the significance level of the equation was 0.037. The R^2 of the equation was 0.78, the RMSE value was 0.094, and its NSE was 0.81.

The results of the stepwise MLR models showed that AMO can explain a significant part of the seasonal changes in TVDI in the counties of Hamadan province; so that high R^2 , along with appropriate values of NSE and low RMSE, indicate acceptable performance of the models in estimating the severity of agricultural drought.

Conclusion

The TVDI index showed a good ability to monitor the spatial and seasonal pattern of agricultural drought in Hamadan province; so that Famen and Razan counties experienced the highest severity of drought, and Asadabad experienced the most suitable moisture conditions, and the spatial pattern of drought remained relatively stable despite seasonal changes. The stepwise MLR results also showed that teleconnection indices, especially AMO, explain a significant part of TVDI changes by considering time lags and have appropriate accuracy in drought forecasting. Overall, the integration of remote sensing indices and teleconnection indices can be an effective basis for the development of drought forecasting and water resources management systems, and the use of machine learning methods and ground data in future studies will increase the accuracy of these systems.

Keywords: Hamadan province, Agricultural drought, Multiple Linear Regression, Teleconnection indicator, TVDI

بررسی خشکسالی کشاورزی و مدلسازی آن بر پایه الگوهای دورپیوندی با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه (مطالعه موردی: استان همدان)

عاطفه الماسی نهنجی^۱ ID، شیما نیکو^{۲*} ID، محمد رحیمی^۳ ID

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲- دانشیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳- استاد، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*نویسنده مسئول: shimanikoo@semnan.ac.ir

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که اثرات گسترده‌ای بر کشاورزی، منابع آب و امنیت غذایی دارد. این پژوهش با هدف بررسی وضعیت و روند خشکسالی کشاورزی در شهرستان‌های استان همدان و مدلسازی آن بر پایه الگوهای دورپیوندی انجام شد. بدین منظور، شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی (TVDI) با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Terra در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ به صورت فصلی از Google Earth Engine استخراج و تحلیل مکانی-زمانی آن انجام شد. روند تغییرات TVDI با آزمون من-کندال و شیب سن بررسی گردید. همچنین همبستگی ۱۳ شاخص دورپیوندی با TVDI ارزیابی و شاخص‌های دارای بیشترین همبستگی برای مدلسازی با رگرسیون خطی چندگانه (MLR) انتخاب شدند. نتایج نشان داد بیشترین میانگین فصلی TVDI در تابستان در شهرستان‌های رزن و فامنین برابر با ۰/۹۰ و کمترین مقدار در زمستان در اسدآباد برابر با ۰/۳۸ بود. در مقیاس سالانه نیز فامنین با ۰/۸۷ بیشترین و ملایر با ۰/۴۹ کمترین میانگین TVDI را داشتند. روند TVDI در مقیاس فصلی (به جز پاییز) با شیب ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ و در مقیاس سالانه با شیب ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ افزایشی و معنی‌دار بود. پهنه‌بندی خشکسالی نشان داد بخش عمده استان در طبقات خشکسالی متوسط و شدید واقع شده‌است. TVDI با NAO، GLOBALT و PDO در برخی وقفه‌های زمانی و با AMO در تمامی وقفه‌های زمانی ۰ تا ۱۲ فصل همبستگی معنی‌دار داشت. مدل MLR مبتنی بر AMO با متوسط خطا (RMSE)، ۰/۰۹۳، ضریب تبیین (R^2), ۰/۷۸ و ضریب کارایی نش-ساتکلیف ۰/۷۶، دقت مناسبی در برآورد TVDI نشان داد.

کلیدواژه‌ها: استان همدان، خشکسالی کشاورزی، رگرسیون خطی چندگانه، شاخص‌های دورپیوندی، TVDI

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی است که خسارات و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل توجهی در سراسر جهان به همراه دارد. (Wilhite, 2000). کمبود آب ناشی از دوره‌های خشکسالی مداوم از چند ماه تا چند سال، به طول می‌انجامد چالش بزرگی برای پایداری جامعه به شمار می‌رود. در نتیجه تغییرات آب و هوایی، احتمال خشکسالی‌های گسترده با افزایش فراوانی، شدت و تداوم بیشتر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، افزایش خواهد یافت (Konapala et al., 2021; Loc et al., 2020). در سال‌های اخیر، تشدید تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب در دسترس، خشکسالی را به یکی از چالش‌های اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تبدیل کرده است (Hamzeh et al., 2017). بیش از دو سوم مساحت ایران در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک قرار دارد؛ از این رو، به دلیل شکنندگی شرایط محیطی، پیامدهای خشکسالی در این مناطق شدیدتر و محسوس‌تر است. از مهم‌ترین این پیامدها، کاهش قابل توجه دسترسی کشاورزان به آب و در پی آن کاهش میزان تولیدات کشاورزی است که امنیت غذایی و اقتصادی کشور را تحت تأثیر قرار خواهد داد (Mohsen Pour and Zibaei, 2010). بنابراین، شناسایی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی و تحلیل آن، گامی ضروری برای ارائه راهکارهای مناسب در مدیریت و کاهش پیامدهای این پدیده به شمار می‌رود. همچنین، بررسی امکان مدلسازی و شبیه‌سازی خشکسالی با بهره‌گیری

از شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس، نظیر پدیده ال‌نینو، می‌تواند در مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی بحران نقش مؤثری ایفا کند (Li et al., 2022b).

انواع خشکسالی‌ها و پایش آن با روش‌های مختلفی بررسی می‌شوند از جمله شاخص‌های عددی مثل SPI و SPEI که مبتنی بر داده‌های نقطه‌ای و یا ایستگاهی می‌باشند و نیز شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور مانند VCI، NDVI و TVDI مورد مطالعه قرار می‌گیرند. روش‌های نقطه‌ای پایش خشکسالی این مزیت را دارند که با استفاده از داده‌های سری زمانی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرولوژی، امکان بررسی تغییرات زمانی خشکسالی را در نقاط مشخص فراهم می‌کنند. با این حال، مهم‌ترین محدودیت این شاخص‌ها ماهیت نقطه‌ای آن‌هاست؛ به‌گونه‌ای که نتایج تنها معرف شرایط محل استقرار ایستگاه بوده و برای تعمیم وضعیت خشکسالی به سایر مناطق، نیاز به استفاده از روش‌های میان‌یابی مکانی وجود دارد. دقت این میان‌یابی نیز به عواملی مانند تعداد، پراکنش و کیفیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری وابسته است. (Akhtari et al., 2009). در مقابل استفاده از فناوری سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، به دلیل برخورداری از پوشش مکانی گسترده، تکرار زمانی مناسب و امکان استخراج اطلاعات پیوسته از سطح زمین، به یکی از کارآمدترین ابزارها برای پایش خشکسالی کشاورزی تبدیل شده است. این فناوری امکان ارزیابی وضعیت خشکسالی را در مقیاس‌های منطقه‌ای و وسیع با دقت مناسب، هزینه کمتر و صرفه‌جویی در زمان فراهم کرده و نسبت به روش‌های متداول مبتنی بر داده‌های زمینی، قابلیت بیشتری در نمایش تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی دارد (Qin et al., 2021). در این راستا می‌توان از تحلیل سری‌های زمانی با استفاده از شاخص‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی نیز استفاده کرد. مدل‌سازی و پیش‌بینی مبتنی بر سری‌های زمانی صرفاً مختص منطقه بوده و گام زمانی آن کوتاه‌تر است؛ ولی استفاده از شاخص‌های دورپیوندی به عنوان شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده می‌تواند راهگشا باشد. الگوهای دورپیوندی (پیوند از دور) ساختارهای آماری هستند که تعاملات فرایندهای پیچیده اقیانوسی و جوی را نشان می‌دهند که منجر به پدیده‌های آب و هوایی مهمی مانند نوسانات جنوبی ال‌نینو (ENSO¹) می‌شود. این شاخص‌ها برای توصیف رفتار زمانی حالت‌های تغییرپذیری آب و هوا استفاده می‌شوند و برای درک و پیش‌بینی الگوهای اقلیمی و تأثیرات آن‌ها بر متغیرهای مختلف محیطی ضروری هستند (مک‌گرگور²، ۲۰۱۷). الگوهای دورپیوندی در مطالعه روابط بین محرک‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس و متغیرهای آب و هوایی محلی یا منطقه‌ای مانند دما، بارش، دبی رودخانه‌ها، و فنولوژی پوشش گیاهی استفاده می‌شوند (Hidago-Munoz et al., 2015; McGregor et al., 2017; Wu et al., 2021). قدرت این شاخص‌ها اغلب از طریق همبستگی‌های آماری بین شاخص‌های نشان‌دهنده پدیده‌های اقلیمی یا هیدرولوژیکی در مناطق مختلف و متغیرهای محیطی خاص ارزیابی می‌شود (Mahmud and Chen, 2021; Brown et al., 2019). مطالعات صورت‌گرفته کاربرد این شاخص‌ها را در مدل‌سازی دما (Habibian and Mohammadi, 2012)، بارش (Helali et al., 2020)، دبی (Modarresi et al., 2018)، پدیده‌های اقلیمی حدی مثل سرمازدگی یا یخبندان (Helali et al., 2021)، خشکسالی‌ها (Nazemosadat, and Ghasemi, 2004; Li et al., 2022a) و تبخیر و تعرق (Hamzeh et al., 2017; Helali et al., 2024) اثبات کرده است.

همچنین بررسی همبستگی و مدل‌سازی شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای چون شاخص خشکی پوشش گیاهی - دما³ (TVDI) با استفاده از الگوهای بزرگ‌مقیاس اقلیمی مثل ENSO، نائو⁴ (NAO)، و شاخص‌های مرتبط با دمای سطح دریا در نقاط مختلف جهان (SST⁵) می‌تواند در پیش‌بینی خشکسالی مثرتر باشد (Li et al., 2022b)، چرا که این شاخص‌ها قابل پیش‌بینی بوده و می‌توان آن‌ها را با تأخیر زمانی با کمک مدل‌های یادگیری ماشین مورد مدل‌سازی و شبیه‌سازی قرار داد (Helali et al., 2023; Helali et al., 2024).

با توجه به قرارگرفتن استان همدان در ناحیه آب و هوایی سرد و نیمه‌خشک ایران و به دلیل اهمیت استراتژیک آن از نظر تولید محصولات کشاورزی و باغداری، مطالعه و شناخت پدیده خشکسالی، توسعه و روند مکانی آن در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و

¹El Niño-Southern Oscillation

²McGregor

³Temperature Vegetation Dryness Index

⁴North Atlantic Oscillation

⁵Sea Surface Temperature

مدیریت منابع آب مهم است. زیرا بخش عمده فعالیت‌های اقتصادی استان همدان کشاورزی و دامداری است که با توجه به خشکسالی‌های فراگیر شدیداً تحت تأثیر قرار گرفته است. طبق آمار وزارت کشاورزی سالانه سه میلیون و ششصد هزار تن محصولات زراعی، ۸۱۹ هزار تن محصولات باغی، ۵۶۰ هزار تن فراورده‌های دامی و یک میلیون و هشتصد هزار تن فراورده‌های حاصل از صنایع تبدیلی در این استان تولید می‌شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که کشور ایران (Bari Abarghouei et al., 2011; Modarres et al., 2016; Nouri and Homaei, 2020; Bahrami et al., 2019; Isfahani et al., 2022; Emadodin et al., 2019; Tabari et al., 2012) و به خصوص مناطق غربی ایران (Maryanaji et al., 2015; Amiri et al., 2011; Zareabyaneh et al., 2017; Zare Abianeh et al., 2010; Majidi et al., 2018; Nazari Pouya and Khosroshahi, 2014; Nazarifar et al., 2008) با خشکسالی‌های متنوع درگیر بوده‌اند که خسارات جبران‌ناپذیری در پی داشته است.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های ایستگاهی، شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور و همچنین کاربرد الگوهای دورپیوندی در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی، هنوز چندین خلأ پژوهشی وجود دارد. نخست آنکه بخش عمده پژوهش‌های پیشین بر مدل‌سازی شاخص‌های نقطه‌ای خشکسالی نظیر SPI یا متغیرهایی مانند بارش، دما و دبی متمرکز بوده‌اند و مطالعات محدودی به بررسی ارتباط TVDI با مجموعه‌ای از شاخص‌های دورپیوندی در مقیاس منطقه‌ای پرداخته‌اند. افزون بر این، تاکنون مطالعه جامعی درباره الگوی زمانی-مکانی خشکسالی کشاورزی استان همدان بر پایه TVDI و ارتباط آن با شاخص‌های دورپیوندی با هدف ارائه مدل گزارش نشده است.

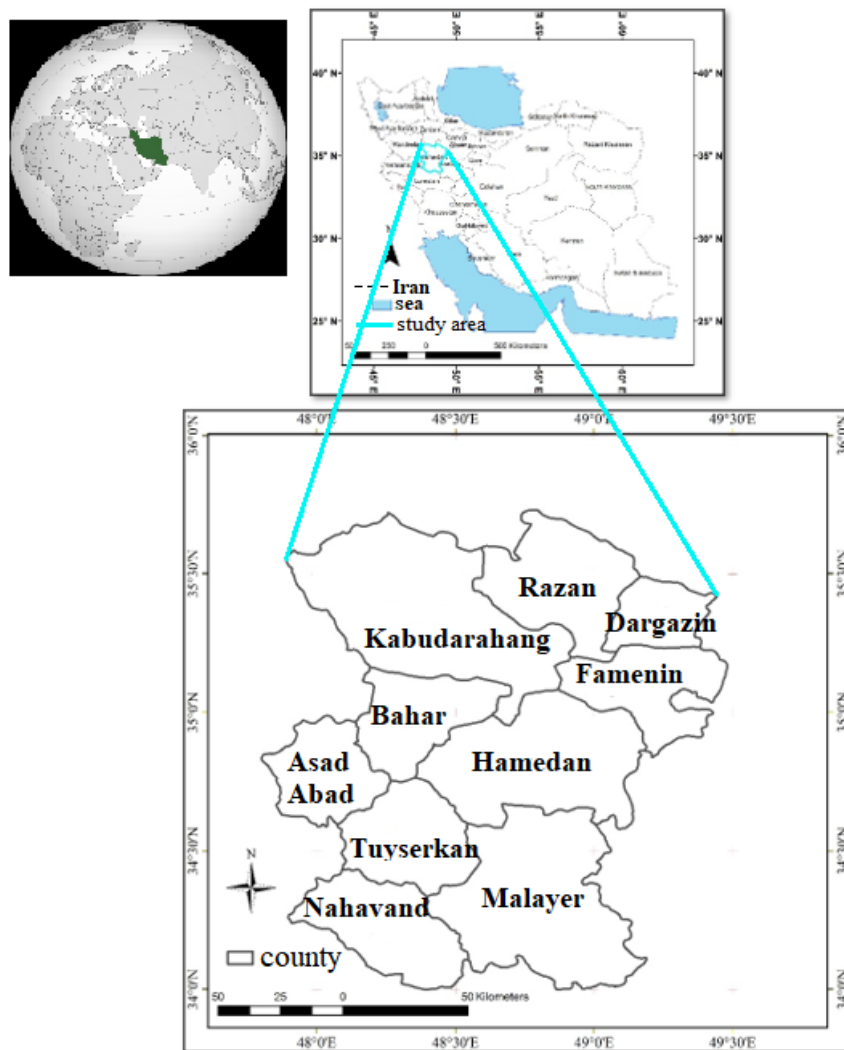
بر این اساس، پژوهش حاضر به تلفیق داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی برای تحلیل خشکسالی کشاورزی پرداخته است. در این پژوهش، ابتدا تغییرات زمانی و مکانی TVDI در سطح شهرستان‌های استان همدان بررسی شد، سپس ارتباط آن با مجموعه‌ای از شاخص‌های دورپیوندی در تأخیرهای زمانی مختلف ارزیابی گردید و در نهایت با انتخاب شاخص‌های مؤثر، مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR^1) برای مدل‌سازی و پیش‌بینی TVDI توسعه داده شد. این رویکرد علاوه بر آگاهی از وضعیت خشکسالی و بر شناسایی مهم‌ترین محرک‌های اقلیمی مؤثر بر خشکسالی کشاورزی، امکان پیش‌بینی شرایط خشکسالی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی را فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان همدان است که در بخش غربی ایران قرار دارد. این استان از غرب با استان‌های کردستان و کرمانشاه، از جنوب با لرستان، از شرق با استان مرکزی و از شمال با استان‌های زنجان و قزوین هم‌مرز است (شکل ۱). از نظر جغرافیایی در بین عرض‌های ۳۳ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی قرار گرفته است. از نظر توپوگرافی رشته کوه‌های الوند در بخش مرکزی و رشته کوه‌های گرین در بخش جنوبی آن واقع شده‌اند به طوری که از نظر توپوگرافی، رشته کوه الوند در بخش مرکزی و رشته کوه گرین در بخش جنوبی استان واقع شده‌اند. این ناهمواری‌ها در شکل‌گیری دشت‌های وسیع، تنوع اقلیمی و غلبه شرایط سردسیر در بخش‌هایی از استان نقش دارند. مساحت استان همدان ۱۹۴۹۳ کیلومتر مربع است. از نظر اقلیمی، این استان دارای تابستان‌هایی معتدل و زمستان‌هایی سرد است و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، در گروه اقلیم نیمه‌خشک قرار می‌گیرد؛ همچنین بر پایه طبقه‌بندی دومارتن توسعه‌یافته، دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد تا نیمه‌خشک بسیار سرد است (Khalili et al., 2022). بر اساس داده‌های هواشناسی، میانگین دمای سالانه استان ۱۱/۳ درجه سلسیوس و بیشینه دمای ثبت‌شده آن ۴۰ درجه سلسیوس است؛ همچنین کمینه دمای ثبت‌شده به ۳۲/۸- درجه سلسیوس می‌رسد. از نظر بارشی، بخش‌های مختلف استان ناهمگونی قابل توجهی دارند؛ به گونه‌ای که نواحی جنوبی، به‌ویژه تویسرکان و نهاوند، بیشترین بارش و نواحی شمالی، به‌ویژه محدوده کبودرآهنگ و قهاوند، کمترین بارش را دریافت می‌کنند. میانگین بارش سالانه استان همدان نیز ۳۱۷/۷ میلی‌متر گزارش شده است.

¹ Multiple Linear Regression



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان همدان و تقسیمات شهرستان‌های آن
Fig 1. Geographical location of Hamedan province and its counties

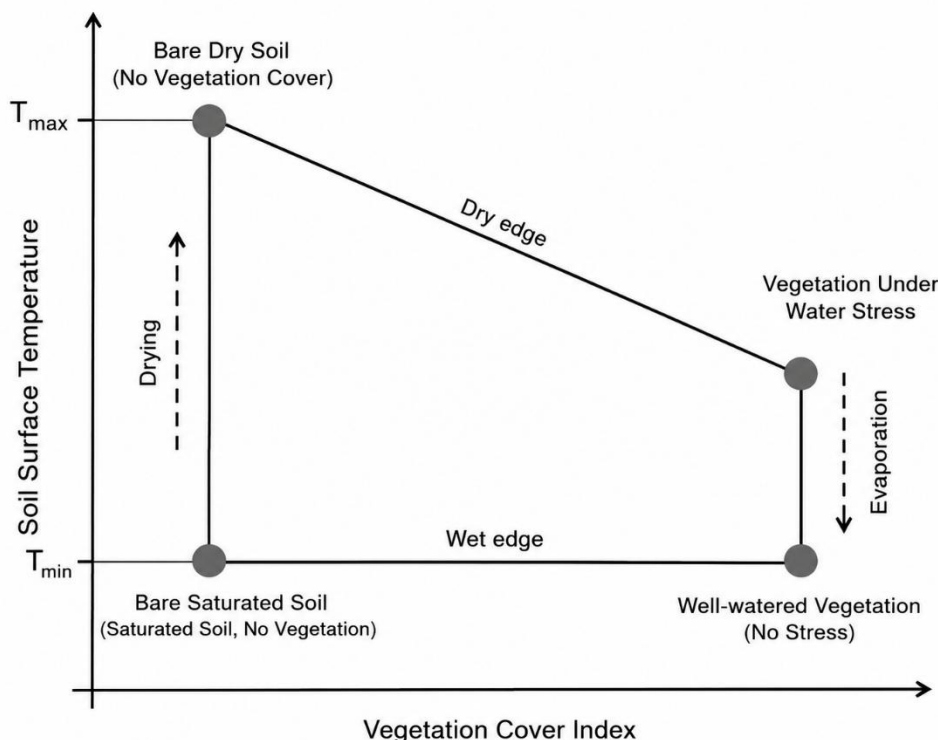
داده‌های سنجش از دور

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS مستقر بر روی ماهواره Terra استفاده شده است. این تصاویر محصولات ترکیبی ۸ روزه دمای سطح زمین و ۱۶ روزه شاخص‌های پوشش گیاهی تحت نام‌های MOD11A2 و MOD13A2 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر می‌باشند. تصاویر مذکور برای دوره ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ استخراج شدند. لازم به یادآوری است از آنجا که باید مقیاس زمانی داده‌های مورد استفاده با هم تطابق داشته باشد مقادیر ۸ روزه دمای سطح زمین با عملیات میانگین‌گیری به مقادیر ۱۶ روزه تبدیل و سپس با تغییر پروجکشن تصاویر از Sinusoidal به پروجکشن UTM محاسبات مربوط به شاخص‌های خشکی انجام شد. بعد از این مقادیر فصلی شاخص از طریق مقادیر ۱۶ روزه به دست آمد. کلیه محاسبات در محیط Google Earth Engine انجام شده است.

محاسبه شاخص TVDI

محققان دریافته‌اند که چنانچه پوشش گیاهی در منطقه، از خاک فاقد پوشش تا خاک دارای پوشش گیاهی کامل تغییر کند، از طرفی رطوبت خاک نیز از شرایط خشک تا کاملاً مرطوب در منطقه وجود داشته باشد، داده‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در نموداری نقطه‌ای که مقابل هم رسم شده‌اند شکلی مثلثی یا دوزنقه‌ای پیدا می‌کنند (شکل ۲) (Price, 1990; Carlson et al., 1990; Moran et al., 1994). این شاخص رابطه بین دمای سطح زمین، پوشش گیاهی و

رطوبت خاک را به نحوی مطلوب مدل می‌کند (Sandholt et al., 2002). این حالت در صورتی رخ می‌دهد که بازه‌ای وسیع از پوشش‌های گیاهی و مناطق با رطوبت سطحی مختلف در تصویر باشد (Price, 1990).



شکل ۲. نمودار شماتیک شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در مقابل دمای سطح زمین (LST)

Fig 2. Schematic diagram of vegetation cover index (NDVI) versus land surface temperature (LST)

پس از تشکیل فضای مثلثی می‌توان با استفاده از رابطه ۱ به TVDI برای هر نقطه دست یافت که مقداری بین صفر تا یک به خود می‌گیرد:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (1)$$

که در آن LST دمای سطح پیکسل مورد نظر، LST_{max} بیشینه دمای NDVI در پیکسل مربوطه، LST_{min} دمای حداقل مربوط به آن NDVI می‌باشد. بیشترین و کمترین مقادیر این شاخص به ترتیب در مناطق کم آب (برابر با یک) و مناطق با بیشترین تبخیر و تعرق و بدون محدودیت آب (برابر با صفر) وجود خواهد داشت. در نتیجه رابطه منفی بین این شاخص و رطوبت خاک وجود دارد. مقادیر بیشینه و کمینه دمای سطح زمین برای هر NDVI معلوم را می‌توان از برازش خطی رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه نمود:

$$LST_{max} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

$$LST_{min} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (3)$$

که در این روابط، a_1 و b_1 به ترتیب عرض از مبدأ خطوط برازش یافته بر مقادیر بیشینه و کمینه دمای سطح؛ و a_2 و b_2 نیز به ترتیب شیب خطوط برازش یافته بر این مقادیر (مقادیر بیشینه و کمینه دمای سطح) به منظور ایجاد اضلاع خشک و تر می‌باشند.

محاسبه روند TVDI

تحلیل نوع و شدت روند سری‌های زمانی به منظور بررسی رفتار متغیرها امری ضروری است که در این مطالعه از روش من - کندال (Mann, 1945; Kendall, 1975) برای تعیین نوع روند و روش سن (Sen, 1968) برای تعیین شدت روند استفاده شد. در سری‌های زمانی شدت یک متغیر در زمان خاص بستگی به شدت آن متغیر در زمان بعد و یا زمان‌های قبل از خود دارد که اصطلاحاً خودهمبستگی نامیده می‌شود که این امر احتمال تشخیص روند معنادار را در سری زمانی افزایش می‌دهد (Karmeshu, 2012). بنابراین پیش از تحلیل روند، اثر خودهمبستگی توسط آزمون pre-whitening حذف می‌شود (Von Storch and Navarra, 1999). روش من - کندال دارای این مزیت است که برای داده‌های حدی قوی بوده (Hirsch et al., 1993)، به توزیع احتمالاتی خاصی نیاز نداشته و همچنین داده‌های مفقود نیز بر آن تاثیری ندارند. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک نشانگر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. در این روش ابتدا اختلاف بین تک تک مشاهدات با یکدیگر محاسبه شده (رابطه ۴) و تابع علامت (sgn) بر آن اعمال (رابطه ۵) و پارامتر S به شرح زیر استخراج می‌گردد:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

که n تعداد مشاهدات سری، x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری می‌باشد. در مرحله بعد تابع علامت به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn}(n) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

سپس با استفاده از رابطه ۶ واریانس محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \begin{cases} \frac{n - (n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t-5)}{18} & \text{if } n > 10 \\ \frac{n - (n-1)(2n+5)}{18} & \text{if } n < 10 \end{cases} \quad (6)$$

که n تعداد داده‌های مشاهده‌ای، m معرف تعداد سری‌های دارای داده تکراری و t فراوانی داده‌های با ارزش یکسان می‌باشد. در نهایت آماره Z بر اساس پارامتر S به کمک یکی از معادلات زیر (رابطه ۷) به دست می‌آید:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

در یک آزمون دو دامنه برای روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه ۸ برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad (8)$$

که α سطح معناداری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری α می‌باشد. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد به منظور بررسی بزرگی و شدت روند در سری‌های زمانی شاخص TVDI از آزمون تخمین گر شیب Sen استفاده شد که اساس آن محاسبه شیب میانه سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد حقیقی بودن این شیب در سطوح معناداری مختلف است. برای محاسبه این متغیر آماری در مرحله اول شیب بین هر جفت داده سری زمانی با کمک رابطه ۹ به دست آمد:

$$Q = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad \text{for } 1, \dots, N' \quad (9)$$

که N' برابر با تعداد جفت داده‌ها بوده و با رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (n تعداد داده‌های سری زمانی):

$$N' = \frac{n(n-1)}{2} \quad (10)$$

سپس سری شیب‌های به دست آمده از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین مرتب شده و میانه (Q_{med}) یا همان شیب خط روند با توجه به فرد یا زوج بودن N' محاسبه می‌شود (Sen, 1968; Hejam et al., 2008; Gocic and Trajkovic, 2013).

تهیه و آماده‌سازی داده‌های شاخص‌های دورپیوندی

الگوهای دورپیوندی بزرگ‌مقیاس در واقع تغییرات دما یا فشار در سطوح مختلف ارتفاعی در بین پهنه‌های آبی یا بین پهنه‌های آبی-خشکی هستند که موجب تغییرات الگوهای دمایی و یا فشاری در مناطق دیگر جهان می‌گردند (Helali et al., 2020). در این مطالعه از شاخص‌های نوسانات آتلانتیک شمالی^۱ (NAO)، نوسانات چنددهه‌ای آتلانتیک^۲ (AMO)، دمای سطح دریای مقیاس جهانی^۳ (GLOBAL SST)، شاخص چندمتغیره انسو^۴ (MEI)، دمای سطح اقیانوس آرام حاره‌ای^۵ (NINO3)، دمای سطح اقیانوس آرام مرکزی^۶ (NINO4)، بیشینه دمای سطح اقیانوس آرام شرقی^۷ (NINO1.2)، دمای سطح اقیانوس آرام شرقی^۸ (NINO3.4)، شاخص نینو اقیانوسی^۹ (ONI)، شاخص دهه‌ای اقیانوس آرام^{۱۰} (PDO)، شاخص نوسان جنوبی^{۱۱} (SOI)، لکه‌های خورشیدی (SUNSPOT) و شاخص انتقالی نینو^{۱۲} (TNI) استفاده شد که از فرکانس‌های مختلفی برخوردار هستند. عمده شاخص‌ها از پایگاه داده NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL) استخراج شدند، در حالی که داده‌های شاخص ONI NOAA Climate Prediction Center (CPC) و داده‌های SunSpot Number از پایگاه SILSO دریافت گردیدند. از آنجا که شاخص‌های دورپیوندی به صورت ماهانه منتشر می‌شوند، ابتدا داده‌های ماهانه هر شاخص برای دوره زمانی متناظر با داده‌های TVDI دریافت شد. سپس، به منظور همگام‌سازی با مقیاس زمانی TVDI، میانگین سه‌ماهه داده‌های هر شاخص برای چهار فصل سال (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) محاسبه و سری زمانی فصلی هر شاخص تهیه گردید.

¹ North Atlantic Oscillation

² Atlantic Multidecadal Oscillation

³ Global Sea Surface Temperature

⁴ Multi ENSO Index

⁵ Tropical Pacific SST

⁶ Central Tropical Pacific SST

⁷ Extreme Eastern Tropical Pacific SST

⁸ East Central Tropical Pacific SST

⁹ Oceanic Nino Index

¹⁰ Pacific Decadal Oscillation

¹¹ Southern Oscillation Index

¹² Trans Niño Index

به منظور بررسی اثرات تأخیری شاخص‌های دورپیوندی بر تغییرات TVDI، برای هر شاخص تأخیرهای زمانی صفر تا ۱۲ فصل ایجاد شد. در نتیجه، برای هر یک از ۱۳ شاخص دورپیوندی، ۱۳ متغیر مستقل تولید شد.

محاسبه همبستگی شاخص‌های دورپیوندی و TVDI به منظور شناسایی ارتباط اولیه بین متغیرها، همبستگی TVDI فصلی در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۳ با تمامی شاخص‌های دورپیوندی در تمامی تأخیرهای زمانی ۰ تا ۱۲ فصلی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون از رابطه ۱۱ محاسبه شد:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (11)$$

که در آن x_i و y_i متغیرهای مستقل شاخص‌های پیوند از دور و وابسته شاخص TVDI، و $\bar{x}$ و $\bar{y}$ مقادیر متوسط متغیرهای وابسته و مستقل است. این رابطه از طریق ماتریس همبستگی زیر (رابطه ۱۲) به دست آمد:

$$R_{i,j} = \begin{bmatrix} R_{0,1} & R_{0,2} & R_{0,3} & \cdot & R_{0,13} \\ R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} & \cdot & R_{1,13} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & R_{3,13} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{24,1} & R_{24,2} & R_{24,3} & \cdot & R_{24,13} \end{bmatrix} \quad (12)$$

مدل‌سازی با شاخص‌های دورپیوندی

شاخص‌های دور پیوندی و تأخیرهای زمانی دارای همبستگی آماری معنی‌دار ($P < 0.05$) انتخاب شدند و بر اساس مقدار مطلق ضریب همبستگی متغیرهای دارای بیشترین همبستگی با TVDI به عنوان متغیرهای کاندید برای مدل‌سازی در نظر گرفته شدند. در ادامه، برای هر شهرستان استان همدان متغیرهای منتخب وارد مدل رگرسیون چندگانه خطی گام‌به‌گام^۱ شدند. در این روش، متغیرها به صورت مرحله‌ای وارد مدل شدند و در هر مرحله، متغیری که بیشترین افزایش را در ضریب تعیین (R^2) ایجاد می‌کرد، به مدل افزوده شد. همچنین، متغیرهایی که پس از ورود سایر متغیرها فاقد معنی‌داری آماری شدند، از مدل حذف گردیدند. این روند تا رسیدن به بهترین ترکیب از متغیرهای مستقل ادامه یافت. در نهایت، مدل نهایی رگرسیون چندگانه خطی برای برآورد شاخص TVDI بر اساس شاخص‌های دورپیوندی منتخب استخراج شد. عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE^2) (رابطه ۱۳) ارزیابی شد و مدلی که از بیشترین ضریب تبیین، کمترین میزان خطا و بیشترین مقدار ضریب کارایی نش-ساتکلیف برخوردار بود، به عنوان مدل نهایی برآورد TVDI انتخاب شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (13)$$

Q_i مقادیر مشاهده شده، P_i مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و $\bar{Q}$ میانگین مشاهدات است.

نتایج و بحث

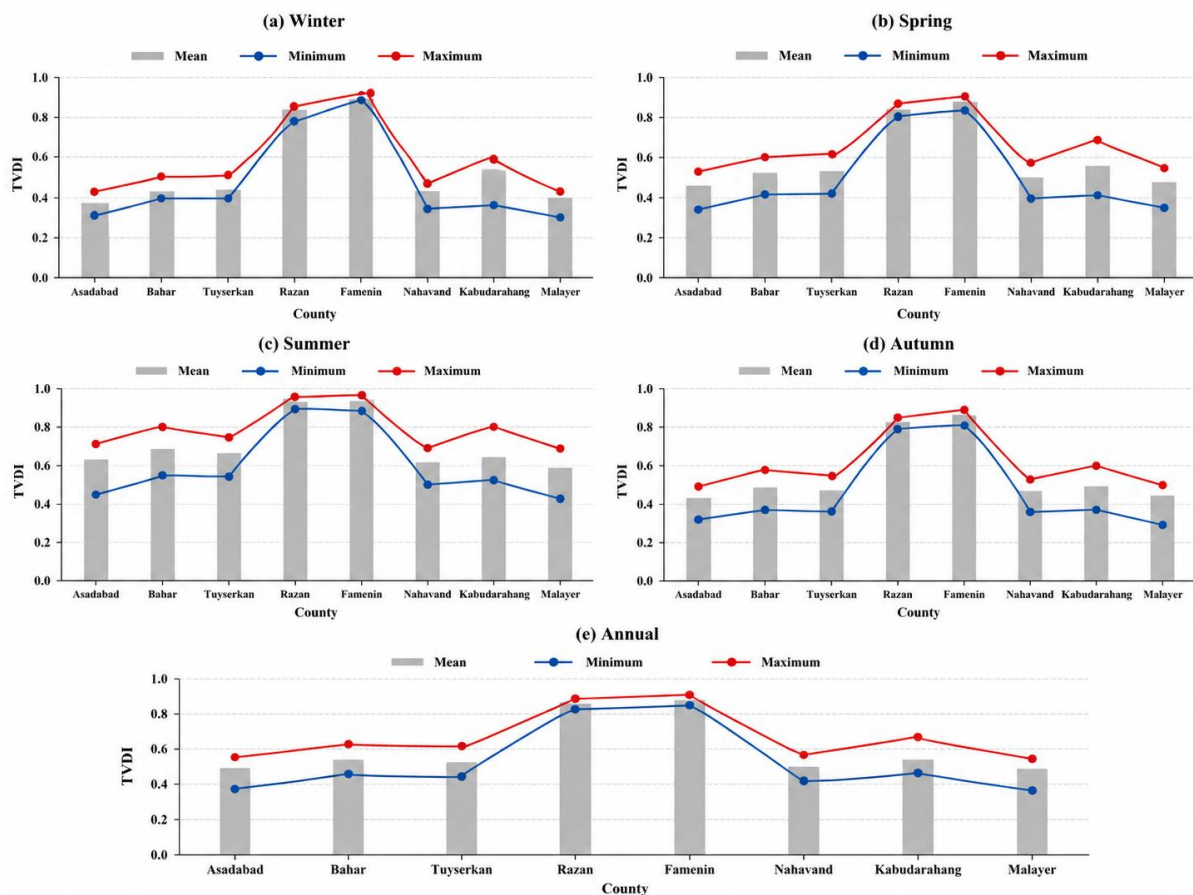
مقادیر TVDI فصلی و سالانه

در فصل زمستان، بیشترین میانگین TVDI در شهرستان‌های فامنین (۰/۸۹) و رزن (۰/۸۲) مشاهده شد که بیانگر شرایط خشک‌تر این مناطق نسبت به سایر شهرستان‌ها است. در مقابل، اسدآباد با میانگین ۰/۳۸ کمترین مقدار را به خود اختصاص داد. در فصل بهار نیز روند مشابهی مشاهده شد، به طوری که فامنین (۰/۸۶) و رزن (۰/۸۴) بالاترین میانگین‌ها را داشتند، در

¹ Forward Stepwise Multiple Linear Regression

² Nash-Sutcliffe Efficiency

حالی که اسدآباد با میانگین $0/43$ کمترین مقدار را نشان داد. در فصل تابستان، مقادیر میانگین TVDI در تمامی شهرستان‌ها افزایش یافت که نشان‌دهنده تشدید شرایط خشکسالی در این فصل است. بیشترین میانگین در شهرستان‌های رزن و فامنین ($0/90$) بود، در حالی که اسدآباد با میانگین $0/63$ همچنان کمترین مقدار را دارا بود. در فصل پاییز نیز بیشترین میانگین شاخص به شهرستان‌های فامنین ($0/84$) و رزن ($0/82$) تعلق داشت و کمترین مقدار در اسدآباد ($0/42$) مشاهده شد. بررسی میانگین سالانه TVDI نشان داد که شهرستان فامنین با مقدار $0/87$ بیشترین و پس از آن شهرستان رزن با مقدار $0/84$ بالاترین میانگین شاخص خشکسالی را دارند. در مقابل، اسدآباد و ملایر با میانگین سالانه $0/49$ کمترین مقادیر شاخص را داشتند (شکل ۳).



شکل ۳. تغییرات فصلی و سالانه میانگین TVDI به تفکیک شهرستان‌های استان همدان
Fig 3. Seasonal and annual changes in the average TVDI in the counties of Hamedan province

نتایج نشان داد که الگوی مکانی خشکسالی کشاورزی در استان همدان طی سال از پایداری نسبی برخوردار بوده و شهرستان‌های فامنین و رزن در تمامی فصول بیشترین مقادیر TVDI را تجربه کرده‌اند، در حالی که اسدآباد و تا حدودی ملایر شرایط مرطوب‌تری داشته‌اند. همچنین افزایش مقادیر TVDI در فصل تابستان بیانگر تشدید تنش رطوبتی خاک در اثر افزایش دما و تبخیر و تعرق است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه شدت خشکسالی تحت تأثیر تغییرات فصلی تغییر می‌کند، اما توزیع مکانی آن عمدتاً تابع ویژگی‌های نسبتاً ثابت محیطی مانند اقلیم، توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی است. نتایج این پژوهش با مطالعه لی و همکاران (Li et al., 2022a) همخوانی دارد که با استفاده از TVDI در استان سیچوان چین نشان دادند الگوی فضایی خشکسالی در طول سال نسبتاً پایدار است، در حالی که شدت آن در فصل گرم افزایش می‌یابد. همچنین یوان و همکاران (Yuan et al., 2023) گزارش کردند که TVDI قادر است تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی را با دقت مناسبی آشکار کند و اگرچه شدت خشکسالی در فصول مختلف تغییر می‌کند، مناطق دارای مقادیر بالای TVDI معمولاً در طول دوره مطالعه جایگاه خود را حفظ می‌کنند؛ یافته‌ای که با پایداری الگوی خشکی در شهرستان‌های فامنین و رزن مطابقت دارد. افزون بر این، گیو و

همکاران (Guo et al., 2023) نشان دادند که افزایش دمای سطح زمین در فصل گرم موجب افزایش مقادیر TVDI و تشدید خشکسالی می‌شود و عوامل اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی مکانی خشکسالی دارند. این نتایج نیز با افزایش چشمگیر TVDI در تابستان و تفاوت پایدار شدت خشکسالی بین شهرستان‌های استان همدان در پژوهش حاضر سازگار است.

روند TVDI

نتایج بررسی روند TVDI (جدول ۱)، نشان داد که روند تغییرات این شاخص در فصل زمستان در اکثر ایستگاه‌ها (به استثنای کبودرآهنگ و نهاوند) با شیب بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۵ در سال افزایشی معنادار بود. در فصل بهار نیز مشابه فصل زمستان عمدتاً شیب معنادار شاخص TVDI در اکثر ایستگاه‌ها دیده شد (به استثنای کبودرآهنگ و نهاوند) که شیب آن بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۵ در سال تغییر کرده است که به معنی افزایش شاخص TVDI و خشک‌تر شدن منطقه بود. وضعیتی مشابه با فصول زمستان و بهار در فصل تابستان دیده شد به طوری که روند افزایشی شاخص TVDI در همه شهرستان‌ها (به جز نهاوند) در سطح ۹۵ تا ۹۹/۹ درصد معنادار و مقدار شیب آن بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۳ در سال بود. در فصل پاییز روند شاخص TVDI در هیچ‌کدام از شهرستان‌های استان همدان معنادار نبوده و شیب آن مقدار ثابت ۰/۰۰۲ در سال بود. همچنین روند سالانه، در تمام شهرستان‌ها معنی‌دار و شیب آن بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ در سال متغیر بود.

جدول ۱. مقادیر ضرایب من-کندال و شیب سن شاخص TVDI فصلی و سالانه در شهرستان‌های استان همدان در دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۳
Table 1. Mann-Kendall coefficients and Sen's slope of the seasonal and annual TVDI in the cities of Hamedan province in the period 2003-2023

شهرستان county	تابستان summer		بهار spring		زمستان winter		
	شیب سن Sen's slope	من-کندال Mann-Kendall	شیب سن Sen's slope	من-کندال Mann-Kendall	شیب سن Sen's slope	من-کندال Mann-Kendall	
	Z	معناداری Sig.	Z	معناداری Sig.	Z	معناداری Sig.	
Asad Abad	0.001	*	2.24	0.004	*	2.26	
Bahar	0.001	**	2.76	0.005	*	2.02	
Dargazin	0.002	**	2.95	0.005	*	2.31	
Famenin	0.003	***	3.31	0.005	*	2.50	
Hamedan	0.001	**	3.02	0.004	*	2.42	
Kaboodarahang	0.002	**	3.25	0.005	ns	1.84	
Malayer	0.001	*	2.34	0.004	*	2.03	
Nahavand	0.001	ns	1.82	0.003	ns	1.82	
Razan	0.002	**	2.99	0.005	*	2.01	
Tuyserkan	0.001	*	1.98	0.003	*	2.11	

شهرستان county	پاییز Autumn		سالانه Annual		
	من-کندال Mann-Kendall	شیب سن Sen's slope	من-کندال Mann-Kendall	شیب سن Sen's slope	
	Z	معناداری Sig.	Z	معناداری Sig.	
Asad Abad	1.46	ns	3.18	**	0.003
Bahar	1.04	ns	3.02	**	0.003
Dargazin	0.88	ns	3.41	***	0.003

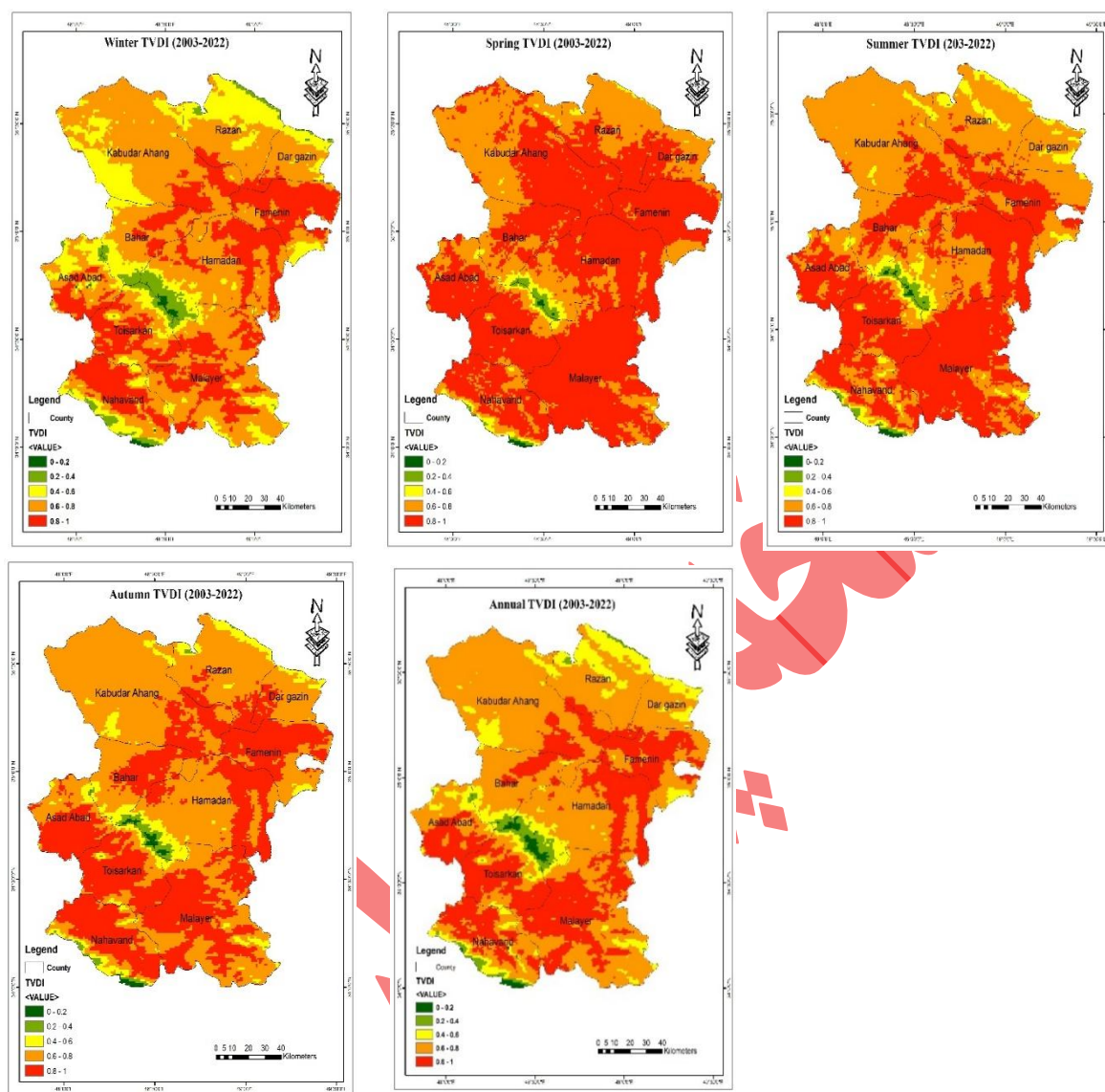
ns، *، ** و *** به ترتیب
غیر معنی، معنادار در سطوح ۹۵، ۹۹ و ۹۹/۹ درصد می‌باشد.

ns, *, ** and *** are non-significant, significant at 95, 99 and 99.9%, respectively	0.003	***	3.44	0.002	ns	1.34	Famenin
	0.002	**	2.69	0.002	ns	1.30	Hamedan
	0.003	**	2.89	0.002	ns	1.01	Kaboodarahang
	0.002	**	2.88	0.002	ns	1.07	Malayer
	0.002	*	2.50	0.002	ns	1.40	Nahavand
	0.003	**	2.87	0.002	ns	0.94	Razan

نتایج بررسی روند، بیانگر وجود روند افزایشی معنادار TVDI در اکثر فصول و سالانه (به استثناء فصل پاییز) بود که به مفهوم افزایش معنادار خشکسالی فصلی و سالانه در شهرستان‌های استان همدان در دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۳ بود. نتایج مذکور با نتایج به دست آمده صلاحی و وطن پرست (Salahi and Vatanparast Galeh Juq, 2024) در محدود حوضه آبریز رودخانه ارس هم راستا است. این مطالعه نشان داده است در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۱۲ خشکسالی در حال افزایش بوده و مساحت مناطقی که در کلاس خشکسالی قرار دارند در شمال غرب کشور افزایش یافته است. اگر چه با نتایج تحقیقات شاملو و همکاران (Shamloo et al., 2022) در حوضه دریاچه ارومیه اختلاف دارد. این مطالعه نشان داده است شدت خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه بر مبنای شاخص TVDI در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ کاهش داشته است. این اختلاف نشان می دهد با توجه به تنوع بالای شرایط محیطی و مدیریتی کشور، بررسی خشکسالی ها باید بر اساس حوزه‌های آبخیز انجام شود.

پهنه بندی مقادیر شاخص TVDI

تحلیل نتایج پراکنش جغرافیایی و پهنه‌بندی شاخص TVDI فصلی در پهنه استان همدان به تفکیک شهرستان در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان داد در فصل زمستان بخش عمده‌ای از استان همدان در طبقه خشکسالی متوسط (رنگ قهوه‌ای) و شدید (رنگ قرمز) قرار داشتند، ولی در بخش‌های جنوبی نهاوند، بخش‌های گسترده شهرستان تویسرکان، اسدآباد، غرب کبودرآهنگ و شمال رزن طبقات نرمال و ترسالی جزئی دیده شد. در فصل بهار عمده طبقات خشکسالی به گروه خشکسالی شدید و متوسط تبدیل شده و بخش محدودی از مرکز استان همدان و حاشیه جنوبی نهاوند (بخش‌های کوهستانی) در طبقه خشکسالی جزئی و ترسالی جزئی (رنگ زرد و سبز کم‌رنگ) قرار داشت. در فصل تابستان نیز تا حدودی از پراکنش طبقه خشکسالی شدید در استان همدان کاهش یافته و جزو طبقه خشکسالی متوسط قرار گرفته است (عمدتاً بخش شمالی استان در شهرستان‌های کبودرآهنگ، رزن، درگزین و فامنین). در فصل پاییز وضعیت غالب شاخص TVDI متعلق به طبقه خشکسالی متوسط بود و تنها بخش جنوبی شهرستان نهاوند و مرکزی استان همدان در طبقات ترسالی جزئی و خشکسالی خفیف قرار داشت. تحلیل نتایج در مقیاس سالانه بیانگر وضعیت غالب خشکسالی شدید در عمده بخش‌های شهرستان ملایر، تویسرکان، فامنین، و اسدآباد، خشکسالی متوسط در بخش‌های عمده کبودرآهنگ، رزن، درگزین، همدان، و خشکسالی جزئی در بخش‌های مرکزی استان، جنوب نهاوند و شمال استان در محدوده رزن و درگزین بود. وضعیت ترسالی جزئی و ترسالی تنها محدود به محدوده مرکزی استان در پیرامون رشته کوه‌های الوند و بخش جنوبی شهرستان نهاوند در محدوده شمالی رشته کوه‌های گرین بود.



شکل ۴. پراکنش مکانی- زمانی فصلی و سالانه TVDI در شهرستانهای استان همدان در دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۲
Fig 4. Seasonal and annual spatial - temporal distribution of the TVDI in Hamadan province's counties (2003-2023)

تحلیل تغییرات مکانی- زمانی شاخص TVDI نشان داد بیشترین سطح استان همدان در طبقات خشکسالی متوسط و شدید قرار داشته و فقط محدود جزئی آن در طبقه خشکسالی‌های جزئی و ترسالی قرار گرفته است. این الگوی مکانی بیانگر غلبه تنش رطوبتی در سطح استان و تشدید شرایط خشکسالی در سال‌های اخیر است. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعه سندالت و همکاران (Sandholt et al., 2002)، به‌عنوان ارائه‌دهندگان شاخص TVDI، همخوانی دارد؛ آنان نشان دادند که افزایش مقادیر TVDI بیانگر کاهش رطوبت خاک و تشدید تنش آبی بوده و این شاخص توانایی بالایی در آشکارسازی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی دارد. همچنین بررسی خشکسالی در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۰ با استفاده از شاخص سنجش از دوری TVMPDI که مشابه TVDI بر مبنای اطلاعات دمای سطح زمین، پوشش گیاهی و رطوبت است، نشان داده است که بسیاری از نواحی مرکزی و غربی کشور در معرض خشکسالی شدید قرار دارند (Mehravari et al., 2021).

همبستگی شاخص TVDI فصلی با الگوهای دورپیوندی

نتایج همبستگی نشان داد که از میان ۱۳ الگوی دورپیوندی بررسی شده، تنها AMO، GLOBALSST، NAO و PDO دارای ارتباط معنی‌دار با TVDI بودند، در حالی که الگوهای مرتبط با سامانه ENSO شامل MEI2، NINO1+2، NINO3، NINO3.4، NINO4، ONI، SOI، و همچنین SUNSPOT در هیچ‌یک از وقفه‌های زمانی بررسی شده همبستگی معنی‌داری با TVDI نشان ندادند. (جدول ۲).

جدول ۲. ضریب همبستگی الگوهای دورپیوندی AMO، GLOBALSST، PDO و NAO با شاخص TVDI در شهرستانهای استان همدان (زرد: همبستگی معنادار $P < 0.05$)

Table 2. Correlation coefficient of AMO, GLOBALSST, PDO and NAO long-distance models with TVDI in the counties of Hamedan province (yellow: significant correlation $P < 0.05$)

تاخیر زمانی Lag Time	اسدآباد Asad Abad				بهار Bahar				درگزین Dargazin				ملایر Malayer				نهایند Nahavand			
	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO
	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO
0	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3
1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1
2	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3
3	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1
4	0.4	-0.2	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.4	-0.2	-0.1	-0.2
5	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1
6	-0.4	0.3	0.1	0.3	-0.4	0.3	0.1	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3
7	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1
8	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.2	-0.1	-0.2	0.4	-0.2	-0.1	-0.2
9	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.3	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1
10	-0.3	0.3	0.1	0.3	-0.3	0.3	0.1	0.2	-0.3	0.3	0.1	0.2	-0.4	0.3	0.1	0.2	-0.3	0.3	0.1	0.3
11	0.2	0.1	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.1
12	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2
تاخیر زمانی Lag Time	فامنین Famenin				همدان Hamedan				کبودرآهنگ Kaboodarahang				رزن Razan				تویسرکان Tuyserkan			
	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO
	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO	AMO	GLOBALSST	PDO	NAO
0	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.1	-0.3
1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1
2	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.3	0.0	0.3
3	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1
4	0.3	-0.2	0.0	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.4	-0.2	-0.1	-0.2
5	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.2	0.1
6	-0.4	0.3	0.0	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.3
7	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1
8	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.2	-0.1	-0.2
9	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1
10	-0.3	0.3	0.1	0.2	-0.3	0.3	0.1	0.2	-0.3	0.3	0.1	0.2	-0.3	0.3	0.1	0.2	-0.3	0.3	0.1	0.2
11	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.1
12	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	-0.2

این نتایج بیانگر آن است که تغییرات خشکسالی کشاورزی در استان همدان بیش از آنکه تحت تأثیر نوسانات حاره اقیانوس آرام باشد، از تغییرات دمای سطح اقیانوس اطلس و الگوهای گردش جوی نیمکره شمالی تأثیر می‌پذیرد. مطالعات انجام‌شده در ایران

و منطقه خاورمیانه نیز نشان داده‌اند که AMO، NAO و PDO از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تغییرپذیری بارش، دما و وقوع خشکسالی در این منطقه هستند، در حالی که اثر ENSO در بسیاری از مناطق ایران ضعیف، غیرمستقیم یا وابسته به شرایط زمانی و مکانی است (Rezaei, 2021; Aghelpour et al., 2023; Rezaei, 2023).

همچنین نتایج نشان داد که AMO در مقایسه با سایر الگوهای دورپیوندی، در بیشترین تعداد وقفه‌های زمانی (۰ تا ۱۲ فصل) با TVDI همبستگی معنی‌دار داشت، در حالی که GLOBAL SST، NAO و PDO تنها در چند وقفه زمانی خاص دارای همبستگی معنی‌دار بودند. این موضوع بیانگر آن است که نوسانات چنددهه‌ای دمای سطح آب اقیانوس اطلس، اثری ماندگار و بلندمدت و تدریجی بر شرایط اقلیمی استان همدان دارد. برخلاف برخی شاخص‌های دورپیوندی که تأثیر آنها به چند ماه خاص محدود می‌شود، AMO به دلیل ماهیت کم‌فرکانس و پایداری زمانی خود، می‌تواند از طریق تغییر در الگوهای گردش عمومی جو، بارش، دما و رطوبت خاک، به‌طور مستمر بر شدت خشکسالی کشاورزی اثر بگذارد و از آنجا که TVDI شاخصی مبتنی بر دمای سطح زمین و پوشش گیاهی است، این تغییرات در TVDI نیز منعکس می‌شوند. لذا می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب برای مدل‌سازی و پیش‌بینی TVDI در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. این نتیجه با یافته‌های سعادت مقدسی (Saadatmoghadasi, 2026) همخوانی دارد که AMO را یکی از شاخص‌های پیش‌آگاهی بارش و خشکسالی فصلی توصیه کرد.

از سوی دیگر، تغییر علامت ضرایب همبستگی از مثبت به منفی و بالعکس در وقفه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که اثر الگوهای دورپیوندی بر خشکسالی کشاورزی خطی و ثابت نیست، بلکه وابسته به زمان و متأثر از برهم‌کنش سامانه اقیانوس-جو است. این تغییر جهت می‌تواند ناشی از اثرات تأخیری انتقال سیگنال‌های اقلیمی، تغییرات گردش عمومی جو، تفاوت پاسخ فصلی سامانه اقلیم و برهم‌کنش AMO با سایر الگوهای دورپیوندی باشد. در نتیجه، یک فاز از AMO ممکن است در برخی وقفه‌های زمانی موجب افزایش TVDI و تشدید خشکسالی و در وقفه‌های دیگر موجب کاهش TVDI و بهبود نسبی شرایط رطوبتی شود. چنین رفتاری در مطالعات مربوط به دورپیوندهای اقلیمی در ایران (Rezaei, 2021) و خاورمیانه (Rezaei, 2023) نیز گزارش شده و نشان می‌دهد که اثر این الگوها بر متغیرهای هیدرواقلیمی دارای ماهیت غیرخطی، چندمقیاسی و وابسته به وقفه زمانی است. مطالعات انجام شده در مناطق مختلف جهان نشان دهنده تأثیرگذاری الگوهای دورپیوندی دیگر بر خشکسالی است از جمله: اثر شاخص‌های ENSO، NAO، PDO و AMO بر TVDI در چین (Liu et al., 2020)، اثر شاخص‌های PDO و ENSO بر TVDI در چین (Yang and Xing, 2022)، اثر شاخص‌های ENSO، NAO، PDO، PNA و AO بر SPEI در کانادا (Asong et al., 2018)، اثر شاخص‌های ENSO، PDO، AMO، NAO و La Nina بر MSDI¹ در خاورمیانه (Rezaei, 2021; Rezaei et al., 2023).

مدلسازی با MLR

در شهرستان استان همدان، بر اساس داده‌های ۴ فصل و ۲۰ سال در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ با در نظر گرفتن تاخیرهای زمانی ۱۱ فصلی و ۱۲ فصلی به ترتیب ۶۹ و ۶۸ نمونه از کل ۸۰ داده برای مدلسازی استفاده شد. معادلات رگرسیون خطی چندگانه بین الگوی دورپیوندی AMO در تاخیرهای زمانی مختلف (L) و مقادیر فصلی TVDI در شهرستان های استان همدان به شرح ذیل بود (روابط ۱۴ تا ۲۳):

$$TVDI_{Asadabad} = 0.5507 + 0.513(AMO_{L0}) + 0.467(AMO_{L3}) + 0.650(AMO_{L8}) + 0.455(AMO_{L12}) \quad (14)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF^2 < 7$ ، قابل قبول و سطح معنی‌داری معادله (Sig.) برابر ۰/۳۷ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر ۰/۷۸، مقدار RMSE برابر با ۰/۰۹۴ و NSE آن ۰/۸۱ بود.

$$TVDI_{Bahar} = 0.5564 + 0.512(AMOL0) + 0.459(AMOL3) + 0.635(AMOL8) + 0.393(AMOL11) \quad (15)$$

¹ Multivariate Standardized Drought Index

² Variance Inflation Factor

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 8$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/043$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/77$ ، مقدار RMSE برابر با $0/094$ و NSE آن $0/74$ بود.

$$TVDI Dargazin = 0.5231 + 0.520(AMO_{L0}) - 0.407(AMO_{L1}) + 0.498(AMO_{L3}) + 0.661(AMO_{L8}) + 0.385(AMO_{L11}) \quad (16)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 8$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/032$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/78$ ، مقدار RMSE برابر با $0/098$ و NSE آن $0/85$ بود.

$$TVDI Famenin = 0.5743 + 0.492(AMOL0) + 0.441(AMOL3) + 0.624(AMOL8) + 0.437(AMOL12) \quad (17)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 8$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/048$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/78$ ، مقدار RMSE برابر با $0/090$ و NSE آن $0/72$ بود.

$$TVDI Hamedan = 0.5158 + 0.518(AMOL0) + 0.457(AMOL3) + 0.643(AMOL8) + 0.412(AMOL11) \quad (18)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 7$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/045$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/78$ ، مقدار RMSE برابر با $0/093$ و NSE آن $0/76$ بود.

$$TVDI Kaboodarahang = 0.5621 + 0.516(AMOL0) + 0.451(AMOL3) + 0.658(AMOL8) + 0.394(AMOL12) \quad (19)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 8$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/035$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/78$ ، مقدار RMSE برابر با $0/096$ و NSE آن $0/83$ بود.

$$TVDI Malayer = 0.5537 + 0.530(AMOL0) + 0.478(AMOL3) + 0.642(AMOL8) + 0.387(AMOL11) \quad (20)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 8$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/041$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/78$ ، مقدار RMSE برابر با $0/095$ و NSE آن $0/75$ بود.

$$TVDI Nahavand = 0.565 + 0.512(AMOL0) - 0.39(AMOL1) + 0.45(AMOL3) + 0.62(AMOL8) + 0.38(AMOL11) \quad (21)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 9$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/047$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/78$ ، مقدار RMSE برابر با $0/091$ و NSE آن $0/71$ بود.

$$TVDI Razan = 0.541 + 0.515(AMOL0) - 0.48(AMOL1) + 0.48(AMOL3) + 0.69(AMOL8) + 0.34(AMOL12) \quad (22)$$

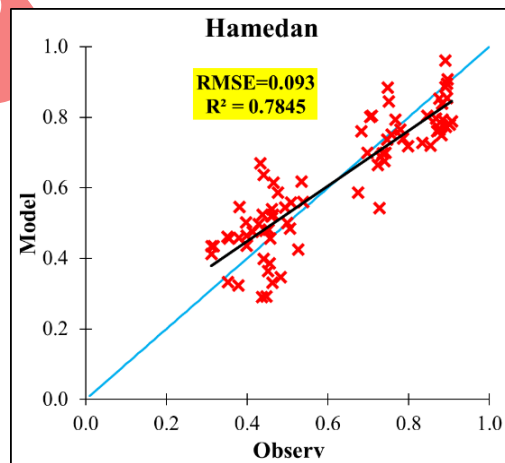
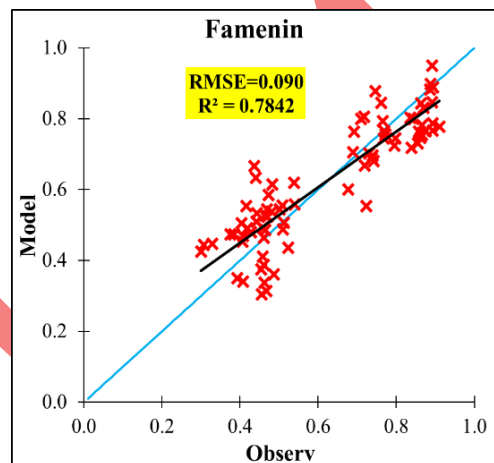
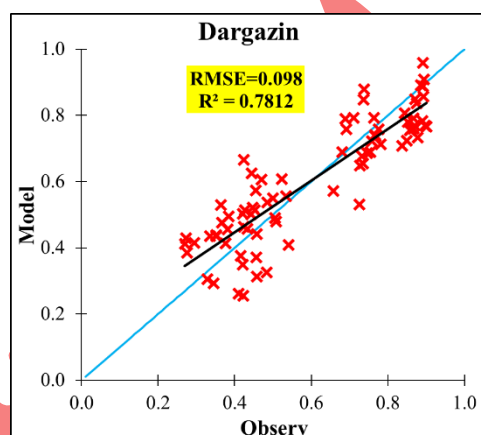
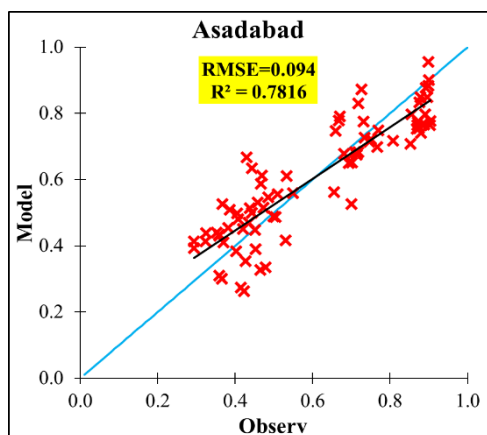
هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 8$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0/038$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر $0/77$ ، مقدار RMSE برابر با $0/098$ و NSE آن $0/81$ بود.

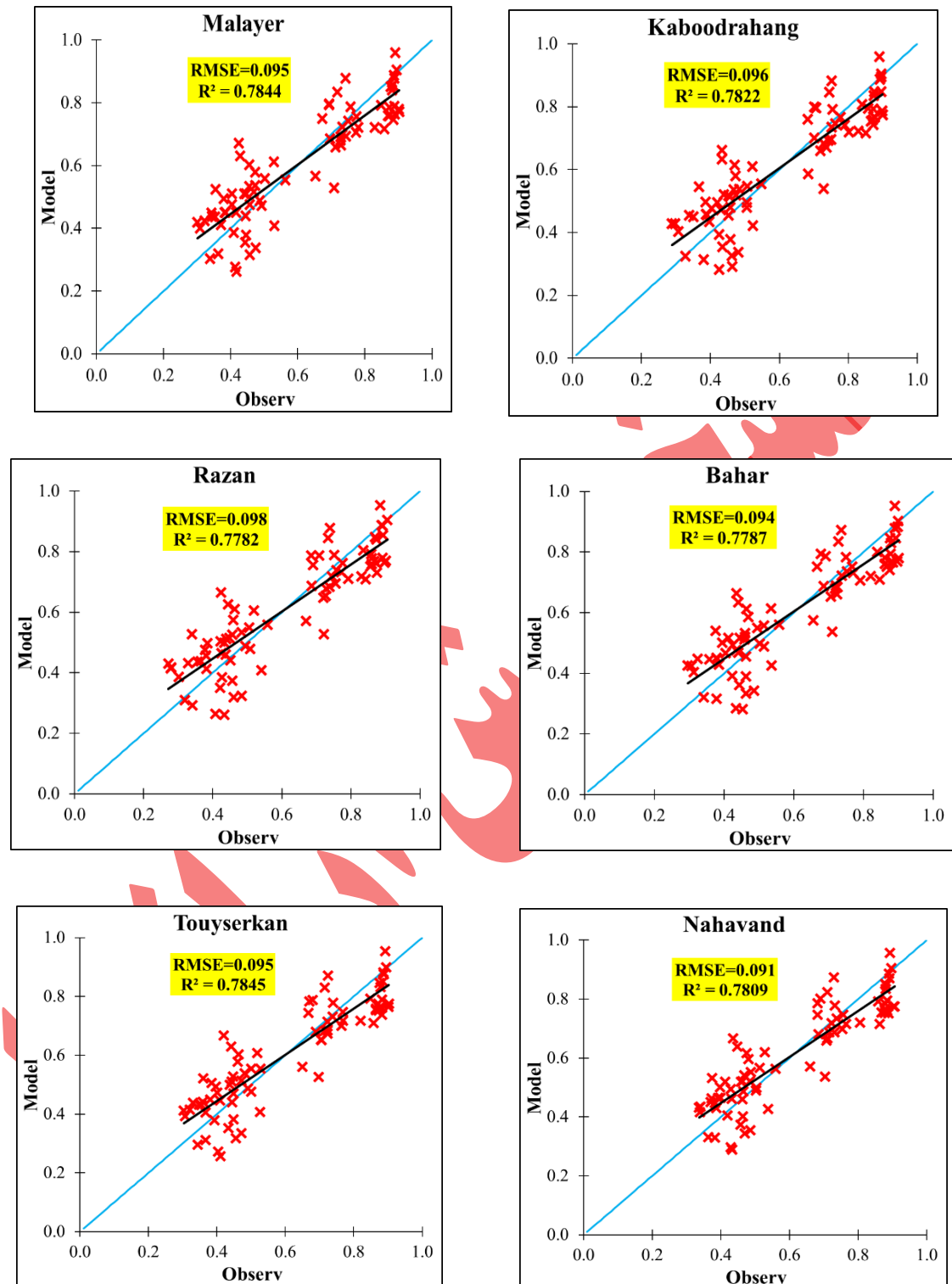
$$TVDI Toyserkan = 0.5487 + 0.517(AMOL0) + 0.479(AMOL3) + 0.640(AMOL8) + 0.401(AMOL11) \quad (23)$$

هم خطی بین مقادیر AMO برای تاخیرهای زمانی با مقادیر $VIF < 7$ ، قابل قبول و سطح معنی داری معادله برابر $0.43/0$ بود. ضریب تعیین (R^2) معادله برابر 0.78 ، مقدار RMSE برابر با 0.095 و NSE آن 0.78 بود.

با توجه به نتایج بررسی همبستگی شاخص‌های دور پیوندی و TVDI، این نکته قابل توجه است که حذف سایر تاخیرهای زمانی در معادلات رگرسیونی به معنای نبود اثر آنها نیست، بلکه نشان داد آن تاخیرها پس از ورود متغیرهای منتخب، سهم معنی‌دار مستقلی در تبیین تغییرات TVDI نداشته‌اند.

همچنین نمودارهای پراکنش مقادیر TVDI مشاهده‌شده و برآوردشده با مدل بر روی خط برابری در تمامی شهرستان‌ها نشان داد که اکثر نقاط در نزدیکی نیمساز قرار گرفته‌اند بیانگر برازش مناسب و واسنجی موفق مدل و انطباق مطلوب بین مقادیر برآوردشده و داده‌های مشاهده‌شده است (شکل ۵).





شکل ۵. نمودار مقادیر TVDI مشاهده شده و مدل شده با MLR نسبت به خط ۱:۱ در شهرستان‌های استان همدان
 Fig 5. Scatter plot of observed versus MLR-predicted TVDI values with the 1:1 line in the counties of Hamedan province

نتایج مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام نشان داد که شاخص دورپیوندی AMO قادر است بخش قابل توجهی از تغییرات فصلی شاخص TVDI را در شهرستان‌های استان همدان تبیین کند؛ به‌طوری‌که R^2 بالا، همراه با مقادیر مناسب NSE و RMSE پایین، بیانگر عملکرد قابل قبول مدل‌ها در برآورد شدت خشکسالی کشاورزی بود. انتخاب تاخیر زمانی صفر، ۱، ۳، ۸،

۱۱ و ۱۲ ماه (توسط الگوریتم رگرسیون گام‌به‌گام نشان داد که اثر AMO بر خشکسالی منطقه، هم به‌صورت همزمان و هم با تأخیرهای چندفصلی ظاهر شده و سایر وقفه‌های زمانی، پس از ورود این متغیرها، سهم مستقلی در افزایش توان تبیین مدل نداشته‌اند. این موضوع بیانگر وجود حافظه اقلیمی در سامانه‌های خشکسالی است؛ به‌گونه‌ای که ناهنجاری‌های دمای سطح آب اقیانوس اطلس می‌توانند با تأثیر بر الگوهای گردش جو، انتقال رطوبت و رژیم بارش، با یک تأخیر زمانی مشخص بر وضعیت رطوبت خاک و در نهایت بر شاخص TVDI اثرگذار باشند. نتایج این پژوهش با مطالعه رضایی (Rezaei, 2021) همخوانی دارد نشان داد در ایران شاخص‌های اقیانوسی، از جمله AMO، دارای ارتباط معنی‌دار با خشکسالی هستند، هرچند شدت اثر آنها در مناطق مختلف کشور متفاوت است. همچنین این پژوهش نشان داد که بخشی از اثر AMO از طریق وقفه‌های زمانی چندماهه منتقل می‌شود. از سوی دیگر، ساهرواردی و همکاران (Saharwardi, 2023) نیز گزارش کردند که تغییرات چنددهه‌ای خشکسالی در شبه‌جزیره عربستان تا حد زیادی تحت تأثیر فازهای مختلف AMO قرار دارد و فاز مثبت این شاخص با تشدید خشکسالی‌های بلندمدت همراه است. یافته‌های آنها نقش مؤثر AMO در کنترل شرایط خشکسالی مناطق خشک و نیمه‌خشک غرب آسیا تایید می‌کند. همچنین نتایج گیو و همکاران (Guo, 2022) نشان دادند که AMO از طریق تغییر شدت بادهای غربی و سامانه‌های موسمی، الگوی بارش و وضعیت ترسالی-خشکسالی را در نواحی خشک آسیای مرکزی و شرق آسیا تغییر می‌دهد. این پژوهش تأکید می‌کند که پاسخ مناطق مختلف به فازهای AMO یکسان نیست و به ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه بستگی دارد. این موضوع می‌تواند اختلاف ضرایب رگرسیونی و تأخیرهای زمانی منتخب بین شهرستان‌های استان همدان را نیز توجیه کند. در مقیاس منطقه‌ای نیز رضایی (Rezaei, 2023) با بررسی کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا نشان داد که ارتباط خشکسالی با شاخص‌های دورپیوندی در بخش شرقی منطقه، از جمله ایران، قوی‌تر از بخش‌های غربی است و AMO یکی از شاخص‌های مؤثر بر تغییرات خشکسالی محسوب می‌شود.

توجه به این نکته ضروری است که نتایج این پژوهش ممکن است تحت تأثیر عدم قطعیت ناشی از تفکیک مکانی تصاویر MODIS، نحوه تعیین خطوط خشک و تر در محاسبه TVDI، فرض خطی بودن مدل رگرسیون و عدم لحاظ برخی متغیرهای اقلیمی و محیطی مؤثر قرار گرفته باشد. با این وجود، متوسط مقادیر RMSE برابر ۰/۰۹۳، R^2 برابر ۰/۷۸ و ضریب کارایی NES برابر ۰/۷۶ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در برآورد TVDI است.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج شاخص TVDI از توانایی مناسبی برای آشکارسازی الگوی فضایی و فصلی خشکسالی کشاورزی در استان همدان برخوردار است. بررسی توزیع مکانی این شاخص بیانگر آن بود که شهرستان‌های فامنین و رزن در اغلب فصول و در مقیاس سالانه بیشترین شدت خشکسالی را تجربه کرده‌اند، در حالی که اسدآباد و تا حدودی ملایر از شرایط رطوبتی مناسب‌تری برخوردار بوده‌اند. همچنین، اگرچه شدت خشکسالی در فصول مختلف، به‌ویژه در تابستان، افزایش یافت، اما الگوی مکانی خشکسالی در سطح استان نسبتاً پایدار باقی ماند که نشان‌دهنده نقش عوامل محیطی نسبتاً ثابت مانند اقلیم، توپوگرافی، ویژگی‌های خاک و کاربری اراضی در شکل‌گیری این الگو است.

مدل‌سازی با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام نشان داد که شاخص‌های دورپیوندی قادرند بخش قابل توجهی از تغییرات TVDI را تبیین کنند. انتخاب تنها برخی از تأخیرهای زمانی توسط الگوریتم گام‌به‌گام نشان‌دهنده آن است که اثر شاخص‌های دورپیوندی بر خشکسالی کشاورزی دارای حافظه زمانی بوده و تمامی تأخیرهای زمانی نقش مستقلی در بهبود مدل ندارند. مقادیر مناسب ضریب تبیین، خطای پایین برآورد و ضرایب کارایی بالای مدل بیانگر قابلیت مطلوب این رویکرد در پیش‌بینی تغییرات خشکسالی کشاورزی در استان همدان است.

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شاخص‌های دورپیوندی در کنار داده‌های سنجش از دور می‌تواند ابزار موثری برای توسعه سامانه‌های پیش‌آگاهی خشکسالی و بهبود مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی باشد. این موضوع به‌ویژه در استان همدان که بخش قابل توجهی از اقتصاد آن به کشاورزی وابسته است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با وجود عملکرد مناسب مدل‌های رگرسیونی، استفاده از تنها یک روش آماری از محدودیت‌های این پژوهش بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، از روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مانند Random Forest, XGBoost, Support Vector

Regression و Long Short-Term Memory (LSTM) برای مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی و شاخص TVDI استفاده شود. همچنین تلفیق داده‌های سنجش از دور با داده‌های زمینی رطوبت خاک، بارش و تبخیر-تعرق می‌تواند موجب افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی و توسعه سامانه‌های عملیاتی پایش و هشدار سریع خشکسالی کشاورزی شود.

منابع

- Aghelpour, P., Bahrami-Pichaghchi, H., Varshavian, V. & Norooz-Valashedi, R. (2023). Evaluating the predictability of eight atmospheric-oceanic signals affecting Iran's droughts, employing intelligence-based and stochastic methods. *Advances in Space Research*, 71(5), 2394-2415. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.047>
- Akhtari, R., Morid, S., Mahdian, M. H., & Smakhtin, V. (2009). Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *International Journal of Climatology*, 29(1), 135-145. <https://doi.org/10.1002/joc.1691>
- Amiri, M.J., Karbasi, A.R., Zoghi, M. & Sadat, M. (2015). Detection of climate change by Mann-Kendall analysis and drought indices (Case study: Agh Gol wetland). *Journal of Environmental Studies*, 41(3), 545-561. <https://doi.org/10.22059/jes.2015.55896>
- Asong, Z.E., Wheeler, H.S., Bonsal, B., Razavi, S. & Kurkute, S. (2018). Historical drought patterns over Canada and their teleconnections with large-scale climate signals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3105-3124. <http://doi.org/10.5194/hess-22-3105-2018>
- Bahrami, M., Bazrkar, S. & Zarei, A.R. (2019). Modelling, prediction and trend assessment of drought in Iran using standardised precipitation index. *Journal of Water and Climate Change*, 10(1), 181-196.
- Bari Abarghouei, H., Asadi Zarch, M.A., Dastorani, M.T., Kousari, M.R. & Safari Zarch, M. (2011). The survey of climatic drought trend in Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 851-863. <http://doi.org/10.1007/s00477-011-0491-7>
- Brown, L. P., Charlery, J., & Voutchkov, M. (2019). Investigating the apparent teleconnection between Cosmic-Ray muon flux over Jamaica and large-scale climate phenomena that impact the Caribbean. *Atmospheric and Climate Sciences*, 9(04), 626. <http://doi.org/10.4236/acs.2019.94039>
- Carlson, T. N., Perry, E. M., & Schmugge, T. J. (1990). Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52(1-2), 45-69. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90113-W](http://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90113-W)
- Emadodin, I., Reinsch, T. & Taube, F. (2019). Drought and desertification in Iran. *Hydrology*, 6(3), 66. <http://doi.org/10.3390/hydrology6030066>
- Gocic, M. & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172-182. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- Guo, S., Guan, X., Gao, L., Sun, W., Cao, C., & He, Y. (2022). Opposite Atlantic Multidecadal Oscillation effects on dry/wet changes over Central and East Asian drylands. *Atmospheric Research*, 271, 106102. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106102>
- Guo, Y., Han, L., Zhang, D., Sun, G., Fan, J., & Ren, X. (2023). The factors affecting the quality of the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the spatial-temporal variations in drought from 2011 to 2020 in regions affected by climate change. *Sustainability*, 15(14), 11350. <https://doi.org/10.3390/su151411350>
- Habibian, A.H., & Mohammadi, B. (2012). The relation of monthly temperature of some sample stations in Iran with different ENSO indices. *Journal of Geographical Space*, 12(38), 1-19. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-858-en.html> [In Persian]
- Hamzeh, S., Farahani, Z., Mahdavi, S., Chatroboun, O., & Gholamnia, M. (2017). Spatio-temporal monitoring of agricultural drought using remotely sensed data (Case study of Markazi province of Iran). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4 (3), 53-70. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2749-fa.html> [In Persian]
- Hejam, S., Khoshkho, Y., & Shamsoldinvandi, R. (2008). Analysis of seasonal and annual rainfall variations of several selected stations in central Iran using nonparametric methods. *Geographical Research Journal* (63), 1000252. https://jphgr.ut.ac.ir/article_26912.html?lang=en
- Helali, J., & Asadi Oskouei, E. (2021). Correlation analysis of large-scale teleconnection indices with monthly reference evapotranspiration of Iran synoptic stations. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(6), 1629-1644. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2021.322853.668951> [In Persian]
- Helali, J., Asadi Oskouei, E., HosseinZadeh, T., Cheraghalizadeh, M., & Kouhi, M. (2022). Analysis of late spring frost, early fall frost, frost-free period and probability of their occurrence based on ENSO index in different climates of Iran. *Journal of Climate Research*, 13(51), 212-199. https://clima.irimo.ir/article_150070.html?lang=en [In Persian]

- Helali, J., Mohammadi Ghaleni, M., Mianabadi, A., Asadi Oskoue, E., Momenzadeh, H., Haddadi, L., & Saboori Noghabi, M. (2024). Enhancing reference evapotranspiration forecasting with teleconnection indices and advanced machine learning techniques. *Applied Water Science*, 14, 219. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02289-x>
- Helali, J., Momenzadeh, H., Oskoue, E.A., Lotfi, M., & Hosseini, S.A. (2021). Trend and ENSO-based analysis of last spring frost and chilling in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1203-1221. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00804-2>
- Helali, J., Nouri, M., Mohammadi Ghaleni, M., Hosseini, S.A., Safarpour, F., Shirdeli, A., Paymard, P., & Kalantari, Z. (2023). Forecasting precipitation based on teleconnections using machine learning approaches across different precipitation regimes. *Environmental Earth Sciences*, 82, 495. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11191-9>
- Helali, J., Pishdad, E., Alidadi, M., Loukzadeh, S., Asadi Oskoue, E., & Norooz Valashedi, R. (2020). Investigating the relationship between climate teleconnection indices and autumnal rainfall in Iranian watersheds. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(8), 1921-1936. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2020.294238.668434> [In Persian]
- Helali, J., Salimi, S., Lotfi, M., Hosseini, S.A., Bayat, A., Ahmadi, M., & Naderizadeh, S. (2020). Investigation of the effect of large-scale atmospheric signals at different time lags on the autumn precipitation of Iran's watersheds. *Arabian Journal of Geoscience*, 13(18), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05840-7>
- Hirsch, R., Helsel, D., Cohn, T., & Gilroy, E. (1993). *Statistical analysis of hydrologic data*. In: D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology* (Chap. 17), New York, McGraw-Hill, pp. 245-276.
- Isfahani, P.M., Soltani, S. & Modarres, R. (2022). Assessing agrometeorological drought trends in Iran during 1985–2018. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(1), 251-262. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04159-5>
- Karmeshu, N. (2012). *Trend detection in annual temperature & precipitation using the Mann-Kendall test—a case study to assess climate change on select states in the northeastern United States*. MSc dissertation, Department of Earth & Environmental Science, University of Pennsylvania, Pennsylvania, United States.
- Kendall, M. (1970). *Rank Correlation Methods* (2nd ed), Hafner Publishing Company, New York.
- Khalili, A., Bazrafshan, J., & Cheraghalizadeh, M. (2022). A Comparative study on climate maps of Iran in extended de Martonne classification and application of the method for world climate zoning. *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1), 3-16. <https://doi.org/10.22125/agmj.2022.156309>
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, 11, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Li, C., Adu, B., Wu, J., Qin, G., Li, H., & Han, Y. (2022a). Spatial and temporal variations of drought in Sichuan province from 2001 to 2020 based on modified temperature vegetation dryness index (TVDI). *Ecological Indicators*, 139, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109106>
- Li, M.H., Vu, T.M., & Chen, P.Y. (2022b). Multiple drought indices and their teleconnections with ENSO in various spatiotemporal scales over the Mekong River basin. *Science of The Total Environment*, 158589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158589>
- Liu, W., Zhu, S., Huang, Y., Wan, Y., Wu, B., & Liu, L. (2020). Spatiotemporal variations of drought and their teleconnections with large-scale climate indices over the Poyang Lake basin, China. *Sustainability*, 12, 3526. <https://doi.org/10.3390/su12093526>
- Loc, H. H., Van Binh, D., Park, E., Shrestha, S., Dung, T. D., Son, V. H., Truc, N. H. T., Mai, N. P., & Seijger, C. (2021). Intensifying saline water intrusion and drought in the Mekong delta: From physical evidence to policy outlooks. *Science of the Total Environment*, 757, 143919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143919>
- Mahmud, K., & Chen, C. J. (2021). Space-and time-varying associations between Bangladesh's seasonal rainfall and large-scale climate oscillations. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3), 1347-1367. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03697-8>
- Majidi, A., Radfar, M., Mirabbasi Najafabadi, R., & Marofi, S. (2018). "Technical Report" Trend analysis of meteorological drought characteristics in Hamedan province. *Journal of Watershed Management Research*, 9(17), 295-305. <http://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.295> [In Persian]
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 1-245. <http://doi.org/10.2307/1907187>
- Maryanaji, Z., Hoseini, S.A. & Aasi, V. (2017). Analysis of the effects of drought on wheat production and rural migration in Hamadan province. *Space economy & rural development*, 6(19), 95-112. [In Persian]. <http://doi.org/10.18869/acadpub.serd.6.19.95>

McGregor, G. (2017). Hydroclimatology, modes of climatic variability and stream flow, lake and groundwater level variability: a progress report. *Progress in Physical Geography*, 41(4), 496-512. <https://doi.org/10.1177/0309133317726537>

Mehravar, S., Amani, M., Moghimi, A., Javan, F.D., Samadzadegan, F., Ghorbanian, A., Stein, A., Mohammadzadeh, A. and Mirmazloumi, S.M., 2021. Temperature-Vegetation-Soil Moisture-Precipitation Drought Index (TVMPDI); 21-year drought monitoring in Iran using satellite imagery within Google Earth Engine. *Advances in Space Research*, 68(11), 4573-4593. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.041>

Modaresi, F., Araghinejad, S. & Ebrahimi, K. (2018). Selected model fusion: an approach for improving the accuracy of monthly streamflow forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 20(4), 917-933. <http://doi.org/10.2166/hydro.2018.098>

Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D.H. (2016). Changes of extreme drought and flood events in Iran. *Global and Planetary Change*, 144, 67-81. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.008>

Mohsen Pour, R. & Zibaei, M. (2010). Assessing the consequences of drought at farm Level: a case study of Marvdasht region. *Journal of Water and Soil Science*, 14 (52), 49-62. [In Persian]

Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of environment*, 49(3), 246-263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90020-5)

Nazari Pouya, H. & Khosroshahi, M. (2014). Determining the most appropriate meteorological drought index for evaluation of drought in Hamedan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 20(4), 625-633. [In Persian]. <http://doi.org/10.22092/ijrdr.2014.5802>

Nazarifar, M.H., Banjad, H. and Sabziparvar, A.A. (2008). Drought risk monitoring and its application in water resources management (Case study: Hamedan province). p. 238-245. In: Proceedings of the 13th Iranian Geophysical Conference, 7 May 2008. Iranian Geophysical Society, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/71498> [In Persian]

Nazemosadat, M.J. & Ghasemi, A.R. (2004). Quantifying the ENSO-related shifts in the intensity and probability of drought and wet periods in Iran. *Journal of Climate*, 17(20), 4005-4018. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C4005:QTESIT%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C4005:QTESIT%3E2.0.CO;2)

Nouri, M., & Homaei, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, 27(2), 1899. <https://doi.org/10.1002/met.1899>

Price, J.C. (1990). Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5), 940-948. <https://doi.org/10.1109/36.58983>

Qin, Q., Wu, Z., Zhang, T., Sagan, V., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, C., Ren, H., Sun, Y., Xu, W., & Zhao, C. (2021). Optical and thermal remote sensing for monitoring agricultural drought. *Remote Sensing*, 13(24), 5092. <https://doi.org/10.3390/rs13245092>

Rezaei, A. (2021). Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran. *Journal of Hydrology*, 603, 126928. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126928>

Rezaei, A. (2023). Teleconnections between ocean-atmosphere circulations and historical integrated drought in the Middle East and North Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 775. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11386-4>

Saadatmoghadasi, A. (2026). Influence of leading teleconnection indices on key climate variables—precipitation and Tmin/Tmax—at Saveh synoptic station, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(11), 3217-3235. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.400345.669995> [In Persian]

Saharwardi, M. S., Dasari, H. P., Aggarwal, V., Ashok, K., & Hoteit, I. (2023). Long-term variability in the Arabian Peninsula droughts driven by the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Earth's Future*, 11. <https://doi.org/10.1029/2023EF003549>

Salahi, B., & Vatanparast Galeh Juq, F. (2024). Agricultural drought monitoring in the Aras River catchment using satellite and meteorological indicators. *Environmental Management Hazards*, 11(3), 193-212. <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.384523.847> [In Persian]

Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of soil moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79 (2), 213-224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

Shamloo, N., Sattari, M. T., & Apaydin, H. (2022). Agricultural drought survey using MODIS-based image indices at the regional scale: case study of the Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1), 39-51. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04023-6>

Tabari, H., Abghari, H., & Hosseinzadehtalaei, P. (2012). Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrological processes*, 26(22), 3351-3361. <http://doi.org/10.1002/hyp.8460>

- Von Storch, H., & Navarra, A. (1999). Analysis of climate variability: applications of statistical techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Widiasari, I., Nugroho, L., & Widyawan, W. (2017). *Deep learning multilayer perceptron (MLP) for flood prediction model using wireless sensor network-based hydrology time series data mining*. P. 1-5. In: Proceedings of 2017 international conference on innovative and creative information technology (ICITech 2017), 2-4 November. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Salatiga, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/INNOCIT.2017.8319150>
- Wilhite, D. A. (2000). *Drought as a natural hazard: concepts and definitions*. In: Drought: A Global Assessment, Drought mitigation centre faculty publications, University of Nebraska, Lincoln, United States.
- Wu, M., Vico, G., Manzoni, S., Cai, Z., Bassiouni, M., Tian, F., Zhang, J., Ye, K. & Messori, G. (2021). Early growing season anomalies in vegetation activity determine the large-scale climate-vegetation coupling in Europe. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(5), e2020JG006167. <https://doi.org/10.1029/2020JG006167>
- Yang, R. and Xing, B. (2022). Teleconnections of large-scale climate patterns to regional drought in mid-latitudes: A case study in Xinjiang, China. *Atmosphere*, 13(2), 230. <https://doi.org/10.3390/atmos13020230>
- Yuan, Y., Ye X., Liu, T., Li, X., (2023). Drought monitoring based on temperature vegetation dryness index and its relationship with anthropogenic pressure in a subtropical humid watershed in China. *Ecological Indicators*, 154, 110584. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110584>
- Zare Abianeh, H., Yazdany, V. & Azhdary, K. (2010). Comparative study of four meteorological drought indices based on relative yield of rain-fed wheat in Hamedan province. *Physical Geography Research*, 41(69). https://jphgr.ut.ac.ir/article_21512.html?lang=en [In Persian]
- Zareabyaneh, H., Bayatvarkeshi, M. & Yazdani, V. (2011). Trend analysis of annual and seasonal temperature, precipitation and drought in Hamedan province. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 1(3), 47-58. [In Persian]