

## Investigating the Trend of Drought Changes with Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) and Its Relationship with Atmospheric Factors (Case Study: Siah Kooch Watershed)

A. Safdari Molan<sup>1</sup>, A. Mardaneh<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. in Geography and Urban Planning, Department of Human Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. 2- M.Sc. in Remote Sensing and GIS, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

\* (Corresponding Author Email: adel.mardaneh@ut.ac.ir)

Received: 18-05-2023

Revised: 01-09-2023

Accepted: 05-09-2023

Available Online: 21-12-2023

## بررسی روند تغییرات خشکسالی با شاخص خشکی دمایی- پوشش گیاهی (TVDI) و ارتباط آن با عوامل جوی (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیاه کوه)

امین صفدری مولان<sup>۱</sup>، عادل مردانه<sup>۲\*</sup>

۱- دکتری تخصصی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه جغرافیا انسانی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\* (نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: adel.mardaneh@ut.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

### Abstract

Statistics show that the occurrence of severe and long-term droughts, especially in sensitive and fragile areas of the country has caused severe economic and social losses, and the occurrence of drought, increased dust, storms, and desertification has caused a decrease in agricultural production. Extensive and dynamic monitoring of dryness by traditional methods is very difficult and costly due to the lack of soil moisture display points. Remote sensing technology is a practical and applied method for large-scale land monitoring. In this study, we tried to identify the drought in the Siah Kooch watershed area with TVDI dryness-temperature indices and the NDVI index resulting from MODIS sensor images and to investigate the relationship between drought and atmospheric elements in the region. The results of correlation as a total showed that the correlation values of TVDI index SPI6 and SPI12 are 0.68 and 0.71, respectively, and the correlation rates of NDVI values with SPI6 and SPI12 are 0.49 and 0.51, respectively. As a result, it can be said that the TVDI index, due to the use of thermal and reflective bands and soil moisture, is more accurate than the NDVI index, which considers only the amount of vegetation in the region. The TVDI index had an inverse correlation with the average of two months of rainfall of 0.54 and a direct correlation of 0.64 with the surface temperature of the earth. In contrast, the NDVI vegetation index with a two-month average rainfall has a direct correlation of 0.54 and an inverse correlation of 0.6 with the temperature. These linkages show that the correlation between vegetation and temperature is inverse (negative) and the correlation between vegetation and rainfall is direct (positive).

Keywords: Drought, Remote Sensing, Vegetation, Temperature and Precipitation, TVDI.

### چکیده

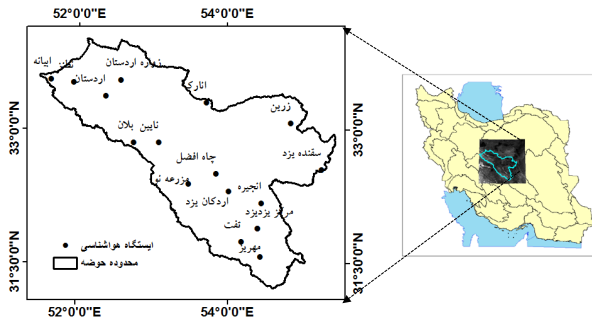
آمارها نشان می‌دهد که وقوع پیاپی خشکسالی‌های شدید و بلندمدت، به ویژه در مناطق حساس و شکننده کشور موجب زیان‌های شدید اقتصادی و اجتماعی شده و بروز پدیده خشکسالی، افزایش ریزگردها، توفان‌ها، بیابان‌زایی و کاهش تولید محصولات کشاورزی را سبب شده است. پایش گسترده و پویای خشکی به وسیله روش‌های سنتی امری بسیار مشکل و هزینه‌بر است و علت آن کم‌بودن نقاط نمایش رطوبت خاک است. تکنولوژی سنجش از دور یک روش عملی و کاربردی برای پایش خشکی در یک مقیاس وسیع است. در این تحقیق سعی شده تا خشکسالی منطقه حوضه آبریز سیاه‌کوه با شاخص‌های خشکی-دمایی TVDI و شاخص NDVI منبج از تصاویر سنجنده MODIS شناسایی و ارتباط خشکسالی با عناصر جوی در منطقه، مورد بررسی قرار داده شود. نتایج همبستگی به صورت میانگین کل، نشان داد که مقدار همبستگی شاخص TVDI با SPI شش و دوازده ماهه به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۷۱ و میزان همبستگی مقادیر NDVI با SPI شش و دوازده ماهه به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۵۱ می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که شاخص TVDI به علت استفاده از باندهای حرارتی و انعکاسی و رطوبت خاک، دقت مناسب‌تری از شاخص NDVI که تنها میزان پوشش گیاهی منطقه را در نظر می‌گیرد، دارد. شاخص TVDI با میانگین بارش دو ماهه، همبستگی معکوس ۰/۵۴ و با حرارت سطح زمین، همبستگی مستقیم ۰/۶۴ داشته است و در مقابل شاخص پوشش گیاهی NDVI با میانگین بارش دو ماهه، همبستگی مستقیم ۰/۵۴ و با دمای هوا نیز همبستگی معکوس ۰/۶ را دارا است. این روابط نشان می‌دهد که ارتباط بین پوشش گیاهی و دما به صورت معکوس (منفی) و ارتباط بین پوشش گیاهی و بارش به صورت مستقیم (مثبت) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، سنجش از دور، پوشش گیاهی، دما و بارش، TVDI.

شمالی طی دو سال خشک (سال آبی ۸۷-۸۶) و نرمال (سال آبی ۸۳-۸۲) پردازند و کارایی دو روش مذکور را مورد سنجش قرار دهند. نتایج نشان داد که شاخص MTVDI نسبت به شاخص TVDI، دوره‌های خشکی را بهتر پایش می‌کند. Gao و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود از تصاویر ماهواره‌ای لندست TM استفاده کرده، مقادیر دمای سطح زمین (LST) و شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) را در مقابل هم رسم کردند. نتایج مقایسه شده با مقادیر بارش نشان داد که شاخص خشکی دمایی-پوشش گیاهی (TVDI) توانسته است به خوبی شرایط خشکی و کمبود بارش را نشان دهد. Chopra (۲۰۰۶)، در ایالت Gujarat هندوستان با استفاده از تصاویر سنجنده‌های AVHRR و NOAA، اقدام به محاسبه شاخص NDVI نموده و این شاخص را با شاخص SPI<sup>۵</sup> مقایسه کرد. وی نشان داد که این دو شاخص ارتباط نزدیکی نسبت به هم در حالت SPI سه ماهه دارند. Lio و همکاران (۲۰۱۹)، اخیراً خشکسالی را در شمال چین با استفاده از شاخص‌های ترکیبی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص MSDI-9 شاخص مناسبی برای رصد خشکسالی کشاورزی است و از این شاخص می‌توان برای پایش خشکسالی شمال چین و مناطق مشابه استفاده کرد. Ghulam و همکاران (۲۰۰۷)، با انجام یک تحقیق به این نتیجه رسیدند که یک شاخص خشکسالی زمانی می‌تواند به عنوان یک شاخص خشکسالی مناسب ارائه گردد که تأثیر رطوبت خاک و پوشش گیاهی را لحاظ کند. بنابراین در سال ۲۰۰۷ شاخص عمودی خشکسالی (PDI) را با عنوان شاخص خشکسالی عمودی اصلاح شده (MPDI) ارائه دادند. این شاخص علاوه بر رفتار طیفی رطوبت در باند قرمز و مادون قرمز، درصد پوشش گیاهی (FVC) را نیز در نظر می‌گیرد. نتایج نشان داد که این شاخص نسبت به شاخص PDI از درصد همبستگی بیشتری با شاخص خشکسالی محاسبه شده از طریق داده‌های زمینی برخوردار است. Patel و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی خشکی و وضعیت رطوبت خاک با استفاده از شاخص خشکی درجه حرارت/پوشش گیاهی TVDI در منطقه غربی Uttar Pradesh هند پرداختند. بدین منظور محصولات ۱۶ روزه شاخص پوشش گیاهی MOD13A2 و ۸ روزه درجه حرارت MOD11A2 را مورد استفاده قرار دادند. تجزیه و تحلیل همبستگی و رگرسیون نشانگر ارتباط TVDI در محل اندازه‌گیری رطوبت خاک در ماه آوریل و اکتبر در مراحل اولیه رشد محصول نیشکر است. الگوهای زمانی-مکانی در TVDI نشان داد که مناطق شمالی از سطح رطوبت بیشتری نسبت به مناطق جنوبی برخوردارند و یک رابطه قوی قابل توجه و منفی بین TVDI و محل اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد، به خصوص هنگامی که پوشش گیاهی نادر است. Yao و همکاران (۲۰۰۴)، در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی رطوبت خاک با استفاده از شاخص خشکی گیاهی TVDI، از محصولات هشت روزه درجه حرارت سنجنده مودیس MOD11A2 و شانزده روزه پوشش گیاهی

عواملی از قبیل افزایش جمعیت، تغییر الگوی مصرف و سبک زندگی (safdari و همکاران، ۲۰۱۹) و گرمای جهانی (Tamir و William، ۲۰۲۱) در بسیاری از مناطق منجر به افزایش شدت و تعداد خشکسالی‌ها می‌شود (Spinoni و همکاران، ۲۰۲۱). باتوجه به خسارت فوق‌العاده وسیع و زیانبار این پدیده، متأسفانه در کشور ما ایران به جهت کمبودهای موجود در دیده‌بانی، رشد جمعیت در نواحی مستعد خشکسالی، برنامه‌ریزی نامناسب و فقدان مدیریت خشکسالی، آسیب پذیری ناشی از بلایای طبیعی و بروز بحران‌های اقتصادی اجتماعی شدیداً با افزایش روبرو بوده است. از این رو پایش و بررسی خشکسالی مهمترین اقدام در مدیریت ریسک خشکسالی خواهد بود. هرچه این عمل دقیق‌تر صورت بگیرد، میزان خسارت و صدمات ناشی از آن و نهایتاً بررسی راهکارهای جلوگیری از روند آن به صورت صحیح‌تری انجام خواهد شد. داده‌های سنجش از دور می‌توانند به طور منظم و مداوم اطلاعاتی مانند تغییرات دوره‌ای پوشش گیاهی و آب را ارائه دهند، بنابراین شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور می‌توانند بر کاستی‌های شاخص‌های خشکسالی سنتی غلبه کنند و برای پایش خشکسالی در فضا به کار گرفته شوند (Xiu و همکاران، ۲۰۱۸). پیشینه تحقیق نشانگر آن است که، کویرها و مناطق بیابانی به عنوان یکی از اجزای تشکیل‌دهنده محیط زیست، همواره مورد توجه دانشمندان و محققین بوده و اکثر محققین در پی یافتن راه‌ها و تکنیک‌های نوین جهت مطالعه این نواحی بوده‌اند؛ زیرا دسترسی به این مناطق همواره به علت شرایط خاص آن‌ها، مشکل و محدود بوده است. سنجش از دور در این زمینه نیز توانسته است به عنوان ابزار و تکنیکی کارآمد به خوبی ایفای نقش نموده و مفید واقع شود. در این میان، از مطالعات و بررسی‌های به عمل آمده در کویر سیاه‌کوه و نیز کاربرد سنجش از دور در مطالعات بیابانی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

Alavipanah (۲۰۰۱) در تحقیقی با عنوان ارزیابی باند حرارتی ماهواره لندست در مطالعه کویرهای ایران، به این نتیجه رسید که باند حرارتی، حاوی اطلاعات مهمی درباره خاک‌های شور، گچی و گیاهان می‌باشد، در نتیجه باند حرارتی به عنوان تابعی از حرارت سطحی می‌تواند مکمل باندهای انعکاسی باشد. همچنین Alavipanah و همکاران (۲۰۰۱) به مطالعه خاک‌های منطقه یزد و میزان شوری آنها با داده‌های ماهواره لندست پرداخته و نتیجه گرفتند که باند حرارتی در تفکیک کلاس‌های خاک گچی و شور، سطوح پوسته‌دار خاک و مناطق شهری می‌تواند بسیار مفید باشد. نوری و ثنائی‌نژاد (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای سعی کردند تا با استفاده از دو شاخص خشکی دما-گیاه (TVDI)<sup>۱</sup> و دما-گیاه اصلاح شده (MTVDI)<sup>۲</sup> و همچنین با بکارگیری محصولات دمایی و پوشش گیاهی سنجنده MODIS به بررسی خشکسالی در استان خراسان



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز سیاه کوه در میان حوضه‌های آبریز ایران به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی داخل آن

#### • داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق تصاویر سنجنده MODIS مستقر بر روی ماهواره TERRA استفاده شد. این تصاویر، محصولات ترکیبی ۸ روزه دمای سطح زمین و ۱۶ روزه شاخص‌های پوشش گیاهی تحت نام‌های MOD1۱A۲ و MOD1۳A۲ با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر می‌باشند. با توجه به اینکه بیشترین میزان پوشش گیاهی در منطقه، در فصل بهار می‌روید، بدین جهت روز ۱۵م ماه اردیبهشت به عنوان ماه مبنا انتخاب گردید و تصاویر این تاریخ برای هر یک از سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ از سایت ماهواره MODIS اخذ گردید. همچنین به منظور محاسبه شاخص بارش استاندارد (SPI) از داده‌های ایستگاه‌های زمینی شامل ۱۴ ایستگاه هواشناسی متعلق به سازمان هواشناسی کشور که از سال ۱۳۷۵ تا سال ۱۳۹۲، آمار بارش ماهانه داشتند، استفاده گردید.

#### • شاخص‌های خشکسالی

##### - شاخص خشکی دمایی-گیاهی (TVDI):<sup>۱</sup>

شاخص خشکی دمایی-گیاهی (TVDI) یکی از شاخص‌های مناسب در تعیین میزان خشکسالی و ترسالی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. اصل اولیه آن این است که تبخیر رطوبت خاک از طریق حرارت سطح<sup>۱۱</sup> کاسته می‌شود (رابطه ۱).

$$TVDI = \frac{(T_s - T_{smin})}{(T_{smax} - T_{smin})} \quad (1)$$

که در آن  $T_s$  حرارت سطح مشاهده شده در هر سلول از منطقه می‌باشد و  $T_{smin}$  کمترین حرارت سطح برای هر سلول NDVI در مثلث تشکیل شده است که لبه خشک را نشان می‌دهد.  $T_{smax}$  نیز بیشترین حرارت سطح مشاهده شده در NDVI داده شده می‌باشد و لبه مرطوب را نشان می‌دهد که بدین صورت محاسبه می‌گردد:

$$T_{smax} = a_1 + bNDVI_1 \quad (2)$$

$$T_{smin} = a_2 + bNDVI_2 \quad (3)$$

$a$  و  $b$  ضرایب معادلات خطی لبه‌های خشک و مرطوب هستند و با استفاده از لبه‌های خشک و مرطوب، بدین صورت بیان می‌گردد:

$$TVDI = \frac{(T_s - (a_2 + bNDVI_2))}{((a_1 + bNDVI_1) - (a_2 + bNDVI_2))} \quad (4)$$

MODIS NDVI MOD13A2 به منظور محاسبه شاخص خشکی دمایی - پوشش گیاهی TVDI استفاده کردند. بدین منظور رطوبت خاک ۱۶ روزه در اوت و سپتامبر در Xinjiang با استفاده از TVDI بازیابی شد. آنها متوجه شدند که TVDI و رطوبت خاک به شدت در ارتباط هستند و TVDI می‌تواند وضعیت رطوبت خاک سطحی را منعکس کند، بنابراین بر اساس اطلاعات سنجش از دور، تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک در این منطقه را مورد بررسی قرار دادند. Fensholt و همکاران (۲۰۰۹)، مقایسه‌ای بین شاخص‌های گیاهی NDVI حاصل از MODIS Terra، SPOT VGT، و AVHRR و GIMMS با داده‌های مشاهداتی انجام دادند. با توجه به عملکرد بالای هر سه ماهواره در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، تنها تفاوت آنها در روند تغییراتی شاخص NDVI در مناطق مرطوب و خشک بود. Yuan و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از محصول LST و شاخص پوشش گیاهی بارز شده EVI به جای شاخص NDVI، مقادیر شاخص خشکی دما- گیاه اصلاح شده (MTVDI) را محاسبه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که شاخص MTVDI بهتر از شاخص TVDI می‌تواند خشکسالی را پیش‌بینی کند. Wan و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از شاخص دمایی- گیاهی (VTCI) و استفاده از تصاویر ماهواره سنجنده مودیس شرایط خشکی در آمریکا را پیش‌بینی کردند و نتایج را با داده‌های بارندگی ثبت شده در ایستگاه‌های این منطقه، مورد ارزیابی قرار دادند. آنالیز همبستگی بین شاخص (VTCI)، مقادیر تجمعی بارش ماهانه و انحراف از بارش ماهانه نرمال نشان داد که شاخص مذکور نه تنها همبستگی نزدیکی با وقایع بارندگی اخیر دارد، بلکه با مقادیر بارش در گذشته نیز همبستگی دارد.

#### مواد و روش

##### • منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سیاه کوه با وسعت حدود ۴۸۴۷۳۲۰ هکتار در قسمت مرکزی ایران واقع شده است و قسمت‌هایی از چندین استان مرکزی ایران را شامل می‌شود (شکل ۱). این حوضه یکی از زیر حوضه‌های آبریز فلات مرکزی می‌باشد و با حوضه‌های دریاچه نمک، گاوخونی، کویر مرکزی، کویر لوت، کویر انجیر و ابرقو، همسایه است. قسمت زیاد کویر سیاه کوه در استان یزد و بقیه در استان اصفهان (شهرستان نائین) قرار دارد. متوسط ارتفاع آن ۹۷۰ متر از سطح دریا و شیب متوسط آن در حدود ۰/۵ درصد می‌باشد. شکل آن نواری با تحدب به سمت جنوب غربی است و در امتداد شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده است (Mazidi و Yamani، ۲۰۰۸). از نظر اقلیمی جزء مناطق بیابانی با متوسط بارش ۵۰ میلی‌متر در سال و متوسط دمای ۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط رطوبت نسبی سالانه حدود ۴۰ درصد بوده که بیشترین آن در دی ماه حدود ۶۰ درصد و کمترین آن در تیر ماه حدود ۲۰ درصد است.

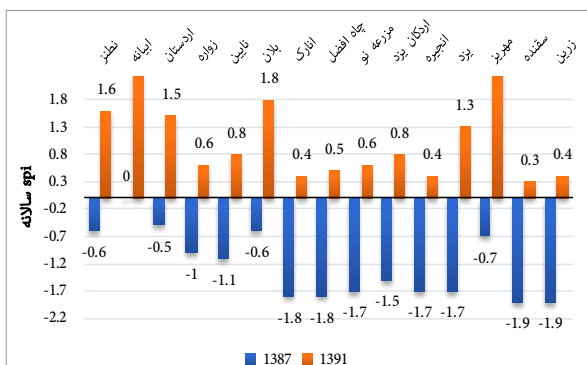
## یافته‌ها و نتایج

### - پیش‌پردازش تصاویر MODIS

تحقیق حاضر از تصاویر سنجنده مودیس مستقر بر ماهواره ترا استفاده شد. دلایل انتخاب سنجنده مودیس، در این تحقیق توان تفکیک طیفی و مکانی متوسط، تکنیک واسنجی مخصوص و باریک بودن اکثر باندهای طیفی این سنجنده است که این ویژگی سبب جلوگیری از جذب بخار آب در باند مادون قرمز شده و در نتیجه خطایی که به واسطه جذب بخار آب ایجاد می‌شود، بسیار کوچک است. بنابراین دقت محاسباتی در تعیین شاخص NDVI و LST افزایش می‌یابد. این تصاویر، محصولات ترکیبی ۸ روزه دمای سطح زمین و ۱۶ روزه شاخص پوشش گیاهی تحت نام‌های MOD11A2 و MOD13A2 با قدرت تفکیک یک کیلومتر می‌باشند. از آنجا که بیشترین میزان رشد پوشش گیاهی در منطقه در ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر می‌باشد و براساس شواهد موجود، در این منطقه خشک و کویری با پشت سرگذشت فصل بهار و اتمام بارندگی‌های سالانه، بسیاری از پوشش‌های گیاهی مرتعی که بیشتر گیاهان یک‌ساله هستند خشک شده و از بین می‌روند، بنابراین روز ۱۵ اردیبهشت هر سال به‌عنوان نماینده تصاویر در نظر گرفته شد. در نتیجه ۱۲ تصویر پوشش گیاهی و حرارتی تصویر سنجنده مودیس مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر اخذ شده در سیستم تصویر سینوسی تهیه شده‌اند و لازم است تا به سیستم تصویر جغرافیایی تبدیل گردند که این کار با افزونه MCTK در نرم افزار ENVI صورت گرفت. همچنین تصحیحات رادیومتریک و هندسی انجام شده و در نهایت منطقه مورد نظر از تصاویر اصلی جدا گردید.

### - تعیین سال‌های آبی خشک و مرطوب در منطقه

به منظور تعیین سال‌های آماری پایه، از شاخص SPI استفاده گردید. بدین منظور بارندگی ماهانه در ۱۷ ایستگاه هواشناسی و سینوپتیک منطقه جمع آوری گردید و با نرم‌افزار <sup>۱۱</sup>DIC مقادیر شاخص SPI محاسبه شد. این مقادیر برای ایستگاه‌های مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- توزیع شاخص خشکسالی SPI سالانه در ایستگاه‌های موجود در سال ۱۳۸۷ (خشکسالی) و ۱۳۹۱ (ترسالی)

با توجه به معادله بالا، مقادیر شاخص TVDI بین صفر و یک متغیر خواهد بود که مقدار صفر، معرف شرایط مرطوب، بیشترین میزان تبخیر و تعرق و عدم محدودیت منابع آب و مقدار یک نشانگر نزدیکی به لبه خشک و معرف شرایط خشک می‌باشد. شاخص پوشش گیاه (NDVI)، نیز از رابطه زیر بدست می‌آید و بیشترین رابطه را با حجم زنده گیاهی در میان مشخصه‌های پوشش گیاهی دارد.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (5)$$

که در آن، NIR میزان مادون قرمز نزدیک ثبت شده در هر سلول و RED نیز مقدار باند قرمز برای هر سلول در تصویر می‌باشد. دامنه تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ است. شیب خط خاک یک بوده و از مبدأ می‌گذرد.

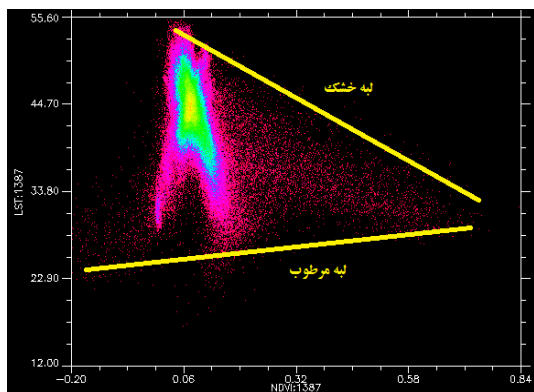
### - شاخص SPI:

شاخص SPI بر اساس اختلاف بین مقادیر بارش و میانگین بارش برای یک بازه زمانی مشخص و تقسیم این مقدار بر انحراف معیار بارش پیشنهاد شده است (McKee و همکاران، ۱۹۹۳). اساس این نمایه برارزش استاندارد بر محاسبات احتمالات وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار است. این نمایه صرفاً از داده‌های بارندگی ماهانه استفاده می‌کند و برای تشخیص کمبود میزان بارندگی در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه) طراحی شده است. مقادیر مثبت شاخص، نشان‌دهنده بارندگی‌های بیشتر از میانه و مقادیر منفی، بارندگی زیر میانه را نشان می‌دهد. طبقات این شاخص در جدول (۱) آمده است. شاخص SPI تنها بر مبنای استفاده از داده‌های بارندگی استوار است و از مزایای شاخص SPI این است که برای مقیاس‌های مختلف زمانی (با تعداد مختلف) قابل محاسبه است. از معایب این شاخص این است که بایستی توزیع آمار بارندگی مشاهده‌ای تبدیل به توزیع نرمال شود و برای این منظور به بیش از ۳۰ سال آمار بارندگی نیاز دارد.

جدول ۱- طبقه بندی مقادیر شاخص SPI (محمدی، ۱۳۸۸)

مقادیر SPI	وضعیت رطوبتی
۲ و بیشتر	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
۰/۵ تا ۰/۹۹	ترسالی ضعیف
۰/۴۹ تا -۰/۴۹	نرمال
-۰/۴۹ تا -۰/۵	خشکسالی ضعیف
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
کمتر از -۲	خشکسالی بسیار شدید

سطح زمین همبستگی منفی باهم دارند، در نتیجه می‌توان لبه‌های مرطوب و خشک را با استفاده از خط روند یا رگرسیون خطی ساده پارامترهای (شیب و عرض از مبدا) آن دو را بدست آورد. معادله خط رگرسیون مربوط به لبه‌های خشک و مرطوب برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ در شکل (۴) و جدول (۲) نشان داده شده است.



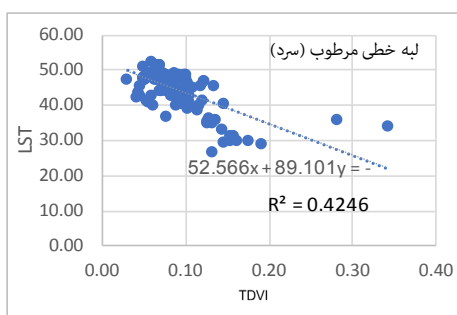
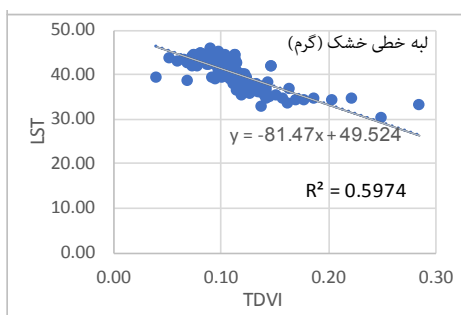
شکل ۳- نمودار پراکنش و فضای NDVI/LST و موقعیت سلول‌های لبه‌های خشک و مرطوب در سال ۱۳۸۷

از میان سال‌هایی که دارای وضعیت بحرانی بوده‌اند، می‌توان به سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۷ اشاره کرد که میزان شاخص SPI در هر یک از آنها برای ۱۷ ایستگاه مورد مطالعه، دچار یک نوع کاهش بخصوصی شده‌اند. از میان سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ با توجه به میزان SPI سالانه و میزان بارندگی سالانه، سال‌های آبی ۱۳۸۷ با مجموع بارش سالانه ۶۱ میلی‌متر به عنوان سال خشک و سال ۱۳۹۱ با مجموع بارش ۱۰۶ میلی‌متر به عنوان سال مرطوب در منطقه انتخاب گردید.

#### تحلیل فضای NDVI/LST و محاسبه شاخص TVDI

نمودارهای پراکنش مربوط به فضای پوشش گیاهی و حرارت سطح زمین در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که مقادیر بالا در لبه خشک همان خاک‌های بایر یا فاقد پوشش گیاهی هستند و با افزایش مقادیر پوشش گیاهی (NDVI)، مقادیر بالای لبه خشک به علت تبخیر و تعرق بالای ناشی از گیاهان کاهش می‌یابند.

از آنجا که در این نمودار میزان پوشش گیاهی با میزان حرارت



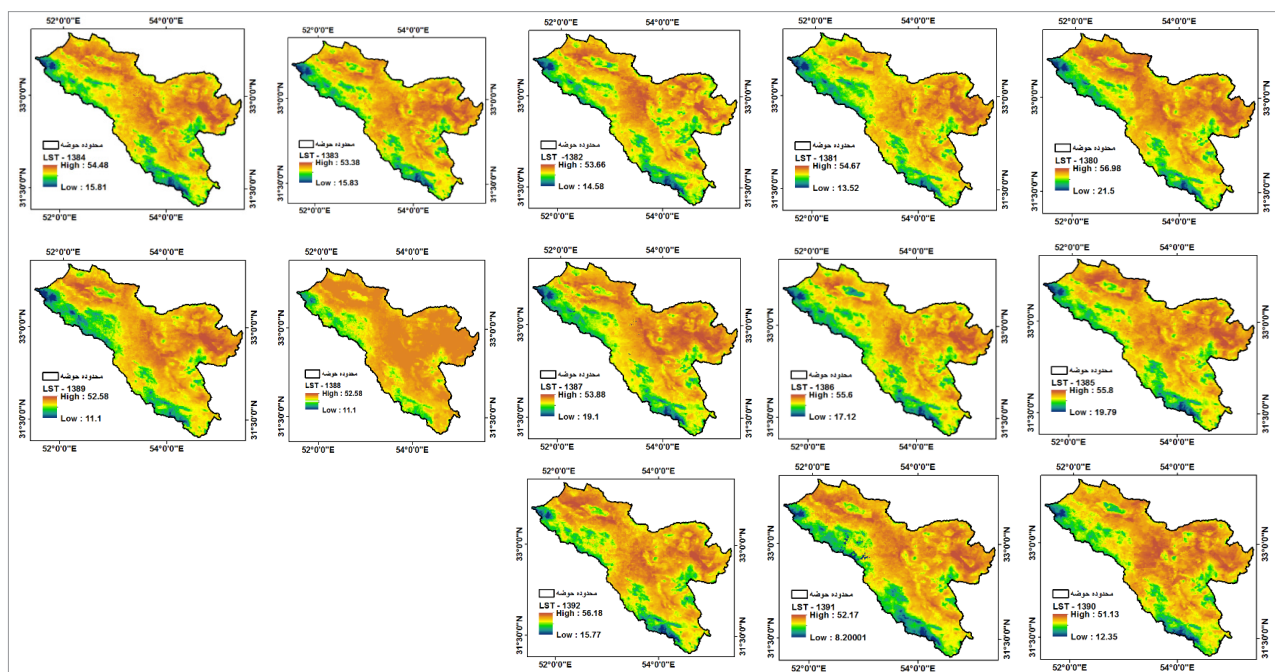
شکل ۴- رگرسیون خطی لبه مرطوب (سرد) و لبه خشک (گرم) در سال ۱۳۸۷

#### جدول ۲- پارامترهای رگرسیون خطی لبه خشک و لبه مرطوب

تاریخ	لبه خشک	لبه مرطوب
۱۳۸۰	$LST_{Max(NDVI)} = -125/8 NDVI + 55/6$	$LST_{Max(NDVI)} = -39/86 NDVI + 46/24$
۱۳۸۱	$LST_{Max(NDVI)} = -118/19 NDVI + 51/59$	$LST_{Max(NDVI)} = -12/48 NDVI + 38/07$
۱۳۸۲	$LST_{Max(NDVI)} = -109/15 NDVI + 50/98$	$LST_{Max(NDVI)} = -12/07 NDVI + 37/85$
۱۳۸۳	$LST_{Max(NDVI)} = -159/86 NDVI + 58/19$	$LST_{Max(NDVI)} = -45/26 NDVI + 42/1$
۱۳۸۴	$LST_{Max(NDVI)} = -109/15 NDVI + 52/68$	$LST_{Max(NDVI)} = -28/38 NDVI + 45/26$
۱۳۸۵	$LST_{Max(NDVI)} = -87/18 NDVI + 52/74$	$LST_{Max(NDVI)} = -93/45 NDVI + 52/6$
۱۳۸۶	$LST_{Max(NDVI)} = -46/24 NDVI + 45/6$	$LST_{Max(NDVI)} = -47/55 NDVI + 44/19$
۱۳۸۷	$LST_{Max(NDVI)} = -89/1 NDVI + 52/56$	$LST_{Max(NDVI)} = -81/47 NDVI + 49/52$
۱۳۸۸	$LST_{Max(NDVI)} = -21/68 NDVI + 36/04$	$LST_{Max(NDVI)} = -7/16 NDVI + 32/66$
۱۳۸۹	$LST_{Max(NDVI)} = -131/17 NDVI + 51/69$	$LST_{Max(NDVI)} = -98/82 NDVI + 49/52$
۱۳۹۰	$LST_{Max(NDVI)} = -22/39 NDVI + 40/27$	$LST_{Max(NDVI)} = -32/12 NDVI + 43/91$
۱۳۹۱	$LST_{Max(NDVI)} = -140/79 NDVI + 57/9$	$LST_{Max(NDVI)} = -37/17 NDVI + 41/99$
۱۳۹۲	$LST_{Max(NDVI)} = -140/32 NDVI + 54/48$	$LST_{Max(NDVI)} = -42/16 NDVI + 43/19$
۱۳۹۲	$LST_{Max(NDVI)} = -115/08 NDVI + 56/74$	$LST_{Max(NDVI)} = -32/38 NDVI + 46/87$

می‌دهد افزایش و کاهش TVDI، روندی منطقی داشته و در سال ۱۳۸۷ (سال خشک) این مقدار به عدد یک نزدیکتر شده و بیشتر مناطق دچار خشکسالی شده‌اند. همچنین طبق شاخص NDVI در سال ۱۳۸۷، میزان پوشش گیاهی در منطقه بسیار کاهش داشته و اکثر منطقه به جز در قسمت‌های شمال غربی، دچار خشکسالی شده‌اند. در سال ۱۳۹۱ که میزان بارش نسبت به سال‌های پیشین افزایش داشته، میزان پوشش گیاهی در منطقه نسبت به سال‌های قبل افزایش یافته است؛ اما مناطق مرکزی و شرقی همچنان دچار خشکسالی می‌باشند. میانگین NDVI کل منطقه در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۱۳ بوده است که نشان می‌دهد افزایش و کاهش NDVI روندی منطقی داشته و در سال ۱۳۸۶ (سال خشک) این مقدار به عدد صفر نزدیکتر شده و بیشتر مناطق دچار خشکسالی و فاقد پوشش گیاهی شده‌اند.

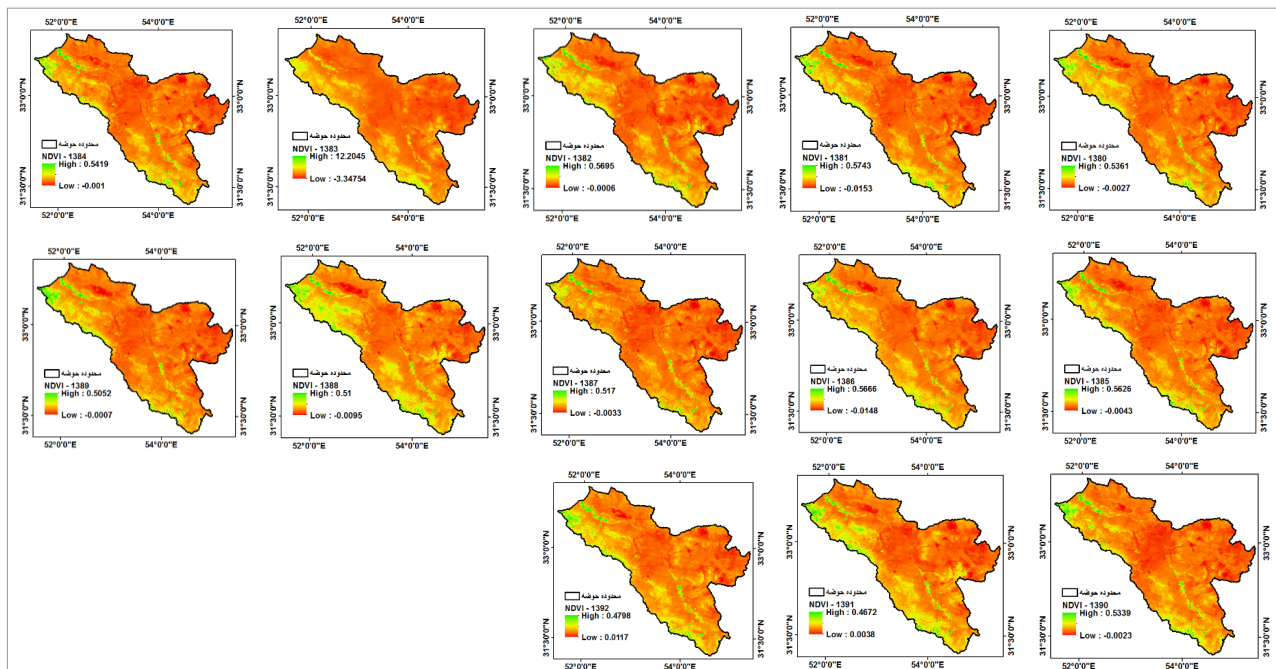
- تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های TVDI و NDVI و تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های خشکسالی NDVI، LST و TVDI در روز ۱۵ اردیبهشت در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده است. به طور کلی روند تغییرات شاخص‌ها نشان می‌دهند که نواحی شرقی، مرکزی و جنوب شرقی منطقه، خشک‌ترین مناطق بوده است؛ در حالیکه نواحی غرب و شمال غربی مقدار خشکی کمتری داشته‌اند و مشخص می‌گردد که اکثر مناطق در سال ۱۳۸۷ دچار خشکی شده‌اند که این خشکی در قسمت‌های مرکزی و شرقی قابل توجه‌تر است. در سال ۱۳۹۱ (سال مرطوب) هرچند که قسمت‌های مرکزی و شرقی همچنان نسبت به سایر مناطق، TVDI بیشتر و خشک‌تری را نشان می‌دهند، اما بیشتر مناطق، TVDI کمتر و بدون خشکسالی را نشان می‌دهند. میانگین TVDI کل منطقه در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۴۲ بوده است که نشان



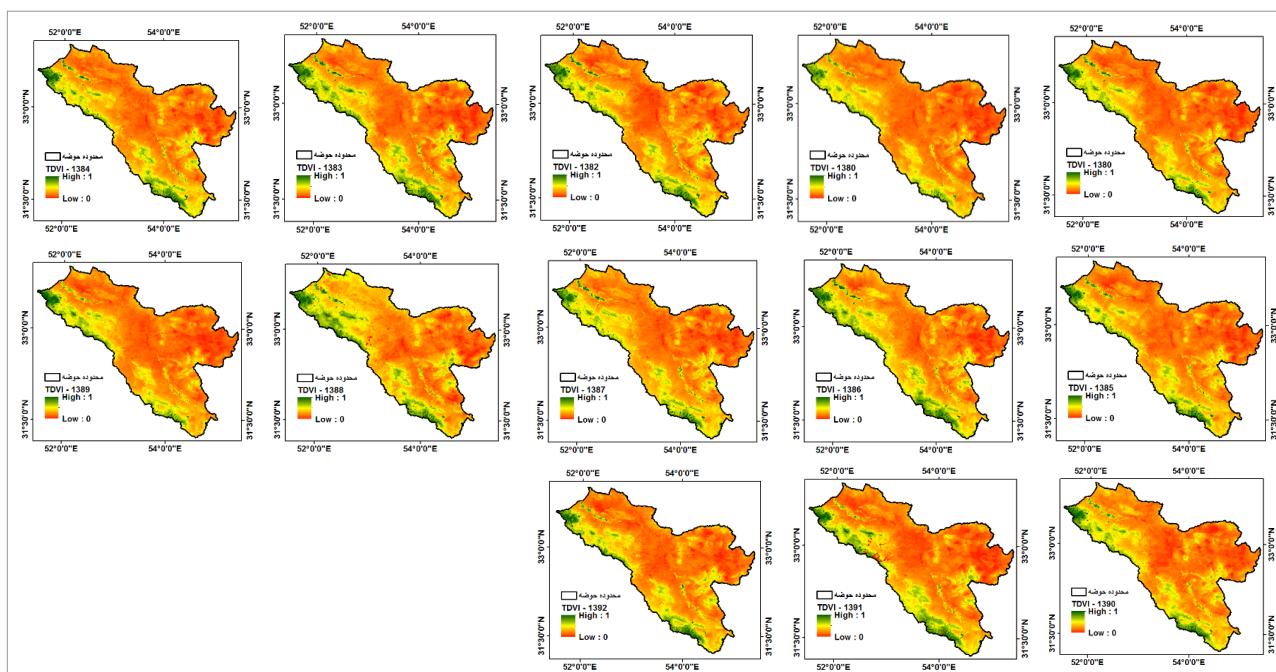
شکل ۵- نقشه توزیع شاخص حرارتی LST منطقه سیاه‌کوه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲

در مقایسه‌های صورت گرفته میان شاخص‌های مورد استفاده، مشخص گردید که بهترین رابطه میان این دو شاخص در حالتی برقرار می‌شود که شاخص SPI به صورت ۱۲ ماهه و بعد از آن در حالت ۶ ماهه<sup>۱۳</sup> مقایسه گردد (شکل ۸). همچنین با توجه به شکل (۹)، میزان همبستگی مقادیر NDVI با SPI شش و دوازده ماهه به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۵۱ می‌باشد. در نتیجه شاخص TVDI نسبت به NDVI، عملکرد بهتری در پهنه‌بندی خشکسالی داشته است و می‌تواند در کنار شاخص SPI بکار گرفته شود.

- مقایسه میانگین کل شاخص‌های NDVI و TVDI با شاخص SPI به منظور بررسی دقت شاخص NDVI و TVDI در برآورد خشکسالی در منطقه، از شاخص SPI که روشی مورد پذیرش در تعیین خشکسالی است، استفاده گردید. با استفاده از توابع GIS، مقدار شاخص NDVI و TVDI در هر یک از ۱۷ ایستگاه موجود در منطقه برآورد گردید و ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر آنها با مقدار شاخص SPI محاسبه شد. مقدار همبستگی شاخص TVDI با SPI شش و دوازده ماهه به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۷۱ می‌باشد،

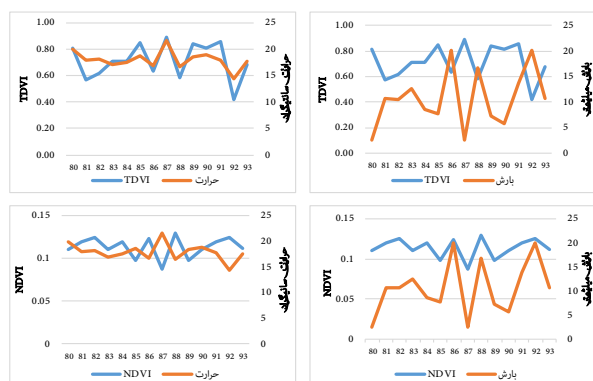


شکل ۶- نقشه توزیع شاخص پوشش گیاهی NDVI منطقه سیاهکوه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲

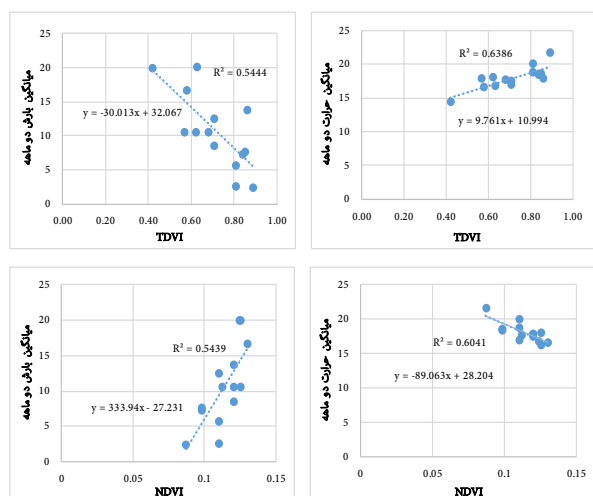


شکل ۷- نقشه توزیع شاخص خشکی دمایی TVDI منطقه سیاهکوه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲

بنابراین به منظور بررسی ارتباط میان شاخص‌های مورد نظر با بارش و حرارت، میانگین ماه اردیبهشت و ماه فروردین هر یک از سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ را بدست آورده و میزان همبستگی محاسبه گردید (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). نتایج نشان داد که این میزان برای شاخص TVDI برای میانگین بارش، ۰/۵۴ همبستگی معکوس و حرارت با ۰/۶۴ همبستگی مستقیم بوده است و شاخص NDVI با میانگین بارش، همبستگی مستقیم ۰/۵۴ و با حرارت همبستگی معکوس ۰/۶۴ را نشان می‌دهد. می‌توان گفت که از نظر ارتباط با عوامل جوی میزان بارش و حرارت در منطقه، هر دو شاخص عملکرد یکسانی دارند.



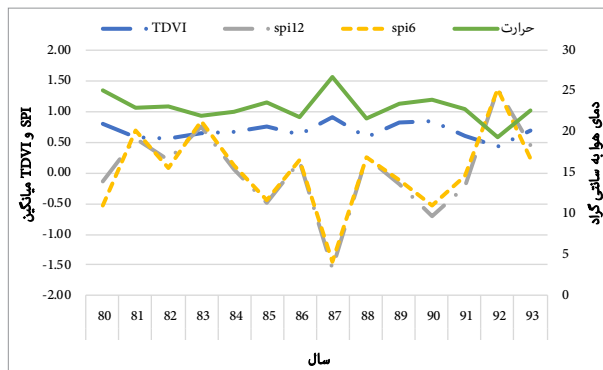
شکل ۱۰- روند تغییرات شاخص‌های TVDI و NDVI با میانگین بارش و حرارت سطح زمین دو ماهه



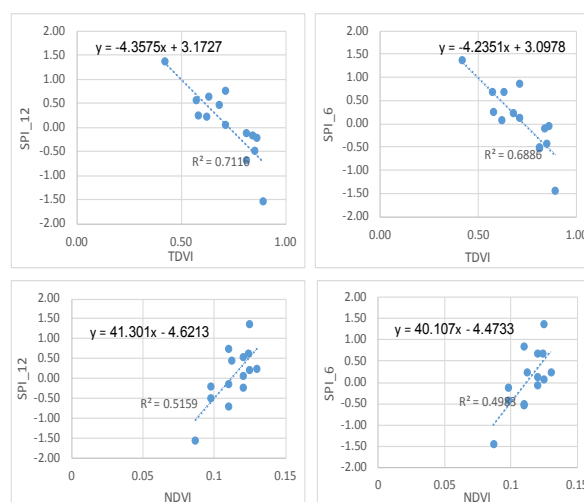
شکل ۱۱- همبستگی میانگین شاخص‌های TVDI و NDVI با میانگین بارش دو ماهه و حرارت دو ماهه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲

### بحث و نتیجه‌گیری

پایش و کنترل خشکسالی، نقش عمده‌ای در کاهش اثرات و خسارات آن دارد. پایش خشکسالی به طور معمول به وسیله پارامترهای



شکل ۸- روند پارامترهای خشکسالی و هواشناسی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۳



شکل ۹- همبستگی میانگین شاخص‌های TVDI و NDVI با شاخص SPI شش ماهه و دوازده ماهه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲

### ارتباط شاخص‌های خشکسالی با عناصر جوی

یکی از اهداف این پژوهش، بررسی ارتباط شاخص‌های خشکسالی مورد نظر با عناصر اقلیمی بوده است. با توجه به اینکه از نظر اقلیمی، منطقه مطالعاتی به عنوان یک منطقه گرم و خشک طبقه‌بندی می‌شود، بنابراین مهم‌ترین عناصر اقلیمی تأثیرگذار در این منطقه، دما و بارش خواهند بود. این مسأله به کمک ضرایب ارائه شده در ماتریس همبستگی شکل (۱۱) نیز قابل درک است. این ماتریس نشان می‌دهد که ارتباط بین پوشش گیاهی و دما به صورت معکوس (منفی) و ارتباط بین پوشش گیاهی و بارش به صورت مستقیم (مثبت) است. بنابراین منطقی است که نمایان شدن آثار منفی خشکسالی، به عنوان پدیده‌ای تأثیرگذار بر پوشش گیاهی، ارتباط مستقیم با بارش و ارتباط معکوس با دما خواهند داشت. به عبارتی دیگر با افزایش دما و کاهش بارش، باید انتظار تشدید آثار خشکسالی بر پوشش گیاهی منطقه را داشت. با توجه به اینکه اثرات بارش بر خشکسالی و پوشش گیاهی زمان‌بر است،



مربوط به بارش صورت می‌گیرد. در بررسی خشکسالی هواشناسی همواره کمبود ایستگاه‌ها و کوتاه‌بودن دوره آماری آن‌ها، دقت ارزیابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی داده‌های هواشناسی وضعیت کشاورزی و مرتعی را به خوبی نشان نمی‌دهند. بنابراین استفاده از داده‌های سنجش از دور با دقت مکانی و زمانی بالا، می‌تواند مکمل داده‌های هواشناسی باشد. اضافه بر آن با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌توان وضعیت خشکسالی را برای مناطق و حوضه‌های آبریزی که فاقد آمار هستند، بررسی نمود، در حالی که امکان بررسی مناسب خشکسالی در حوضه‌های آبریز فاقد آمار بارش میسر نیست. بنابراین اطلاعات ماهواره‌ای قابلیت بالایی در پایش و حتی پیش‌بینی خشکسالی در مناطق فاقد آمار دارند. شاخص‌های هواشناسی از قبیل SPI به تنهایی نماینده مناسبی از وضعیت خشکسالی هواشناسی نیستند و با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای می‌توان به برآورد جامع‌تری از وضعیت خشکسالی در مناطق دست یافت. در این تحقیق از محصولات دمایی و پوشش گیاهی سنجنده مودیس به منظور بررسی خشکی با استفاده از شاخص‌های NDVI و TVDI که مبتنی بر سنجش از دور هستند در منطقه سیاه‌کوه که دارای اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است، استفاده گردید. بررسی زمانی و مکانی شاخص‌های مذکور نشان داد که با تغییر در میزان بارش، مقادیر شاخص‌ها نیز دستخوش تغییر شده و متناسب با کاهش یا افزایش بارش، تغییر می‌کنند. شاخص TVDI به علت همبستگی بالا با شاخص SPI شش و دوازده ماهه، به عنوان شاخصی مناسب جهت پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در منطقه معرفی و قابلیت‌های آن اثبات گردید. با توجه به مقالات مرجع، لازمه استفاده از شاخص TVDI در پایش خشکسالی، انتخاب منطقه بزرگی است که کلیه شرایط رطوبتی اعم از شرایط خشک تحت تنش و شرایط مرطوب فاقد تنش را در بر داشته باشد. همچنین اثرات پدیده خشکسالی بر پوشش گیاهی سطح زمین حالت تدریجی دارد، اگر بتوان با الگوریتمی بر میزان پوشش گیاهی از روی تصاویر ماهواره‌ای نظارت و پایش داشته باشیم، با کاهش تدریجی پوشش گیاهی منطقه، پدیده مخرب خشکسالی را هشدار داد. با توجه به نتایج تحقیق پیشنهاد می‌گردد تا شاخص‌های NDVI و TVDI به همراه سایر شاخص‌های خشکسالی که از تصاویر ماهواره‌ای از قبیل شوری خاک استفاده می‌کنند، در مناطق دیگر نیز مورد آزمون قرار گیرد و قابلیت آنها با نتایج این تحقیق مورد مقایسه قرار گیرد. سرمایه‌گذاری در بخش تحقیقات کشاورزی به منظور اصلاح گیاهان و معرفی ارقام مقاوم به خشکسالی و شوری نیز در این منطقه ضروری است. همچنین می‌بایست بین بخش‌های تحقیقاتی و اجرایی کشاورزی، هماهنگی‌های لازمی صورت گیرد تا طرح‌های مذکور در مرحله اجرا با شکست همراه نشوند. همچنین برای پیشگیری از خشکسالی و مشکلات ناشی از آن در منطقه مورد مطالعه (حوضه سیاه‌کوه) توصیه و پیشنهاد به مسئولان با

توجه به افت سطح آب زیرزمینی در منطقه و لزوم حفظ این منابع برای نسل‌های آینده، اصلاح و بهبود آب‌بندان‌ها، می‌بایست از اولویت‌های اصلی مسئولان و سیاست‌گذاران امر قرار گیرد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1-Temperature Vegetation Dryness Index
  - 2-Modified Temperature Vegetation Dryness Index
  - 3-Land Surface Temperature
  - 4-Normalized difference vegetation index
  - 5-Standardized precipitation index
  - 6-Perpendicular Drought Index
  - 7-Modified Perpendicular Drought Index
  - 8-Vegetation Fraction, Fractional vegetation cover
  - 9-<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>
  - 10-Temperature Vegetation Dryness Index
  - 11-land surface temperature
  - 12-Drought Indicis Calculator
- ۱۳- شش ماهه اول سال به عنوان مبنا مورد بررسی قرار گرفت (فرودین تا آخر شهریورماه)

#### منابع

- هارپال اس، ماوی، و گرائم جی، تاپر. (۱۳۸۸). آب و هواشناسی کشاورزی اصول و کاربرد مطالعات آب و هوا در کشاورزی. مترجم: حسین محمدی. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ اول. تهران. ایران.
- نوری، سمیرا، و ثنایی‌نژاد، سیدحسین. (۱۳۹۲). بررسی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکی دما-گیاه (TVDI) و دما-گیاه اصلاح شده (MTVDI) و تصاویر سنجنده مودیس. نشریه آب و خاک، ۲۷(۴)، ۷۵۳-۷۶۲. doi: [10.22067/jsw.v0i0.28135](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28135)
- Alavipanah, S. K. (2001). Performance evaluation of Landsat TM satellite spectral bands in desert studies in Iran. *Journal of Natural Resources*, 53 (1), 67-78.
- Alavipanah, S. K., De Dapper, M., Goossens, R., & Mas-soudi, M. (2001). The use of TM thermal band for land cover/land use mapping in two different environmental conditions of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 3(1), 27-36. DOR: [20.1001.1.16807073.2001.3.1.2.5](https://doi.org/10.1001.1.16807073.2001.3.1.2.5)
- Chopra, P. (2006). Drought risk assessment using remote sensing and GIS: a case study of Gujarat. ME thesis,

- Study of Tehran). In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2019: 19th International Conference*, Saint Petersburg, Russia, July 1–4, 2019, Proceedings, Part III 19 (pp. 660–674). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24302-9\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24302-9_47)
- Spinoni, J., Marinho Ferreira Barbosa, P., Cherlet, M., Forzieri, G., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J. and Dosio, A. (2021). How will the progressive global increase of arid areas affect population and land-use in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 205, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103597>
- Tamir K.; William R. L. A. (2021). A vast increase in heat exposure in the 21st century is driven by global warming and urban population growth. *Sustainable Cities and Society*, 73, 103098. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103098>
- Wan, Z., Wang, P., & Li, X. (2004). Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 61-72. <https://doi.org/10.1080/0143116031000115328>
- Xu, P., Zhou, T., Zhao, X., Luo, H., Gao, S., Li, Z., Cao, L. (2018). Diverse responses of different structured forest to drought in Southwest China through remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 69, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.03.009>
- Yamani, M., Mazidi, A. (2008). The Investigation of changes in surface and vegetation of Shaikh desert using remote sensing data. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 40(64), 1-12.
- Yao, C., Zhang, Z. and Wang, X. (2004). Evaluating Soil Moisture Status in XinJiang Using the Temperature Vegetation Dryness Index(TVDI). *Remote Sensing Technology and Application*, 6, 473-478.
- Yuan, X. Y., Chao, D. Y., Gao, J. P., Zhu, M. Z., Shi, M., & Lin, H. X. (2009). A previously unknown zinc finger protein, DST, regulates drought and salt tolerance in rice via stomatal aperture control. *Genes & Development*, 23(15), 1805-1817. <https://doi.org/10.1101/gad.1812409>
- Indian Institute of Remote Sensing, Dehradun & International Institute for Geo-information & Earth Observation, the Netherlands.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T. T., & Mbow, C. (2009). Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1886-1898. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.004>
- Gao, Z., Gao, W., & Chang, N. B. (2011). Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), 495-503. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.10.005>
- Ghulam, A., Qin, Q., Teyip, T., & Li, Z. L. (2007). Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(2), 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.03.002>
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.
- Patel, N. R., Anapashsha, R., Kumar, S., Saha, S. K., & Dadhwal, V. K. (2009). Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 23-39. <https://doi.org/10.1080/01431160802108497>
- Rahimzadeh, B., P., Omasa, K., & Shimizu, Y. (2012). Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.10.009>
- Safdari Molan, A., Ziari, K., Pourahmad, A., & Hataminejad, H. (2019). Providing a Livable Housing Development Model for Increasing Urban Livability (Case