

Analyzing the dynamics of vegetation cover in Iran's Basins in relation to drought conditions

Jabar Rezaei^{1*}, Masoud Jalali², Hossein Asakereh³, Peyman Mahmoudi⁴

¹ PhD student, Department of Meteorology, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: jabar_1362@yahoo.com

² Assistant Professor of Climatology, Department of Meteorology, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: mjalali@znu.ac.ir

³ Professor of Climatology, Department of Meteorology, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: asakereh1@yahoo.com,

⁴ Associate Professor of Climatology, Department of Meteorology, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, Email: paymanasia@yahoo.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 2025-01-16

Accepted: 2025-03-07

Keywords:

Content analysis

Scientometrics

Climate change

Iran

Web of Science database

Scientific mapping

To achieve the research objectives, two different databases with a common time period of 23 years (2000-2022) were used in this study: first, the 16-day composite MODIS *NDVI* (MOD13A3) products of the Terra satellite and second, the Standardized Precipitation-Evaporation-Transpiration Index (SPEI) database on a 12-month time scale. First, to obtain the type of drought, the SPEI index was classified into 7 thresholds. Then, according to the thresholds, a map of all 6 main watersheds of Iran was extracted, and to classify the vegetation type, 10 thresholds were extracted for the *NDVI* index, and the relevant maps of the watersheds were categorized into 5 vegetation types in the form of a map for each year. Then, to examine the relationship between the two SPEI and *NDVI* indices, Then, using the Pearson correlation test, the relationship between the two indices was evaluated in the average of the gridded data pixel by pixel, and the age slope estimator was used to estimate the rate of change. The results showed that the slope of the negative trend of the SPEI index, 264 months, is increasing in the range of most watersheds, so that the negative trend of this index is more severe in the southwestern regions (Persian Gulf basin and Oman Sea) and in the northern regions of the country (north of the central basin and the center of the Caspian Sea basin) and is statistically significant at a confidence level of 90%, so that the rate of decrease of its index reached -0.9 per decade. For the *NDVI* index, both positive trends (in the southern and southwestern regions) and negative trends (in the northern regions) prevail throughout Iran, and for basins with a significant trend, the slope of the change trend is (0.01 per decade).

Cite this article: Rezaei, J., Jalali, M., Asakereh, H., Mahmoudi, P. (2025). Analyzing the dynamics of vegetation cover in Iran's Basins in relation to drought conditions. *Journal of the Climate Change research*, 6 (23), 21-40.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: [10.30488/CCR.2025.500184.1265](https://doi.org/10.30488/CCR.2025.500184.1265)



واکاوی پویایی پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز کشور ایران در ارتباط با شرایط خشکسالی

جبار رضایی^{۱*}، مسعود جلالی^۲، حسین عساکره^۳، پیمان محمودی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: jabar_1362@yahoo.com

^۲ استادیار اقلیم‌شناسی، گروه هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: mjalali@znu.ac.ir

^۳ استاد اقلیم‌شناسی، گروه هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: asakereh1@yahoo.com

^۴ دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، رایانامه: paymanasia@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷ واژه‌های کلیدی: شاخص NDVI، شاخص SPEI، حوضه‌های آبریز، آزمون من-کندال اصلاح شده، ضریب همبستگی	به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، از دو پایگاه داده متفاوت با یک دوره زمانی مشترک ۲۳ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) استفاده شد: اول، محصولات ترکیبی ۱۶ روزه MODIS NDVI (MOD13A3) ماهواره Terra و دوم، پایگاه داده ای شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه. ابتدا جهت دستیابی به نوع خشکسالی، شاخص SPEI در ۷ آستانه طبقه بندی شد. سپس طبق آستانه‌ها، نقشه هر ۶ حوضه آبریز اصلی ایران استخراج شد و برای طبقه بندی نوع پوشش گیاهی ۱۰ آستانه جهت شاخص NDVI استخراج گردید و نقشه‌های مربوطه حوضه‌های آبریز در قالب یک نقشه برای هر سال در ۵ نوع پوشش گیاهی دسته بندی شد. سپس برای بررسی ارتباط بین دو شاخص SPEI و NDVI، در ابتدا تفکیک مکانی دو پایگاه داده به کمک روش نزدیکترین همسایه یکسان سازی شد. آنوقت به کمک آزمون همبستگی پیرسون ارتباط بین دو شاخص در میانگین داده‌های شبکه بندی شده به صورت پیکسلی مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت برآورد نرخ تغییرات از تخمینگر شیب سن بهره گرفته شد. نتایج نشان داد شیب روند منفی شاخص SPEI، ۲۶۴ ماهه، در گستره ی اکثر حوضه‌های آبریز افزایشی است به طوری که روند منفی این شاخص بر روی مناطق جنوب غرب (حوضه خلیج فارس و دریای عمان) و بر روی مناطق شمالی کشور (شمال حوضه مرکزی و مرکز حوضه دریای خزر) شدیدتر است و به لحاظ آماری در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنادار است. نرخ کاهش شاخص آن به میزان ۰/۹- به ازای هر دهه رسید. برای شاخص NDVI هم روند مثبت (در مناطق جنوبی و جنوب غرب) و هم روند منفی (مناطق شمالی) در گستره ی ایران حاکم است. برای حوضه‌های با روند معنادار، شیب روند تغییرات (۰/۱) به ازای هر دهه است.
استناد: رضایی، جبار؛ جلالی، مسعود؛ عساکره، حسین؛ محمودی، پیمان (۱۴۰۴). واکاوی پویایی پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز کشور ایران در ارتباط با شرایط خشکسالی. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۳)، ۴۰-۲۱.	

مقدمه

خشکسالی یکی از جدی‌ترین مخاطرات طبیعی است و یکی از مهم‌ترین پیامدهای آن، کاهش منابع آب برای مدت طولانی زیر سطح نرمال (Vicente-Serrano et al., 2013; Zhang et al., 2017) و کاهش تولیدات کشاورزی، تغییر در پوشش گیاهی و تسریع در بیابان‌زایی است (Dastorani et al., 2015). خشکسالی نه تنها تأثیر مهمی بر روی انواع پوشش گیاهی روی زمین و نحوه پراکندگی آنها دارد، بلکه بر رشد پوشش گیاهی نیز تأثیر می‌گذارد؛ این وضعیت به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک مشهودتر است. به‌علت نیاز به دقت، دید وسیع‌تر، کاهش هزینه‌های مالی و نیاز به صرفه‌زمانی و همچنین به دلیل پیشرفت‌های فناوری ماهواره‌ای در حیطه علوم زمین، امروزه محققین به روش‌های قدیمی برای شناسایی و مدیریت خشکسالی اکتفا نمی‌کنند، بلکه برای نتیجه‌گیری بهتر و جامع از روش‌های سنجش از دور برای بررسی پویایی پوشش گیاهی استفاده می‌کنند. از جمله شاخص‌های بررسی خشکسالی سنجش از دور می‌توان به شاخص گیاهی بازسازی شده^۱ (Bannari, 1995, VI)، شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی^۲ (Rouse et al., 1974, *NDVI*)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک^۳ (Huete, 1988, *ASVI*)، شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده با خاک^۴ (Qi et al., 1994, *SMVCI*) و بسیاری نمایه‌های دیگر اشاره نمود. در این میان شاخص‌های پوشش گیاهی *EVI* و *NDVI* از کاربرد بیشتری برخوردارند. طبق پژوهش محققان مختلف، *EVI* برای مناطقی با پوشش گیاهی متراکم مناسب‌تر است (Firouzi et al., 2019). نمایه *NDVI* نیز در تحلیل‌ها و اندازه‌گیری‌های سنجش از دور و ارزیابی وجود پوشش گیاهی جذابیت زیادی در مطالعات کشاورزی تجاری و کاربری زمین دارد (Huang et al., 2021). تهیه اطلاعات مربوط به این شاخص در مقیاس جهانی از سال ۱۹۸۱ به کمک

داده‌های^۵ (AVHRR) توسط ماهواره اداره ملی اقیانوسی و جوی^۶ (NOAA) امکان پذیر شد (Didan et al., 2015). امروزه *NDVI* نقش کلیدی در نظارت بلند مدت سلامت پوشش گیاهی ایفا می‌کند (Grist et al., 1997; Karnieli et al., 2018; Klisch and Atzberger, 2016). بنابراین، مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از داده‌های سنجش از دور در پایش خشکسالی و پوشش گیاهی صورت گرفته است. برای مثال پیشرفت در سنجش از دور در بررسی عملکرد صفات پوشش گیاهی (Houborg et al., 2015)، تحلیل مقایسه‌ای از تنوع مکانی-زمانی ویژگی‌های خشکسالی (Lv et al., 2022)، بهره‌وری چند مقیاسی از تورب زارهای کوه‌های مرتفع آند در سراسر آلتیپلانو شیلی با استفاده از ۳۱ سال تصاویر لندست برای ذخیره کربن (Chavez et al., 2019) و غیره. محققان بسیاری نیز جهت بررسی تغییرات اقلیمی از *NDVI* و سایر شاخص‌های خشکسالی نظیر شاخص بارش استاندارد شده (SPEI) (McKee et al., 1995)، شاخص شدت خشکسالی پالمر^۷ (PDSI) (Palmer, 1963)، شاخص درصد از نرمال بارش^۸ (PNPI) (Hayes et al., 2011) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) (Vicente Serrano et al., 2010) استفاده کرده‌اند. (Vicente-Serrano (2007) از *SPI*، *NDVI* و شاخص وضعیت پوشش گیاهی^۹ (*VCI*) استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای AVHRR برای دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۰۰ بر روی فعالیت پوشش گیاهی مناطق شمال شرقی شبه جزیره ایبری استفاده کرده و به این نتیجه رسید که اثر خشکسالی در قسمت‌های مختلف منطقه مورد مطالعه متفاوت بوده و به نوع پوشش اراضی و مکان رویشی آنها بستگی دارد. همچنین (Ma et al., 2023) تغییرات در مقاومت و انعطاف‌پذیری پوشش گیاهی در زمان اثرات مختل‌کننده فعالیت‌های زیستی خشکسالی را بر اساس داده‌های سری زمانی *NDVI* و *SPEI* برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ در استان

6. National Oceanic and Atmospheric Administration

7. Palmer drought severity index

8. Percent of Normal Index precipitation

9. Vegetation condition index

1. Vegetation Index

2. Normalized Difference Vegetation Index

3. Adjusted Soil Vegetation Index

4. Soil modified vegetation cover index

5. Advanced Very High Resolution Radiometer

جیلین چین مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که زمان پاسخ پوشش گیاهی به خشکی، سه ماه است و شمال غربی استان جیلین به عنوان آسیب پذیرترین منطقه از خشکسالی تشخیص داده شد. Peng et al. (2020) جهت بررسی آسیب پذیری‌های ناشی از خشکسالی در آفریقا همبستگی بین $NDVI$ و $SPEI$ را در سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۱۶ بدست آوردند و ارتباط بین این دو شاخص را مهم تشخیص دادند. در تحقیق دیگری پویایی خشکسالی و پوشش گیاهی در سراسر حوضه رودخانه دامکو^۱ در چین بین سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۱۵ توسط Zhao et al. (2018) ارزیابی شد. آنها اثر تاخیر زمانی پاسخ هر دو شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ و شاخص سطح برگ^۲ (LAI) را با توجه به شاخص‌های خشکسالی SPI و $SPEI$ مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که پوشش گیاهی حوضه رودخانه دامکو در سال‌های مرطوب بهتر رشد می‌کند در حالی که در سال‌های خشک برعکس است و در سراسر حوضه رودخانه دامکو شاخص‌های خشکسالی و پوشش گیاهی هر دو با همبستگی مثبت معنی‌دار در مقیاس‌های زمانی مختلف مشخص شدند.

در ایران نیز مطالعات زیادی در زمینه ارتباط بین پوشش گیاهی و خشکسالی انجام گرفته است (محمودی و همکاران، ۱۳۹۰؛ کیپاشا و همکاران، ۱۳۹۶؛ عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ میرموسوی و کریمی، ۱۳۹۲؛ رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۳؛ باعقیده و همکاران، ۲۰۱۱). در یک پژوهش، جهانبخش اصل و همکاران، (۱۳۸۷) به ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب مشکین شهر با استفاده از شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI^3) پرداختند. نتایج آنها نشانگر بالا بودن تغییرات وضعیت سلامت پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق تحت کشت دیم بود. بر اساس این پژوهش خطر آسیب پذیری خشکسالی در منطقه غرب دشت سراب بالا بود. همچنین فیروزی و همکاران ۱۳۹۵، به بررسی حساسیت دو شاخص ($NDVI$ و EVI) به خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در دشت

سیستان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص $NDVI$ شاخص بسیار مناسب تری برای بررسی پویایی پوشش گیاهی دشت سیستان است و شاخص EVI برای مناطقی مناسب است که پوشش گیاهی آن متراکم باشد. امیدوار و همکاران (۱۳۹۷) نیز شاخص خشکی گیاه (VDI) مبتنی بر تصاویر ماهواره ای را در استان سیستان و بلوچستان جهت بررسی سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی طی بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۸ مورد ارزیابی قرار دادند. آنها از دو شاخص SPI و VDI برای برآورد خشکسالی در منطقه مورد نظر استفاده کرده و نتیجه گرفتند که ضریب همبستگی بالایی بین دو شاخص وجود دارد. شاخص خشکسالی VDI مبتنی بر داده‌های سنجش از دور به خوبی می‌تواند در سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی استفاده شود.

محمودی و همکاران، (۱۳۹۹)، روند تغییرات طولانی مدت پوشش گیاهی دشت سیستان واقع در شرق ایران را با استفاده از محصولات $MODIS$ و سنجنده ماهواره Terra برای یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۴) مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که روند افزایشی تغییرات در $NDVI$ شمال غرب دشت سیستان مشاهده می‌شود و روند کاهشی تغییرات $NDVI$ در شرق و مرکز دشت حاکم است.

در تحقیقات بسیاری گزارش شده است که دو شاخص $PDSI$ و SPI نتایج بهتری در مقایسه با دیگر شاخص‌ها در پایش خشکسالی‌ها ارائه می‌دهند. این دو شاخص کاستی‌هایی نیز دارند. SPI تنها یک عنصر بارش را در نظر می‌گیرد و نمی‌تواند نقش افزایش دما را در شرایط خشکسالی آینده شناسایی کند و $PDSI$ نیز تنها یک مقیاس زمانی ثابت بین ۹ تا ۱۲ ماهه را در نظر می‌گیرد (Guttman, 1998; Vicente-Serrano et al., 2010). ما از آنجایی که $SPEI$ تأثیر تبخیر و تعرق بالقوه^۴ (PET) را بر شدت خشکسالی در بعد مکان در نظر می‌گیرد و ویژگی‌های چند مقیاسی آن امکان شناسایی انواع مختلف خشکسالی و اثرات آن را در زمینه گرمایش جهانی فراهم می‌کند می‌توان آن را

3. Vegetation Health Index
4. Potential evaporation and transpiration

1. Damqu
2. Leaf area index

شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی (*NDVI*): در این پژوهش برای ایران، از داده‌های شبکه بندی شده *SPEI* موسسه اکولوژی پیرنه واقع در زاراگوزای اسپانیا در فرمت *NETCDF* برای ۲۳ سال (۲۰۰۰-۲۰۲۳) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه منتهی به دسامبر هر سال تهیه شد که در کل حاوی ۶۳۵ پیکسل بود. این پیکسل‌ها در شکل ۱ الف، قابل مشاهده است. پایگاه داده ای دوم نیز مربوط به تولیدات *NDVI* سنجنده *MODIS* ماهواره *TERRA* با نام *MOD13A3* با قدرت تفکیک 1×1 کیلومتر است که در این تحقیق پنج کاشی کل ایران را پوشش داد. تصاویر ۱۲ ماهه برای هر سال از هر پنج کاشی (در کل ۶۰ تصویر) استخراج و میانگین آنها محاسبه شد. مناطق خارج از مرزهای ایران برش داده شد. پوشش کل نقاط شش حوضه آبریز برای ایران طبق شمارش پیکسل‌های نقطه ای در محیط آرک مپ، ۲۶۸۳۸۸۱ پیکسل یا به عبارتی نقطه بود. به علت تراکم فشرده و قدرت تفکیک بسیار بالای میانگین تصاویر، تصویر نقاط شبکه بندی شده *NDVI* به رنگ مشکی نمایان شد (شکل ۱، ب).

در طیف وسیعی از اقلیم‌ها محاسبه کرد (Vicente-Serrano et al., 2013)، به‌طوری‌که در اقلیم‌های خشک و فوق‌العاده خشک مثل ایران به صورت دقیق‌تری خشکسالی را پایش می‌کند (بذر افشان و همکاران، ۱۳۹۷) و پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی دارد (نصرتی، ۱۳۹۲)، با این توضیح، چون اقلیم ایران متنوع است و به موازات گرمایش جهانی این اقلیم‌ها هم دستخوش تغییر شده‌اند (محمدی، ۱۳۹۰؛ مسعودیان و دارند، ۱۳۹۲؛ مفاخری و همکاران، ۱۳۹۴؛ دوستان و علیجانی، ۱۳۹۵؛ عساکره و همکاران، ۱۳۹۹؛ ترابی نژاد و همکاران، ۱۴۰۱). لذا خشکسالی خسارات هنگفتی بر اقتصاد کشور وارد کرده و منابع کشاورزی و غذایی را با تهدید مواجه ساخته است؛ این بررسی، واکاوی پویایی پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز کشور ایران در ارتباط با شرایط خشکسالی مورد مطالعه قرار می‌دهد و با سنجش ارتباط دو شاخص *NDVI* و *SPEI*، تصویری واضح‌تر از رفتار خشکسالی و مناطق حساس حوضه‌های اصلی ایران ارائه گردد.

داده‌ها و روش‌شناسی

داده‌های شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (*SPEI*)



شکل ۱: پراکندگی نقاط *SPEI* و *NDVI* به ترتیب الف و ب، کل ایران در دوره مورد مطالعه

شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) را نخستین بار (Vicente-Serrano et al., 2010) و همکاران به کار بردند. این شاخص یک شاخص چند کمیتی است که در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. نحوه محاسبه این شاخص همانند شاخص SPI است با این تفاوت که یک مزیت مهم SPEI نسبت به SPI تأثیر تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) بر شدت خشکسالی است. همچنین ویژگی‌های چند مقیاسی آن امکان شناسایی انواع مختلف خشکسالی و اثرات آن را در زمینه گرمایش جهانی فراهم می‌کند. از آنجا که شاخص‌های خشکسالی باید از نظر آماری قوی و به راحتی محاسبه شوند (Keyantash and Dracup, 2002) و دارای یک روش محاسبه واضح و قابل درک باشند، تمام این الزامات توسط SPEI برآورده شده و قابل استفاده برای کل پهنه کره زمین است و نتایج زمانی و مکانی آن نیز می‌تواند کمک شایانی به شناخت گسترش خشکسالی در پهنه کره زمین باشد. بنابراین، برای پایش خشکسالی‌های ایران شاخص مناسبی به نظر می‌رسد. با این توضیح در این پژوهش از نمایه آماده SPEI که به صورت زیر حاصل شده است استفاده شده است.

تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای روز i ام به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$Di = Pi - PET_i$$

رابطه ۱

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (نصرتی، ۱۳۹۰)

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} p_{n-1} - PET_{n-1}$$

رابطه ۲

که k (دوره آماری) در این مقاله (۲۳ سال) و n ماه‌های سال مورد نظر در محاسبه می‌باشد (Nosrati, 2012) و در نهایت از D_n^k مقدار $SPEI$ بدست آمده که مقدار آن طبق جدول ۲ بین ۲- تا ۲+ می‌باشد.

همچنین در توضیح ماهیت چند مقیاسی آن برای شناسایی انواع مختلف خشکسالی‌ها و اثرات آن بر پهنه‌های متنوع زمینی دسته بندی‌هایی توسط ویسنه

سرانو و همکاران، ۲۰۱۰، معرفی شده است که مبنای دسته بندی وضعیت خشکسالی در این پژوهش می‌باشد. از مقدار حاصل شده شاخص (SPEI) در هر نقطه از آستانه‌های مندرج در جدول (۲) استفاده شد.

همچنین از آنجا که سری‌های زمانی رفتار نا ایستا دارند و این سری‌ها در میانگین‌های بلند مدت خود همواره دارای حرکات کاهشی، افزایشی و یا ثابت هستند (عساکره، ۱۳۹۹)، لذا تحلیل روند این سری‌ها در مقیاس‌های نقطه‌ای و پهنه‌ای ضروری است. در این پژوهش جهت آشکار سازی رفتار بلند مدت هر دو شاخص (SPEI و NDVI)، از هر دو گروه روند ترسیمی و تحلیلی استفاده شد. یکی از روش‌های ناپارامتریک، آزمون من کندال می‌باشد. این آزمون بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار (کفایت مطلق و مسعویان، ۱۳۹۴) این آزمون در سال ۱۹۸۸ به وسیله سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد شد و در بررسی معنی داری روند سری‌های اقلیمی به کرات و در موارد مختلف استفاده شده است (خلیلی و بذرافشان، ۱۳۸۲)، ولی از آنجا که تصادفی بودن داده‌ها و عدم وجود خود همبستگی در سری زمانی مورد بررسی، فرض صفر آزمون من-کندال است. با این حال وجود خود همبستگی در سری زمانی مورد بررسی می‌تواند بر نتایج آنالیز روند اثرات معنی داری داشته باشد. بر این اساس روش من-کندال برای اثر خود همبستگی اصلاح گردید و به صورت آزمون من - کندال اصلاح شده بر داده‌ها انجام شد (عباسی، ۱۴۰۰).

جدول ۲: شاخص استاندارد شده بارش- تبخیر و تعرق

(SPEI) ویسنه سرانو و همکاران، ۲۰۱۰

مقدار	طبقات خشکسالی
$-1.99 \leq -2.00$	خشکسالی بسیار شدید
-1.50 to -1.99	خشکسالی شدید
1 to -1.49	خشکسالی متوسط
0.00 to 0.9	نزدیک به نرمال
1.00 to 1.49	ترسالی متوسط
1.50 to 1.99	ترسالی شدید

۱. جهت استفاده کامل از مراحل آماری این شاخص به ویسنه و همکاران، در سال ۲۰۱۰ مراجعه شود.

ترسالی بسیار شدید	$1.99 \geq 2.00$
-------------------	------------------

در مقیاس حوضه آبریز است، نمایه آستانه $NDVI$ از صفر تا یک مثبت در ۱۰ رده برای هر شش حوضه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد. با توجه به اینکه کل حوضه‌ها از آستانه تقریباً ثابت ۰/۱ تا ۰/۳ برخوردار هستند و میزان تغییرات در حوضه‌ها از آستانه ۰/۴ به بالا در نوسان بود؛ لذا بررسی رفتار شاخص $NDVI$ برای هر سال و برای هر حوضه از آستانه ۰/۴ به بالا محاسبه شد. جهت دست یابی به تصویر کلی ایران مطابق شکل (۴)، مقادیر هر ۱۰ آستانه طبق رده‌های جدول ۳ برای پویایی نوع پوشش گیاهی مختلف تهیه شد.

جدول ۳: کلاس‌های نوع پوشش گیاهی در طبقات $NDVI$

نوع پوشش	طبقات $NDVI$
بدون پوشش تا ضعیف	0 - 0.3
پوشش متوسط	0.3 - 0.5
پوشش خوب	0.5 - 0.7
پوشش عالی	0.7 - 1

نتایج و بحث

پویایی زمانی - فضایی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده ($SPEI$): شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده ($SPEI$)، برای یک دوره ۲۳ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) در مقیاس سالانه در شکل ۲ ارائه شده است، طبق این شاخص $SPEI$ ، بیشترین نوع خشکسالی‌ها در هر ۶ حوضه آبریز کشور، به ترتیب خشکسالی‌های متوسط و شدید بودند به طوری که سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۲ به ترتیب سهم بیشتری را از هر دو نوع خشکسالی دارا بودند. همچنین غیر از سال‌های مذکور، اکثر حوضه‌ها خشکسالی‌های نزدیک به نرمال را تجربه کرده‌اند به طوری که از لحاظ وسعت فراگیری این نوع خشکسالی (نزدیک به نرمال)، در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بیشترین وسعت را در حوضه‌های آبریز دارا بودند. همچنین سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ در حوضه مرکزی و دریاچه ارومیه نیز بیشترین وسعت را نشان دادند چنانچه، فراوانی نوع خشکسالی‌های بیشتر از ترسالی‌ها بود و گستره‌ی مکانی آنها از غرب به شرق ایران بیشتر و از جنوب به شمال تداوم و

آزمون من کندال اصلاح شده اولین بار توسط Hamed and Rao (1988) ارائه شد (زادهمر و فرخیان فیروزی، ۱۳۹۱). در این آزمون فرض اصلی استفاده از روش ناپارمتریک من کندال جهت واکاوی تغییرات سری زمانی و روند، آن است که در مشاهدات خود همبستگی معناداری وجود نداشته باشد. جهت حذف خود همبستگی لازم است که اجزاء خود همبستگی، از قبیل فرایند خود همبستگی مرتبه اول قبل از انجام آزمون من کندال از سری زمانی داده‌ها حذف شود (کلاهدوزان و همکاران، ۱۳۹۴). گام اول در محاسبه‌ی من کندال اصلاح شده، آزمون ضریب خود همبستگی مرتبه K ام (r_k) بر اساس رابطه زیر است (رابطه ۳).

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

برای محاسبه آماره Z من کندال اصلاح شده، در رابطه ۵، مقدار $Var(S)$ با مقادیر $Var(S)^*$ در رابطه ۴ جایگزین می گردد. (زادهمر و فرخیان فیروزی، ۱۳۹۱)

$$Var(s)^* = Var(s) \frac{n}{n^*} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)r_i \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه ۵، r_i ضرایب همبستگی با تأخیر i می‌باشد که از طریق رابطه ۳ بدست می‌آید. در ادامه، جهت شناخت رفتار خطی و ترسیم خط روند و محاسبه شیب آن از شیب سن استفاده شد.

$$f(t) = Qt + B \quad \text{رابطه ۶}$$

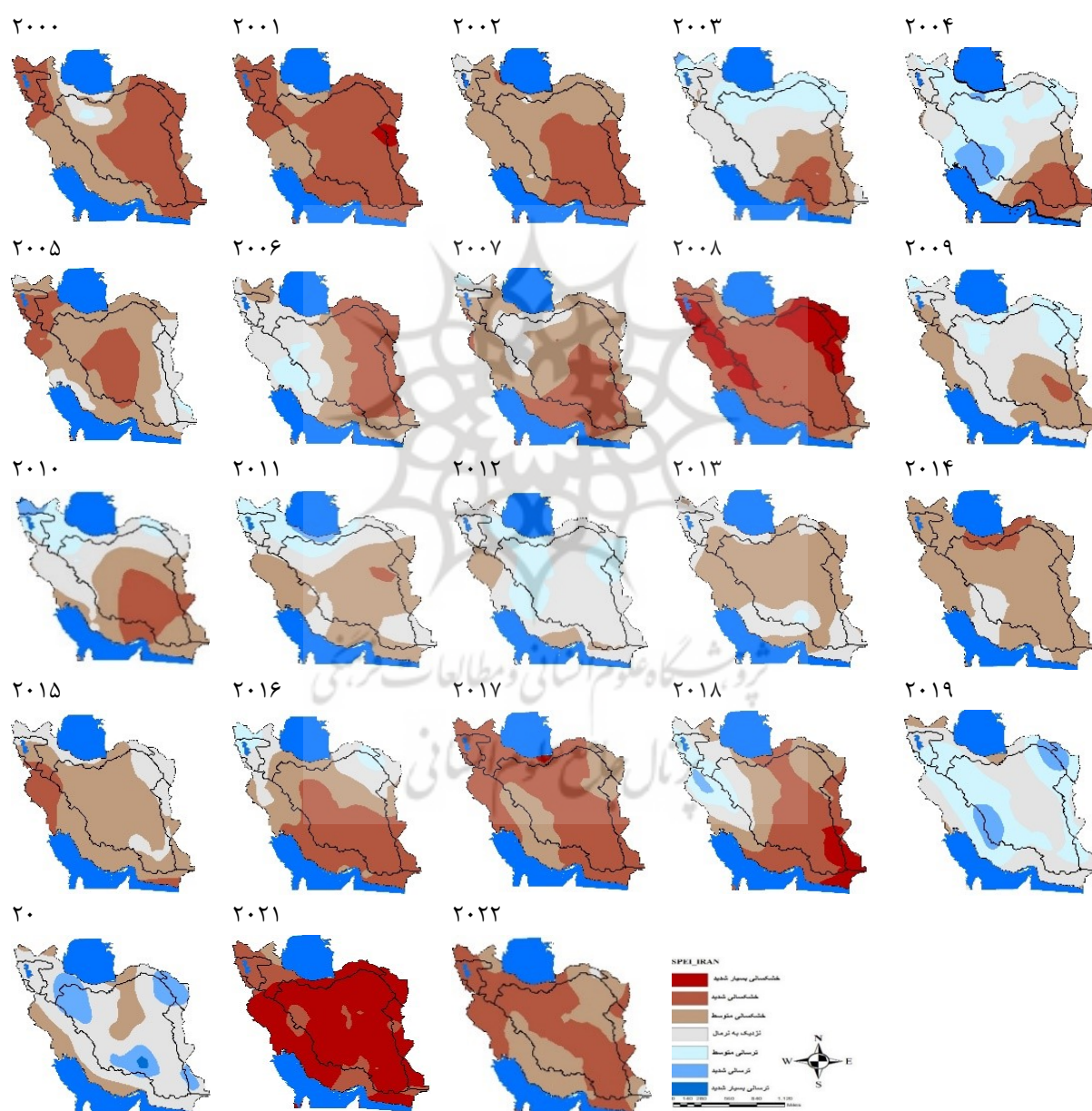
همچنین نمایه آماده شده $NDVI$ طبق رابطه ۷ به دست آمده است:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه، NIR و RED به ترتیب نماینده بازتاب اندازه‌گیری شده در باند فرو سرخ نزدیک و باند سرخ هستند (کفایات مطلق و مسعودیان، ۱۳۹۷). مقدار این نمایه ± 1 است. در پژوهش حاضر چون هدف، بررسی پوشش گیاهی پویا ($NDVI$) در ارتباط با خشکسالی‌ها

بیشتر از عوامل درونی بوده به طوری در دهه اخیر نزدیک به ۶۰ درصد از گستره کشور با وردایی بارش حاصل از عوامل بیرونی مواجه بوده است. نهایتاً، برای هر ۶ حوضه آبریز کشور، سال‌های ۲۰۲۱ (۱۴۰۰.ش.) و ۲۰۱۹ (۱۳۹۸.ه.ش.) به عنوان نماینده خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال معرفی شدند به طوری که غیر از حوضه دریاچه ارومیه بقیه حوضه‌ها در وضعیت خشکسالی‌های بسیار شدید قرار داشتند.

وسعت کمتری داشتند. به علاوه، از لحاظ نوع ترسالی‌ها، وضعیت کمی متفاوت‌تر است زیرا فراوانی نوع ترسالی‌های غیر از حوضه خزر و دریاچه ارومیه نسبتاً کمتر است به طوری که در هر دو حوضه مذکور سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ و در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ ترسالی‌های نوع متوسط تا شدید چشمگیر بودند. قابل ذکر است غیر از عوامل محلی یعنی تابش و ناهمواری (علیجانی، ۱۳۸۴) و طبق پژوهش‌های عساکره و همکاران (۲۰۲۰)، سهم عوامل بیرونی بسیار



شکل ۲: پهنه‌بندی (IDW)^۱ شدت خشکسالی بر اساس شاخص *SPI* سالانه منتهی به ماه

^۱ Inverse distance weighting

دسامبر در دوره زمانی (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

همکاران (۱۳۹۱) در مورد پهنه بندی طول دوره‌های خشک همخوانی دارد و (کمترین مقدار، ۱۱/۶۸-) به حوضه قره قوم اختصاص دارد. حوضه‌های ایران مرکزی و خلیج فارس و دریای عمان نیز هر کدام به ترتیب در رده‌های بعدی خشکسالی قرار دارند.

همچنین جهت بررسی دقیق‌تر رفتار زمانی- مکانی شاخص مذکور، مجموع میانگین عددی کل دوره ۲۳ ساله برای هر شش حوضه در جدول ۳ آورده شده است. به‌طوری که مقادیری که با رنگ قرمز مشخص شده (خشک‌ترین مقدار، ۲۳/۵۹-) متعلق به حوضه‌هامون که این مقادیر با تحقیقات محمودی و

جدول ۳: میانگین سالانه میزان شاخص استاندارد شده بارش- تبخیر و تعرق (*SPEI*) نقاط شبکه بندی شده حوضه‌های آبریز اصلی ایران

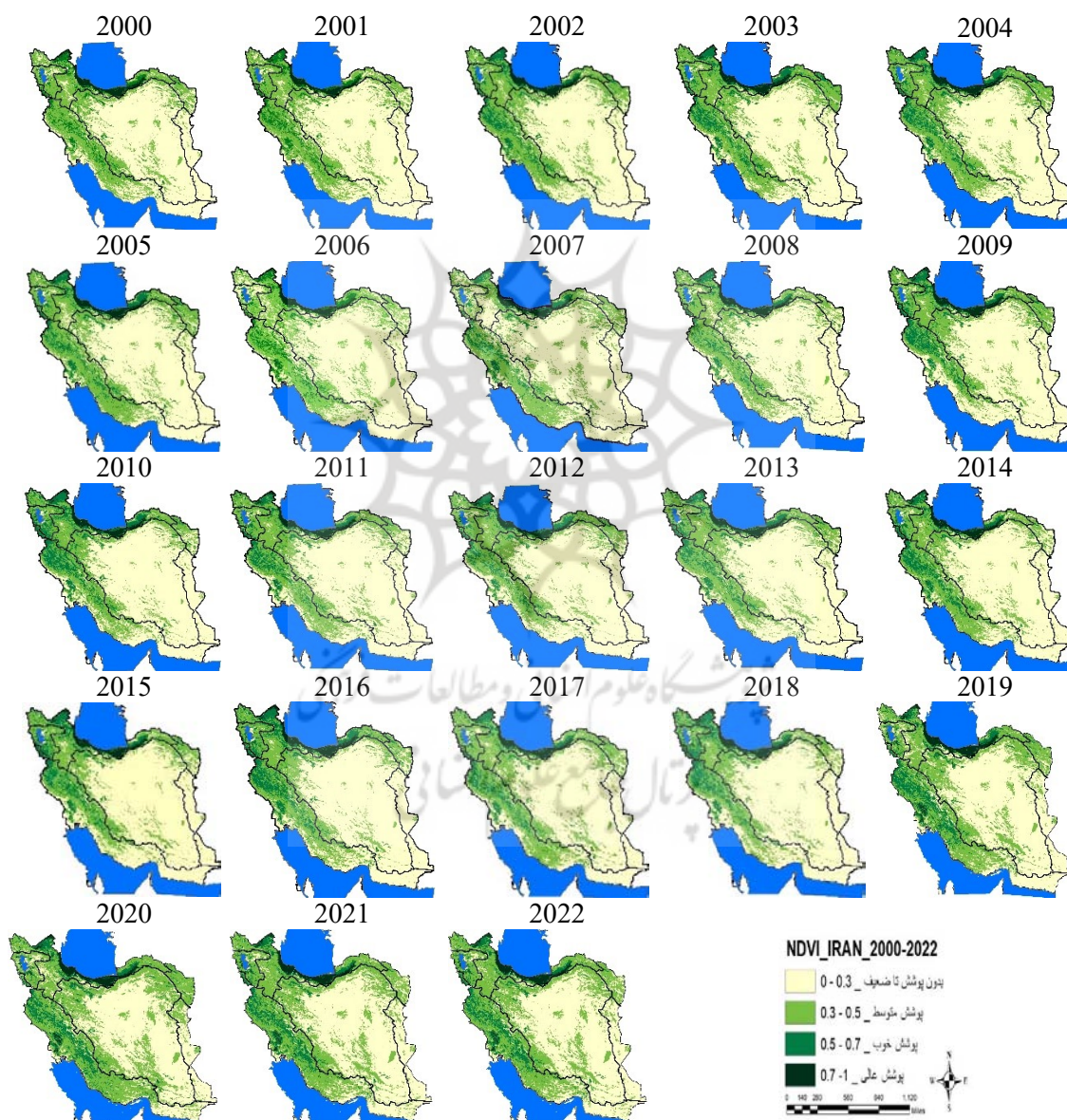
سال‌ها	ایران مرکزی	خلیج فارس و عمان	هامون	دریای خزر	قره قوم	دریاچه ارومیه
۲۰۰۰	-۱/۳۱	۱/۰۷	۱/۵۳	۱/۰۰	۱/۶۳	۱/۸۹
۲۰۰۱	-۱/۷۲	۱/۵۲	۱/۹۴	۱/۵۰	۱/۸۷	۲/۰۲
۲۰۰۲	۱/۰۵	۰/۷۹	۱/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۰۴
۲۰۰۳	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۶۸	۱/۵۸	۹۲	۰/۰۵
۲۰۰۴	۰/۱۵	۰/۲۲	۱/۱۹	۴۱	۳۲	۰/۰۵
۲۰۰۵	۰/۷۴	۰/۵۵	۲۹	۰/۷۲	۰/۱۱	۱/۱۶
۲۰۰۶	۰/۸۵	۰/۱۶	۱/۴۳	۰/۱۶	۱/۳۴	۰/۱۸
۲۰۰۷	۰/۶۴	۰/۹۲	۰/۸۲	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۲۲
۲۰۰۸	۱/۶۷	۱/۶۶	۱/۵۶	۱/۴۱	۲/۱۰	۱/۹۷
۲۰۰۹	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۲۵	۴۱	۹۲	۰/۲۰
۲۰۱۰	۱/۲۲	۰/۹۷	۱/۴۸	۵۴	۰/۴۲	۶۲
۲۰۱۱	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۸۰	۰/۰۳	۰/۶۶	۶۸
۲۰۱۲	۰/۱۹	۰/۶۳	۰/۱۶	۰/۱۴	۲۲	۰/۳۶
۲۰۱۳	۰/۹۷	۰/۷۷	۰/۸۹	۰/۷۳	۱/۰۲	۰/۵۰
۲۰۱۴	۱/۰۳	۰/۷۹	۱/۱۹	۱/۲۳	۱/۰۹	۰/۹۵
۲۰۱۵	۰/۷۳	۱/۲۵	۰/۴۸	۰/۴۴	۳۱	۰/۷۸
۲۰۱۶	۱/۳۱	۱/۴۱	۱/۴۲	۱/۴۱	۱۱	۲۹
۲۰۱۷	۱/۳۶	۱/۲۳	۱/۴۶	۱/۵۵	۰/۸۵	۱/۵۳
۲۰۱۸	۱/۲۴	۰/۶۷	۱/۹۰	۰/۴۵	۰/۹۰	۵۰
۲۰۱۹	۲۷	۱۰	۱۰	۰/۱۵	۲۲	۱۰
۲۰۲۰	۲۵	۰/۱۷	۳۵	۰/۰۹	۸۰	۱۵
۲۰۲۱	۲/۴۰	۲/۳۷	۲/۴۰	۲/۱۰	۲/۷۴	۱/۹۸
۲۰۲۲	۱/۶۳	۱/۵۹	۱/۴۱	۱/۶۴	۱/۳۴	۱/۹۴
مجموع سالها	-۲۰/۶۱	۲۰/۱۷	۲۳/۵۹	۱۱/۸۴	۱۱/۶۸	۱۳/۵۰

حاصل نشد. برخلاف انتظار و بدون لحاظ کردن در میانگین کل داده‌های ۲۳ سال، سال‌های (۲۰۲۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲)، حوضه‌های هامون، خلیج فارس و مرکزی از روند افزایشی برخوردار بودند، بنابر این رشد چشمگیر سبزی‌نگی را می‌توان به ترتیب در شمال، مرکز و کناره‌های حوضه خلیج فارس از خوزستان تا نزدیک بندرعباس و نیز در حوضه خشک

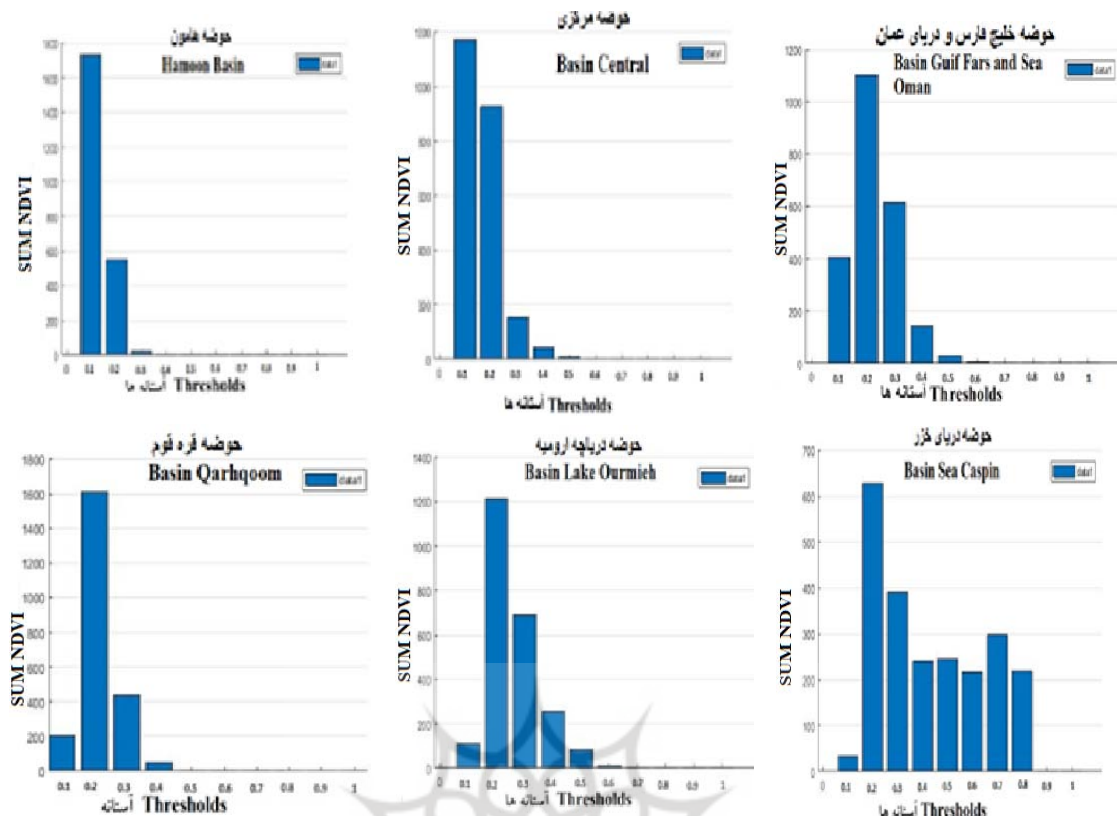
پویایی زمانی - فضایی شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (*NDVI*): توزیع زمانی-فضایی *NDVI* در شکل ۳ قابل مشاهده است، بررسی رفتار پویایی پوشش گیاهی در طی دوره زمانی مورد مطالعه ی این پژوهش منطبق با خشکسالی‌ها نبود به طوری که حتی در سال‌های خشک ۲۰۰۸ و ۲۰۲۲ تغییر خاصی در میانگین سالانه این شاخص *NDVI* در اکثر حوضه‌ها

هر ۱۰ آستانه از هر ۴ نوع پوشش ضعیف تا عالی برخوردار بود و شاخص $NDVI$ حوضه مرکزی نیز برخلاف انتظار تا آستانه ۰/۸ امتداد داشت. همچنین با محاسبه مجموع درصد فراوانی‌ها در میان هر ۶ حوضه بیشترین تجمع این شاخص در میان آستانه‌ها در رده طبقات ۰/۲ و ۰/۱ از نوع بدون پوشش تا ضعیف (۰/۳-۰/۰) قرار داشت، لذا جهت درک بیشتر نمودار مجموع درصد فراوانی شاخص $NDVI$ در هر ۶ حوضه آبریز در شکل (۴) نمایش داده شده است.

مرکزی وهامون در اشکال ۳، به خوبی مشاهده کرد. در بررسی داده‌های پیکسلی جدا از ظاهر اشکال ۳، تفاوت‌ها مقداری قابل لمس‌تر بودند زیرا در اکثر مناطق ایران جدا از نقش عرض جغرافیایی، دما، ارتفاع و رژیم بارشی، از پوشش گیاهی متوسط تا عالی برخوردار بودند و در رده طبقات بدون پوشش تا ضعیف قرار داشتند به‌طوری‌که حوضه‌های هامون و قره‌قوم با کم‌ترین فراوانی طبقات از پوشش متوسط (۰/۵-۰/۳) برخوردار بودند و حوضه خزر تنها حوضه‌ای بود که در



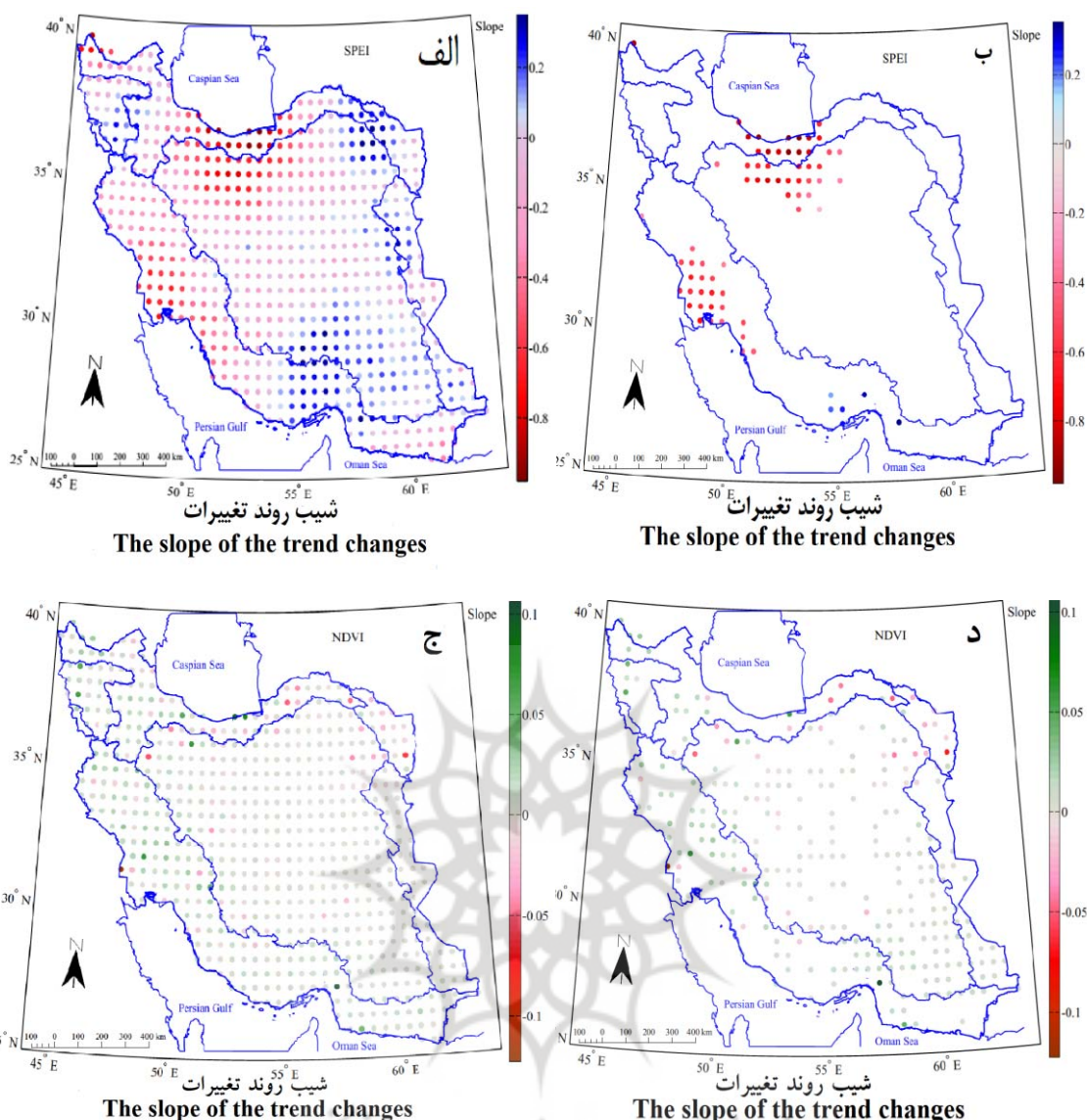
شکل ۳: توزیع فضایی،-زمانی شاخص تفاوت پوشش گیاهی استاندارد شده ($NDVI$) برای دوره زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ بر اساس پایگاه داده‌ای شبکه بندی شده ماهواره مودیس ($MODIS$).



شکل ۴: مجموع درصد فراوانی شاخص $NDVI$ شش حوضه آبریز کشور در میان ۱۰ آستانه طی دوره (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

به طوری که بر روی برخی از مناطق یاد شده نرخ کاهش شاخص به میزان ۰/۹- به ازای هر دهه می‌رسد. به بیانی دیگر طی دوره مورد واکاوی، بیش از ۲ واحد مقدار شاخص خشکسالی روند کاهشی داشته است که بیانگر افزایش شدت خشکسالی بر روی مناطق یاد شده است. برای شاخص $NDVI$ نیز یافته‌ها در شکل‌های ۵ (ج)، شامل تمام پیکسل‌های معنادار و بدون معنادار آمده است. همانطور که پیداست هم روند مثبت و هم روند منفی بر روی این شاخص در گستره‌ی ایران دیده می‌شود ولی نرخ وردایی روند بسیار کوچکی است با این توضیح، بر روی مناطق شمالی کشور روند منفی معنادار شاخص $NDVI$ بیشتر دیده می‌شود (نقاط قرمز رنگ شکل د) و در مناطق جنوبی و جنوب غرب کشور روند مثبت معنادار غلبه بیشتری دارد (نقاط سبز رنگ در شکل د). بنابر این اغلب مناطقی که روند معنادار در آنها دیده می‌شود نرخ روند کوچکتر از ۰/۱+ به ازای هر دهه است.

همچنین جهت بدست آوردن معناداری روند و برآورد نرخ تغییرات آن برای دو شاخص ($NDVI, SPEI$) از آزمون من کندال اصلاح شده و برآوردگر شیب سن بهره گرفته شد. در شکل ۵ یافته‌های حاصل از آزمون‌های یاد شده در سطح اطمینان ۹۰ درصد توأم با مقادیر شیب روند به ازای هر دهه نشان داده شده است. در شکل الف ($SPEI$) و کلیه نقاط معنادار و بدون معنادار طبق کل پیکسهای (۲۶۸۳۸۸۱) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود روند شاخص $SPEI$ در اغلب گستره‌ی ایران منفی است و بر روی برخی مناطق واقع در جنوب، شمال شرق و جنوب حوضه دریاچه ارومیه روند مثبت دیده می‌شود (شکل ۵ الف)، و روند منفی شاخص $SPEI$ بر روی مناطق جنوب غرب کشور در حوضه خلیج فارس و دریای عمان و بر روی مناطق شمالی کشور (شمال حوضه مرکزی و خصوصاً حوضه دریای خزر) به لحاظ آماری در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنادار است (شکل ۵ ب)،

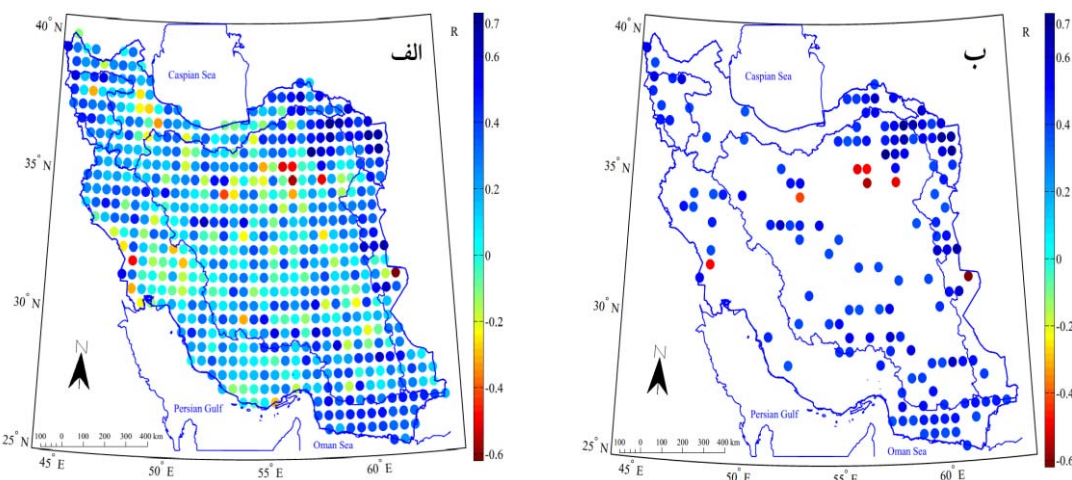


شکل ۵: الف) توزیع فضایی مقادیر شیب روند تغییرات $SPEI$ در حوضه‌های آبریز شش گانه ایران، ب) موقعیت جغرافیایی نقاط دارای روند معنادار در سطح احتمالاتی ۰/۰۹۰ اطمینان برای $SPEI$ در حوضه آبریز شش گانه ایران برای سالهای (۲۰۰۰ - ۲۰۲۲). ج) توزیع فضایی مقادیر شیب روند تغییرات $NDVI$ در حوضه آبریز شش گانه ایران، د) موقعیت جغرافیایی نقاط دارای روند معنادار در سطح احتمالاتی ۰/۰۹۰ اطمینان برای $NDVI$ در حوضه‌های آبریز شش گانه ایران برای سالهای (۲۰۰۰ - ۲۰۲۲).

که به ترتیب نشان دهنده میزان همبستگی ضعیف تا قوی می باشد به طوری که نقاط زرد تا قرمز رنگ نیز فاقد ضریب همبستگی و نقاط آبی پر رنگ نشان دهنده همبستگی بالا می باشد شکل (الف). همچنین درصد معناداری با میزان اطمینان ۹۰ درصد طبق شکل (ب)، در حوضه قره قوم و جنوب شرقی حوضه خلیج فارس از بقیه حوضه‌ها بیشتر بود و به عبارتی، هرچه از غرب کشور به طرف شرق حرکت کنیم بر

ارتباط بین دو شاخص $SPEI$ و $NDVI$: ارتباط بین مقادیر پیکسلی دو شاخص، تفاوت پوشش گیاهی استاندارد شده ($NDVI$) و شاخص استاندارد شده بارش- تبخیر و تعرق ($SPEI$)، از طریق ضریب همبستگی پیرسون در سطح معناداری ۹۰ درصد اطمینان طبق شکل ۶، برای هر ۶ حوضه بدست آمد. همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، میزان ضریب همبستگی در کل حوضه‌ها با نقاط آبی کم رنگ تا پر رنگ و نقاط زرد تا قرمز مشخص شده است

میزان همبستگی و شدت دو شاخص افزوده خواهد شود.



شکل ۶: الف) ضریب همبستگی پیرسون کل نقاط هر ۶ حوضه آبریز اصلی و شکل ب) نقاط معناداری با ۹۰ درصد اطمینان در طول ۲۳ سال (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

شده است به طوری بزرگترین همبستگی مثبت در میان کل پیکسل‌ها عدد ۰/۵ مربوط به کناره‌های دریای عمان (با توجه به پوشش گیاهی یکساله) و همبستگی منفی با مقدار ۰/۴- مربوط به گوشه شمال غربی حوضه (پوشش جنگلی متراکم و متناوب) بود. لذا علی‌رغم سطح پوشش گیاهی زیاد در این حوضه، همبستگی‌ها اغلب معنی دار نبودند و همچنین در حوضه مرکزی نیز علی‌رغم کاهش مساحت پیکره‌های آبی و قرارگیری در نواحی بسیار کم بارش (۱۰۲ میلی‌متر، مسعودیان، ۱۳۸۷)، مجموع درصد فراوانی شاخص پوشش گیاهی آن افزایش یافته (۰/۲ تا ۰/۶)، که بیان‌گر افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی (قنات و چاه) است (شکل ۴). همچنین از آنجا که توزیع پوشش گیاهی و تراکم آن رابطه مستقیم با توزیع دما دارد (خورشید دوست و همکاران، ۱۴۰۰) و دما نیز تاثیر بسیاری بر بازتابش و تولیدات سنجش از دور دارد (Schaepman et al., 2006) در نتیجه به علت حجم وسیع شن و ریگ و تاثیر بازتاب خاک (Montandon and Small, 2008)، در سنجنده‌های ماهواره‌ای آستانه طبقات در این حوزه بالا بود. به علاوه در سال‌های گذشته افزایش تقاضای محصولات کشاورزی در اکثر نقاط ایران در حوضه مرکزی هم بی‌تاثیر نبوده است.

طبقه‌بندی حوضه‌ها: از آنجا که بیشترین مساحت حوضه خزر از نوع پوشش جنگلی متراکم، است و در زمان کمبود بارش و خشکسالی این پوشش همواره محفوظ است، در نتیجه میزان ضریب همبستگی رقم بالای آن را نشان نداد، به طوری که بزرگترین رقم ضریب همبستگی عدد ۰/۶ بود که در انتهای باریکه شرقی حوضه مشاهده شد. کمترین مقدار در حوضه آبریز سد سفید رود با مقدار ۰/۳- بود و در اکثر حوضه‌ها تقریباً میزان همبستگی از نوع ضعیف تا متوسط برقرار بود (شکل ۶ الف و ب).

حوضه خلیج فارس و دریای عمان نیز، از لحاظ پوشش جنگلی بزرگ‌ترین حوضه آبریز ایران محسوب می‌شود (سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، ۱۴۰۲). نوع پوشش گیاهی آن در طبقات متوسط (۰/۳-۰/۵) قرار دارد (شکل ۳). شیب روند شاخص SPEI آن در طول ۲۳ سال منفی و کاهشی است به طوری که سال ۲۰۲۱ خشک‌ترین سال (۲/۳۷-)، در رده خشکسالی بسیار شدید ($\text{index} \leq -2.0$) و سال ۲۰۱۹ که در اکثر نقاط ایران ترسالی اتفاق افتاده است، میزان همبستگی با اطمینان ۹۰ درصد ($p < 0.1$) معناداری بین دو شاخص نامبرده، در حد متوسط بود که با دایره‌های رنگ آبی کم رنگ و پررنگ به ترتیب برای نشان دادن میزان همبستگی کمتر و بیشتر در شکل ۶ الف و ب، ارائه

تغییر نوع کشت در بیش از نیمی از سال بر میانگین شاخص $NDVI$ سالانه تاثیر گذاشته است و رده طبقات پوشش گیاهی از نوع متوسط ($0/5 - 0/3$) را برای خود حفظ کرده است. در مقابل، شاخص $SPEI$ آن نیز هر سه نوع خشکسالی را از بسیار شدید، شدید و متوسط تجربه کرده است و از نظر میزان همبستگی، دومین حوضه کشور بود که میزان ضریب همبستگی بین دو شاخص مذکور $0/7$ بود که در گوشه شمال شرقی حوضه قرار داشت. کمترین میزان ضریب همبستگی نیز در میان کل حوضه‌های کشور در این حوضه با میزان ($0/5$) در جنوب سمنان مشاهده شد (شکل ۶ الف و ب).

همچنین حوضه دریاچه ارومیه نیز با میانگین بارش سالانه ۱۸۰ تا ۵۰۰ میلیمتر (مهسفر و همکاران، ۱۳۹۰)، توزیع فضایی-زمانی شاخص ($NDVI$)، آن در رده طبقات متوسط ($0/5 - 0/3$) قرار داشت و از آنجا که بررسی پیکسلی شاخص $NDVI$ در هیچ کدام از حوضه بی تاثیر از شاخص $SPEI$ نبود لذا همبستگی برقرار بود و میزان همناوبی آن در میان کل پیکسل‌های حوضه رقم کمتری را نسبت به سایر حوضه‌ها نشان داد به طوری که بالاترین رقم ثبت شده ضریب همبستگی در این حوضه $0/4$ بود. تحقیقات کندی و همکاران (۱۴۰۲)، مبنی بر افزایش قابل توجه در مساحت کشت‌های آبی کشاورزی و باغی و پوشش جنگلی و همچنین کاهش پهنه‌های آبی و مراتع و رشد ساخت و سازها خصوصا در جنوب دریاچه و همچنین افزایش زمین‌های زراعی و باغی و جنگلی در مناطق غربی و شمال غربی دریاچه شاید یکی دیگر از دلایل کاهش میزان ضریب همبستگی بین دو شاخص باشد.

به علاوه، حوزه شرقی (هامون) نیز، با اقلیم گرم، بسیار کم بارش و خشک (مسعودیان، ۱۳۸۷) از کمترین آستانه پوشش گیاهی در نوع طبقات بدون پوشش تا مقدار کمی پوشش متوسط، برخوردار بود. در سال‌های اخیر خشکسالی‌های طولانی مدت و ویژگی‌های جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی (بوستانی و همکاران، ۱۴۰۰)، زمینه تغییر در نوع کشت را ایجاد کرده و پوشش گیاهی نه به بارش بلکه به آب جاری در

رودخانه (فیروزی و همکاران، ۱۳۹۵) و کشت بستر خشک شده‌هامون در جنوب حوضه به مقدار فراوان (شکریاری و همکاران، ۱۴۰۰) و با زیر کشت رفتن زمین‌های کشاورزی در سالی ۲ بار، روند رشد و نوع پوشش گیاهی آن به مقدار ناچیزی افزایش یافته داده است. البته این افزایش به معنای همبستگی بین دو شاخص $NDVI$ و $SPEI$ نیست زیرا میزان همبستگی در این حوضه و سایر حوضه‌ها نسبت به رشد گیاهان یکساله و مرتعی بیشتر قابل قیاس است نه آبیاری مکانیزه و کشاورزی. همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است بالاترین مجموع درصد فراوانی شاخص $NDVI$ آن در رده طبقات $0/2$ بود ولی میزان همبستگی پیکسلی دو شاخص مذکور با مقدار $0/7$ دارای ضریب همبستگی بالایی بود که ناشی از نوع پوشش گیاهی یکساله است و تنها نقطه‌ای که در آن همبستگی دیده نشد روی پیکسل‌های دریاچه‌هامون به میزان عددی $0/6 -$ بود (شکل ۶ الف و ب). همچنین نوع پوشش گیاهی و شاخص سالانه $NDVI$ حوضه قره قوم نیز، در طبقات متوسط قرار داشت ($0/5 - 0/3$)، و از آنجا که رژیم بارشی این حوضه بهاری است و رشد گیاهان با گرما و تابش خورشید در روزهای تقریباً بلند اوایل بهار همزمانی دارد (آذرانی و قربانی، ۱۳۹۱). در نتیجه مقدار ضریب همبستگی در این حوضه در میان کل سال‌ها و برای کل محدوده پیکسلی حوضه رقم مثبت و ($0/7$) و بیشتر) بالایی بود که به صورت نقاط آبی پر رنگ تا متوسط در شکل‌های ۶ الف و ب، قابل مشاهده است.

نتیجه گیری

درک تغییرات پویایی پوشش گیاهی در طول خشکسالی برای مدیریت کشاورزی و اکولوژیکی و سازگاری با تغییرات آب و هوایی از اهمیت بالایی برخوردار است. از جنبه‌های ناشناخته در آب و هوای ایران، بررسی پویایی پوشش گیاهی با توجه به تاثیر خشکسالی در حوضه‌های آبریز از طریق تولیدات سنجش از دور است. شاخص‌های مختلفی جهت بررسی پویایی پوشش گیاهی ارائه شده است که از میان آنها شاخص نرمال شده تفاوت پوشش

روند منفی، بر روی مناطق جنوب غرب کشور در حوضه خلیج فارس و دریای عمان و بر روی مناطق شمالی کشور (شمال حوضه مرکزی و مرکز حوضه دریای خزر) شدیدتر است و به لحاظ آماری در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنادار است و نرخ کاهش شاخص آن به میزان ۰/۹- به ازای هر دهه رسید که نشان دهنده افزایش شدت خشکسالی بر روی مناطق یاد شده است.

در شاخص *NDVI* نیز یافته‌ها نشان داد که هم روند مثبت و هم روند منفی در گستره‌ی ایران دیده می‌شود ولی نرخ وردایی روند آن بسیار کوچک است به طوری که بر روی مناطق شمالی کشور روند منفی معنادار شاخص *NDVI* بیشتر دیده می‌شود و در مناطق جنوب و جنوب غرب کشور روند مثبت معنادار غلبه بیشتری دارد به عبارتی نرخ روند کوچکتر از ۰/۱ به ازای هر دهه است.

نتیجه روابط دو شاخص (*SPEI* و *NDVI*) بین حوضه‌ای نیز نشان داد که روابط نسبتاً متوسطی بین دو شاخص در کل حوضه‌ها برقرار است به طوریکه قوی‌ترین ضریب همبستگی در پهنای حوضه‌ها با نرخ ۰/۳ تا ۰/۷ مربوط به حوضه‌های قره قوم و جنوب شرقی حوضه خلیج فارس بود و کمترین ضریب هم در حوضه دریاچه ارومیه مشاهده شد. به عبارتی هرچه از نیمه غربی کشور به طرف نیمه شرقی حرکت کنیم بر میزان همبستگی دو شاخص افزوده خواهد شد.

با توجه به آنچه گفته شد، به نظر می‌رسد نیمه شرقی کشور از لحاظ خشکسالی آسیب پذیرتر است و از آنجا که احتمالاً کشور ما در آینده خشکسالی‌های شدیدتری را تجربه کند، لذا باید جهت مدیریت صحیح منابع آب، حوضه‌های حساس به خشکسالی شناخته شود، خصوصاً در کشت محصولات کشاورزی اقدامات لازم جهت مصرف بهینه آب با تنوع محصول در نظر گرفته شود زیرا تقاضای روز افزون و مصرف بیشتر محصولات کشاورزی و غذایی نیازمند مدیریت صحیح منابع آب است.

گیاهی (*NDVI*) دارای محبوبیت فراوانی است. در این مطالعه با استفاده از شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (*SPEI*) و نقش خاصی که این شاخص در پایش خشکسالی‌ها برای مناطق خشک و فوق‌العاده خشک دارد هر شش حوضه آبریز ایران را در طول ۲۳ سال (۲۰۰۰-۲۰۲۲)، از طریق پایگاه داده‌های شبکه بندی شده مورد بررسی قرار گرفت.

رفتار زمانی- مکانی شاخص (*SPEI*) در این پژوهش نشان داد که بیشترین خشکسالی‌ها در هر ۶ حوضه آبریز کشور، به ترتیب از نوع خشکسالی‌های متوسط و شدید هستند که این با مطالعات خیری و همکاران (۲۰۲۰) مطابق دارد، به طوری که سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۲ به ترتیب سهم بیشتری را از هر دو نوع خشکسالی (متوسط و شدید) دارا بودند و تداوم نوع خشکسالی‌های بیشتر از ترسالی‌ها بود، به طوری که گستره‌ی مکانی آنها از غرب به شرق با وسعت افزایشی و از جنوب به شمال با وسعت کاهشی همراه بود و در طی دوره مورد مطالعه، سال‌های ۲۰۲۱ (۱۴۰۰ ه. ش.) و ۲۰۱۹ (۱۳۹۸ ه. ش.)، به ترتیب نماینده کم باران ترین و پر باران ترین سال و حوضه‌ی هامون با مقدار عددی ۲۳/۵۹- و حوزه قره قوم با عدد ۱۱/۶۸- به ترتیب خشکترین و ترترین حوضه معرفی شدند.

همچنین از لحاظ شاخص *NDVI* باز حوضه‌هامون، کم پوشش ترین حوضه با آستانه‌های ۰/۱ تا ۰/۲ از نوع ضعیف تا متوسط بود و حوضه خزر با ثبت بیشترین مقدار از مجموع درصد فراوانی‌ها در هر ۱۰ آستانه در شاخص *NDVI*، از هر ۴ نوع رده پوشش گیاهی برخوردار بود.

همچنین نتایج آزمون من- کندال اصلاح شده و شیب سن دو شاخص (*NDVI*, *SPEI*) در هر دهه نشان داد که روند شاخص *SPEI* در اغلب حوضه‌های ایران منفی (افزایش خشکسالی‌ها) است که این با مطالعات قبای سوق و همکاران، ۱۳۹۴ در مورد روند منفی اکثر ایستگاه‌های ایران همخوانی دارد. به طوری که این

منابع

- ۱- احمدی، م.، شکیب، د. و داداشی رودباری، ع.ع. ۱۳۹۷. بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مولفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری امواج هوایی فصلی ایران. زمین و فیزیک فضا، ۴۵ (۱)، ۲۱۱-۲۳۳.
- ۲- ابراهیمی، م. و ابراهیمی خوسفی، ز. ۱۳۹۳. تحلیل روند تغییرات منابع آب و عوامل موثر بر آن در فلات مرکزی ایران با استفاده از محصولات ماهواره ای. مجله سنجش از دور و GIS ایران، ۱۵ (۴)، ۴۱-۶۰.
- ۳- ارشاد، م.، کشتکار، ع.، حسینی، س. و افضلی، ع. ۱۳۹۰. تحلیل روند زمانی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های ناپارامتری من کندال و سن (مطالعه موردی: یزد- دشت اردکان). جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۲ (۴)، ۸۷-۱۰۶.
- ۴- اسکندری دامنه، ح.، زهتابیان، گ.، خسروی، ح.، آذرنبیان، ح. و براتی، ع. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر خشکسالی بر روند تغییرات پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از تکنیک سنجش از دور: مطالعه موردی استان هرمزگان). مهندسی اکوسیستم کویر، ۹ (۲۸)، ۱۳-۲۸.
- ۵- امیدوار، ک.، نبوی زاده، م.، مزیدی، ع.، غفاریان مالمیری، ح. و محمودی، ص. ۱۳۹۱. حساسیت شاخص خشکی پوشش گیاهی (VDI) به بازتاب باندهای مادون قرمز مختلف موج کوتاه در مناطق خشک و نیمه خشک (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان). مجله سنجش از دور و GIS ایران، ۱۴ (۴)، ۱۰۳-۱۱۸.
- ۶- باعقیده، م.، علیجانی، ب.، ضیائیان، ص. ۱۳۹۰. ارزیابی امکان استفاده از شاخص *NDVI* برای تحلیل و پایش خشکسالی در استان اصفهان. فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۲ (۴)، ۱-۱۶.
- ۷- باقری، س.، حیدری علمدارلو، ا.، خسروی، ح.، ابوالحسنی، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی اثر خشکسالی هواشناسی بر پویایی پوشش گیاهی در ایران. نشریه مرتع، ۱۵ (۴): ۶۲۲-۶۳۷.
- ۸- بذرافشان، ا.، محمودزاده، ف.، عسگری نژاد، ع. و بذرافشان، ج. ۱۳۹۸. ارزیابی تطبیقی شاخص‌های *SPI*، *RDI* و *SPEI* در تحلیل روند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۲ (۳)، ۱۱۷-۱۳۱.
- ۹- ترابی نژاد، ن.، زرین، ع. و داداشی رودباری، ع. ۱۳۹۲. تحلیل انواع خشکسالی‌ها و ویژگی‌های آنها در ایران با استفاده از شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (*SPEI*) آب و خاک، ۳۷ (۳)، ۴۷۳-۴۸۶.
- ۱۰- جهانبخش اصل، س.، سریع صراف، ب.، خورشید دوست، ع. م. و رستم زاده، ح. (۱۳۸۸). ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب و تجزیه و تحلیل دو دوره خشکسالی. جغرافیا، ۷ (۲۳)، ۱۱۷-۱۳۲.
- ۱۱- خلیلی، الف. و بذرافشان، ج. ۲۰۰۴. تحلیل روند بارش سالانه، فصلی و ماهانه در ایران طی ۱۱۶ سال گذشته صحرای (۹): ۲۵-۳۲.
- ۱۲- دستورانی، م.، ولی، ع.، سپهر، ع. و کمکی، ج.ب. ۱۳۹۴. تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی با استفاده از ماهواره مودیس خراسان رضوی. مهندسی اکوسیستم بیابان، ۴ (۷)، ۸-۱.
- ۱۳- دوستان، ر. و علیجانی، ب. ۱۳۹۵. تغییر اقلیم ایران: رویکرد همدیدی. مجله جغرافیا و توسعه منطقه ای، ۱۳ (۲)، ۸۹-۱۱۳.
- ۱۴- رضایی بنفشه، م.، جهانبخش اصل، س.، ولی زاده کامران، ک. ۱۳۹۳. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه سفیدرود با پردازش تصویر ماهواره ای. فضای جغرافیایی، ۱۳ (۴۴)، ۲۴۱-۲۶۲.
- ۱۵- زارع ابیانه، ح.، قباي ثوق، م. و مساعدی، ع. ۱۳۹۴. پایش خشکسالی بر اساس شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق بارش (*SPEI*) تحت تأثیر تغییرات آب و هوا. آب و خاک، ۲۹ (۲)، ۳۷۴-۳۹۲.
- ۱۶- زادمهر، ح. و فرخیان فیروزی، ع. ۱۳۹۱. بررسی دمای خاک با استفاده از آزمون غیر پرامتری من-کندال اصلاح شده در مناطق منتخب استان خوزستان. مجله تحقیقات خاک ایران، ۳۵ (۴)، ۴۲۹-۴۴۳.
- ۱۷- ساری صراف، ب. و خلخالی، م. ۱۳۸۸. تعیین حساسیت پوشش اراضی در برابر خشکسالی آینده با استفاده از *MFI* و نقش آن در برابر پراکندگی سکونتگاه‌ها در دشت سراب. فصلنامه جغرافیای فیزیکی، ۲ (۵)، ۴۹-۶۲.
- ۱۸- شاکریاری، م.، احسانی، ع.، نصرآبادی، ط و محمودی، ص. ۱۳۹۱. بررسی قابلیت داده‌های لندست برای ارزیابی تغییرات پوشش زمین (مطالعه موردی: تالاب بین المللی هامون). مهندسی اکوسیستم بیابان، ۵ (۱۰)، ۶۹-۸۴.
- ۱۹- شهبایی کوتنایی، عساکره، ح. ۱۳۹۲. تحلیل روند زمانی- مکانی فراوانی بارش‌های شدید روزانه در ایران. مجله علوم آب و خاک، ۲۷ (۲)، ۲۰۹-۲۲۲.

- ۲۰ - صفری شاد، م.، حبیب نژاد روشن، م.، و ایلدورومی، ع. . ارزیابی شاخص *NDVI* در پایش خشکسالی با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی: استان اصفهان). فصلنامه علمی- پژوهشی داده‌های جغرافیایی (*SEPEHR*)، ۲۵(۱۰۰)، ۳۵-۴۴.
- ۲۱- عباسی، ح.، اعلمی، م. ت.، و فرجی، م. ۱۳۹۰. بررسی روند دبی و بار رسوب در مردقچای با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک. هیدروژئومورفولوژی، ۹(۳۲)، ۸۷-۱۰۴.
- ۲۲- عرفانیان، م.، وفایی، ن.، و رضاییان زاده، م. ۱۳۹۳. روشی جدید برای ارزیابی خطر خشکسالی با ادغام داده‌های بارندگی ماهانه *TRMM* و داده‌های *Terra/MODIS NDVI* در استان فارس، ایران. تحقیقات جغرافیای فیزیکی، ۴۶(۱)، ۹۳-۱۰۸.
- ۲۳- عراقی نژاد، س.، انصاری قوجغر، م.، پورغلام امیگی، م.، لیاقت، ع.، و بذرافشان، ج. ۱۳۹۱. تأثیر نوسانات اقلیمی بر فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در ایران. مهندسی اکوسیستم بیابان، ۷(۲۱)، ۱۳-۳۲.
- ۲۴- عساکره، ح. ۱۳۹۵. مبانی تحقیق در اقلیم شناسی. انتشارات دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
- ۲۵- عساکره، ح. ۱۳۹۷. مبانی اقلیم شناسی آماری. انتشارات دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
- ۲۶- عساکره، ح.، مسعودیان، س.ع.، و ترکرانی، ف. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات ده ساله بارش ایران در چهار دهه (۱۳۹۵-۱۳۵۵). مجله جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۵(۷۶)، ۱۸۷-۲۰۲.
- ۲۷- فاطمی نیا، ف.س.، سبحانی، ب.، مسعودیان، س.ا. ۱۳۹۷. تجزیه و تحلیل *LAI* در ایران بر اساس داده‌های ماهواره ای *MODIS*. مجله تحقیقات کاربردی در علوم جغرافیایی، ۱۸(۴۸)، ۴۱-۵۷.
- ۲۸- فیروزی، ف.، طاووسی، ط. و محمودی، پ. ۱۳۹۸. بررسی حساسیت شاخص‌های پوشش گیاهی *NDVI* و *EVI* به سال‌های خشک و مرطوب در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: دشت سیستان، ایران). فصلنامه علمی- پژوهشی داده‌های جغرافیایی (*SEPEHR*)، ۲۸(۱۱۰)، ۱۶۳-۱۷۹.
- ۲۹- کفایات مطلق، ا.ر.، و مسعودیان، س.ا. ۱۳۹۷. تحلیل روند شاخص *NDVI* در طبقه ارتفاعی ایران. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۸(۴)، ۷۱-۸۴.
- ۳۰- کلاهدوزان، ع.، دین پژوه، ی.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، اسدی، ا.، و دربندی، س. ۱۳۹۴. تأثیر خشک شدن رودخانه زاینده رود بر نوسانات آبخوان نجف آباد طی دو دهه گذشته. مجله تحقیقات خاک و آب ایران، ۴۶(۱)، ۸۱-۹۳.
- ۳۱- مفاحری، ا.، خالدی، س.، شمسی پور، ع.ع.، فلاحی خوشجی، م.، کرمانی. ۱۳۹۵. تجزیه و تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص *NDVI* در دشت قروه و دهگلان. پژوهش‌های کاربردی در علوم جغرافیایی، ۱۶(۴۱)، ۷۷-۹۴.
- ۳۲- محمودی، پ.، شیرازی، س.ع.، امیر جهانشاهی، س.م.، فیروزی، ف.، مظهر، ن. ۱۳۹۰. شناسایی تخریب طولانی مدت پوشش گیاهی در بلوچستان در جنوب غربی آسیا با استفاده از محصولات *NDVI* حسگر مدیس ماهواره terra. مجله مهندسی و مدیریت محیط زیست، ۲۰(۲)، ۲۹۳-۳۰۰.
- ۳۳- محمودی، پ.، امیر جهانشاهی، س.م.، فیروزی، ف. ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات بلندمدت سری زمانی پوشش گیاهی دشت سیستان در مقیاس پیکسلی با استفاده از محصولات حسگر *MODIS* ماهواره *Terra*. در دومین کنفرانس بین المللی علم اطلاعات جغرافیایی مبانی و کاربردهای میان رشته ای، ۳۰ آذر ۱۳۹۰، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۳۴- محمودی، پ.، خسروی، م.، مسعودیان، س.ع.، و علیجانی، ب. ۱۳۹۵. بررسی روند تغییرات فراوانی روزهای با شرایط فراگیر و نیمه فراگیر یخبندان. مجله جغرافیا و برنامه ریزی، ۱۹(۵۴)، ۳۰۳-۳۲۷.
- ۳۵- محمودی، پ.، پروین، ن.، رضایی، ج. ۱۳۹۲. پهنه بندی ایران بر اساس طول دوره‌های خشک. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۳، صص ۸۵-۱۰۶.
- ۳۶- مهسفر، ح.، مکنون، ر.، و ثقفیان، ب. ۱۳۸۹. تأثیر تغییر اقلیم بر سطح آب دریاچه ارومیه. ایران-پژوهش منابع آب، ۷(۱)، ۴۷-۵۸.
- ۳۷- مسعودیان، س.ع.، و دارند، م. ۱۳۹۲. تحلیل و شناخت تغییرپذیری در شاخص‌های شدید بارش در ایران طی دهه‌های گذشته. مجله جغرافیا و توسعه منطقه ای، ۱۱(۱)، ۲۳۹-۲۵۷.
- ۳۸- میرموسوی، س.، کریمی، ح. ۱۳۹۲. تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجش *MODIS* مورد: استان کردستان. جغرافیا و توسعه، ۱۱(۳۱)، ۵۷-۷۶.

- ۳۹- محمدی، ب. (۱۳۹۰). تحلیل روند بارش سالانه ایران. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، ۳۲(۳) (پیاپی ۴۳)، ۹۵-۱۰۶.
- ۴۰- منتظری، م.، کفایت مطلق، ا.ر. ۱۳۹۷. میانگین بلندمدت تحلیل پوشش گیاهی ایران با استفاده از شاخص *NDVI* جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۹(۳)، ۱-۱۴.
- ۴۱- مظفری، غ.ا. ۱۳۸۵. عدم انطباق خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دو حوضه مجاور در دامنه کوه شمالی شیرکوه یزد. مجله برنامه ریزی فضایی و ژئوماتیک، ۱۰(۱)، ۱۷۳-۱۹۰.
- ۴۲- نیک پور، ن.، نگارش، ح.، فتوحی، س.، حسینی، س. ز.، و بهرامی، س. ۱۳۹۸. پایش روند پوشش گیاهی یکی از مهم ترین شاخص‌های تخریب اراضی (در استان ایلام) را تغییر می دهد. مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۴): ۲۱-۴۸.
- ۴۳- نصرتی، ک. ۱۳۹۳. ارزیابی شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق بارش (SPEI) برای شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران. علوم محیطی، ۱۲(۴)، ۶۳-۷۴.
44. Al-Quraishi, A. M. F., Gaznayee, H. A., & Crespi, M. 2021. Drought trend analysis in a semi-arid area of Iraq based on Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Water Index and Standardized Precipitation Index. *Journal of Arid Land*, 13, 413-430.
45. Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1-2), 95-120.
46. Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Angulo-Martínez, M. 2010. A Multiscalar Global Drought Dataset: The SPEIbase: A New Gridded Product for the Analysis of Drought Variability and Impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1351-1356. doi:10.1175/2010bams2988.1.
47. Chávez, R. O, Christie, D. A., Olea, M., & Anderson, T. G. 2019. A Multiscale Productivity Assessment of High Andean Peatlands across the Chilean Altiplano Using 31 Years of Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 11(24), 2955.
48. Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. 2015. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 35 p.
49. Grist, J., Nicholson, S. E., Mpolokang, A. 1997. On the use of *NDVI* for estimating rainfall fields in the Kalahari of Botswana. *Journal of Arid Environments*, 35(2), 195-214.
50. Guttman, N. B. 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 113-121.
51. Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. 2011. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488.
52. Helali, J., Asaadib, Sh., Jafarie, T., Habibi, M., Salimi, S., Momenpour, S., Shahmoradi, S., Hosseini, S., Hessari, B., & Saeid, V. 2017. Drought monitoring and its effects on vegetation and water extent changes using remote sensing data in Urmia Lake watershed, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(15), 2107-2128.
53. Houborg, R., Fisher, J. B., & Skidmore, A. K. 2015. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1-6.
54. Huang, S., Tang, L., Hupy, P. H., Wang, Y., & Shao, G. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (*NDVI*) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1- 6.
55. Huete, A. R. 1988. A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
56. Karnieli, A., Bayasgalan, M., Bayarjargal, Y., Agam, N., Khudulmur, S., & Tucker, C. 2006. Comments on the use of the Vegetation Health Index over Mongolia. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10), 2017-2024.
57. Keyantash, J., & Dracup, J. 2002. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180.
58. Klisch, A., & Atzberger, C. 2016. Operational drought monitoring in Kenya using MODIS *NDVI* Time Series. *Remote sensing*, 8(4), 267.

59. Liu, H. Q., & Huete, A. 1995. A feedback-based modification of the *NDVI* to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457–465.
60. Lv, W., Wu, C., Yeh, P. J.-F., & Hu, B. X. 2022. Spatio-temporal variability of dryness and wetness based on standardized precipitation evapotranspiration index and standardized wetness index and its relation to the normalized difference vegetation index. *International Journal of Climatology*, 42(2), 671–690.
61. Ma, J., Zhang, C., Li, S., Yang, C., Chen, C., & Yun, W. 2023. Changes in Vegetation Resistance and Resilience under Different Drought Disturbances Based on *NDVI* and *SPEI* Time Series Data in Jilin Province, China. *Remote Sensing*, 15(13), 3280.
62. Montandon, L.M., Small, E. E. 2008. The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from *NDVI*. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1835–1845.
63. Palmer, W.C. 1965. Meteorological drought. Research Paper No. 45, U.S. Dept. of Commerce, *Weather Bureau, Washington*, 58p.
64. Peng, J., Dadson, D., Hirpa, F., Dyer, E., Lees, T., Miralles, D., Vicente-Serrano, S., & Funk, C. 2020. High resolution Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*) dataset for Africa. *Earth System Science Data*, 12, 753–769.
65. Pyarali, K., Peng, J., Disse, M., Tuo, Y. 2022. Development and application of high resolution *SPEI* drought dataset for Central Asia. *Scientific Data*, 9, 172
66. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, H. Y., Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119 –126.
67. Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect of Natural Vegetation). *NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt, MD: NASA/ GSFC*.
68. Schaepman-Strub, G., Schaepman, M. E., Painter, T. H., Dangel, S., Martonchik, J. V. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 27-42.
69. Vicente-Serrano, S. M. 2007. Evaluating the Impact of Drought Using Remote Sensing in a Mediterranean, Semi-arid Region. *Natural Hazards*, 40, 173–208.
70. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - *SPEI*. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.
71. Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., Sanchez-Lorenzo, A. 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(1), 52-57.
72. Wang, F.-M., Huang, J.-F., Tang, Y.-L., Wang, X.-Z. 2007. New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice. *Rice Science*, 14(3), 195–203.
73. Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Coonrod, J. E. A., Dahm, C. N. 2004. Long-term vegetation monitoring with *NDVI* in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 58(2), 249–272.
74. Wu, C., Zhong, L., Yeh, P. J.-F., Gong, Z., Lv, W., Chen, B., Zhou, J., Li, J., Wang, S. 2023. A evaluation framework for quantifying vegetation loss and recovery in response to meteorological drought based on *SPEI* and *NDVI*. *Science of the Total Environment*, 906, 167632.
75. Zhan, Y., Ma, C., Yan, Y., Zhu, J., Ji, Y., Ma, C., Luo, Y. 2022. Spatial differentiation characteristics of vegetation greening rates and climate attribution in China's arid and semi-arid regions. *Global Ecology and Conservation*, 46, e02563.
76. Zhang, Q., Kong, D., S., Singh, V. P., Shi, P. 2017. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 152, 1-11.

77. Zhao, Z., Zhang, Y., Liu, L., Hu, Z. 2018. The impact of drought on vegetation conditions within the Damqu River Basin, Yangtze River Source Region, China. *PLoS ONE* 13(8): e0202966.

