



Received: 09/08/2024

Accepted: 28/09/2024

Investigation of Drought Trend Using Satellite Imagery (Case study: West Azerbaijan Province)

Ehsan Soureh

M.A., Climatology, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

Mohammad Sadegh Zangeneh¹

M.A., GIS, Agricultural Engineering System and Natural Resources Organization, Khuzestan Province

Akram Keramat

Department of RS & GIS, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract

Drought is a complex meteorological phenomenon that depends on several environmental factors. This phenomenon is a common natural disaster that is recognized as one of the ecological, hydrological, agricultural, and economic concerns of humanity. In this study, satellite data and Google Earth Engine were used to investigate the drought phenomenon in West Azerbaijan province. In order to achieve this research goal, four indices, namely SPI, NDVI, VCI, and TCI, were selected and utilized for a 23-year period from satellite images of the years 2000 to 2022. In this study, 526 images were used for the NDVI, VCI, and TCI indices, and 111 images were used to calculate the SPI index. The research results showed that severe and moderate droughts were experienced in most parts of the province in the years 2000, 2008, 2010, 2017, 2021, and 2022. Additionally, various levels of drought existed in the central, northern, and southern parts of the province in the years 2002, 2006, and 2019. Moreover, normal conditions were observed in all areas of the province in the years 2001, 2004, 2005, 2007, and from 2012 to 2014 and 2016. Comparing the results of the indices, it can be stated that the VCI and SPI indices were the most sensitive indices for drought identification in the West Azerbaijan province, as they were able to effectively identify different types of droughts. Furthermore, the NDVI index, due to its relatively good sensitivity for drought identification, can indicate a decrease in vegetation cover during drought years. Overall, the results of this study demonstrated that West Azerbaijan province is at risk of drought.

Key words: West Azerbaijan Provinc, Satellite Images, Drought, Drought Indices, MODIS



بررسی روند خشک‌سالی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی)

احسان سوره

کارشناس ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

محمدصادق زنگنه^۱

کارشناس GIS، سازمان نظام مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، خوزستان، ایران

اکرم کرامت

گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

چکیده

خشک‌سالی یک پدیده آب و هواشناسی پیچیده بوده که متکی به چندین عامل محیطی است. این پدیده یک بلای طبیعی رایج بوده که بعنوان یکی از دغدغه‌های اکولوژیکی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی بشر شناخته شده است. در این پژوهش به کمک داده‌های ماهواره‌ای و سامانه گوگل ارث انجین به مطالعه پدیده خشک‌سالی در استان آذربایجان غربی پرداخته شده است. در راستای تحقق این پژوهش، چهار شاخص VCI ، $NDVI$ ، SPI و TCI انتخاب و برای یک دوره ۲۳ ساله از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استفاده گردید. در این مطالعه تعداد ۵۲۶ تصویر برای شاخص‌های VCI ، $NDVI$ و TCI و ۸۰۸۱ تصویر جهت محاسبه شاخص SPI استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد، در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ خشک‌سالی‌های شدید و متوسط در بیشتر پهنه استان تجربه شده و همچنین در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹ در قسمت‌های مرکزی، شمالی و جنوبی استان ترسالی‌های مختلفی وجود داشته است. همچنین شرایط نرمال نیز در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ در تمامی مناطق استان وجود داشته است. در مقایسه بین نتایج شاخص‌ها می‌توان بیان نمود که در پهنه استان آذربایجان غربی شاخص VCI و SPI حساس‌ترین شاخص برای شناسایی خشک‌سالی بوده که قادرند انواع خشک‌سالی‌ها را به خوبی شناسایی کنند. همچنین شاخص $NDVI$ با توجه به حساسیت نسبتاً خوبی که برای شناسایی خشک‌سالی دارد، قادر است کاهش پوشش گیاهی در سال‌های خشک‌سالی را نشان دهد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که استان آذربایجان غربی در معرض خطر خشک‌سالی است.

کلمات کلیدی: آذربایجان غربی، تصاویر ماهواره، خشک‌سالی، شاخص‌های خشک‌سالی، MODIS.



مقدمه

خشک‌سالی یکی از پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی است که تاکنون توسط بشر شناخته شده است (Khan and Gilani, 2021a). رخداد خشک‌سالی ناگهانی نبوده بلکه به کندی در طول زمان افزایش می‌یابد. افزایش و کاهش برخی از شاخص‌های اقلیمی نظیر دمای هوا، رطوبت، سطح آب زیرزمینی، رواناب سطحی، دمای سطح زمین، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، بارندگی و سطح گرما و غیره می‌تواند علت اصلی خشک‌سالی در یک منطقه باشد (Khan et al, 2020). خشک‌سالی پدیده‌ای طبیعی است که با کمبود منابع آب در یک منطقه جغرافیایی بزرگ همراه است و در طول دوره زمانی قابل توجهی گسترش می‌یابد (Haied et al, 2017). این پدیده طبیعی دارای انواع مختلفی است. خشک‌سالی کشاورزی (خشکی محصولات زراعی)، خشک‌سالی هواشناسی (بارش کمتر از حد نرمال)، خشک‌سالی هیدرولوژیکی (سطح پایین آب در نهرها، مخازن و آبهای زیرزمینی) و خشک‌سالی اقتصادی-اجتماعی از انواع خشک‌سالی می‌باشد (Khan and Gilani, 2021a). خشک‌سالی تمامی اقشار مردم را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Zargar et al, 2011). این پدیده بر بخش‌های اجتماعی-اقتصادی مانند گردشگری، انرژی، تامین آب، کشاورزی، زیرساخت‌ها و اقتصاد کشورها تأثیر می‌گذارد (Meza et al, 2019). تقریباً ۸۵ درصد از بلایای طبیعی مربوط به حوادث شدید هواشناسی است که در این میان خشک‌سالی بیشترین خسارت را به همراه دارد (Haied et al, 2017). برای کاهش خسارات ناشی از خشک‌سالی، تشخیص و توصیف خشک‌سالی بسیار مهم است (Zargar et al, 2011). پایش خشک‌سالی به طور سنتی براساس مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی بوده است (Tran et al, 2020). اخیراً شناسایی خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی محقق شده است. با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان گستره و شدت خشک‌سالی را از لحاظ زمانی و مکانی تعیین کرد (Haied et al, 2017). پژوهشگران شاخص‌های محاسبه‌شده عددی را برای بررسی اثرات خشک‌سالی در یک منطقه ارائه می‌کنند. شاخص‌ها وضعیت کیفی خشک‌سالی را در یک منطقه خاص برای یک دوره زمانی توصیف کرده و ارزیابی کمی از شدت و مدت زمان آن ارائه می‌دهند. هر یک از این شاخص‌ها اهمیت خاصی داشته و به همان اندازه نقش مهمی در ارزیابی خشک‌سالی ایفا خواهند کرد (Svoboda and Fuchs, 2016). شاخص‌های خشک‌سالی معیارهای کمی هستند که سطوح خشک‌سالی را با جذب داده‌های یک یا چند متغیر مثل بارش، تبخیر و تعرق در یک مقدار عددی مشخص می‌کنند. اطلاعات در مورد شدت خشک‌سالی می‌تواند در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد و در صورت نیاز برای راه‌اندازی طرح‌های اضطراری خشک‌سالی استفاده و تصمیم‌گیری شود. از زمانی که مفهوم شاخص‌های خشک‌سالی بین محققین جای پیدا کرد، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند. برخی از این شاخص‌ها شامل: شاخص شدت خشک‌سالی پالمیر^۱ (PDSI)، شاخص ناهنجاری بارندگی^۲ (RAI)، شاخص رطوبت محصول^۳ (CMI)، شاخص خشک‌سالی بالم و مولی^۴ (BMDI)، شاخص تامین آب سطحی^۵ (SWSI)،

1. Palmer Drought Severity Index

2. Rainfall Anomaly Index

3. Crop Moisture Index

4. Bhalme and Mooly Drought Index

5. Surface Water Supply Index



شاخص ملی بارندگی^۱ (NRI)، شاخص بارش استاندارد شده^۲ (SPI)، شاخص خشک‌سالی احیا^۳ (RDI)، شاخص خشک‌سالی رطوبت خاک^۴ (SMDI)، شاخص خشک‌سالی محصول ویژه^۵ (CSDI)، شاخص خشک‌سالی پوشش گیاهی^۶ (NDVI) و غیره می‌باشند (Haied et al, 2017).

پلتفرم سامانه گوگل ارث انجین^۷ (GEE) به کمک زبان برنامه نویسی پایتون و جاوا قابلیت اجرا و انجام تحلیل دارد (Gorelick et al, 2017). این سامانه قدرتمند مناسب برای مجموعه پایگاه داده‌های جغرافیایی بزرگ است. همچنین سریعتر از نرم افزارهای سنتی بوده و می‌تواند زمان پردازش را به نصف کاهش دهد. همچنین این پلتفرم مجموعه داده‌های زیادی در مخزن خود دارد که محققان با کدنویسی می‌توانند به راحتی از آنها استفاده کنند (Khan and Gilani, 2021b). تغییرات اقلیمی در حال حاضر یکی از مهمترین معضلات زیست محیطی کشور است. ذوب برف ارتفاعات، کم شدن بارش و استفاده بی‌رویه از منابع آبی یکی از بزرگترین چالش‌های دهه‌های اخیر کشور را بوجود آورده است. استان آذربایجان غربی به دلیل اهمیت اقلیمی-کشاورزی و همچنین قرارگیری بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه در آن و تنش‌های آبی موجود در این حوضه نویسندگان را بر آن داشت تا در این پژوهش به کمک تصاویر ماهواره‌ای و سامانه گوگل ارث انجین به بررسی و پایش خشک‌سالی استان آذربایجان غربی براساس شاخص‌های خشک‌سالی NDVI، SPI، VCI و TCI پردازند.

پیشینه تحقیق

متین‌فر و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی پایش خشک‌سالی بوم‌شناختی زاگرس میانی به کمک تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های اقلیمی و شاخص‌های گیاهی NDVI، SAVI و VCI و همچنین شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI در استان لرستان پرداختند. نتایج شاخص VCI نشان داد منطقه مورد مطالعه در طول دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ اغلب تحت تأثیر خشک‌سالی خفیف بوده و بین سال‌های مورد مطالعه در سال ۲۰۰۸ بیشترین میزان مساحت خشک‌سالی مربوط به طبقه متوسط را با ۵۸۸۰/۶ هکتار دارا بوده است. نتایج شاخص SPI نشان داد در سال ۲۰۱۰ خشک‌سالی متوسط در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ خشک‌سالی شدید در ۲۰۰۶ ترسالی ملایم و سال ۲۰۱۹ ترسالی شدید رخ داده است. نتایج شاخص‌های NDVI و SAVI نیز گویای افزایش طبقات پوشش گیاهی تنک و مناطق فاقد پوشش گیاهی به ترتیب ۳۳۱۶۷۹/۱ و ۱۱۵۱۶۴ هکتار و کاهش پوشش گیاهی نرمال و متراکم به ترتیب ۴۴۶۱۶۰/۷ و ۶۸۲/۴ هکتار در سال ۲۰۰۸ در قیاس با سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ بوده است.

آرخی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی شاخص‌های VCI، TCI و VHI برای ارزیابی خشک‌سالی به کمک تصاویر مادیس در مناطق مرکزی ایران (استان‌های اصفهان، چهارمحال و بختیاری، مرکزی و قم) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد

1. National Rainfall Index

2. Standardized Precipitation Index

3. Reclamation Drought Index

4. Soil Moisture Drought Index

5. Crop-specific Drought Index

6. Normalized Difference Vegetation Index

7. Google Earth Engine



طی این دوره ده ساله در برخی از سال‌ها خشک‌سالی شدید وجود داشته که در همان سال نیز بارش به میزان کمتری رخ داده است.

سیدی قلدره و همکاران (۱۴۰۱) شاخص‌های سنجش از دوری پایش خشک‌سالی را به کمک رگرسیون بردار پشتیبان و مدل‌های جنگل تصادفی در شهرستان مریوان ارزیابی کردند. نتایج مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان نشان دهنده ضریب تبیین ۰/۸۸ و مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۳۱۳ بین شاخص‌های خشک‌سالی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای و نیز اطلاعات ایستگاه‌های زمینی می‌باشد. همچنین نتایج مدل جنگل تصادفی با مقادیر ضریب تبیین ۰/۹۰۹ و مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۲۵۹ بیانگر کارایی بالای این مدل بوده است.

اسمعیلی و همکاران (۱۴۰۰) به کمک تصاویر مادیس و سامانه گوگل ارث انجین براساس سری زمانی در یک دوره زمانی ۲۰ ساله (۱۳۹۹)–(۱۳۷۹) به مطالعه و بررسی خشک‌سالی کشاورزی شهرستان داراب استان فارس پرداختند. نتایج به دست آمده حاکی از این است که مطابق با طبقه خشکی بسیار شدید و براساس شاخص TCI سال ۱۳۷۹ با مساحت ۲۲۵/۶۶ کیلومتر مربع وسعت و همچنین نیز بر اساس شاخص VCI سال ۱۳۹۲ با مساحت ۲۸۰/۸۰ کیلومتر مربع وسعت بیشترین مساحت خشکی را در شهرستان داراب داشته‌اند.

قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به مطالعه و بررسی پایش خشک‌سالی در البرز جنوبی پرداختند. در این مطالعه نویسندگان به ارزیابی روند خشک‌سالی شدت و مدت آن طی سال‌های ۱۹۸۸–۲۰۱۹ نسبت به اقلیم‌های موجود در منطقه البرز جنوبی به کمک دو شاخص خشک‌سالی SPI و SPEI پرداختند. نقشه‌های شدت خشک‌سالی برای (SPI) و (SPEI) نشان داده است که منطقه با شرایط بسیار خشک مواجه بوده است.

افتخاری و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به تحلیل و پایش زمانی-مکانی خشک‌سالی با استفاده از محصولات سنجنده مادیس در استان اصفهان پرداختند. پایش خشک‌سالی مذکور توسط نویسندگان برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ میلادی انجام گرفت. نتایج نشان داد ضریب همبستگی ۰/۷۱ بین دو شاخص SPI و VHI وجود دارد که نشان دهنده همبستگی بالا و قابل قبول بودن شاخص VHI در پایش تغییرات زمانی و مکانی خشک‌سالی در نواحی مختلف استان می‌باشد.

تاووهمکاران^۱ (۲۰۲۳) در پژوهشی به کمک داده‌های ماهواره ای MODIS و Landsat-8 به بررسی شاخص خشک‌سالی دمای نرمال شده (NTDI) جهت پایش رطوبت خاک در ایالت ویکتوریا، استرالیا پرداختند. نتایج خاک نشان داد وضعیت آب خاک آسان تر به دست آمده و تناسب خوبی دارد. در مقایسه با دیگر شاخص‌های کشت، NTDI عملکرد نسبتاً بهتری را در نظارت بر رطوبت خاک برای اکثر روزها نشان داد.

بنزوگافی و همکاران^۲ (۲۰۲۲) در پژوهشی به نظارت و ارزیابی میزان سطح آب و شدت خشک‌سالی در سد ادریس پایین دست رودخانه ایناوتن در شمال شرقی مراکش به کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ بصورت ترکیبی در

^۱ – Tao et al

^۲ – Benzougagh et al



سامانه گوگل ارث انجین پرداختند. نتایج به دست آمده از این تحقیق براساس تجزیه و تحلیل شاخص‌های SPI، NDWI و SDI نشان‌دهنده تغییر وضعیت مرطوب به سمت شرایط اقلیمی خشک از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ در منطقه دارد. چن و همکاران^۱ (۲۰۲۲) به کمک داده‌های سنجنده مادیس در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ به مطالعه پایش خشک‌سالی سنجنش از دور در استان سیچوان چین پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص تنش آبی محصول (CWSI) برای پایش خشک‌سالی در استان سیچوان مناسب‌ترین بود. این شاخص بهترین نظارت را در علفزارها، بدترین نظارت را در جنگل‌ها و بالاترین درجه برازش همبستگی کلی را داشته است. تغییر خشک‌سالی در استان سیچوان روند کلی ترسالی را نشان داد و وضعیت خشک‌سالی تا حد زیادی کاهش یافته است.

دویانکی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در مقاله‌ای به بررسی پایش خشک‌سالی در منطقه گرسیک، شرق استان جاوا در کشور اندونزی با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای و سامانه گوگل ارث انجین پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد در ۹ منطقه فرعی از گرسیک استان جاوا خشک‌سالی در دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ بوده است.

علی باقی و همکاران^۳ (۲۰۲۰) به ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی و زراعی حوضه رودخانه چیترا کابل با استفاده از شاخص‌های چندگانه خشک‌سالی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که سال ۲۰۰۰ خشک‌ترین سال در فصل باران‌های موسمی و به دنبال آن سال ۲۰۰۴ بوده که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ هم خشک‌سالی هواشناسی و هم خشک‌سالی کشاورزی تجربه شده است. روند کاهشی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ برای هر دو نوع خشک‌سالی مشاهده شد و پیش‌بینی می‌شود که این روند در خشک‌سالی‌های آینده بین سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ ادامه یابد.

وانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۹) شرایط خشک‌سالی در سرچشمه سه رودخانه مهم در چین را در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ با استفاده از چند شاخص خشک‌سالی بررسی کردند. در ناحیه مورد مطالعه نتایج شاخص‌های VCI و SMCI مناسب نبوده و شاخص CMDI و CVDI شاخص‌های امیدوارکننده در پایش خشک‌سالی کشاورزی / پوشش گیاهی در منطقه بودند.

کن‌ها و همکاران^۵ (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی رویداد خشک‌سالی شدید کشور برزیل در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ پرداختند. نتایج نشان داد که رویداد خشک‌سالی در سراسر برزیل وجود داشته که شدیدترین و گسترده‌ترین آن بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ بود است.

1 – Chen et al

2 – Dwiyaniek et al

3 - Ali Baig et al

4 –Wang et al

5 – Cunha et al



مبانی نظری

خشک‌سالی^۱

کاهش چشمگیر دسترسی آب در طول مدت زمان طولانی و در یک منطقه وسیع شاید کلی‌ترین تعریفی باشد که از خشک‌سالی وجود دارد (Cancelliere et al, 2007). خشک‌سالی یک رویداد اقلیمی است که به صورت تجمعی و آهسته در دوره‌های زمانی مختلف رخ داده و از نظر جغرافیایی متفاوت است. افزایش تبخیر و تعرق در نتیجه کمبود بارش و دمای بالا منجر به شرایط خشک‌سالی می‌شود (Aksoy & Sertel, 2022). گرم شدن کره زمین باعث افزایش دفعات و مدت خشک‌سالی می‌شود. بنابراین نظارت و درک شرایط خشک‌سالی قبل از گذر از شرایط عادی و ورود به فازهای مختلف شرایط خشک‌سالی مهم است (Kogan et al, 2020). خشک‌سالی باید به عنوان یک رویداد سه بعدی در نظر گرفته شود که با شدت، مدت و منطقه آسیب دیده مشخص می‌شود (Cancelliere et al, 2007).

پلتفرم موتور گوگل ارث^۲

گوگل یک سامانه ابری به نام گوگل ارث انجین ایجاد کرده تا به طور موثر چالش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ را برطرف کند. این پلتفرم در سال ۲۰۱۰ راه اندازی و پتانسیل بالای خود را برای کاربردهای مختلف ثابت کرده است (Amani et al., 2020). گوگل ارث انجین یک سامانه برای ذخیره، پردازش، تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری داده‌های عظیم است (Mutanga & Kumar, 2019). این سامانه رایگان حجم زیادی از تصاویر سنجنش از راه دوری را برای استفاده در دسترس عموم قرار می‌دهد (Tamiminia et al, 2020). این پلتفرم برای دسترسی به حساب کاربری نیاز داشته و برای مقاصد آموزشی و پژوهشی رایگان است (Velastegui-Montoya et al, 2023). در این سامانه پردازش موازی با سرعت بالا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شده و دارای کتابخانه‌ای از روابط برنامه‌نویسی کاربردی با محیط‌های توسعه‌ای که از زبان‌های برنامه‌نویسی محبوب نظیر جاوا اسکریپت و پایتون پشتیبانی می‌کنند. توسعه گوگل ارث انجین اشتیاق و مشارکت زیادی در زمینه‌های سنجنش از دوری و علم داده‌های مکانی ایجاد کرده است (Tamiminia et al, 2020). به طور خاص این سامانه پردازش داده‌های جغرافیایی حجیم را در مناطق بزرگ و نظارت بر محیط را برای مدت زمان طولانی تسهیل می‌کند (Amani et al., 2020). گوگل ارث انجین دسترسی آسان و محیطی کاربر پسند برای توسعه الگوریتم فراهم کرده است (Mutanga & Kumar, 2019). این سامانه دارای کاتالوگ وسیعی در مقیاس پتابایت^۳ بوده و

^۱ . Drought

^۲ - Google Earth Engine Platform

^۳ . Petabyte



اطلاعاتی از ماهواره‌های لندست^۱، سنتینل^۲، مادیس^۳ و داده‌هایی در مورد مدل‌های آب و هوایی، دما و ویژگی‌های ژئوفیزیکی جمع‌آوری می‌کند. این سامانه قابلیت خروجی داده‌ها را برای نمایش و پردازش‌های بعدی در نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی نظیر QGIS و ArcGIS Pro می‌دهد (Velastegui-Montoya et al, 2023).

سنجنده مادیس

در دهه ۱۹۸۰ گروهی متشکل از نوزده دانشمند و متخصص سنجش از دوری از آزمایشگاه‌های دولتی و دانشگاه‌ها، پس از بررسی علم سنجش از دور در آن زمان، مفهوم مادیس را بررسی و توسعه دادند (Salomonson et al, 2006). سنجنده مادیس یک ابزار کلیدی برای مأموریت‌های سیستم رصد زمین توسط ناسا است. از زمان راه‌اندازی بر روی ماهواره ترا در دسامبر ۱۹۹۹ بیش از دو دهه با موفقیت کار کرده است. این سنجنده در می ۲۰۰۲ بر روی ماهواره آکوا نصب، راه‌اندازی و پرتاب شد و بیش از ۲۰ سال است که به طور مداوم کار کرده (Xiong & Butler, 2020) و داده‌های مهم اقلیمی را ثبت می‌کند (Sawyer et al, 2020). برای این سنجنده ۳۶ باند طیفی با وضوح ۲۵۰ متری، ۵۰۰ متری و ۱ کیلومتر طراحی شده است (Xiong & Butler, 2020). در طول سال‌ها اخیر چندین به روزرسانی در محصولات مادیس انجام شده است. پس از تایید تغییرات در مجموعه جدید، کل آرشیو مادیس دوباره پردازش شده تا کاربران به سازگارترین و دقیق‌ترین داده‌های ممکن دسترسی داشته باشند. C6 جدیدترین مجموعه سنجنده مادیس بوده که برای بهبود چندین الگوریتم بر روی آن اعمال و از لحاظ کالیبراسیون تنظیم و برخی نوسانات سنسور اصلاح شده و از نظر تئوری محصولات را دقیق‌تر کرده است (Heck et al, 2019).

داده‌های CHIRPS^۴

پایگاه داده CHIRPS مجموعه داده‌های بارش جهانی سی سال بوده که با همکاری دانشمندان EROS^۵ و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده USGS^۶ به منظور ارائه اطلاعات قابل اعتماد ایجاد شده است. تا به امروز مجموعه‌ای از داده‌های کامل و قابل اعتماد برای اهدافی نظیر مانند تجزیه و تحلیل روند و پایش خشک‌سالی ارائه کرده‌اند. این پایگاه داده با گستره ۵۰ درجه جنوبی تا ۵۰ درجه شمالی و تمام طول‌های جغرافیایی از سال ۱۹۸۱ تاکنون، اطلاعات بارش با

1 . Landsat

2 . Sentinel

3 . Modis

4 . Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

5 . Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

6 . Earth Resources Observation and Science

7 . United States Geological Survey



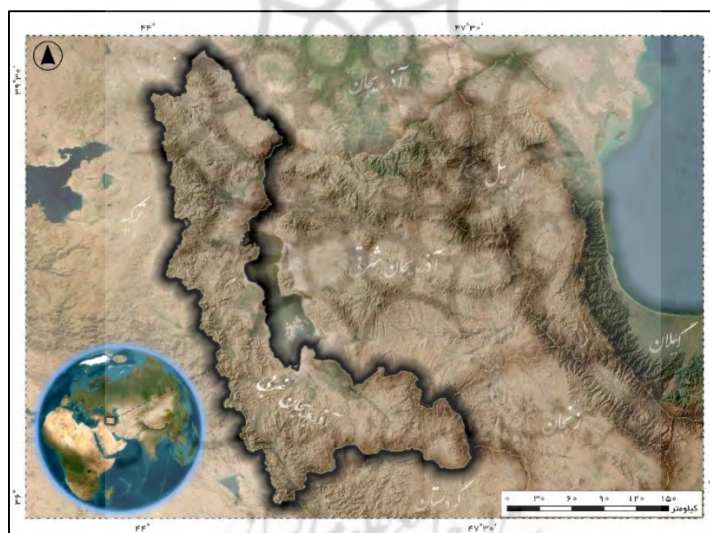
تفکیک مکانی ۰,۰۵ درجه را براساس اطلاعات ماهواره‌ای و ایستگاهی برای تحلیل روند و پایش خشک‌سالی ترکیب می‌کند (Mianabadi et al, 2022; Dutta, 2018).

روش‌شناسی تحقیق

گوگل یک سامانه ابری به نام گوگل ارث انجین ایجاد کرده تا به طور موثر چالش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ را برطرف کند. این پلتفرم در سال ۲۰۱۰ راه اندازی و پتانسیل بالای خود را برای کاربردهای مختلف ثابت کرده است (Amani et al., 2020). گوگل ارث انجین یک سامانه برای ذخیره، پردازش، تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری داده‌های عظیم است (Mutanga and Kumar, 2019). این سامانه رایگان حجم زیادی از تصاویر سنجنش از راه دوری را برای استفاده در دسترس عموم قرار می‌دهد (Tamiminia et al., 2020). این پلتفرم برای دسترسی به حساب کاربری نیاز داشته و برای مقاصد آموزشی و پژوهشی رایگان است (Velastegui-Montoya et al., 2023). در این سامانه پردازش موازی با سرعت بالا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شده و دارای کتابخانه‌ای از روابط برنامه‌نویسی کاربردی با محیط‌های توسعه‌ای که از زبان‌های برنامه‌نویسی محبوب نظیر جاوا اسکریپت و پایتون پشتیبانی می‌کنند. توسعه گوگل ارث انجین اشتیاق و مشارکت زیادی در زمینه‌های سنجنش از دوری و علم داده‌های مکانی ایجاد کرده است (Tamiminia et al., 2020). به طور خاص این سامانه پردازش داده‌های جغرافیایی حجیم را در مناطق بزرگ و نظارت بر محیط را برای مدت زمان طولانی تسهیل می‌کند (Amani et al., 2020). گوگل ارث انجین دسترسی آسان و محیطی کاربر پسند برای توسعه الگوریتم فراهم کرده است (Mutanga & Kumar, 2019). این سامانه دارای کاتالوگ وسیعی در مقیاس پتابایت بوده و اطلاعاتی از ماهواره‌های لندست، سنتینل، مادیس و داده‌هایی در مورد مدل‌های آب و هوایی، دما و ویژگی‌های ژئوفیزیکی جمع‌آوری می‌کند. این سامانه قابلیت خروجی داده‌ها را برای نمایش و پردازش‌های بعدی در نرم افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی نظیر QGIS و ArcGIS Pro می‌دهد (Velastegui-Montoya et al., 2023). در این پژوهش جهت از داده‌های مختلفی استفاده شده است. برای محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI و شاخص VCI از محصول MOD13A1 سنجنده مادیس استفاده شده است و قدرت تفکیک مکانی این داده ۵۰۰ متر است که از بازتاب سطحی دو جهته تصحیح اتمسفر محاسبه شده‌اند. برای محاسبه شاخص TCI نیز از داده MOD11A2 سنجنده مادیس که میانگین ۸ روزه دمای سطح زمین را در پیکسل‌های ۱۲۰۰*۱۲۰۰ کیلومتری ارائه می‌کند و از قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر بهره‌مند است، بهره گرفته شد. جهت ترسیم نقشه‌های مربوط به شاخص SPI از داده‌های ماهواره CHIRPS استفاده شد. CHIRPS یک مجموعه داده بارشی شبه جهانی ۳۰ ساله است که دارای وضوح ۰,۰۵ درجه با داده‌های ایستگاهی برای ایجاد سری‌های زمانی بارندگی شبکه‌ای برای تحلیل روند و پایش خشک‌سالی فصلی استفاده می‌کند. به دلیل تطابق زمانی، محصولات هشت روزه به شانزده روزه تبدیل گردید. همچنین اطلاعات برای یک دوره ۲۳ ساله مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ مورد استفاده قرار گرفت. از این محصولات تعداد ۵۲۶ تصویر برای شاخص‌های NDVI، VCI و TCI و ۸۰۸۱ تصویر از ماهواره CHIRPS جهت محاسبه شاخص SPI استفاده شد. محاسبات مربوطه در سامانه گوگل ارث انجین و ArcGIS Pro انجام گردید. همچنین دقت نقشه‌های تولید شده با استفاده از روش همبستگی پیرسون ارزیابی شد و با مطالعات انجام شده مقایسه گردید.

معرفی محدوده مورد مطالعه

استان آذربایجان غربی در شمال غربی ایران و با مرکزیت شهر ارومیه قرار دارد. بر اساس آخرین آمار تقسیمات کشوری این استان دارای ۱۲ شهرستان، ۲۸ بخش، ۱۴ شهر، ۱۰۳ دهستان و ۳۲۲۷ آبادی دارای سکنه می‌باشد. آذربایجان غربی تنها استان هم مرز با کشور ترکیه است. از شمال به جمهوری آذربایجان، از غرب به ترکیه و عراق، از شرق به استان آذربایجان شرقی و زنجان و از جنوب به استان کردستان محدود است (شکل ۱). مساحت این استان ۳۷۰۵۹ کیلومترمربع بوده و سیزدهمین استان بزرگ کشور به حساب می‌آید. این استان ۲٫۶۵ درصد از مساحت کل کشور را شامل شده و در محدوده ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی (از خط استوا) و ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی (از نصف‌النهار گرینویچ) قرار گرفته است. استان آذربایجان غربی یکی از مناطق کوهستانی کشور بوده و توپوگرافی متنوع و گسترده‌ای دارد. براساس ساختار طبیعی استان اکوسیستم‌های ویژه‌ای از ترکیب گیاهان در سطوح مختلف پوشش گیاهی در اشکوره‌های مختلف توپوگرافی به وجود آمده است که اهم آن‌ها به شکل جنگل‌ها و مراتع خودنمایی می‌کند.



شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه

مآخذ: نگارندگان

بحث و یافته‌ها

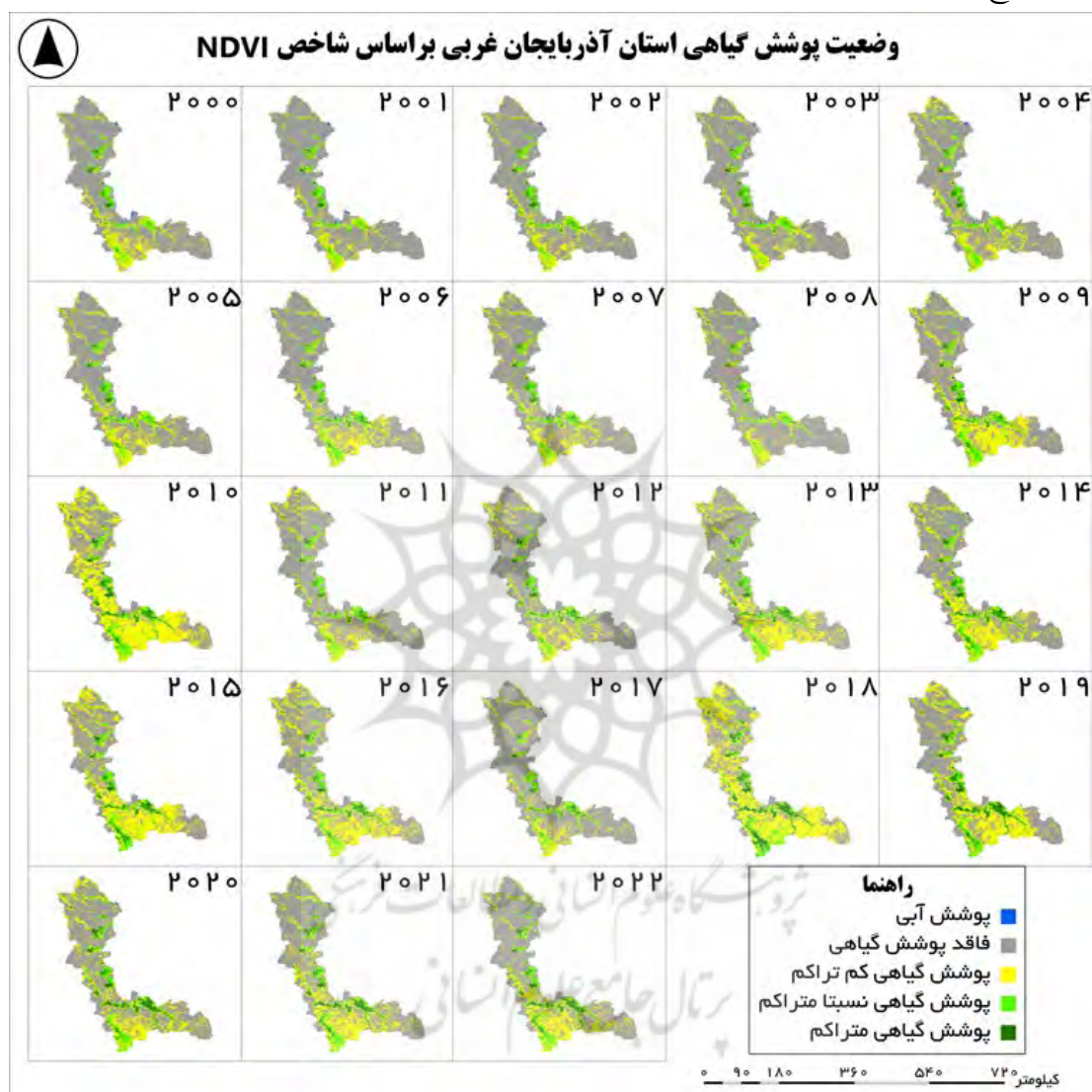
در این تحقیق، از شاخص NDVI به عنوان یکی از روش‌های مؤثر سنجش از دور برای ارزیابی وضعیت تغییرات پوشش گیاهی استفاده شده است. این شاخص از ترکیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک در تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شود (Gulácsi and Kovács, 2015). مقادیر شاخص NDVI در محصولات MODIS در تصاویر مادیس ارائه شده‌اند. در این مطالعه، برای جداسازی مناطق دارای پوشش گیاهی از مناطق فاقد پوشش گیاهی، از روش آستانه گذاری پوشش گیاهی استفاده شد. مقادیر آستانه با توجه به شرایط منطقه و اطلاعات جانبی علم و تجربه تعیین و اعمال شدند (Kabiri, 2001). در این پژوهش، مناطق با مقادیر NDVI بزرگتر از ۰٫۴ به عنوان مناطق دارای پوشش گیاهی مشخص



شدند. نقشه‌های پوشش گیاهی از داده‌های ۸ روزه استخراج و سپس جهت تطابق زمانی با دیگر شاخص‌ها به ۱۶ روزه تبدیل شدند و برای کل سال میانگین آن محاسبه شد. شاخص NDVI از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

در شکل زیر نتایج حاصل از تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI ارائه شده است.



شکل ۲: پهنه‌بندی پوشش گیاهی استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص NDVI

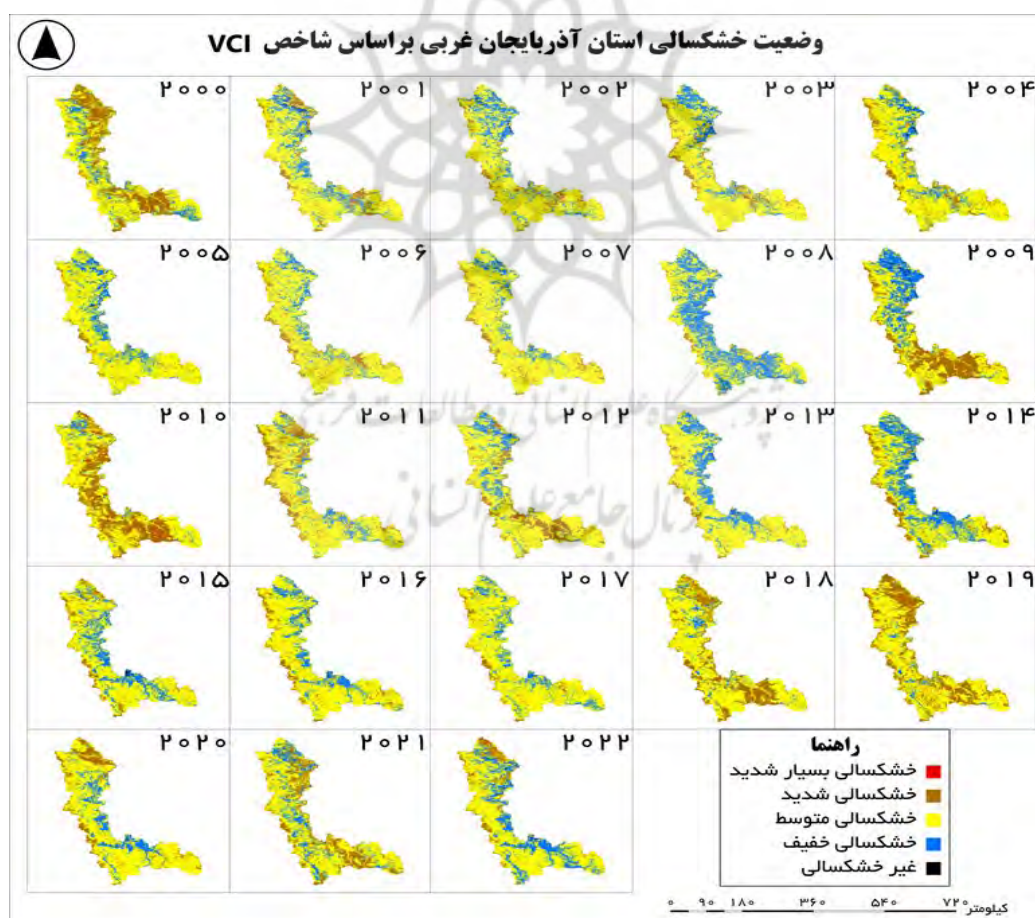
مآخذ: نگارندگان

براساس شکل ۲ که شاخص NDVI برای کل پهنه استان محاسبه شده، مشخص است که در اکثر سال‌های مورد مطالعه قسمت اعظم منطقه، پوشش معمولی و نیمه متراکم را داشته و در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ بیشتر در قسمت‌های جنوبی استان پوشش گیاهی متراکم‌تری مشاهده می‌شود. شاخص VCI که برای نخستین بار توسط کوگان و سولیوان توسعه یافت (Kogan and Sullivan, 1993). از مقادیر حداکثر و حداقل NDVI به عنوان مؤلفه‌های اصلی خود استفاده می‌نماید. شاخص VCI تغییرات زمانی NDVI را ارزیابی می‌نماید، در حالی که اثرات تغییرات مکانی

فاکتورهای محیطی از جمله اقلیم، خاک، نوع گیاه و توپوگرافی را به حداقل می‌رساند (Kogan, 1995). همچنین این شاخص به عنوان یک ابزار موثر برای نظارت بر شرایط هواشناسی کشاورزی عنوان می‌شود، زیرا قادر است برآورد کمی از اثرات آب‌وهوایی بر پوشش گیاهی را فراهم آورد (Zhang et al, 2013). شاخص VCI نسبت به شاخص NDVI، به ویژه در مناطقی با جغرافیای ناهمگن، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. این شاخص دارای بازه تغییرات بین صفر تا یک است (Kogan, 1995). هنگامی که مقدار VCI به صفر نزدیک می‌شود، نشان‌دهنده یک ماه بسیار خشک بوده و در صورتی که به مقدار بیشینه‌اش یعنی یک نزدیک می‌شود، وضعیت خشک‌سالی بهبود می‌یابد. این شاخص به کمک فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVImin}{NDVImax - NDVImin}$$

که در آن NDVImax و NDVImin به ترتیب مقادیر NDVI حداکثر و حداقل برای هر ماه می‌باشد (Bayarjargal et al, 2006). مقدار شاخص NDVI وابسته به تغییرات گیاه از شرایط شدید نامطلوب تا شرایط بالای نرمال و بین صفر تا یک متغیر است (Zhang et al, 2013). جدول ۱ نحوه طبقه‌بندی خشک‌سالی براساس مقادیر این شاخص را توسط کوگان نشان می‌دهد. در شکل ۳ نتایج حاصل از خشک‌سالی سالانه با استفاده از شاخص VCI نشان داده شده است.



شکل ۳: پهنه‌بندی خشک‌سالی سالانه استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص VCI

مآخذ: نگارندگان



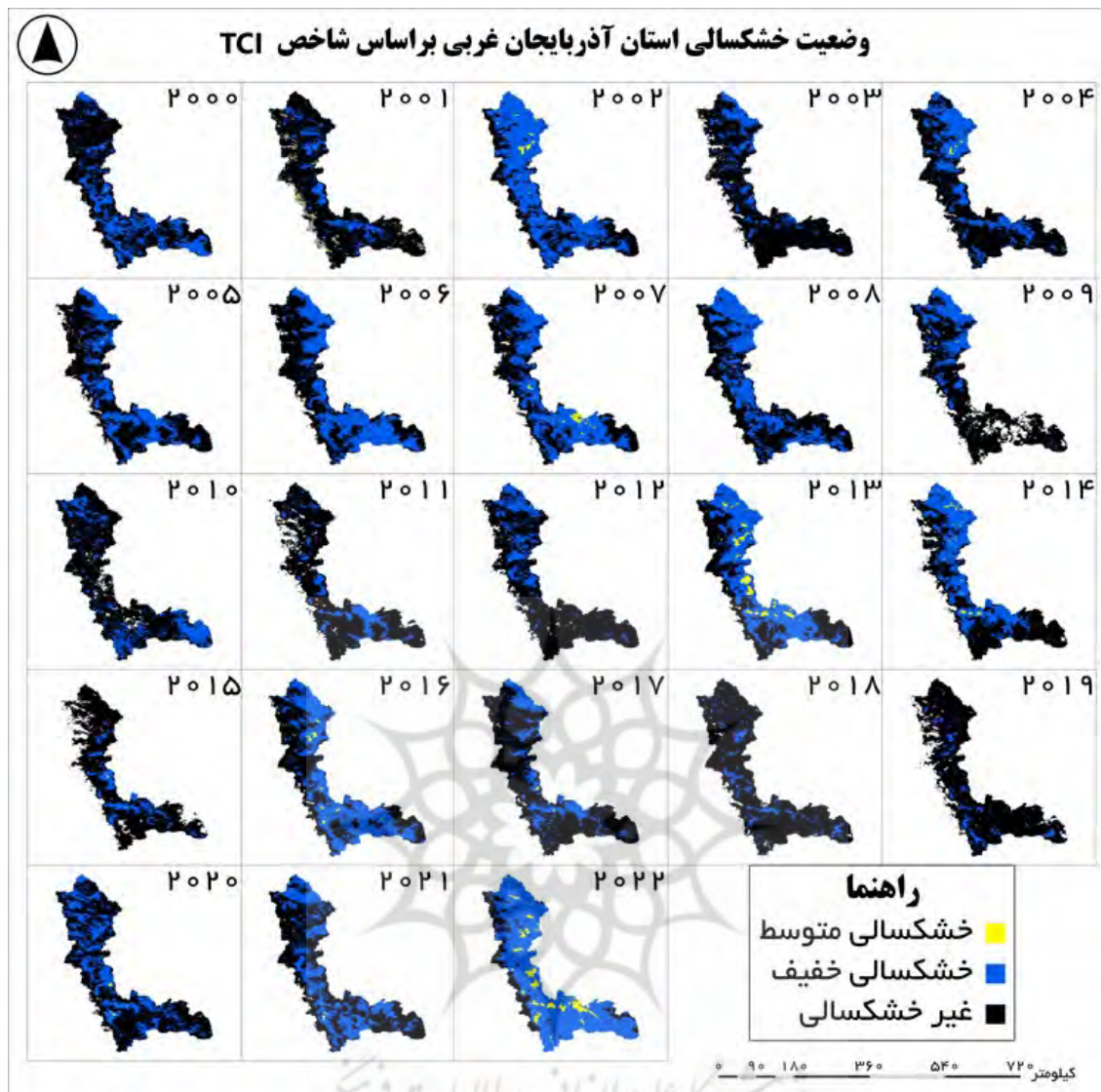
جدول ۱: نحوه طبقه‌بندی خشک‌سالی براساس مقادیر شاخص VCI.

وضعیت	VCI (درصد)
خشک‌سالی بسیار شدید	< ۰,۱
خشک‌سالی شدید	۰,۱-۰,۲
خشک‌سالی متوسط	۰,۲-۰,۳
خشک‌سالی ملایم	۰,۳-۰,۴
خشک‌سالی نرمال	۰,۴-۰,۶
ترسالی	≤ ۰,۶

با توجه به نتایج بدست آمده از شاخص VCI میزان خشک‌سالی در همه سال‌ها از بسیار شدید تا خفیف متغیر است. در سال ۲۰۰۰ در قسمت‌های شمال شرقی و جنوب شرقی خشک‌سالی شدید مشاهده می‌شود. در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ بخش‌های شرقی استان دارای خشک‌سالی خفیف و بخش‌های غربی و جنوبی دارای شرایط خشک‌سالی متوسط بوده است. در سال ۲۰۰۸ اکثر پهنه استان را خشک‌سالی خفیف و بخش‌هایی نیز خشک‌سالی متوسط دربر گرفته است. در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ قسمت‌های جنوبی استان دارای خشک‌سالی شدید بوده است. همچنین در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ در قسمت‌های شرقی استان خشک‌سالی خفیف و در اکثر بخش‌های دیگر خشک‌سالی متوسط حاکم بوده است. در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بخش‌های شمالی و جنوبی دارای خشک‌سالی شدید بوده است. در کل با توجه به تحلیل سری زمانی در پهنه مورد نظر از شدت خشک‌سالی کاسته شده است. شاخص TCI در سال ۱۹۹۵ توسط کوگان پیشنهاد شد که الگوریتم محاسباتی آن همانند شاخص وضعیت پوشش گیاهی است اما معادله‌اش برای انعکاس پاسخ حرارتی پوشش گیاهی تعریف شده است. در شرایط خشکی، به دلیل کمبود آب برای تبخیر و در نتیجه کاهش تبخیر، دمای سطح زمین افزایش می‌یابد. بنابراین، در نمایه‌های ارزیابی خشک‌سالی دخالت دمای سطح زمین می‌تواند به عنوان یک عامل موثر در تعیین خشک‌سالی مورد نظر محسوب شود (کوگان، ۱۹۹۵). شاخص TCI به صورت زیر توسط کوگان معرفی شد:

$$TCI = \frac{BT_{max} - BT}{BT_{max} - BT_{min}}$$

در این نمایه، مقدار عددی بین صفر و یک است که توسط دماهای درخشنده‌گی حداکثر و حداقل برای هر پیکسل در مقیاس زمانی مورد نظر، به ترتیب به عنوان BT_{max} و BT_{min} نمایش داده می‌شود. مقادیر نزدیک به صفر این نمایه نشان‌دهنده وجود دماهای بالا طی دوره مورد نظر می‌باشد، که در اواسط فصل رویش، شرایط نامطلوب خشک‌سالی را نشان می‌دهد، در حالی که دماهای پایین، شرایط مطلوب را نمایش می‌دهند (Singh et al, 2003). دسته‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص TCI مشابه شاخص VCI می‌باشد. در شکل ۴ نتایج حاصل از خشک‌سالی سالانه با استفاده از شاخص TCI ارائه شده است.



شکل ۴: پهنه‌بندی خشک‌سالی سالانه استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص TCI

مآخذ: نگارندگان

براساس نتایج محاسبه شده خشک‌سالی براساس شاخص TCI، پهنه استان به دو طبقه متوسط و خفیف دسته‌بندی شده است. در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بیشتر پهنه استان را شرایط غیر خشک‌سالی به خود اختصاص داده است. در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ در بیشتر مناطق استان شرایط خشک‌سالی خفیف رخ داده است. همچنین در برخی نقاط در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۷، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ شرایط خشک‌سالی متوسط تجربه شده است. در دیگر سال‌ها اغلب خشک‌سالی خفیف به صورت پراکنده در پهنه استان گزارش شده است. شاخص SPI که اولین بار توسط مک‌کی و همکاران از دانشگاه ایالات کلرادو در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت، برای کمی‌سازی کمبود بارش یا میزان خشک‌سالی در بازه‌های زمانی چندگانه طراحی شده است (باعقیده و ضیاییان، ۱۳۹۰) و اثرات ویژه بر روی قابلیت دسترسی به منابع آبی مختلف را بیان می‌کند و دقت محاسبات را افزایش می‌دهد (Wu et al, 2001). این

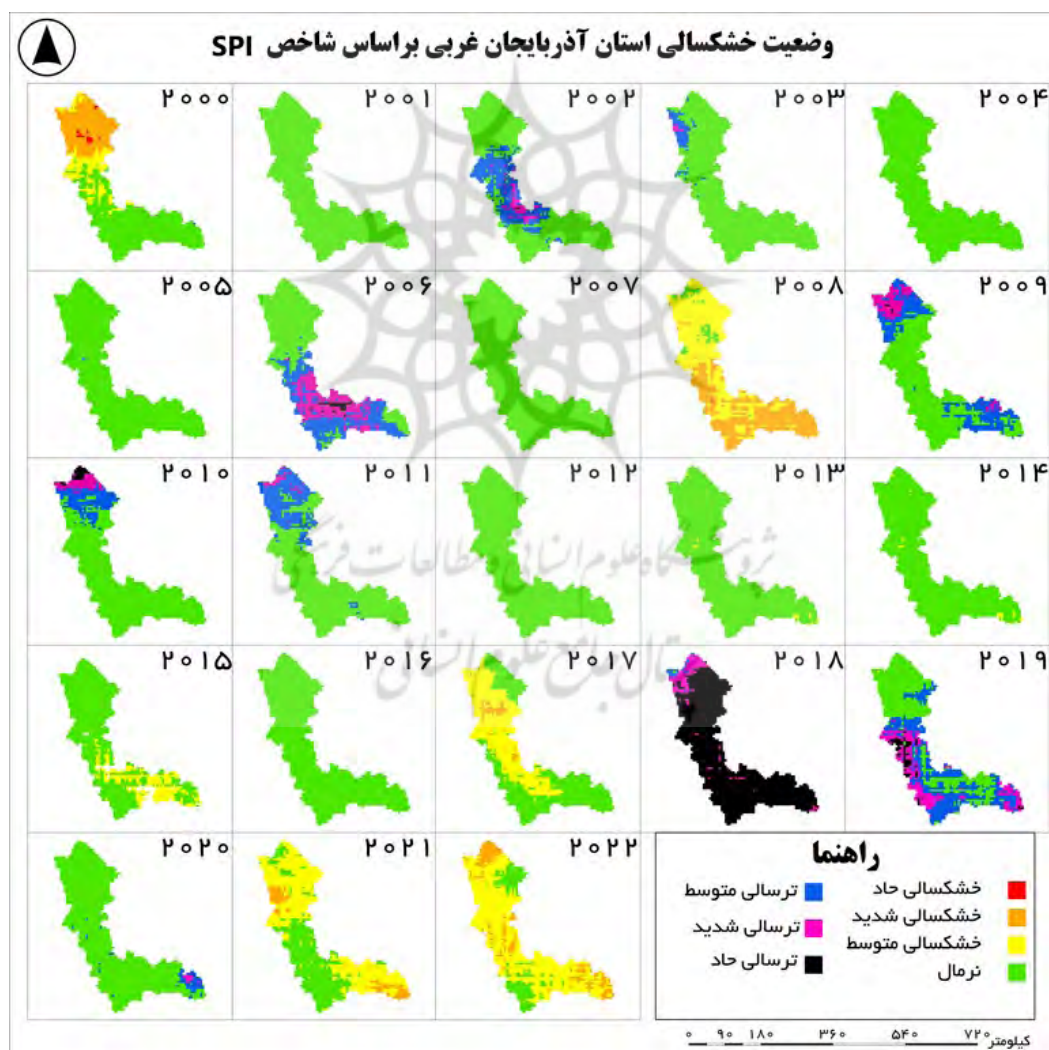


شاخص در مطالعه تأثیرات کمبود بارش بر ذخایر آب زیرزمینی، منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه‌ها عملکرد مناسبی دارد (قلی‌زاده، ۱۳۸۳). این شاخص از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SPI = (P_i - P) / S$$

که در آن مقدار بارش در دوره مورد نظر P_i ، میانگین دراز مدت بارش برای دوره مورد نظر P و S انحراف معیار مقدار بارش می‌باشد. برای محاسبه این شاخص داده‌های بارش با توزیع گاما برازش شده که پس از انجام محاسبات و تعیین پارامترهای SPI انجام می‌شود. پس از محاسبه SPI ارزیابی وضعیت خشک‌سالی بر اساس جدول زیر قابل انجام خواهد بود.

مطابق جدول ۲، خشک‌سالی زمانی اتفاق می‌افتد که شاخص استاندارد شده منفی تداوم داشته باشد و همچنین وقوع یک خشک‌سالی زمانی شدید است که SPI کوچکتر و مساوی -1 باشد و در صورتی که SPI مثبت شود رخداد خشک‌سالی به پایان خواهد رسید. نقشه پهنه‌بندی خشک‌سالی سالانه تهیه شده با استفاده از شاخص SPI در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵: پهنه‌بندی خشک‌سالی استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص SPI

مآخذ: نگارندگان



جدول ۲: نحوه طبقه‌بندی خشک‌سالی براساس مقادیر شاخص SPI

وضعیت	VCI (درصد)
خشک‌سالی بسیار شدید	< -2
خشک‌سالی شدید	-2 تا $-1/5$
خشک‌سالی متوسط	-1 تا $1/5$
خشک‌سالی نرمال	1 تا -1
ترسالی متوسط	$1/5$ تا 1
ترسالی شدید	$1/5$ تا 2
ترسالی بسیار شدید	≥ 2

ماخذ: Mckee et al, 1993

با توجه به شکل ۵ که پهنه‌بندی خشک‌سالی براساس شاخص SPI محاسبه شده است، در سال ۲۰۰۰ مناطق شمالی استان با خشک‌سالی با درجات مختلفی مانند خشک‌سالی حاد، شدید و متوسط مواجه شده‌اند و قسمت‌های جنوبی استان دارای شرایط نرمال بوده‌اند. در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ در بیشتر پهنه استان خشک‌سالی‌های شدید و متوسط تجربه شده است. همچنین در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹ در قسمت‌های مرکزی، شمالی و جنوبی استان، ترسالی‌های مختلفی مشاهده می‌شود. شرایط نرمال نیز در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ در تمامی مناطق استان وجود داشته است. ضریب همبستگی بین شاخص VCI و SPI برابر ۱۹،۷۳۷ و بین شاخص TCI و SPI، برابر ۰،۳۲- به دست آمد. سطح معناداری نیز برای شاخص VCI قابل قبول بوده ولی برای شاخص VCI قابل قبول نیست. بنابراین شاخص VCI همبستگی بیشتری را با شاخص SPI داشته و نتایج آن قابل اعتمادتر از شاخص TCI است. نتایج این پژوهش با برخی مطالعات مشابه مقایسه شد. از این رو نتایج پژوهش رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱)، که کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشک‌سالی را در حوضه آبریز دریچه ارومیه را ارزیابی کردند، نتایج نشان داد که شاخص TCI نتایج نامناسبی را ارائه می‌دهد، همچنین سطح معناداری شاخص VCI قابل قبول بود و می‌تواند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در برآورد خشک‌سالی باشد. همچنین کاظم‌پور چورسی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی با عنوان ارزیابی داده‌های ماهواره MODIS و TRMM در پایش خشک‌سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، نتایج نشان دادند که شاخص VCI برخلاف دیگر شاخص‌ها همبستگی قوی با شاخص SPI داشته و بهترین عملکرد را در پایش خشک‌سالی از خود نشان می‌دهد. جهانگیر و مشیدی (۱۳۹۹) نیز در مطالعه‌ای پایش خشک‌سالی کشاورزی مبتنی بر سنجش‌ازدور در حوضه آبریز کارون بزرگ را ارزیابی کردند. براساس نتایج بدست آمده از بین شاخص‌های منتج از ماهواره، شاخص VCI همبستگی بالایی با شاخص SPI داشت و شاخص مناسبی جهت پایش خشک‌سالی به شمار می‌رود.



نتیجه گیری

در پژوهش حاضر دو هدف بکارگیری داده‌های سنجنده MODIS و کارایی شاخص‌های سنجش‌ازدوری در پایش خشک‌سالی در استان آذربایجان غربی دنبال شد. این پژوهش با هدف پایش خشک‌سالی و ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای در استان آذربایجان غربی انجام شد. بهره‌گیری از داده‌ها و اطلاعات هواشناسی و کشاورزی در محاسبه شاخص‌ها، ترکیب شاخص‌های به منظور پایش جامع خشک‌سالی و ارزیابی نتایج آن، از مزایای پژوهش حاضر محسوب می‌شود. نتایج پایش خشک‌سالی با استفاده از چهار شاخص SPI، NDVI، VCI و TCI نشان داد که شدت خشک‌سالی در این استان در طی دوره مورد مطالعه متغیر بوده است. در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ خشک‌سالی‌های شدید و متوسط در بیشتر پهنه استان تجربه شده است. همچنین در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹ در قسمت‌های مرکزی، شمالی و جنوبی استان، ترسالی‌های مختلفی مشاهده شد. همچنین شرایط نرمال نیز در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ در تمامی مناطق استان وجود داشته است.

در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که استان آذربایجان غربی در معرض خطر خشک‌سالی است. شدت خشک‌سالی در این استان طی دوره مربوطه متغیر بوده است و در برخی سال‌ها خشک‌سالی‌های شدید در برخی مناطق رخ داده است. پوشش گیاهی در این استان نیز در سال‌های خشک‌سالی کاهش می‌یابد. بنابراین مدیریت منابع آب و خاک در استان آذربایجان غربی باید با توجه به خطر خشک‌سالی صورت گیرد. در مقایسه بین نتایج چهار شاخص مورد مطالعه، می‌توان گفت که در پهنه استان آذربایجان غربی شاخص VCI و SPI حساس‌ترین‌ها برای شناسایی خشک‌سالی بوده که قادرند انواع خشک‌سالی‌ها را به خوبی شناسایی کنند. شاخص NDVI نیز حساسیت نسبتاً خوبی برای شناسایی خشک‌سالی دارد و قادر است کاهش پوشش گیاهی در سال‌های خشک‌سالی را بررسی و نشان دهد. همچنین شاخص TCI حساسیت کمتری برای شناسایی خشک‌سالی دارد و بیشتر خشک‌سالی‌های خفیف را شناسایی می‌کند. نهایتاً می‌توان گفت که داده‌های MODIS و شاخص VCI می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی جهت پایش خشک‌سالی باشند و با توجه به اینکه در تصاویر ماهواره‌ای، تعداد نقاط نمونه‌برداری بسیار بیشتر از تعداد ایستگاه‌های زمینی است، بکارگیری داده‌های سنجش‌از دوری پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از نقشه‌های حاصل از شاخص‌های ارزیابی خشک‌سالی می‌تواند به بهبود برنامه‌های مدیریت خشک‌سالی کمک نموده و نقش بسزایی را در کاهش اثرات خشک‌سالی ایفا می‌کند.



منابع و مآخذ

- ۱) آرخی، صالح، برزگر سواسری، مرضیه، وعمادالدین، سمیه (۱۴۰۱). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجنش از دور VCI، TCI و VHI در ارزیابی خشک‌سالی با تصاویر مودیس (مطالعه موردی مناطق مرکزی ایران). *مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱ (۳)، ۱۸۹-۲۲۴
- ۲) اسمعیلی، حسین، میرموسوی، سیدحسین، وسهیلی، اسماعیل (۱۴۰۰). بررسی سری زمانی خشک‌سالی کشاورزی شهرستان داراب با استفاده از سنجنش از دور و سامانه گوگل ارث انجین. *مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۰ (۴)، ۱۷۵-۱۹۲
- ۳) افتخاری، مبین، محمودی‌زاده، سعید، قزل سولفو، عباسعلی، اسماعیلی، علی، واکبری، محمد (۱۴۰۰). تحلیل و پایش زمانی و مکانی خشک‌سالی با استفاده از محصولات سنجنده MODIS مطالعه موردی استان اصفهان. *مجله علوم جغرافیایی (جغرافیای کاربردی)*. ۱۷ (۳۴)، ۱۷-۲۷
- ۴) باعقیده، محمد، وضیایان، پرویز (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشک‌سالی های استان اصفهان. *مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. ۱ (۴)، ۱-۱۶.
- ۵) جهانگیر، محمدحسین، و مشیدی، ضحی (۱۳۹۹). ارزیابی پایش خشک‌سالی کشاورزی مبتنی بر سنجنش از دور با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش در ماه های رشد (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون بزرگ). *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴ (۴)، ۱۲۶۴-۱۲۵۲.
- ۶) رضایی‌مقدم، محمدحسین، ولی زاده کامران، خلیل، رستم زاده، هاشم، و رضایی، علی (۱۳۹۱). ارزیابی کارایی داده های سنجنده MODIS در برآورد خشک‌سالی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*، ۲ (۵)، ۳۷-۵۲.
- ۷) سیدی قلدره، جمال، احمدی، سلمان، و غلام نیا، مهدی (۱۴۰۱). ارزیابی شاخص های سنجنش از دوری پایش خشک‌سالی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان و مدل های جنگل تصادفی (مطالعه موردی: شهرستان مریوان). *نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، ۱۰ (۳)، ۱۲۱-۱۴۱.
- ۸) قاسمی، پوریا، مسعودکرباسی، مسعود، زمانی‌نوری، علیرضا، و سرائی‌تبریزی، مهدی (۱۴۰۰). پایش و پهنه بندی خشک سالی در البرز جنوبی، *مجله جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۰ (۳۹)، ۹۰-۱۰۴.
- ۹) قلی‌زاده، محمدحسین (۱۳۸۳). پایش‌بینی و پایش‌آگاهی خشک‌سالی در غرب ایران. دانشگاه تربیت معلم تهران. پایان‌نامه دکتری اقلیم‌شناسی، ۱۸۹
- ۱۰) کاظم پورچورسی، سیما، عرفانیان، مهدی، و عبادی‌نهار، زهرا. (۱۳۹۸). ارزیابی داده های ماهواره ای MODIS و TRMM در پایش خشک‌سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)*، ۳۰ (۲)، ۱۷-۳۳.
- ۱۱) متین‌فر، حمیدرضا؛ شمسی پور، علی‌اکبر؛ صادقی، حدیث (۱۴۰۲). پایش خشک‌سالی بوم شناختی زاگرس میانی بر پایه داده‌های ماهواره لندست ۷ و داده‌های اقلیمی (مطالعه موردی: استان لرستان). *سنجنش از دور و GIS ایران*، ۱۵ (۳)، ۱۴۲-۱۲۵.
- 12) Aksoy, S., Sertel, E., (2022) *Comparison of landsat and modis derived vegetation health indices for Drought monitoring using google earth engine platform.*
- 13) Ali Baig, M. H., Abid, M., Khan, M. R., Jiao, W., Amin, M., Adnan, S., (2020) *Assessing meteorological and agricultural drought in Chitral Kabul river basin using multiple drought indices. Remote Sensing*, 12(9), 1417.

- 14) Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Brisco, B., (2020) Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350.
- 15) Bayarjargal, Y., Karnieli, A., Bayasgalan, M., Khudulmur, S., Gandush, C., Tucker, C. J., (2006) A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 105(1), 9-22.
- 16) Benzougagh, B., Meshram, S. G., El Fellah, B., Mastere, M., Dridri, A., Sadkaoui, D., Khedher, K. M., (2022) Combined use of Sentinel-2 and Landsat-8 to monitor water surface area and evaluated drought risk severity using Google Earth Engine. *Earth Science Informatics*, 15(2), 929-940.
- 17) Cancelliere, A., Loukas, A., Pangalou, D., Rossi, G., Tigkas, D., Tsakiris, G., Vangelis, H., (2007) Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component]. *Drought management guidelines technical annex*, 85-102.
- 18) Chen, Y., Yang, J., Xu, Y., Zhang, W., Wang, Y., Wei, J., & Cheng, W. (2022). Remote-Sensing Drought Monitoring in Sichuan Province from 2001 to 2020 Based on MODIS Data. *Atmosphere*, 13(12), 1970.
- 19) Cunha, A. P. M., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., Ribeiro-Neto, G., (2019) Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642.
- 20) Dutta, R., (2018) Drought monitoring in the dry zone of Myanmar using MODIS derived NDVI and satellite derived CHIRPS precipitation data. *Sustainable Agriculture Research*, 7(2), 46-55.
- 21) Dwiyaniek, R., Sukojo, B. M., Bioresita, F., (2021) Drought Monitoring in Gresik Regency East Java using Satellite Image Time Series and Google Earth Engine. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 936, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- 22) Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- 23) Gulácsi, A., & Kovács, F., (2015) Drought monitoring with spectral indices calculated from MODIS satellite images in Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 8(3-4), 11-20.
- 24) Haied, N., Foufou, A., Chaab, S., Azlaoui, M., Khadri, S., Benzahia, K., Benzahia, I., (2017) Drought assessment and monitoring using meteorological indices in a semi-arid region. *Energy Procedia*, 119, 518-529.
- 25) Heck, E., de Beurs, K. M., Owsley, B. C., Henebry, G. M., (2019) Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156, 121-134.
- 26) Khan, R., Gilani, H., (2021)a. Global drought monitoring with big geospatial datasets using Google Earth Engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 17244-17264.



- 27) Khan, R., Gilani, H., (2021)b. Global drought monitoring with drought severity index (DSI) using Google Earth Engine. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1-2), 411-427.
- 28) Khan, R., Gilani, H., Iqbal, N., Shahid, I., (2020) Satellite-based (2000–2015) drought hazard assessment with indices, mapping, and monitoring of Potohar plateau, Punjab, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-18.
- 29) Kogan, F. N., (1995) Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- 30) Kogan, F., Guo, W., Yang, W.,(2020) Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 469-490.
- 31) Kogan, F., Sullivan, J., (1993)Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 13(5), 219-222.
- 32) McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- 33) Meza, I., Siebert, S., Döll, P., Kusche, J., Herbert, C., Eyshi Rezaei, E., Hagenlocher, M., (2020) Global-scale drought risk assessment for agricultural systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 695-712.
- 34) Mianabadi, A., Salari, K., Pourmohamad, Y.,(2022) Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12(8), 183.
- 35) Mutanga, O., Kumar, L.,(2019) Google earth engine applications. *Remote sensing*, 11(5), 591.
- 36) Salomonson, V. V., Barnes, W., Masuoka, E. J.,(2006) Introduction to MODIS and an overview of associated activities. *Earth Science Satellite Remote Sensing: Vol. 1: Science and Instruments*, 12-32.
- 37) Sawyer, V., Levy, R. C., Mattoo, S., Cureton, G., Shi, Y., Remer, L. A.,(2020) Continuing the MODIS dark target aerosol time series with VIIRS. *Remote Sensing*, 12(2), 308.
- 38) Singh, R. P., Roy, S., Kogan, F., (2003) Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International journal of remote sensing*, 24(22), 4393-4402.
- 39) Svoboda, M., Fuchs, B., (2016) Handbook of drought indicators and indices. *Drought and water crises: Integrating science, management, and policy*, 155-208.
- 40) Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., Brisco, B., 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170.
- 41) Tao, L., Di, Y., Wang, Y., & Ryu, D. (2023). Normalized Temperature Drought Index (NTDI) for Soil Moisture Monitoring Using MODIS and Landsat-8 Data. *Remote Sensing*, 15(11), 2830.
- 42) Tran, T. V., Tran, D. X., Huynh, P. D. P., Dao, H. N., Vo, T. M. T., Trinh, H. P., Tran, X. Q., 2020. Analysing Drought Intensity in the Mekong River Delta using Time Series Analysis and Google Earth Engine. *International Journal of Geoinformatics*, 16(1).
- 43) Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., Adami, M.,(2023)Google Earth Engine: a global analysis and future trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675.

- 44) Wang, K., Li, T., Wei, J.,(2019) Exploring drought conditions in the Three River Headwaters Region from 2002 to 2011 using multiple drought indices. *Water*, 11(2), 190.
- 45) Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., Hu, Q. I., (2001) An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(6), 745-758.
- 46) Xiong, X., Butler, J. J., (2020) MODIS and VIIRS calibration history and future outlook. *Remote Sensing*, 12(16), 2523
- 47) Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., Khan, F. I.,(2011)A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333-349.

