

Assessment and Monitoring of Drought Crisis Impacts Using Spatial Data Mining with an Emphasis on the Lake Urmia Basin

Mohammad Eskandari¹, Masoud Darabi², Mohammad Reza Salehi³, Habib Allah Sahami²

1. Assist. Prof., Faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. (Corresponding Author)

Eskandarim@mut.ac.ir

2. Assist. Prof., Faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3. MSc. in Passive Defense, Faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.1.1>

Original Paper

Iran, situated in the arid geographical belt and desert strip of the northern hemisphere between latitudes 20° to 40°, experiences an average annual precipitation of 250 mm. Combined with the uneven distribution of rainfall, this places the country among the arid and semi-arid regions of the world. Consequently, addressing the threat of drought and implementing effective management strategies for this potential crisis is unavoidable. The present study aims to identify the most suitable combination of remote sensing drought indices compared to the Standardized Precipitation Index (SPI) using spatial data mining methods and association rules. The Lake Urmia basin was selected as the study area for evaluation. SPI was calculated by interpolating precipitation data from rain gauge and synoptic stations between 2011 and 2022 (1390 to 1401 in the Persian calendar), resulting in raster layers for 1, 3, 6, 9, and 12-month intervals. In parallel, remote sensing indices, including VHI, TCI, VCI, EVI, LST, and NDVI, were derived from MODIS sensor data for the same period. The results indicate a high correlation between remote sensing indices (LST, NDVI, and VCI) and SPI, with reliability exceeding 70%. Furthermore, drought zoning maps derived from the extracted rules reveal that the most severe droughts occurred in the years 2013, 2020, and 2021 (1392, 1399, and 1400). This study underscores the potential of integrating spatial data mining and remote sensing indices for more effective drought assessment and monitoring, particularly in regions prone to severe water stress.

Keywords:

Drought, Spatial Data Mining, Lake Urmia Basin, SPI Index.



Received: Dec. 1, 2024

Revised: Jan. 5, 2025

Accepted: Jan. 24, 2025

To cite this article:

Eskandari, M., Darabi, M., Salehi, M. R., Sahami, H. A., 2025. Assessment and Monitoring of Drought Crisis Impacts Using Spatial Data Mining with an Emphasis on the Lake Urmia Basin, *Emergency Management*, 14(2), 1-18.

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.1.1>

Use your device to scan and read the article online



سنجش و پایش بحران خشک‌سالی با استفاده از داده‌کاوی مکانی با تأکید بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه

محمد اسکندری^{۱*}، مسعود دارابی^۲، محمدرضا صالحی^۳، حبیب‌الله سهامی^۲

۱- استادیار، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

Eskandarim@mut.ac.ir

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد پدافند غیرعامل، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.1.1>

مقاله پژوهشی

چکیده

ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک جغرافیایی و نوار بیابانی واقع در عرض‌های ۲۰ تا ۴۰ درجه‌ی نیمکره‌ی شمالی با متوسط بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی‌متر، همچنین به دلیل توزیع نامتناسب مقدار بارندگی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا به شمار می‌رود؛ لذا جدی گرفتن تهدید خشک‌سالی و مدیریت این تهدید بالقوه امری اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش حاضر تلاش دارد تا بر اساس روش‌های داده‌کاوی مکانی و قوانین انجمنی، مناسب‌ترین ترکیب شاخص‌های خشک‌سالی سنجش‌ازدور را در مقایسه با شاخص استانداردشده‌ی بارش معرفی نماید. برای ارزیابی این روش، حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه به‌عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. شاخص استانداردشده بارش با استفاده از بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ درون‌یابی، سپس یک‌لایه رستری شاخص به‌صورت رسترهای ۹، ۳، ۶، ۱ و ۱۲ ماهه تهیه و شاخص‌های VHI، TCI، VCI، EVI، LST، NDVI از طریق داده‌های سنجنده MODIS برای سال‌های بازه زمانی مشابه استخراج شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین شاخص‌های سنجش‌ازدور LST، NDVI و VCI و شاخص SPI وجود دارد؛ به‌طوری‌که اعتماد بین شاخص SPI و شاخص‌های LST، NDVI و VCI بالاتر از ۷۰ درصد است. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی شده خشک‌سالی به‌وسیله قوانین استخراج‌شده نشان می‌دهد که بیشترین خشک‌سالی در سال‌های ۱۳۹۹، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۰ رخ داده است.

واژه‌های کلیدی:
خشک‌سالی، داده‌کاوی
مکانی، حوضه‌ی آبریز
دریاچه‌ی ارومیه، شاخص
SPI

دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۱

اصلاح: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۵

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به‌صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به‌صورت زیر اقدام بفرمایید:

اسکندری، م.، دارابی، م.، صالحی، م.، ر.، سهامی، ح.، ۱۴۰۴، سنجش و پایش بحران خشک‌سالی با استفاده از داده‌کاوی

مکانی با تأکید بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مدیریت بحران، ۱۴(۲)، ۱-۱۸

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.1.1>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

خشک‌سالی یک فاجعه طبیعی و موقت ناشی از کمبود بارش بوده که در تمام مناطق اقلیمی رخ می‌دهد و زیان‌های قابل توجهی اقتصادی نه تنها برای کشاورزان به دنبال دارد بلکه برای کل جامعه‌ی انسانی مخاطره‌آمیز است [۱]. خشک‌سالی در پهنه وسیع کشورهای مختلف به‌ویژه کشورهای مستقر در مناطق گرم و خشک به‌کرات وقوع یافته است. طبق مطالعات و آمارهای گزارش‌شده، با توجه به وضعیت جغرافیایی و اقلیمی ایران، کشور ما با میانگین بارشی معادل یک‌سوم، متوسط کل جهان و همچنین یک‌سوم آسیا در وضعیت مناسبی از لحاظ تأمین آب قرار ندارد. [۲] خشک‌سالی پدیده‌ای است دارای آثار مختلف و اثرگذار در طولانی‌مدت که کنترل کردن اثرات آن هزینه‌های زیادی را بر دولت‌ها تحمیل می‌کند و اگر به‌خوبی شناسایی شود، می‌تواند در کاهش هزینه‌ها تأثیر بسزایی داشته باشد. یکی از اثرات اصلی خشک‌سالی، کمبود آب است [۳].

کمبود بارندگی در طی مدت طولانی منجر به کاهش سطح بحرانی جریان آب رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی و مخازن می‌شود. خشک‌سالی هواشناسی همچنین علت خشک‌سالی کشاورزی است که به‌عنوان کسری در رطوبت خاک تعریف شده به‌طوری‌که رشد گیاهان تقریباً غیرممکن است، براین اساس امروزه بسیاری از دانشمندان و برنامه‌ریزان شهری بر نظارت تغییرات زیست‌محیطی مناطق شهری توجه دارند [۴]. مهم‌ترین نوع خشک‌سالی، یعنی خشک‌سالی هواشناسی، حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی است که برای کمی‌سازی شدت آن از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که به دودسته‌ی کلی شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور تقسیم می‌شود [۵]. محاسبه این شاخص‌ها عمدتاً بر اساس متغیرهای آب و هوایی مانند

بارش، دما پوشش گیاهی رواناب و رطوبت خاک انجام می‌شود [۶].

برای پیش‌بینی مدل‌سازی و تحلیل سری زمانی شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور، از روش‌های مختلف مانند زنجیره‌ی مارکوف، شبکه‌های عصبی NN، رگرسیون بردار پشتیبان SVR، سیستم فازی مبتنی بر شبکه عصبی تطبیقی ANFIS و روش ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات LSSVM استفاده شده است [۷]. اکثر مطالعات خشک‌سالی به روش‌های آماری سنتی برای ساخت مدل‌های مبتنی بر روابط متغیرهای جوی، آب و هوایی و اقیانوسی متکی هستند. با این حال تکنیک‌های آماری سنتی که برای شناسایی ویژگی‌های خشک‌سالی به‌عنوان مثال، شدت و مدت استفاده می‌شود. به دلیل تعامل پیچیده‌ی این متغیرها و عواملی که بر وقوع گسترده‌ی جغرافیایی، شدت و مدت خشک‌سالی تأثیر می‌گذارد کافی نیست [۸]. در نتیجه، محققان بر روی ایجاد ابزارهای نظارت بر خشک‌سالی با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی جدید که می‌توانند این روابط پیچیده را بررسی کنند، تمرکز کرده‌اند.

به‌تازگی تکنیک‌های داده‌کاوی برای بهبود ابزارهای شناسایی خشک‌سالی و درک بهتر از ویژگی‌های خشک‌سالی استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی تحلیل‌های مربوط به خشک‌سالی روش‌های سنتی مورداستفاده در تحلیل داده‌های مربوطه مانند روش‌های آماری، نمی‌توانند به‌تنهایی و اطمینان بالا در تصمیم‌گیری‌های مکانی مؤثر واقع شوند [۹].

در این میان روش‌های داده‌کاوی مکانی با ترکیب روش‌های یادگیری ماشین هوش مصنوعی پایگاه داده، سعی در دستیابی به اطلاعات غنی نهفته در داده‌های مکانی دارد. امروزه با توسعه سریع تکنیک‌ها و ابزارهای پیشرفته برای به دست آوردن ذخیره و انتقال داده‌های عظیم مکانی

۳

شماره ۳۰

تابستان ۱۴۰۴
فصلنامه علمی

و پژوهشی



سنجش و پایش بحران خشک‌سالی با استفاده از داده‌کاوی مکانی با تأکید بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه / محمدرضا صالحی، محمد اسکندری، مسعود دارابی، حبیب‌الله سهیلی

همانند سایر داده‌ها به‌طور مداوم در حال گسترش هستند [۱۰].

این مجموعه داده‌های تاریخی برای مطالعه‌ی خشک‌سالی شامل ارتباط پیچیده بین داده‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور است که استخراج اطلاعات ارزشمند از چنین آرشیوهای اطلاعاتی بزرگ نیازمند یک روش خودکار و کارآمد است. داده‌های مکانی می‌تواند برای جستجوی الگوی پنهان و ارتباط بین داده‌ها به کار گرفته شود [۱۱]. خشک‌سالی که با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی شناسایی شده مزایای بیشتری نسبت به تجزیه‌وتحلیل آماری و روش‌های دیگر دارند؛ زیرا این تکنیک می‌تواند پیچیدگی خشک‌سالی (مانند ویژگی‌ها و روابط بین متغیرها) را به‌صورت قواعدی توصیف کند [۱۲]. در همین راستا داده‌کاوی مکانی به‌عنوان حوزه‌ی جدید و پرکاربرد مطرح شده است. از مزایای داده‌کاوی مکانی توانایی ادغام و ایجاد مجموعه داده هوشمند از منابع اطلاعاتی با فرمت‌های مختلف است و الگوها و دانش پنهان در حجم بالایی از داده‌های مکانی را مورد اکتشاف قرار می‌دهد [۱۳].

با استفاده از ابزارهای مختلف تجزیه‌وتحلیل داده‌ها برای کشف الگوها و روابط متغیرهای فیزیکی در مجموعه داده‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. قوانین انجمنی برای کشف الگوهایی که اغلب اتفاق می‌افتد و برای شناسایی روابط بین متغیرهای مختلف استفاده می‌شود. برخلاف روش‌های دیگر مانند رگرسیون و تجزیه‌وتحلیل همبستگی، از اطمینان بالاتری برخوردار است [۱۴]. هدف این تحقیق، بررسی میزان انطباق و همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی سنجش‌ازدور با شاخص‌های خشک‌سالی داده‌های زمینی نظیر، شاخص

استانداردشده بارش SPI^1 با استفاده از روش‌های داده‌کاوی مکانی است. شاخص استانداردشده بارش (SPI) یک شاخص جهانی پذیرفته‌شده برای ارزیابی شدت خشک‌سالی در سطح منطقه است. از ویژگی‌های این شاخص، محاسبه مدت و شدت خشک‌سالی در دوره‌های مختلف یک‌ماهه، سه‌ماهه، شش‌ماهه، یک‌ساله و... است [۱۵].

با توجه به پیچیده بودن پدیده‌ی خشک‌سالی و بالا بودن حجم داده‌ها در پایش آن، این تحقیق تلاش دارد تا بر اساس روش‌های داده‌کاوی مکانی و قوانین انجمن، مناسب‌ترین ترکیب شاخص‌های خشک‌سالی سنجش‌ازدور را در مقایسه با SPI معرفی نماید. از این‌رو در این تحقیق به پایش خشک‌سالی در سطح حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه که یکی از پنج حوضه‌ی آبریز اصلی کشور است، پرداخته می‌شود.

در یک تقسیم‌بندی کلی شاخص‌ها به دودسته‌ی شاخص‌های سنجش‌ازدور و شاخص‌های غیر سنجش‌ازدور تقسیم می‌شوند. رایج‌ترین شاخص هواشناسی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است [۱۶]. مطالعه‌های توسط سه مدل داده محور برای پیش‌بینی شرایط خشک‌سالی در حوضه‌ی رودخانه ایوش اتیوپی مقایسه شد. مقدار شاخص بارش استاندارد ۳ ماهه و ۱۲ ماهه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و شبکه‌های عصبی موجک پیش‌بینی و مقایسه شد. نتایج پیش‌بینی شده نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی موجک بهترین مدل برای پیش‌بینی مقادیر SPI در زمان‌های مختلف در حوضه‌ی رودخانه‌ی ایوش در اتیوپی است.

SPI^1 یا Standardized Precipitation Index شاخص بارش استانداردشده بر پایه‌ی این حقیقت که کسری بارش تأثیرات متفاوتی بر آب‌های زیرزمینی، ذخیره منابع، رطوبت خاک، پوشش برف و جریان جویبار دارد، استوار است. شاخص بارش استاندارد شده کسری بارش را برای مقیاس‌های زمانی چند گانه (۰.۳، ۰.۶، ۱.۲، ۲.۴، ۴.۸ ماهه) محاسبه می‌کند.

سعدا و ابورمان (۲۰۲۱) بارش ماهانه با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده مقیاس زمانی ۱۲ ماه (SPI-۱۲) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. برای مدل سازی داده های SPI-۱۲، مدل متحرک هم زمان (CARMA) برای چندین منطقه مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش های شبیه سازی با مدل CARMA نشان داد که این مدل به خوبی می تواند با داده های SPI-۱۲ انطباق پیدا کند این مدل همچنین قادر به حفظ ساختار همبستگی متقابل SPI-۱۲ بین منطقه های مورد مطالعه بود. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل CARMA برای مناطق روستایی که داده های مشاهده نشده ای دارند، مفید و مهم خواهد بود [۱۷]. همچنین هابو و همکاران (۲۰۲۰) یک بسته یکپارچه برای نظارت پیش بینی و تجزیه و تحلیل خشک سالی برای کمک به مدل سازی و ارزیابی خشک سالی ارائه دادند.

در این تحقیق یک بسته تلفیقی با نرم افزار R را ارائه می کند و طیف گسترده ای از کاربردهای آن را برای مدل سازی خشک سالی بر اساس شاخص های مختلف خشک سالی نشان می دهد. این بسته همچنین شامل پیش بینی آماری خشک سالی به شیوه های احتمالی بر اساس چندین شاخص خشک سالی است که به عنوان اساس پیش بینی خشک سالی عمل می کند [۱۸].

صفایی پور و همکاران (۱۴۰۳) پژوهشی تحت عنوان تحلیل و پیشنهاد الگوی توسعه فیزیکی شهر ایزه با تأکید بر مخاطرات طبیعی انجام داد که مشخص شد حدود ۴۸ درصد از محدوده شهری ایزه به دلیل تراکم نواحی سکونتگاهی و دور بودن از فضاهای باز و جاده های اصلی، دارای پتانسیل آسیب پذیری زیادی در برابر مخاطره زمین لرزه هستند [۱۹].

مرتازی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی زمین ساخت فعال نسبی حوضه های آبریز

جنوب شرقی البرز مرکزی از طریق تحلیل شاخص های مورفومتری پرداخته شد و نتایج حاصل از این ارزیابی ها را به صورت شاخص نسبی فعالیت های تکتونیکی (Iat) ارائه و برای برآورد تکتونیک فعال از نقشه های توپوگرافی و نقشه های زمین شناسی و DEM استفاده شد. همچنین برای تشکیل حوضه ها بر روی منطقه مورد مطالعه از نرم افزار Arc GIS بر پایه داده های حاصل از مدل رقومی ارتفاعی استفاده شده است [۲۰].

در حوضه دریایچه ارومیه به تحلیل فراوانی ناحیه ای خشک سالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI و شدت خشک سالی هیدرولوژی بر مبنای شاخص SDI انجام گرفت که برای این تحقیق از داده های ماهانه بارندگی ۳۹ ایستگاه باران سنجی و حجم جریان ۲۵ ایستگاه هیدرومتری استفاده شد [۲۱].

نواحی همگن با انتخاب توزیع آماری مناسب در هر ناحیه و فراوانی شاخص ها به صورت منطقه ای تحلیل و کمیت هر یک از شاخص های خشک سالی در دوره های بازگشت و مقیاس های زمانی مختلف برآورده شد. نتایج نشان داد که ایستگاه های موجود در مقیاس های ۶ ماهه و ۹ ماهه از نظر شاخص SPI در دو گروه همگن قرار دارند. در شاخص SDI توزیع های آماری تعمیم یافته است و پردازش مناسب تری نشان دادند. نتایج شبیه سازی مقادیر ناحیه ای شاخص های خشک سالی در دوره های بازگشت مختلف نشان داد که میزان خطای RMSE با افزایش دوره بازگشت کاهش می یابد. به علاوه در مقیاس ناحیه ای نسبت به مقیاس نقطه ای ایستگاه احتمال خشک سالی های شدید بیشتر مورد انتظار است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق برای پایش خشک سالی با روش های داده کاوی مکانی از سه روش داده کاوی

مکانی برای بررسی ارتباط بین شاخص SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدور استفاده شده است. در ابتدا از روش درخت تصمیم برای طبقه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی و از الگوریتم جنگل تصادفی نیز برای شناسایی شاخص‌هایی که بیشترین رابطه را با SPI دارند استفاده شد. پس از شناسایی مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار بر SPI با استفاده از قوانین انجمنی به استخراج قوانینی با درجه پشتیبان بالا پرداخته شد.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی کشور است. این حوضه بین استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۴۵/۵ تا ۴۶ طول شرقی و ۳۷/۵ تا ۳۸/۱۵ عرض شمالی واقع شده است. دریاچه ارومیه به‌عنوان قلب این حوضه آبریز با مساحت ۵۰۰۰ کیلومترمربع بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان به شمار می‌رود. رودخانه‌های مهم این حوضه شامل زرینه‌رود، سیمینه‌رود و آجی‌چای می‌باشند. این حوضه ۳/۱۵ درصد از کل مساحت کشور را در برمی‌گیرد و حجم آب‌های سطحی در حوضه دریاچه، ۷ درصد از آب‌های سطحی کل کشور است و ارتفاع حوضه دریاچه بین ۱۲۶۷ تا ۳۷۴۶ متر از سطح دریا متفاوت است. حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس و دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و نیز دامنه‌های شمالی غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. حدود ۳۳۴۶۹ کیلومترمربع از سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه را مناطق کوهستانی (۶۵٪)، ۱۲۵۶۴ کیلومترمربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها (۲۴٪) و ۵۳۲۰ کیلومترمربع آن را نیز دریاچه ارومیه (۱۰٪) در برگرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

از لحاظ شرایط اقلیمی این حوضه دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است. در طبقه‌بندی اقلیمی کوپن این منطقه در اقلیم نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. مقدار بارندگی متوسط منطقه حدود ۳۵۲ میلی‌متر در سال که بخش عمده بارش از فصل پاییز تا اواسط بهار رخ می‌دهد. منشأ این ریزش‌ها، جبهه‌های هوایی است که از اروپا و مناطق سردسیری وارد ایران شده و از شمال و شمال غرب حوضه آبریز مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۲].

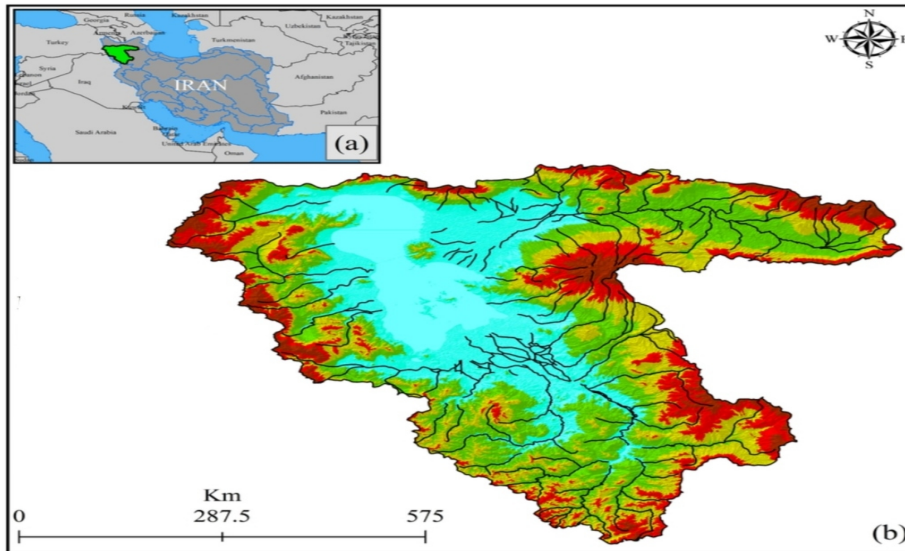
شکل ۲ توزیع بارش در فصل بهار از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ را برای منطقه مطالعه نشان می‌دهد. کاهش شدید بارش در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ قابل مشاهده است. این پژوهش در نظر دارد همه‌جانبه به بررسی موضوع مطرح‌شده بپردازد تا نتایج دقیقی را بیان کند. از این‌رو در شکل ۳ نیز نقشه ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک منطقه مورد مطالعه لحاظ شده است تا تصویر بهتری از این پروژه به نمایش بگذارد.

این تحقیق باهدف پایش و ارزیابی خشک‌سالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از روش‌های داده‌کاوی مکانی و شاخص‌های سنجش‌ازدور استفاده کرده است. روش‌شناسی تحقیق شامل مراحل زیر است:

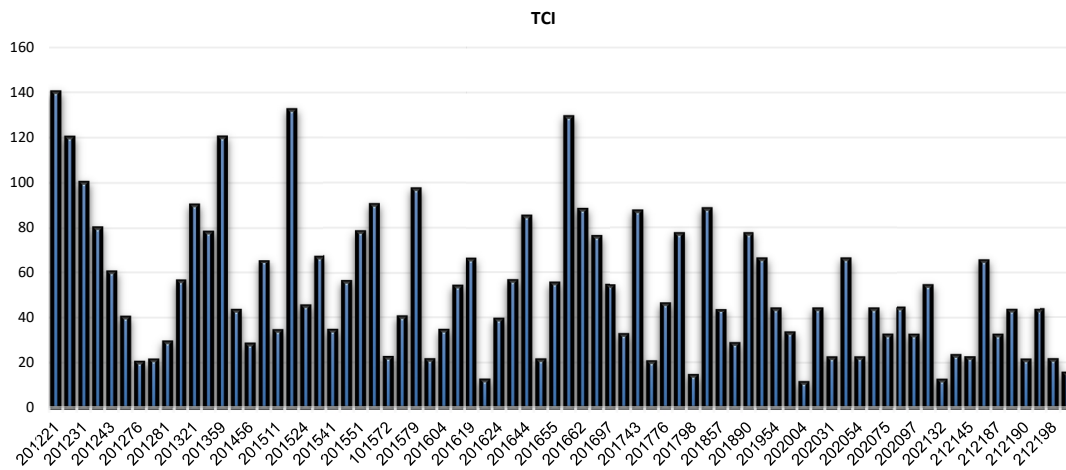
- داده‌های زمینی: شامل داده‌های بارش ماهانه از ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱.

- داده‌های سنجش‌ازدور: شامل شاخص‌های NDVI (شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی)، LST (دمای سطح زمین)، VCI (شاخص وضعیت پوشش گیاهی)، TCI (شاخص وضعیت دما)، VHI (شاخص سلامت پوشش گیاهی) و EVI (شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی) از سنجنده MODIS.

در ادامه به تشریح شاخص‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه



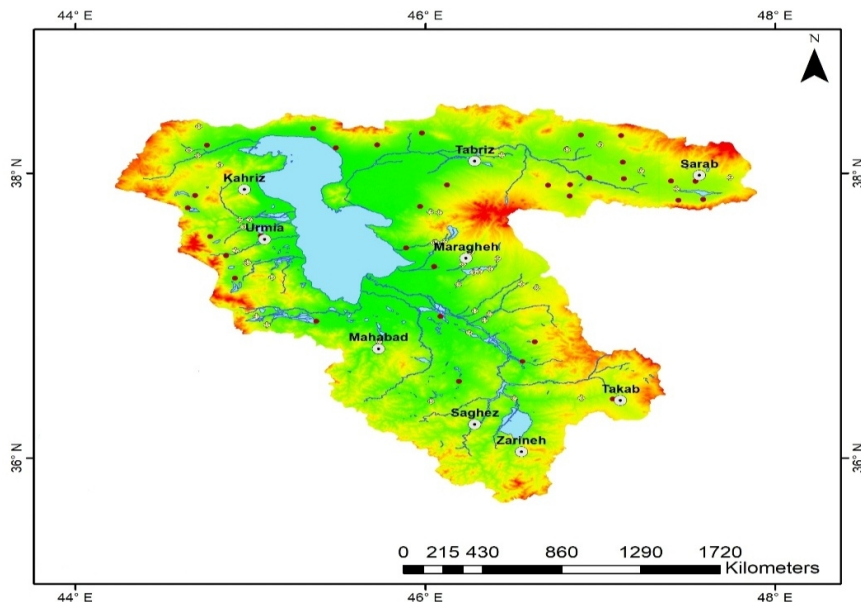
شکل ۲- توزیع بارش در فصل‌های بهار سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲

قوانین انجمنی: با استفاده از الگوریتم Apriori، قوانینی برای ارتباط بین شاخص‌های سنجش‌ازدور و SPI استخراج شد. حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه دارای جمعیتی حدود ۵ میلیون نفر است که بیش از ۳۶ شهر و ۳۱۵۰ روستا را در برمی‌گیرد. تراکم جمعیت در حوضه ۹۵ نفر در کیلومتر مربع بوده که بیش از دو برابر تراکم نسبی کل کشور است [۲۳]. بخش عمده‌ای از کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه (شکل ۴) را کشاورزی تشکیل می‌دهد که به شدت تحت تأثیر خشک‌سالی است.

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) این شاخص با استفاده از داده‌های بارش ماهانه محاسبه شد و برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه درون‌یابی شد. شاخص‌های سنجش‌ازدور: شاخص‌های NDVI، LST، VCI، TCI، VHI و EVI از داده‌های MODIS استخراج شدند. درخت تصمیم: برای طبقه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی به پنج گروه (بسیار کم، کم، متوسط، بالا، بسیار بالا) استفاده شد. جنگل تصادفی: برای شناسایی مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار بر SPI به کار گرفته شد.



شکل ۳- نقشه پایگاه ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک منطقه مورد مطالعه



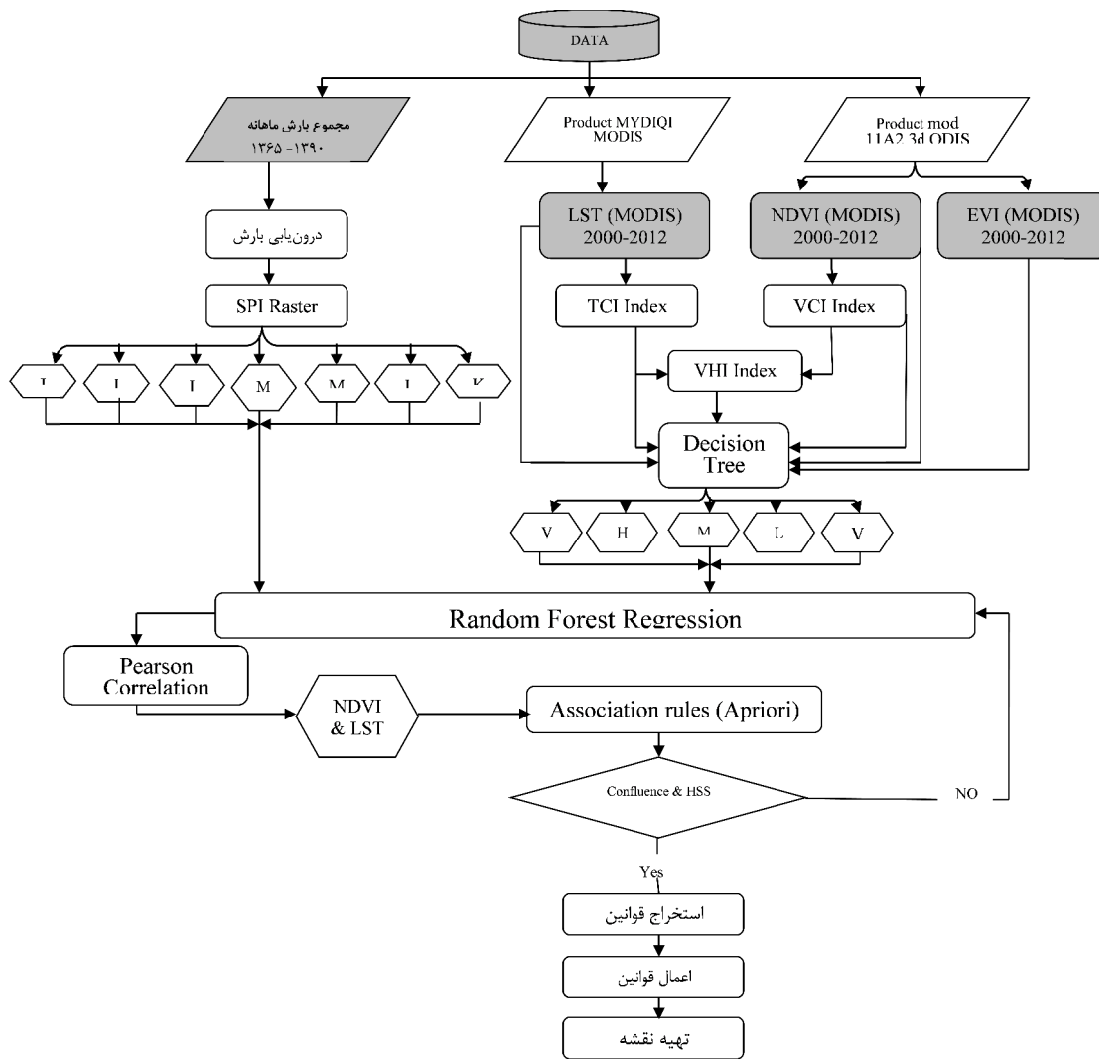
شکل ۴- نقشه اراضی

نرم‌افزار R و کتابخانه قوانین انجمنی و الگوریتم Apriori استفاده شده است. شکل ۵ مراحل انجام این تحقیق را به صورت مختصر بیان می‌کند. در این تحقیق ورودی‌ها به دو دسته بارش اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های زمینی و شاخص‌های استخراج شده از سنجنده MODIS تقسیم می‌شود. در مرحله دوم شاخص‌ها با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم^۱ طبقه‌بندی شده و به صورت گسسته درآمده‌اند.

¹ Decision Tree

۲-۱- نرم‌افزارهای مورد استفاده

از جمله نرم‌افزارهای مورد استفاده در تحقیق می‌توان به MATLAB اشاره کرد که برای محاسبه شاخص‌های گیاهی و شاخص SPI به صورت پیکسل مورد استفاده قرار گرفته است. از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه جنگل تصادفی آن نیز برای شناسایی متغیرها که بیشترین تأثیر را در مقدار شاخص SPI دارند، استفاده شد. در نهایت برای استخراج قوانین از



شکل ۵- فلوجارت مراحل تحقیق

۲-۲- معرفی شاخص‌های مورد استفاده در تحقیق

مجموعه شاخص‌های به کار گرفته در این تحقیق شامل شاخص بارش استاندارد شده SPI^۱ به دست آمده از مجموع بارش ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک است. شاخص‌های سنجش‌ازدور نیز شامل شاخص نرمال پوشش گیاهی NDVI، دمای سطح زمین LST.

شاخص استاندارد شده بارش SPI در سال ۱۹۹۵ توسط McKee و همکارانش ارائه شد. این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص سپس تقسیم آن بر

¹ Standardized Precipitation Index

انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص عنصر بارندگی است. این شاخص را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۳-۶-۱۲-۲۴-۴۸ ماهه محاسبه کرد. از نظر ریاضی شاخص SPI بر احتمال تجمعی وقایع بارندگی اتفاق افتاده در یک ایستگاه پایه‌ریزی می‌شود. این شاخص از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$SPI = \frac{P_i - P}{S}$$

Pi = مقدار بارش در دوره‌ی مورد نظر؛

P = میانگین درازمدت بارش برای دوره‌ی مورد نظر؛

جدول ۱- نتایج نهایی

Class	Very High	High	Medium	Low	Very Low	Range
LST	≤ 18.4	24.8 – 18.4	31.9 – 24.8	40.1 – 31.9	≥ 40.13	-6 – 53
TCI	< 30.46	38.8 – 30.4	46.7 – 38.8	66.2 – 46.7	> 66.2	3.4 – 91.1
VCI	< 0.79	0.54 – 0.79	0.40 – 0.54	0.30 – 0.40	> 0.30	0 – 1
EVI	≥ 0.72	0.42 – 0.72	0.22 – 0.42	0.12 – 0.22	-0.10 – 0.12	-1 – 1

گره‌ها و برگ است که می‌تواند به راحتی تفسیر شود. یک برگ نشان‌دهنده‌ی یک کلاس خاص که ممکن است شامل یک برچسب ویژگی باشد. شاخص‌های EVI, LST, TCI, VCI به پنج، گروه بسیار بالا (V)، بالا (H)، متوسط (M) کم (L) و بسیار کم (VL) با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری تقسیم شدند که محدوده‌ی طبقات به صورت جدول (۱) است.

۳-۲- نتایج جنگل تصادفی

پس از بررسی همبستگی بین شاخص‌ها با استفاده از جنگل تصادفی به مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر شاخص SPI شناسایی شدند. در این روش جنگل تصادفی شروع به ساخت درختان با متغیرهای مختلف می‌کند و به پیش‌بینی متغیر وابسته می‌پردازد سپس شکل زیر نمونه کوچکی از درخت ساخته شده توسط جنگل تصادفی است. شکل ۶ نیز مقدار SPI را با مقدار پیش‌بینی شده توسط جنگل تصادفی مقایسه می‌کند که نقاط کم‌رنگ داده‌ها و نقاط تیره، پیش‌بینی شده‌ها است.

برای پیدا کردن مهم‌ترین ویژگی‌های همبستگی در مقدار SPI جنگل تصادفی یک لیست از ویژگی‌ها را ایجاد می‌کند و برای هر کدام مقدار اهمیت آن را بیان می‌نماید. این آمار ثابت می‌کند که برخی از متغیرها برای مسئله‌ی ما بسیار مهم‌تر از سایر متغیرها هستند. در این رابطه مقدار NDVI بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده است. LST نیز در درجه دوم اهمیت زیادی برخوردار است. شاخص EVI نیز از اهمیت بالایی برخوردار است که به دلیل

S = انحراف معیار مقدار بارش
مقادیر شاخص SPI که بدین گونه از داده‌های بلندمدت بارش برای یک دوره‌ی زمانی موردنظر به دست می‌آید از یک توزیع نرمال تبعیت می‌کند که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است. این نتیجه‌ی عددی موجب می‌شود تا بتوان اقلیم‌های مرطوب و خشک را به یک روش بررسی کرد. برای محاسبه‌ی این نمایه از توزیع گاما برای برازش داده‌های بلندمدت بارش استفاده می‌شود. پس از انجام محاسبه‌های لازم و تعیین پارامترهای مربوطه شاخص SPI به دست می‌آید. بر اساس شاخص SPI می‌توان آستانه خشک‌سالی را برای هر آیتم مشخص کرد [۲۴].

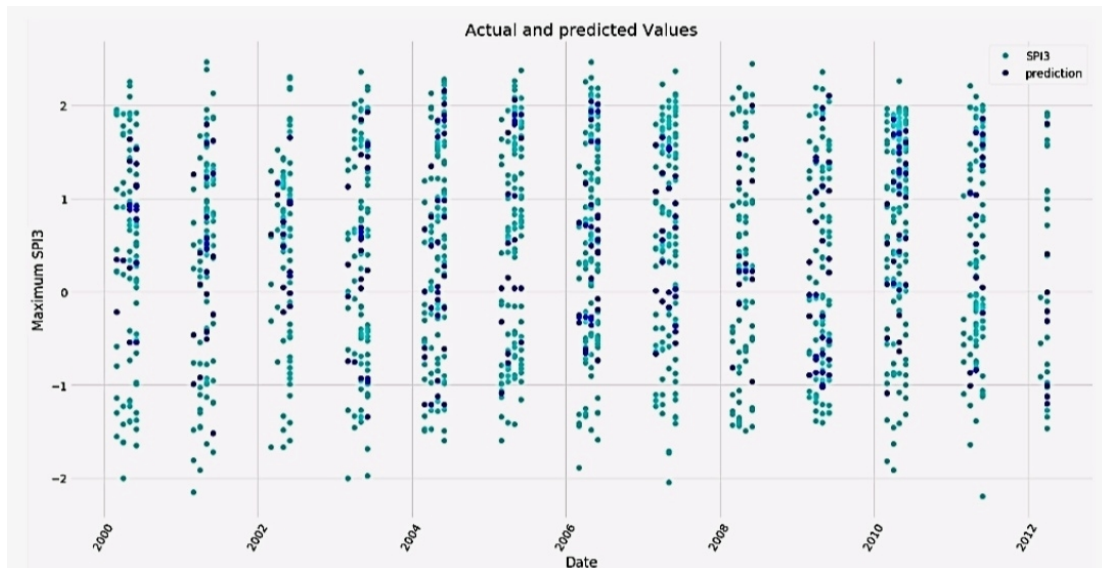
۳-۲- روش‌های سنجش‌ازدور در پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی

سنجش‌ازدور ابزاری ایجاد می‌کند که اندازه‌گیری تشعشع خالص از سطح زمین را امکان‌پذیر می‌سازد به همین دلیل وسیله‌ی مستقلی را برای پایش دما، رطوبت و تغییرات پوشش گیاهی از طریق بیان انرژی به وجود می‌آورد. در این ابزار پوشش گیاهی عامل مفید و مهمی برای شناسایی خشک‌سالی و بخصوص خشک‌سالی کشاورزی است.

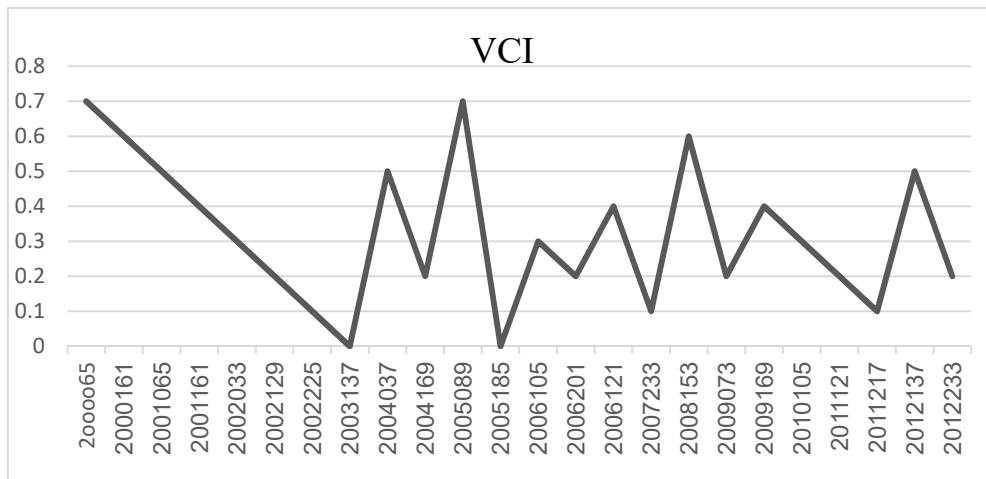
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج درخت تصمیم

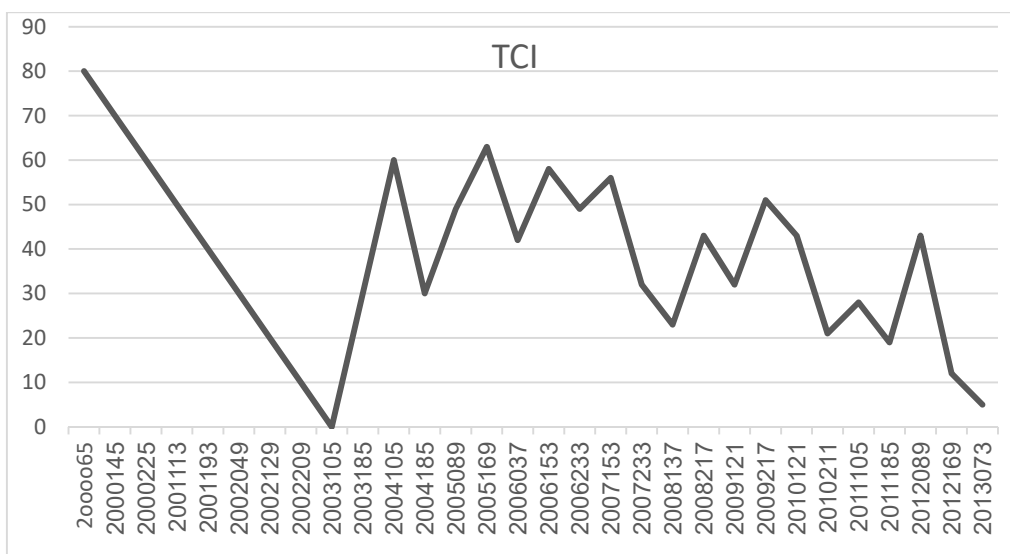
روش درخت تصمیم برای طبقه‌بندی داده‌ها با استخراج مقادیر منطقی در مجموعه لحاظ می‌شود. نتیجه‌ی نهایی یک درخت، تصمیم‌گیری



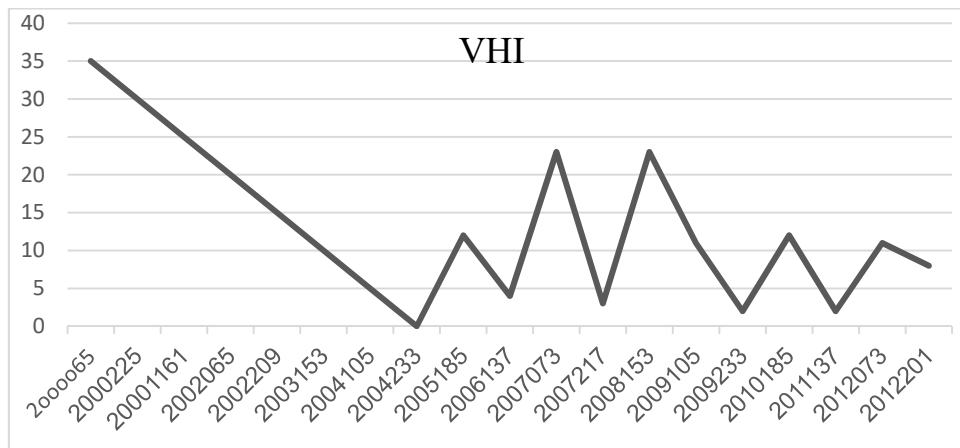
شکل ۶- مقایسه SPI پیش‌بینی شده با داده‌ها موجود



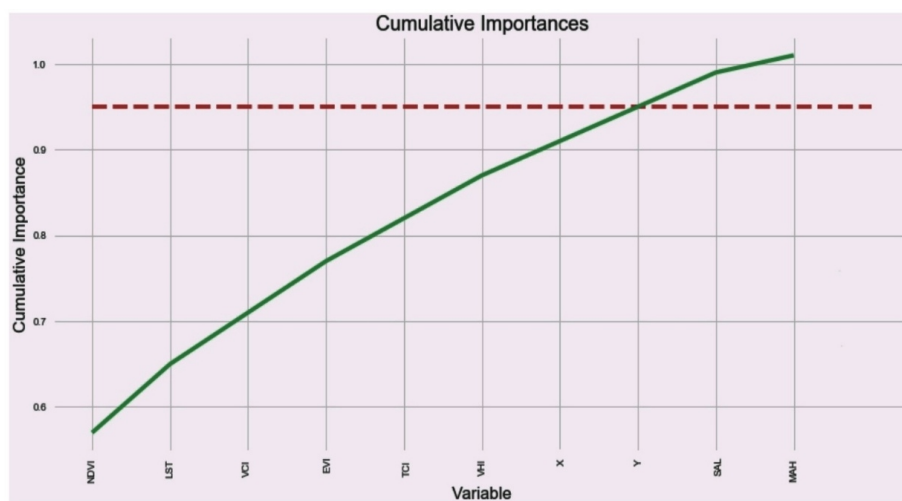
شکل ۷- تغییرات VCI از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ میلادی در منطقه سلماس



شکل ۸- تغییرات شاخص TCI از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ میلادی در منطقه مطالعاتی



شکل ۹- تغییرات شاخص VHI 2012 تا ۲۰۲۲ میلادی در منطقه مطالعاتی



شکل ۱۰- نمودار اهمیت تجمعی

جدول ۲- اهمیت شاخص‌ها تأثیرگذار بر شاخص‌های

Variable	Importance
NDVI	0.58
LST	0.10
VCI	0.08
EVI	0.05
TCI	0.04
VHI	0.04
X	0.04
Y	0.03
سال	0.02
ماه	0.02
مجموع	1.00

همبستگی آن با شاخص NDVI که در مطالب قبل نیز ارائه شد. از آن طرف در نهایت سه شاخص NDVI, LST و VCI به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر SPI انتخاب شدند. شکل ۱۰ یک نمودار اهمیت تجمعی است که سهم اهمیت کلی هر متغیر را نشان می‌دهد. خط کشیده شده ۹۵٪ از کل اهمیت به حساب می‌آید.

همبستگی بین دو شاخص و SPI سه‌ماهه با رابطه‌ی $y = 3.215x - 0.393$ مثبت بوده و مقدار آن $R^2 = 0.49$ است. همان‌طور که در جدول نیز مشاهده می‌شود شاخص‌های NDVI و VCI دارای بالاترین همبستگی باهم هستند که می‌توان از شاخص VCI به‌عنوان جایگزینی برای برخی از مناطق استفاده کرد.

جدول ۳. ماتریس همبستگی زوجی شاخص‌ها با

شاخص Ndvi

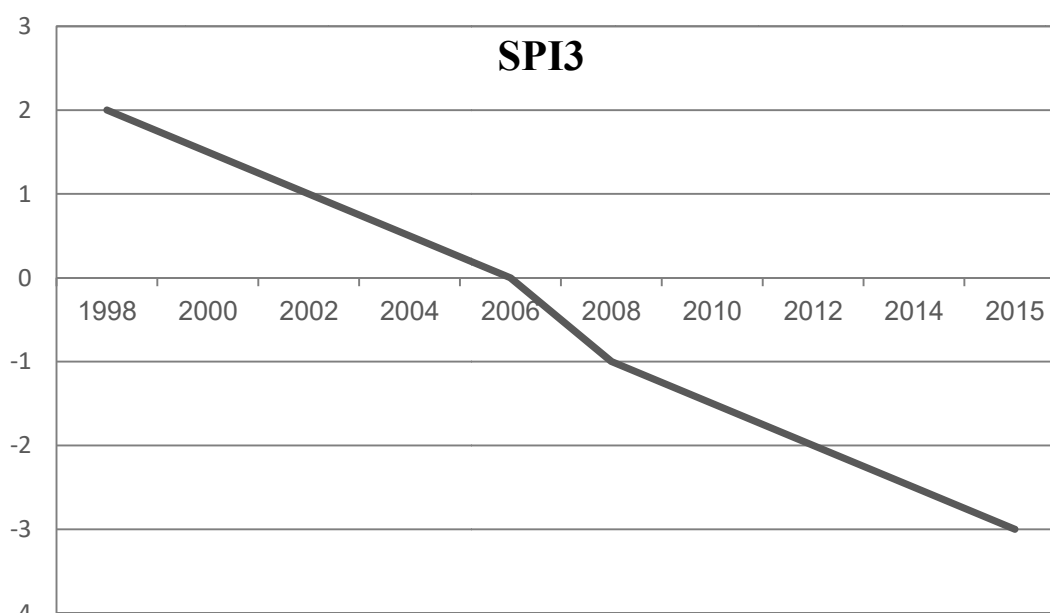
Indices	NDVI
NDVI	1
LST	-0.76
VCI	0.78
EVI	0.89
TCI	0.90
VHI	0.79

LST از جنبه پوشش گیاهی و دما مورد استفاده قرار گرفتند که خروجی قوانین استخراج شده، روند خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه را با استفاده از این قوانین به دست آمده، بیان می‌کند. این قوانین دربرگیرنده LST است که تعیین کننده نوع خشک‌سالی بر اساس شاخص SPI است.

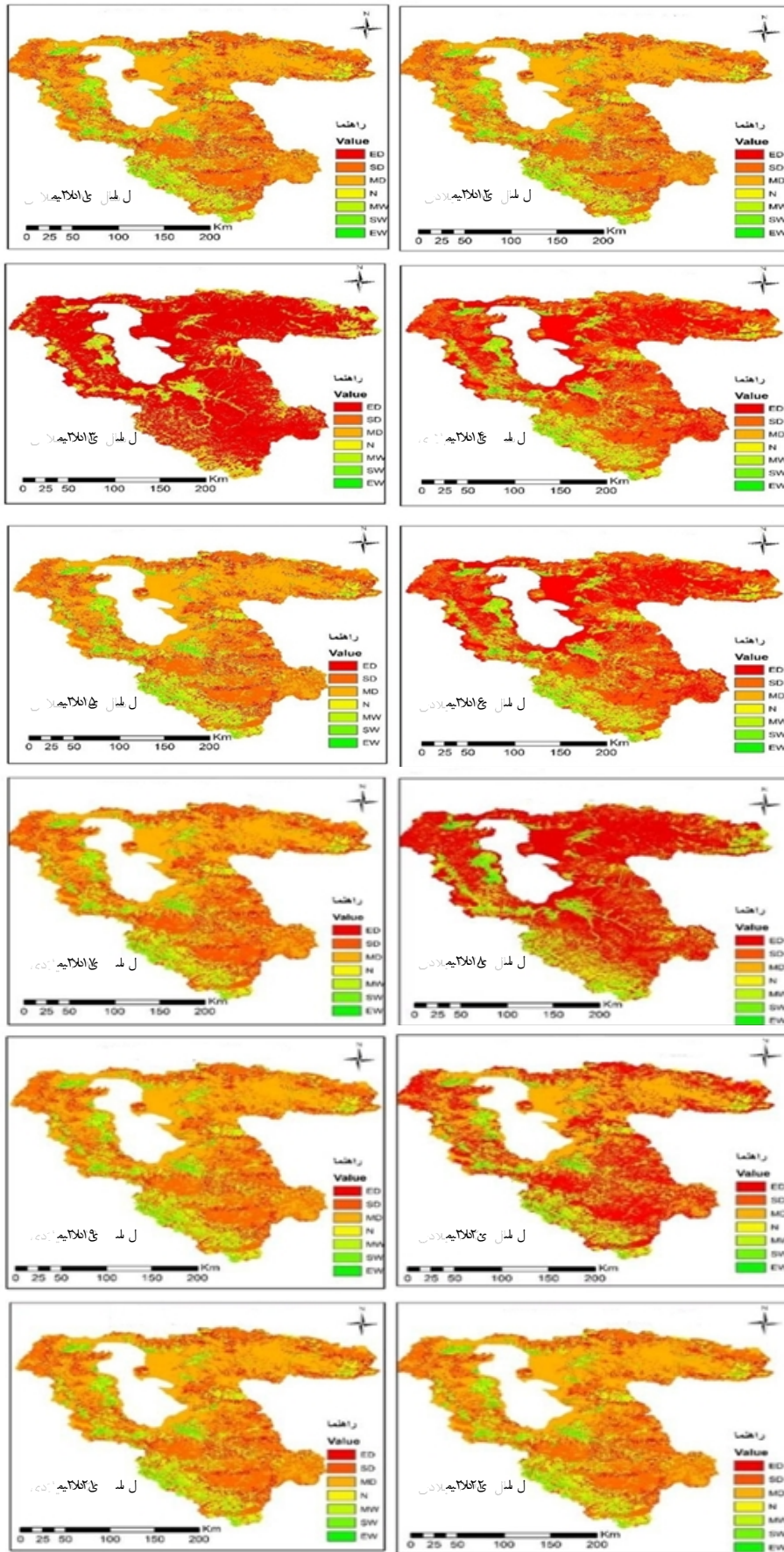
به کمک شکل ۱۱ شاخص SPI به دست آمده از داده‌های زمینی می‌توان به این نتیجه رسید که این قوانین به خوبی می‌توانند خشک‌سالی را در سطح منطقه نشان دهند. شکل ۱۲ روند خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه را بر اساس خشک‌سالی بسیار شدید با پیکسل‌های دربرگیرنده‌ی این نوع خشک‌سالی، از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بیشترین مساحت دربرگیرنده خشک‌سالی در منطقه را نشان می‌دهد.

۳-۳- روند خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه

پارامترهای متعددی بر پدیده خشک‌سالی تأثیرگذار و تأثیرپذیر است از جمله: دما و بارندگی... که به دلیل عدم دسترسی به داده و مشکل بودن بررسی تمامی عوامل به منظور پایش خشک‌سالی در این مطالعه از سه عامل پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و بارش به عنوان پارامترهای مؤثر بر خشک‌سالی برای پایش جامع خشک‌سالی استفاده شد. شاخص VCINDVI و



شکل ۱۱- روند خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص SPI3



شکل ۱۲- بررسی وضعیت خشک‌سالی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ میلادی

۴- نتیجه گیری

یکی از روش‌های متداول در پایش خشک‌سالی استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است که به دو دسته شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور طبقه‌بندی می‌شود. دسترسی آسان به اطلاعات و سری زمانی منظم آن‌ها و نیز پایش سطح گسترده‌ای از منطقه، از مزایای شاخص‌های سنجش‌ازدور است.

در این تحقیق بر اساس روش‌های داده‌کاوی مکانی، درخت تصمیم، جنگل تصادفی و قوانین انجمنی مناسب‌ترین ترکیب شاخص‌های خشک‌سالی سنجش‌ازدور در مقایسه با شاخص استاندارد شده بارش (SPI) معرفی و همچنین شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص‌های سنجش‌ازدور فوق بیان شد. شاخص‌های سنجش‌ازدور برخلاف شاخص SPI که خشک‌سالی را بر اساس شدت به طبقات مختلف تقسیم‌بندی می‌کند و دارای طبقه‌بندی استاندارد است، فاقد طبقه‌بندی خاصی برای خشک‌سالی است و داده‌ها به صورت پیوسته بوده و مقدار شدت خشک‌سالی را نیز به صورت نسبی بیان می‌کند. در این تحقیق با به‌کارگیری روش‌های داده‌کاوی به ارائه‌ی یک طبقه‌بندی از شاخص‌های سنجش‌ازدور پرداخته شد که میزان و شدت خشک‌سالی را بسته به مقدار شاخص بیان می‌کند.

شاخص‌های سنجش‌ازدور متعددی در زمینه پایش خشک‌سالی وجود دارد که میزان اهمیت و دقت هر کدام از شاخص‌ها در پیش‌بینی و پایش خشک‌سالی مشخص نیست. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم جنگل‌های تصادفی به اندازه‌گیری اهمیت هر کدام از شاخص‌ها برای مشخص کردن اینکه هر شاخص به چه میزان در پیش‌بینی نقش دارد، پرداخته شد که در نهایت برای هر شاخص میزان اهمیت و تأثیر آن بر شاخص SPI مشخص شد. از میان شاخص‌های

بررسی شده دو شاخص NDVI و LST بیشترین همبستگی را بر مقدار SPI داشتند که در صورت ضعیف بودن شاخص NDVI شاخص VCI در درجه دوم قرار می‌گیرد. همبستگی بین شاخص‌های سنجش‌ازدور و شاخص SPI نشان می‌دهد که بین نوع خشک‌سالی با پوشش گیاهی شرایط دمایی و بارش رابطه وجود دارد. به‌عنوان مثال رابطه آماری بین SPI و VCI نشان داد که می‌توان برای مناطقی که پوشش گیاهی ضعیفی دارند، از این شاخص به‌عنوان جایگزین شاخص NDVI استفاده کرد.

در این تحقیق ابتدا استخراج شاخص‌های سنجش‌ازدور و زمینی طبقه‌بندی شاخص‌ها شناسایی شد سپس مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار SPI و در نهایت به استخراج قوانین انجامید. این مراحل توانست روند خشک‌سالی مورد مطالعه را استخراج کند و نشان داد که امکان پایش خشک‌سالی با استفاده از روش‌های داده‌کاوی مکانی با دقت بالا وجود دارد. با توجه به استخراج قوانین انجمنی مبتنی بر شاخص‌های سنجش‌ازدور، این قوانین با سطح اطمینان بالا می‌توانند الگوی پنهان بین شاخص‌های سنجش‌ازدور را کشف و میزان خشک‌سالی را بیان کنند. به‌طور مثال قانون $\{LST_VL, NDVI_VL, VCI_M\} \Rightarrow \{SPI_MD\}$ که دارای سطح اطمینان ۸۲ است.

نشان می‌دهد خشک‌سالی سطح متوسط اتفاق می‌افتد. لذا اگر دما خیلی بالا NDVI خیلی پایین و VCI متوسط فرض دوم با بررسی شاخص استاندارد شده بارش (SPI)، شاخص‌های پوشش گیاهی و با به‌کارگیری تکنیک‌های داده‌کاوی مکانی می‌توان روند خشک‌سالی در حوضه‌ی مورد مطالعه را به دست آورد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های داده‌کاوی مکانی و شاخص‌های سنجش‌ازدور ابزارهای مؤثری برای پایش خشک‌سالی هستند.

در ادامه، یافته‌های کلیدی تحقیق به‌طور مبسوط ارائه می‌شوند:

الف) وضعیت همبستگی بین شاخص‌ها - شاخص‌های NDVI و LST بیشترین همبستگی را با SPI داشتند. همبستگی بین NDVI و SPI حدود ۰,۵۸ و بین LST و SPI حدود ۰,۱۰ بود. - شاخص VCI در صورت ضعف NDVI، شاخص VCI می‌تواند به‌عنوان جایگزین استفاده شود. همبستگی بین VCI و SPI حدود ۰,۰۸ بود. - شاخص‌های EVI، TCI و VHI همبستگی کمتری با SPI داشتند، اما همچنان در تحلیل خشک‌سالی مفید بودند.

ب) طبقه‌بندی خشک‌سالی - درخت تصمیم: شاخص‌ها به پنج گروه (بسیار کم، کم، متوسط، بالا، بسیار بالا) طبقه‌بندی شدند. به‌عنوان مثال، مقادیر LST در محدوده ۴۰,۱۳ تا ۵۳ به‌عنوان «بسیار کم» و مقادیر کمتر از ۱۸,۴ به‌عنوان «بسیار بالا» طبقه‌بندی شدند. - جنگل تصادفی: شاخص‌های NDVI و LST به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر SPI شناسایی شدند.

ج) قوانین انجمنی - قانون نمونه $\{LST_VL, NDVI_VL, VCI_M\} \Rightarrow \{SPI3_MD\}$: ۸۲٪ نشان می‌دهد که اگر دما بسیار بالا، NDVI بسیار کم و VCI متوسط باشد، خشک‌سالی سطح متوسط رخ می‌دهد. - پیش‌بینی خشک‌سالی: بر اساس قوانین استخراج‌شده، بیشترین خشک‌سالی در سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ رخ داده است.

د) نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی - در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰: بیشترین مساحت تحت تأثیر خشک‌سالی شدید و بسیار شدید قرار داشت.

- روند خشک‌سالی در نقشه‌ها نشان دادند که خشک‌سالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌طور پیوسته در حال افزایش است.

ه) مقایسه با تحقیقات پیشین - مطابقت با مطالعات دیگر: نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مطابقت دارد. به‌عنوان مثال، تحقیقات نشان داده‌اند که خشک‌سالی در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ به اوج خود رسیده است.

- نوآوری تحقیق: استفاده از روش‌های داده‌کاوی مکانی و قوانین انجمنی به‌عنوان رویکردی نوین برای پایش خشک‌سالی

این تحقیق نشان داد که روش‌های داده‌کاوی مکانی و شاخص‌های سنجش‌ازدور ابزارهای قدرتمندی برای پایش خشک‌سالی هستند. ترکیب این روش‌ها با شاخص‌های زمینی مانند SPI می‌تواند دقت و کارایی تحلیل‌ها را افزایش دهد. در ادامه، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود:

- استفاده از داده‌های با وضوح بالاتر: استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور با وضوح مکانی و زمانی بالاتر برای بهبود دقت تحلیل‌ها.

- توسعه مدل‌های پیش‌بینی: استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی مختلف.

- تحلیل تأثیرات اقتصادی و اجتماعی: بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر بخش‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

- مدیریت منابع آب: ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش تأثیرات خشک‌سالی بر منابع آب و کشاورزی در منطقه.

این تحقیق گامی مهم در راستای بهبود روش‌های پایش خشک‌سالی و ارائه راهکارهای

drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment. *Environmental modelling & software*, 91, 199-209.

8. Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., & Ebadi Nehari, Z. (2019). Evaluation of MODIS and TRMM satellite data for drought monitoring in the Urmia lake basin. *Geography and Environmental Planning*, 30(2), 17-34.

9. Kerdprasop, K., & Kerdprasop, N. (2016). Remote sensing based model induction for drought monitoring and rainfall estimation. In *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2016: 16th International Conference*, Beijing, China, July 4-7, 2016, Proceedings, Part III 16 (pp. 356-368). Springer International Publishing.

10. Dehghan, A., Khanjani, N., Bahrapour, A., Goudarzi, G., Yunesian, M., Hopke, P. K., & Jafarnejhad, A. (2020). Forecasting Ambient Air Pollutants in Tehran, Iran. *Environmental Justice*, 13(6), 193-201.

11. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995, January). Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of the Conference on Applied Climatology*.

12. Khosravi, I., Jouybari-Moghaddam, Y., & Sarajian, M. R. (2017). The comparison of NN, SVR, LSSVR and ANFIS at modeling meteorological and remotely sensed drought indices over the eastern district of Isfahan, Iran. *Natural Hazards*, 87, 1507-1522.

13. Navabi, N., Moghaddasi, M., & Gangi, N. (2021). Assessment of Agricultural Drought Monitoring Using Various Indices based on Ground-based and Remote Sensing Data (Case Study: Lake Urima Basin). *Watershed Engineering and Management*, 13(1), 1-12.

14. Marcos-Garcia, P., Lopez-Nicolas, A., & Pulido-Velazquez, M. (2017). Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292-305.

15. Nourani, V., & Molajou, A. (2017). Application of a hybrid association rules/decision tree model for drought monitoring. *Global and Planetary Change*, 159, 37-45.

16. Rafiei Sardooi, E., Azareh, A., Eskandari Damaneh, H., & Skandari Damaneh, H. (2021). Drought Monitoring Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index Products in Semi-Arid Areas of Iran. *Journal of Rangeland Science*, 11(4), 402-418.

17. Saada, N., & Abu-Romman, A. (2017). Multi-site modeling and simulation of the standardized precipitation index (SPI) in Jordan. *Journal of Hydrology: Regional*

مدیریتی برای مقابله با این پدیده است. امید است که نتایج این تحقیق بتواند به عنوان مرجعی برای تحقیقات آینده و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد. قوانین انجمنی استخراج شده بر مبنای شاخص‌های سنجش‌ازدور و ارتباط آن با شاخص SPI امکان بررسی روند خشک‌سالی در حوضه‌ی مورد مطالعه را فراهم نمود که برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بیشترین خشک‌سالی پیش‌بینی شد. این نتایج با تحقیقاتی که بر روی حوضه آبریز ارومیه انجام شده است، مطابقت دارد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از تمامی اساتید و همکاران که در جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل نتایج، همراهی و کمک کردند، تشکر قدردانی می‌کنند.

۶- منابع

1. Kerdprasop, K., & Kerdprasop, N. (2021). Remote Sensing Based Model Induction for Drought Monitoring and Rainfall Estimation, *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2016: 356-368*
2. Barati, M. K., Soundharajan, B. S., & Nikoo, M. R. (2024). Simulation of climate-adaptation responses to rainfall variability on rainfed yield anomalies. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100411.
3. Chang ChungTe, C. C., Wang HsuehChing, W. H., & Huang ChoYing, H. C. (2018). Assessment of MODIS-derived indices (2001-2013) to drought across Taiwan's forests.
4. Safaeepour, M., Maleki, S., Ghaed, S., & Ebrahimi, A. (2024). Investigation and analysis of the physical development pattern of Izeh city in dealing with natural hazards. *Scientific and Research Quarterly*, 13(4), 21-35
5. Chopra, P. (2006, January). Drought risk assessment using remote sensing and GIS: a case study of Gujarat. *Enschede, The Netherlands: ITC*.
6. Goyal, M. K., & Sharma, A. (2016). A fuzzy c-means approach regionalization for analysis of meteorological drought homogeneous regions in western India. *Natural hazards*, 84, 1831-1847.
7. Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., Ouyang, W., & Cheng, H. (2017). An integrated package for

Studies, 14, 83-91.

18. Tadesse, T., Wardlow, B., & Hayes, M. J. (2009). The application of data mining for drought monitoring and prediction. In Data mining applications for empowering knowledge societies (pp. 278-289). IGI Global.

۱۹- صفایی پور، مسعود، ملکی، سعید، قانیدی، سهراب و ابراهیمی، اعظم. (۱۴۰۳). تحلیل و پیشنهاد الگوی توسعه فیزیکی شهر ایزه با تأکید بر مخاطرات طبیعی. مجله مدیریت بحران، ۱۳(۴)، ۲۱-۳۵.

۲۰- مرتازی، حسین، پورکرمانی، محسن، الماسیان، محمود و بوذری، سهیلا. (۱۴۰۲). بررسی فعالیت زمین‌ساختی با استفاده از شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی در حوضه‌های آبریز حومه شمال شرق استان تهران با رویکرد مدیریت بحران. مجله مدیریت بحران، ۱۲(۱)، ۱۳۹-۱۵۶.

21. Zahraie, B., Nasser, M., & Nematizadeh, F. (2017). Exploring spatiotemporal meteorological correlations for basin scale meteorological drought forecasting using data mining methods. Arabian Journal of Geosciences, 10, 1-15.

22. Zougrana, B. J., Conrad, C., Thiel, M., Amekudzi, L. K., & Da, E. D. (2018). MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa. Journal of Arid Environments, 153, 66-75.

23. Thavorntam, W., Tantemsapya, N., & Armstrong, L. (2015). A combination of meteorological and satellite-based drought indices in a better drought assessment and forecasting in Northeast Thailand. Natural Hazards, 77, 1453-1474.

24. R. Khavari, M. Ghorashi, M. Arian, Kh.Khosrotehrani. (2008). Geomorphi signatures of Active Tectonics in the Karaj drainage Basin insouth central Alborz, N Iran. ScientificQuarterly Journal Geo sciences vol. 19, No. 75, spring 2010. Pages 67 to 74.

۱۸

شماره ۳۰

تابستان ۱۴۰۴

فصلنامه علمی

و پژوهشی



داری، حبیب‌الله سهیلی
بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه / محمدرضا صالحی، محمد اسکندری، مسعود
سنجش و پایش بحران خشک‌سالی با استفاده از داده‌های مکانی با تأکید