

Evaluation of drought in the Gharasou basin using meteorological, hydrological, and remote sensing indices

Batol Zeynali^{1*} , Mojtaba Faridpour² 

1. *Corresponding Author*, Associate Professor of Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardebili, Ardabil, Iran

2. PH. D in Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardebili, Ardabil, Iran

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 07 October 2020

Revised: 15 May 2021

Accepted: 06 June 2021

Keywords:

Drought monitoring,
SPI,
SDI,
NDVI and VCI indices,
Gharasou basin.

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate drought using meteorological, hydrological, and remote sensing indicators in the Gharasou basin located in Ardabil province with an area of 495 square kilometers. Therefore, to calculate the SPI index was used monthly rainfall values related to 22 rainfall stations (1985-2015) and to calculate the SDI index, the monthly discharge values of 14 hydrometric stations (1985-2015). Then, SPI and SDI indices were compared with each other on a time scale of 1, 3, 6, 9, and 12 months, as well as seasonal and half a year. To study vegetation drought and calculate NDVI and VCI indices, were used MODIS images, with a spatial resolution of 500 meters for 15 years (2000-2015). The results of the meteorological drought time series in Gharasou showed that the drought occurred comprehensively in the years (2001-2000, 2006-2005, 2008-2007, and 2014-2013). So that the most affected areas of drought were related to the northern and northeastern of the basin (Namin and Abarkooh). The results showed that meteorological drought has been more persistent in recent years and has been significantly correlated with hydrological drought with a delay of 1 to 3 months. NDVI and VCI indices showed that in identifying drought periods, these indices are consistent with meteorological drought, but are different correlation values. Finally, the comparison of NDVI and VCI indices with the SPI index showed that the VCI index with a value of $r = 0.44$ has the highest correlation with the SPI index. However, the correlation between NDVI and SPI indices is $r = 0.38$. The results of the VCI index showed that in drought conditions, only in the east of the basin and in the areas around Sabalan mountain, favorable vegetation conditions are observed, but in other areas of the basin, moderate and weak drought has occurred.

Cite this article: Zeynali, B., Faridpour, M. (2022). Evaluation of drought in the Gharasou basin using meteorological, hydrological, and remote sensing indices. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(31), 85- 106. DOI: 10.22111/jneh.2021.36028.1708



© Batol Zeynali.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2021.36028.1708

* Corresponding Author Email: Zeynali.b@uma.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره یازدهم، شماره ۳۱، بهار ۱۴۰۱

ارزیابی خشکسالی در حوضه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های هواشناسی،

هیدرولوژیکی و سنجش‌ازدور

بتول زینالی^{۱*}، مجتبی فریدپور^۲

۱. دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل (نویسنده مسئول)
۲. دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف از این پژوهش بررسی خشکسالی از جنبه‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و سنجش‌ازدور در حوضه قره‌سو واقع در استان اردبیل با مساحتی حدود ۴۹۵ کیلومترمربع است. بنابراین، به‌منظور محاسبه خشکسالی هواشناسی (شاخص SPI) از مقادیر بارندگی ماهانه مربوط به ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی در بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۱۵-۱۹۸۵) و برای محاسبه خشکسالی هیدرولوژیکی (شاخص SDI) از مقادیر دبی ماهانه ۱۴ ایستگاه هیدرومتری از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ (۳۰ سال) استفاده شد. در ادامه شاخص‌های SPI و SDI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، همچنین به‌صورت فصلی و نیم‌سال آبی با یکدیگر مقایسه شدند. جهت بررسی خشکسالی پوشش گیاهی و محاسبه شاخص‌های VCI، NDVI، از تصاویر MOD13 A1 v6 سنجنده MODIS، با توان تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۱۵-۲۰۰۰) استفاده شد. نتایج سری زمانی خشکسالی هواشناسی در قره‌سو نشان داد که خشکسالی در سال‌های (۲۰۰۱-۲۰۰۰، ۲۰۰۶-۲۰۰۵، ۲۰۰۸-۲۰۰۷ و ۲۰۱۴-۲۰۱۳) به‌صورت فراگیر رخ داده است. به‌طوری‌که بیشترین پهنه‌های درگیر خشکسالی مربوط به نواحی شمال و شمال شرق حوضه (ایستگاه‌های نمین و ابرکوه) بوده است. همچنین نتایج نشان داد که خشکسالی هواشناسی در سال‌های اخیر تداوم بیشتری داشته و به‌صورت محسوس با ۱ تا ۳ ماه تأخیر، بیشترین همبستگی را با خشکسالی هیدرولوژیکی داشته است. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های NDVI و VCI نشان داد که در تشخیص دوره‌های خشکسالی و ترسالی با شاخص SPI همخوانی دارند؛ اما مقادیر همبستگی آن‌ها متفاوت است. در نهایت مقایسه شاخص‌های NDVI و VCI با شاخص SPI نشان داد که شاخص VCI با مقدار $r=0/44$ بیشترین همبستگی را با شاخص SPI دارد. این در حالی است که مقدار همبستگی بین شاخص‌های NDVI و SPI برابر با $r=0/38$ می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی شاخص VCI نشان داد که در شرایط خشکسالی شدید، تنها در شرق حوضه و در مناطق اطراف سیلان، شرایط مطلوب پوشش گیاهی مشاهده می‌شود؛ اما در دیگر مناطق حوضه، خشکسالی متوسط و ضعیف رخ داده است.
واژه‌های کلیدی: پایش خشکسالی، شاخص‌های SPI، SDI، NDVI و VCI، حوضه قره‌سو.	
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۶	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶	
استناد: زینالی، بتول، فریدپور، مجتبی. (۱۴۰۱). ارزیابی خشکسالی در حوضه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و سنجش‌ازدور. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۱)، ۸۵-۱۰۶. DOI: 10.22111/jneh.2021.36028.1708	
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	© بتول زینالی، مجتبی فریدپور.



مقدمه

خشکسالی یک پدیده طبیعی و مکرر است که به انواع مختلفی از جمله خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی تقسیم می‌شود (وایت^۱، ۲۰۰۰). به‌طور کلی، بدون توجه به واقعیت فیزیکی حاکم بر پدیده خشکسالی، اگر خشکسالی را نوعی کمبود نسبت به شرایط نرمال یک منطقه بدانیم و آن را به‌عنوان یک پدیده نسبی نگاه کنیم، اولین گام در مطالعات خشکسالی (به‌ویژه مطالعات مدیریت خشکسالی) را می‌توان، بحث به کمیت درآوردن این کمبودها دانست که در اصطلاح «پایش خشکسالی»^۲ نامیده می‌شود. تاکنون شاخص‌های متعددی برای پایش انواع خشکسالی‌ها ارائه شده است. تنوع شاخص‌ها بیانگر آن است که هیچ‌یک از شاخص‌ها به‌تنهایی نتوانسته است نیازهای تحقیقاتی در زمینه خشکسالی را به‌طور کامل برطرف کند. از این‌رو، به محققان توصیه شده است، به‌جای پایش خشکسالی با استفاده از یک شاخص، نتایج حاصل از چندین شاخص به‌صورت هم‌زمان را مورد توجه قرار دهند (بذرافشان و حجابی، ۱۳۹۶). در میان انواع خشکسالی‌ها، خشکسالی هواشناسی صرفاً تحت تأثیر ویژگی‌های آب و هوایی می‌باشد، در حالی که دیگر خشکسالی‌ها ممکن است تحت تأثیر عوامل دیگری مانند رفتارهای انسانی باشد (تساکریس و همکاران^۳، ۲۰۱۳؛ پاپتاناسیو و همکاران^۴، ۲۰۱۳). با توجه به اینکه خشکسالی تقریباً تمامی عوامل تعیین‌کننده چرخه هیدرولوژیکی از آغاز بارش و سپس جریان آب سطحی و در نهایت ذخیره‌سازی در آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در ادامه به برخی از مطالعاتی که در این زمینه‌ها در سطح ملی و بین‌المللی صورت گرفته است اشاره می‌شود.

کانلو و همکاران^۵ (۲۰۰۸)، دو شاخص^۶ RDI و^۷ VHI (شاخص سلامت گیاهی) را برای پایش خشکسالی در لاریسا در مرکز یونان استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کاربرد این دو شاخص VHI به‌عنوان نوعی شاخص خشکسالی کشاورزی و RDI به‌عنوان شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی با یکدیگر می‌تواند نمایشگر انواع دیگر خشکسالی نیز باشد. همچنین ری و همکاران^۸ (۲۰۱۰) با استفاده از شاخص‌های^۹ NDVI،^{۱۰} VCI،^{۱۱} TCI و VHI و شاخص SPI در منطقه خشک آریزونا و نیومکزیکو و نیز در منطقه مرطوب کارولینای شمالی و جنوبی پرداختند. کاظم‌زاده و ملکیان (۲۰۱۶) مشخصات فضایی و روند زمانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را در شمال غرب ایران بررسی نمودند که نتایج نشان داد که منطقه در طی سه دهه گذشته خشک‌تر شده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان‌دهنده همبستگی قوی بین شاخص SPI و^{۱۲} SDI می‌باشد. همچنین گاو و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۶) به بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه هگزی^{۱۴} در شمال غرب چین پرداختند و نشان دادند که

¹ Wilhite

² Drought Monitoring

³ Tsakiris et al

⁴ Papatthanasio et al

⁵ Kanellou et al

⁶ Reclamation Drought Index

⁷ Vegetarian Health Index

⁸ Rhee et al

⁹ Normalized Difference Vegetation Index

¹⁰ Vegetation Condition Index

¹¹ temperature condition index

¹² Streamflow Drought Index

¹³ Gao et al

¹⁴ Hexi

میانگین سالانه SPI و SDI، به‌ویژه در ۱۰ سال گذشته، روند افزایشی دارد. آن‌ها همچنین روابط بین الگوی خشکسالی و شاخص‌های آب و هوایی را مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دادند. رادوا و همکاران^۱ (2018) در پژوهشی به بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت دانوب^۲ در شمال بلغارستان پرداختند. در این پژوهش از شاخص‌های SPI و SDI در مقیاس‌های زمانی ۶ تا ۱۲ ماهه استفاده شده است که نتایج پیش‌بینی نشان داده است که خشکسالی‌های متوسط در نیمه دوم قرن بیست‌ویکم افزایش می‌یابد. میرونی‌دیس و همکاران^۳ (۲۰۱۸) به بررسی و پیش‌بینی کوتاه‌مدت روند خشکسالی هیدرولوژیکی در جزیره قبرس پرداختند. در این پژوهش نتایج شاخص خشکسالی SDI را با روش ARIMA برای دوره‌های کوتاه‌مدت پیش‌بینی شده است.

خواجه (۱۳۸۶) به پایش خشکسالی با استفاده از شاخص NDVI در استان اصفهان پرداخت. در این پژوهش از داده‌های ماهواره NOAA در ماه‌های مارس تا سپتامبر از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۳ استفاده گردیده است. در این پژوهش برای از شاخص SPI، به‌عنوان معیار استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داده که درصد بالای تطابق مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در اغلب موارد نشان‌دهنده دقت بالای روابط NDVI و SPI می‌باشد. مفیدی پور (۱۳۹۱)، در پژوهشی به بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه اترک پرداختند. در این پژوهش جهت پایش خشکسالی هواشناسی از شاخص SPI و جهت پایش خشکسالی هیدرولوژیکی از شاخص SDI در حوضه آبخیز اترک استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار بین زمان وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در این حوضه است که بیشترین همبستگی در بازه زمانی ۳ ماهه می‌باشد. میروموسی و کریمی (۱۳۹۲)، در پژوهشی اثر خشکسالی‌های استان کردستان را بر روی پوشش گیاهی با تصاویر ماهواره‌ای بررسی کردند. در این مطالعه شاخص‌های SPI و NDVI مقایسه شدند که نتایج نشان داد بین این دو شاخص همبستگی بالایی (+۰/۷۷) وجود دارد. همچنین مشخص شد که هم‌زمان با وقوع خشکسالی در منطقه میزان پوشش گیاهی ضعیف، افزایش و در دوره‌های ترسالی این میزان کاهش یافته است. همچنین رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی به بررسی کارایی شاخص وضعیت پوشش گیاهی در تحلیل خشکسالی کشاورزی از طریق سنجش‌ازدور در استان آذربایجان شرقی پرداختند. ایشان در پژوهش خود از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Terra بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ برای محاسبه شاخص‌های VCI و NDVI و داده‌های بارش از ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی برای محاسبه شاخص SPI استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که جهت برآورد خشکسالی کشاورزی از طریق سنجش‌ازدور، شاخص VCI روش بسیار مناسبی است و در مناطقی که ایستگاه‌های هواشناسی به‌صورت پراکنده بوده (و یا اصلاً وجود ندارد) می‌توان از این مدل برای برآورد خشکسالی استفاده نمود. خدایی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی به بررسی شاخص ترکیبی بهبودیافته خشکسالی (OSDI) در مناطقی با پوشش اراضی ناهمگن، نتیجه گرفتند که در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ در مناطق مرکزی و جنوب شرق استان تهران و مناطق مرکزی و شمالی استان قم، خشکسالی شدیدی رخ داده است. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به تحلیل خشکسالی در شهرستان مریوان با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدوری پرداختند. برای این منظور از تصاویر ماهواره لندست و

1 Radeva et al

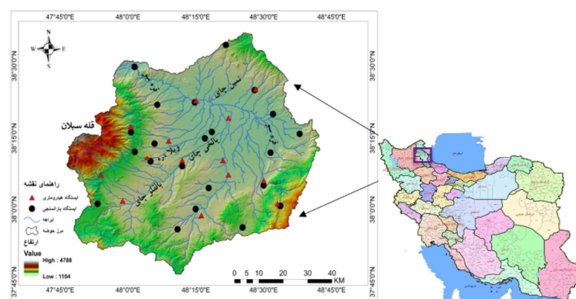
2 Danube

3 Myronidis et al

شاخص‌های خشکی پوشش گیاهی (VDI) و سلامت پوشش گیاهی (VHI) استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌جز سال ۱۳۹۱، در کل دوره آماری مورد مطالعه خشکسالی کشاورزی در شهرستان مریوان مشاهده نشده است. با توجه به موارد یادشده، شناسایی روابط خشکسالی از جنبه‌های مختلف در حوضه آبریز قره‌سو که از نظر کشاورزی و صنعت، همچنین اهمیتی که در ارتباط با معیشت مردم منطقه دارد، بسیار حائز اهمیت است. بنابراین در این پژوهش سعی شده است ارتباط خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس‌های زمانی مختلف از جمله مقیاس فصلی، نیم‌سال آبی، همچنین ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت به‌منظور آشکارسازی زوایای پنهان سلامت پوشش گیاهی، نتایج خشکسالی هواشناسی با شاخص‌های خشکسالی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مقایسه و همبستگی بین آن‌ها به‌دست آمد.

داده‌ها

حوضه آبریز قره‌سو در شمال غرب ایران و در موقعیت جغرافیایی ۳۷ تا ۳۹ درجه عرض شمالی و ۴۷ تا ۴۸ درجه طول شرقی در استان اردبیل واقع شده است. مهم‌ترین رودخانه‌های این حوضه شامل: قره‌سو، بالیخی چای، نمین چای، ویلا دره می‌باشند. مساحت منطقه مورد مطالعه حدود ۴۹۵ کیلومتر مربع بوده و دشت اردبیل یکی از دشت‌های مهم از نظر صنعتی، کشاورزی و جمعیتی در این منطقه واقع شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه قره‌سو. منبع: نگارندگان

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل سه بخش هواشناسی، آب‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای بوده که داده‌های مربوط به مجموع بارندگی ماهانه ۲۲ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی در بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۱۵-۱۹۸۵) از سازمان‌های هواشناسی و آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ گردید. همچنین مقادیر دبی ماهانه ۱۴ ایستگاه هیدرومتری از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ (۳۰ سال) از سازمان آب منطقه‌ای تهیه گردید. در ادامه جهت بررسی خشکسالی پوشش گیاهی (VCI, NDVI)، تصاویر سنجنده MODIS ورژن MOD13 A1 v6 با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر از سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS^۱) اخذ گردید. تمامی نقشه‌ها در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8, ENVI 5.3 و ERDAS 2018 ترسیم و نمودارها و جداول در محیط نرم‌افزارهای Excel 2013 و XIStat 2013 به‌دست آمد.

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov>

محاسبه شاخص SPI:

محاسبه شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه (در این مطالعه) نیازمند مراحل زیر است. در بسیاری از موارد نتایج پژوهشگران مختلف نشان داده است که توزیع گاما مناسب‌ترین توزیع جهت برازش داده‌های بارندگی است (روسی و همکاران، ۲۰۰۷). تابع چگالی احتمال برای توزیع گاما به صورت معادله ۱ بیان می‌شود.

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \text{ for } x, \alpha, \beta > 0 \quad (1)$$

که در آن α و β به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس هستند و X میزان بارندگی و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما می‌باشد (روسی و همکاران، ۲۰۰۷؛ گاسیو و موسیال^۲، ۲۰۱۵). به منظور محاسبه داده‌های بارش و برازش آن‌ها به تابع توزیع یادشده، باید ضرایب α و β را از روابط زیر محاسبه نمود:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{44}{3}} \right) \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (3)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4)$$

به این صورت که n : تعداد مشاهدات بارندگی و \bar{x} میانگین بارش در مدت‌زمان موردنظر است. سپس پارامترهای حاصل از α و β با استفاده از معادله ۵ جهت برآورد احتمال جمع‌ی برای بارش‌های غیر صفر مورد استفاده قرار می‌گیرد. (بارو و همکاران^۳، ۲۰۱۰؛ روسی و همکاران، ۲۰۰۷).

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (5)$$

معادله 20 همچنین به صورت معادله ۶ نیز می‌تواند بیان شود (بارو و همکاران، ۲۰۱۰؛ روسی و همکاران، ۲۰۰۷).

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (6)$$

چنانچه فرض گردد که $t = x/\hat{\beta}$ است، ممکن است تابع گاما برای مقادیر بارش صفر در نظر گرفته نشود و $X=0$ محاسبه گردد. در صورتی که ممکن است بارندگی حاوی مقادیر صفر نیز باشد، در این صورت محاسبه احتمال صفر و غیر صفر بارش با استفاده از معادله ۷ صورت می‌گیرد (هوگس و ساندرز^۴، ۲۰۰۲).

$$H(x) = q + (1 - q)F(x) \quad (7)$$

در این رابطه، q این احتمال است که بارش وجود ندارد و $H(x)$ یک توزیع استاندارد نرمال شده با میانگین صفر و واریانس واحد است که باعث تولید شاخص SPI با توزیع گاما می‌شود (ادوارد و مک کی^۵، ۱۹۹۷).

باین حال در رویکرد فوق، چنانچه تعداد نقاط یا ایستگاه‌های زیادی برای محاسبه شاخص SPI وجود داشته باشد، این روش به صورت عددی و عملی به سادگی قابل اجرا نیست. به همین دلیل یک روش جایگزین توسط ادوارد و مک کی

1 Rossi et al

2 Gasiorek and Musiał

3 Barua, et al

4 Lloyd-Hughes and Saunders

5 Edwards and McKee

(۱۹۹۷) با استفاده از فن تبدیل تقریبی توسعه داده شده است که احتمال تجمعی را به یک متغیر استاندارد Z تبدیل می‌کند. سپس شاخص SPI به صورت معادلات ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ تعریف می‌شود.

$$SPI = z = - \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (۸)$$

$$\text{when } k = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[H(x)]^2} \right\}} \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (۹)$$

$$SPI = z = + \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (۱۰)$$

$$\text{when } k = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[1-H(x)]^2} \right\}} \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (۱۱)$$

جایی که: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189369$, $d_3 = 0.001308$ (روسی و همکاران، ۲۰۰۷). آستانه‌هایی که برای تعریف شدت خشکسالی SPI بیان می‌شوند، در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱: مقدار عددی SPI و شدت خشکسالی (منبع: مک کی و همکاران، ۱۹۹۳)

مقدار عددی SPI	طبقه خشکسالی	ردیف
≤ -2	خشکسالی بسیار شدید	۱
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید	۲
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط	۳
۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی ملایم	۴
$< 0/0$	بدون خشکسالی	۵
$> 0/0$	ترسالی	۶

محاسبه شاخص SDI:

در این روش فرض می‌شود که سری‌های زمانی حجم جریان‌های رودخانه‌ای ماهانه به صورت Q_{ij} موجود می‌باشد که در آن اندیس i سال هیدرولوژیکی و اندیس j ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی می‌باشد. اساس این سری‌ها بر پایه رابطه زیر می‌باشد:

$$V_{ik} = \sum_{j=1} Q_{ij} \quad i=1,2,\dots \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4,5,6 \quad (۱۲)$$

که در آن V_{ik} ، حجم تجمعی جریان‌های رودخانه‌ای در سال هیدرولوژیکی i و دوره مبنای k ماهه است. مقادیر k برابر ۳، ۴، ۵، ۶ و به ترتیب بیانگر دوره‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه می‌باشد.

شاخص خشکسالی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI) بر اساس حجم تجمعی جریان‌های رودخانه‌ای (V_{ik}) برای دوره مبنای (k) مربوط به (i) سال هیدرولوژیکی به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i = 1, 2, \dots \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (۱۳)$$

\bar{V}_k و S_k به ترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار مبنای (k) می‌باشد (مفیدی پور، ۱۳۹۱). طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص SDI در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲: طبقه‌بندی مقادیر SDI (منبع: مفیدی پور، ۱۳۹۱)

مقدار SDI	وضعیت خشکسالی
$SDI \geq 0$	فاقد خشکسالی
۰ تا -۱	خشکسالی ملایم
-۱ تا -۱/۵	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۲	خشکسالی شدید
$SDI < -2$	خشکسالی خیلی شدید

محاسبه شاخص NDVI:

شاخص NDVI برای اولین بار توسط تاکر^۱ در سال ۱۹۷۹ به‌عنوان شاخصی برای سلامت پوشش گیاهی مطرح گردید.

$$NDVI = (P\ NIR - P\ R) / (P\ NIR + P\ R) \quad (14)$$

که در آن P NIR، باند مادون قرمز نزدیک و P R، باند قرمز می‌باشد. شاخص NDVI پتانسیل گیاهی (تیلت^۲ و همکاران، ۱۹۹۷)، درصد پوشش سبز گیاهی، شاخص درصد نواحی برگ‌دار و انبوه‌های گیاهی (تنکابیل و همکاران^۳، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) را انعکاس می‌دهد. شاخص NDVI رایج‌ترین شاخص بررسی پوشش گیاهی می‌باشد. پوشش گیاهی در حالت سلامت، امواج باند مادون قرمز نزدیک را به خوبی منعکس می‌کند. در این شاخص مقدار عددی هر پیکسل بین +۱ و -۱ متغیر بوده، برای مناطق دارای پوشش گیاهی از ۰/۱ (پوشش گیاهی تنک) تا ۰/۸ (پوشش گیاهی متراکم) است (تنکابیل و همکاران، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴؛ رسولی، ۱۳۸۷).

مطالعات قبلی نشان می‌دهد که شاخص NDVI پیش‌بینی تأثیر بارش‌های قبلی را بر روی پوشش گیاهی تا سه ماه به تأخیر می‌اندازد. زمان تأخیر بستگی به آب‌وهوای ناحیه دارد که از لحاظ بارش به‌طور کامل تغذیه شده و یا به‌طور کامل آبیاری گشته و یا به‌صورت بخشی این عمل انجام گردیده است (وانگ و همکاران^۴، ۲۰۰۲).

محاسبه شاخص VCI:

شاخص VCI برای اولین بار توسط کوگان^۵ در سال‌های بین ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ پیشنهاد شده است. این شاخص نشان می‌دهد که چگونه NDVI ماه جاری به NDVI محاسبه‌شده از طریق ثبت داده‌های درازمدت نزدیک می‌شود. روش محاسبه شاخص VCI از رابطه ۱۵ به‌دست می‌آید.

$$VCI = (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) * 100 \quad (15)$$

که در اینجا $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ از طریق داده‌های ثبت‌شده درازمدت (به‌عنوان مثال ۱۰ ساله) برای آن ماه یا آن هفته محاسبه شده است و i نشان‌دهنده ماه جاری می‌باشد. شرایط و وضعیت پوشش گیاهی توسط VCI، به‌صورت درصد اندازه‌گیری می‌شود و مقادیر VCI حدود ۵۰ درصد انعکاس‌دهنده شرایط گیاهی متوسط و مقادیر ۵۰ الی

¹ Tucker² Teillet³ Thenkabail et al⁴ Wang et al⁵ Kogan

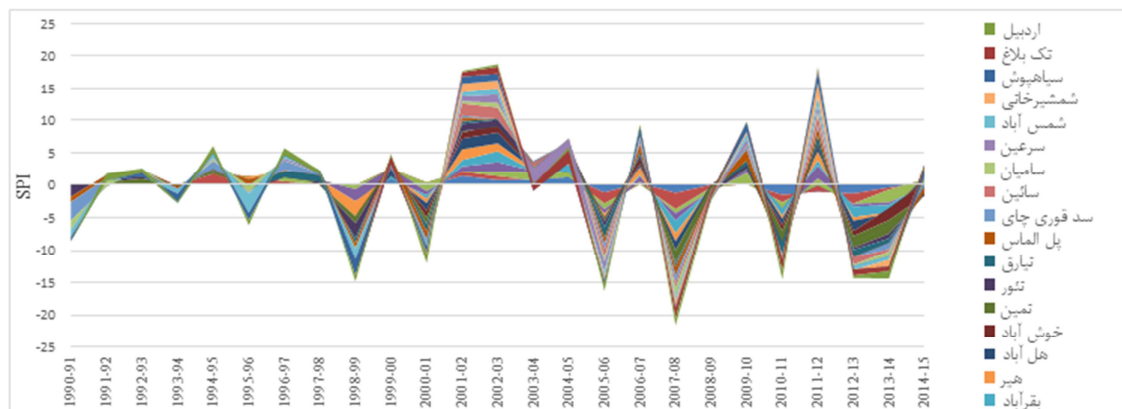
۱۰۰ درصد آن نشان‌دهنده حالت بهینه و بالای نرمال پوشش گیاهی است (کوگان، ۱۹۹۷). طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص VCI در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳: طبقه‌بندی شاخص VCI (منبع: کوگان، ۱۹۹۷)

VCI	وضعیت خشکسالی
< ۱۰	خشکسالی بسیار شدید
< ۲۰	خشکسالی شدید
< ۳۰	خشکسالی متوسط
< ۴۰	خشکسالی خفیف
> ۴۰	غیر خشکسالی

یافته‌های پژوهش

ابتدا سری زمانی خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز قره‌سو بررسی و مشخص شد که دوره‌های خشکسالی و ترسالی تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها مشابه و نزدیک به هم رخ داده است. به منظور نشان دادن نتایج تمامی ایستگاه‌ها به صورت منظم و جلوگیری از بهم‌ریختگی، از نمودار Stacked Area همراه با اغراق در نرم‌افزار اکسل استفاده شد (شکل ۲). سری زمانی شاخص SPI، نشان می‌دهد که نتایج خشکسالی حوضه قره‌سو کاملاً متقارن می‌باشند و هیچ اغراقی در بالا یا پایین بودن محور X ها از نظر ترسالی و خشکسالی خارج از حد انتظار وجود ندارد و داده‌ها نرمال می‌باشند. این مطلب در پژوهش‌های مک کی و همکاران (۱۹۹۳) در ایالت کلرادو آمریکا و بویان^۱ و همکاران (۲۰۰۶) در منطقه آراوالی^۲ در هند به اثبات رسیده است.



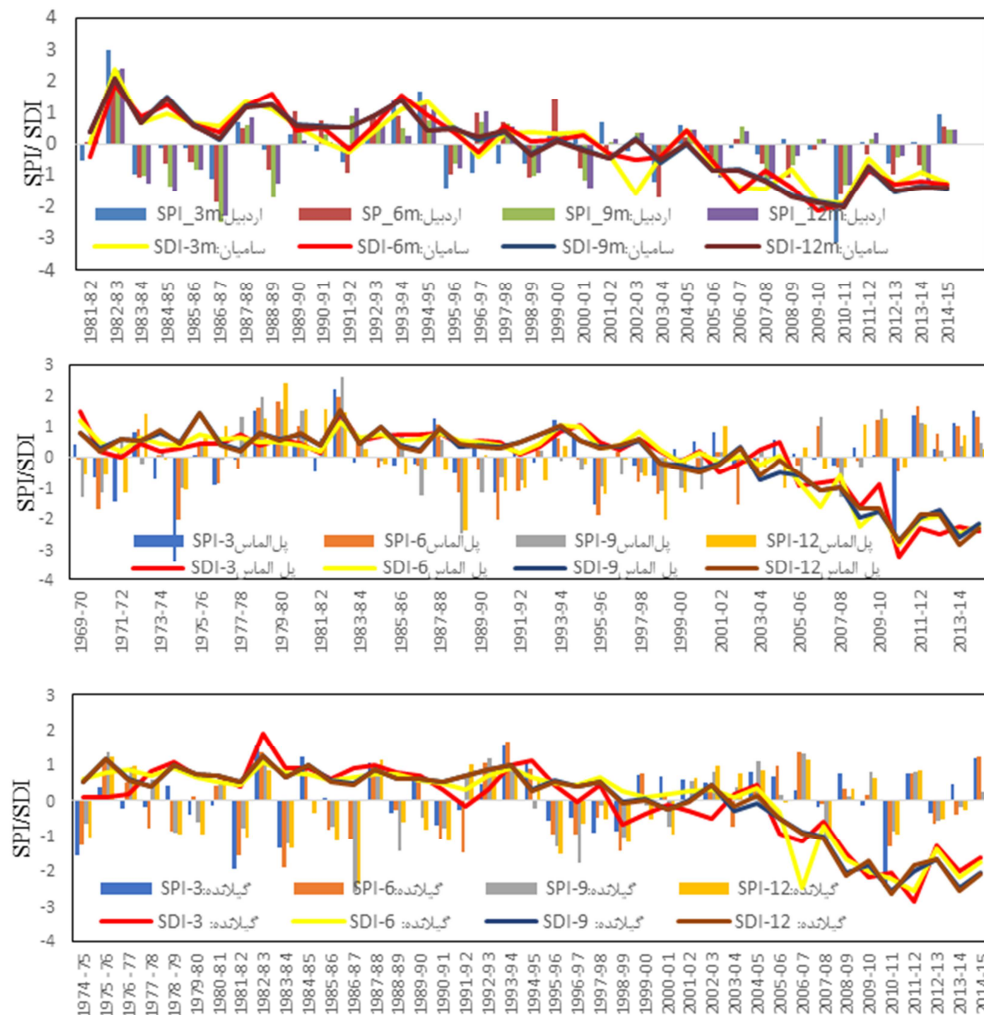
شکل ۲: دوره‌های خشکسالی و ترسالی در حوضه قره‌سو (منبع: نگارندگان)

نتایج سری زمانی خشکسالی هواشناسی در حوضه قره‌سو نشان داد که خشکسالی هواشناسی در سال‌های (۲۰۰۱-۲۰۰۰، ۲۰۰۶-۲۰۰۵، ۲۰۰۸-۲۰۰۷ و ۲۰۱۴-۲۰۱۳) به صورت فراگیر رخ داده است. این در حالی است که هر چه به سال‌های پایانی دوره آماری مورد بررسی نزدیک می‌شویم بر تداوم خشکسالی هواشناسی افزوده شده است.

¹ Bhuiyan

² Aravalli

در ادامه به منظور بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی بر جریان آب‌های سطحی در حوضه قره‌سو، مقادیر ماهانه، فصلی و نیم‌سال آبی شاخص‌های SPI و SDI با یکدیگر مقایسه و مقادیر همبستگی به‌دست آمد. در ادامه به‌عنوان نمونه سری زمانی شاخص‌های SPI و SDI در سه ایستگاه باران‌سنجی (اردبیل، پل الماس و گیلانده) و سه ایستگاه هیدرومتری (سامیان، پل الماس و گیلانده) که کمترین فاصله را با یکدیگر دارند در مقیاس‌های زمانی ۳ (اکتبر-دسامبر^۱)، ۶ (اکتبر-مارس^۲)، ۹ (اکتبر-ژوئن^۳) و ۱۲ (اکتبر-دسامبر^۴) ماهه در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳: سری زمانی شاخص‌های SPI و SDI در مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه (منبع: نگارندگان)

¹ Oct-Dec
² Oct-Mar
³ Oct-Jun
⁴ Oct-Dec

با توجه به نتایج سری زمانی شاخص خشکسالی SPI در منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که تقریباً همه ایستگاه‌ها در سال‌های اخیر خشکسالی شدید و خیلی شدید را تجربه کرده‌اند (شکل‌های ۲ و ۳). همچنین نتایج سری زمانی شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) نشان داد که خشکسالی هیدرولوژیکی روند افزایشی داشته، به طوری که سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ را می‌توان به عنوان یک دوره مهم در سری زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه قره‌سو دانست (شکل ۳). در این سال خشکسالی هواشناسی در سال‌های قبل به صورت کاملاً مشخص بر مقادیر آب سطحی حوضه قره‌سو تأثیر گذاشته و سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ به عنوان نقطه شروع خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه شناخته می‌شود. در ادامه با توجه به نتایج بررسی سری زمانی شاخص‌های SPI و SDI، مشخص شد که خشکسالی هواشناسی با فاصله زمانی کوتاهی بر جریان آب سطحی در حوضه قره‌سو تأثیر می‌گذارد. به طوری که با افزایش و کاهش مقادیر شاخص SPI، دبی آب‌های سطحی نیز با فاصله زمانی کوتاهی واکنش نشان داده و دچار نوسان می‌شوند. در سال‌های اخیر هر چند ترسالی‌های کوتاه‌مدتی رخ داده است، اما در اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری همچنان خشکسالی هیدرولوژیکی قابل مشاهده است.

در ادامه، به منظور بررسی تأخیر زمانی بین شاخص‌های SPI و SDI از ماتریس همبستگی با روش پیرسون استفاده شد. در این بخش نیز به جهت جلوگیری از تکرار نتایج، تنها به مقادیر همبستگی در چند ایستگاه نمونه پرداخته شده است. ابتدا مقادیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در شش ماهه اول سال یعنی اکتبر تا مارس (Oct-Mar) و شش ماهه دوم سال یعنی آوریل تا سپتامبر (Apr-Sep) به صورت دو به دو روبروی هم قرار گرفته و روابط همبستگی آن‌ها محاسبه شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که بیشترین روابط خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در شش ماه دوم سال رخ می‌دهد؛ بدین معنی که شاخص SDI در فاصله زمانی اکتبر تا مارس (Oct-Mar) کمترین همبستگی را با شاخص‌های SPI در همان ماه‌ها و به صورت هم‌زمان دارد. با توجه به مقدار خیلی کم همبستگی به صورت هم‌زمان می‌توان نتیجه گرفت که خشکسالی هواشناسی با یک تأخیر زمانی بر خشکسالی هیدرولوژیکی (بیشتر در نیمه دوم سال آبی) در حوضه آبریز قره‌سو، تأثیر می‌گذارد. بالاترین مقدار همبستگی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در نیمه دوم سال آبی یعنی فصول بهار و تابستان در پژوهش‌هایی چون کاظم‌زاده و ملکیان (۲۰۱۶) نیز به اثبات رسیده است. به همین دلیل در ادامه مقادیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به صورت فصلی نیز با یکدیگر مقایسه شد.

جدول ۵ نتایج همبستگی بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی را به صورت فصلی نشان می‌دهد. نتایج این جدول حاکی از آن است که در مقیاس‌های هم‌زمان و ماه‌های Oct-Dec و Jan-Mar کمترین همبستگی بین شاخص‌های SPI و SDI وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد که در نیمه دوم سال آبی، شاخص SPI در فاصله زمانی Jan-Mar با شاخص SDI در فاصله زمانی Apr-Jun بیشترین همبستگی را دارد. همچنین شاخص SPI در فاصله زمانی Apr-Jun با شاخص SDI در فاصله زمانی Jul-Sep بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جداول ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که خشکسالی هواشناسی به صورت فصلی و با تأخیر زمانی حدوداً سه ماهه بیشترین تأثیر را بر جریان آب سطحی دارد. به همین منظور جهت تعیین دقیق تأخیر زمانی، مقادیر ماهانه خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی نیز با یکدیگر مقایسه شد (جدول ۶).

جدول ۴: مقادیر همبستگی پیرسون بین شاخص SPI و شاخص SDI برای نیم سال آبی (منبع: نگارندگان)

پل الماس - SPI		گیلانده - SPI		اردبیل - SPI		مقادیر خشکسالی
پل الماس - SDI		گیلانده - SDI		سامیان - SDI		
SDI Apr-Sep	SDI Oct-Mar	SDI Apr-Sep	SDI Oct-Mar	SDI Apr-Sep	SDI Oct-Mar	
0/534	0/286	0/609	0/290	0/587	0/034	SPI_Oct-Mar
0/111	-0/189	0/386	0/078	0/393	-0/027	SPI_Apr-Sep

Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05

جدول ۵: مقادیر همبستگی پیرسون بین شاخص SPI و شاخص SDI به صورت فصلی (منبع: نگارندگان)

گیلانده SPI, گیلانده SDI				اردبیل SPI, سامیان SDI				مقادیر خشکسالی
SDI Jul-Sep	SDI Apr-Jun	SDI Jan-Mar	SDI Oct-Dec	SDI Jul-Sep	SDI Apr-Jun	SDI Jan-Mar	SDI Oct-Dec	
0/203	0/239	0/213	0/275	0/327	-0/049	0/115	0/250	SPI_Oct-Dec
-0/167	0/094	-0/022	-0/137	-0/185	0/512	0/198	-0/123	SPI_Jan-Mar
0/508	0/257	-0/105	-0/205	0/149	0/022	-0/106	-0/176	SPI_Apr-Jun
0/126	-0/360	-0/276	-0/110	0/143	-0/289	-0/078	-0/212	SPI_Jul-Sep

پل الماس SPI, پل الماس SDI				مقادیر خشکسالی
SDI Jul-Sep	SDI Apr-Jun	SDI Jan-Mar	SDI Oct-Dec	
0/171	0/309	0/178	0/305	SPI_Oct-Dec
0/127	0/547	0/091	0/123	SPI_Jan-Mar
0/421	0/402	0/160	-0/099	SPI_Apr-Jun
-0/074	-0/134	-0/049	0/029	SPI_Jul-Sep

در ادامه جهت تعیین دقیق‌تر تأثیر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی هیدرولوژیکی، نتایج شاخص‌های SPI و SDI به صورت ماهانه با یکدیگر مقایسه شد. به‌عنوان نمونه و جهت جلوگیری از تکرار نتایج، مقادیر همبستگی پیرسون مربوط به ایستگاه سینوپتیک اردبیل و ایستگاه هیدرومتری سامیان در جدول ۶ و مقدار P-value در سطح اطمینان $\alpha = 0.05$ در جدول ۷ مشاهده می‌شود. در جدول ۶ و ۷ نتایج همبستگی در ماه اکتبر مربوط به شاخص SDI، به دلیل اینکه هیچ همبستگی مشاهده نشد، حذف شده است.

جدول ۶: مقادیر همبستگی پیرسون بین شاخص SPI و شاخص SDI در ایستگاه‌های نمونه (منبع: نگارندگان)

متغیر	SDI_Nov	SDI_Dec	SDI_Jan	SDI_Feb	SDI_Mar	SDI_Apr	SDI_May	SDI_Jun	SDI_Jul	SDI_Aug	SDI_Sep
SPI_Oct	0/549	0/361	0/219	0/209	0/240	0/359	0/203	0/155	0/041	0/113	-0/034
SPI-Nov	0/150	0/431	0/309	0/226	0/259	0/113	0/142	0/350	0/426	0/394	0/142
SPI-Dec	-0/031	0/213	0/272	0/263	0/286	0/157	0/213	0/237	0/155	0/107	-0/145
SPI-Jan	0/101	0/025	0/029	0/062	0/175	0/293	0/191	0/046	0/012	-0/017	0/245
SPI-Feb	-0/240	-0/351	-0/278	-0/143	0/013	0/070	-0/021	-0/188	-0/168	-0/235	0/026
SPI-Mar	-0/084	-0/051	-0/026	-0/084	0/080	0/339	0/195	-0/035	-0/125	-0/171	0/048
SPI-Apr	-0/199	-0/223	-0/215	-0/280	-0/270	-0/160	0/342	0/251	-0/123	-0/105	-0/177
SPI-May	-0/223	-0/008	0/022	-0/144	-0/103	-0/078	0/023	0/442	0/578	0/566	0/379
SPI-Jun	-0/041	-0/071	-0/145	-0/259	-0/084	0/168	0/273	0/338	0/201	0/134	0/273
SPI-Jul	-0/050	0/139	0/127	0/049	-0/085	0/052	0/083	0/016	-0/180	-0/044	0/516
SPI-Aug	-0/141	-0/240	-0/171	-0/217	-0/056	-0/128	0/126	0/062	-0/085	-0/155	-0/187
SPI-Sep	0/239	0/170	0/061	0/140	-0/001	0/016	-0/153	-0/104	0/012	0/083	0/047

Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05

نتایج جدول ۶ نشان داد که خشکسالی هواشناسی به صورت هم‌زمان با خشکسالی هیدرولوژیکی همبستگی بسیار پایینی دارد. این در حالی است که بعد از وقوع خشکسالی هواشناسی، ابتدا در همان ماه همبستگی کمی با SDI مشاهده می‌شود؛ اما در ماه‌های دوم و سوم بر مقدار همبستگی بین شاخص‌های SPI و SDI افزوده می‌شود. با توجه به این موضوع، می‌توان نتیجه گرفت که بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت بیشترین رابطه همبستگی وجود دارد. در این رابطه زنگ و همکاران^۱ (۲۰۱۵) نیز در مقایسه‌ای در حوضه رودخانه جیالین^۲ در چین تأخیر زمانی ۱ تا ۳ ماه را بین شاخص‌های SPEI و SDI به دست آوردند. این در حالی است که گموش و آلگین^۳ (۲۰۱۷)، در پژوهشی در حوضه رودخانه سیهان-جیهان^۴ در کشور ترکیه، بین شاخص‌های SPI و SDI تأخیر زمانی یک‌ساله را به دست آورده‌اند.

همچنین در جدول ۷ مقادیر P-Value بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (ایستگاه سینوپتیک اردبیل) و هیدرولوژیکی (ایستگاه هیدرومتری سامیان) قابل مشاهده است.

جدول ۷: مقادیر P-Value برای همبستگی بی‌رسون بین شاخص SPI و شاخص SDI در ایستگاه‌های نمونه (منبع: نگارندگان)

SDI_Sep	SDI_Aug	SDI_Jul	SDI_Jun	SDI_May	SDI_Apr	SDI_Mar	SDI_Feb	SDI_Jan	SDI_Dec	SDI_Nov	متغیر
0/852	0/529	0/822	0/388	0/258	0/040	0/178	0/243	0/220	0/039	0/001	SPI_Oct
0/432	0/023	0/013	0/046	0/430	0/530	0/145	0/206	0/080	0/012	0/404	SPI-Nov
0/420	0/552	0/388	0/184	0/235	0/383	0/107	0/140	0/126	0/235	0/864	SPI-Dec
0/170	0/926	0/945	0/801	0/287	0/098	0/330	0/734	0/873	0/891	0/575	SPI-Jan
0/885	0/189	0/349	0/295	0/910	0/699	0/942	0/426	0/118	0/045	0/178	SPI-Feb
0/792	0/341	0/487	0/845	0/278	0/054	0/658	0/640	0/887	0/776	0/642	SPI-Mar
0/324	0/560	0/495	0/160	0/051	0/373	0/129	0/114	0/230	0/213	0/267	SPI-Apr
0/030	0/001	0/000	0/010	0/900	0/665	0/568	0/425	0/902	0/966	0/212	SPI-May
0/124	0/457	0/261	0/054	0/124	0/350	0/644	0/146	0/421	0/696	0/821	SPI-Jun
0/002	0/807	0/316	0/932	0/647	0/774	0/639	0/785	0/481	0/442	0/781	SPI-Jul
0/299	0/388	0/638	0/730	0/484	0/479	0/759	0/225	0/343	0/179	0/435	SPI-Aug
0/795	0/645	0/947	0/565	0/394	0/929	0/997	0/438	0/734	0/343	0/180	SPI-Sep

Values in bold are different from 0 with a significance level $\alpha=0.05$

بررسی روابط خشکسالی هواشناسی با شاخص NDVI

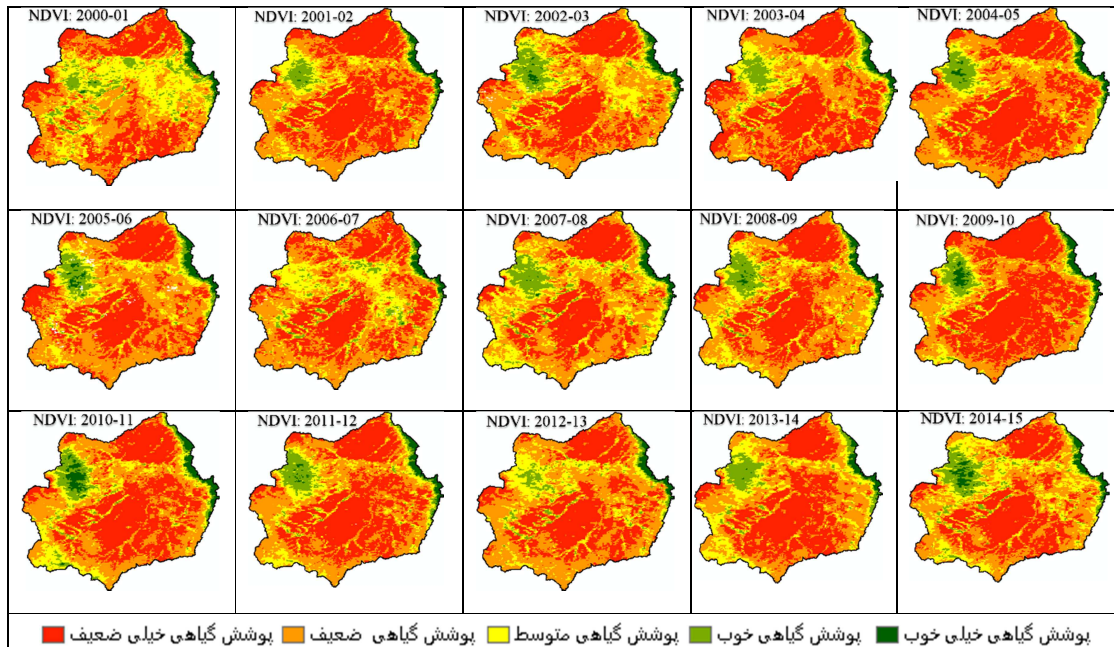
در این بخش به منظور آشکارسازی زوایای پنهان سلامت پوشش گیاهی، همچنین ارزیابی روابط خشکسالی هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای در حوضه قره‌سو، شاخص‌های SPI، NDVI و VCI با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل ۴ تغییرهای سالانه شاخص NDVI که به صورت سال آبی (اکتبر- سپتامبر) تهیه شده است در حوضه قره‌سو قابل مشاهده می‌باشد. نقشه‌های خروجی حاصل از شاخص NDVI نشان داد که بهترین پوشش گیاهی مربوط به مناطق مرتعی و جنگلی در شرق حوضه و قسمت‌های غربی مربوط به پایکوه سلان می‌باشد. مقادیر NDVI نشان می‌دهد که در تمامی سال‌های مورد مطالعه، پوشش گیاهی ضعیف و خیلی ضعیف به صورت گسترده قابل مشاهده می‌باشد. همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که پوشش گیاهی متراکم و مناسب از نظر کیفیت، اکثراً مربوط به دشت‌ها و حریم رودخانه اصلی حوضه قره‌سو است.

¹ Zeng et al.

² Jialing River Basin

³ Gumus and Algin

⁴ Seyhan- Ceyhan River Basins



شکل ۴: تغییرات شاخص NDVI در سال‌های خشک و مرطوب (منبع: نگارندگان)

در ادامه به منظور بررسی رابطه شاخص SPI با شاخص NDVI، میانگین مقادیر NDVI در پیکسل‌های متناظر با مقادیر SPI در نقاط ایستگاهی واقع در حوضه قره‌سو با یکدیگر مقایسه شد. نتایج همبستگی شاخص SPI با شاخص‌ها NDVI در جدول ۸ قابل مشاهده است. در بررسی رابطه شاخص NDVI با خشکسالی هواشناسی مشخص شد که این دو شاخص در اکثر مناطق حوضه قره‌سو به صورت هم‌زمان دارای رابطه ضعیف و یا منفی با یکدیگر هستند. در این بخش نیز جهت جلوگیری از بالارفتن حجم مقاله، سعی شد روابط همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دور با تأخیر زمانی یک تا سه ماهه آورده شود. دلیل ضعیف بودن رابطه SPI و NDVI می‌تواند دو عامل باشد؛ یکی قرار گرفتن ایستگاه‌های هواشناسی در دشت‌ها و اطراف چاه‌های پیرومتری که باعث می‌شود بین مقادیر NDVI با ایستگاه هواشناسی به صورت هم‌زمان رابطه معنی‌داری مشاهده نشود که در اکثر موارد رابطه معکوس و منفی مشاهده شد. دلیل این امر می‌تواند افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی به منظور جبران نیاز آبی گیاهان و محصولات کشاورزی در شرایط خشکسالی باشد. دلیل دوم در مورد رابطه ضعیف نقاط مورد بررسی در خارج از دشت‌ها و به دور از چاه‌های پیرومتری، نیز می‌تواند به خاطر فاصله زمانی بین رخداد خشکسالی و ترسالی با پاسخ گیاه باشد.

نتایج همبستگی بین شاخص‌های SPI و NDVI در جدول ۸ نشان داد که بیشترین همبستگی در ایستگاه سنین، مشاهده می‌شود و مقدار همبستگی آن برابر با $r=0/46$ که در سطح $0/05$ درصد معنی‌دار است. همچنین در ایستگاه شمشیر خوانی نیز مقدار همبستگی شاخص‌های SPI و NDVI برابر با $r=0/43$ می‌باشد که در سطح $0/05$ درصد معنی‌دار است؛ اما به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر همبستگی بین شاخص‌های SPI و NDVI در اکثر

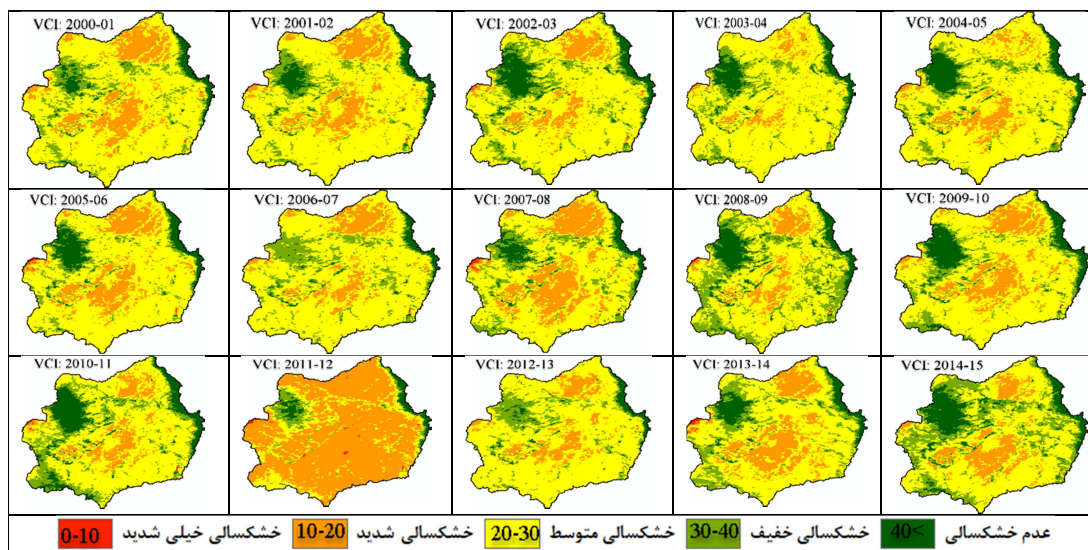
مناطق حوضه قره‌سو بسیار پایین بوده و این شاخص نمی‌تواند به‌تنهایی مکمل مناسبی برای جبران ضعف شاخص SPI که تنها بارندگی را در نظر می‌گیرد، باشد.

جدول ۸: نتایج همبستگی پیرسون (r) بین مقادیر خشکسالی هواشناسی با شاخص NDVI (منبع: نگارندگان)

P-Value	SPI- NDVI	ضریب همبستگی پیرسون (r)	P-Value	SPI- NDVI	ضریب همبستگی پیرسون (r)
0/73	0/07	خوش آباد	0/71	-0/08	آتشگاه
0/94	0/01	نمین	0/85	-0/04	بقرآباد
0/39	0/19	ارباب کندی	0/02	0/46*	سئین
0/81	0/05	هل آباد	0/13	0/33	اردبیل
0/97	-0/00	سامیان	0/68	-0/09	پل‌الماس
0/94	0/01	ابركوه	0/87	0/03	سرعین
0/81	0/05	آلادیزک	0/08	0/38	هیر
0/51	-0/15	اردبیل-باران‌سنجی	0/85	-0/04	سد قوریچای
0/03	0/43*	شمشیر خوانی	0/44	-0/17	تک بلاغ
0/64	-0/10	نیارق	0/92	0/02	شمس آباد
**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).			0/49	-0/15	نئور
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).			0/68	0/09	سیاهپوش

بررسی روابط خشکسالی هواشناسی با شاخص VCI

شاخص VCI برگرفته از مقادیر حداکثر و حداقل شاخص NDVI می‌باشد، به همین منظور نتایج این دو شاخص در اکثر موارد مشابه یکدیگر می‌باشند. در مواردی که مقادیر VCI به صفر نزدیک شود نشان‌دهنده خشکسالی شدید بوده و مقادیر بالاتر از ۴۰ درصد شرایط فاقد خشکسالی را نشان می‌دهد. باتوجه به این موارد، نقشه‌های مربوط به شاخص VCI در شکل ۵ نشان داد که همانند NDVI، اکثر مناطق حوضه قره‌سو درگیر خشکسالی شدید (۱۰-۲۰ درصد) بوده و تنها قسمت‌هایی از مرز شرقی حوضه، نواحی پایکوهی سلان در غرب حوضه و حاشیه رودخانه‌های اصلی در نقشه‌های به‌دست‌آمده فاقد خشکسالی می‌باشند. خشکسالی خیلی شدید (۱۰-۰ درصد) تنها در برخی از سال‌ها مانند ۱۲-۲۰۱۱ و ۱۴-۲۰۱۳ در قسمت‌های کوچکی از حوضه رخ داده است. مقایسه نقشه‌های VCI و NDVI نشان می‌دهد که در برخی موارد که شاخص NDVI خشکسالی خیلی شدید را نشان می‌دهد، شاخص VCI متفاوت بوده و مقادیر خشکسالی خیلی شدید را تعدیل می‌کند. دلیل این امر مربوط به هدف ایجاد شاخص VCI است که به‌منظور کاهش و حذف اثرات کوتاه‌مدت و تفاوت‌های آب و هوایی و توپوگرافی بر روی شاخص NDVI ایجاد شده است. به‌همین دلیل شاخص VCI تغییرهای شدید کوتاه‌مدت را از بلندمدت جدا کرده و در نتیجه کمتر شاهد خشکسالی‌های خیلی شدید هستیم. در ادامه نتایج همبستگی شاخص VCI با شاخص SPI در جدول ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۵: تغییرهای شاخص VCI در سال‌های خشک و مرطوب (منبع: نگارندگان)

شاخص VCI نشان داد که تقریباً در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی بالاتری با SPI نسبت به NDVI دارد (جدول ۹). در این شاخص نیز ایستگاه‌های سنین و شمشیر خوانی به ترتیب با مقدار $r=0/49$ و $r=0/46$ بیشترین همبستگی را با SPI دارد که در سطح $0/05$ درصد معنی‌دار می‌باشند. با توجه به نتایج همبستگی بین این دو شاخص می‌توان چنین نتیجه گرفت که شاخص VCI نسبت به NDVI شرایط بهتری برای نشان دادن خشکسالی در حوضه قره‌سو دارد.

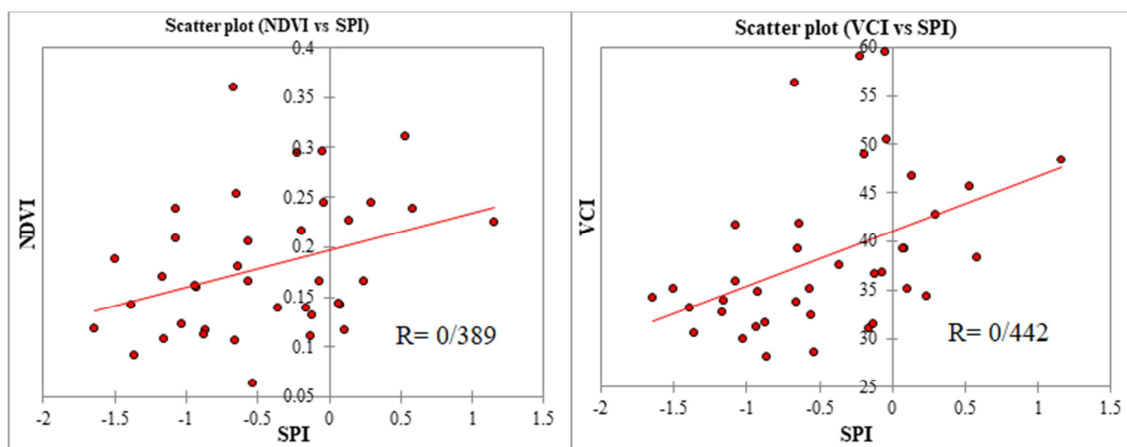
جدول ۹: نتایج همبستگی پیرسون (r) بین مقادیر خشکسالی هواشناسی با شاخص VCI (منبع: نگارندگان)

P-Value	SPI- VCI	ضریب همبستگی پیرسون (r)	P-Value	SPI- VCI	ضریب همبستگی پیرسون (r)
0/46	0/17	خوش آباد	0/71	-0/08	آنشگاه
0/77	0/06	نمین	0/94	-0/01	بقرآباد
0/29	0/24	ارباب کندی	0/02	0/49*	سنین
0/68	0/09	هل آباد	0/15	0/38	اردبیل
0/92	0/02	سامیان	0/74	-0/07	پل‌الماس
0/91	0/02	ابرقوه	0/90	0/02	سرعین
0/78	0/06	آلادیزک	0/07	0/39	هیر
0/54	-0/14	اردبیل_باران‌سنجی	0/89	-0/03	سد قوریچای
0/03	0/46*	شمشیر خوانی	0/50	-0/15	نک بلاغ
0/62	-0/11	نیارق	0/89	0/03	شمس آباد
			0/50	-0/15	نئور
			0/675	0/097	سیاهپوش

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

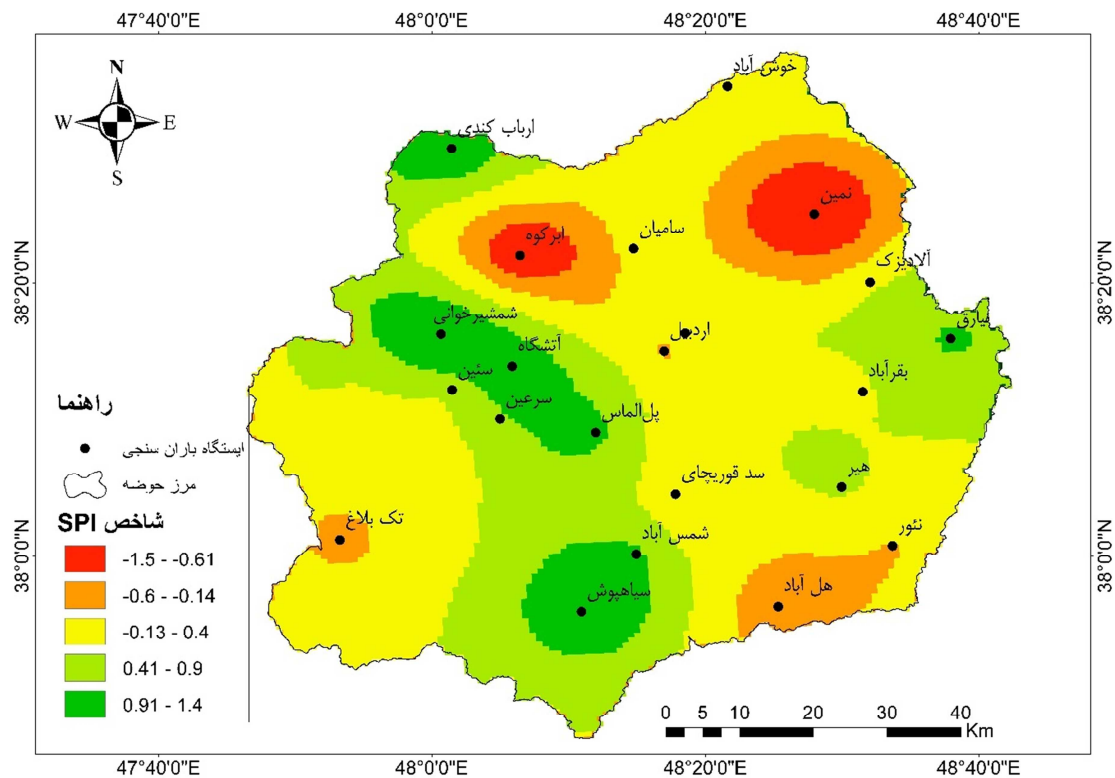
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

در ادامه به منظور درک بهتر روابط همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و ماهواره‌ای، میانگین مقادیر شاخص‌ها در نمودار اسکاتر پلات با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که بیشترین همبستگی بین شاخص‌های SPI و VCI می‌باشد که مقدار آن برابر با $r=0/44$ است. نتایج همبستگی در شکل ۶ نشان داد که شاخص‌های NDVI و VCI تقریباً همبستگی مشابه و نزدیکی با شاخص SPI دارند. با این تفاوت که شاخص NDVI با مقدار همبستگی $r=0/38$ با شاخص SPI، نمی‌تواند مکمل خوبی به منظور بررسی خشکسالی در حوضه قره‌سو در مناطقی که فاقد ایستگاه‌های باران‌سنجی هستند، باشد.



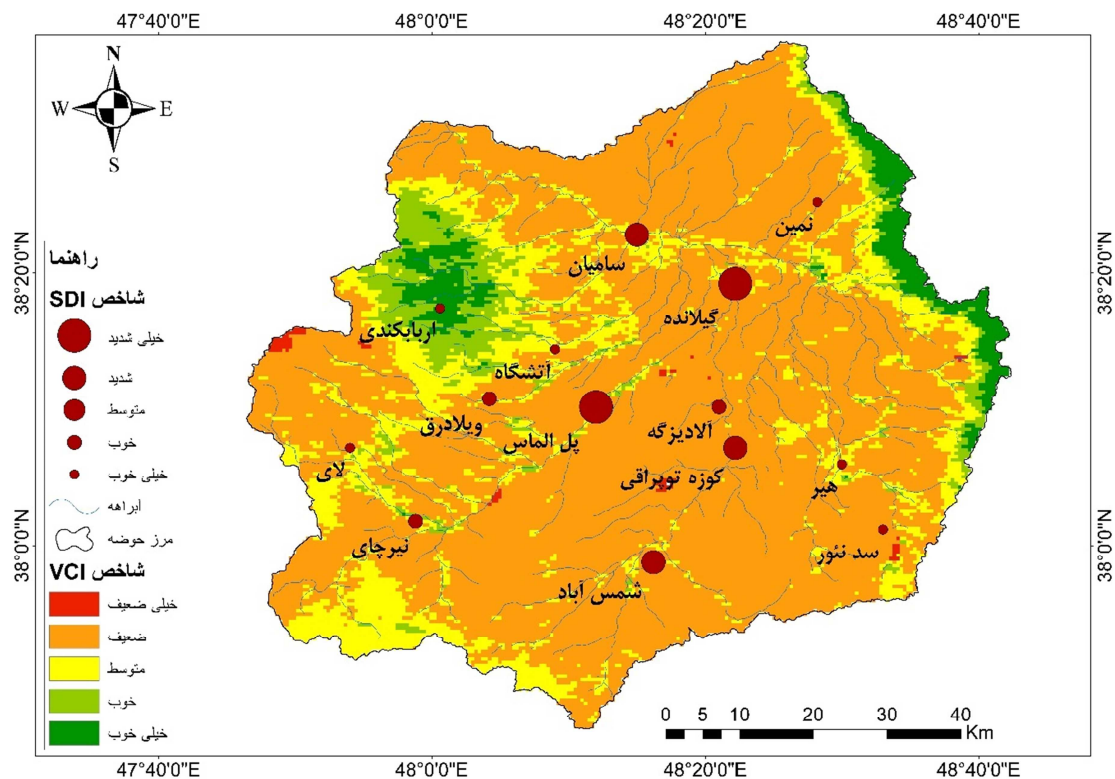
شکل ۶: مقادیر همبستگی بین میانگین شاخص‌های SPI، NDVI و VCI (منبع: نگارندگان)

در ادامه با توجه به نتایج سری زمانی شاخص‌های SPI، SDI و VCI و به منظور نشان دادن پهنه‌های درگیر خشکسالی، نقشه پهنه‌بندی مربوط به سال آبی ۱۲-۲۰۱۱ به عنوان نماینده خشکسالی فراگیر در حوضه قره‌سو تهیه شد. نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI در شکل ۷ قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که در شمال و شمال شرق حوضه به ویژه در ایستگاه‌های باران‌سنجی نمین، ابرکوه، خوش آباد و اردبیل خشکسالی شدیدی و بسیار شدید رخ داده است. همچنین در برخی ایستگاه‌ها مانند نیارق در شرق حوضه، ارباب کندی در شمال غرب و ایستگاه‌های اطراف و پایکوه قله سبلان نسبت به دیگر مناطق از شرایط ترسالی متوسط تا نرمال تری برخوردار بوده‌اند.



شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی SPI در حوضه قره‌سو (منبع: نگارندگان)

همچنین باتوجه به همبستگی بالای شاخص VCI و SPI، به‌منظور بررسی شرایط پوشش گیاهی در سال آبی ۱۲-۲۰۱۱، نقشه پهنه‌بندی شاخص VCI و نتایج خشکسالی هیدرولوژیکی در این سال ترسیم شد (شکل ۸). پهنه‌بندی شاخص VCI در حوضه قره‌سو نشان داد که پوشش گیاهی در شرایط خشکسالی فراگیر تنها در شرق و شمال شرق حوضه و در مرز استان گیلان، همچنین در مناطق پایکوهی سبلان از شرایط مناسبی برخوردار بوده و در دیگر مناطق دارای شرایط متوسط تا ضعیف می‌باشد. نتایج خشکسالی هیدرولوژیکی در سال ۱۲-۲۰۱۱ نشان داد که به‌طرف شمال و خروجی حوضه، مقادیر شاخص SDI، خشکسالی شدید و خیلی شدید به‌ویژه در ایستگاه‌های هیدرومتری گیلانده و پل الماس را نشان داده است. همچنین کمترین مقادیر خشکسالی هیدرولوژیکی مربوط به سرشاخه رودخانه‌ها و ارتفاعات اطراف حوضه قره‌سو به‌ویژه در ایستگاه‌های هیدرومتری ارباب کندی، آتشگاه و لای در غرب و ایستگاه‌های هیر و سد نئور در جنوب شرق حوضه می‌باشد.



شکل ۸: نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی SDI و VCI در حوضه قره‌سو (منبع: نگارندگان)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از داده‌های بارندگی سالانه ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک در یک دوره زمانی ۲۴ ساله در حوضه قره‌سو در استان اردبیل استفاده شد. ابتدا مقادیر SPI سالانه برای همه ایستگاه‌های منطقه محاسبه شد که نتایج نشان داد دوره‌های خشکسالی و ترسالی به‌تناوب در منطقه رخ داده است و اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های خشکسالی و ترسالی مشابه هم می‌باشند. نتایج نشان داد که خشکسالی هواشناسی در سال‌های اخیر تداوم بیشتری داشته و به‌صورت محسوس بر جریان آب‌های سطحی تأثیر گذاشته است. به‌همین منظور تأثیر خشکسالی هواشناسی بر آب‌های سطحی در بازه زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، همچنین به‌صورت فصلی و نیم‌سال آبی بررسی شد. در بررسی نقشه پهنه‌بندی خشکسالی هواشناسی مشخص شد که در شمال و شمال شرق حوضه به‌ویژه در ایستگاه‌های باران‌سنجی نمین، ابرکوه، خوش‌آباد و اردبیل خشکسالی شدیدی و بسیار شدید نسبت به دیگر مناطق به ثبت رسیده است. همچنین در برخی ایستگاه‌ها مانند نیارق در شرق حوضه، ارباب‌کندی در شمال غرب و ایستگاه‌های اطراف و پایکوه قله سبلان نسبت به دیگر مناطق از شرایط نرمال‌تر از نظر خشکسالی برخوردار بوده‌اند.

نتایج همبستگی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌صورت فصلی نشان داد که در مقیاس‌های هم‌زمان و ماه‌های Oct-Dec و Jan-Mar کمترین همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی و SDI وجود دارد. همچنین در شش ماه دوم سال، شاخص SPI در مقیاس زمانی Jan-Mar با شاخص SDI در مقیاس زمانی Apr-Jun بیشترین

همبستگی را دارد. همچنین مقایسه فصلی خشکسالی‌ها نشان داد که شاخص SPI در مقیاس زمانی Apr-Jun با شاخص SDI در مقیاس زمانی Jul-Sep بیشترین همبستگی را دارد. نتایج پراکندگی فضایی خشکسالی هیدرولوژیکی در سال ۲۰۱۱-۱۲ به‌عنوان سالی که خشکسالی فراگیر در منطقه رخ داده است، نشان داد که به‌طرف خروجی حوضه و شمال منطقه، بر مقادیر منفی شاخص SDI افزوده شده که نشان‌دهنده خشکسالی شدید و خیلی شدید به‌ویژه در ایستگاه‌های هیدرومتری گیلانده و پل الماس می‌باشد. همچنین کمترین مقادیر خشکسالی هیدرولوژیکی در این سال مربوط به سرشاخه رودخانه‌ها و ارتفاعات اطراف حوضه قره‌سو به‌ویژه در ایستگاه‌های هیدرومتری ارباب‌کندی، آتشگاه و لای در غرب و ایستگاه‌های هیر و سد نئور در جنوب شرق حوضه می‌باشد.

به‌منظور تعیین دقیق تأخیر زمانی، مقادیر ماهانه خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی نیز با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که خشکسالی هواشناسی به‌صورت هم‌زمان با خشکسالی هیدرولوژیکی همبستگی بسیار پایینی دارد، این در حالی است که بعد از وقوع خشکسالی هواشناسی، ابتدا در همان ماه همبستگی کمی با SDI داشته اما در ماه‌های دوم و سوم بیشترین همبستگی با خشکسالی هیدرولوژیکی مشخص می‌شود یعنی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت بیشترین رابطه همبستگی وجود دارد. در این رابطه زنگ و همکاران (۲۰۱۵) نیز در مقایسه‌ای در حوضه رودخانه جبالین در چین تأخیر زمانی ۱ تا ۳ ماه را بین شاخص‌های SPEI و SDI به‌دست آوردند. این در حالی است که گوموش و آلگین (۲۰۱۷)، در پژوهشی در حوضه رودخانه سیهان-جیهان در کشور ترکیه، بین شاخص‌های SPI و SDI تأخیر زمانی یک‌ساله را به‌دست آورده‌اند.

در ادامه و به‌منظور ارزیابی رابطه خشکسالی هواشناسی و سلامت پوشش گیاهی در منطقه از شاخص‌های NDVI و VCI استفاده شد. نتایج سری زمانی شاخص NDVI نشان داد که وضعیت پوشش گیاهی در سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳، ۲۰۰۶-۲۰۰۷ و ۲۰۰۱-۲۰۰۰ نسبت به دیگر سال‌ها بسیار ضعیف می‌باشد. همچنین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۹، ۲۰۱۴-۲۰۱۳ و ۲۰۱۶-۲۰۱۵ نیز سطح کیفیت پوشش گیاهی از نظر شاخص NDVI در حوضه قره‌سو پایین بوده است. نتایج سری زمانی شاخص VCI همانند شاخص NDVI توانست دوره‌های خشکسالی و ترسالی را تشخیص دهد. همچنین نتایج نشان داد که از نظر شاخص NDVI شرایط پوشش گیاهی مناسب چه در سال‌های خشک و چه در سال‌های مرطوب، مربوط به حاشیه رودخانه‌های اصلی، قسمت جنوب شرق حوضه (ارتفاعات میان اردبیل و آستارا) و دامنه‌های سبلان می‌باشد. در ادامه شاخص VCI در سال‌های خشک و تر نشان داد که دامنه‌های سبلان از شدت خشکسالی کمتری نسبت به دیگر مناطق حوضه برخوردارند. البته باتوجه به نتایج شاخص VCI در سال‌های ۲۰۰۹-۱۰ و ۲۰۱۳-۱۴ که خشکسالی رخ داده است، قسمت‌هایی در غرب شهر اردبیل خشکسالی خیلی شدید پوشش گیاهی مشاهده می‌شود. به‌منظور بررسی رابطه همبستگی بین شاخص SPI به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و شاخص‌های NDVI، VCI، به‌عنوان شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای، از همبستگی پیرسون استفاده شد. برای این منظور از ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک داخل حوضه جهت بررسی شاخص SPI و میانگین پیکسل‌های متناظر و اطراف هر ایستگاه به‌منظور محاسبه همبستگی شاخص‌های ماهواره‌ای استفاده شد.

در بررسی رابطه شاخص NDVI با خشکسالی هواشناسی مشخص شد که این دو شاخص در اکثر مناطق حوضه قره-سو به صورت همزمان دارای رابطه ضعیف و یا منفی با یکدیگر هستند. دلیل ضعیف بودن رابطه SPI و NDVI می‌تواند دو عامل باشد. یکی قرار گرفتن ایستگاه‌های هواشناسی در دشت‌ها و اطراف چاه‌های پیرومتری که باعث می‌شود بین مقادیر NDVI با ایستگاه هواشناسی به صورت همزمان رابطه معنی‌داری مشاهده نشود که در اکثر موارد رابطه معکوس و منفی مشاهده شد. دلیل این امر می‌تواند افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی به منظور جبران نیاز آبی گیاهان و محصولات کشاورزی در شرایط خشکسالی باشد. دلیل دوم در مورد رابطه ضعیف نقاط مورد بررسی در خارج از دشت‌ها و به دور از چاه‌های پیرومتری، نیز می‌تواند به خاطر فاصله زمانی بین رخداد خشکسالی و ترسالی با پاسخ گیاه باشد.

نتایج همبستگی بین شاخص‌های SPI و NDVI نشان داد که بیشترین همبستگی در ایستگاه سنین، مشاهده می‌شود و مقدار همبستگی آن برابر با $r = 0/46$ که در سطح $0/05$ درصد معنی‌دار است. همچنین در ایستگاه شمشیر خوانی نیز مقدار همبستگی شاخص‌های SPI و NDVI برابر با $r = 43$ می‌باشد که در سطح $0/05$ درصد معنی‌دار است؛ اما به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر همبستگی بین شاخص‌های SPI و NDVI در اکثر مناطق حوضه قره‌سو بسیار پایین بوده و این شاخص نمی‌تواند به تنهایی مکمل مناسبی برای جبران ضعف شاخص SPI که تنها بارندگی را در نظر می‌گیرد، باشد. نتایج همبستگی شاخص VCI نشان داد که تقریباً در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی بالاتری با SPI نسبت به NDVI دارد. در این شاخص نیز ایستگاه‌های سنین و شمشیر خوانی به ترتیب با مقدار $r = 0/49$ و $r = 0/46$ بیشترین همبستگی را با SPI دارد که در سطح $0/05$ درصد معنی‌دار می‌باشند. باتوجه به نتایج همبستگی بین این دو شاخص می‌توان چنین نتیجه گرفت که شاخص VCI نسبت به NDVI شرایط بهتری برای نشان دادن خشکسالی در حوضه قره‌سو دارد. به طور کلی میانگین مقادیر شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور در نمودار اسکاتر پلات با یکدیگر مقایسه و مشخص شد بیشترین همبستگی بین شاخص‌های SPI و VCI می‌باشد که مقدار آن برابر با $r = 0/44$ است. همچنین شاخص NDVI با مقدار $r = 0/38$ همبستگی کمتری با شاخص SPI دارد. در ادامه باتوجه به نتایج همبستگی بین شاخص‌های VCI و SPI و به منظور بررسی پراکندگی فضایی خشکسالی پوشش گیاهی نقشه پهنه‌بندی شاخص VCI در سال آبی ۱۲-۲۰۱۱ به عنوان سال نمونه ترسیم شد. نتایج شاخص VCI نشان داد که پوشش گیاهی در شرایط خشکسالی فراگیر تنها در شرق و شمال شرق حوضه (در مرز استان گیلان)، همچنین در مناطق پایکوهی سبلان که دارای تراکم گیاهی مناسب و پهنه‌های جنگلی می‌باشند، خشکسالی پوشش گیاهی از شرایط نرمالی برخوردار بوده و در دیگر مناطق دارای خشکسالی پوشش گیاهی دارای شرایط متوسط تا ضعیف می‌باشد.

منابع

- بذرافشان جواد، حجابی سمیه. (۱۳۹۶). خشکسالی: روش‌های پایش، انتشارات دانشگاه تهران. ص ۲۲۴.
- خدایی مهسا، شاد روزه، مقصودی مهرانی یاسر، قائمی مرجان. (۱۳۹۵). تعیین یک شاخص بهینه چند سنسور سنجش‌ازدوری به منظور ارتقای فرایند پایش زمان واقعی خشکسالی در مناطقی با پوشش اراضی ناهمگن. اکو هیدرولوژی، دوره سوم، شماره سوم، صص ۴۳۹-۴۵۴.

- رسولی، علی‌اکبر. (۱۳۸۷). مبانی سنجش‌ازدور کاربردی با تأکید بر پردازش تصاویر ماهواره‌ای، انتشارات دانشگاه تبریز، ص ۸۰۶. رضایی بنفشه مجید، رضایی علی، فریدپور مجتبی. (۱۳۹۲). تحلیل خشکسالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی با تأکید بر سنجش‌ازدور و شاخص وضعیت پوشش گیاهی، نشریه دانش آب‌و‌خاک. جلد ۲۳ شماره ۴، صص ۱۳۱-۱۴۱.
- سلیمانی کریم، درویشی شادمان، فاطمه شکریمان. (۱۳۹۸). تحلیل خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: شهرستان مریوان)، سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره ۲، دوره ۱۰، صص ۱۵-۳۳.
- مفیدی پور، نازنین. (۱۳۹۱). بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز اترک، پژوهش‌نامه مدیریت حوضه آبخیز، سال سوم، شماره پنجم، بهار و تابستان ۱۳۹۱، صص: ۲۶-۱۶.
- میرموسوی سید حسین، کریمی حمیده. (۱۳۹۲). مطالعه اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS، مورد: استان کردستان، جغرافیا و توسعه، شماره ۳۱، تابستان ۱۳۹۲، صص: ۷۶-۵۷.
- Barua, S., Ng, A.W.M., Perera, B.J.C. (2010). Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra River catchment in Australia, *J WATER RES PL*, 137(2):215-226.
- Bhuiyan, C., Singh, R. P., Kkogan, F.N. (2006). Monitoring Drought Dynamics in the Aravalli Region (India) using Different Indices based on Ground and Remote Sensing data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 8: 289-302.
- Edwards, D.C., McKee, T. B. (1997). Characteristics of 20th-century drought in the United States at multiple time scales, *Climatology Rep*, 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Gao, L., and Zhang, Y. (2016). Spatio-temporal variation of hydrological drought under climate change during the period 1960-2013 in the Hexi Corridor, China, *Journal of Arid Land*, 8(2), pp.157-171.
- Gąsiorek, E., Musiał, E. (2015). Evaluation of the Precision of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on Years 1954-1995 in Łódź. *Journal of Ecological Engineering*, 16:4.
- Gumus, V., H.M. Algin. (2017). Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan- Ceyhan River basins, Turkey. *Meteorol, Appl* 24(1): 62-73.
- Kanellou, E., Tsiros, E., Omenikiotis, C., Dalezios, N. R. (2008). Meteorological and agrohydrological drought monitoring based on conventional and remotely sensed data. *Geophysical research abstract*
- Kazemzadeh, M., and Malekian, A. (2016). Spatial characteristics and temporal trends of meteorological and hydrological droughts in northwestern Iran. *Natural Hazards*, 80(1):191-210.
- Lloyd-Hughes, B., Saunder, M.A. (2002). A drought climatology for Europe, *International Journal of Climatology*, 22(13), pp.1571-1592.
- Mckee, B.T., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim CA, American Meteorological Society, 17-22 January 1993: 179-184
- 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). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Myronidis, D., Ioannou, K., Fotakis, D., and Dörflinger, G. (2018). Streamflow and Hydrological Drought Trend Analysis and Forecasting in Cyprus. *Water Resources Management*, 32(5):1759-1776.
- Papathanasiou, C., Serbis, D., Mamassis, N. (2013). Flood mitigation at the downstream areas of a transboundary river. *Water Util J*, 3:33-42.
- Radeva, K., Nikolova, N. and Gera, M. (2018). Assessment of hydro-meteorological drought in the Danube Plain, Bulgaria. *Hrvatski geografski glasnik*, 80(1), pp.7-25.
- Rhee, J., Im, J., Carbone, G. J. (2010). monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data, *Remote Sensing of Environment* 114: pp. 2875-2887.
- Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B, Eds. (2007). *Methods and tools for drought analysis and management* (Vol. 62), Springer Science & Business Media.
- Thenkabail, P. S., Gamage, M. S. D. N., Samakhtin, V, U. (2002). Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: pp.607-621.
- Thenkabail, P.S., Enclona, E. A., Ashton, M. S., Legg, C., Jean De Dieu, M. (2004). *The Use of Remote Sensing Data for Drought Assessment and Monitoring in Southwest Asia*, International Water Management Institute, PO Box 2075, Colombo, Sri Lanka.
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Vangelis, H., Verbeiren, B., Huysmans, M., Tychon, B., Jacquemin, I., Canters, F., Tucker, S. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment* 8: pp.127-150.

Wang, J., Price, K. P., Rich, P.M. (2002). spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains, *International Journal of Remote Sensing* 22: pp. 3827–3844.

Wilhite, D.A. (2000). *Drought: A Global Assessment*, Vols, 1 and 2, Rout ledge, New York, USA.

Zeng X., Zhao, N., Sun, H., Ye, L., Zhai, J. (2015). Changes and relationships of climatic and hydrological droughts in the Jialing River basin, China. *PloS one*, 10(11), p.e0141648.

References

References (in Persian)

- Bazrafshan, J., Hejabi, S. (2017). Drought: Monitoring methods, Tehran University Press, 224p. [In Persian]
- Khodae, M., Shad, R., Maghsoudi, Y., Ghaemi, M. (2016). Determination of An Optimized Multi-Sensor Remote Sensing Index to Promote Real-Time Drought Monitoring Over the Heterogeneous Land Covers, Iranian journal of Ecohydrology, 3(3), 439-454. DOI: 10.22059/ije.2016.60041. [In Persian]
- mirmosavei, S., kareimeh, H. (2013). Effect of Drought on Vegetation Cover Using MODIS Sensing Images Case: Kurdistan Province, Geography and Development Iranian Journal, 11(31), 57-76. DOI: 10.22111/gdj.2013. 794.. [In Persian]
- Mofidipour, N. (2012). The Analysis of Relationship Between Meteorological and Hydrological Droughts in Atrak Watershed. JWMR; 3 (5) :16-26. [In Persian]
- Rasoli, A.A. (2008). Fundamentals of remote sensing applications, with emphasis on processing satellite images, Tabriz University Press, 806p. [In Persian]
- Rezaei Banafsheh, M., Rezaei, A., Faridpour, M. (2015). Analyzing Agricultural Drought in East Azerbaijan Province Emphasizing Remote Sensing Technique and Vegetation Condition Index, Water, and Soil Science, 25(1), 113-123. [In Persian]
- Solaimani, K., Darvishi, S., Shokrian, F. (2019). Analysis of agricultural drought using remote sensing indices (Case study: Marivan city), Journal of RS and GIS for Natural Resources, 10(2), 15-33. [In Persian]

References (in English)

- Barua, S., Ng, A.W.M., Perera, B.J.C. (2010). Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra River catchment in Australia, J WATER RES PL, 137(2):215-226.
- Bhuiyan, C., Singh, R. P., Kkogan, F.N. (2006). Monitoring Drought Dynamics in the Aravalli Region (India) using Different Indices based on Ground and Remote Sensing data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 8: 289-302.
- Edwards, D.C., McKee, T. B. (1997). Characteristics of 20th-century drought in the United States at multiple time scales, Climatology Rep, 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Gao, L., and Zhang, Y. (2016). Spatio-temporal variation of hydrological drought under climate change during the period 1960–2013 in the Hexi Corridor, China, Journal of Arid Land, 8(2), pp.157-171.
- Gąsiorek, E., Musiał, E. (2015). Evaluation of the Precision of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on Years 1954-1995 in Łódź. Journal of Ecological Engineering, 16:4.
- Gumus, V., H.M. Algin. (2017). Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan– Ceyhan River basins, Turkey. Meteorol, Appl 24(1): 62-73.
- Kanellou, E., Tsiros, E., Omenikiotis, C., Dalezios, N. R. (2008). Meteorological and agrohydrological drought monitoring based on conventional and remotely sensed data. Geophysical research abstract
- Kazemzadeh, M., and Malekian, A. (2016). Spatial characteristics and temporal trends of meteorological and hydrological droughts in northwestern Iran. Natural Hazards, 80(1):191-210.
- Lloyd-Hughes, B., Saunder, M.A. (2002). A drought climatology for Europe, International Journal of Climatology, 22(13), pp.1571-1592.
- McKee, B.T., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim CA, American Meteorological Society, 17-22 January 1993: 179-184
- 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). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Myronidis, D., Ioannou, K., Fotakis, D., and Dörflinger, G. (2018). Streamflow and Hydrological Drought Trend Analysis and Forecasting in Cyprus. Water Resources Management, 32(5):1759-1776.
- Papathanasiou, C., Serbis, D., Mamassis, N. (2013). Flood mitigation at the downstream areas of a transboundary river. Water Util J, 3:33-42.
- Radeva, K., Nikolova, N. and Gera, M. (2018). Assessment of hydro-meteorological drought in the Danube Plain, Bulgaria. Hrvatski geografski glasnik, 80(1), pp.7-25.
- Rhee, J., Im, J., Carbone, G. J. (2010). monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data, Remote Sensing of Environment 114: pp. 2875–2887.
- Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B, Eds. (2007). Methods and tools for drought analysis and management (Vol. 62), Springer Science & Business Media.
- Thenkabail, P. S., Gamage, M. S. D. N., Samakhtin, V, U. (2002). Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 68: pp.607–621.
- Thenkabail, P.S., Enclona, E. A., Ashton, M. S., Legg, C., Jean De Dieu, M. (2004). The Use of Remote Sensing Data for Drought Assessment and Monitoring in Southwest Asia, International Water Management Institute, PO Box 2075, Colombo, Sri Lanka.

Tsakiris, G., Nalbantis, I., Vangelis, H., Verbeiren, B., Huysmans, M., Tychon, B., Jacquemin, I., Canters, F., Tucker, S. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment* 8: pp.127–150.

Wang, J., Price, K. P., Rich, P.M. (2002). spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains, *International Journal of Remote Sensing* 22: pp. 3827–3844.

Wilhite, D.A. (2000). *Drought: A Global Assessment*, Vols, 1 and 2, Rout ledge, New York, USA.

Zeng X., Zhao, N., Sun, H., Ye, L., Zhai, J. (2015). Changes and relationships of climatic and hydrological droughts in the Jialing River basin, China. *PloS one*, 10(11), p.e0141648.