

Monitoring Meteorological Drought Vulnerability Using Satellite Images of Mazandaran Province

Saleh Arekhi^{*1}, Somayeh Emaddin², Neda Sorizaei³

1. Associate Professor, Department of Geography and GIS, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

2. Associate Professor, Department of Geography and GIS, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

3. Graduated in Geography and Environmental Hazards, Golestan University, Gorgan, Iran

Received Date: 01 July 2025

Accepted Date: 15 September 2025

Abstract

Background and Objective: Today decision-makers in dealing with drought consider the integrated management approach of crisis management and risk management simultaneously. So far, Mazandaran province has suffered a lot of damage from drought risk. Therefore, determining the level of vulnerability and type of meteorological drought risk situation in the study area, especially in the last two decades, is the main issue of this study.

Methodology: Methodology in order to determine the meteorological drought situation, the Standard Precipitation Index was used in this study. First, the monthly rainfall statistics for 17 selected meteorological stations in the region were collected and tested for accuracy, precision and feasibility during the common period of 2000-2020. For each of the station in question the percentage of meteorological drought occurrence was determined on an annual time scale. Then the drought Hazard Index (DHI) was extracted by assigning weights and degrees for each of the different intensities. Also the vulnerability of meteorological drought was calculated using physical and socio-economic indicators and then the drought- vulnerable zones were determined. Finally based on the two factors of drought hazard index and vulnerability index, the risk of drought damage was calculated and then the zones at risk of meteorological drought were determined.

Results and Findings: Findings and conclusion the results of the research on drought conditions showed that the most severe droughts occurred in the region in 2000, 2008, 2012, 2014, 2016 and 2017. Based on the drought risk index, the results showed that northern part of the region and its central part with an area equivalent to 24% in the SPI index, 22% in the VCI index (vegetation condition index) and 28% in the VHI index (vegetation health index) and 20% in TCI index (surface temperature index) the area of Mazandaran province are very susceptible to the risk of meteorological drought. 35 percent of the province's area, located in the north of the province, has very high drought vulnerability. The results of this study indicate that the risk and vulnerabilities caused by meteorological drought seriously threaten Mazandaran province. Meteorological drought risk maps can be used as a suitable warning tool in the risk reduction action plan for all policymakers, managers and stakeholders of the studied region. This issue is of particular importance in planning agricultural activities and the optimal use of water resources, especially in this province where the livelihoods of agricultural operators depend on both rainfed and irrigated agriculture.

Keywords: MODIS remote sensing, drought, damage index, vulnerability, SPI index, Mazandaran Province.

* Corresponding Author Email: s.arekhi@gu.ac.ir

Cite this article: Arekhi, S., Emaddin, S. and Sorizaei, N. (2026). Monitoring Meteorological Drought Vulnerability Using Satellite Images of Mazandaran Province. Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS), 6(4), 387-418.



پایش آسیب‌پذیری خشکسالی هوشناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استان مازندران

صالح آرخی^{۱*}، سمیه عمادالدین^۲، ندا سوری زائی^۳

۱. دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۲. دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۳. دانش آموخته جغرافیا و مخاطرات محیطی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

چکیده

زمینه و هدف: امروزه تصمیم‌گیران در مواجهه با خشکسالی، نگاه مدیریت تلفیقی مدیریت بحران و خطرپذیری را به صورت توأمان مدنظر دارند. تاکنون استان مازندران خسارت زیادی را از ناحیه مخاطره خشکسالی متحمل شده است. از این رو در منطقه مورد پژوهش، تعیین میزان آسیب‌پذیری و نوع وضعیت خطرپذیری خشکسالی هوشناسی به ویژه در دو دهه اخیر، مسأله اصلی مورد این پژوهش است.

روش‌شناسی: به منظور تعیین وضعیت خشکسالی هوشناسی، در این پژوهش از شاخص بارش استاندارد شده (Standard Precipitation Index) استفاده شد. ابتدا آمار بارندگی ماهانه مربوط به ۱۷ ایستگاه هوشناسی منتخب در منطقه جمع‌آوری و مورد آزمون صحت، دقت و همگنی داده‌ها طی دوره مشترک ۲۰۲۰-۲۰۲۰ قرار گرفت. برای هر یک از ایستگاه‌های مورد نظر، عامل درصد فراوانی وقوع خشکسالی‌های هوشناسی در مقیاس زمانی سالانه تعیین شد. سپس شاخص خطر خشکسالی (Drought Hazard Index) DHI با اختصاص اوزان و درجات برای هر یک از شدت‌های مختلف استخراج گردید. همچنین میزان آسیب‌پذیری خشکسالی هوشناسی با استفاده از شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی اجتماعی محاسبه شد و به دنبال آن پهنه‌های آسیب‌پذیر خشکسالی نیز تعیین گردید. در نهایت بر اساس دو عامل استعداد خطر خشکسالی (Drought Hazard Index) و میزان آسیب‌پذیری (Drought Vulnerability Index)، میزان ریسک یا خسارت خشکسالی (Drought Risk Index) محاسبه شد و سپس پهنه‌های خطرپذیر خشکسالی هوشناسی تعیین گردید.

نتایج و یافته‌ها: نتایج پژوهش در خصوص وضعیت‌های خشکسالی نشان داد که شدیدترین خشکسالی‌ها در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲، ۲۰۱۴، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ در منطقه به وقوع پیوسته است. بر اساس شاخص خطر خشکسالی، نتایج نشان داد که پهنه شمالی منطقه و قسمتی میانی آن به گستره‌ای معادل ۲۴ درصد در شاخص SPI، ۲۲ درصد در شاخص VCI (شاخص شرایط پوشش گیاهی) و ۲۸ درصد در شاخص VHI (شاخص سلامت پوشش گیاهی) و ۲۰ درصد در شاخص TCI (شاخص دمای سطحی) از مساحت استان مازندران، مستعد خطر وقوع خشکسالی خیلی زیاد هستند. ۳۵ درصد مساحت استان واقع در شمال استان، آسیب‌پذیری خشکسالی خیلی زیاد داشته است. هم‌چنین تقریباً در حدود ۵۵ درصد در شاخص SPI، ۴۴ درصد در شاخص VCI، ۴۳ درصد در شاخص VHI و ۴۸ درصد در شاخص TCI از کل سطح استان، دارای خسارت خشکسالی متوسط تا زیاد بوده است. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که خطرات و آسیب‌پذیری ناشی از خشکسالی هوشناسی، استان مازندران را به طور جدی تهدید می‌کند. نقشه‌های خطرپذیری خشکسالی هوشناسی می‌تواند به عنوان ابزار مناسب هشدار دهنده در برنامه اقدامات کاهش خطر برای همه سیاست‌گذاران، مدیران و ذینفعان منطقه مورد پژوهش باشد. این موضوع، در برنامه‌ریزی فعالیت‌های کشاورزی، استفاده بهینه از منابع آب، به ویژه در این استان که معیشت بهره‌برداران کشاورزی آن به زراعت دیم و آبی نیز وابسته است، اهمیت خاصی دارد.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور، سنجنده مودیس، خشکسالی، شاخص خسارت، آسیب‌پذیری، شاخص SPI، استان مازندران.

* نویسنده مسئول: s.arekhi@gu.ac.ir

ارجاع به این مقاله: آرخی، صالح، عمادالدین، سمیه و سوری زائی، ندا. (۱۴۰۴). پایش آسیب‌پذیری خشکسالی هوشناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استان مازندران. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۶(۴)، ۳۸۷-۴۱۸.

مقدمه و بیان مسأله

خشکسالی از جمله بلاهای طبیعی می‌باشد که به آهستگی به وقوع می‌پیوندد و می‌تواند برای مدتی طولانی تداوم یابد و قسمت‌های وسیعی از سرزمین را درگیر کند (Fleig et al., 2006). خشکسالی و خشکی دو مفهوم متفاوت‌اند. خشکی نوعی ویژگی دائم آب و هوایی در یک منطقه است که عدم کفایت بارش در حد لازم برای ادامه فعالیت‌های حیاتی و عادی موجودات زنده در آن منطقه می‌باشد در حالی که خشکسالی، خشکی در حد کمتر از حد معمول منطقه است. یکی از تفاوت‌های عمده خشکسالی با دیگر بلاهایی طبیعی در این است که این مصیبت به نسبت سایرین که به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتند، در زمان طولانی‌تر و به تدریج رخ می‌دهد. به همین علت است که این بلا را بلایی خزننده دانسته‌اند (Kogan et al., 2000).

خطرهای ناشی از خشکسالی خیلی بیشتر از خشکی است. به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی، در بسیاری از نقاط ایران، خشکسالی یک تهدید حتمی و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. کمبود بارش در یک منطقه برای دوره‌های زمانی طولانی‌مدت به‌عنوان خشکسالی شناخته می‌شود. این کمبود آب در چرخه هیدرولوژیکی منتشر می‌شود و انواع مختلف خشکسالی را ایجاد می‌کند (Fiorillo and Guadagno, 2010).

بروز خشکسالی و کاهش بارش بر منابع آب و کشاورزی در هر منطقه تأثیرگذار است (Khoshakhlq et al., 2006). تغییرپذیری منابع آب زیرزمینی از تغییرات اقلیمی ناشی از فرایندهای هیدرولوژیکی مانند بارش، تبخیر و تعرق و تعامل با آب سطحی انجام می‌گیرد (Chen et al., 2004). غالباً "خشکسالی‌ها از خشکسالی هواشناسی شروع شده و به ترتیب به خشکسالی هیدرولوژیکی، کشاورزی و سرانجام اجتماعی اقتصادی تبدیل می‌شود (Alizadeh, 2014). سیستم‌های پایش را از ابزارهای لازم برای مدیریت خشکسالی بیان داشتند. با این سیستم‌ها است که می‌توان از شدت و توسعه مکانی خشکسالی آگاهی یافت که معمولاً با شاخص‌های خشکسالی این مهم به انجام می‌رسد (Wilhelmi and Wilhite, 2002). پراکنش متعدد، فراوانی مکانی و زمانی پدیده خشکسالی همچنین متفاوت بودن نیاز به آب توسط بخش‌های مختلف مصرف و اثرات گوناگون آن بر زیر بخش‌های مختلف جامعه، ارائه یک تعریف واحد برای این پدیده اقلیمی را مشکل ساخته است (ریچارد و هیم، ۲۰۰۲). پایش و تحلیل شرایط خشکسالی از نیازهای اصلی مدیریت منابع آب است. با توجه به مشکلات کمی نمودن ویژگی‌های خشکسالی، شاخص‌های متعددی در دهه‌های اخیر توسعه پیدا نموده‌اند (نصرتی، ۱۳۹۳). اهداف این پژوهش به شرح زیر است:

- تعیین و تحلیل شدت و تداوم دوره‌های خشک و مرطوب با استفاده از شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)
- محاسبه شاخص‌های VCI (شاخص شرایط پوشش گیاهی)، VHI (شاخص سلامت پوشش گیاهی) و TCI (شاخص دمای سطحی)
- تجزیه و تحلیل خطر خشکسالی و آسیب‌پذیری با استفاده از سه شاخص خطر (DHI)^۱، شاخص آسیب‌پذیری (DVI)^۲ و شاخص خسارت یا ریسک (DRI)^۳ می‌باشد.

پیشینه پژوهش

در زمینه خشکسالی، تهیه نقشه خطر خشکسالی و آسیب‌پذیری ناشی از آن مطالعات بسیاری در جهان و ایران انجام شده است که می‌توان به مواردی چند از آنها اشاره نمود:

مکی و همکاران (۱۹۹۳) تعریف تازه‌ای از خشکسالی ارائه نمودند تحت عنوان نمایه بارش استاندارد شده یا SPI^۴ و اعتقاد داشتند در هر مقیاس زمانی و مکانی قابل اجرا است. همچنین این شاخص این امکان را به وجود می‌آورد که اطلاعاتی از قبیل شروع، پایان، شدت و بزرگی خشکسالی محاسبه گردد و نیز این روش پایش، احتمال، درصد میانگین و کمبود بارش را در طی

^۱. Drought Hazard Index

^۲. Drought Vulnerability Index

^۳. Drought Risk Index

^۴. Standard Precipitation Index

دوره خشکسالی محاسبه می‌کند. با استفاده از این روش برای اولین بار در ایالت کلرادو مشخص گردید که نتایج حاصل از این روش با واقعیت‌ها و اثرات زمینی همخوانی دارد. همچنین فاکتورهای مهم تحلیل خشکسالی مانند مقیاس زمان، احتمال، نقصان بارش، کاربرد تعریف بارش و پنج متغیر تامین آب و ارتباط تعریف با اثرات خشکسالی را در بر می‌گیرد (McKee et al, 1993).

بوردي و همکاران (۲۰۰۶) با تحلیل روند خطی و غیر خطی خشکسالی و ترسالی بر مبنای شبکه‌بندی شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و با استفاده از بارش ماهانه در اروپا، در دو بازه زمانی ۱۹۴۹ تا ۱۹۹۷ و ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۹ نشان دادند که پوشش سطحی سری‌های زمانی خشکسالی و ترسالی (تعداد نقاط شبکه بالا و پایین آستانه شدت) در بازه زمانی ۱۹۴۹ تا ۱۹۹۷ روند خطی مشخصی دارد ولی در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۹ برعکس شده که نشانه روند خیر خطی است و در مقیاس‌های زمانی هیدرولوژیکی مشخص‌تر است. همچنین در بررسی رفتار زمانی SPI در نقاط شبکه انتخاب شده تغییرپذیری فضایی در روندها شناسایی شده است. (Bordi et al, 2009)

مکونیت و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از سه شاخص SPEI، SPI و RDI و داده‌های بارندگی و دما، خشک سالی‌ها را در مقیاس زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه در حوزه رودخانه تیبیر (Tiber) واقع در ایتالیای مرکزی محاسبه و در نهایت شاخص خطر خشکسالی (DHI) محاسبه و نقشه پهنه‌بندی را تهیه کردند (Maccioni et al, 2014)

یغمایی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که بین پوشش گیاهی مراتع و شاخص خشکسالی SPI در مقیاس‌های مختلف همبستگی دارد و تیپ‌های مختلف گیاهی، زمان بارندگی و نوع فرم گونه گیاهی نقش مهمی در میزان تأثیرات بارش خشکسالی بر پوشش گیاهی در هر منطقه دارد.

لورنزو و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی تحت عنوان تکامل خشکسالی در شبه جزیره ایبری شمال غربی یک دوره ۶۰ ساله (۱۹۶۰-۲۰۲۰) پرداختند. براساس داده‌های چندین باران‌سنج در منطقه با استفاده از شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف زمانی برای توصیف شرایط خشکسالی انجام دادند، نتایج حاکی از افزایش تعداد دوره‌های تحت شرایط خشکسالی و شدت رویدادهای خشکسالی در پایان دوره مورد تجزیه و تحلیل بوده است.

هاشمی و زینب (۱۳۹۰) به منظور پهنه‌بندی خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش شاخص استاندارد شده بارش (SPI) نشان داد که تمام پهنه‌های استان در سال‌های ۱۹۸۳، ۱۹۸۵، ۱۹۹۰، ۱۹۹۵ و ۲۰۰۰ خشکسالی‌های نسبی، شدید و یا بسیار شدیدی را طی کرده‌اند، ولی در سال ۲۰۰۸ تمام پهنه استان شرایط فوق العاده خشکی را تجربه کرده‌اند و خشکسالی بی‌سابقه استان طی این سال اتفاق افتاده است.

زارع خورمیزی و همکاران (۱۳۹۶)، ارتباط خشکسالی و تغییرات پوشش گیاهی را در مراتع جنوب استان یزد با استفاده از سنجش از دور بررسی نمودند. از تصاویر سری زمانی NDVI سنجنده مودیس طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ برای محاسبه میانگین NDVI فصلی و سالانه استفاده گردید. نتایج آنها نشان داد تأثیر خشکسالی بر تیپ‌های مختلف گیاهی بسته به شرایط اکولوژیک منطقه، نوع گونه گیاهی و فرم رویش دارد.

بحرینی و همکاران (۱۳۹۷)، در تحقیقی به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر پوشش گیاهی به خشکسالی با استفاده از سنجش از دور در استان بوشهر پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص NDVI بیشترین همبستگی را بین شاخص‌ها دارد و جهت تهیه نقشه درصد پوشش گیاهی انتخاب گردید، و همچنین بیشترین همبستگی بین شاخص پوشش گیاهی با SPI شش ماهه وجود دارد و منطقه در سال ۲۰۱۲ شدیدترین خشکسالی و سال ۲۰۰۴ بهترین وضعیت ترسالی را داشته است. در پژوهش خادمی‌پور و همکاران (۲۰۱۸) پس از تحلیل خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI، علاوه بر شاخص خطر خشکسالی، سطح آسیب‌پذیری استان کرمان با توجه به شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی محاسبه و در نهایت ریسک خشکسالی براساس شاخص‌های خطر و آسیب‌پذیری، تحلیل شد.

پورهایمی‌مجمورد و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی به بررسی آسیب‌پذیری ناشی از خشکسالی کشاورزی با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره برای شهرستان اردکان انجام دادند، که نتایج نشان داد اهمیت توپوگرافی منطقه به ویژه شیب در میزان خشکسالی تأثیر بسیار دارد.

حیدری‌زادی و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی به ارزیابی خسارت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای خشکسالی و فاکتورهای آسیب‌پذیری در استان ایلام انجام دادند، به این نتایج دست پیدا کردند که نقشه خسارت که دو شهرستان در معرض خشکسالی خیلی شدید، چهار شهرستان در معرض خسارت زیاد و چهار شهرستان در معرض خطر خشکسالی متوسط و کم قرار دارند.

زارعی‌محمودآبادی و همکاران (۱۴۰۲)، در مقاله‌ای تحت عنوان پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SIAP برای شهرستان یزد طی یک دوره ۲۵ ساله از سال ۱۳۷۶-۱۴۰۰ برای ایستگاه‌های سینوپتیک سال‌های خشک و مرطوب را در نظر گرفتند و نشان دادند در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۴۰۰ سال‌های خشکسالی در این منطقه بوده است.

مبانی نظری پژوهش

پایش خشکسالی

عبارت است از سامانه‌ای که به وسیله آن بتوان احتمال وقوع، میزان، شدت و وسعت احتمالی تحت پوشش خشکسالی را برآورد کرد. تعیین شاخصه‌ای مناسب جهت پایش خشکسالی، یکی از اقدامات مهم و اساسی در مطالعه، ارزیابی، برنامه‌ریزی و مبارزه با خشکسالی می‌باشد (باروتی و همکاران، ۱۳۸۷). اینک به معرفی نمایه‌ها پرداخته می‌شود:

نمایه اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)

شاخص NDVI را نخستین بار تاگر در سال ۱۹۷۹ (Tucker, 1979)، به عنوان شاخصی برای سلامت پوشش گیاهی مطرح کرد.

$$NDVI = (R2 - R1) / (R2 + R1) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این معادله: R2 بازتاب در محدوده فرورسرخ نزدیک و R1 بازتاب در محدوده طول موج قرمز است. شاخص NDVI پتانسیل گیاهی، درصد پوشش سبز گیاهی، شاخص درصد نواحی برگ‌دار و انبوه‌های گیاهی را انعکاس می‌دهد. این شاخص رایج‌ترین شاخص پوشش گیاهی است. 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 تغییر می‌کند. این شاخص برای مناطق دارای پوشش گیاهی از ۰/۸ (تنک) تا ۰/۸ (مترکم) است. شایان ذکر است که معادله این شاخص در نرم‌افزار ENVI5.0 انجام شد.

نمایه شرایط پوشش گیاهی (VCI)

این نمایه توسط کوغان در سال ۱۹۹۷ (Kogan, 1997) پیشنهاد شد و براساس رابطه زیر به دست می‌آید. شاخص VCI بر حسب درصد بیان می‌شود. اگر مقدار این نمایه بین ۵۰ تا ۱۰۰ باشد، نشان دهنده شرایط مطلوب خواهد بود و هرچه به صفر نزدیک تر شود بیانگر وجود خشکسالی در منطقه می‌باشد.

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه: $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ به ترتیب مقدار کمینه و بیشینه NDVI برای یک دوره زمانی در مدت زمان طولانی است.

شاخص VCI از شاخص‌های مهم در تغییرات پوشش گیاهی محسوب می‌شود. در واقع می‌توان این نمایه را به نوعی شاخص مقیاس شده NDVI معرفی کرد. از این رو، پاسخ‌های این دو نمایه به تغییرات شرایط گیاه مشابه خواهد بود. مقادیر کم VCI برای فواصل زمانی پی‌درپی اشاره به افزایش خشکسالی دارد (تنکابیل و همکاران، ۲۰۰۴).

شاخص وضعیت دمایی (TCI)

شاخص وضعیت درجه حرارت بر اساس باند حرارتی تبدیل شده به دمای درخشندگی ارائه شده است. این شاخص برای تعیین دمای مرتبط با تنش پوشش گیاهی و همچنین تنش ناشی از رطوبت بیش از حد استفاده می شود. الگوریتم TCI مشابه به الگوریتم VCI است و بر اساس فرمول ذیل بدست می آید.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{BANDMATH} = 100 \times \left(\frac{\text{BTMAX} - \text{LST}_i}{\text{BTMAX} - \text{BTMIN}} \right)$$

در این رابطه، مقادیر BT (LST) دمای درخشایی (باند ۳۱) و i نشان دهنده سال جاری است. مقادیر بیشینه و کمینه‌ای BT از داده‌های ثبت شده دراز مدت برای هر سال به دست می آید. هنگامی که مقدار TCI به ۱۰۰ درصد میرسد BT برای این ماه برابر کمترین مقدار BT دراز مدت برای پیکسل است. مقادیر کم TCI نزدیک به صفر درصد نشان دهنده هوای بسیار گرم در سال مورد نظر است. هنگامی که TCI به صفر درصد می رسد، BT آن سال برابر بیشترین مقدار BT دراز مدت برای پیکسل است. در مجموع برای مشاهدات آب و هواشناسی، ارتباط بین حرارت سطحی و رطوبت روی زمین، تأثیرات ناحیه‌ای خشکسالی را قبل از دست دادن توده‌های گیاهی کشف می کنند. از این رو، TCI می تواند نقش مهمی در پایش خشکسالی ایفا کند.

شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)

شاخص TCI و VCI به ترتیب شرایط دمایی و رطوبتی پوشش گیاهی را نشان می دهند. شاخص TCI مکملی مناسب برای VCI به منظور پایش خشکسالی است. هنگامی که این دو شاخص با یکدیگر استفاده شوند، ابزاری برای ارزیابی میزان محصول فراهم می شود. این شاخص نیز توسط کوگان در ۲۰۰۱ بیان شد.

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{BANDMATH} = (0.5 \times \text{VCI}) + (0.5 \times \text{TCI})$$

در شاخص VHI اگر دیگر شرایط، نزدیک نرمال باشند، پوشش گیاهی در طول شکل‌گیری تاج پوشش (ظهور برگ) به رطوبت و در دوره گلدهی به دما حساسیت بیشتری دارد. از آن جایی که سهم رطوبت و دما در طی چرخه گیاهی به طور عادی نامشخص است، سهم VCI و TCI در شاخص VHI برابر در نظر گرفته می شود (Kogan, 2001).

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص استاندارد بارش (SPI) یکی از شاخص‌های اساسی در مطالعه خشکسالی به شمار می آید که محاسبه آن نیازمند داشتن میانگین و انحراف معیار درازمدت مقادیر بارندگی برای دوره‌های مورد مطالعه است (Bonaccorso, 2003). این شاخص اساساً برای تعریف و پایش خشکسالی و ترسالی ارائه شده است (Tsakiris et al., 2004) و به تحلیل‌گر امکان می دهد تا تعداد وقایع خشکسالی و ترسالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شناسایی کند. از آنجا که این شاخص بی بعد است، می توان به کمک آن اطلاعات مناطق مختلف را با هم مقایسه و نقشه‌های گستره خشکسالی را با دقت بیشتری تولید کرد (Agnew, 2000). Mckee et al. (۱۹۹۳) برای ارزیابی خشکسالی، شاخص SPI را ارائه دادند. این شاخص به علت سادگی، استفاده از داده‌های قابل دسترس و قابلیت محاسبه برای مقیاس زمانی دلخواه، مناسب‌ترین نمایه برای تحلیل خشکسالی و تحلیل مکانی آن است و امکان مطالعه وضعیت منابع آب در دوره‌های کوتاه مدت و بلندمدت را که در کشاورزی، مطالعات جریان‌های سطحی و آبخوان‌های زیرزمینی دارای اهمیت است، فراهم می کند (Wu et al., 2001).

هدف کلیدی این پژوهش ارزیابی پوشش گیاهی و دمای سطح زمین جهت تحلیل دوره خشکسالی و ترسالی در مازندران با استفاده از تصاویر ماهواره مادیس سنجنده ترآ، داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در منطقه، شاخص‌های سنجش از دوری همچون TCI، VCI، VHI و SPI به منظور آشکارسازی تغییرات رخ داده در بازه زمانی ۲۱ ساله (مادیس) و ۲۱ ساله (بارش، جهت صحت سنجی) بوده و در نهایت به تحلیل شاخص خطر، آسیب‌پذیری و خسارت خشکسالی با شاخص‌های خشکسالی پرداخته شد. همچنین در این پژوهش جهت مقایسه و اعتبار سنجی روش‌های مذکور از شاخص SPI و ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید که به خوبی می تواند برای کاربردهای مختلف سطح زمین، مورد استفاده قرار گیرد.

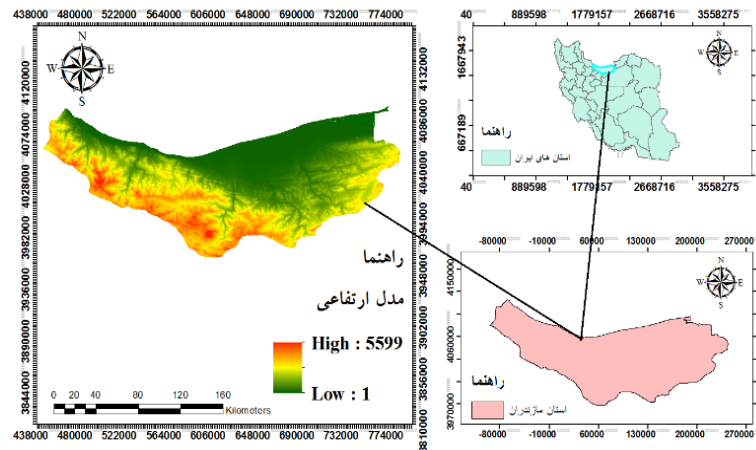
محاسبه شاخص SPI برای هر مکان، بر اساس ثبت بارش‌های بلندمدت در دوره زمانی مورد نظر پایه‌گذاری شده است. با توجه به اینکه داده‌های بارش معمولاً از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند، ابتدا داده‌های بارش با استفاده از تابع چگالی احتمال گاما برازش داده می‌شوند. سپس، از طریق روش تبدیل هم‌احتمال^۱، مقادیر احتمال تجمعی حاصل از توزیع گاما به مقادیر متناظر در توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌شوند. در نهایت، شاخص SPI به صورت نهایی بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (McKee et al., 1993):

$$SPI = (P_i - \bar{P}) / S \quad \text{رابطه (5)}$$

که در آن P_i : مقدار بارش در دوره مورد نظر؛ \bar{P} : میانگین درازمدت بارش برای دوره مورد نظر و S : انحراف معیار مقدار بارش می‌باشد. برای محاسبه این نمایه، از توزیع گاما برای برازش داده‌های بارش استفاده می‌شود.

معرفی محدوده مورد مطالعه

استان مازندران بین ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. این استان در قسمت شمال مرکزی کشور واقع و از شمال به دریای مازندران، از جنوب به استان‌های تهران و سمنان، از باختر و جنوب باختری به گیلان و قزوین و از خاور به استان گلستان محدود است. استان مازندران با مساحت ۲۳۷۶۵ کیلومترمربع وسعت، ۱/۴۶ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است (شکل ۱).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

در مطالعه حاضر پس از بررسی آمار و اطلاعات ایستگاه بارانسنجی و سینوپتیک دریافتی از سازمان هواشناسی کشور از آمار بارندگی ۱۷ ایستگاه طی دوره آماری مشترک ۲۱ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) استفاده شده است. تصاویر MOD13Q1 با تفکیک مکانی ۲۵۰ کیلومتر سنجنش شاخص پوشش گیاهی در دسترس است. این داده‌ها برای فصل رشد آوریل تا ژوئن محاسبه شدند. MOD11A2 تصاویر درجه حرارت هشت روزه ارائه می‌دهند، از این رو ابتدا به داده‌های ماهانه تبدیل می‌شوند (Kogan, 1993). داده‌های بارندگی TRMM از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ که به صورت روزانه و ماهانه بوده و با وضوح فضایی ۰/۲۵×۰/۲۵ و ۲/۵×۲/۵ کیلومترمربع مورد استفاده قرار گرفت.

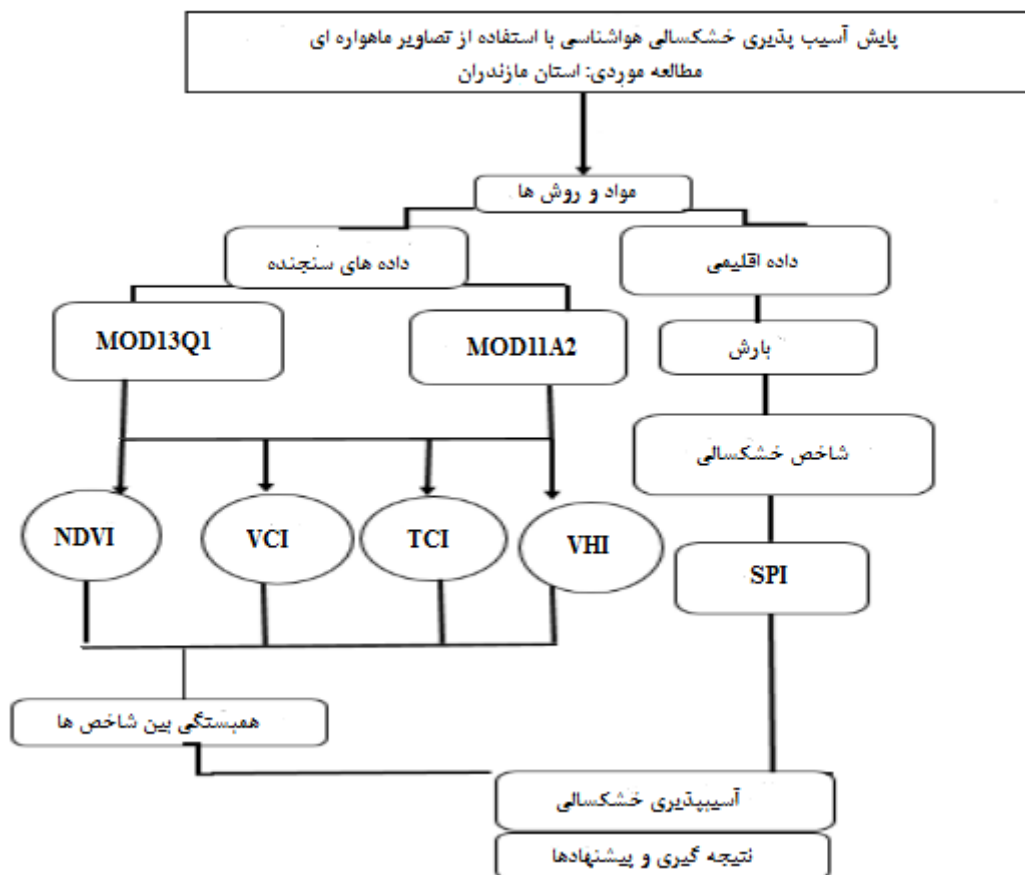
پس از تعیین دوره آماری مشترک، داده‌های هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نواقص آماری با استفاده از روش نسبت‌ها بازسازی گردید. سپس از شاخص (SPI) به منظور تعیین وضعیت خشکسالی استان با استفاده از نرم‌افزار DIP استفاده و نقشه پهنه‌های تحت تأثیر خشکسالی با استفاده از روش درون‌یابی (IDW) در ArcGIS تهیه گردید. روش IDW یکی از روش‌های رایج درونیابی است، فرایند استفاده از مقادیر معلوم برای مشخص سازی مقادیر

^۱ . Probability Integral Transform

شکل ۲. موقعیت ایستگاهها

جدول ۱. مشخصات ایستگاههای مورد مطالعه استان مازندران

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
سفید چاه	۳۶° ۰۰' ۰۰"	۵۳° ۹۱' ۶۶"
بابلسر	۳۶° ۰۸' ۳۳"	۵۲° ۰۶' ۳۳"
پلور	۳۵° ۰۵' ۰۰"	۵۲° ۰۵' ۰۰"
رزن	۳۶° ۰۲' ۰۰"	۵۲° ۱۸' ۳۳"
علوی کلا	۳۶° ۰۵' ۶۶"	۵۱° ۰۸' ۳۳"
کلاردشت	۳۶° ۰۴' ۳۳"	۵۱° ۱۳' ۳۳"
کلارآباد	۳۶° ۰۷' ۰۰"	۵۱° ۰۲' ۶۶"
کلایبن	۳۶° ۰۷' ۶۶"	۵۰° ۰۷' ۶۶"
الوند دو آب	۳۶° ۰۱' ۶۶"	۵۳° ۰۶' ۶۶"
قائم شهر	۳۶° ۰۴' ۳۳"	۵۲° ۰۸' ۳۳"
هلوسر	۳۶° ۰۴' ۰۰"	۵۲° ۰۳' ۰۰"
سعدآباد مرزن	۳۶° ۰۴' ۰۰"	۵۱° ۰۳' ۳۳"
خرم آباد تنکاب	۳۶° ۰۷' ۳۳"	۵۰° ۰۹' ۰۰"
نالارسر	۳۶° ۰۵' ۰۰"	۵۰° ۰۷' ۳۳"
طاهرآبادسفاری	۳۶° ۰۶' ۶۶"	۵۳° ۰۲' ۰۰"
علی کندی	۳۶° ۰۷' ۰۰"	۵۳° ۰۶' ۶۶"
کندوان شمالی	۳۶° ۰۶' ۶۶"	۵۱° ۰۳' ۶۶"



شکل ۳. نمودار مراحل تحقیق

پس از انجام محاسبه‌های لازم و تعیین پارامترهای مربوط به نمایه SPI انجام می‌گیرد. در جدول ۲، رتبه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های VHI، VCI، TCI و SPI نشان داده شده است.

جدول ۲. طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دوری

SPI	VHI	TCI	VCI	شدت خشکسالی
< -۲	< ۱۰	< ۱۰	< ۱۰	خشکسالی حاد
-۲ تا -۱/۵	۱۰ - ۱۹/۵	۱۰ - ۱۹/۵	۱۰ - ۱۹/۵	خشکسالی شدید
-۱ تا -۱/۵	۲۰ - ۲۹/۵	۲۰ - ۲۹/۵	۲۰ - ۲۹/۵	خشکسالی متوسط
۱ تا ۱	۳۰ - ۳۹/۹	۳۰ - ۳۹/۹	۳۰ - ۳۹/۹	نرمال
۱/۵ تا ۱	۴۰ - ۴۹/۵	۴۰ - ۴۹/۵	۴۰ - ۴۹/۵	ترسالی متوسط
۱/۵ تا ۲	۵۰ - ۵۹/۵	۵۰ - ۵۹/۵	۵۰ - ۵۹/۵	ترسالی شدید
> ۲	> ۶۰	> ۶۰	> ۶۰	ترسالی حاد

تعیین شاخص خطر خشکسالی (DHI)

خطر خشکسالی حاصل ضرب ویژگی‌های خشکسالی (شامل فراوانی و بزرگی) است. منطقه آسیب‌پذیر خشکسالی بر اساس درصد احتمال وقوع خشکسالی از طریق نسبت وقوع در گام زمانی به کل وقوع محاسبه می‌شود. برای هر یک از وضعیت‌های خشکسالی متوسط، شدید و حاد، براساس جداول استاندارد خطرپذیری خشکسالی به صورت درصد روش McKee و همکاران (1993) و همچنین استفاده از منابع جدید علمی معتبر اوزان و درجات استخراج شد. در مرحله بعد شاخص خطر خشکسالی با استفاده از (جداول ۳ و ۴) و رابطه (۶) برای مقیاس‌های زمانی سالانه محاسبه شد. در انتها پهنه‌های خطر خشکسالی برای منطقه مورد مطالعه در محیط GIS انجام شد.

$$\text{رابطه (۶)} \quad DHI = (MDr \times MDw) + (SDr \times SDw) + (VSDr \times VSDw)$$

که در آن DHI شاخص خطر خشکسالی، MDr درجه مربوط به حالت خشکسالی متوسط، MDw وزن مربوط به حالت خشکسالی متوسط، SDr درجه مربوط به حالت خشکسالی شدید، SDw وزن مربوط به حالت خشکسالی شدید، VSDr درجه مربوط به حالت خشکسالی حاد، VSDw وزن مربوط به حالت خشکسالی حاد.

جدول ۳. وزن‌ها و درجات مربوط به نقشه‌های شدت خشکسالی (McKee et al., 1993)

درجه	فراوانی وقوع	وزن	وضعیت خشکسالی
۱	< ۳		خشکسالی متوسط
۲	۳-۵	۱	
۳	۵-۸		
۴	۸-۱۲		
۵	> ۱۲		
۱	< ۳	۲	خشکسالی شدید
۲	۳-۴		
۳	۴-۵		
۴	۵-۶		
۵	> ۶		

۱	<۱	۳	خشکسالی خیلی شدید
۲	۳-۱		
۳	۳-۲		
۴	۴-۳		
۵	>۴		

جدول ۴. کلاس‌بندی شاخص خطر خشکسالی برای تعیین خطر خشکسالی (Wilhite & Vanyarkho, 2000)

کلاس	DHI مقدار
بدون خطر	<۱۰
خطر کم	۱۵-۱۰
خطر متوسط	۲۰-۱۵
خطر زیاد	۲۵-۲۰
خطر خیلی زیاد	>۲۵

آسیب‌پذیری خشکسالی

از نظر مکانیسم بلایای طبیعی، شرایط زیر برای تشکیل بلایا ضروری است: اول عوامل ایجادکننده بلایا مانند خشکسالی ناشی از کمبود باران در درازمدت و دوم آسیب‌پذیری از بلا که متشکل از محیط شکل‌دهنده فاجعه یا حاصل بلایا است. عوامل محیطی منجر به آسیب‌پذیری از بلایای طبیعی شامل توپوگرافی، توزیع آب، پوشش گیاهی، و دیگر عوامل است که می‌تواند عامل اصلی افزایش یا کاهش مخاطره باشد. بدین ترتیب محیط عامل مهمی در تعیین آسیب‌پذیری است. عوامل دیگر شامل جمعیت، عوامل اقتصادی و سایر می‌توانند به عوامل محیطی وابسته باشند. همچنین توزیع مکانی مناطق مستعد فاجعه، آسیب‌پذیری ساختارهای متأثر از خشکسالی را تعیین می‌کند (Shahid & Behrawan, 2008). آسیب‌پذیری پاسخی پویا به تغییرات در ویژگی‌های اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی منطقه است (Wilhite & Vanyarkho, 2000). برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری (DVI) به هر کلاس از عوامل مورد استفاده با توجه به مقادیرشان یک رتبه در مقیاس ۴ - ۱ اختصاص داده شد و DVI براساس (رابطه ۷) محاسبه شد.

$$DVI = (Rrn + AO + FPn + TAL)/5 \quad \text{رابطه (۷)}$$

جهت شیب و بارش می‌باشند. در مرحله بعد DVI به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شود؛ آسیب‌پذیری کم ($0 < DVI < 0.25$) متوسط ($0.25 < DVI < 0.50$)، زیاد ($0.50 < DVI < 0.75$) و بسیار زیاد ($0.75 < DVI < 1$) (Dabanli, 2018).

لایه تراکم جمعیت از آمارنامه سال ۱۳۹۵ و تراکم آب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی از طرح آمایش استان مازندران تهیه شدند (آمارنامه جمعیت استان مازندران، ۱۳۹۵؛ آمایش استان مازندران، ۱۳۹۷). نقشه شیب و جهت شیب از Dem ۳۰ متر استان مازندران تهیه شد. در این پژوهش از روش ترکیب خطی - وزنی که رایج‌ترین در تحلیل ارزیابی چند معیاره است استفاده شد. این روش بر مبنای میانگین وزنی استوار است. همچنین از روش فازی برای استانداردسازی شاخص‌ها استفاده شد. در این روش همه مقادیر و ارزش‌های لایه‌های نقشه‌ای به دامنه بین صفر و یک تبدیل شد. در نهایت به منظور وزندهی از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده گردید. در نهایت پس از وزندهی به معیارهای آسیب‌پذیری مطابق (رابطه ۸) در رابطه زیر X_{ij} مقدار i آمین آلترناتیو با j آمین خصیصه و W_j یک وزن استاندارد شده و مجموع وزنها برابر یک باید باشد.

$$A_i = \{jW_jX_{ij}\} \quad \text{رابطه (۸)}$$

فرمول ترکیب خطی وزنی است هر یک از نقشه‌های استاندارد شده در وزن مربوطه ضرب و در نهایت عملیات اجتماع بین لایه‌ها به دست آمده انجام می‌گیرد که نقشه نهایی همان نقشه DVI یا آسیب‌پذیری است.

محاسبه شاخص ریسک یا خسارت خشکسالی (DRI)

میزان احتمال ریسک خشکسالی نتیجه تعامل بین خطر و آسیب پذیری خشکسالی است. از سوی دیگر، ریسک نه تنها با توجه به میزان در معرض بودن و شدت فیزیکی مخاطره طبیعی، بلکه با آسیب پذیری جامعه در یک لحظه معین در زمان مشخص می شود. به منظور محاسبه شاخص ریسک خشکسالی از (رابطه ۹) استفاده شد:

$$DRI = DHI \times DVI \quad \text{رابطه (۹)}$$

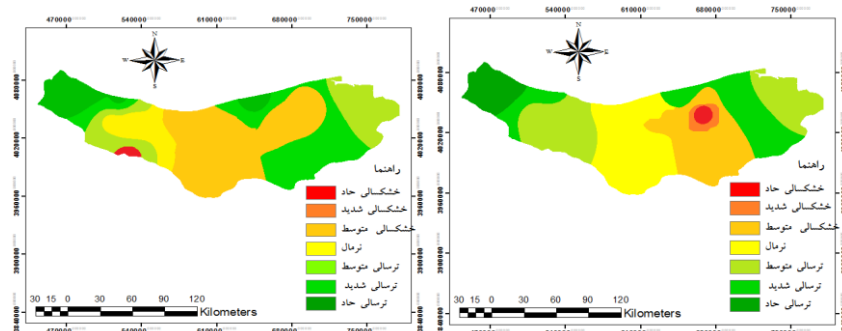
که در آن، DRI شاخص ریسک یا خسارت، DHI شاخص خطر و DVI شاخص آسیب پذیری خشکسالی است که بر این اساس نقشه ریسک خشکسالی به دست آمد. لازم به ذکر است برای نقشه به دست آمده طبقه بندی براساس نقاط شکست به چهار کلاس ریسک کم، متوسط، بالا و خیلی بالا تقسیم بندی شد.

بحث و یافته های پژوهش

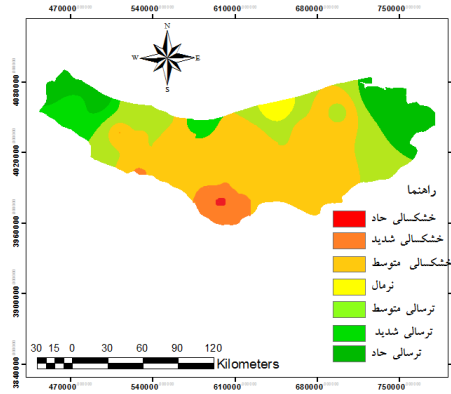
پهنه بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI به صورت ماهانه

خشکسالی مخرب ترین پدیده اقلیمی است که در تمام نواحی اقلیمی اعم از مناطق خشک و نیمه خشک و مناطق نیمه مرطوب پدید می آید. استان مازندران به دلیل شرایط اقلیمی مرطوب که دارد، هر ساله تحت تاثیر این پدیده طبیعی و پیچیده قرار می گیرد. بر این اساس شدت بارندگی منطقه مورد مطالعه در سال های مطالعاتی (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و ماه های فروردین، اردیبهشت و خرداد مورد ارزیابی واقع شد. بررسی های به عمل آمده در خشکسالی های رخ داده در ۱۷ ایستگاه هواشناسی در طول دوره آماری مورد مطالعه بیانگر موارد زیر است:

نتایج ارائه شده توسط شاخص SPI بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در اردیبهشت و خرداد ماه می باشد. به طوری که میانگین شاخص SPI در این ماه ها، ۱/۷۳- و ۲/۳۴- است. بر این اساس بخش های وسیعی از استان مازندران با شدت های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده اند. همچنین بر پایه این شاخص، ماه فروردین به عنوان مرطوب ترین ماه منطقه محسوب می شود. در این ماه میانگین شاخص SPI، ۲/۰۵ می باشد. با توجه به جدول شاخص SPI از بارندگی ماهانه در تمامی ایستگاه های استان مازندران نشان می دهد که در سه ماه (آوریل، می و ژوئن) سال ۲۰۰۰ ترسالی وجود داشته است و در سال ۲۰۰۱ خشکسالی ملایم و متوسط اتفاق افتاده است اما از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۰۶ در سه ماه (آوریل، می، ژوئن) شاهد طبقات مختلف ترسالی بوده است. اما در سال های ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ خشکسالی ملایم و متوسط در استان مازندران در سه ماه آوریل، می و ژوئن که معادل ماه های شمسی فروردین، اردیبهشت و خرداد بوده ادامه داشته است. آوریل و می سال ۲۰۱۸ خشکسالی ملایم و ژوئن ۲۰۱۸ ترسالی ملایم و ماه آوریل و می سال ۲۰۱۹ ترسالی ملایم و ژوئن ۲۰۱۹ خشکسالی ملایم و سه ماه آوریل، می و ژوئن ۲۰۲۰ ترسالی ملایم را تجربه کرده اند. اشکال ۴، ۵ و ۶ وضعیت ترسالی و خشکسالی سه ماه در ۲۱ سال اتفاق افتاده را نشان می دهد.



شکل ۴. وضعیت خشکسالی براساس شاخص SPI در ماه آوریل. شکل ۵. وضعیت خشکسالی براساس شاخص SPI در ماه می



شکل ۶. وضعیت خشکسالی براساس شاخص SPI در ماه ژوئن

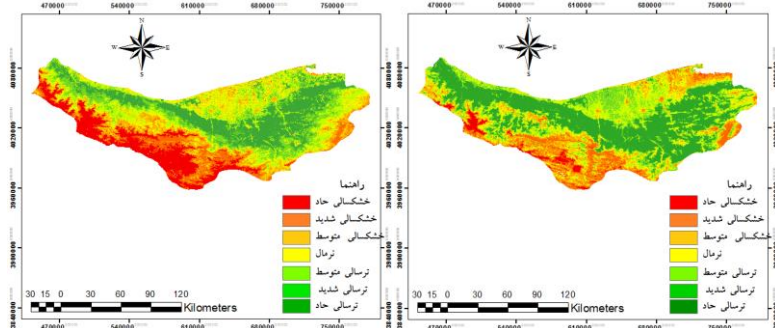
میزان خشکسالی به صورت ماهانه در ماه‌های (آوریل، می و ژوئن) نشان می‌دهد، که در ماه آوریل بیشترین ترسالی را داشته و این ترسالی مربوط به بخش‌های شمال غربی استان می‌باشد و در جنوب استان خشکسالی تداوم بیشتری در هر سه ماه رویش گیاه داشته است.

نتایج حاصل از شاخص‌های خشکسالی سنجش از دوری VCI، TCI و VHI (ماهانه)

پهنه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص‌های سنجش از دور به صورت ماهانه

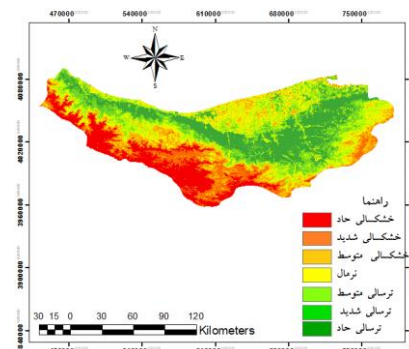
در این مرحله شاخص‌های VCI، TCI و VHI را برای پوشش گیاهی استان مازندران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس جهت پایش خشکسالی این استان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل‌های طبقه‌بندی شاخص‌های مذکور به هفت طبقه خشکسالی حاد، خشکسالی شدید، خشکسالی متوسط، نرمال، ترسالی متوسط، ترسالی شدید و ترسالی حاد صورت گرفته است. همچنین قابل ذکر است که فصل رشد در مناطق نیمه خشک و مرطوب بیشتر در دوره زمانی ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد قرار دارد، براین اساس در این تحقیق تصاویر ماهواره‌ای ماه‌های مذکور از دوره آماری سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰ مورد بررسی قرار دادیم.

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VCI بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در خرداد ماه می‌باشد. به طوری که میانگین شاخص مذکور در این ماه، ۲۶/۱۳ بوده است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده اند، سپس در نواحی شمال غربی استان از شدت خشکسالی آنها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود. همچنین بر پایه این شاخص، ماه فروردین به عنوان مرطوب‌ترین ماه منطقه محسوب می‌شود. در این ماه میانگین شاخص VCI، ۶۹/۲۵ می‌باشد. بخش‌هایی از پهنه‌های شمال غربی، شرقی و میانه استان از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند (شکل‌های ۷، ۸ و ۹).



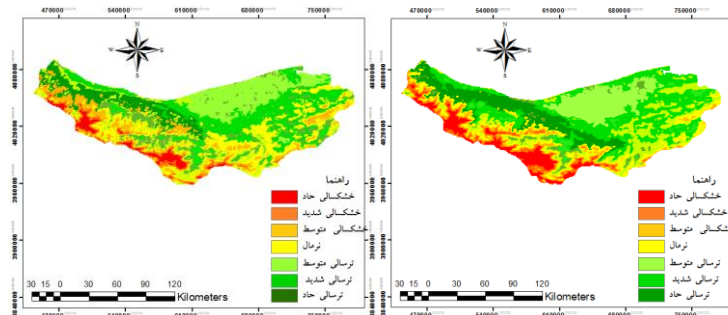
شکل ۷. شاخص VCI در آوریل استان مازندران

شکل ۸. شاخص VCI در می استان مازندران

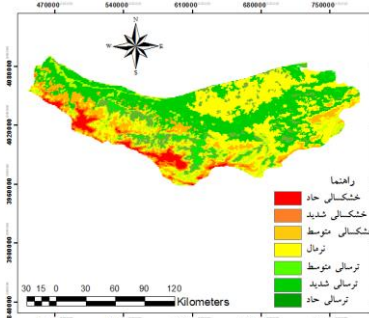


شکل ۹. شاخص VCI در ژوئن استان مازندران

نتایج ارائه شده توسط شاخص TCI، ماه خرداد بیانگر رخداد خشکسالی شدید در استان مورد مطالعه می‌باشد. به طوری که میانگین شاخص مذکور در این ماه، ۳۸/۲۳ است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی شمالی و میانی استان مازندران از شدت خشکسالی نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود. همچنین بر پایه این شاخص، ماه فروردین به عنوان مرطوب‌ترین ماه منطقه محسوب می‌شود. در این ماه میانگین شاخص TCI، ۵۴/۱۵ می‌باشد. بخش‌های وسیعی از استان مازندران از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

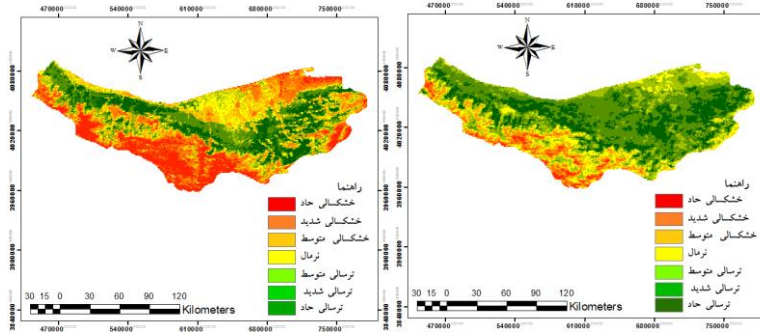


شکل ۱۰. شاخص TCI در آوریل استان مازندران
شکل ۱۱. شاخص TCI در می استان مازندران

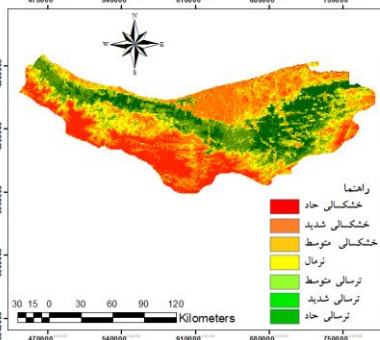


شکل ۱۲. شاخص TCI در ژوئن استان مازندران

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VHI، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در خرداد ماه می‌باشد. به طوری که میانگین این شاخص در این ماه، ۳۷/۲۱ است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در قسمت‌های شمالی از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود. همچنین بر پایه شاخص مذکور، ماه فروردین به عنوان مرطوب‌ترین ماه استان مورد مطالعه محسوب می‌شود. در این ماه میانگین شاخص VHI، ۶۷/۵۶ می‌باشد. بخش‌های وسیعی از استان مازندران از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند (شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵).



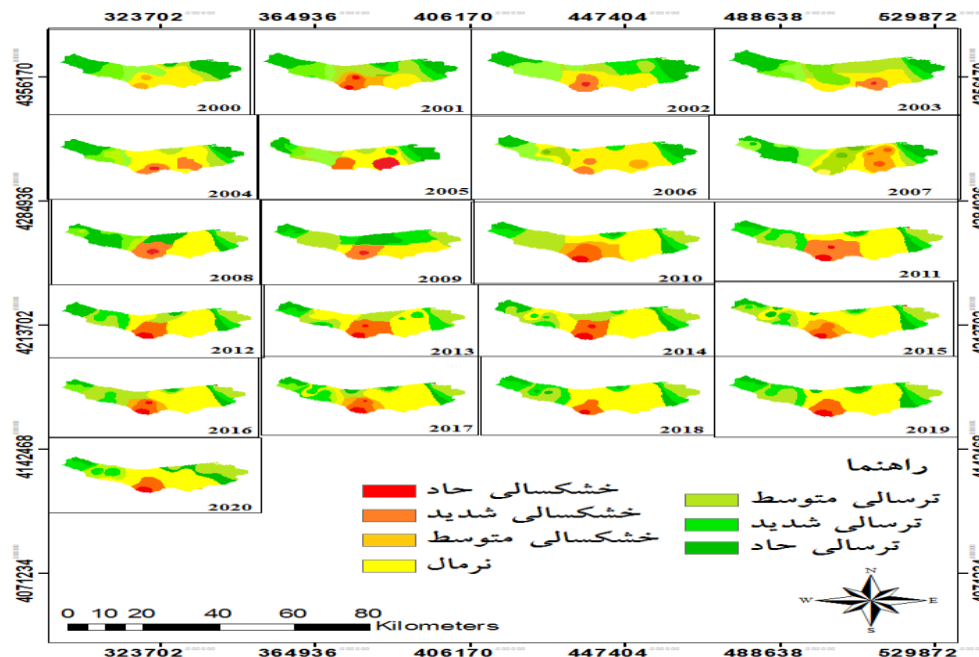
شکل ۱۳. شاخص VHI در آوریل استان مازندران شکل ۱۴. شاخص VHI در می استان مازندران



شکل ۱۵. شاخص HVI در ژوئن استان مازندران

پهنه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI به صورت سالانه

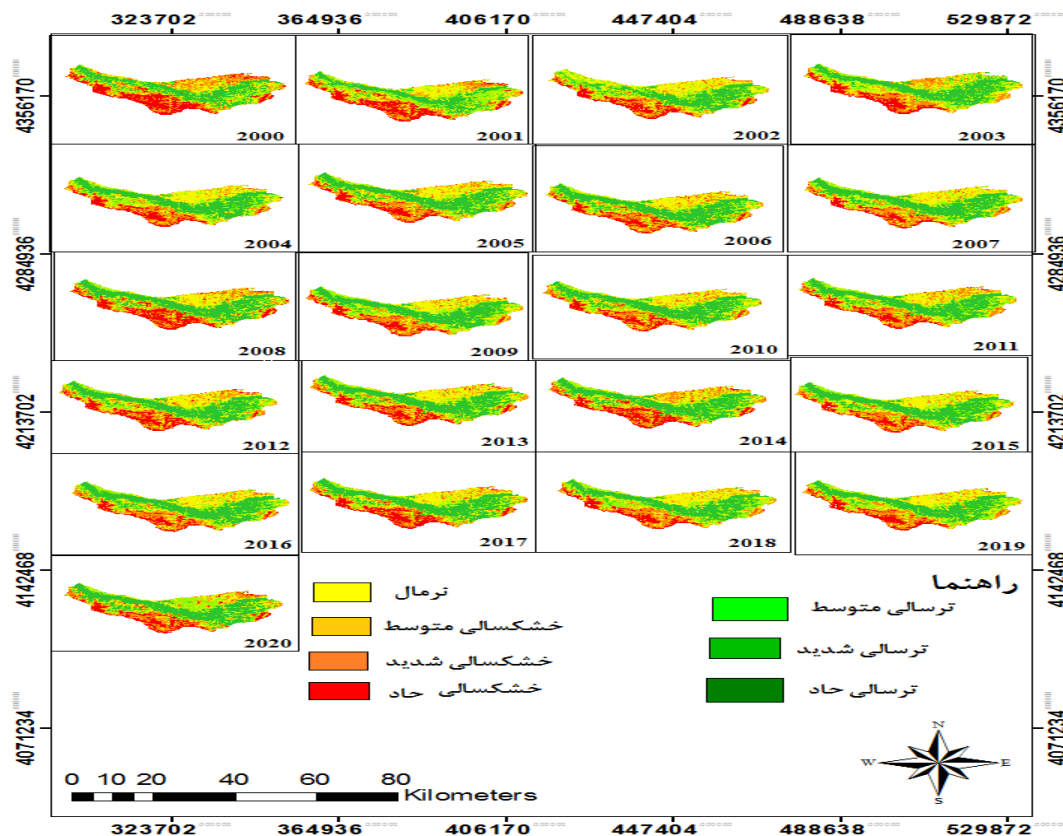
نتایج ارائه شده توسط شاخص SPI بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۱۶ می باشد. به طوری که میانگین شاخص SPI در این سال، ۲/۱۶- است. بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده اند، همچنین بر پایه این شاخص، سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ به عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. در این سال میانگین شاخص SPI، ۲/۵۳ و ۲/۵۸ می باشد (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. نقشه وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص SPI

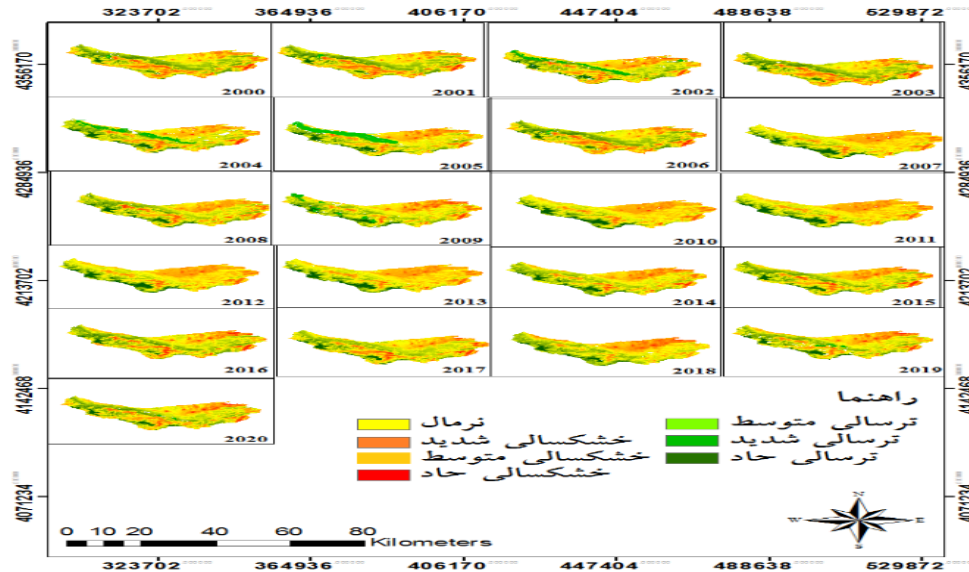
نتایج حاصل از شاخص‌های خشکسالی سنجش از دوری VCI، TCI و VHI (سالانه)

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VCI، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۱۵ به مقدار ۲۸/۳۳ می‌باشد. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده است، سپس در نواحی شمالی و میانی از شدت خشکسالی نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود. همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۰۳ به مقدار ۸۷/۰۹ به عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. بخش‌هایی از پهنه‌های شمال غربی، میانی و شرق از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند (شکل ۱۷).



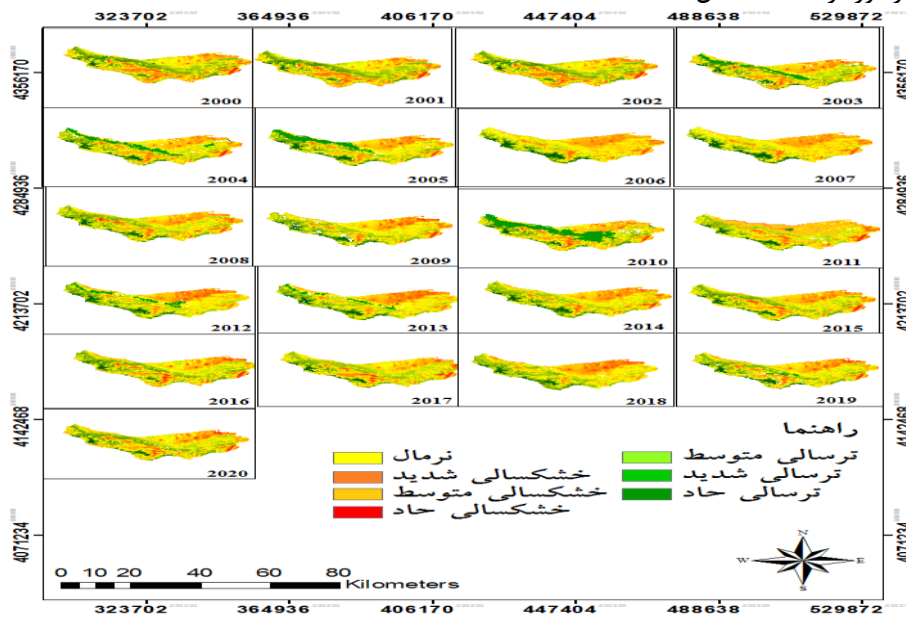
شکل ۱۷. نقشه وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص VCI

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص TCI، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۰۷ می‌باشد. به طوری که میانگین شاخص مذکور در این سال، ۱۶/۵۴ است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده اند، سپس در نواحی جنوبی از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود. همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۰۳ به عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. در این سال میانگین شاخص TCI، ۸۰/۴۳ می‌باشد. بخش‌هایی از پهنه‌های شمالی، میانی و شرق از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند (شکل ۱۸).



شکل ۱۸. نقشه وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص TCI

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VHI بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۱۳ می‌باشد. به طوری که میانگین شاخص مذکور در این سال، ۲۲/۵۳ است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان مازندران با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی شمالی از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود. همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۱۰ به عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. در این سال میانگین شاخص VHI، ۸۱/۰۴ می‌باشد. بر اساس بخش‌هایی از پهنه‌های شمال، شرق و میانه از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند (شکل ۱۹).



شکل ۱۹. نقشه وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص VHI

نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص SPI و شاخص‌های خشکسالی سنجش از دوری در ادامه برای اطمینان از نتایج حاصل از شاخص‌های ماهواره‌ای، ضرایب همبستگی پیرسون و خطای شاخص‌ها بین نمایه‌های VCI، TCI و VHI و نمایه هواشناسی SPI در حالت میانگین دوره‌ای (آوریل، می، ژوئن) و همچنین همبستگی میان شاخص‌های ماهواره‌ای، برای ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه شد. در جدول ۵، ضرایب همبستگی پیرسون میان شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی آورده شده است.

با توجه به مقادیر جدول ۵، ضریب همبستگی در ماه فروردین بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۵۳ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، بین شاخص‌های SPI، VCI و SPI، VHI به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۷۶ که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است. بنابراین شاخص VHI و VCI همبستگی بیشتری را با بارش فروردین ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص TCI داشته است. ضریب همبستگی در ماه اردیبهشت بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۵۸ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، بین شاخص‌های SPI و VCI برابر با ۰/۷۷ که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است. همچنین SPI و VHI برابر با ۰/۷۴ که نشان دهنده همبستگی مثبت معنادار زیاد می‌باشد. بنابراین شاخص VCI همبستگی بیشتری را با بارش اردیبهشت ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص VHI و TCI داشته است. ضریب همبستگی در ماه خرداد بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۶۳ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، شاخص‌های SPI و VHI برابر با ۰/۷۶ که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است و بین شاخص‌های SPI و VCI برابر با ۰/۸۸ که نشان دهنده همبستگی مثبت معنادار زیاد می‌باشد. بنابراین شاخص VCI همبستگی بیشتری را با بارش خرداد ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص VHI و TCI داشته است بنابراین در مجموع، شاخص VCI همبستگی بیشتری با شاخص SPI هر چهار ماه داشته است.

جدول ۵. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص SPI ماهانه و شاخص‌های ماهواره‌ای

ماه	شاخص	VCI	TCI	VHI
فروردین	SPI	۰/۹۱	۰/۵۳	۰/۶۶
اردیبهشت	SPI	۰/۷۷	۰/۵۸	۰/۷۴
خرداد	SPI	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۷۶

با توجه به مقادیر جدول ۶، ضریب همبستگی سالانه بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۵۴ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، بین شاخص‌های SPI، VCI و SPI، VHI به ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۸۲ که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است. بنابراین شاخص VHI و VCI همبستگی بیشتری را با بارش سالانه منطقه مورد مطالعه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص TCI داشته است. هم‌راستا با ضریب همبستگی پیرسون، VHI و VCI نیز خطای کمتری نسبت به روش TCI داشته است (جدول ۷).

جدول ۶. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص SPI سالانه و شاخص‌های ماهواره‌ای

ماه	شاخص	VCI	TCI	VHI
سالانه	SPI	۰/۸۸	۰/۵۴	۰/۸۲

جدول ۷. میزان خطای شاخص SPI سالانه و شاخص‌های ماهواره‌ای

خطا	شاخص	VCI	TCI	VHI
MAD	SPI	۰/۰۰۵	۰/۵۱	۰/۰۲۱
RMSE	SPI	۰/۰۳۲	۱/۲۱	۰/۰۱۵

تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی به صورت سالانه

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۸، بر اساس شاخص هواشناسی SPI، بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ در سال ۲۰۱۶ بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱۵ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه ۲ به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید و ۳۱ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال ۲۰۱۳ اشغال کرده است. سال ۲۰۰۵ نیز کلاس ۳ به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۲۷ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۱۳ طبقه نرمال به مقدار ۳۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول ۸ که میزان درصد مساحت شاخص هواشناسی

SPI را در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۱۵ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره آماری برای سال ۲۰۰۸ به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به سال ۲۰۱۸ می‌باشد که این سال به مقدار ۱۹ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ نیز کلاس ۵ که به عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۲۰ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

با توجه نتایج به دست آمده از جدول ۸، بر اساس شاخص ماهواره ای VCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ در سال ۲۰۰۴ بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۲۱ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه ۲ به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۹ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال ۲۰۱۹ اشغال کرده است. سال ۲۰۱۹ نیز طبقه ۳ به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۲۵ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۱۲ طبقه نرمال به مقدار ۲۹ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول ۸ که میزان درصد مساحت شاخص ماهواره ای VCI را در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۲۲ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره آماری برای سال ۲۰۰۳ به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به سال ۲۰۰۰ می‌باشد که این سال به مقدار ۲۳ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۹ نیز کلاس ۵ که به عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۲۵ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

با توجه نتایج به دست آمده از جدول ۸، بر اساس شاخص ماهواره ای TCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ در سال ۲۰۰۵ بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۲۷ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه ۲ به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۴ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹ اشغال کرده است. سال ۲۰۰۶ نیز طبقه ۳ به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۳۱ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۱۳ طبقه نرمال به مقدار ۳۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول ۸ که میزان درصد مساحت شاخص ماهواره ای TCI را در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۲۸ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره آماری برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ می‌باشد که این سال به مقدار ۹ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۷ نیز کلاس ۵ که به عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۳۱ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

با توجه نتایج به دست آمده از جدول ۸، بر اساس شاخص ماهواره‌ای VHI، بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ در سال ۲۰۱۱ بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۲۰ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه ۲ به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۹ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال ۲۰۱۸ اشغال کرده است. سال ۲۰۲۰ نیز طبقه ۳ به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۲۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ طبقه نرمال به مقدار ۲۳ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول ۸ که میزان درصد مساحت شاخص ماهواره‌ای VHI را در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۲۷ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره آماری برای سال ۲۰۱۹ به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور، بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به سال ۲۰۱۰ می‌باشد که این سال به مقدار ۲۴ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۲ نیز کلاس ۵ که به عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۲۴ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

جدول ۸. درصد مساحت طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص های خشکسالی (سالانه)

شاخص	سال	خشکسالی حاد	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	نرمال	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی حاد
SPI	۲۰۰۰	۸	۱۲	۱۱	۲۶	۱۵	۱۱	۱۵
	۲۰۰۱	۱۰	۱۸	۱۷	۲۱	۱۱	۹	۱۲
	۲۰۰۲	۷	۶	۲۴	۳۱	۱۲	۸	۱۶
	۲۰۰۳	۷	۹	۱۸	۲۶	۱۶	۹	۱۴
	۲۰۰۴	۷	۱۲	۱۶	۲۰	۱۹	۱۱	۱۳
	۲۰۰۵	۵	۱۸	۲۷	۲۴	۱۲	۸	۴
	۲۰۰۶	۱۵	۱۹	۱۴	۳۲	۱۰	۳	۶
	۲۰۰۷	۱۴	۲۰	۱۵	۳۱	۱۱	۲	۷
	۲۰۰۸	۱۱	۹	۱۹	۲۰	۱۲	۱۳	۱۵
	۲۰۰۹	۷	۲۴	۱۷	۲۷	۱۲	۹	۱۶
	۲۰۱۰	۱۱	۱۵	۲۹	۲۸	۲۰	۱۴	۱۳
	۲۰۱۱	۹	۱۴	۲۴	۲۱	۲۰	۷	۴
	۲۰۱۲	۱۰	۲۱	۲۰	۲۲	۱۶	۵	۴
	۲۰۱۳	۱۲	۳۱	۱۰	۳۶	۶	۳	۲
	۲۰۱۴	۹	۱۲	۱۶	۱۹	۱۸	۱۶	۶
	۲۰۱۵	۸	۱۱	۱۷	۲۴	۲۰	۱۳	۴
	۲۰۱۶	۹	۱۳	۱۵	۲۲	۱۸	۱۴	۵
	۲۰۱۷	۹	۱۲	۱۶	۱۹	۱۹	۱۲	۱۰
	۲۰۱۸	۸	۱۲	۲۳	۲۵	۷	۱۹	۲
	۲۰۱۹	۱۲	۱۵	۲۴	۲۷	۱۳	۸	۶
۲۰۲۰	۱۸	۱۹	۱۳	۲۶	۸	۷	۴	
VCI	۲۰۰۰	۲۰	۲۶	۱۱	۱۰	۲۰	۲۳	۲
	۲۰۰۱	۱۳	۴	۲۴	۱۲	۱۸	۱۶	۱۳
	۲۰۰۲	۲	۴	۲۰	۲۲	۲۳	۲	۱۳
	۲۰۰۳	۱	۱۵	۲۱	۱۳	۱	۲۰	۲۲
	۲۰۰۴	۲۱	۱۹	۱۱	۲۱	۱۷	۷	۲
	۲۰۰۵	۱۱	۲۴	۱۳	۱۲	۱۶	۱۸	۵
	۲۰۰۶	۱	۲۰	۲۴	۱۴	۲۲	۲	۱
	۲۰۰۷	۲	۲۳	۲۲	۱۳	۱۰	۱۱	۲
	۲۰۰۸	۵	۱۴	۲۱	۲۰	۱۷	۱۶	۶
	۲۰۰۹	۹	۱۷	۱۳	۲۳	۲۵	۹	۳
	۲۰۱۰	۱۴	۲۵	۲۰	۲۱	۱۸	۱	۹
	۲۰۱۱	۱۹	۱۰	۲۱	۱۳	۱۰	۱۳	۶
	۲۰۱۲	۹	۱۸	۱۷	۲۹	۱۳	۱۰	۷
	۲۰۱۳	۹	۲۰	۱۴	۲۱	۱۴	۶	۱۴
	۲۰۱۴	۵	۲۶	۱۸	۱۳	۱۴	۶	۱۳
	۲۰۱۵	۱۷	۱۹	۱۴	۲۰	۱۶	۷	۱۰
	۲۰۱۶	۱۹	۱۰	۱۵	۲۰	۱۳	۱۶	۱۲
	۲۰۱۷	۵	۱۰	۲۲	۲۳	۲۱	۱۲	۵
	۲۰۱۸	۱۹	۲۱	۲۰	۱۹	۱۷	۱۴	۲
	۲۰۱۹	۱۰	۲۹	۲۵	۱۵	۵	۱۲	۱۰
۲۰۲۰	۱۷	۱۹	۱۴	۵	۲۲	۶	۱۷	

۱۱	۱۰	۹	۱۳	۱۴	۱۹	۲۴	۲۰۰۰	TCI	
۱۰	۷	۸	۱۲	۱۵	۲۰	۲۸	۲۰۰۱		
۱۱	۹	۸	۱۲	۱۵	۲۳	۲۵	۲۰۰۲		
۱۶	۲	۴	۲۱	۱۳	۱۹	۲۵	۲۰۰۳		
۲۴	۱	۲۵	۱۰	۳	۵	۲۴	۲۰۰۴		
۲۳	۴	۲۵	۱۰	۴	۷	۲۷	۲۰۰۵		
۲۵	۴	۲۳	۱۱	۴	۷	۲۸	۲۰۰۶		
۱۲	۳	۳۱	۱۴	۶	۴	۳۰	۲۰۰۷		
۲۵	۳	۲۵	۶	۴	۱۰	۲۷	۲۰۰۸		
۲۴	۳	۲۵	۷	۴	۱۰	۲۷	۲۰۰۹		
۲۴	۳	۲۴	۹	۴	۹	۲۷	۲۰۱۰		
۲۲	۳	۲۳	۹	۵	۱۲	۲۶	۲۰۱۱		
۲۳	۳	۲۵	۸	۴	۱۰	۲۷	۲۰۱۲		
۲۵	۳	۲۶	۷	۴	۱۰	۲۷	۲۰۱۳		
۲۲	۳	۲۶	۱۱	۵	۹	۲۸	۲۰۱۴		
۲۳	۸	۲۵	۱۰	۵	۸	۲۸	۲۰۱۵		
۲۶	۹	۲۵	۷	۵	۸	۲۷	۲۰۱۶		
۲۸	۹	۲۴	۸	۵	۱۰	۲۷	۲۰۱۷		
۲۰	۳	۲۳	۶	۵	۷	۲۵	۲۰۱۸		
۲۸	۳	۲۴	۸	۴	۸	۲۴	۲۰۱۹		
۲۲	۳	۲۴	۸	۵	۷	۲۷	۲۰۲۰		
۱۱	۹	۱۰	۲۳	۱۷	۱۹	۱۰	۲۰۰۰		VHI
۱۶	۱۴	۱۵	۱۲	۱۴	۹	۱۸	۲۰۰۱		
۱۲	۱۵	۲۴	۱۲	۱۳	۱۴	۱۶	۲۰۰۲		
۲۴	۱۴	۲۳	۱۰	۱۳	۷	۱۸	۲۰۰۳		
۱۹	۹	۲۰	۲۳	۱۱	۶	۱۵	۲۰۰۴		
۱۱	۲۳	۱۹	۱۳	۵	۱۱	۱۸	۲۰۰۵		
۱۱	۱۴	۱۴	۲۱	۱۱	۱۱	۱۸	۲۰۰۶		
۱۱	۴	۱۶	۲۳	۱۳	۱۵	۱۲	۲۰۰۷		
۱۰	۱۵	۱۰	۱۲	۱۰	۱۰	۲۳	۲۰۰۸		
۸	۱۶	۱۲	۱۱	۸	۲۲	۱۰	۲۰۰۹		
۷	۲۴	۱۶	۱۳	۶	۱۳	۱۳	۲۰۱۰		
۱۳	۱۵	۱۴	۱۲	۹	۸	۲۰	۲۰۱۱		
۲۲	۸	۲۰	۹	۱۱	۶	۱۹	۲۰۱۲		
۲۲	۱۳	۵	۱۳	۱۱	۲۱	۱۰	۲۰۱۳		
۱۷	۱۳	۱۴	۱۰	۱۰	۲۲	۱۱	۲۰۱۴		
۱۶	۱۴	۱۲	۱۱	۷	۲۵	۱۳	۲۰۱۵		
۱۷	۱۴	۲۳	۱۱	۶	۱۶	۱۳	۲۰۱۶		
۱۷	۱۴	۲۳	۱۱	۶	۱۶	۱۳	۲۰۱۷		
۱۲	۱۵	۱۸	۱۱	۷	۲۹	۸	۲۰۱۸		
۲۷	۸	۷	۱۱	۱۹	۱۵	۱۱	۲۰۱۹		
۹	۱۱	۲۱	۱۰	۲۶	۶	۱۶	۲۰۲۰		

تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی به صورت ماهانه

با توجه نتایج به دست آمده از (جدول ۹)، بر اساس شاخص هواشناسی SPI، بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره سه ماهه در ماه خرداد بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱۱ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۱ کیلومتر مربع از مساحت کل استان‌ها را در ماه خرداد اشغال کرده است. ماه اردیبهشت در طبقه سه به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۱۲ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. می‌توان مشاهده کرد که طبق شاخص SPI بیشترین مساحت به میزان ۱۲ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره سه ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور، بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه فروردین می باشد که این ماه به مقدار ۲۲ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه فروردین نیز طبقه پنج که به عنوان طبقه ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۲۳ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است و ۱۱ درصد در وضعیت نرمال قرار دارد.

با توجه به (جدول ۹)، بر اساس شاخص سنجش از دوری VCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره سه ماهه در ماه خرداد بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۲ درصد از مساحت کل استان‌ها را در ماه خرداد اشغال کرده است. ماه خرداد نیز در طبقه سه به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۱۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در ماه اردیبهشت طبقه نرمال به مقدار ۱۸ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. طبق شاخص VCI بیشترین مساحت به میزان ۲۱ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره سه ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه فروردین می‌باشد که این ماه به مقدار ۲۲ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه فروردین نیز طبقه پنج که به عنوان طبقه ترسالی متوسط می باشد، به میزان ۲۰ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

با توجه به (جدول ۹)، طبق شاخص سنجش از دوری TCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره سه ماهه در ماه اردیبهشت بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱۲ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۱ درصد از مساحت کل استان‌ها را در ماه خرداد اشغال کرده است. همچنین در ماه فروردین طبقه نرمال به مقدار ۱۷ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. بر اساس شاخص TCI، بیشترین مساحت به میزان ۱۴ از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره سه ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه فروردین می باشد که این ماه به مقدار ۲۱ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه فروردین نیز طبقه پنج که به عنوان طبقه ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۱۶ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

با توجه به (جدول ۹)، بر اساس شاخص سنجش از دوری VHI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره سه ماهه در ماه اردیبهشت بوده است. به طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱۳ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۲ درصد از مساحت کل استان‌ها را در ماه خرداد اشغال کرده است. ماه خرداد نیز در طبقه سه به عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۱۸ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در ماه خرداد طبقه نرمال به مقدار ۹ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است. طبق شاخص VHI بیشترین مساحت به میزان ۱۵ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره سه ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه فروردین می باشد که این ماه به مقدار ۲۱ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص

داده است. در ماه‌های فروردین و اردیبهشت نیز طبقه پنج که به عنوان طبقه ترسالی متوسط می باشد، به میزان ۱۶ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته است.

جدول ۹. درصد مساحت طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص های خشکسالی (ماهانه)

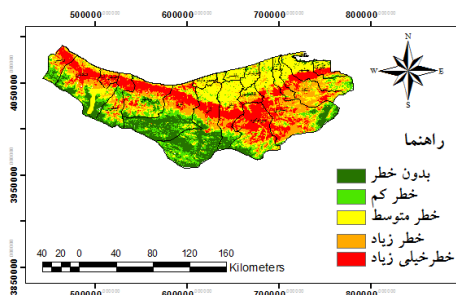
شاخص	ماه	خشکسالی حاد	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	نرمال	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی حاد
SPI	فروردین	۶	۱۲	۱۴	۱۱	۲۳	۲۲	۱۲
	اردیبهشت	۸	۱۷	۱۵	۱۵	۱۸	۱۷	۱۰
	خرداد	۱۱	۲۱	۱۲	۱۴	۱۷	۱۶	۹
VCI	فروردین	۴	۶	۱۰	۱۷	۲۰	۲۲	۲۱
	اردیبهشت	۱۰	۱۵	۱۳	۱۸	۱۵	۱۶	۱۳
	خرداد	۱۶	۲۲	۱۶	۱۱	۱۲	۱۳	۱۰
VHI	فروردین	۱۰	۱۴	۱۵	۹	۱۶	۲۱	۱۵
	اردیبهشت	۱۱	۱۵	۱۷	۱۰	۱۶	۱۷	۱۴
	خرداد	۱۳	۲۲	۱۸	۹	۱۴	۱۴	۱۰
TCI	فروردین	۶	۱۳	۱۳	۱۷	۱۶	۲۱	۱۴
	اردیبهشت	۱۲	۱۸	۱۷	۱۲	۱۵	۱۷	۹
	خرداد	۸	۲۱	۱۹	۱۳	۱۴	۱۵	۱۰

تعیین شاخص خطر خشکسالی (DHI)

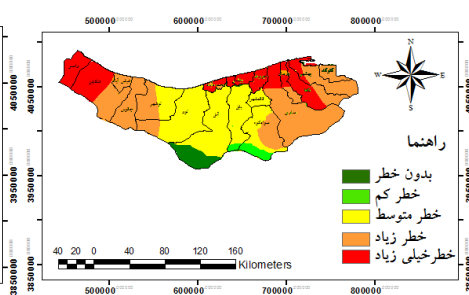
برای محاسبه DHI، احتمال وقوع برای هر شهرستان به دست آمد و فراوانی طبقات خشکسالی نیز محاسبه شد. نقشه خطر DHI برای شاخص‌های SPI، VCI، TCI و VHI با استفاده از روش درون یابی IDW تولید شد (اشکال ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳). مقدار DHI بین صفر تا یک نرمال شده است. استان مازندران بر اساس DHI به چهار طبقه خشکسالی طبقه‌بندی شد که عبارت است از: کم بین ۰ تا ۰/۲۵، متوسط بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰، بالا بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ و بسیار بالا بین ۰/۷۵ تا ۱ (Dabanli, 2018). جدول ۱۰ و شکل ۲۴ مساحت طبقات مختلف خطر را نشان می دهد.

جدول ۱۰. مساحت مناطق مختلف استان مازندران در برابر خطر خشکسالی به هکتار

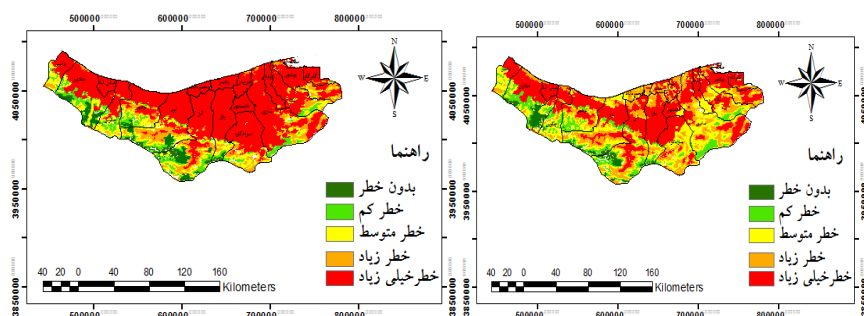
طبقات خطر/شاخص	VCI درصد	SPI درصد	VHI درصد	TCI درصد
بدون خطر	۳۸۹۰۷۴	۲۴۵۳۷۲	۳۳۴۶۱۰	۳۷۱۹۰۵
خطر کم	۴۴۷۵۳۳	۲۵۸۵۴۵	۳۵۳۳۰۴	۳۸۵۵۴۲
خطر متوسط	۵۳۶۳۱۴	۶۹۳۵۵۸	۴۸۳۵۳۰	۵۹۴۳۸۹
خطر زیاد	۴۹۷۶۴۸	۶۰۹۶۴۲	۵۳۷۴۲۹	۵۴۷۰۵۰
خطر خیلی زیاد	۵۰۵۹۳۱	۵۶۹۳۸۳	۶۶۷۶۲۷	۴۷۷۶۱۴



شکل ۲۱. نقشه خطر شاخص VCI

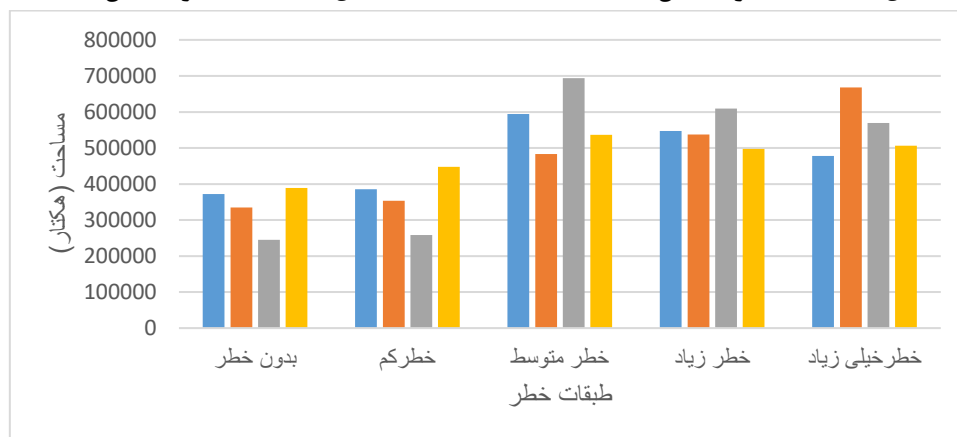


شکل ۲۰. نقشه خطر شاخص SPI



شکل ۲۳. نقشه خطر شاخص TCI

شکل ۲۲. نقشه خطر شاخص VHI



شکل ۲۴. مساحت طبقات مختلف خطر استان مازندران

نتایج ارزیابی شاخص خطر خشکسالی در مقیاس زمانی سالیانه نشان داد که منطقه مورد مطالعه تاکنون هر یک از وضعیت‌های خشکسالی از کم تا خیلی زیاد را به خود اختصاص داده است. بیشترین وسعت منطقه در شاخص SPI با ۷۹ درصد خطر خشکسالی متوسط، زیاد و خیلی زیاد، در شاخص VCI بیشتر منطقه با خطر خشکسالی متوسط، زیاد و خیلی زیاد با ۶۶ درصد، در شاخص VHI ۷۱ درصد با خطر خشکسالی متوسط، زیاد و خیلی زیاد، در شاخص TCI، ۴۳ درصد منطقه با خطر خشکسالی زیاد و خیلی زیاد رو به رو است. در نهایت در همه شاخص‌ها مناطق شمالی و میانی استان مازندران دچار خطر خشکسالی متوسط، زیاد و خیلی زیاد شده‌اند.

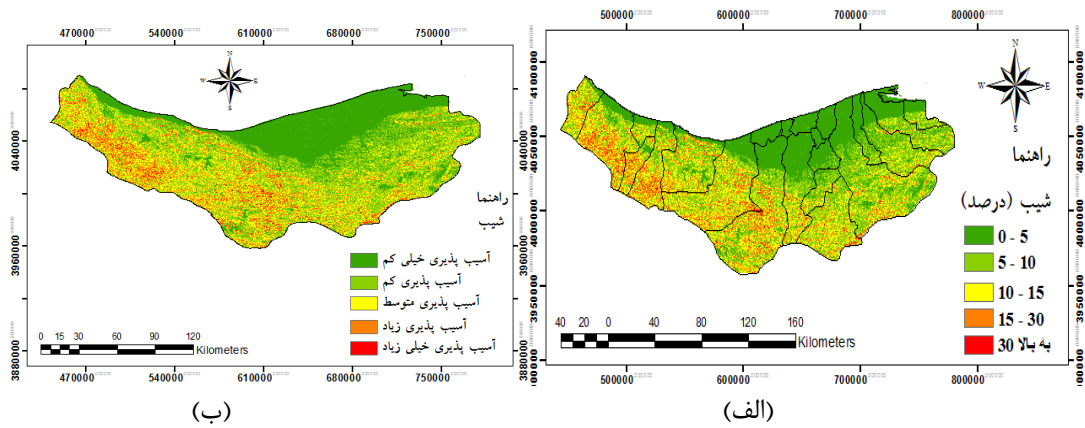
نقشه آسیب‌پذیری خشکسالی

آسیب‌پذیری خشکسالی با استفاده از هفت پارامتر اجتماعی-اقتصادی (کاربری اراضی، شیب، زمین‌شناسی، بارش، جهت شیب، تراکم آب زهکشی، تراکم جمعیت) بر اساس رابطه ۸ مربوطه محاسبه شد. نقشه آسیب‌پذیری در (اشکال ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰ و ۳۱) ارائه شده است. (جدول ۱۳) و (شکل ۳۲) مساحت طبقات مختلف آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد.

شیب: یکی از اساسی‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار بر جریان‌های سطحی عامل شیب می‌باشد. هرچه زاویه شیب بیشتر باشد، مقدار بیشتری از بارش به صورت رواناب ایجاد می‌شود. در پژوهش لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) در سامانه اطلاعات جغرافیایی بدست آمد و نقشه درصد شیب هر منطقه تهیه شد. با توجه به نقشه شیب، کلاس‌های آسیب‌پذیری مربوط به هر یک از طبقات شیب مشخص شد. کلاس‌های آسیب‌پذیری طبقات شیب با توجه به قرار گرفتن عمده اراضی زراعی و باغی در دشت‌ها و مناطق با شیب زیر ۱۵ درصد و با بررسی نقشه کاربری اراضی، طبقات شیب منطقه مورد مطالعه به کلاس‌های جدول (۱۱) برای نتیجه‌گیری بهتر تقسیم گردید (شکل ۲۵).

جدول ۱۱. درصد طبقات شیب در آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری	درصد	شیب
۲	۲-۰	
۴	۵-۲	
۶	۱۰-۵	
۸	۱۵-۱۰	
۱۰	>۱۵	

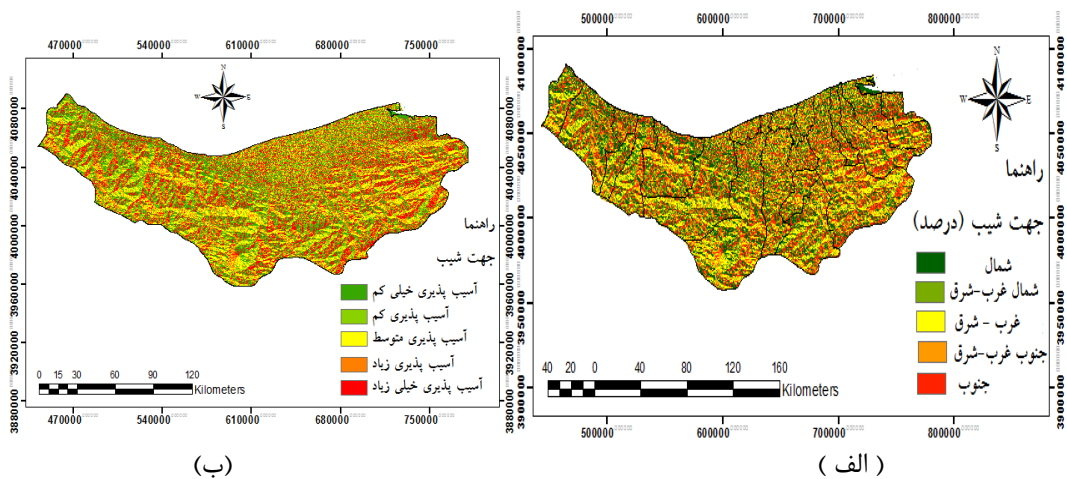


شکل ۲۵. نقشه (الف) شیب منطقه نقشه (ب) آسیب‌پذیری شیب

جهت شیب: جهت‌های مختلف شیب می‌توانند تابش نور خورشید را به میزان متفاوتی دریافت کنند و این عامل می‌تواند در میزان دما، رطوبت و تبخیر و تعرق تأثیر زیادی داشته باشد، لذا در پژوهش حاضر از فاکتور جهت شیب به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در آسیب‌پذیری خشکسالی استفاده شده است. جهت مختلف شیب نیز از مدل رقومی ارتفاع بدست آمد و نقشه جهت شیب برای منطقه مطالعاتی تهیه شد. با توجه به اینکه دامنه‌های شمالی کمترین میزان دریافت تابش خورشید را دارا می‌باشند و بر عکس آن دامنه‌های جنوبی بیشترین میزان دریافت تابش خورشید را دارند، لذا کلاس‌های آسیب‌پذیری مربوط به هر یک از طبقات جهت شیب در محدوده مورد مطالعه مشخص و در جدول (۱۲) نشان داده شده است (شکل ۲۶).

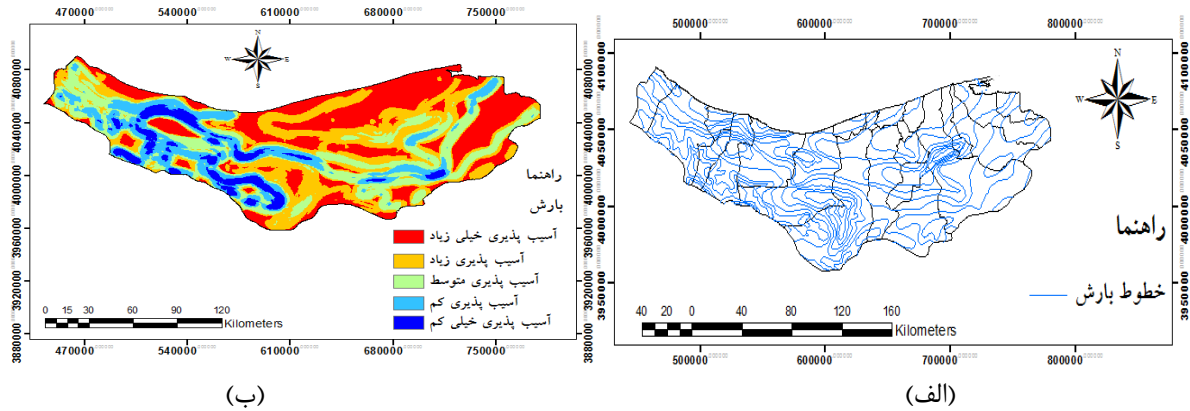
جدول ۱۲. درصد طبقات جهت شیب در آسیب‌پذیری

جهت شیب	جهت شیب	آسیب‌پذیری
۱	شمال	آسیب‌پذیری کم
۳	شمال غرب-شمال شرق	آسیب‌پذیری کم
۵	غرب-شرق	آسیب‌پذیری متوسط
۸	جنوب غرب-جنوب شرق	آسیب‌پذیری زیاد
۱۰	جنوب	آسیب‌پذیری خیلی زیاد

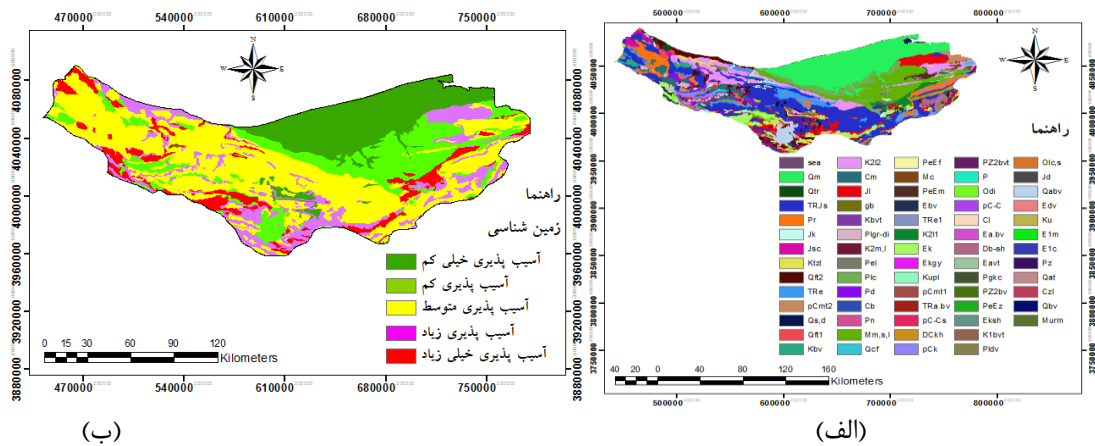


شکل ۲۶. نقشه (الف) جهت شیب، نقشه (ب) آسیب‌پذیری جهت شیب

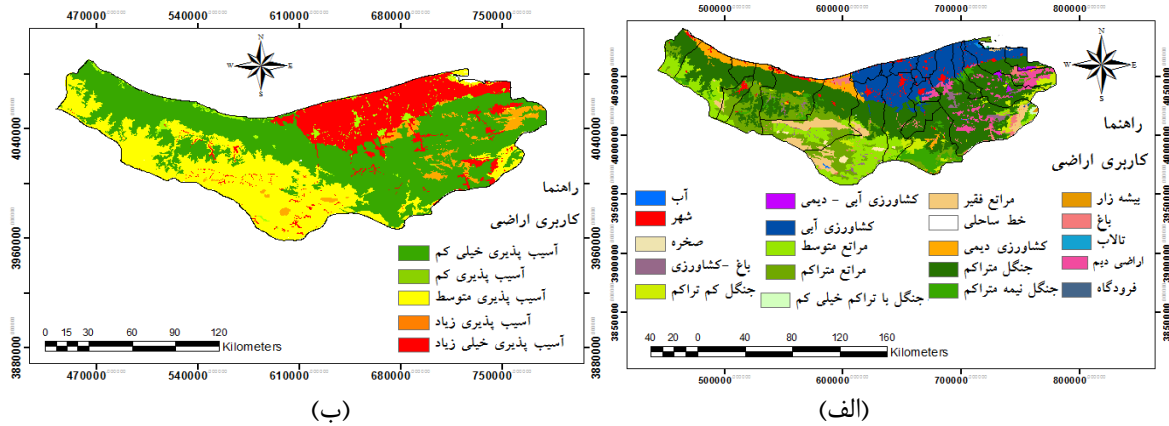
بارش: با توجه به شرایط وقوع خشکسالی، باران مهمترین پارامتر موثر در ایجاد خشکسالی است. مناطق با بارندگی بیشتر حساسیت کمتری به خشکسالی دارند. به منظور بررسی نقش بارش در آسیب پذیری خشکسالی نقشه بارش منطقه به روش آنالیز منطقه‌ای بارش (بارش ارتفاع) تهیه گردید (شکل ۲۷).



زمین شناسی: به منظور در نظر گرفتن نقش سازندهای زمین شناسی محدوده مورد مطالعه، در نگهداری، جذب و انتقال آب و نقش آن در آبدهی قنوات و چاهها و ظرفیت نگهداری آب در خاک، از نقشه سازندهای زمین شناسی که مربوط به سازمان زمین شناسی ایران می باشد، در این پژوهش استفاده شد. مبنای امتیازدهی به سازندها فقط قدرت نگه داشت آب به وسیله زمین سازندهای مختلف و رنج امتیازدهی بین ۱ تا ۱۰ می باشد به طوری که آسیب پذیرترین سازند (سازندی که کمترین نگه داشت آب را دارد) عدد ۱۰ و سازندی که کمترین آسیب پذیری (سازندی که بیشترین نگه داشت آب را دارد) را دارد عدد ۱ می باشد (شکل ۲۸).

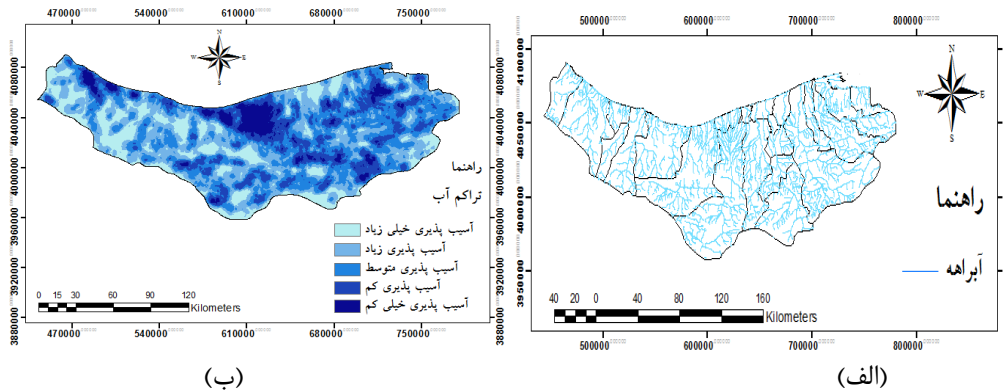


کاربری اراضی: بطور کلی اکوسیستم های مصنوعی نسبت به اکوسیستم های طبیعی از حساسیت بیشتری نسبت به خشکسالی برخوردارند. بنابراین اراضی باغی- زراعی حساسیت بیشتری به خشکسالی نسبت به اراضی مرتعی دارند (شکل ۲۹).



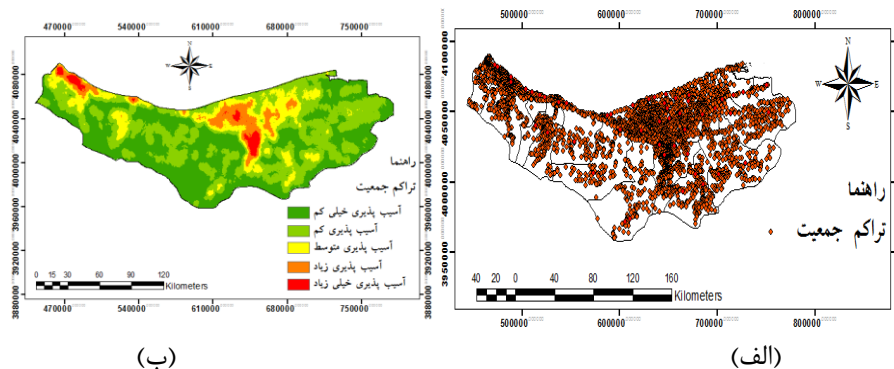
شکل ۲۹. نقشه (الف) کاربری اراضی منطقه، نقشه (ب) آسیب‌پذیری کاربری اراضی

تراکم زهکشی آب: تراکم شبکه آبراهه‌ها بر میزان در دسترس بودن آب در یک منطقه تاثیر گذار است، هر چه تراکم آبراهه‌ها بیشتر باشد، سرعت تخلیه آب بیشتر بوده و آب زمان کمتری برای نفوذ دارد و در نتیجه میزان رطوبت خاک کمتر خواهد بود. بنابراین با افزایش تراکم زهکشی میزان حساسیت به خشکسالی بیشتر خواهد بود (شکل ۳۰).



شکل ۳۰. نقشه (الف) تراکم آب منطقه، نقشه (ب) آسیب‌پذیری تراکم آب

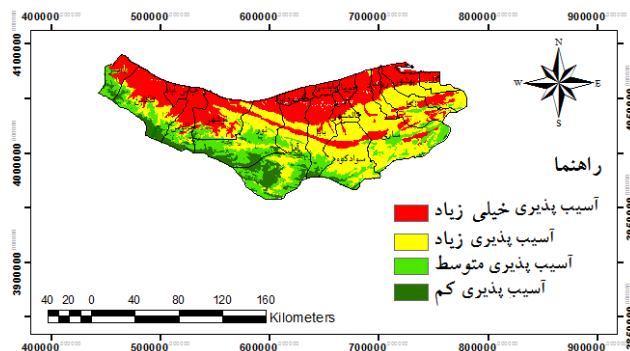
تراکم جمعیتی: افزایش تراکم جمعیتی در حساسیت کاربری، آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. و در مناطقی که جمعیت کمتری وجود دارد، آسیب‌پذیری کمتری نسبت به مناطق با تراکم زیاد برخوردار هستند (شکل ۳۱).



شکل ۳۱. نقشه (الف) تراکم جمعیت منطقه، نقشه (ب) آسیب‌پذیری تراکم جمعیت

در این پژوهش از روش ترکیب خطی - وزنی که رایج‌ترین فن در تحلیل ارزیابی چندمعیاره است، استفاده شد. این روش بر مبنای مفهوم میانگین وزنی استوار است. همچنین از روش فازی برای استانداردسازی شاخص‌ها استفاده شد. در این روش همه مقادیر و ارزش‌های لایه‌های نقشه‌ای به دامنه یکسان بین صفر تا یک تبدیل شد. به عنوان مثال با افزایش تراکم جمعیتی در حساسیت کاربری، آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد (تابع خطی افزایشده) ولی با افزایش ظرفیت آب قابل استفاده در خاک و درصد

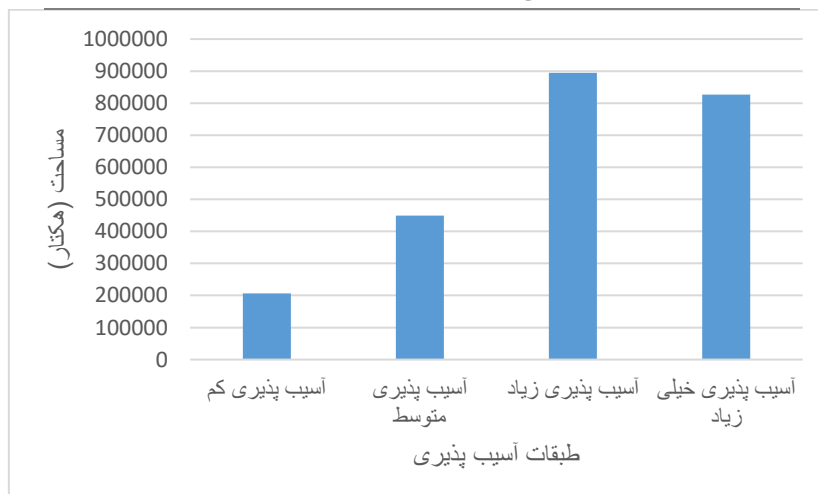
وزنی مواد آلی خاک، آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد (تابع خطی کاهنده). خروجی این مرحله از کار، نقشه‌های استاندارد شده‌ای خواهد بود که مقادیر و ارزش‌های آن‌ها بین صفر تا ۲۵۵ یا صفر تا یک خواهد بود. در نهایت به منظور وزندهی از روش فرایند تحلیل AHP سلسله‌مراتبی استفاده گردید. در این روش در نهایت پس از وزندهی به معیارهای آسیب‌پذیری طبق فرمول ترکیب خطی وزنی محاسبه و هر یک از نقشه‌های استاندارد شده در وزن مربوطه ضرب شده و در نهایت عملیات اجتماع بین لایه‌ها به دست آمده انجام گرفت که این نقشه نهایی همان نقشه DVI یا شاخص آسیب‌پذیری به خشکسالی به دست آمد.



شکل ۳۲. نقشه آسیب‌پذیری استان مازندران

جدول ۱۳. مساحت مناطق مختلف استان مازندران در برابر آسیب خشکسالی به هکتار

درصد	مساحت	طبقات آسیب/ شاخص
۹	۲۰۶۵۷۴	آسیب‌پذیری کم
۱۸	۴۴۸۶۸۱	آسیب‌پذیری متوسط
۳۸	۸۹۴۶۱۴	آسیب‌پذیری زیاد
۳۵	۸۲۶۶۳۱	آسیب‌پذیری خیلی زیاد



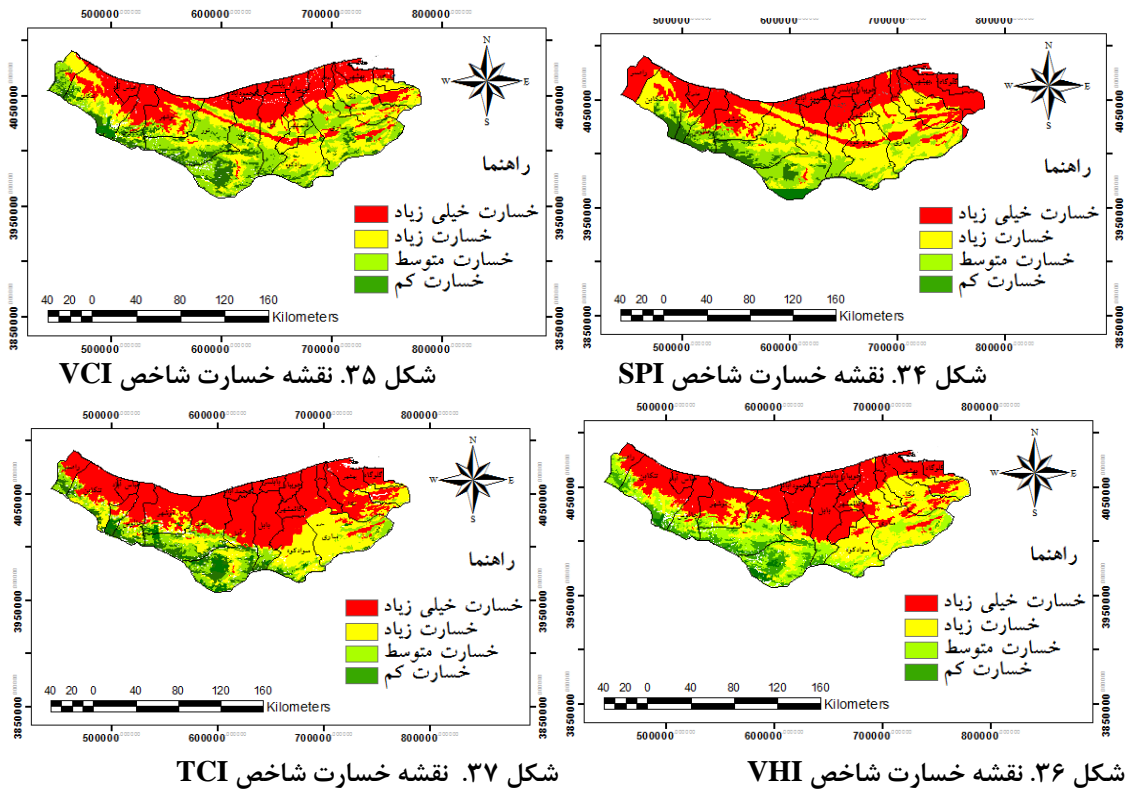
شکل ۳۳. مساحت طبقات مختلف آسیب‌پذیری خشکسالی استان مازندران

نتایج حاصل از استانداردسازی نشانگرهای اقتصادی اجتماعی و فیزیکی نشان داد که تراکم‌ترین شهرستان‌های استان در شمال و غرب قرار دارند. کم‌تراکم‌ترین جمعیت در جنوب استان مازندران و از لحاظ نوع کاربری بیشترین حساسیت به خشکسالی در بخش‌های شمالی و میانی هستند. بیشترین مشاغل کشاورزی در مناطق شمالی و میانی شهرستان‌های (رامسر، تنکابن، عباس‌آباد، محمودآباد، قائمشهر، بابلسر، بهشهر، محمودآباد و...) دارا بوده‌اند. بررسی نتایج آسیب‌پذیری خشکسالی در استان نشان داد (شکل ۳۲) که سطح آسیب‌پذیری در منطقه از وضعیت کم تا خیلی زیاد نوسان دارد. در قسمت جنوبی استان دارای آسیب‌پذیری متوسط با ۱۸ درصد و آسیب‌پذیری کم ۹ درصد است. آسیب‌پذیری خیلی زیاد در قسمت‌های از شمال استان با

۳۵ درصد بوده است. همچنین ۳۸ درصد مساحت استان در قسمت میانی و شرقی در معرض آسیب‌پذیری زیاد خشکسالی قرار گرفته است.

نقشه خسارت یا ریسک خشکسالی (DRI)

DRI با ضرب شاخص خطر خشکسالی (DHI) و شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI) به دست آمد. نقشه DRI برای شاخص‌های VCI، SPI، TCI و VHI با استفاده از روش درون‌یابی IDW تولید شد (اشکال ۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۳۷). استان مازندران از نظر خسارت خشکسالی به چهار طبقه مشابه DHI و DVI تقسیم شده است. جدول ۱۴ و شکل ۳۸ مساحت طبقات مختلف آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد.

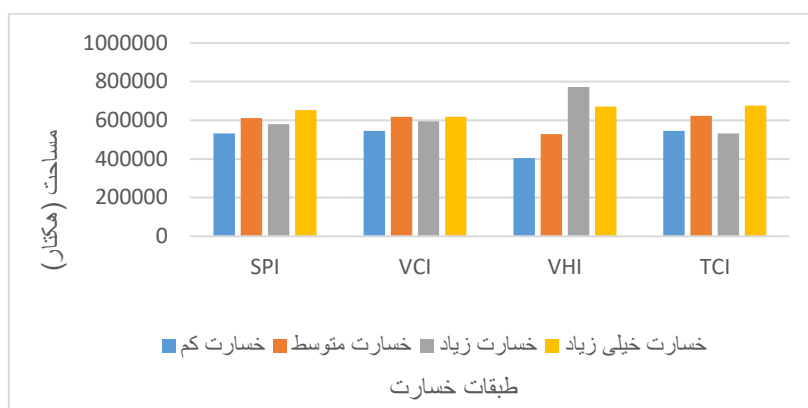


جدول ۱۴. مساحت مناطق مختلف استان مازندران در برابر خسارت خشکسالی به هکتار

طبقات خسارت / شاخص	SPI درصد	VCI درصد	VHI درصد	TCI درصد
خسارت کم	۵۳۲۴۸۰	۲۳	۴۰۳۶۰۶	۵۴۵۸۴۳
خسارت متوسط	۶۱۱۱۲۰	۲۶	۶۱۸۵۰۰	۶۲۳۵۷۶
خسارت زیاد	۵۸۰۳۳۰	۲۴	۵۹۵۴۰۰	۵۳۱۷۰۵
خسارت خیلی زیاد	۶۵۲۵۷۰	۲۷	۶۱۷۶۰۰	۶۷۵۳۷۶

نتایج بررسی ارزیابی نقشه خسارت در مقیاس سالانه در ۴ شاخص خشکسالی (شکل‌های ۳۴ تا ۳۷) نشان داد که این نوع خسارت در سطح منطقه از وضعیت کم تا خیلی زیاد نوسان دارد. بیشترین وضعیت در شاخص VHI، SPI، TCI و VHI مربوط به قسمت‌های جنوبی استان به ترتیب ۲۳، ۲۳، ۱۷ و ۲۳ درصد شامل شهرستان‌های (آمل، ساری، بابل، چالوس و نور) است. در شاخص VHI بیشترین وضعیت مربوط به خسارت زیاد، ۳۲ درصد در مناطق شمال و میانی استان است. حدود ۲۴ درصد از سطح استان در شاخص SPI، وضعیت خسارت زیاد، ۲۷ و ۲۶ درصد وضعیت خیلی زیاد و خسارت متوسط روبه‌رو است. در شاخص VCI حدود ۲۶، ۲۵ و ۲۶ درصد از سطح منطقه دچار خسارت متوسط، زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. در شاخص VHI، ۱۷ درصد خسارت کم در جنوب استان مازندران، ۲۲ درصد خسارت متوسط، ۳۲ درصد خسارت

زیاد در قسمت میانی در سطح استان و ۲۸ درصد خسارت خیلی زیاد مشاهده می‌شود. در شاخص TCI، ۲۸ درصد خسارت خیلی زیاد در شمال استان، ۲۶ درصد خسارت متوسط و ۲۲ درصد خسارت زیاد در قسمت شمال و میانی استان وجود دارد.



شکل ۳۸. مساحت طبقات مختلف خسارت خشکسالی استان مازندران

جهت بررسی همبستگی بین شاخص‌های شاخص‌های خطر، آسیب پذیری و خسارت از ضریب همبستگی استفاده شده است. نتایج ضرایب همبستگی آماری برای شاخص‌های خشکسالی در جدول ۱۵ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد زوج شاخص‌ها DHI و DVI ضریب همبستگی بسیار بالایی دارند به جز شاخص DRI که با شاخص‌های دیگر رابطه همبستگی ضعیفی دارد.

جدول ۱۵. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص SPI سالانه و شاخص‌های خطر، آسیب پذیری و خسارت

شاخص	DHI	DVI	DRI
سالانه	۹۳٪	۸۷٪	۶۹٪

نتیجه گیری

در دهه‌های گذشته معمولاً تحلیل‌های خشکسالی به صورت توصیفی صورت می‌پذیرفت و کمتر به تحلیل‌های کمی پرداخته می‌شد. اثرات و ویژگی‌های خشکسالی ممکن است در رژیم‌های مختلف آب و هوایی با هم متفاوت باشد. شاخص‌های خشکسالی عناصر مهم در پایش خشکسالی هستند. شاخص‌ها ارتباط اطلاعات را درباره تغییرات اقلیمی و بی‌نظمی آن را برای کاربران سهل‌تر کرده و به دانشمندان اجازه می‌دهد تا کمیت‌های بی‌نظمی و تغییرات اقلیمی را که به مدت، شدت و گسترش مکانی برآورد می‌شود، مطالعه کنند. شاخص‌ها اطلاعات مفید و مهمی را برای طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب در اختیار کاربران قرار می‌دهند.

در این پژوهش روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌های رخ داده شده در منطقه طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از شاخص SPI به عنوان شاخص بارش استاندارد از داده‌های زمینی (۱۷ ایستگاه) به صورت روزانه و ماهانه استفاده شد و به کمک نرم‌افزار DIP سال‌های خشکسالی و ترسالی برای ۲۱ سال مشخص شد، همه سال‌ها ترسالی ملایم و خشکسالی ملایم را تجربه کرده‌اند و برخی سال‌ها دارای ترسالی شدید و متوسط بوده‌اند. در این تحقیق برای اینکه شاخص خشکسالی هواشناسی SPI گستره خشکسالی را به طور دقیق نشان دهد از بازه زمانی سالانه آن استفاده شد.

در این مطالعه از چهار نمایه طیفی برای بررسی وضعیت خشکسالی منطقه برای دوره ۲۱ ساله ۲۰۲۰-۲۰۲۰ استفاده شد. این نمایه‌ها عبارتند از نمایه‌های مربوط به پوشش گیاهی مانند نمایه VCI، TCI و VHI استفاده شد و سال‌های دچار خشکسالی تعیین گردید. از آنجا که بیشترین مقدار پوشش گیاهی در ماه‌های معتدل سال مناطق است دوره رشد گیاه از ماه‌های آوریل تا ژوئن در نظر گرفته شد. مقدار نمایه‌های مربوط به این ماه‌ها نیز روند تغییرات را بهتر از بقیه روزهای سال نشان می‌دهد. در بیشتر تصاویر این ۴ نمایه از روند مشابهی پیروی می‌کنند و همانند نمایه‌های هواشناسی، ارزش طیفی نمایه‌ها در سال‌های

که با خشکسالی همراه است کاهش و در سال‌های مرطوب افزایش پیدا می‌کند. بیشترین همبستگی بین شاخص SPI و VHI و VCI به مقدار ۰/۸۲ و ۰/۸۸ می‌باشد که نشان می‌دهد قسمت‌های شمالی و میانی استان مازندران دچار خشکسالی‌های متوسط و شدیدی شده‌اند. نتایج این تحقیق مشابه با نتایج سلطانی و همکاران (۱۳۹۸)، حمزه و همکاران (۱۳۹۶)، غفوریان (۱۳۹۳) که نشان دادند شاخص‌های سنجش از دوری دارای دقت مناسبی در پایش خشکسالی می‌باشد. با استفاده از معادلات DVI نقشه آسیب‌پذیری برای دوره معین از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تولید شد. نتایج نقشه آسیب‌پذیری در شاخص‌های مورد مطالعه نشان داد که در مدل VHI و VCI قسمت‌های از جنوب با آسیب‌پذیری کم و متوسط همراه بوده زیرا در این نقاط زمین تراکم جمعیت کمتری و نوع کاربری اراضی از نوع طبیعی و جنگل و زمین‌شناسی آب را به راحتی از خود عبور نمی‌دهد دیده می‌شود و در هر ۴ شاخص قسمت‌های شمالی و میانی به دلیل وجود زمین‌های کشاورزی، تراکم جمعیت بسیار، وجود اراضی آبی، شیب و جهت شیب با وجود خشکسالی در این مناطق آسیب‌پذیری زیادی و خیلی زیادی همراه هستند. در انتها می‌توان چنین بیان کرد که داده‌های سنجنده مودیس و نمایه‌های سنجش از دور برای پایش خشکسالی در مناطق با پوشش گیاهی بالا استفاده کرد. روند تغییرات این نمایه‌ها با تأخیر زمانی مناسب، مشابه نمایه هواشناسی هستند که نشان دهنده حساسیت آن‌ها به مقدار سبز بودن و آب پوشش گیاهی می‌باشد و در شرایط تنش مقدار آن‌ها کاهش می‌یابد چرا که با کاهش مقدار آب، میزان رطوبت برگ گیاه هم کاهش می‌یابد و این اتفاق به وسیله سنجنده مودیس قابل رویت است. نتایج آسیب‌پذیری و خسارت نشان داد در استان مازندران قسمت‌های میانی و بخش‌های شمالی استان با آسیب‌پذیری و خسارت خیلی زیاد و زیاد در هنگام خشکسالی روبه‌رو هستند. زیرا در این مناطق بیشترین زمین‌های کشاورزی، و بیشترین جمعیت مناطق روستایی و شهری قرار گرفته‌اند. در شاخص‌های آسیب‌پذیری و خسارت مناطق جنوبی استان با آسیب‌پذیری متوسط و کم و خسارت متوسط و کم همراه هستند به دلیل اینکه در این مناطق زمین کشاورزی کمتری وجود دارد و از نظر جمعیت روستایی نسبت به مناطق میانی کمتر بوده است پس آسیب‌پذیری و خسارت در زمان خشکسالی کمتر از دیگر مناطق استان می‌باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند سپاسگذاری می‌کنیم.

منابع و مأخذ

انصافی‌مقدم، طاهره، رفیعی‌امام، عمار. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خشکسالی اقلیمی با استفاده از روش درونیایی معکوس فاصله (IDW) مطالعه موردی: حوضه دریاچه نمک، تحقیقان مرتع و بیابان ایران، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۲۷۴-۲۹۲.

https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_103580_a982079f2d53989fda29bc5524457c92.pdf

باروتی، حنانه، یوسف گمرکچی، افشین، فضل اولی، رامین. (۱۳۸۷). تحلیل و پایش خشکسالی در دشت قزوین با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب. ۲۳-۲۵ مهر.

<https://civilica.com/doc/5036>

بحرینی، فاطمه، پناهی، فاطمه، جعفری، محمد، ملکیان، آرش. (۱۳۹۷). شناسایی مناطق آسیب‌پذیر پوشش گیاهی با خشکسالی با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: استان بوشهر)، منابع طبیعی ایران، دوره ۷۱، شماره ۲، صص ۳۴۱-۳۵۴.

https://jrwm.ut.ac.ir/article_67991_af7b0f4f23341fd60c27ff123f0649d3.pdf

پورهاشمی مجومردی، سیدعلی، فتح‌زاده، علی، حیات‌زاده، مهدی، فاضل‌پور، محمدرضا، فتوحی، فرزانه. (۱۴۰۱). بررسی آسیب‌پذیری ناشی از خشکسالی با استفاده از سیستم‌های چند معیاره (مطالعه موردی: شهرستان اردکان)، انجمن علمی آبخیزداری ایران، صص ۷۸-۸۷.

<http://drnl.sanru.ac.ir/article-1-187-fa.html>

حمزه، سعید؛ فراهانی، زهرا؛ مهدوی، شهریار؛ چترآبگون، امید؛ غلام‌نیا، مهدی. (۱۳۹۶). پایش زمانی و مکانی خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور، مورد مطالعه: استان مرکزی ایران. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال چهارم، شماره ۳، صص ۷۰-۵۳.

<https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2749-fa.pdf>

حیدری علمدارلو، اسماعیل، نسب‌پور، سحر، کشتکار، حمیدرضا. (۱۳۹۶). داده‌کاوی احتمال وقوع خشکسالی در ایران. نشریه مدیریت بیابان، ۵(۹)، ۱-۱۴.

<https://doi.org/10.22034/jdml.2017.27856>

حیدری‌زادی، زاهده، اونق، مجید، کمکی، چوقی بایرام. (۱۴۰۲). ارزیابی خسارت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای خشکسالی و فاکتورهای آسیب‌پذیری (مطالعه موردی: استان ایلام)، نشریه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۲۹، شماره ۴، صص ۵۴۲-۵۶۱.

DOI: 10.22092/ijrdr.2022.128077

سلطانی، میلاد؛ سلطانی، عادل؛ کله‌هوئی، مهین؛ سلیمانی، کریم. (۱۳۹۸). پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از تصاویر لندست، منطقه مورد مطالعه: شهرستان کرمانشاه، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۰۹، صص ۱۳۸-۱۴۶.

https://www.sepehr.org/article_35643_195dfc4fba8302054f7b0ce354645422.pdf

زارعی محمودآبادی، راضیه، خامسی میبیدی، محمدحسن. (۱۴۰۲). پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SIAP (مطالعه موردی: استان یزد). سومین کنفرانس بین‌المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق‌های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب. صص ۱-۶.

<https://civilica.com/doc/1960111>

ظهیری، عبدالرضا، حسین شریفان، فرزانه ابارشی، مهدی رحیمیان. (۱۳۹۳). ارزیابی پدیده‌های ترسالی و خشکسالی در استان خراسان با استفاده از نمایه‌های (NITZCHE, SPI, PNPI)، آبیاری و زهکشی ایران، ۴: ۸۴۵-۸۶۵.

https://idj.iaid.ir/article_54846_a6745b85c9e57eb8ca1817e3dd8b85fb.pdf

<https://golestanp.ir>

غفوریان، هادی؛ ثنائی‌نژاد، سیدحسین؛ داوری، کامران. (۱۳۹۳). بررسی تعیین مناطق مناسب جهت پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی (آب و خاک)، علوم و صنایع کشاورزی (۳). ۶۳۹-۶۴۸.

https://jsw.um.ac.ir/article_37764_3151eb96ec7d6f60125b3e671600f265.pdf

<https://www.agri-peri.ac.ir/dorsapax/userfiles/file/s.golestan.pdf>

نصرتی، کاظم. (۱۳۹۳). ارزیابی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران. فصلنامه علوم محیطی، دوره دوازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳. ۷۴-۶۳.

https://envs.sbu.ac.ir/article_97468_c78ddd24a33bb281b2c9ba3a1504e6d6.pdf

خلیلی جویباری، رضا، ردایی، محمود، باغبان جلودار، علی، بهرام نژاد، فاطمه. (۱۳۹۷). طرح آمایش استان مازندران، سازمان برنامه و بودجه کشور، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان مازندران.

http://www.jesb.ir/article_2476_07e6db118389978ced69ddc81c74daf7.pdf

- Agnew, C.T. (2000). Using the SPI to Identify Drought, Drought Network News, Vol. 12, No. 1, winter 1999-Spring 2000.
- Alizadeh, A., (2014). Applied Hydrology, Imam Reza University Press, thirty- eighth edition, 941 pages. Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., & Sutera, A. (2003). Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water resources management*, 17(4), 273-296.
- Chen, Z., Grasby, S.E., & Osadetz, K.G. (2004). Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada, *Journal of Hydrology*, No. 290: 43–62.
- Dabanli, I. (2018). Drought Risk Assessment by Using Drought Hazard and Vulnerability Indexes. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. 1–15.
DOI: 10.1007/s11069-007-9191-5
- Fiorillo, F., Esposito, L., & Guadagno, FM., (2010). Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, Using the SPI. *Water Resources Manage*, 24: 1867-1884.
- Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., & Hisdal, H. (2006). Drought Indices Suitable to Study the Linkages to Large-Scale Climate Drivers in Regions with Seasonal Frost Influence. *IAHS PUBLICATION*, 308, 169.
- Haro, D., Abel, S., Javier, P., & Joaquín, A. (2014). Methodology for drought risk assessment in within- year regulated reservoir systems: Application to the Orbigo, River System (Spain). *Water Resources Management*, 28 (11), 3801-3814.
- Hou, W., Yan, P., Feng, G., & Zuo, D. (2021). A 3D Copula Method for the Impact and Risk Assessment of Drought Disaster and an Example Application. *Frontiers in Physics*, 9, 156.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0710-3>
- Jiang, S., Yang, R., Cui, N., & Zhao, L. (2018). Analysis of drought vulnerability characteristics and risk assessment based on information distribution and diffusion in Southwest China. *Atmosphere*, 9 (7), 2-39.
- Khademipour, G., Saberi Anari, S.M., Nekoyi Moghadam, M., Masoudi, A., & Jafari Baghini, R. (2018). Comprehensive Assessment and Zonation of Drought Risk and Vulnerability in Kerman Province. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly (HDQ)*. 3: 2. 113-120.
- Khoshakhlagh, F., Hejazi Zadeh, Z., Mohammadi, H., & Roshan, G.H. (2006). TOPSIS Approach in Determining and Ranking of Drought (Case Study: Drought Distribution in Several Stations in Khuzestan Province). 5(6):105-127.
- Kogan, F.N. (1993). United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1:197-199.
- Kogan, F.N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, n°4, p.621-636.
- Kogan, F.N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of American Meteorological Society*, 82(9): 1949–1964.
- Lorenzo, M.N., Alvarez, Ines., Taboada, J.J. (2022). Drought evolution in the NM Iberian Peninsula over a 60 year period. *Journal of Hydrology*,

- Maccioni, P., Kossida, M., Brocca, L., & Moramarco, T. (2014). Assessment of the Drought Hazard in the Tiber River Basin in Central Italy and a Comparison of New and Commonly Used Meteorological Indicators, ASCE, 05014029-
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California.
- Park, S., Im, J., Jang, E., & Rhee, J. (2016). Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and forest meteorology*, 216: 157-169.
[Doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011).
- Shahid, S., & Behrawan, H. (2008). Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards* 46: 391-413 (In Persian with English summary).
- Svoboda, M. (2000). An introduction to the drought monitor. *Drought Network News*. 80: 1994-2001.
- Thenkabail, P.S., & Gamage, M.S.D.N. (2004). The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia, Vol 85, Iwmi.
- Tingsanchali, T., & Piriya Wong, T. (2018). Drought Risk Assessment of Irrigation Project Areas in a River Basin. *Engineering Journal*, 22 (1), 280-286.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2004). Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water resources management*, 18(1), 1-12.
- Tucker, C.J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Wilhelmi, O.V. & Wilhite, D.A. (2002). Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska Case Study. *Natural Hazards*, 25: 37-58.
- Wilhite, D.A. & Vanyarkho, O. (2000). Drought: Pervasive Impacts of a Creeping Phenomenon (Chapter 18), In: D.A. Wilhite (ed.), *Drought: A Global Assessment*, Natural Hazards and Disasters Series, Routledge Publishers, UK.
- Wilhite, D.A., & Vanyarkho, O.V. (2000). Chapter 18 Drought: Pervasive Impacts of a Creeping Phenomenon. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. I: 71: 245-255.
- Wu, C., Yeh, P.J.F., Chen, Y.Y., Lv, W., Hu, B.X., & Huang, G. (2021). Copula-based risk evaluation of global meteorological drought in the 21st century based on CMIP5 multimodel ensemble projections. *Journal of Hydrology*, 598, 126265.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126265>
- Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score, *International journal of climatology*, Vol. 21, No. 6, pp. 745-758.
- Yaghmaei, L., Soltani, S., Jafari, R., Bashari, H., & Jahanbazi, H. (2017). An investigation on impact of drought on rangeland and forest vegetation changes in Chaharmahal & Bakhtiari province using MODIS satellite data, *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 15 (1): 91-108.
- Zare khormizie, H., Hosseini, S., Mokhtari, M., & Ghafarian Malamiri, H. (2017). Analysis of relationship between drought and NDVI variations in different vegetation types (Case study: Southern rangelands of Yazd Province). *Journal of Arid Biome*, 7(2): 85-101.
- Zhao, P., Lü, H., Fu, G., Zhu, Y., Su, J., & Wang, J. (2017). Uncertainty of hydrological drought characteristics with copula functions and probability distributions: a case study of Weihe River, China. *Water*, 9 (5), 334.