

بررسی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی و ارتباط آن با شاخص‌های پوشش گیاهی در حوضه آبخیز سامیان، استان اردبیل

موسی عابدینی 

استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

زهرا شریفی

دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۲۵

چکیده

خشک‌سالی تأثیرات گسترده‌ای بر محیط طبیعی دارد و ارزیابی شاخص‌های خشک‌سالی و پوشش گیاهی می‌تواند به مدیریت بهتر این پدیده کمک کند. هدف این پژوهش، بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشک‌سالی و شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی در حوضه آبخیز سامیان طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ است. در این راستا، شاخص‌های طیفی SAVI، NDVI و NDBI از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ برای پوشش گیاهی، خاک و مناطق ساخته‌شده استخراج شدند. همچنین، شاخص‌های خشک‌سالی VCI، TCI و SPI با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بارشی محاسبه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که شاخص‌های گیاهی NDVI و SAVI هرچند روندی اندک صعودی داشته‌اند، اما این روندها از لحاظ آماری معنادار نبوده‌اند. کاهش ضعیف شاخص NDBI نیز بیانگر گسترش پوشش طبیعی در حوضه بود. شاخص TCI نشان داد که تنش حرارتی در مناطق شمالی و مرکزی بر پوشش گیاهی تأثیر منفی داشته و همبستگی مثبت آن با NDVI، SAVI و NDBI در سطح معناداری 0.01 درصد بیانگر این است که شرایط دمایی مناسب به بهبود سبزیگی گیاهان کمک کرده است و در مناطق با تنش حرارتی بیشتر، گسترش مناطق ساخته‌شده نیز بیشتر بوده است. شاخص VCI نشان داد که شمال و جنوب شرقی حوضه از رطوبت مناسبی برخوردارند و همبستگی مثبت آن با NDVI و SAVI در سطح معناداری 0.01 درصد نشان‌دهنده بهبود پوشش گیاهی در شرایط رطوبتی بهتر است. شاخص SPI با گرایش ضعیف مثبت نیز نشان داد که شمال شرق و نوار غربی حوضه رطوبت بیشتری داشته و همبستگی معنادار آن با NDVI و SAVI نشان‌دهنده بهبود پوشش گیاهی در شرایط بارندگی بیشتر است، در حالی که همبستگی منفی آن با NDBI نشان می‌دهد که در شرایط خشک‌سالی، مناطق ساخته‌شده افزایش یافته و پوشش گیاهی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: خشک‌سالی، ترسالی، پوشش گیاهی، SPI، حوضه آبخیز سامیان.

مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان یکی از جدی‌ترین بلایای طبیعی، هر ساله خسارات جبران‌ناپذیری به بسیاری از کشورها وارد می‌کند. با این حال، با برنامه‌ریزی دقیق و جامع می‌توان از شدت این خسارات کاست. پیش از دهه ۱۹۹۰، اغلب کشورها

برنامه مشخصی برای مقابله با خشک‌سالی نداشتند (Steven et al. 2022)؛ اما با افزایش تعداد و شدت خشک‌سالی‌ها در سده اخیر، رویکرد بسیاری از کشورها به سمت مدیریت ریسک خشک‌سالی تغییر یافته است. امروزه، در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته مانند آمریکا، کانادا، استرالیا و کشورهای اروپایی، مدیریت ریسک خشک‌سالی جایگزین مدیریت بحران شده است. حتی کشورهایی مانند استرالیا، چین و آفریقای جنوبی نیز این رویکرد را پذیرفته‌اند. در منطقه مدیترانه نیز همکاری‌های منطقه‌ای برای مدیریت یکپارچه خشک‌سالی در حال انجام است (مزیدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Henz et al. 2004). کی از معضلات جدی در بسیاری از مناطق، به‌ویژه آسیا، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی است. در جوامع روستایی، آب آشامیدنی اغلب از منابع آبی محلی تأمین می‌شود که به دلیل خشک‌سالی‌ها و سیلاب‌ها بسیار آسیب‌پذیر هستند. اکوسیستم‌های آبی به‌شدت به تغییرات محیطی حساس‌اند و فشارهای وارده بر آن‌ها می‌تواند به تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک منجر شود. بی‌شک یکی از اکوسیستم‌هایی که تحت تأثیر خشک‌سالی قرار می‌گیرد، بوم نظام‌های آبی کشورها است. همچنین، در مناطقی که مستعد خشک‌سالی هستند، محدودیت‌ها و حساسیت‌های مربوط به منابع آبی بیشتر احساس می‌شود (جندقی و همکاران، ۱۴۰۰). نوسانات بارندگی، از جمله خشک‌سالی و ترسالی، یکی از عوامل مؤثر بر هیدرولوژی منطقه، می‌توانند تغییرات قابل توجهی در وضعیت آب‌های سطحی و زیرسطحی ایجاد کنند. ترسالی با افزایش رواناب و نفوذ آب به درون خاک، به پر شدن سفره‌های آب زیرزمینی و افزایش رطوبت خاک در مناطق غیراشباع کمک می‌نماید (Panda et al. 2009). ایران به‌واسطه موقعیت جغرافیایی خود در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از نظر منابع آبی در مقایسه با میانگین جهانی در وضعیت نامطلوبی قرار دارد (Van Loon and Lahha, 2016). در حال حاضر، بیش از نیمی از آب مورد نیاز کشور از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که این میزان برداشت با میزان تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی همخوانی ندارد. طی سال‌های اخیر، کاهش چشمگیر کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی در اکثر مناطق ایران مشاهده شده است و تراز آبی اغلب آبخوان‌ها منفی شده است (میر نظامی و باقری، ۱۳۹۶). وجود آب سالم به‌عنوان یک پیش‌نیاز اساسی، برای حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و سیاسی کشور حیاتی است؛ بنابراین، پایش و کنترل مستمر آب‌های زیرزمینی جهت مصارف گوناگون، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است تا بتوان از آب با کیفیت مناسب برای مصارف مختلف بهره‌برداری کرد. شناخت عمیق عوامل مؤثر بر تغییر کیفیت منابع آب، می‌تواند در تدوین استراتژی‌های جامع مدیریت حوزه‌های آبخیز مؤثر واقع شده و به حفاظت از این منابع ارزشمند کمک شایانی کند (Xu et al. 2016). با توجه به اینکه شاخص‌های هواشناسی رایج‌ترین ابزار برای بررسی خشک‌سالی هستند و محاسبات آن‌ها به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متکی است، محدودیت‌هایی مانند پراکندگی نامناسب ایستگاه‌ها در ایران و کمبود داده‌ها، دقت این روش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی، ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی به روش‌های میدانی نیز با مشکلاتی مانند محدودیت‌های زمانی و مکانی و هزینه‌های بالا روبرو است (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). در مقابل این روش فن‌آوری‌های سنجش از دور و سامانه‌های گوگل ارث انجین قادر به جمع‌آوری از نواحی وسیع به‌وسیله سنجنده‌های مختلف است. تغییرات تدریجی پوشش گیاهی در اثر خشک‌سالی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابل‌ردیابی است. با پایش مداوم این تصاویر و تحلیل

داده‌ها توسط الگوریتم‌های پیشرفته، می‌توان کاهش پوشش گیاهی را به‌عنوان نشانه‌ای اولیه از وقوع خشک‌سالی شناسایی کرده و به‌موقع نسبت به آن هشدار داد. عوامل اقلیمی همچون بارندگی، تبخیر و ترقق، نقش تعیین‌کننده‌ای در وضعیت پوشش گیاهی دارند. در این میان، خشک‌سالی به‌عنوان یک ناهنجاری اقلیمی، می‌تواند اثرات مخربی بر پوشش گیاهی داشته باشد (Ichii et al. 2009). تاکنون مطالعات زیادی در زمینه ارتباط پوشش گیاهی با خشک‌سالی انجام شده است برای مثال، (Hayes et al. 2020)، در پژوهشی به کمک شاخص‌های SPI و پالمر به ارزیابی خشک‌سالی در ایالت کلرادو آمریکا پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شاخص SPI قادر به تشخیص زمان شروع خشک‌سالی و پیشرفت آن است. (Steineman, 2020)، شش کلاس شدت خشک‌سالی از خشک تا مرطوب را برای دو روش پالمر و بارش استاندارد شده تعیین و برای تعیین احتمال وضعیت پایدار و دوام هریک از طبقه‌ها از زنجیره مارکوف استفاده نمود. نتایج مطالعات نشان داد که نمایه بارش استاندارد کارایی بیش‌تری نسبت به نمایه پالمر دارد. (Loukas et al. 2022) در پژوهشی اثرات تغییر اقلیم بر شدت خشک‌سالی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شدت خشک‌سالی منطقه وسیع تسلا یونان پرداختند و جهت بررسی از داده‌های ۵۰ ایستگاه هواشناسی طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۰-۱۳۹۰) استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که در تمامی بخش‌های این منطقه که از تفاوت اقلیمی نیز برخوردارند، در بازه‌های مختلف زمانی (بر اساس شاخص SPI) افزایش شدت خشک‌سالی رخ داده است. (Mukherjee et al. 2022)، به‌منظور پایش خشک‌سالی منطقه چتیسگر هند از شاخص‌های VHI و NDVI در طول سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شرایط خشک‌سالی شدید در چتیسگر در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به‌طور عمده وجود داشته است. همچنین همبستگی زیادی بین SPI و VHI، همبستگی ضعیفی بین SPI و شاخص NDVI وجود دارد که این شاخص‌ها را برای مطالعه پایش خشک‌سالی مناسب می‌کند. (Sruthi and Aslam, 2023)، به‌منظور تجزیه و تحلیل خشک‌سالی کشاورزی در منطقه رایچور هند با استفاده از شاخص NDVI و LST سنجنده مودیس مشخص گردید که ترکیبی از NDVI و LST اطلاعات بسیار مفیدی را برای پایش خشک‌سالی کشاورزی فراهم می‌کند. در ایران نیز حنفی و همکاران (۱۳۹۱)، به تحلیل خشک‌سالی‌های استان تهران با استفاده از شاخص SPI پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های استان به ترتیب ۲۹، ۳۰ و ۴۱ درصد است که این بدین معنی است که در بیش‌تر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد. در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک و مرطوب بسیار به هم نزدیک است. ظهیری و همکاران (۱۳۹۳)، جهت ارزیابی ژدیده‌های ترسالی و خشک‌سالی در استان خراسان با استفاده از نمایه‌های SPI، PNPI و NITZCHE پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که شاخص SPI به دلیل داشتن قابلیت‌های بیش‌تر در تفکیک دقیق‌تر طبقه‌ها در پدیده‌های ترسالی و خشک‌سالی به‌عنوان بهترین شاخص در استان خراسان انتخاب شد. همچنین نواحی جنوب و جنوب غربی استان خراسان رضوی و قسمت‌های شمال و شمال غربی خراسان جنوبی در وضعیت خشکی شدیدتری قرار دارند. بینش و همکاران (۱۳۹۵)، در پژوهشی به بررسی و تحلیل روند تغییرات بارش و تعیین وضعیت خشک‌سالی و ترسالی حوضه آبریز کن پرداخته و به این نتیجه دست یافتند که این حوضه طی دهه ۱۳۷۰ با خشک‌سالی خفیف و متوسطی مواجه بوده است اما پس از آن، روند خشکی و ترسالی

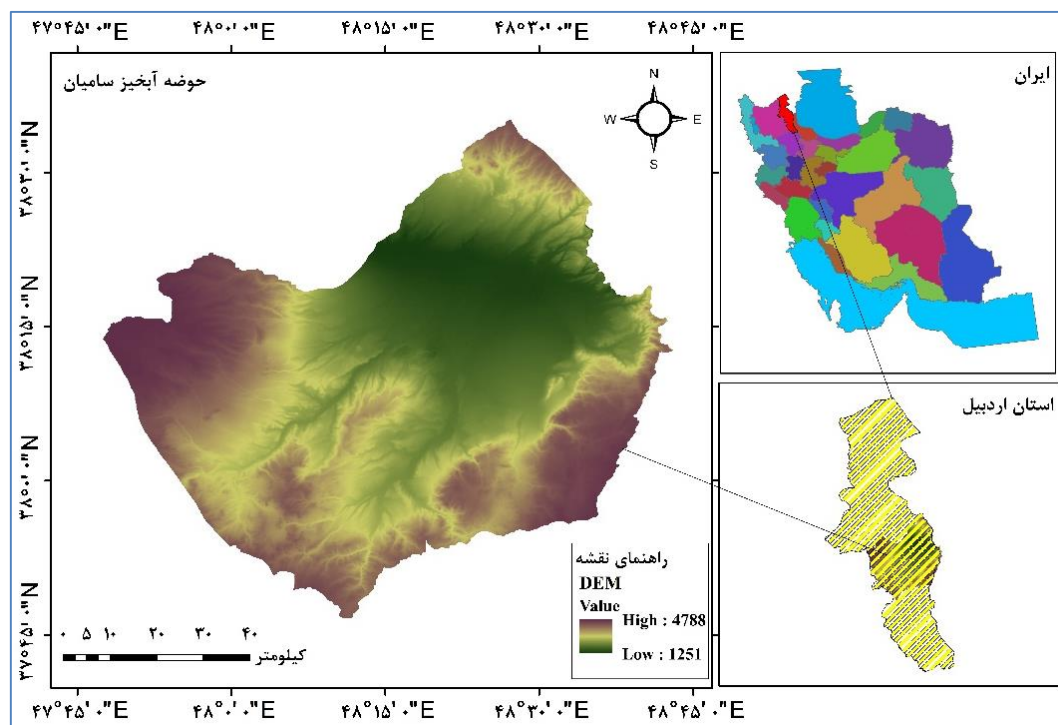
یکنواخت نبوده و از سالی به سال دیگر متغیر است و در مجموع تعداد سال‌های خشک بیشتر از سال‌های تر بوده است. در پژوهشی دیگر فیروزی و طاووسی بررسی حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI به خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک در دشت سیستان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که در سال نمونه خشک (۲۰۱۱-۲۰۱۰) تفاوت قابل توجهی بین این دو شاخص در طبقه پوشش گیاهی نرمال مشاهده شد. در حالی که در زمان ترسالی (۲۰۰۶-۲۰۰۵) شاخص EVI مقداری نتایج بهتری را در اختیار گذاشته است. کریمی و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی کارایی شاخص‌های پوشش گیاهی در تحلیل خشک‌سالی کشاورزی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور در حوزه آبخیز کرخه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که تغییرات شاخص‌های NDVI، EVI و VCI در ایستگاه‌های مورد مطالعه، در طول دوره آماری تقریباً یکسان است. به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار پوشش گیاهی در سال ۱۳۷۹ و در ایستگاه دهنو، بیش‌ترین مقدار پوشش گیاهی در سال ۱۳۸۰ و در ایستگاه هلیان سیمره مشاهده شد؛ اما بررسی ZSI نشان داد از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵ اکثر ایستگاه‌ها با خشک‌سالی مواجه بوده‌اند. همچنین همبستگی پیرسون بین میانگین شاخص‌های پوشش گیاهی با میانگین ZSI به ترتیب برابر با ۰/۷۰۶، ۰/۷۲۵ و ۰/۷۶۵ است که هر سه شاخص پوشش گیاهی با شاخص ZSI در سطح یک درصد معنی‌دار هستند. زندی و همکاران (۱۴۰۰)، جهت ارزیابی خشک‌سالی و تأثیرات آن بر پوشش گیاهی در مناطق جنوبی ایران را مورد مطالعه قرار داده و به این نتایج دست یافتند که پوشش گیاهی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ به میزان قابل توجهی کاهش یافته و به اراضی بایر و یا پوشش گیاهی ضعیف تبدیل شده است. از طرفی بین شاخص‌های مذکور همبستگی گرفته شد. نتایج حاصل از همبستگی بیانگر روند کاهشی است و بیانگر کاهش میزان پوشش گیاهی با افزایش میزان خشک‌سالی می‌باشد. جندقی و همکاران (۱۴۰۰)، تأثیر دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آبخوان در بخش شرقی دشت گرگان پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر این بود که کیفیت آب چاه‌های نیمه عمیق، در هر دو بخش کشاورزی و شرب به‌مراتب بهتر از چاه‌های عمیق است. همچنین نتایج آزمون F نشان داد که با احتمال ۹۵ درصد بین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در آبخوان نیمه عمیق در دوره ترسالی و خشک‌سالی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. راثی نظامی و همکاران (۱۴۰۱)، توسعه شهری و ویژگی‌های خشک‌سالی هیدرولوژیک کوتاه و میان‌مدت در حوضه سامیان استان اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاربری‌های اراضی کشاورزی و مسکونی افزایش یافته است و شاخص SDI یک‌ماهه در همه ایستگاه‌ها نشان‌دهنده افزایش خشک‌سالی در دوره‌های مختلف است. بیش‌ترین تعداد ماه‌های خشک مربوط به دوره آخر (۱۳۸۷-۱۳۹۶) ایستگاه سامیان است. موغلی (۱۴۰۱)، به تحلیل فضایی خشک‌سالی با استفاده از تکنیک سنجش از دور در حوضه مهارلو بختگان پرداخته و به این نتیجه دست یافت که در سال‌های مورد مطالعه مساحت پوشش گیاهی در منطقه کاهش یافته است. از دلایل این تغییرات می‌توان به کاهش بارندگی‌های زمستانه، تغییرات کاربری اراضی، افزایش چرای خارج از فصل و بیرویه اشاره کرد. در واقع نتایج بیانگر وجود خشک‌سالی در منطقه است. همچنین برای بررسی خشک‌سالی در حوضه مهارلو بختگان، از داده‌های هواشناسی برای برآورد شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و تحلیل آمار فضایی، از آمار ۶ ایستگاه منتخب سینوپتیک (شیراز، زرقان، سد درودزن، اقلید،

نی‌ریز و آباد) طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. نتایج شاخص موران در مورد خشک‌سالی نشان داد که مقادیر مربوط به سال‌های مختلف در طول دوره آماری دارای ضریب مثبت و نزدیک به یک می‌باشند که نشان‌دهنده این است که داده‌های شاخص خشک‌سالی SPI دارای الگوی خوشه‌ای می‌باشد؛ بنابراین هدف از این پژوهش بررسی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی و ارتباط آن با شاخص‌های پوشش گیاهی حوضه آبخیز سامیان در استان اردبیل است.

داده‌ها و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سامیان جزء مجموعه حوضه‌های رودخانه ارس بوده و مساحتی معادل ۴۲۰۰ کیلومترمربع دارد. این حوضه در محدوده جغرافیایی بین ۴۷ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. قسمت‌های مرکزی حوضه از واحدهای اراضی دشت‌های دامنه‌ای تشکیل شده که بخشی از فعالیت‌های کشاورزی استان اردبیل در این قسمت متمرکز است. ارتفاع بلندترین نقطه (قله کوه سبلان) نسبت به سطح دریا برابر با ۴۸۱۱ متر و ارتفاع پست‌ترین نقطه واقع در پل سامیان برابر ۱۲۰۰ متر است (ایزدی فرد و همکاران، ۱۴۰۲). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سامیان در سطح کشور و استان اردبیل ارائه شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی خلخال در ایران و استان اردبیل

روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور ارزیابی ارتباط میان شاخص‌های خشک‌سالی و شاخص‌های طیفی در حوضه آبخیز سامیان در

دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴، ابتدا وضعیت پهنه‌بندی و روند تغییرات هر شاخص در طول این دوره بررسی شد. در گام نخست، برای تحلیل پوشش گیاهی از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ در بستر گوگل ارث انجین استفاده گردید. باندهای B5 (نزدیک به مادون قرمز - NIR)، B4 (قرمز - RED) و B2 (آبی - BLUE) برای محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI که به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی وضعیت پوشش سبز گیاهی است، انتخاب شدند. به‌منظور کاهش اثرات خاک بر نتایج، شاخص SAVI (که از باندهای B5 و B4 استفاده می‌کند) نیز محاسبه شد که این شاخص تصحیحی برای خاک‌های دارای پوشش گیاهی ضعیف یا با پوشش گیاهی پراکنده محسوب می‌شود. همچنین شاخص NDBI با استفاده از باندهای B6 (مادون قرمز میانی - SWIR) و B5 محاسبه گردید تا به‌طور خاص وضعیت مناطق ساخته‌شده یا بایر را که نشانگر تأثیرات خشک‌سالی و تغییر کاربری هستند، مشخص نماید. پس از ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی، به‌منظور تحلیل خشک‌سالی از سه شاخص کلیدی خشک‌سالی، شامل VCI (شاخص وضعیت پوشش گیاهی)، TCI (شاخص وضعیت دما) و SPI (شاخص بارش استاندارد شده) بهره گرفته شد. شاخص VCI با استفاده از داده‌های کامپوزیت بازتاب سطحی MODIS/006/MOD09GA و مقادیر شاخص NDVI محاسبه شد تا تغییرات سلامت و تراکم پوشش گیاهی را در ارتباط با خشک‌سالی بررسی کند. شاخص TCI نیز با توجه به دمای سطح زمین (LST) که از محصول روزانه MODIS/MOD11A1 V6.1 استخراج شد، برای ارزیابی وضعیت گرمایی منطقه و تأثیرات دمایی ناشی از خشک‌سالی بر پوشش گیاهی به کار رفت. برای شاخص SPI، از محصول بارش شبه جهانی PERSIANN-CDR که داده‌های بارشی روزانه را ارائه می‌دهد استفاده شد تا نوسانات بارش در دوره‌های زمانی مختلف ارزیابی و شدت و طول دوره خشک‌سالی مشخص گردد. در نهایت، به‌منظور درک رابطه میان خشک‌سالی و وضعیت پوشش گیاهی، همبستگی شاخص‌های خشک‌سالی VCI، TCI و SPI با شاخص‌های طیفی NDVI، SAVI و NDBI محاسبه شد.

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI): پوشش گیاهی در واقع یک عامل کلیدی در کنترل فرسایش خاک در حوضه آبریز مشگین چای عمل می‌کند. ریشه‌های گیاهان با ایجاد یک شبکه مستحکم در خاک، از فرسایش آن جلوگیری کرده و همچنین تاج پوشش گیاهی با جذب انرژی قطرات باران و کاهش سرعت جریان آب سطحی، میزان فرسایش را به حداقل می‌رساند. مطالعات نشان داده‌اند که در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم، حتی در شرایط بارندگی شدید و شیب‌های تند، فرسایش خاک بسیار ناچیز است. در مقابل، زمین‌های فاقد پوشش گیاهی به دلیل شدت برخورد قطرات باران مستعد فرسایش بوده و منجر به افزایش رسوب در رودخانه‌ها و خسارات ناشی از آن می‌شوند. یکی از پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فن‌آوری سنجش از راه دور به دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به‌صورت (رابطه ۱) است.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad \text{رابطه ۱}$$

شاخص NDVI که برای سنجش انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین و تعیین انواع پوشش گیاهی به کار می‌رود، مقادیر بین -۱ تا +۱ را در برمی‌گیرد. این شاخص بر اساس تفاوت بین انعکاس در باند مادون قرمز نزدیک (IR)

و باند مرئی قرمز (R) محاسبه می‌شود. پوشش گیاهی سالم به دلیل فعالیت فتوسنتزی، انعکاس بیشتری در باند IR نسبت به باند R دارد و در نتیجه مقادیر مثبت NDVI را ایجاد می‌کند. برعکس، مناطق فاقد پوشش گیاهی مانند مناطق شهری و اراضی بایر و همچنین ابرها و منابع آبی، معمولاً مقادیر NDVI نزدیک به صفر یا منفی را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست‌توده سطح زمین دارد (Armin et al. 2020).

شاخص SAVI: این شاخص توسط Huete در سال ۱۹۸۸ معرفی شد، یک شاخص گیاهی اصلاح شده است که برای بهبود برآورد پوشش گیاهی در شرایط مختلف خاک، به‌ویژه خاک‌های روشن و تیره، طراحی شده است. این شاخص بر اساس نسبت باندی طراحی شده و در مقایسه با شاخص‌های قبلی، خطوط هم‌سبزینه آن در ناحیه منفی NIR و منفی IR یکدیگر را قطع می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود شاخص SAVI نسبت به تغییرات پس‌زمینه خاک حساسیت کمتری داشته باشد و برای تشخیص بهتر پوشش گیاهی مناسب‌تر باشد. در واقع، SAVI با افزودن یک عامل اصلاحی به شاخص NDVI، تأثیر روشنایی خاک را کاهش می‌دهد. این شاخص در مطالعات اولیه خود بر روی تغییرات پوشش گیاهی پنبه و سایبان‌ها در خاک‌های با زمینه روشن و تیره مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که SAVI می‌تواند تغییرات پوشش گیاهی را با دقت بیشتری نسبت به شاخص‌های دیگر برآورد کند. این شاخص به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$SAVI = \frac{NIR-R}{NIR+R+L}(1+L) \quad \text{رابطه ۲}$$

L در این فرمول فاکتور تصحیح بوده و از صفر برای منطقه با پوشش گیاهی بالا تا ۱ برای مناطق با پوشش گیاهی خیلی کم تغییر می‌کند و برای مناطق با پوشش گیاهی متوسط ۰/۵ است. (1+L) در این فرمول باعث می‌شود که تغییرات شاخص پوشش گیاهی ۱- تا ۱+ باشد و اگر فاکتور L به صفر برسد شاخص SAVI برابر شاخص NDVI خواهد بود.

شاخص نرمال شده تفاوت شاخص ساختمان (NDBI) شاخص دیگری است که برای شناسایی مناطق شهری و سطوح مصنوعی به کار می‌رود. این شاخص بر اساس نسبت بازتابندگی در باند مادون قرمز میانی (MIR) به بازتابندگی در باند مادون قرمز نزدیک NIR محاسبه می‌شود (He et al. 2010). مقادیر آن از ۱- تا ۱+ متغیر است که در آن مقادیر مثبت NDBI نشان‌دهنده وجود سطوح مصنوعی مانند ساختمان‌ها و آسفالت و مقادیر منفی نشان‌دهنده وجود پوشش گیاهی یا آب است (Ranagalage et al. 2018). این شاخص با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$NDBI = \frac{\rho_{MIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{MIR} + \rho_{NIR}} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه PMIR و PNIR به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر بازتابندگی برای باندهای مادون قرمز میانی و مادون قرمز نزدیک تصاویر لندست هستند.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

این شاخص به وسیله دامنه‌ای از مقادیر NDVI بلندمدت برآورد شده و نرمال می‌شود. دامنه این شاخص از ۰ تا ۱۰۰ متغیر است. مقادیر کم شرایط تنش گیاهی، مقادیر میانه شرایط متوسط و مقادیر بالا شرایط بهینه را نشان می‌دهد (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۵). این شاخص طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$VCI = 100 * \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ به ترتیب میانگین حداکثر بلندمدت و میانگین حداقل بلندمدت، $NDVI_i$ مقدار NDVI در گام زمانی i برای هر پیکسل است.

شاخص وضعیت دما (TCI)

دمای سطح زمین (LST) اندازه‌گیری شده از دمای روشنایی برای ارزیابی TCI مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این شاخص تنش پوشش گیاهی مرتبط با دما و رطوبت شدید را اندازه‌گیری می‌کند (Singh et al. 2020). همچنین شاخص TCI را بر اساس دمای روشنایی تعیین کرده است. این شاخص با استفاده از LST ماهانه MOD11C3 به صورت رابطه (۵) استخراج خواهد شد:

رابطه ۵

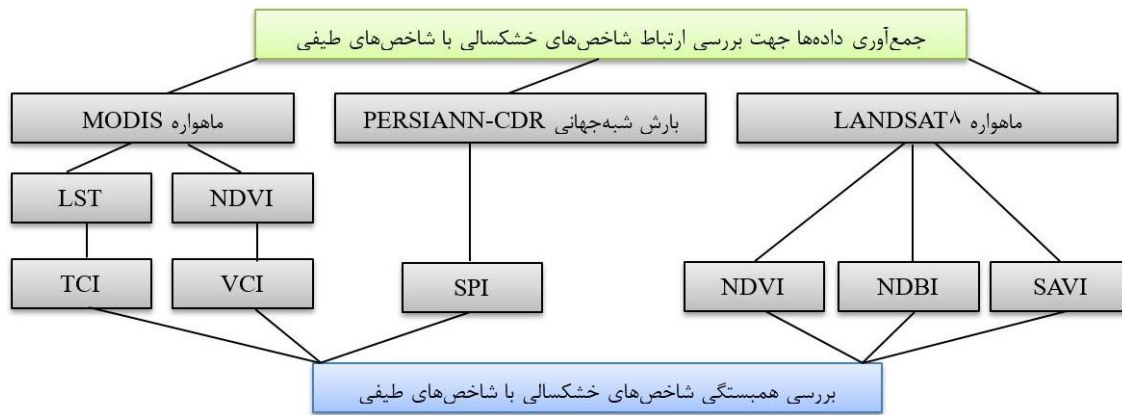
$$TCI = \left(\frac{LST_{max} - LST_1}{LST_{max} - LST_{min}} \right) * 100$$

LST_1 ، LST_{min} و LST_{max} به ترتیب LST ماه خاص، حداقل و حداکثر LST را طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۰ نشان می‌دهند. مقادیر TCI بین ۰ تا ۱۰۰ است. مقادیر بالاتر TCI بیانگر شرایط تنش پوشش گیاهی است (Singh et al. 2020).

شاخص استاندارد بارش (SPI)

SPI بر اساس داده‌های بارش ماهانه بلندمدت است و با برازش سری‌های زمانی به یک توزیع احتمال محاسبه می‌شود (Mckee et al. 2018). این توزیع در نهایت به توزیع نرمال تبدیل می‌شود تا ناهنجاری‌های بارندگی را به یک محدوده امتیازی تبدیل کند. در این مطالعه، SPI برای دوره‌های یک و سه ماهه با استفاده از برنامه SPI_SL_6 (دانلود از http://drought.unl.edu/archive/Programs/SPI/spi_sl_6.exe) محاسبه خواهد شد. هدف از محاسبات مقیاس‌های زمانی مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی با توجه به رویدادهای کوتاه‌مدت و بلندمدت خشک‌سالی خواهد بود (Sehgal et al. 2017).

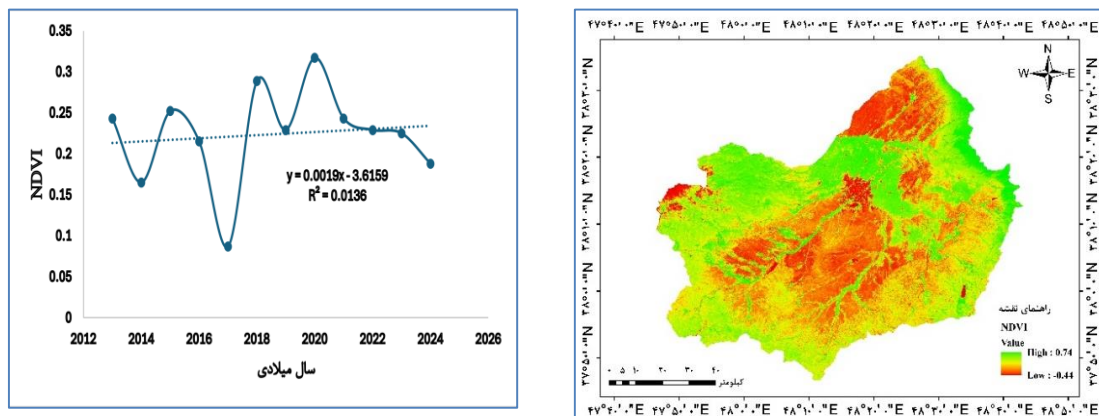
در شکل (۲) نمودار جریانی مراحل انجام پژوهش ارائه شده است.



شکل ۲: نمودار جریان‌ی پژوهش

یافته‌های پژوهش

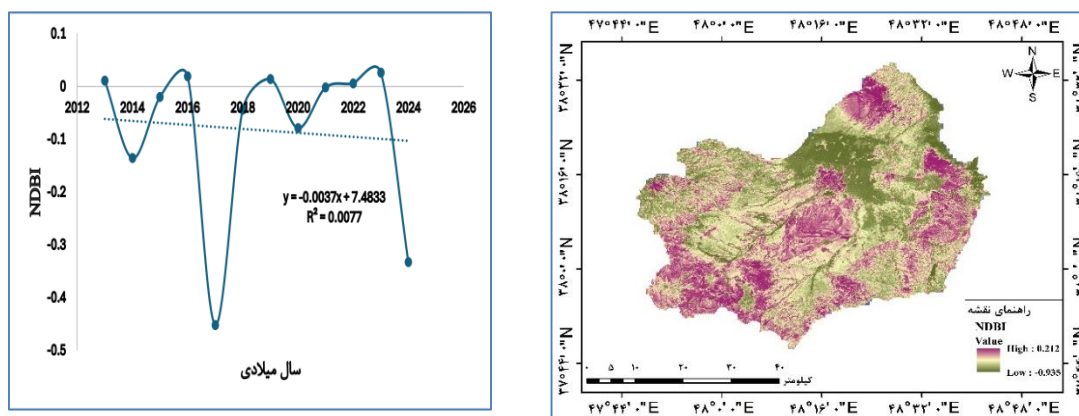
برای درک وضعیت پوشش گیاهی حوزه آبخیز سامیان نقشه NDVI برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۴ ترسیم گردید. در شکل (۳ الف)، وضعیت این شاخص نشان می‌دهد در شمال حوزه و نواری از سمت شرق و حتی غرب آن تراکم پوشش گیاهی به اوج خود رسیده و سبزی‌نگی آن با بیشینه مقدار ۰/۷۴ در مناطق مذکور قابل نمایان است. در شمال شرق و بخش مرکزی حوزه مورد مطالعه از تراکم پوشش گیاهی کاسته شده و کمینه شاخص با مقدار ۰/۴۴- نشان می‌دهد این مناطق عاری از گیاهان و درختان بوده است. در شکل (۳ ب)، روند این شاخص در طول دوره مورد مطالعه شیب نسبتاً ملایم صعودی را نشان داده و به‌طور میانگین بین بازه ۰/۰۵ تا ۰/۳ در نوسان بوده و هرگز به‌طور متوسط مقادیر منفی را تجربه نکرده است هرند که این روند صعودی با توجه به مقدار R^2 ، ۰/۱۳ فاقد روند معنی‌دار است.



شکل ۳: الف) نقشه پهنه‌بندی شاخص NDVI، ب) روند میانگین سالانه NDVI در دوره سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۴

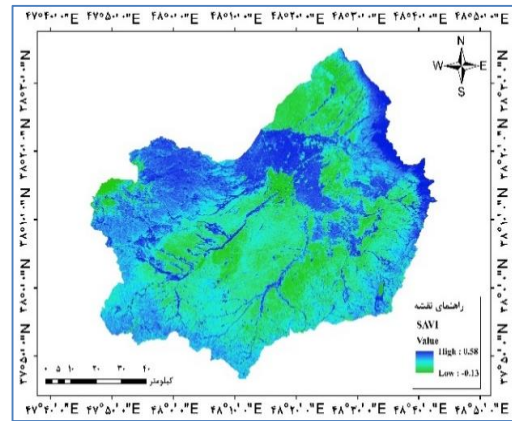
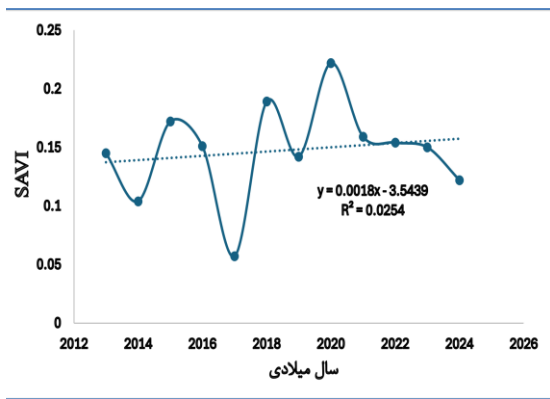
در شکل (۴ الف)، نقشه میانگین پهنه‌بندی شاخص NDBI برای حوزه آبخیز سامیان در طی سال‌های آماری ۲۰۱۳-۲۰۲۴ نمایش داده شده است. پهنه‌های آبی‌رنگ در با بیشینه مقدار ۰/۲۱ NDBI، به غیر از قسمت‌های شمال حوزه در اکثر نواحی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده سطوح ساخته‌شده و غیرقابل نفوذ هستند اما در بخش شمال حوزه مقدار این شاخص نزدیک به ۱- رسیده که بیانگر تراکم پوشش گیاهی و زمین‌های طبیعی بوده که به سمت

اطراف و نواحی پایین‌تر از شدت آن کاسته شده است. در شکل (۴ ب)، روند این شاخص در دوره سال‌های مورد مطالعه به تصویر کشیده شده است همان‌طور که مشخص است با شیب نسبتاً کمی رو به پایین بوده و این حالت بیانگر کاهش سطوح ساخته‌شده و توسعه شهری و افزایش پوشش گیاهی یا منابع طبیعی است. این شاخص تنها در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۷ تغییرات محسوس رو به پایینی داشته و در باقی سال‌ها بین ۰ تا ۰/۱- در نوسان بوده است لذا با توجه به مقدار R^2 که برابر با ۰/۰۰۷ بوده در می‌یابیم تغییرات NDBI در طول زمان معنی‌دار نبوده است.



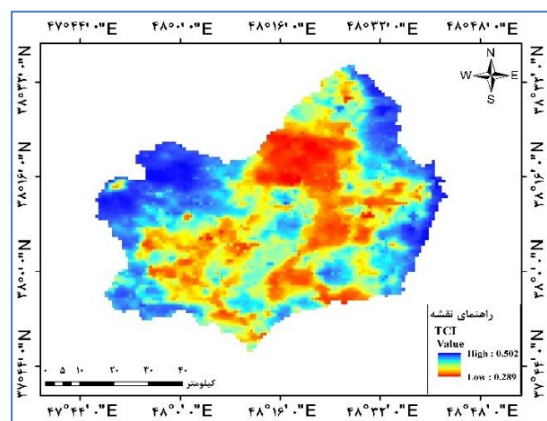
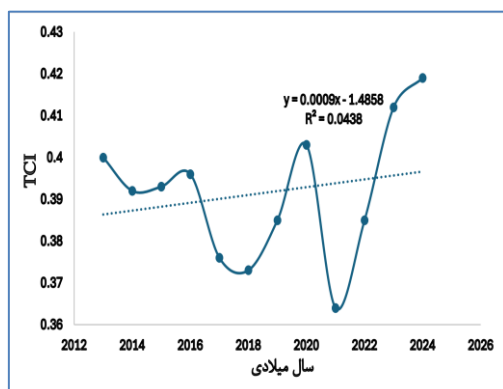
شکل ۴: الف) نقشه پهنه‌بندی شاخص NDBI، ب) روند میانگین سالانه شاخص NDBI در دوره سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۴

شکل (۵ الف)، نمایی از میانگین شاخص SAVI را برای حوضه آبخیز سامیان در دوره آماری مورد مطالعه نشان می‌دهد. مشخص است خاک‌های حاصلخیز و به‌تبع آن شرایط مناسب برای رشد گیاهان در قسمت‌های شمالی و نوار شرقی حوضه مورد مطالعه وضعیت نسبتاً بهتری داشته و بیشینه شاخص مذکور در این مناطق به مقدار ۰/۵۸ رسیده است. عکس این وضعیت در شمال شرق، مرکز و بخش‌های جنوبی مشاهده می‌شود و شرایط حادی برای رشد گیاهان حاکم بوده و خاک این مناطق فاقد رطوبت لازم و کاملاً خشک بوده است. در شکل (۵ ب)، روند میانگین شاخص نامبرده برای دوره مورد مطالعه آورده شده است. نوسان این شاخص بین محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۲۲، تلورانس داشته و در کل یک شیب ملایم صعودی را نشان داده است ضریب R^2 این روند فاقد روند معنادار بوده لذا این روند صعودی ضعیف را تنها یک نوسان مثبت می‌توان در نظر گرفت و در این بازه مورد مطالعه وضعیت رشیت رشد گیاهان و خاک مرطوب کمی بهبود یافته است.



شکل ۵: الف) نقشه پهنه بندی شاخص SAVI، ب) روند میانگین سالانه شاخص SAVI در دوره سال های ۲۰۱۳-۲۰۲۴

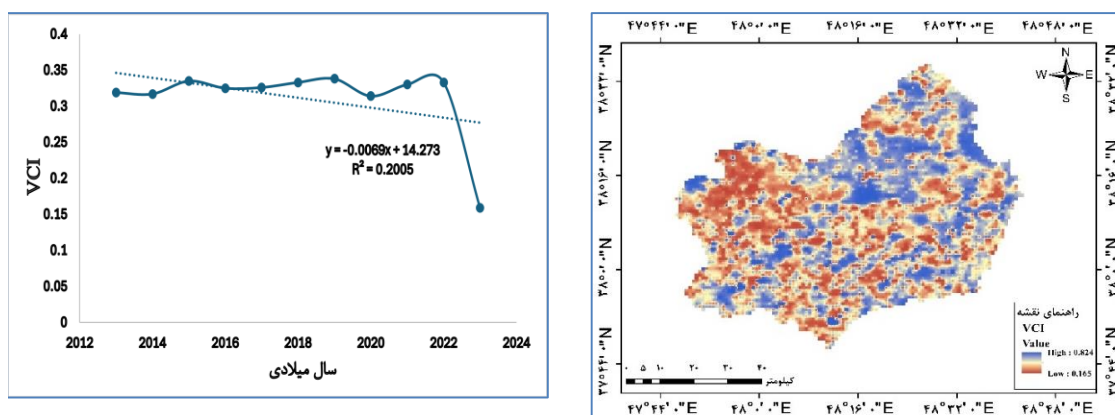
نقشه پهنه بندی میانگین شاخص TCI برای دوره سال های مورد مطالعه در شکل (۶ الف)، نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است در شمال حوضه آبخیز سامیان کمینه شاخص TCI با مقدار ۰/۲۸، نشان می دهد شرایط خشکی بر این مناطق مستولی گشته و تنش حرارتی به بیشینه خود رسیده است این وضعیت در مرکز حوضه و قسمت های جنوبی نیز حاکم بوده و مستعد خشکی شدیدی می باشد. در نقطه مقابل در شمال غرب و در نوار شرقی و غربی حوضه مورد مطالعه شرایط به نسبت متعادل تر گشته و مقدار این شاخص به بیشینه خود تا میزان ۰/۵۰، رسیده است بنابراین انتظار شرایط مطلوب بر این مناطق می توان داشت و این شرایط مرطوب برای رشد گیاهان مناسب بوده است. در شکل (۶ ب)، روند میانگین شاخص مذکور نوسان شدیدی را نشان داده است و به طور میانگین در کل حوضه در سال ۲۰۲۱ مقدار TCI به کمینه خود در طول دوره مورد مطالعه رسیده و بعد از آن سه سال پشت سر هم به سمت شرایط مطلوب تری خیز برداشته است و به همین خاطر روند در حالت کلی صعودی شده ولی با توجه به ضریب R^2 که برابر با مقدار ۰/۴۳ بوده این روند را نمی توان معنادار تلقی کرد.



شکل ۶: الف) نقشه پهنه بندی شاخص TCI، ب) روند میانگین سالانه شاخص TCI در دوره سال های ۲۰۱۳-۲۰۲۴

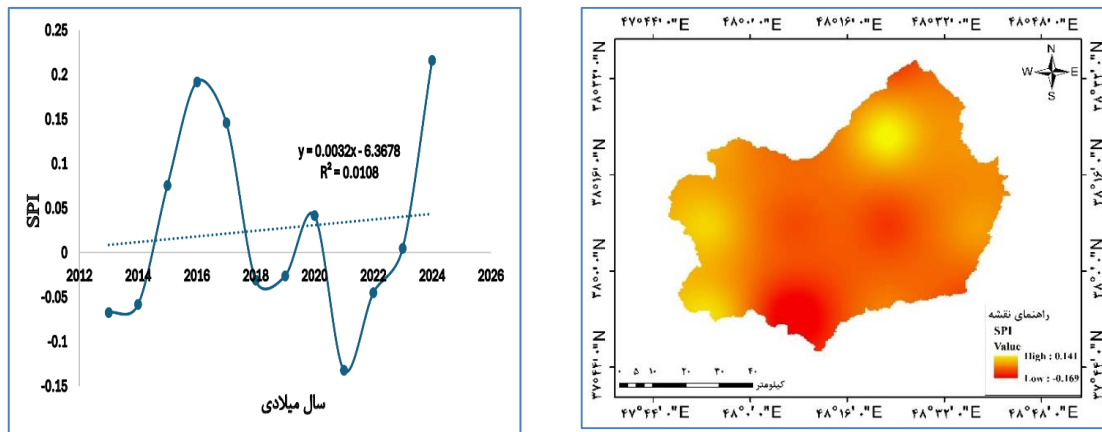
نقشه میانگین پهنه بندی شاخص VCI برای حوضه مورد مطالعه در شکل (۷ الف)، ترسیم گشته است. مناطق مطلوب و رطوبت مناسب برای رشد گیاهان با بیشینه مقدار ۰/۸۲، در شمال و بخش هایی به صورت پراکنده در جنوب و

شمال شرق حوضه مورد مطالعه مشاهده می‌شود اما در قسمت غرب حوضه بیش‌تر مناطق رطوبت کافی را برای رشد گیاه نداشته و سلامت پوشش گیاهی وضعیت نامناسبی داشته است مقدار شاخص VCI در این مناطق به کمینه خود یعنی $0/16$ ، رسیده است. روند میانگین شاخص VCI در کل حوضه و در دوره مورد مطالعه در شکل (۷ ب)، نمایش داده شده است و همان‌طور که مشخص است مقدار این شاخص در سال‌های 2013 تا 2022 نوسان ضعیفی بین محدوده $0/3$ تا $0/35$ داشته است. افت شدید این شاخص در سال 2023 باعث شده شیب روند کلی نزولی شود هر چند که مقدار ضریب R^2 ، یعنی $0/20$ درصد این روند نزولی را معنادار تلقی نکرده است.



شکل ۷: الف) نقشه پهنه‌بندی شاخص VCI، ب) روند میانگین سالانه شاخص VCI در دوره سال‌های $2013-2024$

بر اساس شکل (۸ الف)، نقشه شاخص SPI حوضه آبخیز سامیان برای دوره مورد مطالعه مشاهده می‌کنیم وضعیت حوضه مورد مطالعه جزء طبقه نرمال قرار گرفته و مشخص است در نواحی که پوشش گیاهی به‌وفور موجود بوده به‌خصوص در شمال شرق و نوار غربی حوضه مورد مطالعه مقدار SPI به بیشینه خود ($0/14$) رسیده است که نشان‌دهنده وضعیت مرطوبی بر این مناطق بوده است. درحالی‌که در مناطق مرکزی حوضه که بیش‌تر جزو مناطق بایر و خشک بوده مقدار شاخص SPI نیز به پایین‌ترین حد خود به مقدار ($-0/16$) رسیده و شرایط خشکی بر مناطق مذکور حاکم بوده است؛ اما روند شاخص SPI برای دوره مورد مطالعه در شکل (۸ ب)، نشان می‌دهد که ۶ سال دوره ترسالی و ۶ سال دوره خشک‌سالی بر منطقه حاکم بوده است. بیش‌ترین دوره توالی ترسالی به‌صورت سه سال از 2015 تا 2017 اتفاق افتاده ولی برای خشک‌سالی از دو سال بیش‌تر این اتفاق رقم نخورده است. این شاخص نوسانات شدیدی را نشان داده و در سال‌های 2016 و 2024 ترسالی به اوج خود با مقدار $0/2$ رسیده و بالعکس در سال 2021 شرایط کاملاً متفاوت بوده است. در مدت دوره مورد مطالعه ترازوی این شاخص به سمت ارقام مثبت سنگینی کرده و شیب صعودی ضعیفی هر چند بدون روند معناداری را حوضه مورد مطالعه تجربه کرده است.



شکل ۸: الف) نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI، ب) روند میانگین سالانه شاخص SPI در دوره سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۴

شاخص TCI، به‌طور کلی تأثیر مثبتی بر شاخص‌های پوشش گیاهی دارد. به‌عنوان مثال، همبستگی مثبت و معناداری بین TCI و NDVI (۰/۱۸۳) و با SAVI (۰/۱۴۶) وجود دارد (جدول ۱). این بدان معناست که افزایش مقدار TCI که شرایط مساعد دمایی را برای رشد گیاه‌نشان داده بنابراین با افزایش آن میزان مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی مذکور نیز افزایش یافته است و به بهبود این شاخص‌ها منجر می‌شود. شاخص TCI با NDBI نیز رابطه مثبت و معناداری (۰/۱۱۶) دارد که نشان می‌دهد در مناطقی که تنش گرمایی بالاتر بوده، مناطق ساخته‌شده گسترش یافته‌اند. شاخص (VCI) نیز همبستگی مثبتی با NDVI (۰/۱۰۲) و SAVI (۰/۱۰۵) دارد و نشان می‌دهد که با بهبود شرایط پوشش گیاهی، وضعیت شاخص‌های NDVI و SAVI نیز بهبود می‌یابد؛ اما رابطه منفی VCI با NDBI (۰/۱۱۷-) بیانگر این است که در شرایط بدتر پوشش گیاهی، احتمالاً مناطق ساخته‌شده گسترش پیدا می‌کنند یا پوشش گیاهی در این مناطق کاهش می‌یابد. در نهایت، شاخص SPI نشان داد با NDVI (۰/۱۷۹) و با SAVI (۰/۱۹۶) رابطه مثبت و معناداری داشته که نشان‌دهنده این است با افزایش بارش و کاهش خشک‌سالی، وضعیت پوشش گیاهی بهبود می‌یابد. علاوه بر این، SPI با NDBI همبستگی منفی (۰/۲۰۹-) دارد که نشان می‌دهد در شرایط خشک‌سالی، مناطق ساخته‌شده بیشتر گسترش می‌یابند یا پوشش گیاهی در آن مناطق کاهش پیدا می‌کند؛ به عبارت دیگر، خشک‌سالی به گسترش مناطق ساخته‌شده و کاهش پوشش گیاهی دامن می‌زند.

جدول ۱: همبستگی شاخص‌های خشک‌سالی با شاخص‌های پوشش گیاهی

NDBI	NDVI	SAVI	Pearson Correlation	Drought Indexs
۰/۱۱۶**	۰/۱۸۳**	۰/۱۴۶**	R	TCI
-۰/۱۱۷**	۰/۱۰۲**	۰/۱۰۵**	R	VCI
-۰/۲۰۹**	۰/۱۷۹**	۰/۱۹۶**	R	SPI

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ درصد معناداری

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ درصد معناداری.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر بعد از بررسی وضعیت شاخص‌های خشک‌سالی و پوشش گیاهی حوزه آبخیز سامیان در دوره سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۴ ارتباط آن‌ها نیز بررسی شد. نتایج نشان داد شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی مانند NDVI و SAVI به‌طور کلی روند صعودی و نوسانات مثبت ضعیفی داشته‌اند هرچند که این روند مثبت معنادار نبوده‌اند، اما بیانگر بهبود نسبی شرایط گیاهی و رطوبتی حوزه مورد مطالعه بوده؛ به‌خصوص که در شمال و نوار شرقی حوزه، وضعیت پوشش گیاهی بهتر و غنی‌تر از سایر مناطق است. وضعیت شاخص NDBI نشان‌دهنده کاهش تدریجی مناطق ساخته‌شده و گسترش پوشش طبیعی بوده که حاکی از بهبود نسبی در تراکم پوشش گیاهی است. شاخص TCI نشان داد که تنش حرارتی بر بخش‌هایی از شمال و مرکز حوزه آبخیز سامیان مستولی گشته و خشکی در این مناطق باعث کاهش پوشش گیاهی و ایجاد شرایط نامساعد برای رشد گیاهان شده است. این تنش در شمال حوزه به اوج خود رسیده و به‌مرور با کاهش تنش در شمال غرب و نوار شرقی حوزه مذکور، وضعیت نسبی بهبود یافته است همبستگی مثبت و معنادار میان TCI و شاخص‌های گیاهی NDVI و SAVI نشان داد که افزایش مقدار TCI به دلیل شرایط دمایی مناسب، سبب بهبود رشد گیاهان و افزایش سبزی‌نگی شده است همچنین، همبستگی مثبت TCI با NDBI بیانگر این است که در مناطقی با تنش گرمایی بیشتر، مناطق ساخته‌شده نیز توسعه یافته‌اند. بر اساس شاخص VCI، مناطق شمالی و بخش‌های پراکنده در جنوب و شمال شرق حوزه آبخیز سامیان، شرایط مطلوب‌تری برای رشد گیاهان داشته و از رطوبت مناسبی برخوردار بوده است. این در حالی است که مناطق غربی حوزه به دلیل کمبود رطوبت، پوشش گیاهی ضعیف‌تری و وضعیت نامناسبی از نظر سلامت گیاهان قرار داشته است. روند این شاخص اکثراً خنثی بوده ولی در سال‌های اخیر افت محسوسی نشان داده است شاخص VCI نیز با NDVI و SAVI رابطه مثبتی داشته و بهبود وضعیت گیاهی را منعکس می‌کند. در مقابل، همبستگی منفی بین VCI و NDBI نشان داد که با کاهش کیفیت پوشش گیاهی، احتمال گسترش مناطق ساخته‌شده افزایش می‌یابد. نتایج شاخص SPI برای حوزه آبخیز سامیان نشان داد که این حوزه در طول دوره مطالعه در وضعیت کلی نرمال قرار گرفته، با این تفاوت که بخش‌های شمال شرقی و نوار غربی آن از رطوبت نسبی بیشتری نسبت به مناطق مرکزی برخوردار بوده است. شاخص SPI در این دوره نوساناتی با گرایش مثبت ضعیف نشان داده، اما این شیب صعودی به لحاظ آماری معنادار نبوده است. این امر نشان می‌دهد که حوزه سامیان با وجود وقوع دوره‌های ترسالی، همچنان با تهدید دوره‌های خشک‌سالی و تنش آبی به‌ویژه در نواحی مرکزی روبه‌رو است همچنین رابطه مثبت و معنادار شاخص SPI با NDVI و SAVI حاکی از آن است که با افزایش بارش و کاهش خشک‌سالی، شرایط پوشش گیاهی بهبود می‌یابد. همبستگی منفی میان SPI و NDBI نیز نشان می‌دهد که در شرایط خشک‌سالی، پوشش گیاهی کاهش یافته و مناطق ساخته‌شده بیشتری گسترش می‌یابند.

منابع

- ۱- ایزدی فرد، هادی؛ رائی نظامی، سید سعید؛ مصطفی زاده، رئوف؛ خاوریان، حسن (۱۴۰۲): ارتباط تغییر ضریب رواناب سطحی با تغییر کاربری / پوشش اراضی حوضه سامیان استان اردبیل. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۴(۵۱): ۳۴-۴۱.
- ۲- بینش، نگین؛ نیک سخن، محمدحسین؛ سارنگ، امین (۱۳۹۵): تحلیل روند تغییرات بارش و تعیین وضعیت خشک سالی و ترسالی حوضه آبریز کن در سال های اخیر. ترویج و توسعه آبخیزداری، ۴(۱۴): ۹-۱۶.
- ۳- جندقی، نادر؛ قره محمودلو، مجتبی؛ نصیری، ابودر (۱۴۰۰): تأثیر دوره های ترسالی و خشک سالی بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آبخوان در بخش شرقی دشت گرگان. مدیریت بیابان، ۹(۲): ۶۳-۷۸.
- ۴- حنفی، علی؛ خوش اخلاق، فرامرز؛ سلطانی، محسن (۱۳۹۱): تحلیل خشک سالی های استان تهران با استفاده از شاخص SPI و پیش بینی آن بر اساس مدل زنجیره مارکوف. جغرافیا و پایداری محیط، ۳: ۸۷-۱۰۰.
- ۵- رائی نظامی، سعید؛ ایزدی فرد، هادی؛ مصطفی زاده، رئوف؛ خاوریان، حسن (۱۴۰۱): توسعه شهری و ویژگی های خشک سالی هیدرولوژیک کوتاه و میان مدت در حوضه سامیان استان اردبیل. جغرافیا و مطالعات محیطی، ۵۱(۱۳): ۳۴-۱۵.
- ۶- زندی، رحمان؛ انتظار، علیرضا؛ باعقیده، محمد؛ خسرویان، مریم (۱۴۰۰): ارزیابی خشک سالی و تأثیرات آن بر پوشش گیاهی در مناطق جنوبی ایران. پژوهش های دانش زمین، ۱۲(۴۶): ۳۶-۴۹.
- ۷- شمسی پور، علی اکبر؛ علوی پناه، سید کاظم؛ محمدی، حسین (۱۳۸۹): بررسی کار آبی شاخص های گیاهی و حرارتی ماهواره NOAA-AVHRR در تحلیل خشک سالی منطقه کاشان. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۷(۳): ۴۴۵-۴۶۵.
- ۸- ظهیری، عبدالرضا؛ شریفان، حسین؛ ابارشی، فرزانه؛ رحیمیان، مهدی (۱۳۹۳): ارزیابی پدیده های ترسالی و خشک سالی در استان خراسان با استفاده از نمایه های (PNPI, SPI, NITZCHE). آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۸): ۸۵-۸۶.
- ۹- کریمی، مهشید؛ شاهدی، کاکا؛ رضیئی، طیب؛ میر عقوب زاده، میرحسن (۱۳۹۸): بررسی کارایی شاخص های پوشش گیاهی در تحلیل خشک سالی کشاورزی با استفاده از تکنیک سنجش از دور در حوزه آبخیز کرخه. سنجش از دور و GIS ایران، ۱۱(۴): ۲۹-۴۶.
- ۱۰- مزیدی، احمد؛ امیدوار، کمال؛ ملک احمدی، عاطفه؛ حسینی، سید سلام (۱۴۰۰): بررسی خشک سالی و ترسالی ایستگاه هواشناسی اصفهان با استفاده از شاخص SPI. جغرافیا و روابط انسانی، ۴(۱): ۱۱۴-۱۲۶.
- ۱۱- موغلی، مرضیه (۱۴۰۱): تحلیل فضایی خشک سالی با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه مهارلو بختگان). جغرافیای طبیعی، ۵(۱۵): ۷۱-۹۲.
- ۱۲- میرنظامی، سید جلال الدین؛ باقری، علی (۱۳۹۶): ارزیابی سیستم حکمرانی آب در فرایند حفاظت از منابع آب زیرزمینی ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۲): ۳۲-۵۵.

- 13- Hayes, M.J; Svoboda, M.D; Wihite, D.A; Vanyarkho, O.V. (2020): Monitoring The 1996 Drought Using The Standardized Precipitation Index. Bulletin Of American Meteorological Society. 80: Pp. 429-438.
- 14- Henz, G; Turner, S; Badini, W; Kenny J. (2004): Historical Perspective On Colorado. Drought Chapter, 1: Pp. 3-21
- 15- Ichii, K; Kawabata, A; Yamaguchi, Y. (2002): Global Correlation Analysis For NDVI And Climatic Variables And NDVI Trends: 1982-1990. International Journal Of Remote Sensing, 23, Pp. 38-56.
- 16- Loukas, A; Vasiliades, L; Tzabiras, J. (2022): Climate Change Effects On Drought Severity, Advances In Geosciences. 17: Pp. 23-29.
- 17- Mckee, T.B; Doesken, N.J; Kleist, J. (2018): The Relationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales. In Proceedings Of The AMS 8th Conference On Applied Climatology, Anaheim, CA, USA, 17-22 January Pp. 179-184.
- 18- Mukherjee, T; Mukherjee, J; Rahnemaei, N; Mohammadzadeh, A; Sharifan, R. (2022): Drought Monitoring Methodology Based On AVHRR Image And SPOT Vegetation Maps. Water Reasources And Protetion, 3, Pp. 325-334.

- 19- Panda, D.K; Mishra, A; Jean, S.K; James, B.K; Kumar, A. (2007): The Influence Of Drought And Anthropogenic Effects On Groundwater Levels In Orissa. India. *Hydrology*, 343(3), Pp. 140-153.
- 20- Sehgal, V; Sridhar, V; Tyagi, A. (2017): Stratified Drought Analysis Using A Stochastic Ensemble Of Simulated And In-Situ Soil Moisture Observations. *Journal Of Hydrology*, 545: Pp. 226–250.
- 21- Singh, S; Bhardwaj, A; Verma, V. (2020) Remote Sensing And GIS Based Analysis Of Temporal Land Use/Land Cover And Water Quality Changes In Harike Wetland Ecosystem, Punjab, India. *Journal Of Environmental Management*, 262: Pp. 11035.
- 22- Sruthi, S; Mohammed Aslam, M. A. (2023): Agricultural Drought Analysis Using The NDVI And Land Surface Temperature Data; A Case Study Of Raichur District. *Aquatic Procedia*, 19, Pp. 1258-1264.
- 23- Steinemann, A. (2020): Drought Indicators And Triggers: A Stochastic Approach To Evaluation. *Journal Of The American Water Resources Association*, 39:5. 1217–1233.
- 24- Steven, M; Quiring, T; Papakryiakou, N. (2022): Indices For The Canadian Prairies. *Journal Of Hydrological Science*, 45(5): Pp. 751-769.
- 25- Van Loon, A.F; Laaha, G. (2015): Hydrological Drought Severity Explained By Climate And Catchment Characteristics. *Hydrology*, Pp. 526, 3-14.
- 26- Xu, H; Zheng, H; Chen, X; Ren, Y; Ouyang, Z. (2016): Relationships Between River Water Quality And Landscape Factors In Haihe River Basin, China: Implications For Environmental Management. *Chinese Geographical Science*, 26, Pp. 197-207.