

پایش خشکسالی منطقه‌ای حوضه آبخیز زاینده‌رود بر اساس تغییرات سری زمانی شاخص VCI سنجنده مودیس و شاخص SPI

مرضیه سادات میراحسنی^۱ - دکترای ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشکده محیط‌زیست و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی
گرگان، گرگان، ایران

عبدالرسول سلمان ماهینی - دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،
گرگان، ایران

علیرضا سفیانیان - دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان ایران

رضا مدرس - استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان ایران

رضا جعفری - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان ایران

جهانگیر محمدی - استادیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۲۹

چکیده

خطر خشکسالی تهدیدکننده و منحل سیستم‌های کشاورزی، محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی حوضه آبخیز زاینده‌رود است. پایش خشکسالی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند نمایانگر شدت و گستره خشکسالی در مناطق با کمبود داده بارش هواشناسی بوده و کاستی مکانی و زمانی آن را جبران نماید. کارایی شاخص‌های پوشش گیاهی ماهواره‌ای مانند شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال (NDVI) در تعیین میزان و شدت خشکسالی روشن است؛ اما از آنجاکه واکنش پوشش گیاهی به خشکسالی نسبت به زمان واقعی تأخیر دارد، پایش پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی هواشناسی بر اساس داده‌های سری‌زمانی ماهواره‌ای به برنامه‌ریزی کاهش خطرات خشکسالی کمک شایانی می‌کند. در این پژوهش به بررسی مکانی-زمانی خشکسالی منطقه‌ای حوضه آبخیز زاینده‌رود طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ پرداخته شد. در این راستا، با بهره‌گیری از ۸۴ تصویر سری‌زمانی شاخص NDVI محصولات ماهواره مودیس از فصل رشد منطقه، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) که یک شاخص نرمال‌شده جهت ارزیابی خشکسالی است، محاسبه گردید. سپس پوشش هر طبقه از شدت خشکسالی حاصل از این تصاویر برای دوره زمانی پایش‌شده تعیین گردید. شاخص بارش استاندارد (SPI) مربوط به ۲۶ ایستگاه جهت ارزیابی شاخص

ماهواره‌ای محاسبه شده و ضریب همبستگی این شاخص با میانگین شاخص VCI حاصل ارزیابی گردید. میزان تأخیر خشکسالی هواشناسی به پوشش گیاهی با بررسی همبستگی شاخص میانگین NDVI با میانگین SPI و نمودارهای تغییرات داده‌های VCI با داده‌های SPI و NDVI ارزیابی شد. نتایج پایش مکانی-زمانی نشان داد که قسمت‌های مرکز رو به شمال حوضه آبخیز زاینده‌رود، شرق و جنوب شرقی آن (محل قرارگیری تالاب گاوخونی) در طول دوره مطالعه به‌طور مداوم با خشکسالی شدید روبه‌رو بوده و در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ این خشکسالی بسیار شدید شده است. همچنین نتایج حاکی از تأخیر زمانی ۶ ماهه شاخص خشکسالی هواشناسی با شاخص خشکسالی ماهواره‌ای VCI و معنی‌داری ۰/۹ شاخص SPI با شاخص VCI است که نشان می‌دهد می‌توان از شاخص‌های ماهواره‌ای در نبود شاخص‌های هواشناسی برای بررسی خشکسالی حوضه آبخیز مورد مطالعه استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: پوشش گیاهی، تأخیر پاسخ، MODIS-NDVI، همبستگی پیرسون.

۱. مقدمه

خشکسالی یکی از مخرب‌ترین مشکلات محیط‌زیستی است که در حوضه آبخیز زاینده‌رود رخ می‌دهد (میراحسنی و همکاران، ۱۳۹۵). خشکسالی یک بلای طبیعی نامحسوس است که پوشش گیاهی، زمین‌های کشاورزی و منابع طبیعی را در معرض خطر جدی قرار می‌دهد. این پدیده طبیعی و پرتکرار، مناطق مرطوب و خشک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (مدرس و سیلوا، ۲۰۰۷) و عواقب نامطلوب وسیعی بر شرایط اجتماعی و اقتصادی مردم مناطق در معرض خشکسالی می‌گذارد که شامل تأثیر بر دسترسی آب و کیفیت و سلامت اکوسیستم است (اسوبودا^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). خشکسالی همواره باعث بسیاری از تحولات اقتصادی، جنگ‌ها، قحطی و مهاجرت‌ها گردیده و به نظر می‌رسد در دهه‌های اخیر فراوانی این پدیده از نظر شدت، مدت، فضای تحت پوشش، تلفات جانی، خسارات اقتصادی و اثرات اجتماعی درازمدت، بیشتر از سایر بلایای طبیعی مانند سیل و زمین‌لرزه بوده است (خدافلی و همکاران، ۱۳۹۳). درک ویژگی‌های خشکسالی یک گام ضروری برای فراهم آوردن اقدامات کارآمد کاهش مشکلات ناشی از خشکسالی بوده و عنصر اساسی در برنامه‌های صحیح مدیریت خشکسالی است (مدرس و سیلوا، ۲۰۰۷). شناخت این پدیده، ویژگی‌ها و خصائص آن، آگاهی از امکانات، توانمندی‌ها و استعدادهای مناطق از یک طرف و ارائه راهکارهای کوتاه و بلندمدت از طرف دیگر، مدیران منابع آب‌های سطحی را بر آن می‌دارد تا به‌منظور کاهش خسارات خشکسالی آمادگی لازم را به وجود آورند. توزیع منطقه‌ای وضعیت خشکسالی نسبت به بررسی ایستگاهی آن، سبب درک به‌مراتب کامل‌تری از این پدیده می‌شود؛ بنابراین، آگاهی از شدت، تداوم و مساحت گستره‌های درگیر با خشکسالی و احتمال وقوع آن در دوره بازگشت‌های معین می‌تواند در

1 Modarres and Silva

2 Svoboda

مدیریت منابع آب و در شرایطی که این پدیده منابع حیاتی (آب، خاک، گیاه) را در خطر انهدام و نابودی قرار داده است، بسیار مفید باشد و مدیران مربوطه را در اتخاذ تصمیمات مناسب و سنجیده در این راستا یاری داده، تا خسارات ناشی از سال‌های همراه با خشکسالی را به حداقل برسانند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳). یکی از راه‌های تعدیل خشکسالی، ارزیابی و پایش آن بر اساس شاخص‌هایی است که بتوان میزان شدت و تداوم آن را در یک منطقه تعیین نمود. انواع شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر ایستگاه با استفاده از اندازه‌گیری دما و بارش، مانند شاخص بارش استاندارد^۱ (SPI) توسعه یافته‌اند (مک‌کی^۲ و همکاران، ۱۹۹۳). بر این اساس، شاخص SPI به‌طور مؤثر شرایط خشکسالی ایستگاه‌های هواشناسی را ارزیابی می‌نماید. شاخص SPI ۱۲ ماهه که در این مطالعه به‌کار رفته است نشان‌دهنده الگوهای بارش بلندمدت است، که معمولاً با جریان‌ها، ذخایر و حتی سطح آب‌های زیرزمینی گره خورده است (NDMC، ۲۰۰۷). پایش و ارزیابی پویایی پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های مشتق از تصاویر ماهواره‌ای در شرایط خشکسالی و معمول به کار رفته است. کارایی شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای مانند شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال^۳ (NDVI) (تاکر^۴، ۱۹۷۹) در مطالعات ثابت شده است (تاکر و چادوری^۵، ۱۹۸۷؛ کوگان^۶ و اونگانای، ۱۹۹۸؛ باجگیران و همکاران، ۲۰۰۸). با این حال، از آنجاکه شاخص NDVI برای پایش خشکسالی شامل دو محدودیت اصلی؛ تأخیر زمانی آشکار بین بارندگی و پاسخ NDVI و نیز کم‌بودن تأثیر بارش در فصل رشد (دوره تولید دانه گیاهی) بر NDVI می‌باشد. همچنین این مساله که NDVI نمی‌تواند خطاهای ناشی از انعکاس خاک بر گیاه را کاهش دهد (تیان^۷ و همکاران، ۲۰۱۵)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI^۸) (کوگان، ۱۹۹۵) که نرمال شده‌ی شاخص NDVI است، در این پژوهش به کار برده می‌شود. علاوه بر موارد فوق، شاخص VCI مبتنی بر NDVI می‌تواند خطاهای احتمالی ناشی از استفاده از شاخص NDVI را به حداقل برساند. شاخص VCI برای هر پیکسل بر اساس حداقل و حداکثر مقدار NDVI در طول زمان جهت ارزیابی نسبی تغییرات در سیگنال NDVI محاسبه می‌گردد.

گیتلسون (۱۹۹۷)، ثابت کردند که VCI بر اساس شاخص NDVI نیز با چگالی پوشش گیاهی، زیست توده، و اندازه‌گیری بازتاب قابل مقایسه بوده و یک شاخص خوب تأثیر اقلیم در وضعیت و سلامت پوشش گیاهی می‌باشد. گانش (۲۰۰۷) شاخص VCI را در فصل رشد (ماه‌های مارس تا آگوست) برای ایالت تگزاس تهیه

-
- 1 Standardized Precipitation Index
 - 2 McKee
 - 3 Normalized Difference Vegetation Index
 - 4 Tucker
 - 5 Choudhury and Tucker
 - 6 Kogan
 - 7 Tian
 - 8 Vegetation Condition Index

و آنالیز همبستگی آن‌ها را با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی PDSI^۱ و SPI ۳ ماهه، ۶ ماهه و ۹ ماهه بررسی نمود که نتایج حاکی از همبستگی بیشتر این شاخص با SPI ۶ ماهه داشت. این عدم همبستگی شاخص PDSI با VCI نشان می‌دهد که شاخص VCI بیشتر شبیه به شاخص‌های خشکسالی که شرایط رطوبت را مقدم می‌دانند، می‌باشد. تراوره^۲ و همکاران (۲۰۱۴)، بیان نمودند که نقشه خشکسالی پوشش گیاهی بر اساس شاخص VCI قابلیت پایش خشکسالی را داراست. دوتا^۳ (۲۰۱۵)، با استفاده از تصاویر بلندمدت NDVI ماهواره‌ای خشکسالی کشاورزی را از نظر زمانی و مکانی پایش نمودند. مقایسه مقادیر VCI با SPI نشان از همبستگی با ضریب ۰/۷۵ داشت، که کارایی این شاخص سنجش‌ازدور را برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی پشتیبانی می‌کند. جیائو^۴ و همکاران (۲۰۱۶)، ثابت کردند که VCI می‌تواند شروع خشکسالی و تأثیر خشکسالی را تشخیص دهد. به بیان آنان مزیت آشکار VCI سهولت محاسبه می‌باشد با توجه به این واقعیت که برعکس شاخص SPI به مشاهده ایستگاه نیاز ندارد، و به عنوان محصول ماهواره‌ای از خشکسالی، اطلاعات نزدیک به زمان واقعی در مقیاس جهانی با قدرت تفکیک نسبتاً بالا ارائه می‌دهد. روش تلفیقی آنان به عنوان شاخص خشکسالی بهینه بر اساس سنجش‌ازدور برای خشکسالی طولانی-مدت در منطقه گرم کوناس در ایالت متحده آمریکا توصیه شد. زامبرانو^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از محصولات مودیس^۶ MOD13Q1 شاخص VCI را محاسبه نموده و با شاخص SPI مقایسه نمودند. نتیجه مطالعه آنان همبستگی بالای داده‌ها و استرس در پوشش گیاهی ناشی از عدم بارندگی در ماه سپتامبر در ماه نوامبر را نشان داد.

پژوهش‌هایی در مورد کاربرد NDVI در VCI برای پایش شرایط خشکسالی در ایران گزارش شده‌است؛ از جمله باجگیران و همکاران، ۲۰۰۸؛ شمسی‌پور و همکاران، ۲۰۱۵؛ اورنگی و همکاران، ۲۰۱۱؛ موذن زاده و همکاران (۱۳۹۱)؛ رضائی بنفشه و همکاران (۱۳۹۴) و خسروی و همکاران (۱۳۹۴). باجگیران و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از نقشه‌های ۷ روزه شاخص NDVI ماهواره NOAA-AVHRR به بررسی کارایی شاخص VCI در خشکسالی پوشش گیاهی شمال‌غربی ایران در دوره ۵ ساله و دوره رویشی ۳ ماهه پرداختند. همبستگی مقادیر VCI با NDVI و مقادیر بارندگی بررسی شده و تأخیر ۳ ماهه شاخص VCI به شاخص NDVI حاصل شد. بارندگی هر ایستگاه همبستگی بهتری با مقادیر NDVI داشت. نتایج پژوهش آنان حاکی از کارایی شاخص‌های VCI و NDVI جهت پایش خشکسالی بوده، که تغییرات بارندگی را با

9 Palmer Drought Severity Index

1 Traore

2 Dutta

3 Jiao

4 Zambrano

5 Moderate-resolution imaging spectroradiometer

پیش‌آگاهی خشکسالی برای مدیریت ریسک خشکسالی به خوبی نمایش می‌دهد. اورنگی و همکاران (۲۰۱۱)، در بخشی از مطالعه خود با استفاده از تصاویر ۱۰ روزه NDVI ماهواره AVHRR، شاخص VCI را برای استان فارس محاسبه نموده و جهت ارزیابی آن، تصاویر حاصل را با نقشه‌های پوشش گیاهی ماهواره SPOT مقایسه نمودند. شاخص SPI جهت تعیین مقادیر کاهش بارندگی در منطقه به کار رفت. نتایج حاکی از آن بود که روش به کار رفته پتانسیل پیش‌آگاهی جهت مدیریت ریسک در مناطق نیمه-خشک مانند فارس را دارد. شمسی‌پور و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از نقشه‌های پوشش گیاهی حاصل از تصاویر AVHRR به پایش خشکسالی طی یک دوره ۶ ساله در فصل بهار در دشت کاشان پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص‌های حاصل از باندهای حرارتی حساسیت بیشتری به شرایط خشکسالی نسبت به باندهای مرئی در منطقه دارند. شاخص‌های باندهای انعکاسی مانند VCI و NDVI همبستگی بهتری با پارامترهای هواشناسی نسبت به شاخص‌های حاصل از باندهای حرارتی دارند.

حوضه آبخیز زاینده‌رود به عنوان یکی از مهم‌ترین آبخیزهای کشور، دارای نقش حیاتی در بوم‌شناسی، معیشت، شرب، گردشگری و صنعت کشور است که بررسی و پایش خشکسالی در آن ضرورت مطالعه را روشن می‌نماید. یکی از دلایل مهم استفاده از شاخص VCI در بررسی خشکسالی در حوضه آبخیز زاینده‌رود، بر اساس شرایط ویژه پوشش گیاهی این حوزه بوده است؛ زیرا گستره پراکندگی مکانی و تراکم و نوع پوشش گیاهی آن از غرب تا شرق حوضه متفاوت است، به طوری که بر اساس مطالعه دروگر^۱ و همکاران (۲۰۰۱)، میزان شاخص NDVI از منفی (وسعت زیادی بدون پوشش گیاهی و یا به شکل بوته‌های تنک) در شرق حوضه آبخیز تا مقدار ۰/۵ در غرب آن به شکل جنگل زاگرس متغیر می‌باشد و در سال‌های اخیر حتی در دوره ترسالی از این میزان تجاوز نکرده است. همچنین بنا بر مطالعه مشترک سازمان فضایی ایران^۲ و دفتر پشتیبانی فضایی منطقه‌ای سازمان ملل^۳ که گزارش آن توسط انصاری و همکاران (۲۰۱۵)، ارایه شده است، استفاده مؤثر از اطلاعات فضایی برای پایش بلایای طبیعی و تأثیرات آن در مورد خشکسالی کل ایران بررسی گردید. در مطالعه مذکور، شاخص‌های NDVI^۴، BT^۵، TCI^۵، VCI و VHI^۶ توسط متخصصین کشور پیشنهاد داده شد، و نقشه‌های حاصل از تصاویر مودیس به تفکیک استان تهیه گردید. نقشه‌های پراکندگی شدت VCI نشان داد که حوضه آبخیز زاینده‌رود در استان اصفهان با خشکسالی جزئی، و در استان چهارمحال و بختیاری با خشکسالی متوسط رو به رو است. در حالی که شدت این پراکندگی برای

1 Droogers

2 Iranian Space Agency

3 un-spider

4 Brightness Temperature

5 Temperature Condition Index

6 Vegetation Health Index

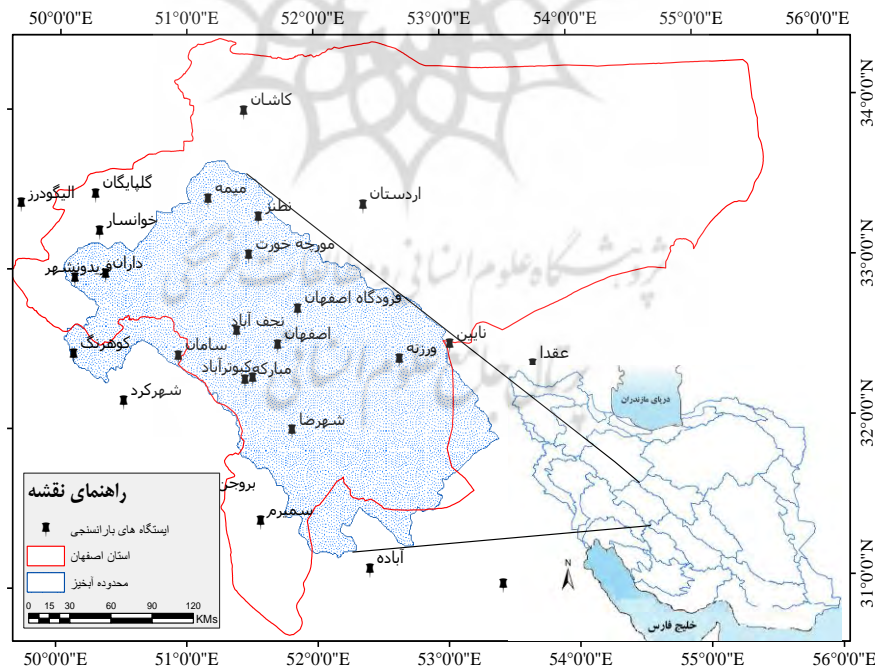
شاخص NDVI متفاوت بوده و از درجه پایین تری برخوردار است. از آنجاکه NDVI در بررسی خشکسالی دارای محدودیت‌هایی که ذکر گردید می‌باشد، نرمال کردن میزان شاخص NDVI که شاخص پوشش گیاهی VCI را تشکیل می‌دهد، در کاستن از خطاهای احتمالی ناشی از میزان پایین NDVI در حوضه آبخیز مؤثر است و منجر به کارایی این مدل در منطقه می‌باشد.

هدف این مطالعه بررسی پراکندگی مکانی خشکسالی پوشش گیاهی و ارزیابی کارایی شاخص پوشش گیاهی ماهواره‌ای VCI با استفاده از پایش سری زمانی ماهانه تصاویر NDVI ماهواره مودیس و بررسی تأخیر پوشش گیاهی نسبت به خشکسالی هواشناسی با محاسبه رابطه VCI با SPI و NDVI و همچنین بررسی نمودار تغییرات شاخص‌ها در حوضه آبخیز زاینده‌رود طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ می‌باشد. در این مطالعه بررسی می‌شود که آیا روابط همبستگی بین شاخص هواشناسی SPI با شاخص‌های ماهواره‌ای VCI و NDVI معنی‌دار است، تا بتوان از شاخص‌های ماهواره‌ای در نبود شاخص‌های هواشناسی برای مطالعات پایش خشکسالی استفاده نمود؟

۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز زاینده‌رود یا در اصل حوضه آبخیز گاوخونی با مساحت ۴۱۴۸۵٫۶۵ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران با اقلیم خشک و نیمه خشک است. این حوضه، بین طول جغرافیایی ۲۴' ۵۰ تا ۲۴' ۵۳ و عرض جغرافیایی ۱۱' ۳۱ تا ۴۲' ۳۳ قرار گرفته است. رودخانه زاینده‌رود به طول ۳۵۰ کیلومتر، در امتداد تقریبی غرب-شرق در جریان می‌باشد و از کوه‌های زاگرس در غرب استان اصفهان سرچشمه گرفته و به باتلاق گاوخونی در شرق می‌رسد (شکل ۱). این رودخانه آب آبیاری، شرب و صنایع مهم کشور را تامین می‌کند. اقلیم بیشتر حوضه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. متوسط درجه حرارت ماهانه از ۳ درجه سانتیگراد در ژانویه تا ۲۹ درجه سانتیگراد در جولای متغیر است. رشته کوه‌های مرتفع زاگرس در غرب و مناطق پست کویری در شرق تغییرات مکانی شدید بارش را از بیش از ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ میلیمتر (غالباً به شکل ذوب برف) در بهار تا کمتر از ۸۰ میلیمتر به دنبال داشته است. میزان بارش از سالی به سال دیگر تفاوت دارد و خشکی‌های مکرر شناخته شده است (خدایلی و همکاران، ۱۳۹۳). میانگین بارش ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. از این میزان بارش در ماه‌های سرد و زمستان همراه با حرکت جبهه شرقی از شرق اروپا حادث می‌شود و فقط در بعضی مواقع در اثر بارش کافی رواناب مهمی در دشت‌های رسوبی ایجاد می‌گردد (سالمی و راست، ۱۳۸۳). تیپ پوشش گیاهی منطقه غالباً شامل جنگل کاری دست کاشت، درختکاری، تالاب، مخلوط تالاب، مرتع خوب، متوسط، ضعیف، مخلوط مرتع متوسط، زمین کشاورزی، مخلوط کشت دیم، مخلوط آیش-باغ، مخلوط آیش، جنگل تنک، جنگل متوسط، باغات، مخلوط

کشت‌باغ، مخلوط باغات و پوشش گیاهی مخلوط می‌باشد (میراحسنی، ۱۳۹۶). زاینده‌رود بعد از طی مسیر حدود ۳۵۰ کیلومتر به تالاب گاوخونی که طبق کنوانسیون رامسر یکی از تالاب‌های مهم ایران به شمار می‌رود و بخش زیادی از آن به دلایل مختلف خشک شده است، می‌ریزد. تالاب گاوخونی نقش حیاتی در تضمین توسعه پایدار ساکنان بخش مرکزی ایران دارد. از سوی دیگر، از نقطه نظر حفاظت، این تالاب به عنوان یکی از اکوسیستم‌های ارزشمند در مرکز ایران محسوب می‌شود. پوشش گیاهی در اطراف تالاب بسیار محدود و عمدتاً محدود به گونه‌های هالوفیت است. هرگونه پوشش گیاهی قابل توجه در خارج از مناطق تالابی وجود ندارد؛ بنابراین ارتباط مهم بین پوشش گیاهی و آبیاری وجود دارد. علاوه بر این، در مورد تپه‌های ماسه‌ای که در اطراف تالاب واقع شده‌اند، اکوسیستم تالاب گاوخونی در جلوگیری از گرد و غبار، تأمین آب تصفیه آب و حفظ ثبات آنها نقش چشمگیری ایفا می‌کند. لازم به ذکر است که اخیراً خشکسالی‌های مکرر مشکلات آلودگی و محیط‌زیست را افزایش داده و منجر به عواقب ناگوار در تالاب گاوخونی شده است. همچنین تغییر شرایط اقلیمی این اکوسیستم طبیعی را به یک نمک‌زار تبدیل می‌کند (سلطانی و سرحدی، ۲۰۱۳). این مشکلات باعث افزایش خطر خشکسالی در حوضه آبخیز زاینده‌رود شده که نشان‌دهنده نیاز مبرم به ارزیابی و پایش خشکسالی و ایجاد استراتژی‌هایی برای کاهش اثرات خشکسالی است.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز زاینده‌رود در استان اصفهان و پراکنش مکانی ایستگاه‌های بارانسنجی مورد مطالعه

۳. مواد و روش‌ها

داده های مورد استفاده به طور خلاصه، در این پژوهش از داده‌های سری زمانی ماهانه بارش ایستگاه‌های باران سنجی محدوده حوضه آبخیز زاینده‌رود جهت بررسی خشکسالی هواشناسی و از داده‌های سری زمانی ماهواره‌ای تصاویر ماهانه مودیس NDVI (MOD13A3) جهت بررسی منطقه‌ای میزان تأخیر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی پوشش گیاهی استفاده شده است.

داده هواشناسی جهت تعیین شاخص بارش استاندارد (SPI)

جهت تهیه شاخص SPI نیز، از آنجا که حداکثر پراکندگی مکانی ایستگاه‌های هواشناسی (۲۶ ایستگاه) در منطقه و حداکثر بازه زمانی دوره آماری بلندمدت ممکن و موجود با شروع یکسان مدنظر بود، از داده‌های سری زمانی ماهانه سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ (۱۴۴ داده) استفاده شد (رجوع شود به شکل ۱). شاخص SPI برای اندازه‌گیری کمبود بارندگی استفاده می‌شود. رطوبت خاک در زمان کوتاه‌تری شرایط غیرنرمال بارندگی را منعکس می‌کند، درحالی‌که آب زیرزمینی، جریان‌های سطحی و ذخائر آب سطحی در زمان طولانی‌تری نسبت به آن عکس‌العمل نشان می‌دهند. از نظر ریاضی، SPI بر مبنای احتمالات تجمعی بارندگی در یک ایستگاه استوار می‌باشد. تام^۱ (۱۹۵۸) دریافت که توزیع گاما برای سری‌های زمانی بارش‌های اقلیمی بهترین برازش را دارد. از این رو مک-کی و همکاران (۱۹۹۳)، شاخص SPI را بر مبنای توزیع گاما قرار دادند. تابع چگالی یا فراوانی توزیع گاما برحسب رابطه (۱) می‌باشد.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه α مشخصه شکل و $\alpha > 0$ ، β مشخصه مقیاس و $\beta > 0$ ، x میزان بارش و $x > 0$ ، $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad \text{رابطه (۲)}$$

این توزیع چوله به راست با حد پایین صفر مشابه توزیع فراوانی بارش می‌باشد که به تدریج فراوانی بارش‌ها افزایش و در نقطه‌ای به اوج می‌رسد و سپس کاهش و در نقطه‌ای به صفر می‌رسد برای محاسبه SPI لازم است، تابع چگالی احتمال توزیع گاما را بر توزیع فراوانی مجموع بارش‌ها (برای هر مقیاس زمانی) در هر ایستگاه برازش دهیم. مقادیر ، تابع چگالی احتمال توزیع گاما برای هر ایستگاه، برای هر مقیاس زمانی مدنظر برآورد می‌شود (مک

کی^۱، (۱۹۹۳). از آنجاکه تابع گاما برای مقادیر صفر تعریف شده نمی‌باشد و توزیع بارندگی ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، تابع احتمال تجمعی که در بر گیرنده مقادیر صفر هم باشد به این صورت می‌شود:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه q احتمال وجود صفر در مقادیر بارش است. اگر m شمار صفرها در دوره زمانی بارش باشد، تام^۲ (۱۹۶۶) ثابت می‌کند که q از تقسیم m بر n می‌تواند محاسبه شود. تام جدول‌های تابع گامای ناقص را برای تعیین احتمال تجمعی $G(x)$ به کار برد. پس از محاسبه تابع تجمعی کل، $H(X)$ ، تغییر شکل هم احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد که این متغیر همان مقادیر SPI بوده و یک تبدیل با احتمال یکسان است. چنانچه شمار ایستگاه‌ها زیاد باشد و بخواهیم برای همه مقیاس‌های زمانی و برای هر ماه سال چنین نموداری را رسم کنیم، بسیار سخت بوده و به آسانی امکان‌پذیر نیست. بدین منظور Z یا SPI به آسانی از تقریب ابراموویتز و استگون^۳ بدست می‌آید که احتمالات تجمعی را به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z تبدیل می‌کند و به صورت روابط زیر است:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

برای $0 < H(X) < 0.5$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad \text{رابطه (۶)}$$

برای $0 < H(X) < 0.5$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \quad \text{رابطه (۷)}$$

برای $0.5 < H(X) < 1.0$

و ثابت‌های معادله عبارتند از:

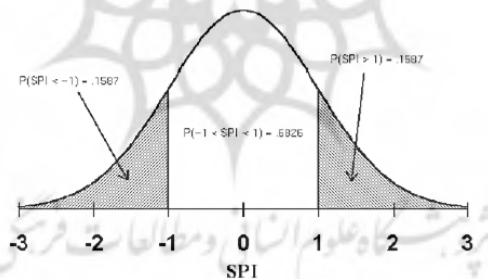
$$c_0=2.515517, c_1=0.802853, c_2=0.010328, \\ d_1=1.432788, d_2=0.189269, d_3=0.001308$$

1 MC Kee

2 Thom

3 Abramowitz and Stegun

از نظر مفهومی SPI نمره سیگمایی یا میزان انحراف استاندارد بالاتر یا پایین تر از میانگین را نشان می‌دهد. شکل (۲) نشان می‌دهد که در پایه زمانی که مشخصه‌های گاما برآورد می‌شوند، SPI دارای یک توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک خواهد بود (ابراموویتز و استگون، ۱۹۶۴؛ رضایی و همکاران (۱۹۹۳). با بهره‌گیری از روش تشریح شده در بالا به کمک برنامه رایانه‌ای spi_sl_6 برای تنظیم شد که با آن مقادیر SPI در پایه‌های زمانی مختلف برای همه ایستگاه‌ها محاسبه شد. با توجه به اینکه این شاخص در پایه‌های زمانی مختلف و متغی به همه ماه‌ها می‌تواند محاسبه و استخراج شود، ولی به دلیل اینکه در این پژوهش تحلیل فراوانی خشکسالی سالیانه مد نظر بود، مناسب‌ترین دوره زمانی برای این کار به جهت مطابقت با داده‌های شاخص‌های ماهواره‌ای، شاخص SPI در پایه زمانی ۱۲ ماهه منتهی به ماه دسامبر بود. بر این اساس دوره زمانی شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه منتهی به دسامبر محاسبه شد و برای تحلیل فراوانی مورد بهره‌گیری قرار گرفت. شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه که در این مطالعه به کار رفته است نشان‌دهنده الگوهای بارش بلندمدت می‌باشد، که معمولاً با جریان‌ها، ذخایر و حتی سطح آب‌های زیرزمینی گره خورده است (اسوودا^۲، ۲۰۱۲). از آنجاکه SPI استاندارد شده است، برای اقلیم‌های خشک و مرطوب قابل استفاده و نتایج آن برای دوره موردنظر قابل مقایسه است. شاخص SPI بر اساس داده‌های ایستگاهی نتایج مطالعه شدت مدت شاخص بارش استاندارد SPI بازه ۱۲ ماهه جهت این مطالعه به کار گرفته شد (میراحسنی و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل ۲. مقادیر SPI دارای توزیع نرمال استاندارد با میانگین ۰ و واریانس ۱ (ابراموویتز و استگون، ۱۹۶۴)

داده‌های ماهواره‌ای جهت پایش پوشش گیاهی

در مطالعه حاضر تصاویر فصل رویشی سنجنده ماهواره مودیس در حوضه آبخیز زاینده‌رود که از فوریه سال ۲۰۰۰ عرضه شده است، استفاده گردید. به منظور تعیین فصل رشد از پردازش تشخیص تغییرات پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، تصاویر ماهانه NDVI استفاده شده است. بر این اساس دوره رویشی در این حوضه از پایان ماه آوریل تا ابتدای دسامبر (یا ابتدای مه تا آخر نوامبر) تعیین شد (میراحسنی، ۱۳۹۶).

1 Abramowitz and Stegun

2 Svoboda

تغییرات شاخص MODIS-NDVI ماهواره ترا^۱

شاخص NDVI (تاكر، ۱۹۷۹) معروف‌ترین شاخص پوشش گیاهی ماهواره‌ای است با توجه به رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در معادله مذکور NIR باند مادون قرمز نزدیک و R باند قرمز می‌باشد، که شماره باند در تصاویر ماهواره‌های مختلف متفاوت می‌باشد. تصاویر سری زمانی MODIS-NDVI ماهانه (MOD13A3) مورد استفاده در پژوهش از ماهواره ترا و از وبسایت شرکت ناسا^۲ بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ اخذ گردید (۱۴۴ تصویر). شبکه سین^۳ این تصاویر ۱ کیلومتر است. تصاویر میانگین ماهانه NDVI محصولات ماهواره مودیس جهت محاسبه VCI به کار رفت.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

شاخص VCI (کوگان، ۱۹۹۵) با استفاده از محدوده ۰ تا ۱۰۰ از شاخص NDVI بلندمدت محاسبه و نرمال می‌شود. مقادیر پایین نشان‌دهنده تنش پوشش گیاهی و مقدار متوسط نشان‌دهنده شرایط متوسط و مقادیر بالا نشان‌دهنده شرایط بهینه و طبیعی می‌باشد؛ VCI با رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$\text{VCI} = \text{NDVI} \cdot (\text{NDVI})_{\min} / (\text{NDVI})_{\max} \cdot (\text{NDVI})_{\min} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه بالا، NDVI_{\min} و NDVI_{\max} به ترتیب میانگین حداکثر و حداقل مدت طولانی NDVI، برای هر پیکسل است که از تصاویر ماهواره مودیس با استفاده از نرم افزار ENVI 5.1 استخراج شده است (جدول ۱).

جدول ۱. طبقه‌بندی خشکسالی VCI (کوگان، ۱۹۹۵)

کلاس	بسیار شدید	شدید	نسبتاً شدید	متوسط	نرمال
VCI	10>	20>	30>	40>	40<

رابطه پارامترهای اقلیمی و شاخص‌های ماهواره‌ای

به منظور درک وضعیت پوشش گیاهی با توجه به خشکسالی، رابطه شاخص SPI با مقادیر میانگین ماهانه NDVI و میانگین ماهانه VCI با استفاده ضریب همبستگی پیرسون^۴ که یک متغیر فاصله‌ای است، بررسی می‌گردد (رابطه ۱۰):

1 Terra
2 NASA
3 SIN Grid
4 Pearson Correlation

$$r = COV(X/Y) / (\sigma X / \sigma Y) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

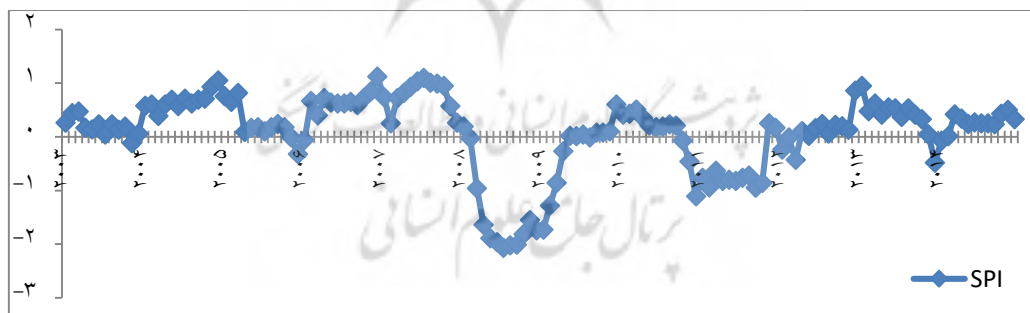
در این رابطه، $COV(X, Y)$ کوواریانس دو متغیره است، و X و Y انحراف معیار هر دو متغیر است. همبستگی وجود یا عدم وجود رابطه بین دو متغیر را نشان داده در صورت وجود شدت آن را تعیین می نماید؛ به عبارت دیگر، برای تشخیص حضور و اهمیت ضریب همبستگی جداول با امکانات مختلف استفاده می شود. در واقع، رابطه بین دو متغیر می تواند مثبت یا منفی باشد. ضریب همبستگی پیرسون (r) بین ۱ و -۱ متفاوت است، مقادیر نزدیک +۱ یا -۱ نشان می دهد که وابستگی این دو متغیر بیشتر است.

در این راستا، روابط پوشش گیاهی VCI با شاخص خشکسالی SPI از طریق ضریب همبستگی پیرسون تعیین می شود. سپس مساحت پوشیده شده توسط هر طبقه خشکسالی پوشش گیاهی سالانه بر اساس دوره ریشی حوضه آبخیز زاینده رود تعیین می گردد.

۴. بحث و نتایج

۴.۱. شاخص بارش استاندارد (SPI)

نمودار نوسانات سری زمانی بازه ۱۲ ماهه شاخص SPI برای ۲۶ ایستگاه حوضه آبخیز زاینده رود طی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ در شکل ۳ نشان داده شده است (میراحسنی و همکاران، ۱۳۹۶). این نمودار حاکی از آن است سال ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ با خشکسالی بسیار شدید، و در سالهای ۲۰۰۵، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ با خشکسالی نسبتاً شدید هواشناسی رو به رو بوده است.



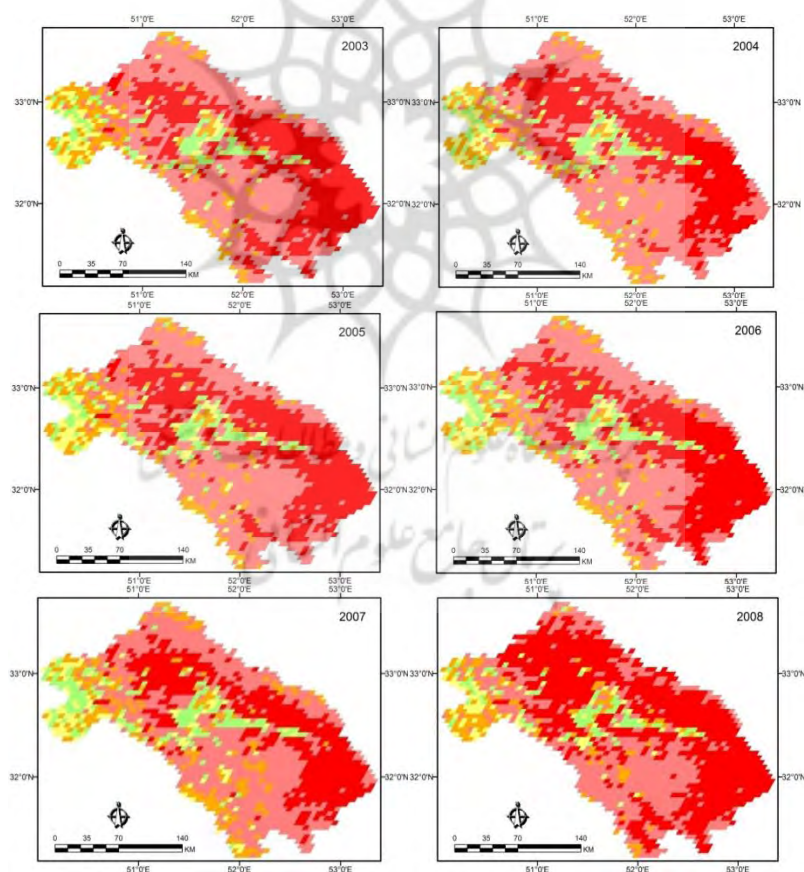
شکل ۳. نمودار نوسانات سری زمانی شاخص SPI حوضه آبخیز زاینده رود طی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴

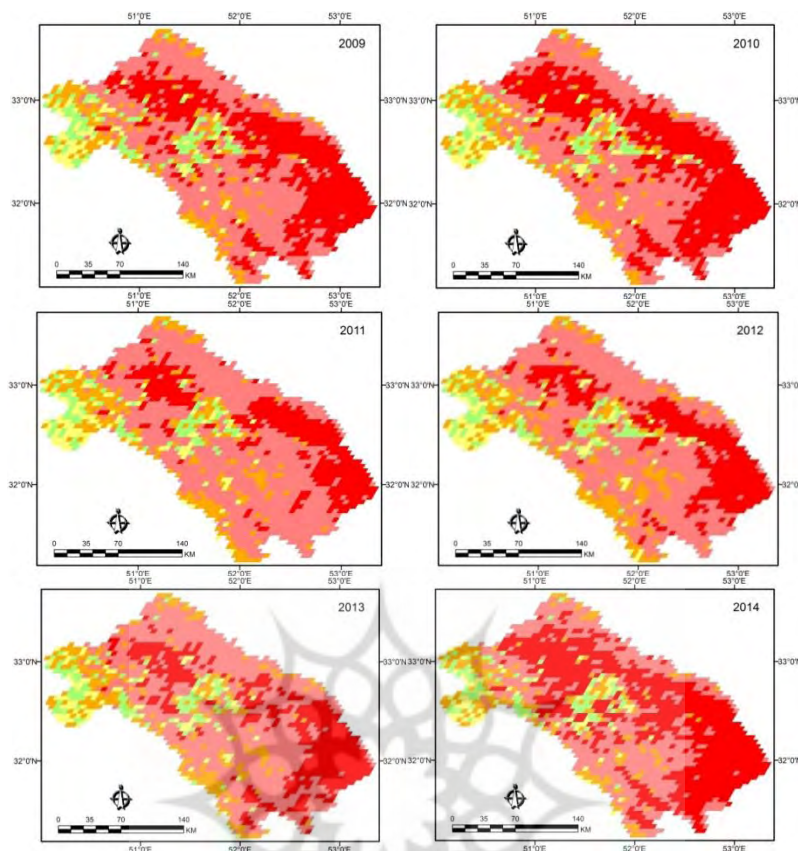
۴.۲. شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

پایش مکانی شاخص VCI

نقشه‌های شاخص VCI بر اساس مقادیر میانگین سالانه فصل رشد تهیه گردید. جهت بررسی طبقات فراوانی مکانی هر طبقه خشکسالی تصاویر بر اساس جدول ۱ به طبقات خشکسالی خیلی شدید، خشکسالی شدید،

خشکسالی نسبتاً شدید، خشکسالی متوسط و نرمال تقسیم شدند. شکل ۴ نقشه‌های سری زمانی میانگین VCI سالانه ۸۴ ماهه بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ در حوضه آبخیز زاینده‌رود را نشان می‌دهد. بررسی پراکنندگی مکانی خشکسالی بر اساس نقشه‌ها نشان می‌دهد که بیشتر حوضه آبخیز در طی دوره مطالعه با خشکسالی شدید و بسیار شدید مواجه بوده است و قسمت جنوب شرقی دایما با خشکسالی بسیار شدید درگیر بوده است. بیشترین گستره خشکسالی بسیار شدید متعلق به سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ بوده است به طوری که قسمت اعظم حوضه آبخیز را فراگرفته بوده است. نقشه‌ها همچنین نشان می‌دهد که شروع خنده خشکسالی بسیار شدید هواشناسی در سال ۲۰۰۷ (نمودار شکل ۳ قسمت ۳-۱) هنوز در پوشش گیاهی حوضه آبخیز نمود نکرده است. همچنین نقشه‌ها بیانگر آنند که حوضه آبخیز بهترین حالت مصون‌بودن از خشکسالی بسیار شدید را فقط در سال ۲۰۱۳ تجربه کرده که پس از آن در سال ۲۰۱۴ دوباره شدت گرفته است. متأسفانه طی دوره مطالعه تنها بخش‌های بسیار کوچکی از مرکز حوضه آبخیز دچار خشکسالی نبوده است که این وجوب توجه جدی به این مخاطره مهم را نشان می‌دهد.



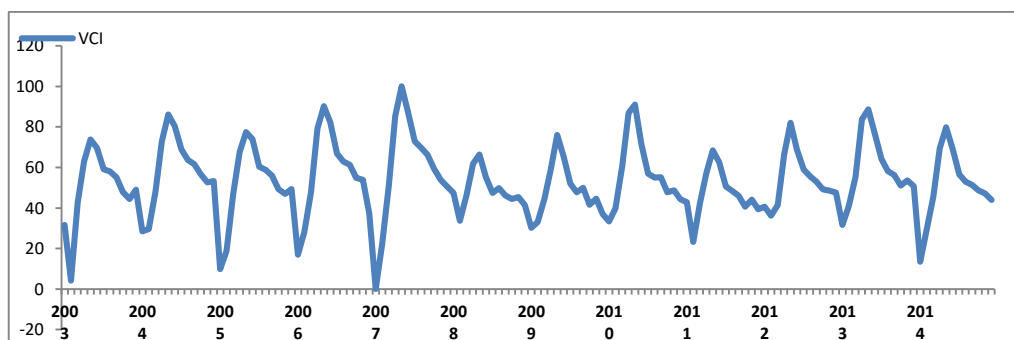


راهنمای نقشه: خشکسالی خیلی شدید، خشکسالی شدید، خشکسالی نسبتاً شدید، خشکسالی متوسط و نرمال

شکل ۴. نقشه میانگین VCI سالانه فصل رشد در حوضه آبخیز زاینده‌رود (۲۰۱۴-۲۰۰۳)

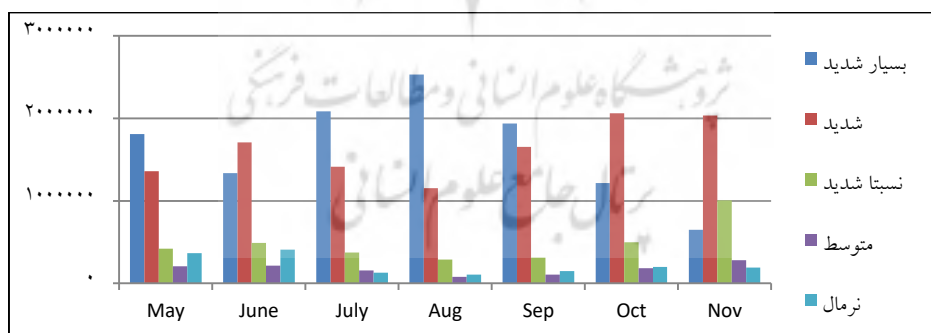
پایش زمانی شاخص VCI

شاخص VCI بر اساس مقادیر میانگین ماهانه ۸۴ ماهه فصل رشد (۷ ماه رشد طی ۱۲ سال)، بر اساس رابطه (۹) و مقادیر جداول ویژگی NDVI با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.3 و ENVI 5.1 محاسبه و بر اساس جدول ۱ (قسمت ۲-۳) طبقه‌بندی شد. نمودار شکل ۵ تغییرات سری زمانی میانگین شاخص VCI ماهانه ۸۴ ماهه در حوضه آبخیز زاینده‌رود بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد. بر این اساس اغلب موارد خشکسالی در ژانویه، فوریه، مارس که معمولاً فصل معمول بارش در اقلیم خشک و نیمه‌خشک است رخ داده است. خشکسالی بسیار شدید در ژانویه ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ و فوریه ۲۰۰۳ تشخیص داده شده است. خشکسالی شدید در ژانویه ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ و فوریه ۲۰۰۵ رخ داده است. خشکسالی نسبتاً شدید در ژانویه ۲۰۰۴ و فوریه ۲۰۰۴، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ دیده می‌شود. خشکسالی متوسط در ژانویه ۲۰۰۳، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۳ و فوریه ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۲ و دسامبر ۲۰۰۶، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ رخ داده است. توضیحات بیشتر در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۵. نمودار تغییرات متوسط VCI در فصل رشد در حوضه آبخیز زاینده رود (۲۰۱۴ تا ۲۰۰۳)

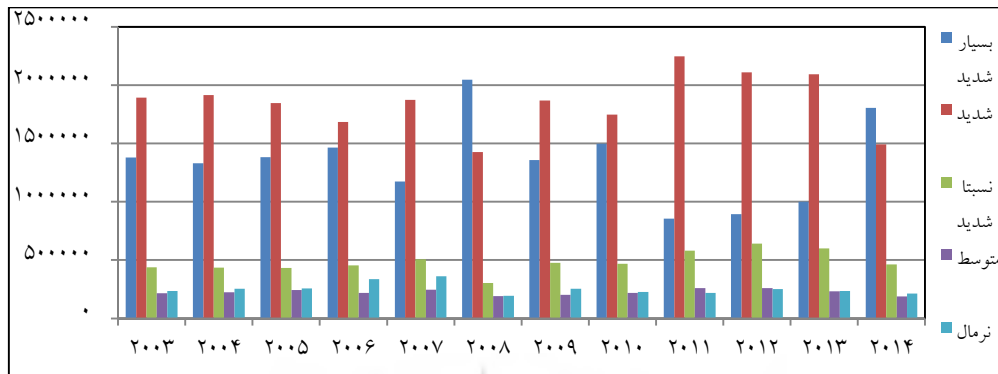
بر اساس نقشه‌های تولید شده، مساحت پوشیده مقادیر میانگین سالانه VCI توسط هر طبقه خشکسالی شامل طبقات خشکسالی خیلی شدید، خشکسالی شدید، خشکسالی نسبتاً شدید، خشکسالی متوسط و نرمال، در حوضه آبخیز زاینده‌رود از ماه مه تا نوامبر ۲۰۰۳-۲۰۱۴ تهیه گردید که در نمودارهای شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. با توجه به نمودار میانگین ماهانه VCI (شکل ۶) در طول ۸۴ ماه دوره مطالعه، بیشترین مساحت منطقه متعلق به خشکسالی بسیار شدید در ماه آگوست و پس از آن ماه‌های ژوئیه و سپتامبر می‌باشد. وسیعترین دسته متعلق به ماه ژوئن می‌باشد. با توجه به نمودار ۶ که میزان مساحت هر دسته از میانگین فصل رشد طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد، بیانگر آن است که بخش اعظم حوضه آبخیز زاینده‌رود در ماه‌های آگوست و پس از آن جولای و سپتامبر با خشکسالی خیلی شدید مواجه بوده است که این مساله از خصوصیات اقلیم خشک و نیمه خشک می‌باشد (مدرس و سیلوا، ۲۰۰۷).



شکل ۶. پراکندگی مساحت هر طبقه VCI در طول فصل رشد (۲۰۱۴-۲۰۰۳) (بر حسب هکتار)

همچنین نمودارها نشان می‌دهند که حوضه آبخیز در ماه‌های اکتبر و نوامبر با بیشترین میزان خشکسالی شدید مواجه بوده است که نشانگر خطر گسترده در این حوضه داشته است. دسته نرمال دارای بیشترین فراوانی مکانی در ماه ژوئن است. با توجه به نمودار شکل ۷ که میزان پراکندگی مساحت هر طبقه VCI سالانه طی سال‌های ۲۰۰۳ تا

۲۰۱۴ را نشان می‌دهد، بیانگر آن است که حوضه آبخیز زاینده‌رود در سال ۲۰۰۸ و بعد از آن ۲۰۱۴ و ۲۰۱۰ با خشکسالی خیلی شدید پوشش گیاهی و در سال‌های ۲۰۱۱ و بعد از آن در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۳ با بیشترین میزان خشکسالی شدید پوشش گیاهی مواجه بوده است. دسته نرمال دارای بیشترین فراوانی مکانی در سال ۲۰۰۷ است.

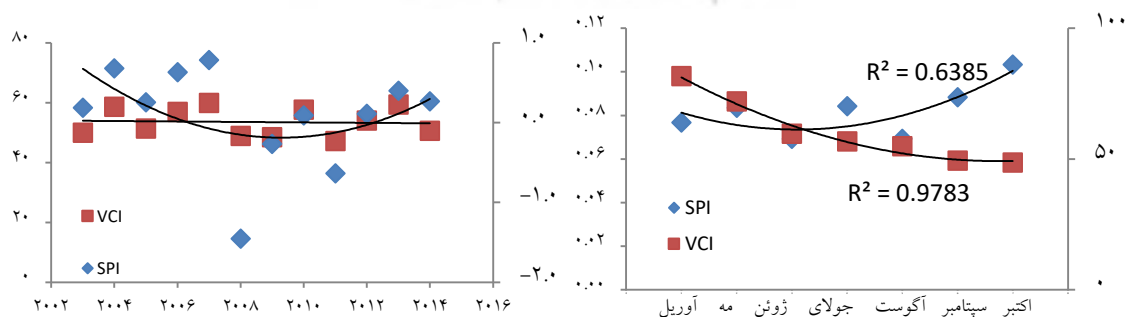


شکل ۷. پراکندگی مساحت هر طبقه میانگین سالانه VCI در (۲۰۱۴-۲۰۰۳) (برحسب هکتار)

رابطه شاخص‌ها و پارامترها بر اساس تغییرات در طول دوره مطالعه

تغییرات VCI و SPI

همبستگی بین میانگین SPI ماهانه و VCI متوسط ماهانه در طول دوره مطالعه ۱۲ ساله در حوضه آبخیز زاینده‌رود برابر ۰/۷۲۴ حاصل شد. از آنجاکه با افزایش خشکسالی (کاهش میزان SPI) میزان شاخص VCI کاهش می‌یابد، این همبستگی مثبت می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد که تغییرات VCI میانگین سالانه نسبت به SPI نسبتاً هماهنگ است؛ اما در سال ۲۰۰۸ با کاهش شدید مواجه شده و سپس افزایش یافته است. همچنین، تغییرات SPI میانگین در فصل رشد با VCI از ماه مه تا ژوئن به هم نزدیک شده و از ماه ژوئن تا ماه ژوئیه به‌طور منطبق کاهش یافته است. کاهش VCI تا آخر فصل رشد ادامه داشته ولی SPI در ماه آگوست افزایش و سپس در ماه سپتامبر دوباره کاهش یافته و پس آن تا پایان فصل رشد افزایش می‌یابد.



شکل ۸. نمودارهای تغییرات میانگین VCI و SPI در فصل رشد (راست) و سالانه (چپ)

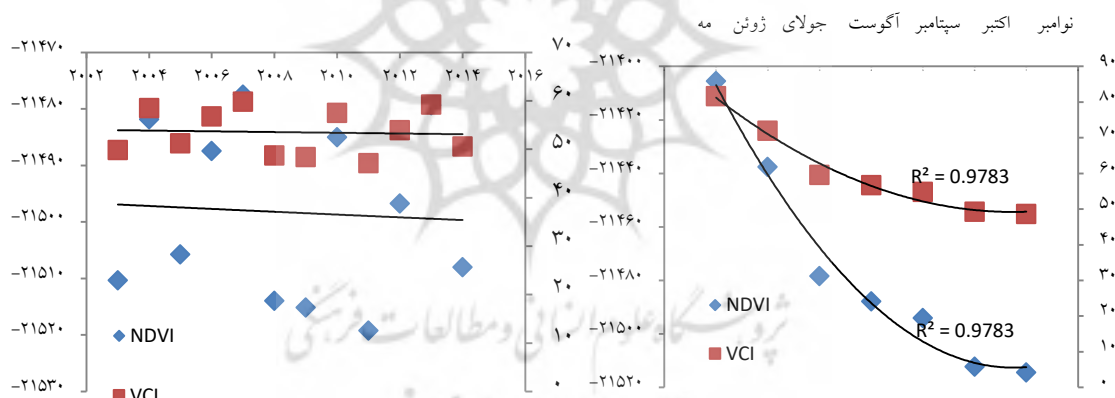
جهت بررسی میزان تأخیر زمانی بین مقادیر بلندمدت ماهانه ۸۴ ماهه بین VCI و SPI، ضریب همبستگی VCI نسبت به SPI محاسبه گردید که در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس شاخص SPI و در ششمین فصل رشد بیشترین همبستگی را با شاخص VCI داشت و میزان همبستگی بعد از آن کاهش می‌یابد (جدول ۳).

جدول ۲. تأخیر زمانی VCI نسبت به SPI

همبستگی	ماه ۱	ماه ۲	ماه ۳	ماه ۴	ماه ۵	ماه ۶	ماه ۷	ماه ۸	بهترین همبستگی
VCI و SPI	۰/۲۹	۰/۳	۰/۳	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/۳۲	ماه ششم

تغییرات VCI و NDVI

شکل ۹ نشان می‌دهد که نرخ تغییرات سالانه شاخص NDVI بیشتر از شاخص VCI است، ضمن اینکه تغییرات هماهنگ هستند (زیرا مقادیر VCI نرمال شده هستند). همچنین تغییرات در فصل رشد شاخص‌های VCI و NDVI در ماه‌های اولیه فصل رشد نزدیکتر است و در طول فصل رشد فاصله می‌یابد تا به یک روند مشخص برسد و تغییرات سالانه هماهنگ می‌باشد. ضمن اینکه تغییرات هر دو شاخص در فصل رشد کاهش می‌یابد.

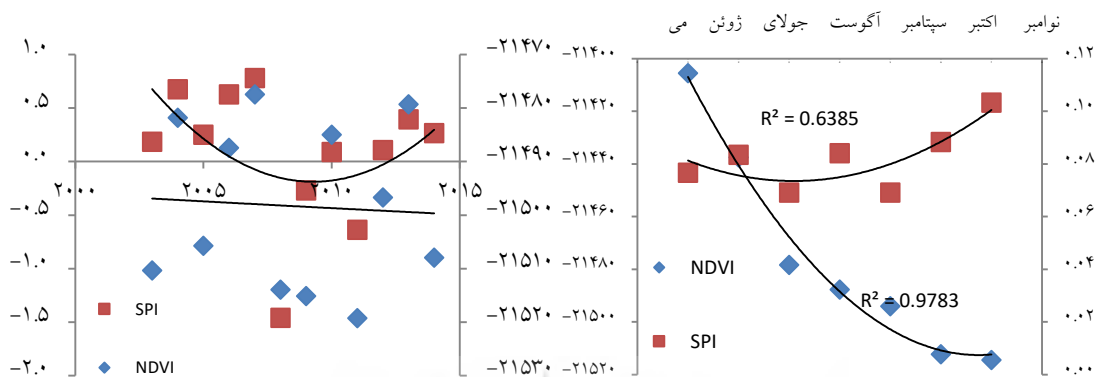


شکل ۹. نمودارهای تغییرات VCI و NDVI فصل رشد (راست) و سالانه (چپ)

تغییرات SPI و NDVI

شکل ۹ نشان می‌دهد که تغییرات میانگین سالانه شاخص‌های NDVI و SPI از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۰۸ با روند مشابه و فاصله یکسان بوده ولی در سال ۲۰۰۸ با کاهش شدید SPI (افزایش خشکسالی هواشناسی) مواجه شده است، بعد از آن تا سال ۲۰۰۹ با وجودی که خشکسالی کاهش یافته (افزایش SPI)، روند تغییرات NDVI تا سال ۲۰۱۰ کاهش است و بعد از آن با فاصله کمتر از قبل از خشکسالی وسیع ۲۰۰۸ افزایش داشته است؛ اما مجدداً در سال ۲۰۱۴ کاهش شدید نشان می‌دهد. ضمن اینکه با بیشترین کاهش در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ روبه‌روست.

همچنین شکل تغییرات در فصل رشد بیانگر آن است این دو شاخص در ماه مه با هم تقاطع داشته و با کاهش تا پایان فصل رشد بیشترین فاصله را از SPI دارند. ضمن اینکه روند تغییرات کاهش NDVI منظم و افزایش SPI (کاهش خشکسالی) نامنظم و به شکل سه بار افزایش و دو بار کاهش است.



شکل ۹. نمودارهای تغییرات NDVI و SPI سالانه (راست) و فصل رشد (چپ)

۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر رویکرد تحلیل خشکسالی در حوضه آبخیز زاینده‌رود با استفاده از شاخص بارش استاندارد SPI و ۸۴ ماه تصویر ماهواره‌ای سری زمانی پوشش گیاهی ماهانه MODIS-NDVI جهت پایش شاخص میانگین ماهانه VCI انجام گرفته و نتایج ارائه گردید. میانگین سالانه هر شاخص با همبستگی ۰/۷ و تأخیر ۶ ماهه شاخص VCI نسبت به SPI مواجه بود که با وجود طیف گسترده بارش در حوضه آبخیز زاینده‌رود (به عنوان مثال بارش متوسط ۱۲۸۲/۶۴ میلی‌متر در سرچشمه ایستگاه کوه‌رنگ در غرب تا ۱۴۹/۸ میلی‌متر در ایستگاه اردستان در شرق حوضه بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۴)، ارتباط معنی‌داری بین شاخص‌های مورد بررسی مقادیر میانگین ۸۴ ماهه پارامترهای VCI و SPI یافت شد. با بررسی نمودار تغییرات سری زمانی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI با شاخص هواشناسی SPI، به دلیل برقرار بودن روابط، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص VCI را می‌توان جهت پایش و تهیه نقشه شرایط خشکسالی در منطقه مورد مطالعه در مقیاس منطقه‌ای بکار برد، با نتیجه مطالعه شمسی‌پور و همکاران (۲۰۱۱)، در دشت کاشان منطبق می‌باشد، در مطالعه آنان همبستگی شاخص‌های SPI با VCI برابر ۰/۴۳ حاصل شد که بالاتر از همبستگی آن با شاخص‌های VHI و TCI بود. همچنین در مطالعه‌های گانش (۲۰۰۷)؛ باجگیران و همکاران (۲۰۰۸)؛ دوتا و همکاران (۲۰۱۱)؛ زامبران و همکاران (۲۰۱۶) نیز همبستگی مناسب بین VCI و SPI یافت شد و توانایی استفاده از شاخص ماهواره‌ای را به جای شاخص خشکسالی هواشناسی در تعیین خشکسالی پوشش گیاهی حوضه آبخیز زاینده‌رود که سوال این پژوهش بود را تایید و آن را تقویت نمود. در نتیجه

داده‌های ماهواره‌ای MODIS با قدرت تفکیک زمانی بالا برای کشف تغییرات سیمای سرزمین در طول زمان مانند پایش سلامت پوشش گیاهی با تحلیل سری‌های زمانی شاخص پوشش گیاهی مفید تشخیص داده شد که در راستای نتایج مطالعه انصاری و همکاران (۲۰۱۵)، در کارایی مدل VCI در حوضه آبخیز زاینده‌رود می‌باشد. در مطالعه باعقیده و همکاران (۱۳۹۰)، که تنها سال ۲۰۰۳ با مطالعه حاضر همزمانی داشت، هر دو شاخص NDVI و SPI در ماه‌های تابستان کاهش داشتند و شرایط حاکمیت خشکی و کاهش پوشش گیاهی را نشان دادند که با نتایج این پژوهش (نمودار شکل ۱۰) همخوانی دارد.

همچنین، نتایج نشان می‌دهد که ویژگی بارش تنها عامل مؤثر بر مقادیر NDVI و VCI نیست، در اکوسیستم‌های نیمه خشک، SPI اثرات بیشتری بر خشکسالی شدید پوشش گیاهی که در این مطالعه پایش گردید دارند، در این مطالعه تأخیر ۶ ماهه SPI بر پوشش گیاهی را نشان داد. مقایسه تأخیر زمانی پاسخ خشکسالی هواشناسی به پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های SPI و VCI نشان می‌دهد که حوضه آبخیز زاینده‌رود در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ با خشکسالی بسیار شدید و در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ با خشکسالی شدید هواشناسی رو به رو بوده است. در حالی که خشکسالی بسیار شدید پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ و خشکسالی شدید پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ و خشکسالی نسبتاً شدید در ۲۰۰۴، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ تشخیص داده شده است؛ بنابراین به نظر می‌رسد علاوه بر بارش، عوامل دیگری همچون دما، تبخیر و تعرق، ارتفاع و تامین آب برای آبیاری حوضه، همراه با میزان و زمان‌های مسدود کردن و باز کردن دریچه سد زاینده‌رود، در سلامت و رشد پوشش گیاهی مؤثر باشد، همچنین در نظر گرفتن مقادیر برداشت از چاه‌ها و آبهای زیرزمینی، با بررسی خشکسالی آب‌شناختی حوضه مورد نیاز است که خارج از محدوده این مطالعه بوده و نیازمند تحقیقات بیشتر می‌باشد که برای پژوهش‌های همه جانبه حوضه آبخیز زاینده‌رود در آینده توصیه می‌شود. از آنجا که حوضه آبخیز زاینده‌رود منابع آب بخش عمده‌ای از فلات خشک مرکزی ایران را تامین می‌کند، بررسی خطر خشکسالی اجتماعی و اقتصادی نیز در این منطقه در مطالعات آینده اهمیت دارد.

لازم به ذکر است که در اقلیم نیمه خشک، بارش بیشتر در زمستان رخ می‌دهد و در تابستان بسیار نادر است؛ و به‌طور کلی، روند قابل توجهی در بارش ماهانه بیشتر در طول زمستان و بهار رخ می‌دهد. در حالی که بر اساس نتایج مطالعه، بیشترین مساحت از منطقه که متعلق به دسته خشکسالی بسیار شدید بود در فصل تابستان (به ترتیب ماه‌های آگوست، ژوئیه و سپتامبر) رخ داده است. ماه‌های مذکور بیشتر فصل رشد در حوضه آبخیز زاینده‌رود را نیز در بر می‌گیرد، که محدودکننده و بازدارنده جدی در رشد گیاهان منطقه می‌باشد. از سویی، وابستگی شدید پوشش گیاهی تابستانه به بارش بهار به نوبه خود باعث می‌شود بارش چند-ماهه نفوذ بیشتری داشته‌باشد. همچنین از محاسبه تأخیر شاخص خشکسالی بر پوشش گیاهی می‌توان نتیجه گرفت که بارش بمثابة عامل غالب در پویایی خشکسالی

پوشش گیاهی در منطقه است. با این حال، این رویکرد باید در اقالیم مختلف آزمایش شود. بازه این مطالعه ماهانه و دوره رشد بود، تصاویر با قدرت مکانی بالاتر و زمانی کوتاه‌تر (۱۰ روزه) برای افزایش دقت ارزیابی در مطالعات بعدی توصیه می‌شود.

از آنجاکه نقشه‌های شکل ۴ نشان داد، حوضه آبخیز زاینده‌رود بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ در در ماه‌های اکتبر و نوامبر با بیشترین میزان خشکسالی شدید مواجه بوده است که این مسئله نشانگر خطر گسترده در این حوضه می‌باشد. همین‌طور به عنوان نمونه، این نقشه‌ها نشان داد که تالاب گاوخونی در طی این مدت همواره با خشکسالی خیلی شدید روبه‌رو بوده است و در بین فصول رویشی تنها در ماه نوامبر و در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ از خشکسالی خیلی شدید مصون بوده است. لازم به ذکر است، به جز خشکسالی، این تالاب با چندین مخاطره محیطی دیگر از جمله آلودگی، گرد و غبار روبه‌روست، به طوری که آن را به شکل مخزنی از فلزات سنگین و خطرناک تبدیل نموده است. حوضه آبخیز زاینده‌رود طی سالیان انبان و پذیرای پساب کشاورزی گسترده‌ای که در مسیر رودخانه صورت می‌گرفته است، و صنایع پرمصرفی از جمله صنایع فولاد که از آب حوضه آبخیز زاینده‌رود استفاده می‌نمایند، بوده است. مساله آلودگی به علاوه خشکسالی باعث شده است تا اکوسیستمی که زمانی نه چندان دور بسیار غنی پویا و ارزشمند بود و دارای نقش مهم و حیاتی نه تنها برای تفریح، محیط زیست و اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری، بلکه برای ساکنین منطقه داشت، با نبود آب و برداشت گرد و غبار، تهدید جدی برای ساکنان از جمله شهرستان ورزنه و حتی استانهای همجوار که در مسیر برداشت تپه‌های ماسه‌ای و گرد و غبار اطراف این تالاب هستند، باشد. این مشکلات وجوب توجه و برنامه ریزی اضطراری و هرچه سریعتر مسئولان و اجرای سختگیرانه قوانین را دو صد چندان روشن می‌نماید.

در پایان، مدل مورد استفاده در پژوهش و استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای در نبود شاخص‌های هواشناسی به عنوان راهکار عملی در راستای بهبود کارایی و کاربردی کردن هرچه بیشتر بررسی خشکسالی در اقالیم مشابه اقلیم زاینده‌رود و برای کل حوضه‌های آبخیز کشور توصیه می‌شود.

کتابنامه

- باعقیده، محمد و دیگران؛ ۱۳۹۰. بررسی امکان استفاده از NDVI در تحلیل خشکسالی‌های استان اصفهان. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۱(۴)، ۱۶-۱.
- خداقلی، مرتضی و دیگران؛ ۱۳۹۳. تحلیل روند گذشته و پیش‌بینی آینده خشک‌سالی در استان اصفهان. نشریه علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۸(۶۷): ۳۶۷-۳۷۹.
- خسروی، ایمان و دیگران؛ ۱۳۹۴. مدل‌سازی و پیش‌بینی سری زمانی شاخص‌های خشکسالی با روش‌های یادگیری ماشین به منظور مدیریت مخاطرات (مطالعه موردی: منطقه شرقی اصفهان). دانش مخاطرات، ۲(۱)، ۵۱-۶۵.

- سالمی، حمیدرضا و دیگران؛ ۱۳۸۳. سیمای کلی هیدرولوژی حوضه آبخیز زاینده‌رود. دو ماهنامه علمی-پژوهشی آب و فاضلاب. ۱۵(۲). ۱۳-۲.
- رضایی بنفشه، مجید و دیگران؛ ۱۳۹۴. تحلیل خشکسالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی با تاکید بر سنجش‌ازدور و شاخص وضعیت پوشش گیاهی. نشریه دانش آب و خاک. ۲۵(۱). ۱۱۳-۱۲۳.
- رضایی، پرویز و دیگران؛ ۱۳۹۳. تعیین روابط شدت، مدت، فراوانی و سطح درگیر با خشکسالی در شمال غرب ایران. نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، (۳) ۱۰، ۱۱۱-۱۲۷.
- موذن زاده، روزبه و دیگران؛ ۱۳۹۱. پایش خشکسالی در کشت‌های غیرآبی با استفاده از تکنیک سنجش‌ازدور. مدیریت آب و آبیاری. ۲(۲). ۳۹-۵۲.
- میراحسنی، مرضیه سادات و دیگران؛ ۱۳۹۵. تحلیل‌های خشکسالی و سری‌زمانی شاخص NDVI تصاویر ماهواره‌ای MODIS جهت پایش تخریب پوشش گیاهی در حوضه زاینده‌رود. دومین کنفرانس بین‌المللی اکولوژی سیمای سرزمین. اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان. ۵. آبان ۱۳۹۵. ۱۱ صفحه.
- http://www.civilica.com/Paper-IALE02-IALE02_105.html
- میراحسنی، مرضیه سادات و دیگران؛ ۱۳۹۶. پایش مکانی- زمانی خشکسالی هواشناسی بر اساس پهنه‌بندی خوشه‌های ایستگاهی در حوزه آبخیز زاینده‌رود، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، در نوبت چاپ.
- میراحسنی، مرضیه سادات؛ ۱۳۹۶. تحلیل سری زمانی شناسایی روند تخریب سرزمین بر مبنای تبیین خصوصیات بیوفیزیکی مؤثر با تأکید بر پایش مکانی زمانی خشکسالی و تغییرات پوشش/کاربری اراضی. پایان‌نامه دکتری. استادان راهنما. عبدالرسول سلمان ماهینی و علیرضا سفیانیان. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- Ganesh, S. (2007). *Investigation of the utility of the vegetation condition index (VCI) as an indicator of drought* (Unpublished doctoral dissertation). Texas A&M University, the USA.
- Kogan, F. N. (1995). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655-668.
- Kogan, F.N., & Unganai, L. S. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 63, 219-232.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Modarres, R., & da Silva, V. D. P. R. (2007). Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 70(2), 344-355.
- Sarhadi, A., & Soltani, S. (2013). Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A hydrological approach. *Journal of arid environments*, 98, 27-40.
- Tucker, C. J., & Choudhury, B. J. (1987). Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment*, 23, 243-251.

Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127° 150.

