

مقاله علمی - پژوهشی

ارزیابی شدت خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور با استفاده از روش هوشمند چند

مقیاسی (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)

محسن رضوی پاشاییگ^۱، کریم امینی نیا^۲، سید مهدی ثاقبیان^{۳*}، رقیه قاسم پور^۴

چکیده

خشکسالی به عنوان یک بلای طبیعی یکی از دغدغه‌های اکولوژیکی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی انسان است. در این مطالعه، روش هوشمند چند مقیاسی برای بررسی شدت خشکسالی و مناطق مستعد خشکسالی در شمال غرب ایران برای سال‌های ۱۹۸۳-۲۰۲۰ استفاده شد. در فرآیند مدل‌سازی مجموعه داده‌های سنجش از دور و زمینی مورد استفاده قرار گرفت. در بررسی وضعیت خشکسالی، سری‌های زمانی خشکسالی ابتدا با روش تجزیه حالت متغیر (VMD) به چندین زیرمجموعه تقسیم شدند. سپس مؤثرترین زیرمجموعه‌ها بر اساس مقدار انرژی آن‌ها انتخاب و منطقه انتخابی پهنه‌بندی شد. در مرحله بعد، مقادیر انرژی میانگین هر ایستگاه به عنوان ورودی تکنیک خوشه‌بندی K-means استفاده شد. نتایج کارایی مناسب روش‌های چند مقیاسی پیشنهادی را در تشخیص مؤثر شدت خشکسالی ثابت کرد. نتایج نشان داد که بخش جنوب شرقی از خشکسالی شدید رنج می‌برد، در حالی که خشکسالی در بخش‌های جنوب غربی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه خفیف‌تر است. کمترین مقدار انرژی برای بخش‌های مرکزی به دست آمد که در آن، مناطق خشک‌تر وجود داشت. مشخص گردید که بین شاخص خشکسالی و مقادیر انرژی رابطه معکوس وجود دارد. همچنین بر اساس نتایج خوشه‌بندی تشابه عدم قطعیت هیدرولوژیکی درون - خوشه‌ای آشکار شد، اگرچه برخی ایستگاه‌های باران‌سنجی در برخی خوشه‌ها با فاصله زیاد از هم قرار دارند. به بیانی دیگر، اساس خوشه‌بندی لزوماً قرابت ایستگاه‌ها نیست.

واژه‌های کلیدی: پایش خشکسالی، پیش‌پردازش چند مقیاسی، پوشش گیاهی، سنجش از دور، K-means

مقدمه

خشکسالی می‌تواند بر تأسیسات زیربنایی و اقتصادی به همراه داشته باشد، به طوری که جبران خسارات ناشی از آن با صرف هزینه‌های بسیار سنگین همراه است (Zhou et al., 2018; Wang and Sun, 2023). تمایز این پدیده با سایر مخاطرات طبیعی در این است که این پدیده به تدریج و در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی عمل کرده و اثرات آن ممکن است پس از چند سال و با تأخیر بیشتری نسبت به سایر حوادث طبیعی ظاهر گردد، بنابراین چون تعیین دقیق زمان شروع آن کار مشکلی است تا حدودی آن را یک پدیده خزنده می‌دانند و از سویی چون خشکسالی برخلاف سایر بلاهای طبیعی کمتر منجر به خسارات ساختاری می‌گردد، کمک‌رسانی در هنگام وقوع این پدیده در مقایسه با سایر پدیده‌ها مثل سیل پیچیده‌تر و مشکل‌تر است

خشکسالی به طور کلی به معنای کم شدن میزان بارش یک دوره نسبت به میانگین بارش درازمدت است و یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در رشته اقلیم‌شناسی مورد بحث قرار می‌گیرد. از دلایل اهمیت موضوع، آسیب و خساراتی است که

^۱ دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

^۲ استاد گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

^۳ استاد گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران (* نویسنده

مسئول: smsaghebian@gmail.com)

^۴ محقق فرادکتری، گروه آب دانشکده عمران دانشگاه صنعتی استانبول،

استانبول، ترکیه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲

قرار دادند. در این پژوهش از شاخص‌های TCI، VCI و SPI استفاده شده است. نتایج نشان داد که شاخص VCI و سنجنده MODIS می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی باشند. مددی و همکاران (۱۳۹۵) برای پایش خشک‌سالی در حوضه مرزی غرب (شامل استان‌های ایلام، کرمانشاه، کردستان و لرستان)، با استفاده از داده‌های هواشناسی (شامل ۳۰ ایستگاه سینوپتیک و کلیماتولوژی)، اقدام به ارزیابی داده‌های ماهانه ماهواره TRMM(3B43) کردند. ترابی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی بیان نمودند که در دهه‌های اخیر، طول دوره و بزرگی خشک‌سالی در ایران افزایش یافته و شدت خشک‌سالی کاهش داشته است. لیو و مولوتالم با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مربوط به شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و دمای سطح زمین، به ارزیابی الگوهای خشک‌سالی در طول فصل زراعی اتیوپی پرداختند (Liou and Mulualem, 2019). نتایج نشان داد که ارتفاعات مرکزی و بخش شمال غربی اتیوپی که شامل زمین‌های زراعی است، دارای روند کاهشی در مقدار بارش و پوشش گیاهی است. بنتو و همکاران با استفاده از شاخص‌های SPI، VCI، TCI و شاخص سلامت گیاه (VHI) به ارزیابی خشک‌سالی در دنیا پرداختند و بیان نمودند که با استفاده از شاخص‌های اشاره شده می‌توان دوره‌های خشک‌سالی شدید در اراضی خشک را بهتر شناسایی کرد (Bento et al., 2020). جلایر و همکاران از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی مبتنی بر سنجش‌ازدور شامل شاخص وضعیت رطوبت خاک، شاخص شرایط دما، شاخص وضعیت پوشش گیاهی و شاخص‌های ترکیبی خشک‌سالی برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی‌های هواشناسی و کشاورزی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ در ایران استفاده کردند (Jalayer et al., 2023).

از مهم‌ترین پارامترهایی که در محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی مورد استفاده قرار می‌گیرد بارش است. بر این اساس هرگاه بارش طی یک دوره زمانی متوالی زیر حالت نرمال قرار گیرد خشک‌سالی رخ می‌دهد. بارش پدیده غیرخطی بوده که تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله عوامل اقلیمی و جغرافیایی، تغییرات زمانی و مکانی زیادی را نشان می‌دهد. از عوامل اقلیمی می‌توان رطوبت، فشار، دما، پوشش ابر، سرعت باد، عوامل فصلی

(Zhou et al., 2018). به‌طور کلی خشک‌سالی سبب کمبود منابع آب شیرین، محدودیت رشد گیاهان زراعی و غیر زراعی، تغییرات زمانی و مکانی طول دوره رشد گیاه، کمبود بارش و تغییر نوع بارندگی، افزایش دما و تبخیر و تعرق می‌شود که نتایج آن تغییر اکوسیستم، آلودگی محیط‌زیست، کاهش کیفیت منابع آب، تغییر گونه‌ها، خشک شدن تالاب‌ها، افزایش بیماری، فقر و قحطی است (Li et al., 2020). از دیگر تبعات خشک‌سالی می‌توان به افزایش دمای هوا، تغییرات در مدیریت اراضی، کاهش یا افزایش میزان اسیدیته آب، تغییر در مقدار و طبیعت جریان، کاهش جریان سطحی، افت سطح ایستابی، کاهش رطوبت خاک و اتمسفر، تشدید تخریب و فرسایش خاک، کمبود آب در بخش کشاورزی و صنعت، مشکلات شهری، نابسامانی اوضاع اقتصادی و اجتماعی از جمله تورم، تخریب منابع زیست‌محیطی و در نهایت فقر غذایی اشاره کرد. از آنجاکه مسئله خشک‌سالی، موضوعی نیست که بشر توان مقابله با آن را داشته باشد و جز بلایای طبیعی محسوب می‌گردد، باید بکوشد با مطالعه و بررسی دقیق این پدیده، آن را هرچه بیشتر بشناسد و راه‌های سازگاری با آن را بیابد. در واقع، داشتن اطلاعات در مورد اثرات خشک‌سالی برای برنامه‌ریزی جهت خشک‌سالی آینده ضروری است. این پدیده از دیرباز به‌عنوان یکی از نگرانی‌های اکولوژیکی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی انسان در نظر گرفته شده است. خشک‌سالی را می‌توان به چهار نوع تقسیم کرد: نوع هواشناسی (کمبود بارندگی)؛ نوع کشاورزی (کمبود رطوبت خاک)؛ نوع هیدرولوژیکی (کمبود رواناب و آب زیرزمینی)؛ و نوع اجتماعی-اقتصادی (کسری در تأمین آب) (Li et al., 2020).

تاکنون مطالعات زیادی در مورد پایش زمانی و مکانی خشک‌سالی صورت گرفته است. ادیب و گرجی‌زاده (۱۳۹۵) در تحقیقی به‌منظور بررسی خشک‌سالی در حوضه آبریز دز از داده‌های بارندگی سالانه ایستگاه‌های تنگ‌پنج و تله‌زنگ سد دز طی یک دوره آماری مشترک ۱۷ ساله استفاده کردند. مقیمی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شاخص RDI یک‌ماهه و مدل زنجیره مارکوف شدت حالت‌های مختلف خشک‌سالی و وقوع حالت‌های مورد انتظار در استان فارس را بررسی کردند. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشک‌سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه را مورد ارزیابی

آب و متعاقب آن بر تأسیسات زیر بنایی وارد می‌آورد و می‌تواند از نظر مدت و گستردگی بسیار طولانی‌مدت و گسترده باشد و باعث ضعف و کاهش عملکرد فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی شود، نظارت بر تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی و ارائه نقشه‌های شدت خشکسالی برای ایجاد راهبردهای سازگاری ضروری است. در این راستا، استفاده از مجموعه داده‌های قابل‌اعتماد و در دسترس می‌تواند مفید باشد. لذا، در تحقیق کنونی به بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شده است. در این راستا، از داده‌های ۲۸ ایستگاه زمینی و داده‌های ماهواره‌های MODIS، PERSIANN-CDR و CMAP جهت پایش خشکسالی شمال غرب ایران و شناسایی مناطق مستعد خشکسالی استفاده شد. جهت افزایش دقت ارزیابی شدت خشکسالی از روش چند مقیاسی^۱ VMD مبتنی بر انرژی استفاده شد. در میان روش‌های پیش‌پردازش داده‌ها، VMD یک رویکرد پردازش سیگنال نسبتاً جدید است که برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های غیر ایستا بکار می‌رود. از این روش به منظور تولید زیرمجموعه‌های ایستاتر با پیچیدگی کمتر استفاده شد. سپس، زیرمجموعه‌هایی مؤثر بر اساس مقادیر انرژی آن‌ها انتخاب شده و منطقه پهنه‌بندی گردید. در نهایت با روش خوشه‌بندی K-means ناحیه انتخابی خوشه‌بندی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه شمال غرب ایران و شامل استان‌های آذربایجان شرقی، غربی و اردبیل است. این ناحیه از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول ۴۴ درجه و ۲ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه و ۳۶ ثانیه شرق نصف‌النهار گرینویچ و عرض ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه و ۵ ثانیه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه و ۲۳ ثانیه شمال خط استوا قرار دارد. مساحت کل منطقه ۱۰۵۰۸۰ کیلومتر مربع است که معادل ۶/۳۷ درصد کل مساحت کشور ایران است. مطابق شکل (۱) بلندترین نقطه این منطقه قله سبلان با ۴۸۱۱

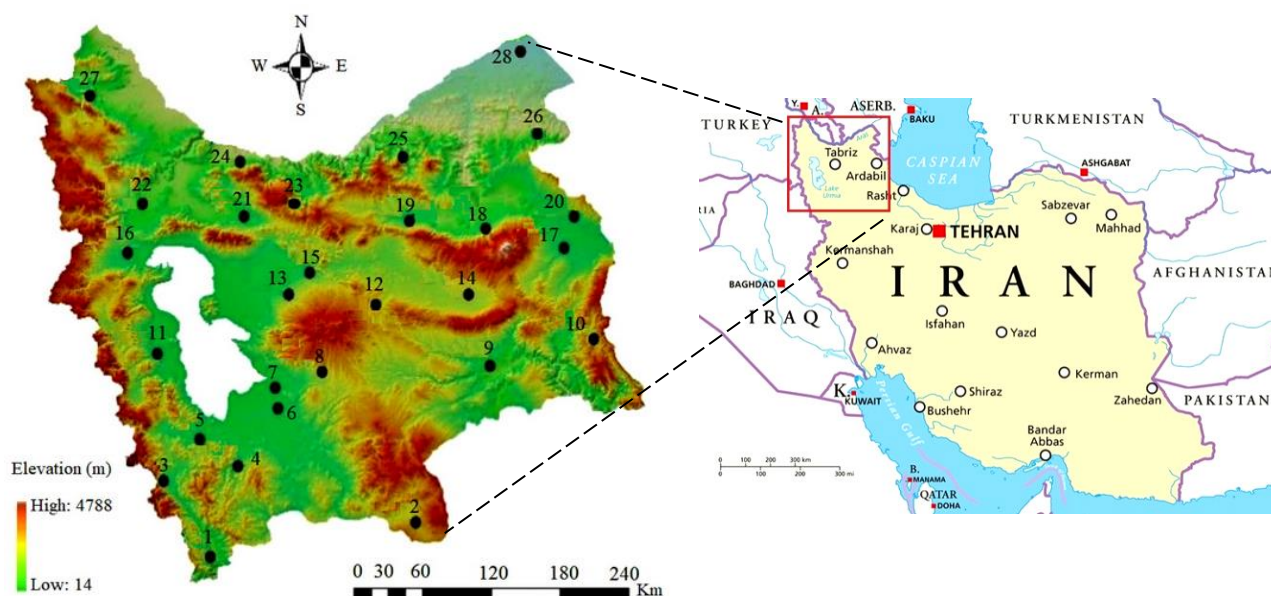
مؤثر بر تغییرات سینوسی بارش، همچنین سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی و به‌خصوص دوره‌های النینو و لانینا را نام برد. همچنین از عوامل جغرافیایی می‌توان به دوری و نزدیکی از مرکز تولید جبهه (مثلاً دریاها یا صحراهای بزرگ) و همچنین ارتفاع اشاره کرد. با توجه به اهمیت اطلاعات بارش به‌عنوان یک داده اولیه در اکثر مطالعات آبی و عدم وجود شبکه باران‌سنجی متراکم در اکثر مناطق و اینکه دسترسی به اندازه‌گیری‌های بارش معمولاً با تأخیر زمانی همراه است، از این‌رو، وجود روش‌های دیگر برای برآورد و بررسی خشکسالی ضروری است. در این راستا، اطلاعات ماهواره‌ای و سنجش‌از‌دور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان برآورد بارش و خشکسالی را در محدوده وسیعی از سطح زمین، به‌خصوص برای مناطق صعب‌العبور امکان‌پذیر ساخته است که این موضوع سبب توجه محققان به داده‌های ماهواره‌ای شده است. سنجش‌از‌دور همراه با تحلیل فضایی، محیط مناسبی را برای محاسبه حجم وسیعی از داده‌ها با بازدهی مطلوب و در زمان کوتاه‌تری فراهم می‌کند (Quan et al. 2021). ابزارهای تحلیل فضایی امکان ادغام و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌ها را از منابع مختلف فراهم می‌کند (Cao et al. 2022). برای کاربردهای مختلف، مدل‌های مختلفی برای تهیه نقشه‌های حساسیت به خشکسالی مانند شاخص آسیب‌پذیری ترکیبی خشکسالی (CDVI)، شاخص گیاهی تقویت‌شده (EVI)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و تبخیر و تعرق استاندارد شده بارش (SPEI)، شاخص پالم (PI)، شاخص ترکیبی (CI) و شاخص‌های چند طیفی با استفاده از پوشش گیاهی و دما استفاده شده است. در بین این شاخص‌ها، SPI به‌عنوان رایج‌ترین روش برای ارزیابی خشکسالی شناخته می‌شود. این شاخص در مقایسه با سایر شاخص‌ها از پیچیدگی کمتری برخوردار است زیرا فقط بر اساس داده‌های بارش است؛ بنابراین، SPI به‌عنوان شاخص اولیه برای پایش خشکسالی در سطح جهانی توصیه می‌شود.

از طرفی، با توجه به ویژگی‌های نوسانات غیرثابت و فصلی سیگنال‌های هیدرولوژیکی، تکنیک‌های پیش‌پردازش به‌طور گسترده در دهه‌های گذشته به‌منظور تجزیه سیگنال‌های غیر ایستا، دوره‌ای و پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اثرات مستقیم و غیرمستقیمی که خشکسالی بر منابع

¹ Variational Mode Decomposition

شامل زمین‌های پست و کم ارتفاع مانند جلگه مغان، میانه و دره رود. میزان بارش در منطقه با ارتفاع محل، جهت کوه‌ها، دوری و نزدیکی به حوضه‌های مؤثر در بارندگی مانند دریاها و دریاچه‌ها و عوامل دیگر در تغییر است. با توجه به تنوع شرایط طبیعی در نواحی مختلف این منطقه، اختلاف دما در طول سال زیاد است. همچنین در این منطقه تغییرپذیری بارندگی سالانه زیاد است؛ بنابراین، خشک‌سالی در این مناطق در مقایسه با سایر نقاط کشور بیشتر است.

متر و پست‌ترین نقطه آن جلگه مغان با ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح دریاست. کوهستان‌های متعدد، عرض جغرافیایی بالا، وجود دریا‌های خزر، مدیترانه، سیله و دریاچه ارومیه و نفوذ توده هوای سرد سیبری در آب‌وهوای این منطقه نقش مهمی دارند. گرچه این منطقه عموماً جزو نواحی سردسیر کشور محسوب می‌شود ولی آب‌وهوای آن را می‌توان به سه قسمت متمایز تقسیم کرد: نواحی سرد: شامل ارتفاعات بلند مانند سبلان، سهند و مناطق جنوبی آذربایجان غربی، نواحی معتدل: شامل دامنه کوه‌ها و جلگه‌ها مانند جلگه تبریز، ارومیه و سراب، نواحی نسبتاً گرم:



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

خوب نمی‌باشند، بعضی از آن‌ها نسبت به سایر نمایه‌ها برای شرایط خاص مساعدتر هستند (بازگیر و همکاران، ۱۳۹۹). نمایه SPI در مقایسه با سایر شاخص‌ها از عمومیت مطلوب‌تری برخوردار است و دلیل آن محاسبه فوق‌العاده ساده و قابل‌اعتماد بودن آن است. همچنین، این شاخص تنها به داده‌های بارندگی نیاز دارد که معمولاً در اکثر نقاط جهان برای دوره‌های بلندمدت وجود دارد. از این شاخص می‌توان به صورت وسیع در کاربردهای متنوع هیدرولوژیکی، کشاورزی، اقلیم و هواشناسی به نحو مطلوبی استفاده کرد.

شاخص SPI را می‌توان در مقیاس‌های زمانی، ۱- ۳- ۶- ۹- ۱۲- ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد. معمولاً SPI یک‌ماهه و

شاخص‌های خشک‌سالی مبتنی بر آمار هواشناسی و داده‌های سنجش‌ازدور

شاخص خشک‌سالی بارش استانداردشده (SPI)

این شاخص در سال ۱۹۹۳ توسط مک‌کی و همکاران ارائه شد. شاخص بارش استانداردشده بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید. شاخص بارش استاندارد شده بر اساس احتمال بارش برای هر بازه زمانی بوده و جهت هشدار اولیه و پایش شدت خشک‌سالی اهمیت زیادی دارد. اگرچه هیچ‌کدام از شاخص‌ها ذاتاً نسبت به سایر نمایه‌ها در همه شرایط

سه ماهه (کوتاه مدت و میان مدت) به ترتیب جهت بررسی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی و SPI شش ماهه به بعد (بلند مدت) جهت بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می گیرد. ویژگی دیگر شاخص SPI این است که بر اساس آن می توان آستانه ی خشکسالی را برای هر دوره زمانی تعیین کرد. بنابراین، بر اساس این شاخص علاوه بر محاسبه شدت خشکسالی، مدت آن را نیز می توان تعیین نمود. شاخص بارش استاندارد شده بر اساس احتمال بارش برای هر بازه زمانی بوده و جهت هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی اهمیت زیادی دارد. فرمول شاخص SPI به صورت زیر می تواند بیان شود که در آن P بارش، P* میانگین بارش و σ_p انحراف معیار بارندگی است.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

شاخص وضعیت گیاه (VCI) اولین بار توسط کوگان در سال ۱۹۹۷ برای حذف اثر تفاوت آب و هوایی و توپوگرافی از روی نتایج شاخص NDVI طراحی شد (Kogan, 1997). این شاخص طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$SPI = \frac{P - P^*}{\sigma_p} \quad (۱)$$

شاخص اختلاف نرمال پوشش گیاهی (NDVI)

$$VCI_{ijk} = \frac{NDVI_{ijk} - NDVI_{i,min}}{NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min}} \quad (۳)$$

از بین شاخص های ماهواره ای، شاخص های پوشش گیاهی در مطالعات خشکسالی بیشترین استفاده را به خود اختصاص می دهند که نظر به دارا بودن قدرت مکانی و زمانی، امکان مطالعه تأثیرات کم آبی بر روی گیاه را نیز فراهم می نمایند. این مسئله سبب شده است تا سنجش از دور به عنوان روشی برای استخراج شاخص ها بکار رود. وضعیت پوشش گیاهی را می توان مهم ترین فاکتور نشان دهنده وضعیت خشکی در هر منطقه دانست. شاخص NDVI از معروف ترین، ساده ترین و کاربردی ترین شاخص های گیاهی شناخته شده است که به صورت زیر بیان می شود.

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_R}{P_{NIR} + P_R} \quad (۲)$$

جدول ۱- طبقه بندی خشکسالی با شاخص VCI

VCI درصد	وضعیت
< 10	خشکسالی بسیار شدید
10 - 19.9	خشکسالی شدید
20 - 29.9	خشکسالی متوسط
30 - 39.9	خشکسالی خفیف
> 40	غیر خشکسالی

شاخص شرایط حرارتی (TCI)

شاخص TCI بر مبنای باند حرارتی تبدیل شده به دمای درخشایی (BT) سنجنده AVHRR ارائه شده است. شاخص TCI 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 به صورت زیر بیان می شود (Singh et al., 2003).

$$TCI = \frac{BT_{max} - BT_i}{BT_{max} - BT_{min}} \quad (4)$$

که در آن BT_{max} ، BT_{min} و BT_i به ترتیب میانگین دمای درخشندگی در مقیاس زمانی مورد مطالعه، دمای درخشندگی حداکثر و حداقل در یک دوره چندساله برای هر پیکسل در مقیاس زمانی مورد نظر است.

شاخص سلامت گیاهی (VHI)

شاخص سلامت گیاهی شامل هر دو شاخص VCI و TCI است و در دسترس بودن رطوبت و دما را در پوشش گیاهی نشان می دهد.

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \quad (5)$$

$$\alpha = 0.5$$

مقدار کمتر VHI نشان دهنده بروز خشک سالی شدید است در حالی که مقدار بالاتر VHI شرایط مرطوب یا غیر خشکی را نشان می دهد.

تجزیه مد متغیر (VMD)

تجزیه مد متغیر (VMD) یکی از روش های پردازش سری زمانی نسبتاً جدید است که برای تجزیه سری های زمانی به دنباله ای از زیر سری های مجزا با باند فرکانسی خاص توسعه یافته است (He et al., 2019). در VMD یک مدل تجزیه مد متغیر کاملاً غیر بازگشتی ارائه می شود که در آن مدها در یک مرحله استخراج می شوند. هدف این مدل به دست آوردن مجموعه ای از مدها و فرکانس های مرکزی مربوطه است، به گونه ای که جمع

مدها سیگنال ورودی را بازیابی می کنند. این روش سیگنال را به صورت بازگشتی به مدهای مختلف که متناظر با طیف های فرکانسی مجزا اما نامعلوم هستند تجزیه می کند. روش مد ذاتی با محدودیت های مانند حساسیت به نویز و فرکانس نمونه برداری شناخته شده است. این محدودیت ها در روش تجزیه مد متغیر با راهکارهایی مانند همگام سازی موجک های تجربی و تجزیه متغیر بازگشتی تا حدی قابل رفع است. سیگنال های تجزیه شده توسط این روش IMF نامیده می شوند. در روش VMD، هر IMF به عنوان یک پهنای باند محدود با فرکانس مرکزی متفاوت در نظر گرفته می شود و هدف، به حداقل رساندن مجموع پهنای باند برآورد شده برای هر IMF است. دیگر مدل های تجزیه، مانند Empirical Mode Decomposition (EMD) اکثراً دارای محدودیت های زیر هستند:

۱. نداشتن بنیان های ریاضی کافی که باعث ایجاد ماهیت الگوریتمی و سعی و خطا گونه بودن آن ها می شود.
۲. غربالگری بازگشتی که در بیشتر روش ها وجود دارد اجازه اصلاح خطا رو به عقب را نمی دهند.
۳. پاسخ های آن ها به میزان نویز حساس هستند.
۴. محدودیت باند فرکانسی سخت در روش های مبتنی بر موجک وجود دارد.

۵. نیازمند به پیش تعریف حدود بانک های فیلتر در تبدیل موجک تجربی ۲ هستند.

هدف اصلی VMD تجزیه کردن سیگنال ورودی به تعدادی زیر سیگنال u_k (مد) است، ضمن بازیابی سیگنال ورودی دارای ویژگی های پراکندگی ۳ نیز هست. در اینجا پراکندگی هر مد به عنوان پهنای باند همان مد انتخاب می شود. به عبارت دیگر، فرض می شود که هر مود k بیشتر حول فرکانس مرکزی ω_k فشرده است، که این فرکانس مرکزی در دوره تجزیه تعیین می شود. به منظور تعیین پهنای باند هر مد مراحل زیر انجام می شود.

۱. برای هر مد، سیگنال تحلیلی مرتبط با استفاده از تبدیل هیلبرت محاسبه می شود تا طیف فرکانس یک طرفه به دست آید.

¹ Backward error correction

² Empirical wavelet transform (EMT)

³ Sparsity

پس از تجزیه داده‌ها با روش‌های سری زمانی مؤلفه‌های زیرسری زیادی به دست می‌آیند که تعداد ورودی‌های لازم برای مدل‌سازی را افزایش می‌دهند؛ بنابراین، لازم است این مؤلفه‌های سازمان‌دهی یا گروه‌بندی مجدد شوند. در این مطالعه از انرژی زیر سری‌ها برای انجام سازمان‌دهی زیرسری‌ها استفاده شد. برای محاسبه انرژی (E) زیرسری‌ها از رابطه زیر استفاده شده است.

$$E = \frac{\sum (SP_m^2)}{(\sum SP_m)^2} \quad m=1, 2, \quad (۸)$$

که در این رابطه SP مقدار زیر سری تجزیه‌شده و m نمایانگر ماه از سری زمانی است.

روش خوشه‌بندی K-means

روش K-means یکی از روش‌های خوشه‌بندی داده‌ها در داده‌کاوی است. این روش علی‌رغم سادگی آن یک روش پایه برای بسیاری از روش‌های خوشه‌بندی دیگر (مانند خوشه‌بندی فازی) محسوب می‌شود. این روش روشی انحصاری و مسطح محسوب می‌شود. برای این الگوریتم شکل‌های مختلفی بیان شده است. ولی همه آن‌ها دارای روالی تکراری هستند که برای تعدادی ثابت از خوشه‌ها سعی در تخمین موارد زیر دارند:

به دست آوردن نقاطی به‌عنوان مراکز خوشه‌ها، این نقاط در واقع همان میانگین نقاط متعلق به هر خوشه هستند. نسبت دادن هر نمونه داده به یک خوشه که آن داده کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را دارا باشد. در نوع ساده‌ای از این روش ابتدا به تعداد خوشه‌های موردنیاز نقاطی به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس داده‌ها با توجه به میزان نزدیکی (شباهت)، به یکی از این خوشه‌ها نسبت داده می‌شوند و بدین ترتیب خوشه‌های جدیدی حاصل می‌شود. با تکرار همین روال می‌توان در هر تکرار با میانگین‌گیری از داده‌ها مراکز جدیدی برای آن‌ها محاسبه کرد و مجدد داده‌ها را به خوشه‌های جدید نسبت داد.

این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دیگر تغییری در داده‌ها حاصل نشود. در الگوریتم K-means ابتدا k عضو (که k تعداد خوشه‌ها است) به‌صورت تصادفی از میان n عضو به‌عنوان

۲. برای هر مد، طیف فرکانس مد با استفاده از اختلاط با یک سیگنال تک فرکانسی با فرکانس ω_k به باند پایه انتقال داده می‌شود (مرحله دمدولاسیون).

۳. با کمک پهناهای باند به‌وسیله تابع گوسی H سیگنال دمدولاسیون شده استخراج می‌شود. نتیجه به‌صورت رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (۶)$$

s. t. $\sum_k u_k = f$

در رابطه بالا $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_k\}$ و $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$ نمایش کوتاه شده تمام مدها و فرکانس‌های مرکزی هستند. $\sum_k := \sum_{k=1}^K$ بیانگر جمع تمام مدها است. قید بازیابی سیگنال به روش‌های مختلفی قابل‌اعمال به مسئله بهینه‌سازی است. در اینجا از هر دو روش ضرایب پنالتی^۱ درجه چهار و ضریب‌های لاگرانژ^۲ استفاده می‌شود تا مسئله به یک بهینه‌سازی جدید غیر مقید تبدیل شود. روش ضرایب پنالتی درجه چهار یک روش کلاسیک برای حفظ هر چه بیشتر دقت بازیابی به‌ویژه در شرایط وجود نویزهای گوسی جمع شونده از نوع متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع یکسان است. روش ضرایب لاگرانژ روش مرسوم برای اعمال اکید قیود است. ترکیب جملات این دو روش باعث می‌شود از مزیت همگرایی خوب روش ضرایب پنالتی درجه چهار و همچنین مزیت اعمال قطعی قید در روش ضریب‌های لاگرانژ به‌طور هم‌زمان بهره برد. در نتیجه مسئله بهینه‌سازی اصلی (۶) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) := \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \|f(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (۷)$$

نقطه زینی^۳ دستگاه بالا پاسخ مسئله بهینه‌سازی معادله (۶) است.

^۱ Quadratic penalty

^۲ Lagrangian multipliers

^۳ Saddle point

شاخص $Dunn_i$ که به نوعی شاخص ارزیابی درونی خوشه‌ها است، به صورت نسبت حداقل فاصله درون خوشه‌ای به حداکثر فاصله میان خوشه‌ای است.

$$D_i = \min_{i=1, \dots, k} \left\{ \min_{j=i+1, \dots, k} \left(\frac{diss(C_i, C_j)}{\max_{m=1, \dots, k} diam(C_m)} \right) \right\} \quad (11)$$

که در آن $diss(C_i, C_j)$ عدم تجانس بین خوشه C_i و C_j است و C_m نیز تابع درون خوشه‌ای است (قطر خوشه). مقادیر بزرگ شاخص $Dunn_i$ موردنظر است چون فشردگی مناسب خوشه‌ها را نشان می‌دهد.

$$diss(C_i, C_j) = \min_{x \in C_i, y \in C_j} \|x - y\| \quad (12)$$

$$diam(C) = \max_{x, y \in C} \|x - y\| \quad (13)$$

شاخص ضریب سیلوئه (SC_i)

جهت بررسی عملکرد روش خوشه‌بندی K-means و SOM شاخص SC_i می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد. SC_i بیشترین کاربرد را در علم هیدرولوژی دارد. شاخص SC_i در یک خوشه نشانگر درجه تشابه درون خوشه‌ای است. مقادیر بزرگ SC_i نشانگر تفرق بهتر بین خوشه‌ها است. شاخص SC_i از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Sc(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (14)$$

برای هر داده i ، $a(i)$ میانگین عدم تشابه داده i با تمامی دیگر داده‌ها در درون خوشه موردنظر است، درحالی‌که $b(i)$ نشانگر میانگین کمترین عدم تشابه داده i با دیگر داده‌های درون خوشه موردنظر است. شاخص SC_i نشانگر تشابه اعضا به خوشه متعلق به آن \leftarrow (وابستگی) \leftarrow در مقایسه با دیگر خوشه‌ها (جدایی) است. مقادیر SC_i ما بین -1 تا $+1$ متغیر است و مقادیر مثبت بزرگ نشان از سازگاری مناسب عضو موردنظر با خوشه متعلق به آن است و برعکس.

مراکز خوشه‌ها انتخاب می‌شود. سپس $n-k$ عضو باقیمانده به نزدیک‌ترین خوشه تخصیص می‌یابند. بعد از تخصیص همه اعضا مراکز خوشه مجدداً محاسبه می‌شوند و با توجه به مراکز جدید به خوشه‌ها تخصیص می‌یابند و این کار تا زمانی که مراکز خوشه‌ها ثابت بماند ادامه می‌یابد (Agarwal et al., 2016). برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی از شاخص‌های زیر استفاده شده است.

معیارهای ارزیابی مدل

شاخص دیویس بولدین DB_i^1

شاخص DB_i از انواع شاخص‌های معیار ارزیابی درون خوشه‌ای است که در علم هیدرولوژی کاربرد دارد. علت کاربرد زیاد این شاخص، توانایی آن در تعیین تعداد خوشه‌های بهینه‌ای هستند که به صورت صحیح جداسازی شده و فشرده هستند. شاخص DB_i به صورت تابعی از نسبت مجموع پراکنندگی درون-خوشه‌ای به جدایی درون خوشه‌ای است و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$DB_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j=1, \dots, k, i \neq j} \left\{ \frac{diam(C_i) + diam(C_j)}{\|C_i - C_j\|} \right\} \quad (9)$$

که در این حالت قطر خوشه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$diam(C_i) = \left(\frac{1}{n_i} \sum_{x \in C_i} \|x - z_i\|^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

که در آن h_i تعداد نقاط و Z_i مرکزیت هر خوشه است. چون هدف به دست آوردن خوشه‌ای است که کمترین فاصله درون-خوشه‌ای را دارا است، بنابراین کمترین مقدار ممکن DB_i موردنظر است.

شاخص دون $(Dunn_i)$

² Silhouette Coefficient index

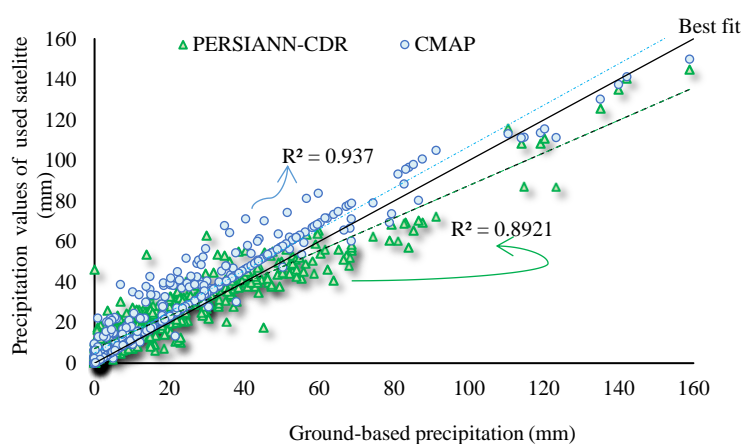
¹ Davis- Bouldin index

نتایج و بحث

بررسی وضعیت خشکسالی منطقه با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای

بوده است. همبستگی بین داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای ایستگاه تبریز برای نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، بین داده‌های زمینی و ماهواره‌ای همبستگی خوبی وجود دارد و نتایج داده‌های ماهواره‌ای CMAP به نتایج ایستگاه‌های زمینی نزدیک‌تر است. در ادامه با توجه به اینکه نتایج ماهواره CMAP به مقادیر زمینی نزدیک‌تر بود، با استفاده از داده‌های بارش این ماهواره مقادیر SPI محاسبه گردید و به پایش زمانی و مکانی خشکسالی منطقه پرداخته شد.

پس از استخراج داده‌های بارش حاصل از ماهواره PERSIANN-CDR و CMAP برای بازه زمانی ۱۹۸۳-۲۰۲۰ همبستگی آن‌ها با داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه سری زمانی بارش ماهانه با میانگین بلندمدت نشان داد که منطقه منتخب دچار خشکسالی‌های مکرر

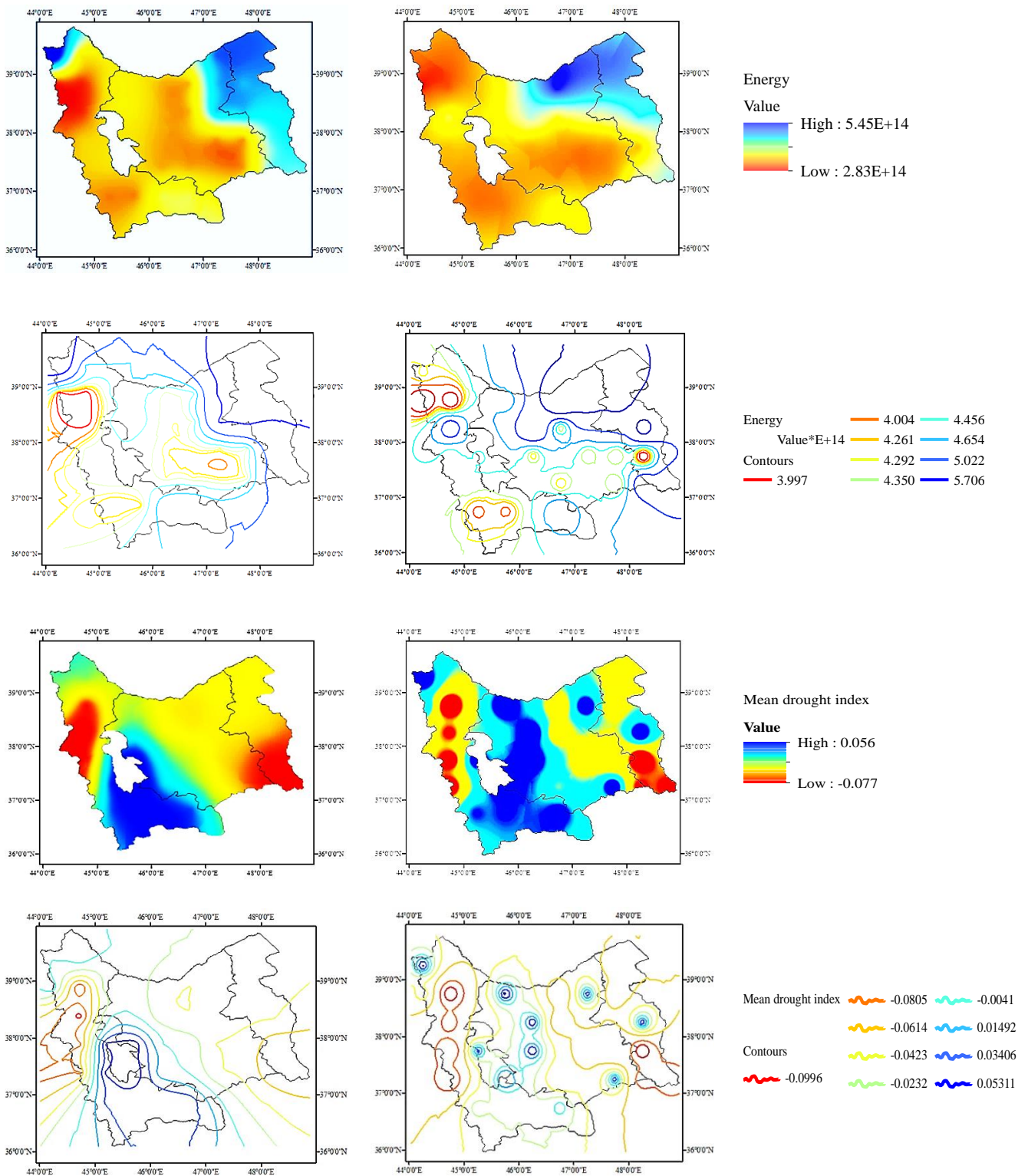


شکل ۲- همبستگی بین داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای ایستگاه تبریز

سری‌های محاسبه و به‌عنوان ورودی تکنیک‌های خوشه‌بندی اعمال شد. در مرحله بعد، منطقه انتخاب شده از طریق مقادیر میانگین انرژی به‌دست‌آمده پهنه‌بندی گردید تا رابطه بین مقادیر انرژی و سری زمانی SPIها بررسی شود. شکل (۳) نتایج پهنه‌بندی منطقه را با استفاده از مقادیر میانگین انرژی و میانگین شاخص خشکسالی برای مشاهدات زمینی و مجموعه داده‌های ماهواره‌ای CMAP نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که در فرآیند پهنه‌بندی، از وزن‌های فاصله معکوس (IDW) برای درونیابی فضایی استفاده شد. روش‌های درونیابی را می‌توان در دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد: قطعی و زمین‌آماری. تکنیک‌های درونیابی قطعی سطوح را از نقاط اندازه‌گیری شده بر اساس میزان شباهت یا درجه هموارسازی ایجاد می‌کنند.

برای ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی سری‌های زمانی خشکسالی در منطقه موردنظر، ابتدا از روش VMD برای تجزیه SPIها به چندین زیرسری بدون نویز استفاده شد. از آنجایی که عوامل داخلی و خارجی مختلف ممکن است بر کیفیت داده‌ها در طول فرآیند جمع‌آوری داده‌ها تأثیر بگذارند، روش VMD برای حذف نویز مجموعه داده‌های اصلی SPI استفاده شد. سری‌های زمانی طی سال‌های منتخب به ۸ زیرسری (IMF و Residual) تجزیه شدند. IMFهای ۱ تا ۷ با فرکانس‌هایی از زیاد به کم، که هر کدام نشانگر اجزایی نوسانگر با پریودهایی مشخص است. زیرسری باقی‌مانده (residual) عضو نشان‌دهنده روند است که بعد از IMF7 به‌دست‌آمده است. مجموع این زیرسری‌ها همان سیگنال اصلی خواهد بود. با توجه به افزایش تعداد ورودی‌ها پس از تجزیه سیگنال، برای کاهش تعداد ورودی‌ها، مقادیر انرژی زیر



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه با استفاده از مقادیر میانگین انرژی و میانگین شاخص خشک‌سالی

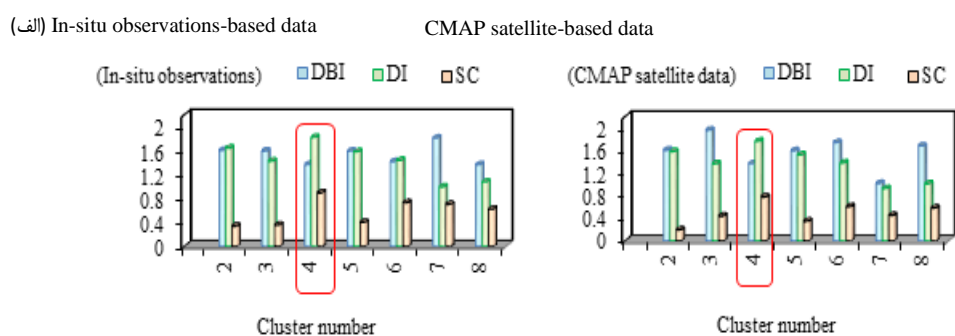
به منظور خوشه‌بندی ۲۸ ایستگاه در منطقه انتخاب شده، مقادیر انرژی میانگین هر ایستگاه به عنوان ورودی تکنیک خوشه‌بندی K-means استفاده شد. مطابق شکل (۴)، سه معیار ارزیابی SC، DBI و DI برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (NC) اعمال شد. DI به عنوان نسبت حداقل فاصله درون خوشه‌ای به حداکثر فاصله بین خوشه‌ای تعریف می‌شود. این شاخص یک طرح ارزیابی داخلی برای ارزیابی الگوریتم‌های خوشه‌بندی است که در آن نتیجه بر اساس خود داده‌های خوشه‌بندی شده است. مقدار بزرگ‌تر DI ترجیح داده می‌شود زیرا نشان‌دهنده جداسازی بهتر است. DBI تعداد خوشه بهینه را تعیین می‌کند به طوری که خوشه‌ها به خوبی از هم جدا شده و فشرده شوند. از آنجایی که هدف به دست آوردن خوشه‌هایی با حداقل فاصله درون خوشه‌ای است، مقدار کوچک DBI مهم است. همچنین، اگر اکثر اعضا دارای مقدار SC بالایی باشند، خوشه‌بندی مناسب است. از طرف دیگر، اگر تعداد زیادی از اعضا دارای یک مقدار SC کم یا منفی باشند، بر این اساس در تشکیل خوشه ممکن است خوشه‌هایی دارای اعضای خیلی زیاد یا خیلی کمی باشد. تعداد خوشه‌ها برای نمایش مناسب ویژگی‌های دینامیکی داده‌های خشک‌سالی بین ۲ تا ۸ تعیین شد. پس از استفاده از تکنیک خوشه‌بندی K-means با یک برنامه آموزشی که طی ۱۰۰۰ تکرار انجام شد، نتایج برای اعداد مختلف انرژی به دست آمد. خوشه‌ها مقایسه شدند و تعداد بهینه خوشه‌ها (شکل (۴)) از طریق مقایسه سه شاخص ذکر شده تعیین گردید. در فرآیند خوشه‌بندی از طریق رویکرد K-means، می‌توان مشاهده کرد که برای مجموعه داده‌های زمینی، عدد خوشه‌بندی چهار مقادیر ۰.۸۹، ۱.۳۶ و ۱.۸۲ را برای SC، DBI و DI به دست می‌دهد. برای داده‌های CMAP، عدد خوشه‌بندی چهار دارای مقادیر ۰.۷۷، ۱.۳۶ و ۱.۷۶ را برای SC، DBI و DI است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر در تعیین مناطق همگن در مقایسه با سایر تعداد خوشه‌ها است؛ بنابراین، عدد خوشه‌بندی برابر با چهار به عنوان مقدار بهینه برای خوشه‌بندی ایستگاه‌ها انتخاب شد.

یک درون‌یابی قطعی می‌تواند سطح حاصل را مجبور به عبور از مقادیر داده کند یا خیر. از سوی دیگر، روش‌های زمین‌آماري (یا تصادفی) از همبستگی فضایی بین مشاهدات همسایه برای پیش‌بینی مقادیر نسبت داده‌شده در مکان‌های نمونه‌گیری نشده استفاده می‌کنند. IDW یک روش قطعی است و مقادیر یک ویژگی را در نقاط نمونه‌برداری نشده با استفاده از ترکیب خطی مقادیر در نقاط نمونه‌برداری شده با وزن تابع معکوس فاصله از نقطه موردنظر تا نقاط نمونه تخمین می‌زند. فرض بر این است که نقاط نمونه‌برداری شده نزدیک به نقطه نمونه‌برداری نشده بیشتر شبیه آن هستند تا نقاط دورتر. این روش به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌های مختلف مانند هیدرولوژی، علوم زمین و غیره استفاده شده است (Jeong et al. 2020). مطابق شکل (۳)، برای هر دو مجموعه داده، بخش جنوب شرقی از خشک‌سالی شدید رنج می‌برد، در حالی که خشک‌سالی در بخش‌های جنوب غربی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه خفیف‌تر است.

در قسمت جنوب شرقی منطقه انتخاب شده، مقادیر SPI بیشتر از سایر نقاط بوده و در قسمت جنوب غربی مقادیر SPI کاهش یافته و به کمترین مقدار رسیده است. کمترین مقدار انرژی برای بخش‌های مرکزی به دست آمد که در آن مناطق خشک‌تر وجود داشت. خطوط کانتور فشرده در قسمت‌های شمال غربی منطقه انتخاب شده مشاهده شد، به این معنی که مقادیر انرژی در این بخش‌ها که در مناطق پرباران منطقه قرار داشتند، به سرعت تغییر می‌کند. تغییرات مکانی انرژی برای مناطق شرقی که مناطق نیمه‌خشک بودند هموارتر است. از این نتایج مشخص است که بین شاخص خشک‌سالی و مقادیر انرژی رابطه معکوس وجود دارد، یعنی هر چه مقادیر انرژی کمتر باشد، شدت شاخص خشک‌سالی بیشتر است.

نتایج پهنه‌بندی SPI برای مشاهدات زمینی و داده‌های

ماهواره‌ای



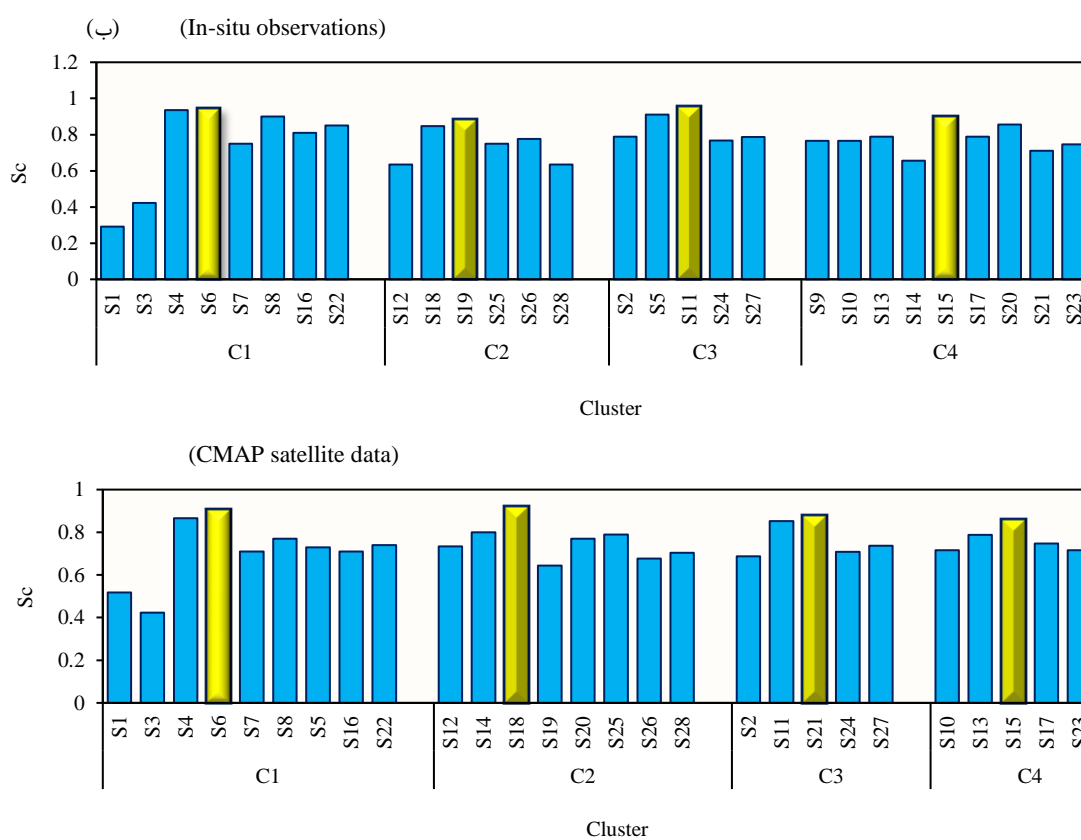
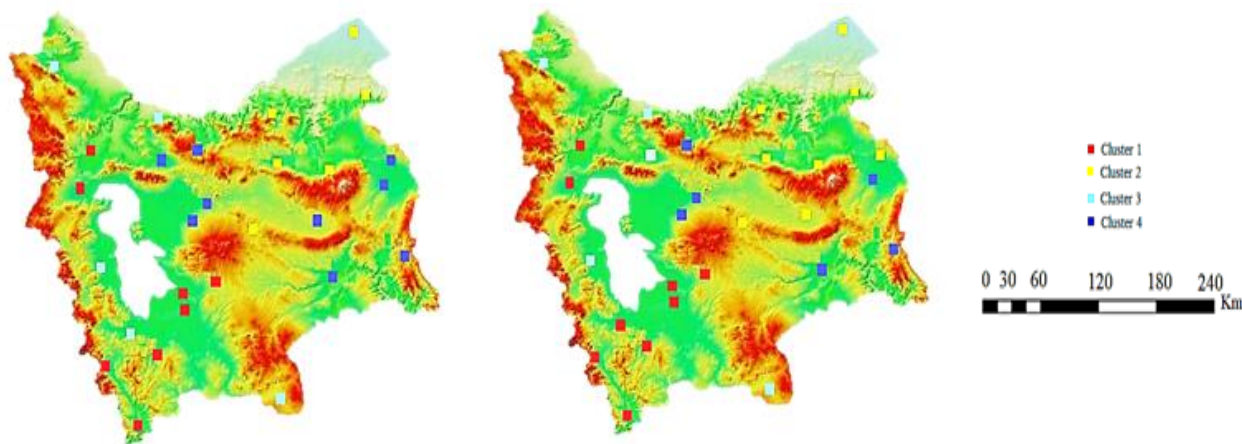
شکل ۴- مقادیر بهینه خوشه‌بندی به‌دست آمده برای روش k-means

مناطق با اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم (مناطق خشک) است. خوشه (۳) دارای ۵ ایستگاه است که به‌صورت پراکنده در نیمه غربی منطقه قرار گرفته‌اند و اکثراً دارای اقلیم نیمه‌خشک هستند. خوشه (۴) نیز دارای ۹ ایستگاه هست که در قسمت جنوب شرقی و نواحی مرکزی منطقه قرار گرفته‌اند و دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک هستند. بر اساس داده‌های ماهواره‌ای نیز در خوشه (۱)، ۹ ایستگاه توزیع شده در جنوب و غرب منطقه وجود دارد. خوشه (۲) دارای ۸ ایستگاه توزیع شده در شمال شرق منطقه است. خوشه (۳) دارای ۵ ایستگاه است که به‌صورت پراکنده در نیمه غربی منطقه قرار گرفته‌اند و خوشه (۴) دارای ۶ ایستگاه در قسمت جنوب شرقی و نواحی مرکزی است.

بر اساس اطلاعات بارش برای دوره انتخابی، بارش در مناطق جنوب و به‌ویژه جنوب غربی مقدار حداکثر را داشته (ایستگاه سردشت با داشتن میانگین بارندگی سالانه ۸۲۳ میلی‌متر) و با حرکت به سمت مناطق شمال شرقی (ایستگاه پارس‌آباد با داشتن میانگین بارندگی سالانه ۲۲۲ میلی‌متر) مقدار نزولات جوی کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبروزه اقلیم شمال غرب کشور به چهار اقلیم خشک، نیمه‌خشک، نیمه مرطوب و مرطوب تقسیم می‌شود. بر اساس این طبقه‌بندی نواحی جنوب غربی دارای اقلیم مرطوب و نیمه مرطوب بوده، بخش شمال شرقی و برخی نواحی مرکزی دارای اقلیم خشک بوده و بقیه نواحی دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشند (صمدی نقاب، ۱۳۹۵).

زیرمجموعه‌های تجزیه‌شده در مرحله پیش‌پردازش، مقیاس‌های ماهانه متفاوتی را نشان می‌دهد. با این حال، برخی از این مؤلفه‌ها همبستگی قوی با SPIهای اصلی ندارند؛ بنابراین، مقادیر میانگین انرژی زیرمجموعه‌ها محاسبه و به‌عنوان ورودی K-means برای انجام دسته‌بندی فضایی در نظر گرفته شد. ویژگی‌های دینامیکی سری‌های زمانی بر اساس مقادیر انرژی آن‌ها می‌تواند برای بهبود کارایی رویکردهای خوشه‌بندی استفاده شود. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها بر اساس خوشه‌بندی از طریق مقادیر انرژی در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. در شکل (۵-ب)، اعضای هر خوشه و ایستگاه‌های مرکزی آن‌ها بر اساس شاخص SC ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که برخی از ایستگاه‌های واقع در یک خوشه در سراسر منطقه مورد مطالعه پراکنده شده‌اند که نشان می‌دهد مجاورت جغرافیایی تنها مبنای خوشه‌بندی با توجه به تفاوت در مقادیر انرژی محاسبه‌شده برای هر ایستگاه نیست.

بر اساس مشاهدات، ۲۸ ایستگاه انتخابی به خوشه ۴ خوشه جدا شدند. تشابه عدم قطعیت هیدرولوژیکی درون-خوشه‌ای آشکار بوده است اگرچه برخی ایستگاه‌های باران‌سنجی در برخی خوشه‌ها بافاصله زیاد از هم قرار دارند. به بیانی دیگر، اساس خوشه‌بندی در این مطالعه لزوماً قربت ایستگاه‌ها نیست. با توجه به شکل (۵)، بر اساس داده‌های ایستگاه‌های زمینی در خوشه (۱)، ۸ ایستگاه توزیع شده در جنوب غرب و غرب منطقه وجود دارد که در مناطق با اقلیم مرطوب و نیمه مرطوب جای دارند و بارش متوسط سالانه در آن‌ها زیاد است. خوشه (۲) دارای ۶ ایستگاه توزیع شده در شمال شرق منطقه است که نماینده



شکل ۵- (الف): خوشه‌بندی مکانی منطقه مورد مطالعه و (ب): مقدار SC برای هر ایستگاه در هر خوشه از طریق روش VMD-K- means و ایستگاه‌های مرکزی آن‌ها (ایستگاه‌های با رنگ زرد)

خوشه‌بندی مبتنی بر انرژی به اثبات می‌رسد. مشاهده می‌شود که با استفاده از هر دو مجموعه داده بارش ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای، مناطق همگن به‌طور مناسبی خوشه‌بندی شده‌اند. به-

به‌طور کلی، می‌توان گفت اقلیم منطقه از جنوب به سمت شمال از حالت مرطوب به نیمه‌خشک تغییر می‌کند. با توجه به مطالب ذکر شده و نتایج خوشه‌بندی، عملکرد مناسب روش

یکی از بهترین سنجنده‌ها برای مطالعات ارزیابی مکانی و زمانی خشک‌سالی‌ها، سنجنده MODIS است که استفاده از اطلاعات آن مورد نظر در این تحقیق است. بدین منظور شاخص‌های LST، NDVI، به‌عنوان محصولات حاصل از سنجنده MODIS و شاخص‌های VHI، TCI، VCI، به‌عنوان شاخص‌های ترکیبی حاصل از سری‌های زمانی NDVI و LST به‌منظور ارزیابی کارایی شاخص‌های سنجش‌ازدور در پایش خشک‌سالی مورد استفاده و بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل ارائه شدند. بازه زمانی در نظر گرفته شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است. NDVI و LST دو شاخص مهم مبتنی بر ماهواره هستند که می‌توانند برای پایش خشک‌سالی، به‌ویژه در مناطق دورافتاده با دسترسی دشوار استفاده شوند. به گفته متیو و همکاران، NDVI نه تنها حضور پوشش گیاهی را بر اساس پیکسل نشان می‌دهد، بلکه معیارهایی از وضعیت یا میزان پوشش گیاهی در یک پیکسل را نیز ارائه می‌دهد (Mathew et al., 2018). همچنین، LST به دلیل اهمیت آن در فیزیک فرآیندهای سطح زمین در هر دو مقیاس منطقه‌ای و جهانی به‌عنوان یک شاخص خوب برای تعادل انرژی در سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه از مجموعه داده‌های MODIS (MOD13Q1) و MODIS (MOD11A2) به ترتیب برای به دست آوردن سری‌های زمانی NDVI و LST استفاده شد. علاوه بر این، در این تحقیق، امکان استفاده از TCI و VCI استخراج شده از LST و NDVI در ارزیابی خشک‌سالی بررسی شده است. مطابق با ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2015)، پایش خشک‌سالی تنها از طریق شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی دارای محدودیت‌هایی است. باین‌حال، آن‌ها را می‌توان از طریق ترکیب دمای سطح (LST) حل کرد؛ بنابراین می‌توان از VHI به‌عنوان جایگزین مناسب در پایش خشک‌سالی استفاده کرد.

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۲) و شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. شکل (۶) توزیع مکانی NDVI را برای یک سال خشک (۲۰۰۸) و یک سال مرطوب (۲۰۱۰) و همچنین برای میانگین NDVI در طول دوره در نظر گرفته نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که قسمت جنوب غربی منطقه مورد مطالعه کمتر تحت تأثیر خشک‌سالی قرار گرفته است و بخش‌های مرکزی خشک‌سالی شدیدتری دارند. مقادیر میانگین بلندمدت (۲۰۰۰-۲۰۰۰)

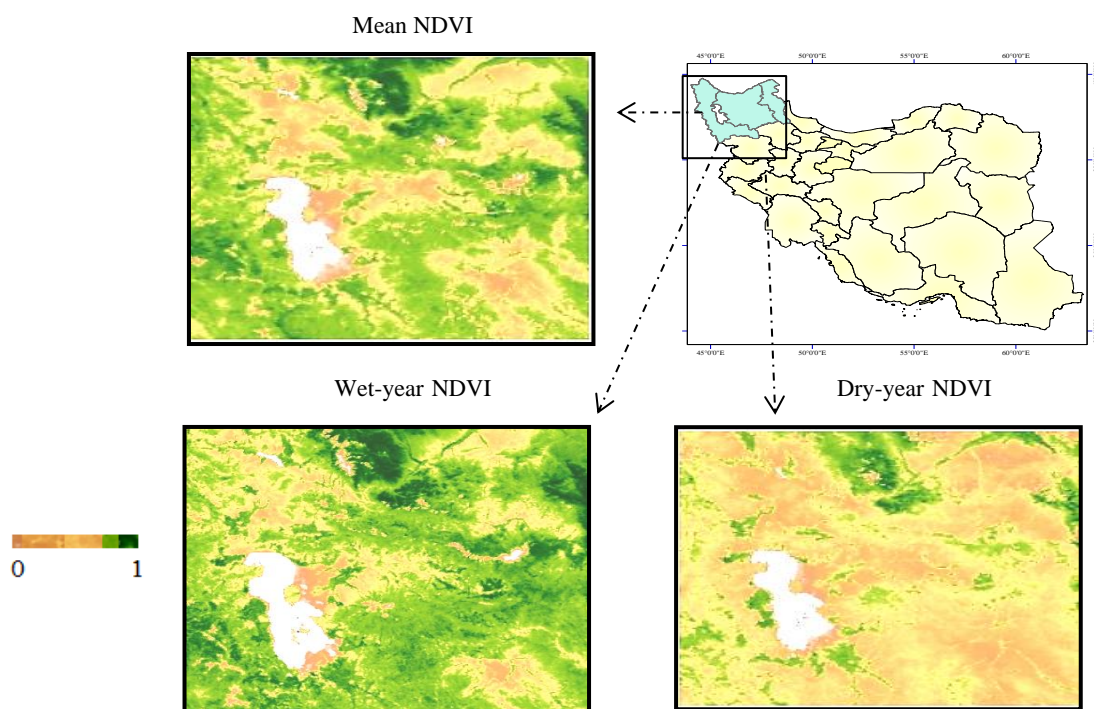
عنوان مثال، ایستگاه‌های واقع در جنوب غرب منطقه که کمتر مستعد خشک‌سالی هستند در یک خوشه قرار دارند و ایستگاه‌های واقع در جنوب شرق منطقه که دارای الگوی خشک‌سالی شدیدتری هستند در یک خوشه جای دارند.

بررسی خشک‌سالی و طبقه‌بندی مکانی منطقه شمال غرب ایران توسط دیگر محققان نیز انجام پذیرفته است. به‌عنوان مثال، عزیزی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از شاخص ناهنجاری‌های بارندگی به پهنه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی در شمال غرب ایران پرداختند و نشان دادند که اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر وسعت، شدت و گسترش مکانی، خشک‌سالی نسبتاً ضعیفی داشته‌اند. صلاحی و فریدپور (۱۳۹۵) با استفاده از داده‌های بارندگی ۲۳ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی در بازه زمانی ۲۰ ساله در شمال غرب ایران، به بررسی و تحلیل فضایی خشک‌سالی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مقادیر SPI، دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی منطقه را شناسایی کرده و اقدام به پهنه‌بندی خشک‌سالی کردند. آن‌ها به‌منظور تبیین الگوی حاکم بر خشک‌سالی در شمال غرب ایران از آماره‌های سراسری و موضعی موران در حکم رویکردهای تحلیل اکتشافی داده‌های فضایی استفاده کردند. 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 و نشان می‌دهد که توزیع فضایی خشک‌سالی خوشه‌ای است. همچنین، جهت شناسایی الگوهای فضایی حاکم بر خشک‌سالی از آماره عمومی G استفاده شد. نتایج این آماره نشان داد که قسمت غرب و شمال غرب منطقه دارای الگوی خشک‌سالی ملایم و جنوب شرق منطقه دارای الگوی خشک‌سالی بسیار شدید می‌باشد که در سطح ۰/۹۹ درصد معنادار می‌باشند. همچنین سال ۲۰۰۸ به‌عنوان سالی که تمامی ایستگاه‌ها دارای خشک‌سالی شدید است انتخاب گردید. این نتایج با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای مطابقت دارد.

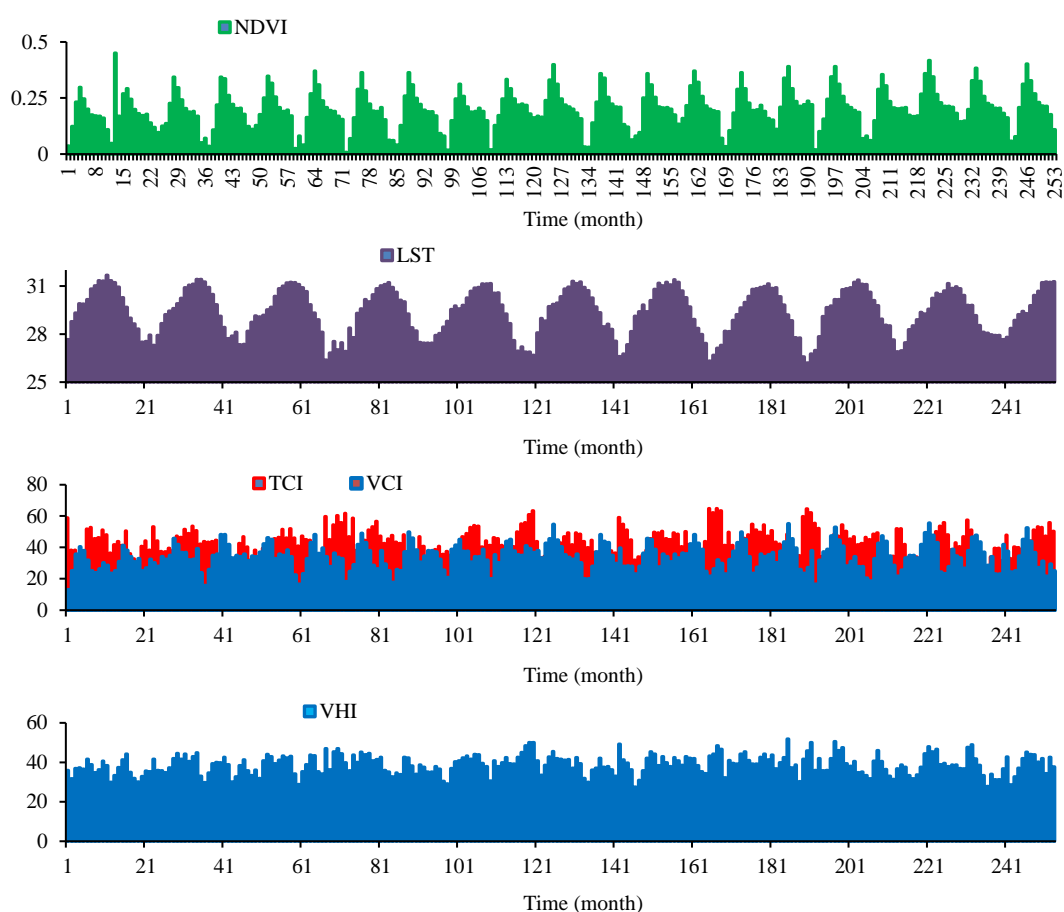
نتایج بررسی خشک‌سالی منطقه با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و همبستگی بین آن‌ها

از دماهای بالاتر بر NDVI تأثیر می‌گذارد (Karnieli et al., 2010). مطابق با گیدی و همکاران، در طول خشک‌سالی، تنها LST افزایش می‌یابد درحالی‌که NDVI به دلیل در دسترس بودن رطوبت ضعیف و افزایش دمای سطح به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (Gidey et al., 2018). این امر می‌تواند ناشی از بارش کم در منطقه مورد مطالعه آن‌ها باشد. با این حال، در مناطق با دمای پایین، رابطه بین NDVI و LST ممکن است مثبت باشد. به‌عنوان مثال، در طول زمستان یا فصل سرد، رگرسیون بین NDVI و LST می‌تواند مثبت باشد (Sun and Kafatos, 2007). یک رابطه منفی نیز بین VCI و TCI مشاهده شد. نتایج نشان داد که بین VHI و SPI رابطه مثبت وجود دارد. گیدی و همکاران نشان دادند که وقتی SPI افزایش می‌یابد، VHI نیز تمایل به افزایش دارد (Gidey et al., 2018). رابطه آماری بین SPI و VHI نشان می‌دهد که چگونه خشک‌سالی ارزیابی شده توسط VHI با خشک‌سالی هواشناسی اندازه‌گیری شده توسط SPI مرتبط است. نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که رابطه بین SPI و VHI مثبت و از نظر آماری معنادار است...

۲۰۲۰) NDVI در منطقه انتخاب‌شده بین ۰.۰۰۸ و ۰.۴۵ هست. درحالی‌که، مقادیر LST بین ۲۶.۲ و ۳۱.۶۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. به‌طور کلی، منطقه‌ای با مقدار NDVI کمتر نشان‌دهنده مقدار LST بالا است و بالعکس. مقدار NDVI بالاتر، پوشش گیاهی سالم‌تر با محتوای کلروفیل بالا را نشان می‌دهد. همچنین منطقه‌ای با VHI پایین نشان‌دهنده وقوع زیاد خشک‌سالی و مقدار VHI بالاتر شرایط مرطوب را نشان می‌دهد. از سری زمانی VHI می‌توان استنباط کرد که خشک‌سالی‌های متوسط ($۲۰ < VHI < ۳۰$) و خفیف ($۳۰ < VHI < ۴۰$) در منطقه رخ داده است. نتایج رابطه بین LST و NDVI نشان می‌دهد که بین دو شاخص مذکور همبستگی منفی وجود دارد و با افزایش LST به مقدار مشخصی، NDVI کاهش می‌یابد. ژانگ و جیا نیز یافته‌های مشابهی را گزارش کردند. آن‌ها گزارش دادند که LST در طول روز قوی‌تر است و این باعث سطح بالاتری از تنش گیاهی می‌شود که می‌تواند منجر به بروز خشک‌سالی شود (Zhang and Jia, 2013). همچنین کارنیلی و همکاران استفاده از NDVI و LST را برای ارزیابی خشک‌سالی بررسی کردند و نشان دادند که افزایش تبخیر همراه با کاهش رطوبت خاک ناشی



شکل ۶- توزیع فضایی NDVI برای سال‌های خشک (۲۰۰۸) و مرطوب (۲۰۱۰) و میانگین NDVI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ برای منطقه انتخاب‌شده



شکل ۷- سری‌های زمانی NDVI، TCI، VCI و VHI در طول دوره انتخاب‌شده

جدول ۲- ماتریس همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰

Indices	NDVI	LST	VCI	TCI	VHI	SPI
NDVI	1	-0.62	0.98	0.63	0.83	0.72
LST		1	-0.64	-0.97	-0.90	-0.58
VCI			1	-0.65	0.85	0.70
TCI				1	0.88	0.59
VHI					1	0.69
SPI						1

حاصل منطقه پهنه‌بندی و خوشه‌بندی گردید. در مرحله بعد، از شاخص‌های استخراج‌شده از ماهواره شامل سری‌های زمانی NDVI، LST، VCI، TCI و VHI به منظور بررسی شرایط خشک‌سالی و همبستگی‌های بین آن‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که روش مبتنی بر تکنیک ترکیبی K-VMDEnergy روش مناسبی برای رویکرد مناسب برای منطقه‌بندی خشک‌سالی است.

نتیجه‌گیری

خشک‌سالی به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی اثرات منفی بر زندگی انسان دارد. در این مطالعه از روش هوشمند چند مقیاسی و با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای خشک‌سالی شمال غرب ایران بررسی شد. در این راستا، با روش VMD سری‌های زمانی خشک‌سالی تجزیه و بر اساس مقدار انرژی زیرسری‌های

ترابی نژاد، ن.، زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ۱۴۰۲. بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI). نشریه آب و خاک. ۳۷(۳): ۴۸۶-۴۷۳.

رضایی‌مقدم، م.، ولیزاده، ح.، رستم زاده، خ. و رضایی، ع. ۱۳۹۱. ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده MODIS برآورد خشکسالی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه). نشریه جغرافیا و پایداری محیط. ۱: ۱۶-۳. صلاحی، ب. و فریدپور، ف. ۱۳۹۵. تحلیل فضایی خشکسالی اقلیمی شمال غرب ایران با استفاده از آماره خودهمبستگی فضایی. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی ۳ (۳): ۱-۳۰.

صمدی نقاب، س. ۱۳۹۵. تحلیل پس پردازش خروجی مدل-های دینامیکی بر روی خشکسالی شمال غرب ایران. رساله دکتری. دانشگاه تبریز.

عزیزی، ق.، صفرزاد، ط.، محمدی، ح. و فرجی‌سبکبار، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی و مقایسه داده‌های بازکای شده بارش جهت استفاده در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۲ (۶): ۴۱-۳۳.

کاظم‌پور چورسی، س.، عرفانیان، م. و عبادی نهاری، ز. ۱۳۹۸. ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای MODIS و TRMM در پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۷۴(۲): ۳۴-۱۷.

مددی، غ.، حمزه، س. و نوروزی، ع. ۱۳۹۵. ارزیابی تصاویر ماهواره‌ای TPMM جهت پایش زمانی و مکانی خشکسالی، مطالعه موردی: حوضه مرزی غرب. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۴(۴): ۳۷۶-۳۶۲.

مقیمی، م.، کوهی، ا. و زارعی، ع. ۱۳۹۷. پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکوف. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۳(۳): ۱۶۵-۱۵۳.

Agarwal, A., Maheswaran, R., Sehgal, V., Khos, R., Sivakumar, B. and Bernhofer, C. 2016. Hydrologic regionalization using wavelet-based multiscale entropy method. *Hydrology*. 538: 22-32.

مشاهده شد که قسمت جنوب غربی منطقه مورد مطالعه کمتر تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته است و بخش‌های مرکزی خشکسالی شدیدتری را تجربه کرده‌اند. بین شاخص خشکسالی و مقادیر انرژی رابطه معکوس به دست آمد. بدین معنی که هر چه مقادیر انرژی کمتر باشد، شدت شاخص خشکسالی بیشتر خواهد بود. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های مستقر در یک خوشه خاص در مناطق مختلف پراکنده شده‌اند و مجاورت ایستگاه‌ها به یکدیگر تنها مبنای خوشه‌بندی نیست. مطالعه کاظم‌پور و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای روش مناسبی جهت تحلیل خشکسالی است. همچنین اسمعیلی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی کارایی شاخص‌های TCI، SPI و VCI در تعیین خشکسالی شهرستان داراب پرداختند و بیان کردند که داده‌های ماهواره‌ای همبستگی مناسبی با داده‌های زمینی دارند. نتایج حاصل از شاخص‌های ماهواره‌ای در این تحقیق بیانگر یک رابطه منفی بین LST و NDVI و بین TCI و VCI و یک رابطه مثبت بین سری زمانی VHI و SPI است. از نقطه نظر سری زمانی VHI، خشکسالی‌های متوسط و خفیف در طول دوره زمانی انتخاب شده در منطقه رخ داده است.

منابع

ادیب، ا. و گرجی زاده، ع. ۱۳۹۵. بررسی و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی؛ مطالعه موردی حوضه آبریز دز. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۲(۲): ۱۸۵-۱۷۳.

اسمعیلی، ح.، میرموسوی، س.ح. و سهیلی، ا. ۱۴۰۱. تحلیل اثر خشکسالی بر پارامترهای فنولوژی شاخص‌های گیاهی با استفاده از سری زمانی تصاویر سنجنده MODIS (مورد مطالعاتی: استان همدان). نشریه علمی علوم و فنون نقشه-برداری. ۱۲(۲): ۱۶۶-۱۵۲.

بازگیر، س.، اسعدی اسکویی، ا.، عباسی، ف.، رضازاده، پ. و حقیقت، م. ۱۳۹۹. مطالعه تطبیقی کارایی برخی نمایه‌های خشکسالی هواشناسی در مناطق مختلف اقلیمی ایران. تحقیقات آب‌و خاک ایران. ۵۱(۱۱): ۲۷۶۰-۲۷۵۱.

- meteorological and remote sensing data in Guanzhong Area, China. *Hydrology Research*. 51(5): 942-958.
- Liou, Y. A. and Muluaem, G.M. 2019. Spatio-temporal assessment of drought in Ethiopia and the impact of recent intense droughts. *Remote sensing*. 11(15): 1828.
- Mathew, A., Khandelwal, S., Kaul, N. 2018. Spatio-temporal variations of surface temperatures of Ahmedabad city and its relationship with vegetation and urbanization parameters as indicators of surface temperatures. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 11: 119-139.
- Quan, Q., Gao, S., Shang, Y., Wang, B. 2021. Assessment of the sustainability of *Gymnocypris eckloni* habitat under river damming in the source region of the Yellow River. *Science of the Total Environment*. 778: 146312.
- Singh, R.P., Roy, S. and Kogan, F. 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International journal of remote sensing*. 24(22): 4393-4402.
- Sun, D. and Kafatos, M. 2007. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical Research Letters*. 34(24): L24406.
- Wang, T. and Sun, F. 2023. Integrated drought vulnerability and risk assessment for future scenarios: An indicator based analysis. *Science of the Total Environment*. 900: 165591.
- Zhang, A. and Jia, G. 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote sensing of Environment*. 134: 12-23.
- Zhang, H.K., Huang, B., Zhang, M., Cao, K. and Yu, L. 2015. A generalization of spatial and temporal fusion methods for remotely sensed surface parameters. *International Journal of Remote Sensing*. 36(17): 4411-4445.
- Zhou, Q., Leng, G., Peng, J. 2018. Recent Changes in the Occurrences and Damages of Floods and Droughts in the United States. *Water*. 10(9): 1109.
- Bento, V. A., Gouveia, C.M., DaCamara, C.C., Libonati, R. and Trigo, I. F. 2020. The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and Planetary Change*. 190: p.103198.
- Cao, S., Zhang, L., He, Y., Zhang, Y., Chen, Y., Yao, S., Yang, W. and Sun, Q. 2022. Effects and contributions of meteorological drought on agricultural drought under different climatic zones and vegetation types in Northwest China. *Science of the Total Environment*. p.153270.
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebege, R., Segosebe, E. and Zenebe, A. 2018. Using Drought indices to model the statistical relationships between meteorological and agricultural drought in Raya and its environs, Northern Ethiopia. *Earth Systems and Environment*. 2(2): 265-279.
- He, X., Luo, J., Zuo, G. and Xie, J. 2019. Daily runoff forecasting using a hybrid model based on variational mode decomposition and deep neural networks. *Water resources management*. 33: 1571-1590.
- Jalayer, S., Sharifi, A., Abbasi-Moghadam, D., Tariq, A. and Qin, S. 2023. Assessment of spatiotemporal characteristic of droughts using in situ and remote sensing-based drought indices. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 16: 1483-502.
- Jeong, H.G., Ahn, J.B., Lee, J., Shim, K.M. and Jung, M.P. 2020. Improvement of daily precipitation estimations using PRISM with inverse-distance weighting. *Theoretical and Applied Climatology*. 139(3): 923-934.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N. and Goldberg, A. 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of climate*. 23(3): 618-633.
- Kogan, F.N. 1997. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 621-636.
- Li, J., Zhang, S., Huang, L., Zhang, T. and Feng, P. 2020. Drought prediction models driven by

Assessment of Drought Severity Based on Remote Sensing Using a Multi-scale Intelligent Method (Case Study: Northwest Iran)

M. Razavi Pashabeigh¹, K. Amininia², S.M. Saghebian^{3*} and R. Ghasempour^{2&4}

Abstract

Drought as a natural disaster is one of the ecological, hydrological, agricultural and economic concerns of humans. In this study, a multi-scale intelligent method was used to assess drought severity and drought-prone areas in northwest Iran for the years 1983-2020. The modeling process utilized both remote sensing and ground-based datasets. To analyze drought conditions, drought time series were first decomposed into several subseries using the Variational Mode Decomposition (VMD) method. Then, the most effective subseries were selected based on their energy values and the selected area was zoned. In the next step, the mean energy values of each station were used as input of the K-means clustering technique. Results proved the proposed multiscale method's appropriate efficiency in effectively diagnosing drought severity. Results showed that the southeastern part suffers from severe drought, while drought in the southwestern and northwestern parts of the study area is milder. The lowest energy values were obtained for the central regions, where drier areas were present. It was found that there is an inverse relationship between the drought index and energy values. Also, based on the results obtained from clustering, it was revealed the similarity of intra-cluster hydrological uncertainty, although some rain-gauge stations in some clusters are located at a great distance from each other. In other words, the basis of clustering was not necessarily the proximity of the stations.

Keywords: Drought monitoring, K-means, Multi-scale preprocessing, Remote sensing, Vegetation

¹ Ph.D. candidate, Department of Geography, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

² Professor, Department of Geography, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

³ Professor, Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran (*-Corresponding Author Email: smsaghebian@gmail.com)

⁴ Post Doc., Faculty of Civil Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul-Türkiye

Received: 13 Jul 2024

Accepted: 23 Aug 2024