

ارزیابی روند تغییرات پوشش برف با استفاده از سامانه GEE و آزمون TFPW-MK (مطالعه موردی: حوضه ماربر - اصفهان)

حسن ترابی پوده^۱، حسین یوسفی^{۲*}، آرمان صمدی^۳، آزاده ارشیا^۴، زهرا شمسی^۴، یزدان یاراحمدی^۵

۱. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۲. دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران

۴. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۵. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۱۵، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۱/۲۵)

چکیده

مطالعه و ارزیابی تغییرات سطح پوشش برف به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب، بسیار بااهمیت است. با توجه به شرایط مناطق صعب‌العبور کوهستانی، امکان اندازه‌گیری دائم زمینی برای تخمین منابع برفایی و تشکیل پایگاه داده‌ها وجود ندارد. به همین دلیل، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در شناسایی مناطق برف‌گیر و ارزیابی تغییرات آن بسیار مهم و ضروری است. در مطالعه حاضر از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS حوضه ماربر واقع در جنوب استان اصفهان مربوط به دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹) استفاده شد. نکته درخور توجه اینکه در این مطالعه از سامانه Google Earth Engine یا به‌اختصار GEE استفاده شد که سامانه‌ای نوپا و بسیار کاربردی در سال‌های اخیر است. در مطالعه حاضر بیش از ۷ هزار تصویر مربوط به پوشش برف روزانه استفاده شده است که در GEE در کمترین زمان در دسترس قرار می‌گیرند. برای ارزیابی روند تغییرات پوشش برف از آزمون TFPW-MK استفاده شد. در این مطالعه علاوه بر برنامه‌نویسی و فراخوانی تصاویر و استخراج مقادیر پوشش برف در سامانه انجین و تحلیل روند با اجرای آزمون TFPW-MK، نرم‌افزار ArcGIS 10.5 نیز در تهیه خروجی‌ها استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد روند تغییرات سطوح پوشش برف طی دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۹)، کاهش یافته است، به طوری که از حدود ۱۲۰ کیلومتر مربع به کمتر از ۶۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۱۸ رسیده است. با توجه به درصد اعتماد ستون مربوط به p در روش TFPW ماه‌های ژانویه و آگوست دارای روند منفی معنادار در سطح ۵ درصد هستند و ماه ژوئن روند منفی معنادار در سطح ۱۰ درصد دارد. شدیدترین روند کاهش مربوط به ماه ژانویه با آماره $(Z = -2/518)$ است. روند سالیانه نیز با آزمون TFPW بررسی شد که نشان‌دهنده روند منفی معنادار در سطح ۵ درصد بود. آب حاصل از ذوب برف در این منطقه به‌عنوان یک منبع مهم تأمین آب باید مورد توجه، حفاظت و بررسی‌های بیشتر و نیز بررسی علل در مطالعات آینده قرار گیرد.

کلیدواژگان: برف، حوضه ماربر، MODIS، GEE، TFPW-MK.

مقدمه

مطالعات و بررسی‌های مربوط به برآورد سطح پوشش برف به‌عنوان نوعی عملیات محوری و اساسی در زمینه مدیریت منابع آب به‌ویژه در مناطقی است که بارش برف، سهم زیادی در نزولات جوی دارد [۱]. پوشش برف و تغییرات زمانی آن از پارامترهای اساسی در مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیم‌شناسی در مناطق با عرض جغرافیایی بالا و متوسط است [۲]. ذخایر برفی در بالادست کوه‌ها، الگوی رواناب فصلی پایین‌دست را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به‌خصوص در مناطق با فصل تابستان خشک که در آن رواناب حاصل از ذوب برف یک منبع اساسی برای تأمین آب است [۳]. برای نخستین بار برف‌سنجی در سال ۱۹۶۰ در شرق کانادا توسط ماهواره ۱-TIROS انجام شد. پیشرفت‌های اخیر در فناوری و تعدد ماهواره‌ها، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در بررسی پوشش برف را امری حیاتی ساخته است [۴]. طی چند دهه گذشته، سنجنده‌های ماهواره‌ای متعدد و متنوعی طراحی و به فضا ارسال شده که یکی از انواع مهم آنها ماهواره TERRA است. سنجنده MODIS ماهواره یادشده با توجه به قابلیت‌های فنی و اپتیکی خود، تصاویر متنوعی را در باندهای مختلف الکترومغناطیس عرضه می‌کند [۵]. سطوح برفی تغییرات زیادی نسبت به زمان دارند و در نتیجه، پایش آن نیازمند استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک زمانی زیاد است. در مطالعات متعدد، توانایی سنجنده MODIS در استخراج سطوح پوشیده از برف به اثبات رسیده است. بلاش و پارازک به بررسی ارزش داده‌های سنجنده MODIS در کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی بر مبنای مقایسه غیر مستقیم آب معادل برف شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و داده‌های پوشش برفی سنجنده MODIS پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد داده‌های تصاویر سنجنده MODIS کارایی مدل‌های ذوب برف را بهبود می‌بخشد [۶]. فتاحی و مقیمی در مطالعه‌ای تأثیر تغییرات اقلیمی بر روند پوشش برف شمال غرب ایران را با استفاده از سنجنده MODIS بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها، کاهش سطح پوشیده از برف و تهدید ذخایر برفی منطقه را تأیید کرد [۷].

روش‌های متعددی برای بررسی وجود تغییرات در سری‌های زمانی وجود دارد. روش‌های ناپارامتریک معمول‌ترین روش‌های آماری هستند که برای بررسی وجود

تغییرات معنادار در سری‌های زمانی هیدرومتئورولوژیک استفاده می‌شوند. دلیل عمده استفاده از روش‌های ناپارامتریک این است که روش یادشده برای داده‌هایی که توزیع نرمال ندارد، مانند بسیاری از عوامل هواشناسی و هیدرومتری مناسب‌تر است [۸]. یو و همکاران با استفاده از مطالعات شبیه‌سازی سه روش PW-MK و MK-VCA و TFPW-MK را بررسی کردند و نشان دادند روش TFPW-MK بسیار دقیق‌تر از سایر روش‌هاست [۹]. شاکریان و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی روند تغییرات بارندگی و دبی رودخانه‌های حوضه کارون بزرگ با استفاده از روش TFPW-MK پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در مقیاس ماهانه ۸۷ درصد ماه‌های سال دارای روند کاهش و ۶۳ درصد ماه‌ها دارای روند افزایش معنادار بوده است و در روند سالانه نیز ۸۲ درصد ایستگاه‌ها روند کاهش داشته‌اند [۸].

از جمله منابع مهم اطلاعاتی به‌کارگرفته‌شده در پژوهش حاضر، سامانه Google Earth Engine (GEE) است. با این سامانه می‌توان تمام مناطق و پوشش‌ها را با قدرت تفکیک زمانی زیاد تحلیل کرد. همچنین، دانلود تصاویر ماهواره‌ای را به دنبال ندارد. ابزارهای مبتنی بر سیستم‌های عامل محاسبات ابری (Cloud computing operating systems) برای پردازش داده‌های جغرافیایی در مقیاس بزرگ و بدون نیاز به تخصص فنی خاصی طراحی شده‌اند؛ مانند سامانه گوگل ارث انجین که می‌تواند داده‌های موجود در پایگاه داده را پردازش کند و نتایج مناسب را ارائه دهد [۱۰ و ۱۱]. گوگل ارث انجین جدیدترین پلتفرم پردازش‌های زمین است که با فراهم آوردن امکان دسترسی آزاد کاربران به مجموعه داده‌های سنجنده از دور، فرایند کشف علمی را هموار می‌کند [۱۲]. در این سامانه کاربران از طریق یک رابط برنامه‌نویسی مبتنی بر اینترنت (AIP) و یک محیط توسعه تعاملی مبتنی بر وب به GEE دسترسی می‌یابند [۱۳]. قابلیت‌های شگفت‌انگیز این سامانه فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای استفاده از این پلتفرم برای پردازش و تفسیر داده‌های حجیم فراهم می‌کند و در زمینه‌های بسیار متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]. در سامانه گوگل ارث انجین امکان استخراج اطلاعات منابع آبی مانند مساحت پهنه‌های آبی، بارش باران، سطح پوشش

سامانه GEE و تصاویر MODIS (دارای قدرت تفکیک زمانی زیاد) و نیز آزمون TFPW-MK برای ارزیابی روند تغییرات پوشش برف در حوضه ماربر واقع در جنوب استان اصفهان استفاده شده است.

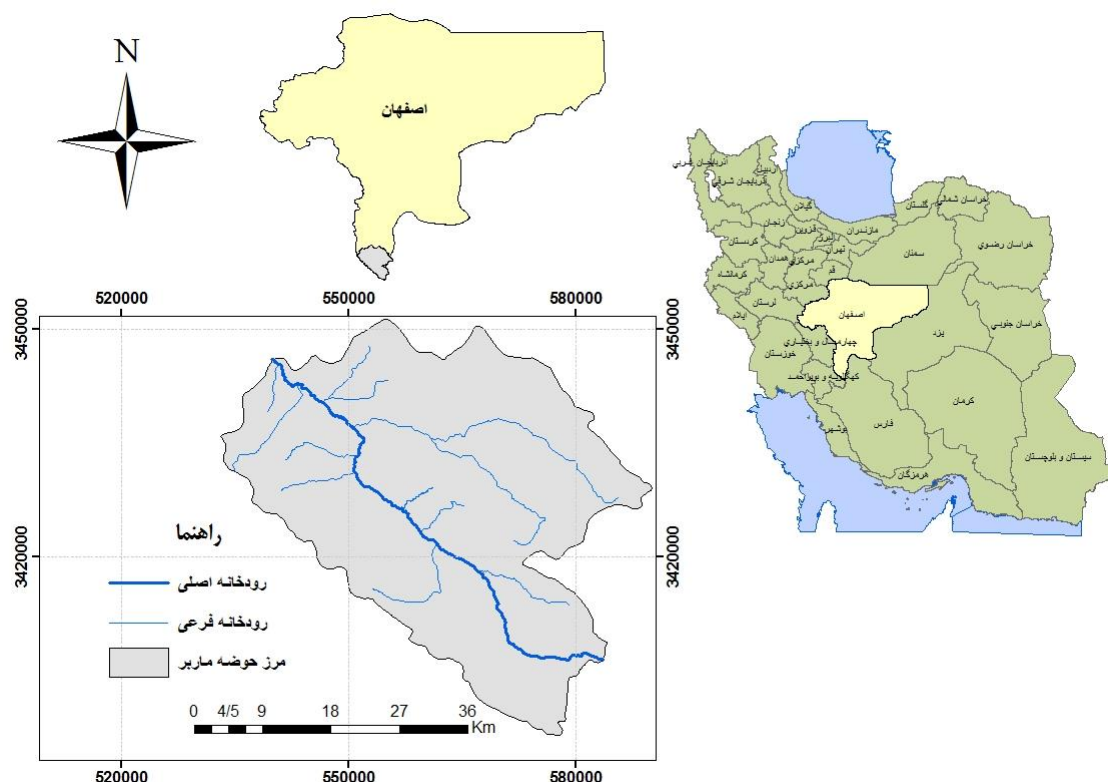
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

استان اصفهان با قرارگیری در منطقه خشک و نیمه‌خشک مرکزی، یکی از استان‌های کم‌آب ایران است که همواره تحت تأثیر پدیده خشک‌سالی بوده است. منابع آب شیرین این استان، محدود بوده و در سال‌های اخیر نیز رشد جمعیت و بهره‌برداری‌های نادرست از منابع آب باعث مشکلات کمی و کیفی منابع آب شده است. شهرستان سمیرم با مساحت ۵۱۱۳ کیلومترمربع در جنوب غربی استان اصفهان واقع شده است. منابع آب‌های سطحی شهرستان سمیرم از دو حوضه آبریز رودخانه خرسان در مرکز و نیمه جنوبی و حوضه آبریز رودخانه ونک-سولکان در نیمه شمالی شهرستان تشکیل شده است. این دو حوضه بخشی از سرشاخه‌های رودخانه کارون در شرق رشته‌کوه‌های زاگرس را تشکیل می‌دهند. حوضه آبریز رودخانه خرسان توسط ارتفاعات واقع در منطقه به چندین زیرحوضه تقسیم می‌شود که حوضه ماربر بزرگ‌ترین آن بوده و حدود ۸۳ کیلومتر طول مسیر آن است. رودخانه ماربر نقش مهمی در کشاورزی شهرستان سمیرم دارد و حدود ۴۰ هزار هکتار از اراضی شهرستان سمیرم، آب مورد نیاز خود را از این رودخانه تأمین می‌کنند. ارتفاعات پربرف دنا در شهرستان سمیرم واقع در جنوب استان اصفهان قرار دارد. مساحت حوضه رودخانه ماربر ۱۶۵۴ کیلومتر مربع، ارتفاع حداقل ۱۷۸۷ متر و ارتفاع حداکثر ۴۳۵۴ متر و ارتفاع متوسط ۲۵۳۸ متر است. متوسط بارش سالیانه در این منطقه ۵۶۶/۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۱/۸ سانتی‌گراد است. حداقل سطح پوشش برف ۴۳/۴۳ کیلومترمربع، حداکثر سطح پوشش برف سالیانه ۱۶۲/۴۶ و میانگین ۱۰۱/۱۸ کیلومترمربع است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه ماربر در ایران و استان اصفهان نشان داده شده است.

برف، عمق برف، آب زیرزمینی، رواناب، سیل، پایش خشک‌سالی و بسیاری موضوعات مختلف دیگر قابل بررسی است. پژوهشگران در سال‌های اخیر و با روی کار آمدن این سامانه برای تحقیقات سنجش از دور، کشاورزی، مدیریت بلایای طبیعی، پیش‌بینی شیوع بیماری و موضوعات متعدد دیگر از آن بهره می‌گیرند. وانگ و همکاران با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین به ارزیابی تغییرات پهنه‌های آبی با بررسی پویایی طولانی‌مدت دریاچه پویانگ پرداختند و آن را ابزاری مناسب برای این مطالعات معرفی کردند [۱۵]. خسروی و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های آبی و گوگل ارث انجین در تالاب‌های شهرستان پلدختر پرداختند. آنها تغییرات تالاب‌ها طی چهار دهه گذشته را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و کاربرد ۷ شاخص پهنه آبی بررسی کردند و در گوگل ارث انجین از Landsat Water Product بهره گرفتند. اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌ها و سرویس ارث انجین نشان داد ابزاری مفید برای شناسایی روند افزایشی و کاهش سطح آب تالاب‌ها هستند [۱۶]. شیخ‌قادری و مهدوی‌فرد در مطالعه‌ای به‌کارگیری و پردازش داده‌های حجیم چندسنجنده‌ای را در Earth Engine (EE) Explorer به‌منظور آشکارسازی تغییرات دریاچه ارومیه در فصول بارشی بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد خروجی‌های حاصل از تصاویر لندست همبستگی زیادی با محصول آبی مودیس دارد و نیز سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بیش از ۲۶ درصد کاهش داشته که در این میان بیشترین کاهش سطح آب مربوط به ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ با بیش از ۵۲ درصد بوده است. آنها نتیجه گرفتند که سامانه انجین، ابزاری مفید برای شناسایی و پایش روند تغییرات سطح دریاچه‌ها و همچنین، کار با داده‌های حجیم است [۱۷].

با توجه به اینکه گوگل ارث انجین به‌عنوان سامانه‌ای نوپا و بسیار کاربردی توانسته است بسیاری از فرایندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر آسان کند و بسیار مورد توجه و استقبال پژوهشگران در موضوعات مختلف قرار گرفته است، در پژوهش حاضر از قابلیت‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه ماربر در ایران و استان اصفهان

بررسی‌ها با استفاده از این نرم‌افزارها بسیار زمان‌بر بود و باید ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری انجام می‌شد تا از درصد خطاها کاسته شود و تعداد بسیار زیادی تصویر با حجم زیاد، تولید و طبقه‌بندی شود. این عملیات علاوه بر هدررفت زمان زیاد، نیاز به حافظه ذخیره‌سازی زیادی هم برای تصاویر داشت. با استفاده از سامانه GEE می‌توان گام بزرگی در مدیریت منابع آب و محیط اطراف آن برداشت [۱۸]. برای این بخش از پژوهش حاضر، ابتدا مرز حوضه ماربر به وارد سامانه گوگل ارث انجین شد و با استفاده از کدنویسی، تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز برای مطالعه، فراخوانی شد. برای انجام پردازش، حوضه مطالعه‌شده از روی تصاویر MODIS معرفی شد و سپس، بازه زمانی مد نظر، تعیین شده و تمام تصاویر ماهواره‌ای که در بازه زمانی معین از طریق سنجنده MODIS از پوشش برف حوضه ماربر واقع در جنوب استان اصفهان گرفته شده بود، فراخوانی شد. نکته درخور توجه اینکه در این مطالعه تصاویر روزانه مربوط به پوشش برف ماهواره MODIS طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، طی زمان کوتاهی و فقط با استفاده از کدنویسی تحت وب، فراخوانی شد. به این معنا که دستیابی

مواد

در این مطالعه از سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS برای بررسی تغییرات سطح پوشش برف استفاده شد که روشی جدید در علم سنجش از دور است. سامانه گوگل ارث انجین (GEE)، سامانه‌ای نوپا و بسیار کاربردی برای علوم مختلف در سال‌های اخیر محسوب می‌شود که بیشترین حجم داده را در کمترین زمان در اختیار قرار می‌دهد. همچنین، برای محاسبات لازم و میانگین‌گیری مقادیر سطوح پوشش برف از Excel استفاده شد. برای تحلیل روند داده‌ها از آزمون TFPW-MK بهره گرفته شد. برای تهیه نقشه‌های خروجی سطوح پوشش برف از نرم‌افزار ArcGIS10.5 استفاده شد.

روش کار

سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)

تا کنون محاسبات سطح پوشش برف و موضوعاتی از این نوع و مرتبط با تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند ENVI انجام می‌گرفت. محاسبات و

که در آن t_m تعداد داده‌های یکسان در دسته i ام است. آماره آزمون MK یا Z با رابطه ۴ محاسبه می‌شود. احتمال آماره Z آزمون MK را می‌توان با استفاده از توزیع تجمعی نرمال محاسبه کرد [۲۰].

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

آزمون MK روی سری زمانی پیش‌سفیدشده به روش TFPW

روش TFPW-MK برای شناسایی روند در یک سری زمانی دارای خودهمبستگی توسط یو و همکاران (۲۰۰۲) به صورت زیر ارائه شد:

۱- شیب روند در داده‌های نمونه با استفاده از روش TSA به صورت زیر برآورد می‌شود (رابطه ۵).

$$b = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_i}{j-i} \right) \quad \forall i < j \quad (5)$$

۲- اگر شیب تقریباً برابر صفر باشد، دیگر نیازی به ادامه انجام آنالیز روند نیست، اما اگر مقدار آن برابر با صفر نباشد، روند به صورت خطی فرض شده و داده‌های نمونه به صورت $X'_t = X_t - T_t = X_t - bt$ نوشته شده و بدون روند می‌شوند. ۳- ضریب خودهمبستگی مرتبه اول سری بدون روند X'_t با استفاده از معادلات زیر برآورد می‌شود (رابطه ۶).

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} [X'_t - E(X'_t)][X'_{t+k} - E(X'_{t+k})]}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [X'_t - E(X'_t)]^2} \quad (6)$$

$$E(X'_t) = \frac{1}{n} \sum_1^n X'_t$$

۱ ضریب خودهمبستگی مرتبه ۱ داده‌های نمونه سری بدون X'_t و $E(X'_t)$ میانگین داده‌های نمونه است.

۴- پس از محاسبه ضریب خودهمبستگی با مرتبه اول، خودهمبستگی مرتبه اول AR(1) با استفاده از $Y'_t = X'_t - r_1 X'_{t-1}$ حذف می‌شود. این روش پیش‌سفید کردن پس از حذف روند از سری‌ها، روش پیش‌سفید کردن بدون روند نامیده می‌شود (TFPW). سری باقی‌مانده‌ها پس از انجام روش TFPW یک سری مستقل

به بیش از ۷ هزار تصویر ماهواره‌ای در کوتاه‌ترین زمان و بدون نیاز به فضای ذخیره‌سازی برای داده‌های حجیم.

تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS

سنجنده MODIS یکی از پنج سنجنده مستقر روی ماهواره Terra است که در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد. این سنجنده هر ۱ تا ۲ روز، یک پوشش کامل تصویری از زمین در ۳۶ باند طیفی ارائه می‌دهد. سنجنده MODIS دارای قدرت تفکیک زمانی زیاد (۱ تا ۲ روز) و قدرت تفکیک مکانی متوسط (۲۵۰ تا ۱۰۰۰) است که این خصوصیات برای مطالعات برف‌سنجی مورد نیاز است. تصاویر پوشش برف MODIS برای تعیین مساحت پوشش برف در مناطق مرتفع که ایستگاه برف‌سنجی ندارند، بسیار مفید است [۱۹]. در مطالعات برف‌سنجی سال‌های گذشته با این سنجنده، نیاز به دانلود تعداد زیادی تصویر و داده‌های حجیم و تصحیحات و آماده‌سازی‌ها برای تحلیل بود، اما در سال‌های اخیر و با وجود قابلیت‌های فراهم‌شده در سامانه گوگل ارث انجین در کوتاه‌ترین زمان به بررسی و تحلیل تصاویر می‌توان پرداخت.

آزمون MK روی سری زمانی بدون حذف ضریب خودهمبستگی (پیش‌سفیدنشده)

آزمون MK یکی از آزمون‌های پرکاربر غیر پارامتریک برای تحلیل روند داده‌ها است. فرض صفر H_0 مستقل بودن و یکنواختی توزیع داده‌های نمونه و فرض مقابل H_1 وجود یک روند یکنواخت در داده‌هاست. برای انجام این آزمون ابتدا باید آماره S را با رابطه ۱ محاسبه کرد که در آن X_j مقدار داده زام، n تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت بوده و با رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 1 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

برای $n \geq 8$ آماره S دارای توزیع نرمال است و میانگین و واریانس آن از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_m(t_m-1)(2t_m+5)}{18} \quad (3)$$

دوره مطالعه شده، آورده شده است. همان طور که گفته شد، این مقادیر روزانه از سامانه گوگل ارث انجین در کمترین زمان، فراخوانی و استخراج شده اند و متوسط سطح پوشش برف روزانه طی دوره ۲۰ ساله در Excel برای حوضه ماربر محاسبه شد که معادل ۱۰۱ کیلومتر مربع بوده و بیشترین سطح پوشش برف روزانه ۱۴۲۶ کیلومتر مربع بوده است. اگر به محور افقی شکل ۳ دقت شود، ملاحظه می شود که بیش از ۷ هزار روز یعنی بیش از ۷ هزار تصویر و مقادیر عددی روزانه سطح پوشش برف در سامانه انجین بدون نیاز به حجم زیاد و صرف زمان برای دانلود و پردازش تصاویر، فراخوانی شده است که این از مزایای بسیار مهم این سامانه برای مطالعات سنجش از دور است. منشأ آب دائمی رودخانه ماربر در نتیجه ذوب همین برفها در فصل گرم است.

در شکل ۴ سطح پوشش برف به صورت میانگین ماهانه طی دوره زمانی مطالعه شده در حوضه ماربر آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، ماههای ژانویه، فوریه، دسامبر و مارس به ترتیب بیشترین سطوح پوشش برف را دارند که در واقع، ماههای فصل سرد سال هستند و به تاریخ شمسی در دی ماه تا فروردین ماه قرار دارند. ماههای نوامبر و آوریل و می نیز به ترتیب دارای مقدار کمی پوشش برف هستند. در ماههایی که هوا گرم است، ذوب برفها صورت می گیرد و پوشش برف تقریباً از بین می رود که شامل ماههای ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر هستند که در نمودار شکل ۴ به دست آمده از بررسی تصاویر سنجنده مودیس نیز این واقعیت مشهود است.

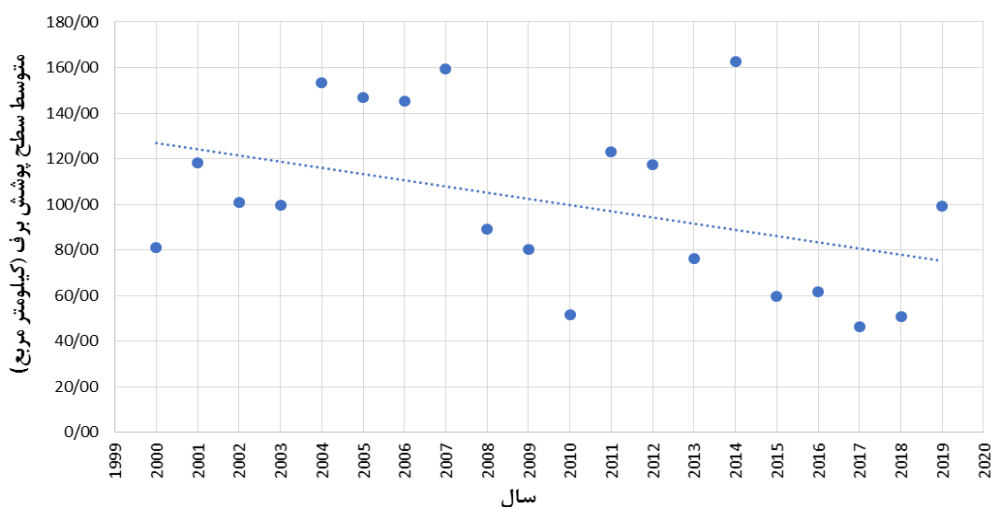
۵- روند شناخته شده T_t و سری باقی مانده ها Y'_t به صورت $Y_t = Y'_t + T_t$ با هم ترکیب می شود. بدیهی است که سری حاصل Y_t روند واقعی را حفظ کرده و اثر ضریب خودهمبستگی نیز حذف شده است. ۶- آزمون MK روی سری ترکیبی Y_t برای برآورد روند واقعی [۹].

نتایج

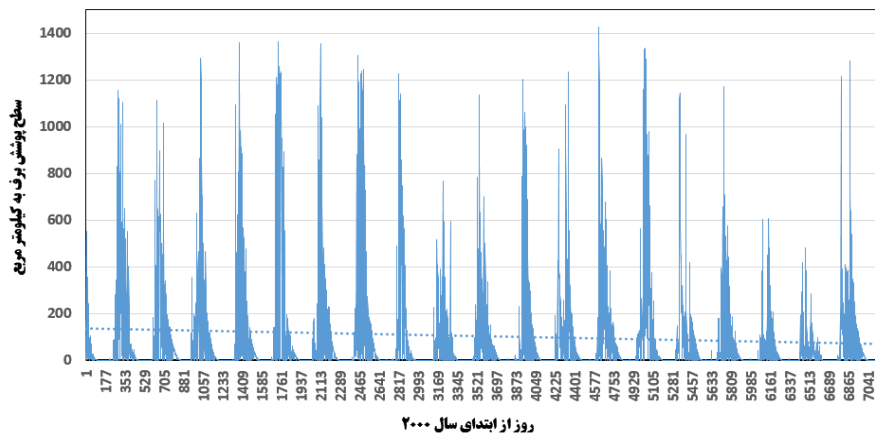
نتایج بررسی سری زمانی روزانه سطح پوشش برف در حوضه ماربر با استفاده از سامانه GEE و سنجنده MODIS

در شکل ۲ سطح پوشش برف سالیانه در حوضه ماربر طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بر حسب کیلومتر مربع آورده شده است. این اعداد با استفاده از برنامه نویسی در سامانه گوگل ارث انجین و فراخوانی تصاویر و مقادیر مربوط به پوشش برف روزانه در این سامانه و سپس، انتقال مقادیر روزانه به Excel و محاسبه مقادیر سالیانه و ماهانه طی دوره ۲۰ ساله یاد شده به دست آمده و مورد بررسی قرار گرفته اند. همان طور که مشاهده می شود طی ۲۰ سال اخیر، سطوح پوشیده از برف کاهش یافته است به طوری که از حدود ۱۲۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۱ به کمتر از ۸۰ کیلومتر مربع در سالهای ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ رسیده است. خشک سالیهای ۱۰ سال اخیر نیز طی سالهای ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ از دلایل روند منفی تغییرات سطوح پوشش برف است که در شکل ۲ نیز کاهش شدید سطوح پوشش برف این دوره، کاملاً مشهود است.

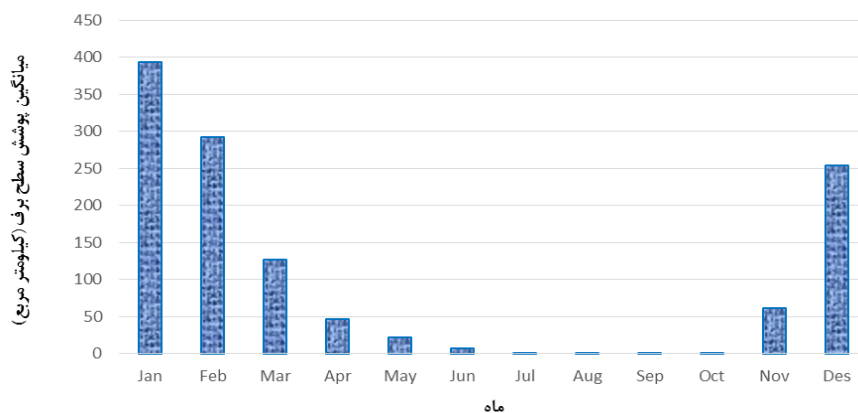
در شکل ۳ سطح پوشش برف روزانه در حوضه ماربر طی



شکل ۲. سطح پوشش برف سالیانه در حوضه ماربر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹



شکل ۳. سطح پوشش برف روزانه در حوضه ماربر طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹



شکل ۴. سطح پوشش برف ماهانه در حوضه ماربر طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹

آماره $(Z = -2/518)$ است. روند سالیانه نیز با آزمون TFPW بررسی شد و نشان‌دهنده روند منفی معنادار در سطح ۵ درصد است. طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ بود.

نقشه‌های خروجی سطح پوشش برف منطقه مطالعه‌شده در گوگل ارث انجین

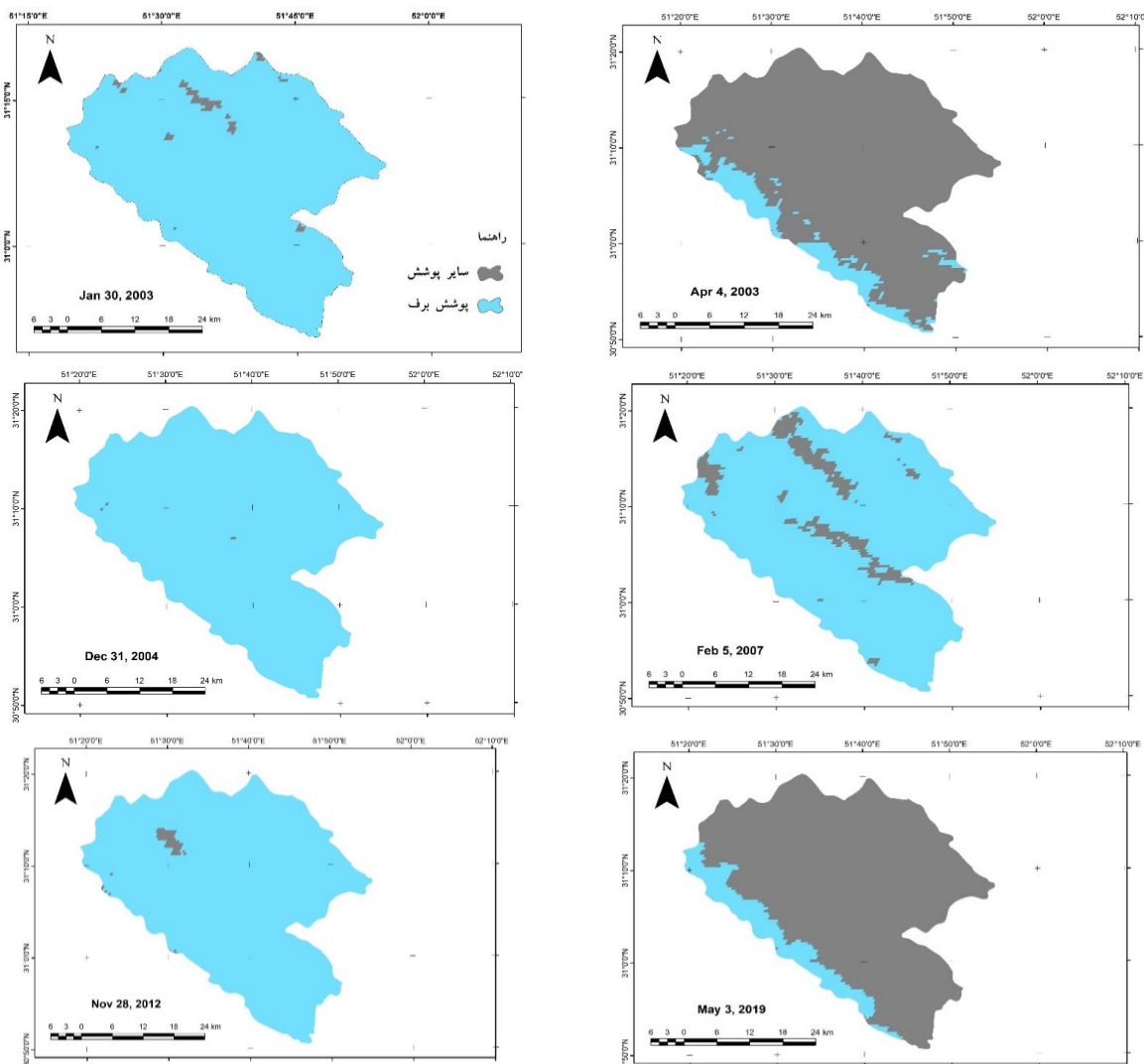
تصاویر مربوط به نقشه‌های خروجی سطح پوشش برف از انجین در ArcGIS 10.5 در ۶ تاریخ مختلف (به طور نمونه) طی دوره ۲۰ ساله در شکل ۵ آورده شده است. به طور مثال، تصویر ۴ آوریل سال ۲۰۰۳ که مربوط به فصل بهار است و پوشش برف که مربوط به ارتفاعات دنا در منطقه است، کم شده و بیانگر ذوب برف و کاهش سطوح پوشیده از برف است و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۴ که یک روز پربرف زمستانی در منطقه بوده و سطوح پوشیده از برف، منطقه را فرا گرفته است. تمامی تصاویر روزانه سطوح پوشش برف (بیش از ۷ هزار تصویر طی دوره ۲۰ ساله) از طریق سامانه انجین در کمترین زمان قابل بررسی است.

تحلیل روند تغییرات پوشش برف در حوضه ماربر با استفاده از آزمون TFPW-MK

نتایج روند تغییرات پوشش برف ۲۰ ساله مربوط به دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ با استفاده از روش‌های من-کندال و من-کندال پیش‌سفیدشده به روش TFPW در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب خودهمبستگی سطوح پوشش برف در تمام ماه‌ها بیانگر وجود خودهمبستگی در داده‌ها است؛ بنابراین، آزمون من-کندال پیش‌سفیدشده (TFPW)، ملاک عمل قرار می‌گیرد و بر اساس این آزمون، آماره Z در ماه‌های دسامبر (Des) تا ژوئن (Jun) نشان‌دهنده روند کاهشی سطوح پوشش برف طی دوره ۲۰ ساله در ماه‌های یادشده است. با توجه به درصد اعتماد (ستون مربوط به p در روش TFPW ماه‌های ژانویه و آگوست دارای روند منفی معنادار در سطح ۵ درصد هستند و ماه ژوئن روند منفی معنادار در سطح ۱۰ درصد دارد. شدیدترین روند کاهشی مربوط به ماه ژانویه با

جدول ۱. روند تغییرات پوشش برف ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۹) با استفاده از روش‌های من-کندال و من-کندال پیش‌سفیدشده به روش TFPW

نام محدوده	ماه‌های سال	شیب	ضریب خودهمبستگی	حد بالا و پایین ضریب خودهمبستگی		آزمون من-کندال	
				حد بالایی	حد پایینی	بدون پیش‌سفید	
						Z	P
	Sep	۰	-۰/۷۴	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۸۶/۰۱	۰/۰۶۹
	Oct	۰	-۰/۲۲۳	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۱۶/۲۵	-۰/۲۰۹
	Nov	۱/۹۱۶	-۰/۰۱۳	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۸۹/۱۵	۱/۶۰۹
	Des	-۸/۰۱۵	-۰/۱۶۲	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۷۶/۴	-۱/۱۸۹
	Jan	-۱۹/۳۹۴	-۰/۴۶۸	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۹۸/۸۱	-۲/۵۱۸
	Feb	-۶/۳۹۲	-۰/۰۸۹	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۸۵/۷۱	-۱/۴۶۹
	Mar	-۲/۹۰۹	-۰/۲۶۰	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۸۲/۷۸	-۱/۳۶۴
	Apr	-۰/۴۸۰	-۰/۱۰۹	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۷۶/۴	-۱/۱۸۹
	May	-۰/۸۱۲	-۰/۱۸۴	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۸۴/۸۷	-۱/۴۳۴
	Jun	-۰/۳۳۳	-۰/۰۳۵	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۹۳/۶۴	-۱/۸۵۴
	Jul	۰	-۰/۰۷۹	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۳۲/۱۹	۰/۴۱۹
	Aug	۰	-۰/۰۳۲	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۹۶/۹۶	-۲/۱۶۹
	سالانه (۲۰۰۰-۲۰۱۹)	-۳/۴۰۴	-۰/۳۱۸	-۰/۴۱۹	۰/۳۱۴	۹۶/۳۸	-۲/۰۹۹



شکل ۵. نقشه‌های خروجی سطح پوشش برف منطقه مطالعه‌شده از طریق سامانه GEE در ۶ تاریخ مختلف

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت سطح پوشش برف به‌ویژه در مناطق با فصل تابستان خشک که در آن رواناب به‌وجودآمده از ذوب برف، یک منبع اساسی برای تأمین آب است، روند تغییرات سطح پوشش برف در حوضه ماربر واقع در جنوب استان اصفهان ارزیابی شد. تصاویر مورد نیاز پژوهش حاضر که تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS مربوط به ماهواره TERRA بود، با استفاده از برنامه‌نویسی در سامانه گوگل ارث انجین (GEE) در کمترین زمان در دسترس قرار گرفت و نیازی به صرف وقت بسیار و حجم زیاد برای دانلود تصاویر و تصحیحات مختلف در نرم‌افزارهایی همچون ENVI نبود. سطوح پوشش برف به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه طی دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ در این مطالعه بررسی شد. طی ۲۰ سال اخیر، سطوح پوشیده از برف از حدود ۱۲۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۱ به کمتر از ۸۰ کیلومتر مربع در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ رسیده است. افزایش دما و همچنین، خشک‌سالی‌های ۱۰ سال اخیر نیز از سال ۲۰۰۹ از دلایل روند منفی تغییرات سطوح پوشش برف است. تمامی تصاویر روزانه مربوط به سطوح پوشش برف از سامانه گوگل ارث انجین قابل استخراج و نقشه‌های خروجی در نرم‌افزار ArcGIS10.5 قابل تنظیم و بررسی است و در پژوهش حاضر هم نقشه‌های ۶ تاریخ به‌عنوان نمونه آورده شدند. اینکه با استفاده از گوگل ارث انجین در این مطالعه به بیش از ۷ هزار تصویر ماهواره‌ای روزانه طی دوره ۲۰ ساله بدون نیاز به تصحیحات مختلف که در نرم‌افزارهایی دیگر باید انجام می‌شد، دست یافتیم، یعنی سرعت و دقت زیاد این سامانه برای مطالعات سنجش از دور بسیار مناسب است و در مطالعات اخیر داخل و خارج کشور هم، پژوهشگران به خلاف سابق به سراغ دانلود حجم زیادی از تصاویر و تصحیحات مختلف و صرف زمان زیاد نرفته‌اند و توانایی‌های این سامانه را بسیار کاربردی و معتبر دانسته‌اند. وانگ و همکاران [۱۵] نیز که همانند پژوهش حاضر به بررسی بلندمدت با این سامانه پرداختند و البته، پهنه‌های آبی را بررسی کردند، آن را بسیار مناسب برای بررسی در کمترین زمان معرفی کردند. شیخ‌قادر و مهدوی‌فرد [۱۷] نیز که همانند پژوهش حاضر، تغییرات را در این سامانه بررسی کردند (البته برای دریاچه ارومیه

انجام دادند)، گوگل ارث انجین را ابزاری مفید برای شناسایی و پایش تغییرات سطوح دریاچه‌ها و غیره و همچنین، کار با داده‌های حجیم دانستند. خسروی و همکاران [۱۶] نیز که تغییرات پهنه‌های آبی را در تالاب‌های شهرستان پلدختر انجام دادند، سرویس گوگل ارث انجین را ابزاری مفید برای شناسایی روند افزایشی و کاهش سطح آب تالاب‌ها دانستند. در پژوهش حاضر برای تحلیل روند از آزمون TFPW-MK استفاده شد که نتایج، نشان‌دهنده روند منفی و کاهش سطح پوشش برف طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بود. همچنین، روند تغییرات در ماه‌های مختلف سال هم بررسی شد و شدیدترین روند کاهش مربوط به ماه ژانویه با آماره $(Z = -2/518)$ بود. به طور غالب تغییرات ماهانه نیز نشان‌دهنده روند منفی و در واقع کاهش مقادیر سطوح پوشش برف بود. شاکریان و همکاران [۸]، یو و همکاران [۹] و بسیاری از پژوهشگران دیگر نیز همانند پژوهش حاضر، آزمون TFPW-MK را دارای دقت مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌ها دانستند و در مطالعات خود از آن بهره بردند. با توجه به اینکه گوگل ارث انجین به‌عنوان سامانه‌ای نو و بسیار کاربردی توانسته است بسیاری از فرایندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر آسان کند و امکان تحلیل‌های بسیار در کمترین زمان و بدون نیاز به دانلود تصاویر و داده‌های حجیم را فراهم آورد، بسیار مورد توجه و استقبال پژوهشگران در علوم مختلف قرار گرفته است. پیشنهاد می‌شود پژوهشگران برای مطالعات آینده خود با این سامانه بسیار کاربردی آشنا شوند و از آن در مطالعات مختلف خود با صرفه‌جویی بسیار در وقت و هزینه بهره گیرند. بررسی‌های بیشتر در رابطه با کاهش سطوح پوشش برف حوضه ماربر اصفهان نیز می‌تواند با روش‌های مختلف و بررسی علل در مطالعات آینده بررسی شود.

منابع

- [1]. Adeli U. Climatology of snowfall in northwestern Iran, Master Thesis, 2005; Remote Sensing Center of Tabriz University (In Persian).
- [2]. Zhang, Y., Yann, S., Lu, Y. "snow cover Monitoring using MODIS Data in Liaoning Province, Northeastern China", Remote Sensing. 2010; 2:777-793.

- [3]. Yang, D.B. "The Urumqi River Source Glacier No. 1, Tianshan, China: changes over the past 45 years", *Geophysical Research Letters*, 32: L21504. 2005; Doi: 10.1029/2005GL024178.
- [4]. Sirguey, P., Mathieu, R., Arnaud, Y. "Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250~m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand: methodology and accuracy assessment", *Remote Sensing of Environment*. 2019; 113(1): 160-181.
- [5]. Najafzadeh R, Abrishami A, Tajrishi M, Taheri Shahraini H. Simulation of river flow with snowmelt model, *Journal of Water and Wastewater*, 2004; Issue 52. (In Persian).
- [6]. -Blosch, G., Parajka, J. "The value of MODIS snow covers data in validating and calibrating conceptual hydrologic models", *Journal of Hydrology*. 2008; 240– 258.
- [7]. Fattahi A, Moghimi Sh. The effect of climate change on snow trend in northwestern Iran. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 2019; 19 (54). (In Persian).
- [8]. Shakerian S, Torabipoudeh H, Shahinejad B, Naghavi H. Investigating the trend of rainfall and discharge changes in the rivers of Karun Bozorg Basin using the method TFPW-MK. *Iranian Journal of Water Resources Research*, 2019; 15 (3). (In Persian).
- [9]. Yue S, Pilon P, Phinney B. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and crosscorrelation. *Hydrological Sciences Journal*, 2003; 48(1):51-64.
- [10]. Wulder M.A. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment*, 2019; 225: p.127-147.
- [11]. Zhu, Z., et al., Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*, 2019; 224: p. 382-385.
- [12]. Tamiminia H, Salehi, B, Mahdianpari, M, Quackenbush, L, Adeli, S, Brisco, B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020; 164, 152-170.
- [13]. Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 2017; 202, 18-27.
- [14]. Amani M, Mahdavi S, Afshar M, Brisco B, Huang W, Mirzadeh M, Hopkinson C. Canadian wetland inventory using Google Earth engine: the first map and preliminary results. *Remote Sensing*, 2019; 11(7), 842.
- [15]. Wang Y, Ma J, Xiao X, Wang X, Dai S, Zhao B. Long-term dynamic of Poyang Lake surface water: A mapping work based on the Google earth engine cloud platform. *Remote Sensing*, 2019; 11(3), 313.
- [16]. Khosravi R, Hassanzadeh R, Hosseinjanizadeh M, Mohammadi S. Investigation of changes in water areas using blue horn and Google Earth Engine (Case study: Tala Baha of Poldakhtar city, Lorestan province). *Journal of Echo Hydrology*, 2020; 7 (1), 131-146. (In Persian).
- [17]. Sheikh Ghaderi H, Mahdavi Fard M. Application and processing of large multimeter data in Earth Engine (EE) Explorer in order to detect changes in Lake Urmia during the rainy season. *First National Earth Data Mining Conference*, 2020, Faculty of Earth Sciences. (In Persian).
- [18]. Ali Bakhshi T, Azizi Z, Vafaeinejad A, Zanjirabadi H. Investigation of water area changes in the catchment area of Shahid Abbaspour Dam caused by 2019 floods using GEE. *Journal of Echo Hydrology*, 2020. 7 (2), 345-357. (In Persian).
- [19]. Tirgar Fakheri F, Alijani B, Firoozabadi P, Akbari M. Simulation of snowmelt runoff under climate change scenarios in Armand Basin. *Journal of Echo Hydrology*, 2017; 4 (2), 357-368. (In Persian).
- [20]. Torabi P H, Emamgholizadeh S. Investigation of changes in river discharge in Lorestan Province Using TFPW-MK. *Scientific Journals Management System*. 2015; 35:73-93 (In Persian).