نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال نهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱.

صفحات ۱۷۹ – ۱۹۴

بررسی روند تغییرات سطح پوشش برف منطقه تخت‌سلیمان با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست در سامانه گوگل ارث انجین

همایون مطیعی[1]؛ دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

صبا احراری؛ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

دریافت مقاله : ۱۴۰۱/۰۳/۳۰ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۰۵/۳۰

چکیده

یخچال‌ها از جمله منابع آبی مهم در جهان بوده که بشدت تحت تاثیر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم واقع شده‌اند. این مقاله به بررسی اثرات اقلیم بر تغییرات سطح پوشش برف و یخ منطقه تخت‌سلیمان واقع در استان مازندران در طی سه دهه گذشته با استفاده از سنجش از راه دور پرداخته شده است. به همین منظور، تصاویر مربوط به ماه ژوئن میلادی ماهواره‌های لندست-۵ و ۸ در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ و همچنین داده‌های محصول دمای هوای سنجنده ERA۵ در پلتفرم گوگل ارث انجین پردازش شد تا میزان دما و سطح پوشش برف و دمای هوای منطقه مورد بررسی مورد محاسبه و بررسی قرار گیرد. در این پژوهش به منظور تشخیص سطوح پوشیده از برف و یخ، از شاخص NDSI (شاخص سطح نرمال‌شده پوشش برف) و برای ارزیابی روند داده‌ها از ضریب کاپا و آزمون من-کندال استفاده گردید. نتایج صحت کلی و ضریب کاپا در سامانه گوگل ارث انجین نشان از صحت کلی ۹۴ درصد و ضریب کاپا ۸۹ درصد در سال ۲۰۲۱ دارد که نشان از مطابقت بالای این روش با داده‌های واقعی است. نتایج بدست‌آمده در این تحقیق در طی بازه زمانی مورد بررسی نشان‌دهنده افزایش حدودا ۱.۵ درجه‌ای دما در طول سه دهه گذشته در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد می باشد. نتایج نشان می دهد که سطح پوشش برف و یخ یخچال‌های تخت سلیمان در ماه ژونن (خرداد) از مقدار ۱۲۷ کیلومترمربع در سال ۱۹۹۰ با کاهش ۸۰ درصدی به ۲۲ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۱ رسیده است. روند تغییرات سطح پوشش برف ماه ژوئن نیز با آزمون من-کندال بررسی شد که نشان دهنده روند منفی معنادار در سطح معنی‌داری بین ۸۰ تا ۹۰ درصد می باشد. به طور کلی این نتایج نشان‌دهنده افزایش دما و کاهش سطح برف و یخ این منطقه در طی دوره آماری مورد مطالعه می‌باشد و ادامه روند زوال تدریجی یخچال های این منطقه در آینده، تهدیدی جدی برای منبع آب پایین دست و محیط زیست اطراف آنها می باشد.

کلمات کلیدی : تغییر اقلیم، سنجش از راه دور، یخچال ها، سامانه GEE ، شاخص NDSI.

[1] . نویسنده مسئول: Email: h_motiei@sbu.ac.ir

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

مقدمه

گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی از خطراتی است که بر وضعیت فعلی و آینده منابع آب جهان بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک در حال تاثیرات منفی جدی می باشد (IPCC, ۲۰۲۱). یخچال‌ها به عنوان بخش مهمی از یخ کره، به شدت به تغییرات اقلیمی حساس هستند به طوری که می‌توان یخچال‌ها را به عنوان شاخص تغییرات اقلیمی برشمرد در دهه های گذشته به دلیل گرمایش زمین، حجم تمامی یخچال‌ها به جز موارد اندکی، با سرعت بالایی کاهش یافت (Wang et al., ۲۰۲۱; Di Tullio, et al., ۲۰۱۸). اگرچه سطح یخچال‌های طبیعی موجود در ایران به نسبت بسیاری از کشورهای اروپایی و آسیایی ناچیز به حساب می‌آید، اما به دلیل قرار گرفتن این یخچال‌ها در عرض جغرافیایی پایین و شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک، مطالعه آن‌ها اهمیت دارد (تحقیقات آب، ۱۴۰۰). همانطور که اشاره شد، ذوب برف و یخ سهم مهمی در تامین آب آشامیدنی، کشاورزی و تولید برق در جهان دارند. با افزایش گرمایش جهانی و ذوب بیشتر یخچال‌ها، پیش بینی می شود که دبی رودخانه‌های پایین دست در کوتاه مدت افزایش و در دراز مدت دچار کاهش شوند که نتیجه آن افزایش وقوع سیلاب‌های یخچالی در سال‌های اخیر بوده است۲۰۱۹) (Wilson et al.,. به عنوان مثال سیل سال ۲۰۲۰ چین، سیل‌های سال ۲۰۱۵ در کشور شیلی و بوتان و سیلاب سال ۱۳۸۲ حوضه آبریز سه‌هزار در ایران ناشی از افزایش دما و ذوب یخچال‌های این مناطق بوده و کارشناسان پیش‌بینی می‌کنند در آینده به دنبال افزایش دمای هوای این مناطق و ذوب بیشتر یخچال‌ها، احتمال وقوع سیلاب‌های یخچالی افزایش یابد (Wangchuk et al,. ۲۰۲۲ ؛ نیک‌پور و سرابیان، ۱۳۸۶). بنابراین بررسی داده‌های مرتبط با تغییر اقلیم و اثرات آن بر یخ‌کره برای پیش‌بینی سیلاب‌ها و منابع تامین آب در آینده ضروری هستند (Scherler et al., ۲۰۱۱).

یخچال‌های طبیعی نسبت به تغییرات اقلیم بسیار حساسند و می‌توانند بر چرخه آب به صورت منطقه‌ای و جهانی تاثیر گذارند. پارامترهای زیادی برای بررسی وضعیت یخچال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند تغییرات مساحت، ضخامت و سرعت حرکت یخچال‌ها که برای مشاهده این پارامترها می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد Huang et al.,) (۲۰۲۱.

یکی از روش‌هایی که از گذشته تا کنون برای بررسی تغییرات یخچال‌ها به‌کار می‌رود، استفاده از روش میدانی برای جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های اولیه استفاده است که استفاده از این روش، با توجه به اینکه عمدتا این مناطق در نواحی سرد و کوهستانی و صعب‌العبور هستند، بسیار پرهزینه و زمان‌بر و دشوار است. همچنین این داده‌ها، تنها مربوط به چند نقطه خاص هستند که نمی‌توانند نماینده خوبی برای کل منطقه مورد بررسی باشد. به همین منظور، در دهه اخیر با رشد تکنولوژی سنجش از راه دور، استفاده از این روش برای بررسی تغییرات یخچال‌ها، مورد توجه جدی قرار گرفته است (جمشیدزاده و زهری، ۱۳۹۴).

امروزه با استفاده از سنجش از راه دور، بسیاری از تجزیه و تحلیل‌های سری زمانی به راحتی امکان‌پذیر است و مطالعات متعددی در زمینه بررسی یخچال‌ها با استفاده از سنجش از دور انجام گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

کریویک و همکاران (Carrivick et al., ۲۰۲۲) به بررسی یخچال‌های جنوب آلپ پرداختند و نتیجه نشان داد حجم دریاچه های پایین دست این یخچال‌ها تا سال ۲۰۵۰ افزایش و بعد از آن، تا سال ۲۱۰۰ دچار کاهش خواهد شد. تیلیدز و همکاران (Tielidze et al., ۲۰۲۲) در پژوهشی یخچال‌های منطقه قفقاز را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

بررسی قرار دادند. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، دمای هوای این منطقه در فصل تابستان افزایش یافته و همچنین میزان بارش در فصول سرد روند کاهشی داشته است و مساحت یخچال‌های این منطقه نیز در طول مدت زمان مورد مطالعه ۲۲۱ کیلومترمربع کاهش یافته است.

وانگ و همکاران (Wang et al., ۲۰۲۱) به بررسی تغییرات مساحت یخچال‌های مناطقی از چین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آنان نشان داد دمای هوا در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ دچار افزایش و به دنبال آن، مساحت این یخچال‌ها در این بازه زمانی، ۲۳.۴۱ کیلومترمربع کاهش داشته است پاتل و همکاران(Patel) (et al., ۲۰۲۱، تغییرات مساحت یخچال‌های غربی هیمالیا را در بازه زمانی ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۸ بررسی کردند. نتیجه نشان داد این یخچال‌ها در این بازه زمانی دچار کاهش ۱۳۲ کیلومترمربعی در مساحت شده‌اند. کدکا و همکاران(Khadka et) (al., ۲۰۱٤، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ذوب یخچال‌ها و رواناب حاصل از آن در منطقه هندوکش همیالیا پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که به دنبال تغییر اقلیم، دما در این منطقه افزایش داشته و به همین دلیل رواناب ناشی از ذوب برف در فصل تابستان افزایش یافته‌است. ژائو و همکاران (Zhao et al., ۲۰۱٤)، با پیش بینی رفتار یخچال‌های رشته‌کوه هیمالیا تا سال ۲۰۵۰ دریافتند مجموعه این یخچال‌ها کاهش مساحتی در بازه ۲۲ تا ۳۵ درصدی را تجربه می‌کنند و همچنین باعث افزایش ۵ میلی‌متری سطح آب دریا می شوند. برتیه و همکاران (Berthier et al., ۲۰۱۰) در پژوهشی میزان افزایش سطح آب دریا ناشی از ذوب یخچال‌های آلاسکا را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش ۴۰ کیلومترمکعبی حجم این یخچال در هر سال، ۰.۱۲ میلی‌متر در سال آب خلیج آلاسکا افزایش می‌یابد. متولا و همکاران (Matulla et al.,۲۰۰۹) به بررسی یخچال پیتو در کانادا پرداختند و نتیجه گرفتند با توجه به روند کاهشی این یخچال، تنها مقدار بسیار کمی از این یخچال در سال ۲۱۰۰ باقی‌می‌ماند. راکوویتیانو و همکاران(Racoviteanu) (et al., ۲۰۰۸ بر روی پارامترهای یخچال‌های پرو با کمک تصاویر ماهواره‌ای کارکردند. نتیجه نشان داد دمای هوای این منطقه در این بازه ۳۰ ساله، رو به افزایش بوده و یخچال‌های این منطقه در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۷۰ تا ۲۰۰۳) دچار کاهش مساحت شده‌اند .

در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه به وسیله سنجش از دور و با استفاده از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای انجام شده است که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

موسسه تحقیقات آب (۱۴۰۰)، به بررسی یخچال علم‌کوه با استفاده از عکس‌برداری هوایی پرداختند که نتایج این پژوهش نشان داد متوسط ضخامت یخچال‌های این منطقه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ با نرخ ۲۳ سانتی‌متر در سال در حال کاهش است و با احتساب حجم ۱۰۲ میلیون متر مکعبی این یخچال، انتظار می‌رود تا انتهای قرن ۲۱، تقریبا ۶۰ درصد حجم این یخچال از بین برود. مطیعی و همکاران (۱۴۰۰) اثرات تغییر اقلیم بر یخچال علم‌کوه را مطالعه کردند و نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد تغییر اقلیم باعث افزایش دما و کاهش بارش این منطقه درطی دهه های گذشته شده است. یمانی (۱۳۸۸) به اندازه‌گیری حرکت سالیانه یخچال‌های علم‌کوه پرداخت که نتایج نشان داد این یخچال‌ها به دلیل گرم شدن اقلیم به تدریج در حال ذوب شدن هستند و فعال‌ترین قسمت آن یعنی زبانه علم‌چال با سرعت سالیانه ۲.۳۰ متر در جهت شیب دره در حال حرکت است. فخاری و همکاران (۱۳۹۰) تغییرات یخچال یخار دماوند با استفاده از تصاویر ماهواره لندست را بررسی و نتیجه گرفتند که مساحت این یخچال نسبت به سال‌های گذشته، به دلیل کاهش نزولات جوی، گرم شدن زمین و همچنین به دلیل حرارت ناشی از خروج دود از دهانه

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

آتشفشان دماوند، رو به کاهش بوده است. رضایی و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهشی یخچال خرسان زردکوه با استفاده از سنجش از دور را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه پژوهش آنان نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی و مدل ارتفاعی رقومی برای بررسی یخچال‌ها مفید بوده‌است.

مطالعات مربوط به بررسی تغییرات یخچال‌ها و برف و یخ، نیازمند بارگیری و پردازش تعداد زیادی داده اولیه است که این کار می‌تواند مدت زمان تجزیه و تحلیل را افزایش دهد. بنابراین در دسترس بودن منبعی که بتواند زمان پردازش این داده‌ها را کاهش دهد، اهمیت دارد که یکی از این منابع، سامانه گوگل ارث انجین[۱] نام دارد که یک سامانه مبتنی بر وب است و دارای آرشیو مناسبی از ماهواره‌ها و سنجنده‌هایی نظیر لندست، سنتینل، مودیس است. برای تحلیل و پردازش داده‌ها در این سامانه، نیازی به بارگیری حجم زیادی از داده نداریم. بنابراین با کمک این سامانه میتوان حجم زیادی از داده را در مدت زمان کمتری نسبت به روش‌های معمول مورد بررسی و تحلیل قرار داد (Tamiminia et al., ۲۰۲۰). طی سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه استفاده از سامانه گوگل ارث انجین به منظور پایش تغییرات یخچال‌ها انجام گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

بانرجی و همکاران (Banerjee et al., ۲۰۲۱) تغییرات دما و مساحت در یخچال‌های منطقه اتارخند در شمال هند، در سامانه گوگل ارث انجین، در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ را بررسی کردند. نتایج نشان داد در این بازه زمانی مورد بررسی، سطح این یخچال‌ها کاهش و دما در فصل زمستان، رو به افزایش است.

لیانگ و همکاران (Liang et al., ۲۰۲۱) با استفاده از تصاویر sentinel-۱، امکان اندازه‌گیری رواناب حاصل از ذوب برف یخچال‌های قطب جنوب را در سامانه گوگل ارث انجین از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ بررسی کردند و نتایج نشان داد تصاویر این ماهواره برای بررسی میزان برف ذوب شده در این سامانه مناسب بوده و می‌توان از این ماهواره برای مناطق یخچالی دیگر نیز استفاده کرد. هانگ و همکاران (Huang et al., ۲۰۲۱) در سامانه گوگل ارث انجین به بررسی مساحت یخچال‌های رشته‌کوه‌های هیمالیا در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ پرداختند و نتیجه نشان داد که مساحت یخچال‌های این مناطق در فصل تابستان در این بازه زمانی مورد مطالعه در حال کاهش بوده‌است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۲۱) تغییرات پوشش برف و مساحت تعدادی از یخچال‌های کشور چین را در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر مودیس در سامانه گوگل ارث انجین مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد مساحت یخچال حوضه تاریم طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ به میزان ۲۵.۱۱ درصد کاهش داشته است.

با توجه به اینکه سامانه گوگل ارث انجین، فرآیند تحلیل و پردازش تصاویر ماهواره‌ای را آسان‌تر کرده و سرعت بخشیده است، لذا در این پژوهش به بررسی میزان کارایی سامانه گوگل ارث انجین در شناسایی و محاسبه مساحت پوشش برف پرداخته شده است. به این منظور، در این پژوهش، در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ روند تغییرات سطح پوشش برف منطقه تخت سلیمان با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست در سامانه گوگل ارث انجین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.Google Earth Engine

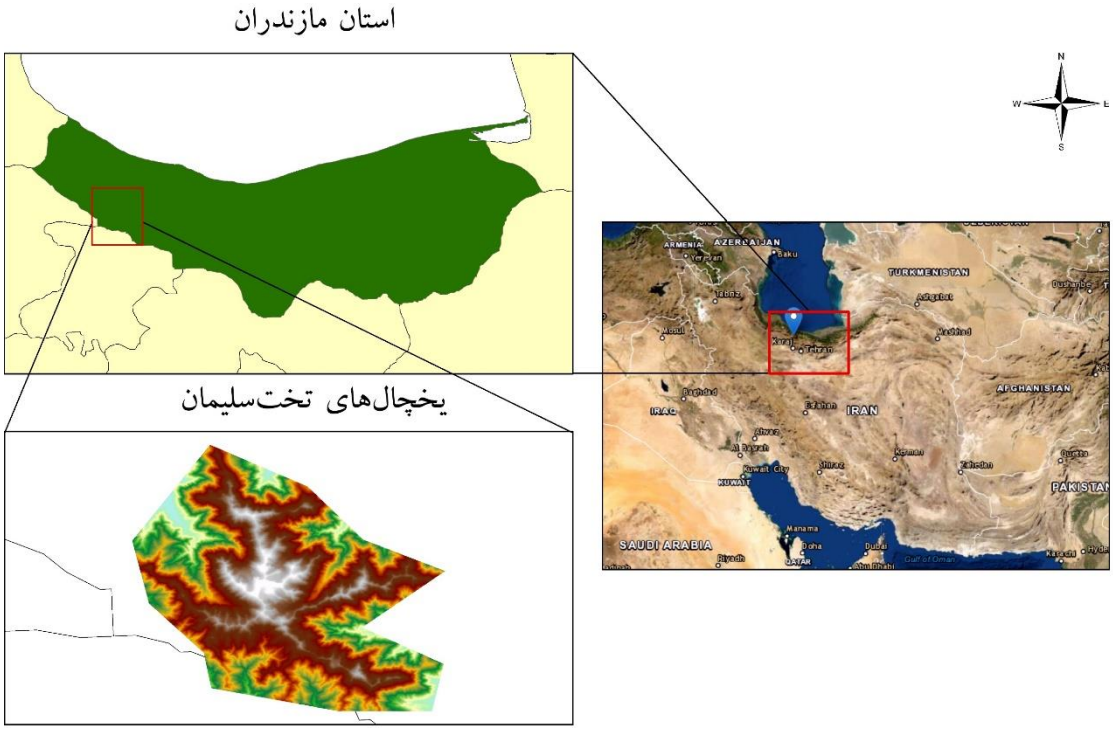
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

داده ها و روش کار

- **قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه**

در این تحقیق، منطقه یخچالی مورد مطالعه، منطقه کوهستانی تخت سلیمان است. این منطقه در استان مازندران، بخش کلاردشت قرار گرفته‌است و بلند ترین قله آن، علم‌کوه با ارتفاع ۴۸۵۰ متر از سطح دریا، واقع در موقعیت جغرافیایی′ ۲۲ ° ۳۶ شمالی و ′۵۷ °۵۰ شرقی، دومین ارتفاع ایران محسوب می‌شود. (شکل ۱). شکل پستی و بلندی‌های این ناحیه به گونه‌ای است که ۴۵ قله با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر و بیش از ۱۰۰ قله بالای ۳۰۰۰ متر در این ناحیه وجود دارد (ولدان زوج و همکاران, ۱۳۸۷).



شکل ۱. موقعیت منطقه تخت سلیمان

- **روش کار**

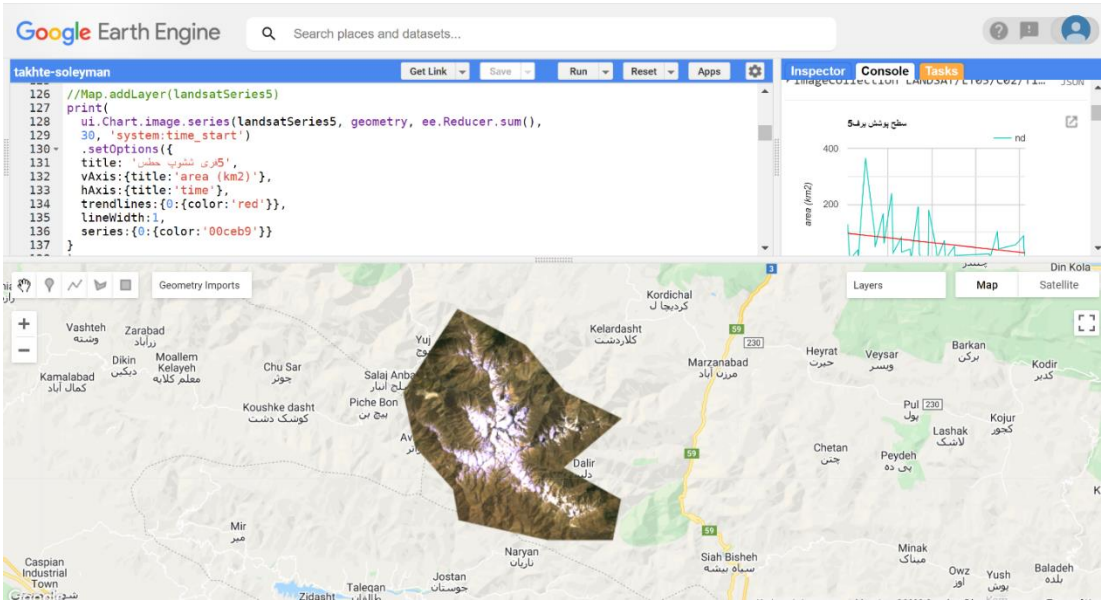
- **سامانه گوگل ارث انجین** Google Earth Engine

سامانه گوگل ارث انجین، مبتنی بر وب و محاسبات ابری است که برای نگه‌داری و تحلیل حجم زیادی از داده، طراحی شده است (Mutanga & Lalit, ۲۰۱۹). این سامانه دارای ویژگی پردازش موازی داده‌های حجیم است و توسط شرکت گوگل در سال ۲۰۱۰ راه اندازی شد و امکان دسترسی رایگان به داده‌های سنجش از دور را فراهم می‌کند (Amani et al., ۲۰۲۰).

از کاربردهای این سامانه می‌توان به استخراج اطلاعات منابع آبی مانند مساحت سطح آب، رطوبت سطحی و زیرسطحی، بارش باران، پوشش برف، عمق برف، آب معادل برف، تغییرات کاربری اراضی، اشاره کرد. با این سامانه می‌توان تمام مناطق و پوشش‌ها را با قدرت تفکیک مکانی و زمانی زیاد تحلیل کرد و نیازی به دانلود تصاویر ماهواره‌ای که دارای حجم زیادی می باشند وجود ندارد (Irshad et al.,۲۰۱۹). ابزارهای مبتنی بر سیستم‌های عامل محاسبات

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

ابری برای پردازش داده‌های حجیم و بدون نیاز به تخصص فنی خاصی طراحی شده‌اند؛ مانند سامانه گوگل ارث انجین که می‌تواند داده‌ها را پردازش و سپس نتیجه مناسبی را ارائه دهد. گوگل ارث انجین جدیدترین پلتفرم پردازش‌های زمین است که با فراهم آوردن امکان دسترسی آزاد کاربران به مجموعه داده‌های سنجش از دور، فرآیند کشف علمی را هموار می‌کند. در این سامانه کاربران از طریق یک رابط برنامه نویسی مبتنی بر اینترنت (API) با کد نویسی به زبان های جاوا اسکریپت و یا پایتون، و یک محیط توسعه تعاملی مبتنی بر وب به گوگل ارث انجین دسترسی دارند (شکل ۲) (ترابی پوده و همکاران، ۱۴۰۰؛ Gorelick et al., ۲۰۱۷).



شکل ۲. محدوده مورد مطالعه و محیط کار در سامانه گوگل ارث انجین

- **تصاویر ماهواره لندست**

ماهواره‌های سری لندست منبع اطلاعاتی مهمی برای مطالعه تغییرات یخچال‌هاست و تصاویر این ماهواره طولانی ترین پوشش زمانی (از سال ۱۹۷۲ تا کنون) را دارد. همانطور که گفته شد، این سری ماهواره‌ها به دلیل آرشیو بسیار غنی، تصاویر ۱۶ روزه، و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری، منبع مناسبی برای بررسی یخچال‌ها، روند تغییرات آب‌های سطحی و ... می‌باشند (Guo et al., ۲۰۲۱). در این پژوهش تصاویر ماهواره لندست مورد استفاده از سامانه گوگل ارث انجین اخذ شده است.

به منظور اطمینان از دقت محاسبه سطح پوشش برف، ابتدا فیلتر پوشش ابر کمتر از ۱۰ درصد اعمال شد و برای اطمینان از عدم وجود پوشش برف فصلی، از تصاویر مربوط به ماه ژوئن میلادی استفاده شد. پس از اعمال فیلترهای ذکر شده، ۲۱ تصویر مربوط به ماهواره لندست ۵ و ۸، با ردیف و گذر ۱۶۵ و ۳۵ در این سامانه فراخوانی شد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

- **روش‌های پردازش اطلاعات**

✓ **شاخص تفاضلی نرمال شده‌ی پوشش برف (NDSI)**

در این شاخص باندهای طیفی سبز[۱] و مادون قرمز موج کوتاه[۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر NDSI بین ۱- تا ۱+ است که مقادیر منفی و یا نزدیک به صفر نشان دهنده مناطق بدون برف و مقادیر نزدیک به ۱+ نشان‌دهنده نقاط دارای برف است. و مطابق رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$NDSI = \frac{(GREEN - SWIR)}{(GREEN + SWIR)} \quad (۱)$$

✓ **ارزیابی روند داده‌ها با آزمون من-کندال**

آزمون ناپارامتری من-کندال ابتدا توسط Mann (۱۹٤٥) ارائه گردید و سپس توسط Kendall در سال ۱۹۷۵ بسط و توسعه یافت. از این روش به‌طور متداول و گسترده در واکاوی روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی استفاده می‌شود و به عنوان یکی از روش‌های مهم آماری به منظور بررسی روند سری‌های زمانی به حساب می‌آید. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در داده‌ها دلالت دارد و فرض یک، به معنای وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد.

در این پژوهش به منظور شناسایی روند پوشش برف و یخ و دما منطقه مورد مطالعه، از روش آماری ناپارامتریک من-کندال استفاده شده است و محاسبه این آزمون در محیط نرم‌افزار Minitab انجام گرفته است. آزمون من-کندال با تعریف آماره S مطابق معادله ۲ تعریف می‌شود.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(x_j - x_k) \quad (۲)$$

که در آن x_j و x_k میزان مرتب شده و n اندازه نمونه است. همچنین تابع علامت مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$sgn(x) = \begin{cases} +1 & if\ (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & if\ (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & if\ (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (۳)$$

و مقدار میانگین و انحراف معیار مطابق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند:

$$E(S) = 0 \quad (۴)$$

$$v(s) = \frac{n(n-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^{n} t_i(i-1)(2t+5)}{18} \quad (۵)$$

در نهایت مقدار آماره Z نیز طبق رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{VAR(s)}} & if\ s > 0 \\ 0 & if\ s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{VAR(s)}} & if\ s < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

۱. (GREEN)

۲. (SWIR)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

جدول ۱ نشان دهنده مقادیر $Z\alpha_{/2}$ و درصد معنی‌داری است. در صورتیکه مقدار $|Z|$ از $Z\alpha_{/2}$ بزرگتر باشد، به معنای وجود روند در سطح معناداری ذکر شده در جدول است.

جدول ۱. جدول مقادیر Z توزیع نرمال بر اساس درصد معناداری

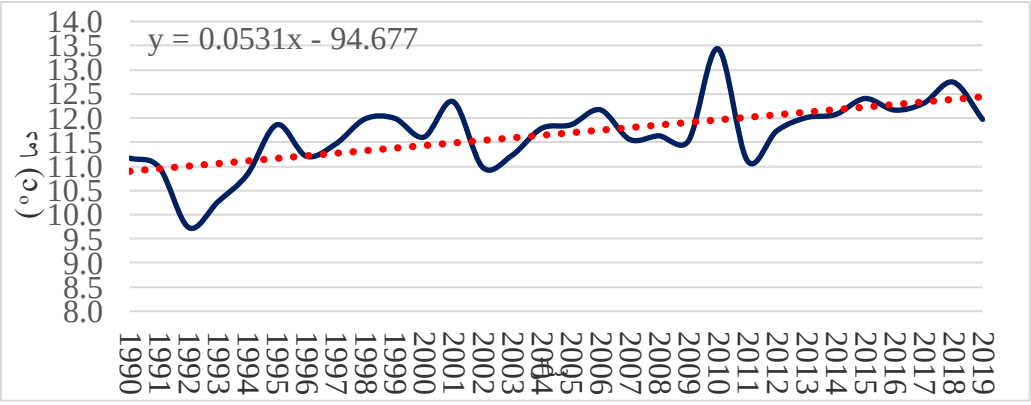
$Z\alpha_{/2}$	درصد معنی‌داری(٪)
۱.۲۸	۸۰
۱.۶۴	۹۰
۱.۹۶	۹۵
۲.۵۸	۹۹

- **بررسی سری زمانی دمای هوا با استفاده از گوگل ارث انجین**

برای محاسبه دمای هوا در این منطقه از داده‌های سنجش از دوری ERA۵[۱]، در سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. به این منظور ابتدا با فراخوانی تصاویر این سنجنده، و تعیین بازه زمانی و مرز مورد مطالعه، محصول متوسط درجه حرارت هوا در دو متری از سطح زمین[۲] انتخاب شده و میانگین دمای سالانه محاسبه و نمودار سری زمانی آن ترسیم شد.

برای نشان دادن تغییرات دمای منطقه که منجر به کاهش پوشش سطح برف یخچال‌های منطقه تخت سلیمان شده است، قبل از بکار گیری تصاویر ماهواره لندست برای اثبات تاثیرات گرمایش جهانی بر این منطقه، نمودار سری زمانی میانگین سالانه دمای هوا در فاصله ۲ متری از سطح زمین در منطقه تخت‌سلیمان از سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹، با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین بدست آمد که این نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است.

روند کلی تغییرات نشان دهنده افزایش دمای هوای این منطقه در طول ۳۰ سال اخیر با شیب مثبت می باشد که این افزایش دما همانند سایر مناطق جهان، متاثر از گرمایش زمین بوده و می‌تواند بر افزایش روند ذوب برف و یخ و همچنین کاهش حجم و سطح یخچال های این منطقه قطعا موثر باشد.



شکل ۳. نمودار تغییرات دمای هوای منطقه تخت سلیمان

۱ .Fifth generation European Center for Medium-Range Weather Forcast Reanalysis
۲. Mean_۲m_air_temperature

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

آزمون تعیین روند من-کندال برای سری زمانی دمای هوای منطقه تخت‌سلیمان انجام شد و نتایج بدست آمده در جدول آورده شده است. با توجه به این مقادیر، مشاهده می‌شود برای متغیر دمای هوای سالانه این منطقه با احتمال ۹۵ درصد، روند صعودی معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۲. آماره‌های آزمون من-کندال بر روی داده‌های میانگین دمای سالانه منطقه تخت سلیمان

منطقه مورد مطالعه	متغیر	آماره Z	p-value
منطقه تخت‌سلیمان	دما	۳.۵	۰.۰۰۰۰۷۲۱

- **ارزیابی صحت سنجی**

برای صحت سنجی نتایج این پژوهش از صحت کلی (OA) و ضریب کاپا (Kc) استفاده شد. این دو روش از روش‌های کاربردی در اعتبارسنجی نتایج هستند. روش صحت کلی از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها مطابق رابطه ۷ بدست می‌آید و ضریب کاپا (رابطه ۸) هم توافق واقعی بین داده‌های مرجع و طبقه‌بندی

$$OA = \frac{1}{n}\sum Pij \quad (۷)$$

$$Kc = n \times S_{total} - \sum_{i=1}^{r} \frac{SiSj}{n} - \sum_{i=1}^{r} SiSj \quad (۸)$$

استفاده شده در مقابل احتمال توافق بین مرجع و موارد تصادفی است.

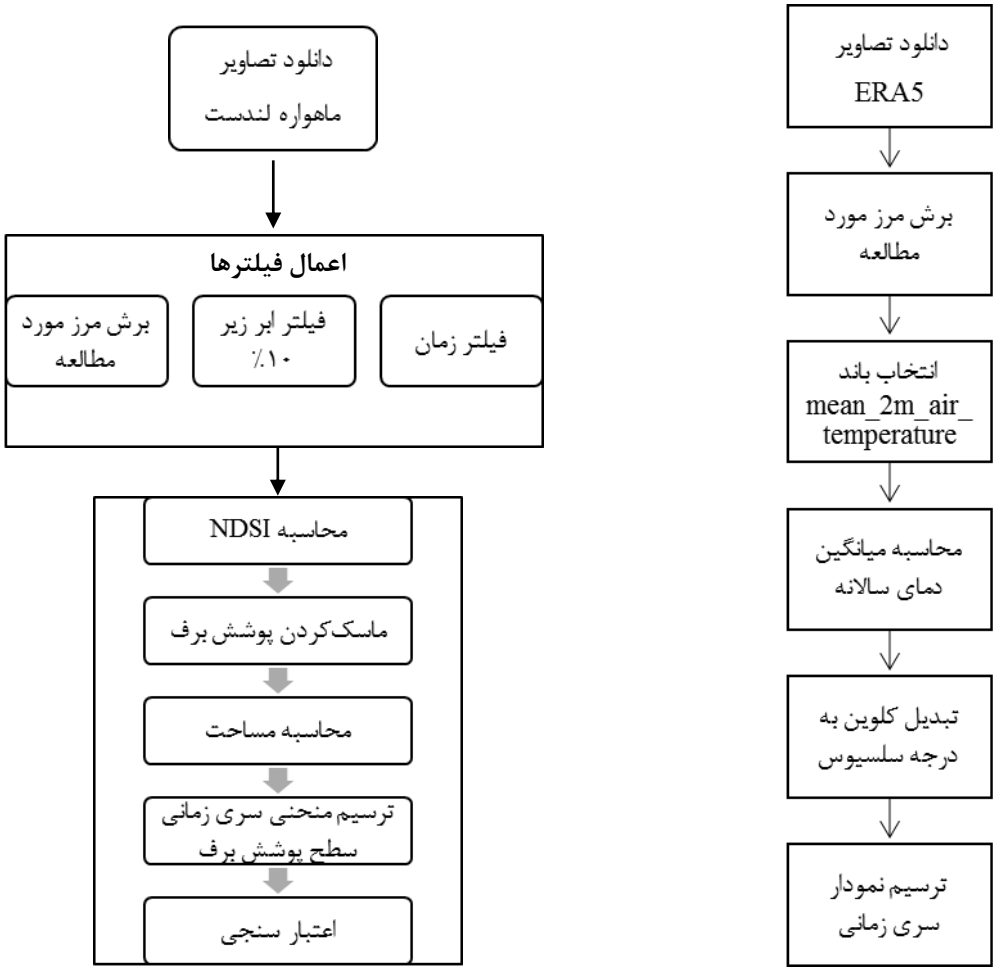
که در این روابط n تعداد کل پیکسل‌ها، S_{total} مجموع پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده، r تعداد سطرهای اعتبارسنجی، Si مجموع حاشیه‌ای ردیف i، Sj مجموع حاشیه‌ای از ستون j است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۹) و به طور کلی در نقشه‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای صحت‌کلی و ضریب کاپا با میزان حداقل ۸۵ درصد قابل قبول است (شیخ قادری و مهدوی فرد، ۱۳۹۹).

- **روش محاسبه سطح پوشش برف در سامانه گوگل ارث انجین**

در این پژوهش تصاویر ۱۶روزه لندست برای بازه زمانی ذکر شده در سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی گردید و سپس بر روی تمام این تصاویر شاخص NDSI اعمال شد تا پوشش برفی مشخص شود. برای تفکیک مناطق برفی از مناطق بدون برف به روش سعی و خطا حد آستانه مورد نظر تعیین شد و در نهایت مناطق دارای پوشش برف به صورت ماسک باینری ۰ و ۱ خروجی گرفته شد که در این ماسک مقادیر ۰ مناطق طبقه بندی نشده و مقادیر ۱ نشانگر مناطق پوشش برفی بود. **Error! Reference source not found.** نشان دهنده الگوریتم روش بکار رفته در گوگل ارث انجین می باشد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]



شکل ۴. روش کار در سامانه گوگل ارث انجین

شرح و تفسیر نتایج

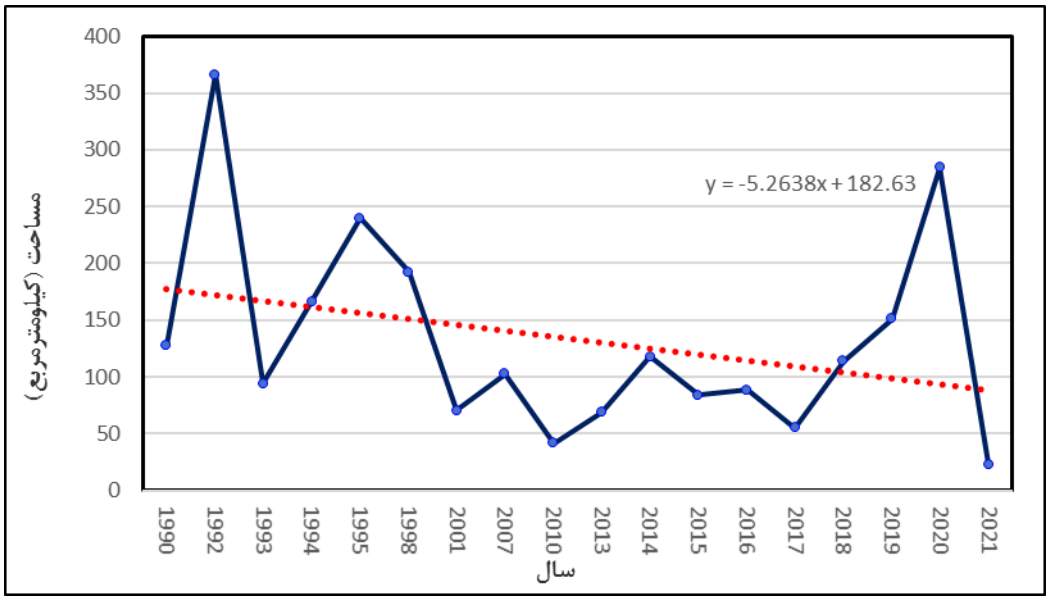
- **بررسی سری زمانی سطح پوشش برف در منطقه تخت سلیمان**

برای بررسی تغییرات پوشش برف و یخ، ماه ژوئن که تغییرات را بصورت واضح تری نسبت به ماه های دیگر تابستان نشان می دهد، انتخاب گردید. علت انتخاب این ماه این بود که در ماه های بعدی مانند ژوئیه (تیر) اوت (مرداد) و یا سپتامبر(شهریور) تصاویر ماهواره ای نشان از ذوب کامل پوشش برف داشتند و حتی در سال هایی به صفر رسیده بودند. در جدول نتایج تغییرات سطح پوشش برف مربوط به ماه ژوئن در بازه زمانی مورد مطالعه ارائه شده است و در شکل ۵، نمودار مربوط به مساحت پوشش برف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ماه های ژوئن ۳۱ سال اخیر مساحت پوشش برف و یخ این منطقه یخچالی کاهش یافته است به طوری که از حدود ۱۲۷ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۰ به حدود ۲۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ رسیده است که معادل ۸۲ درصد کاهش وسعت پوشش برف و یخ می‌باشد. همچنین با مقایسه نمودار دمای هوا و تغییرات سطح پوشش برف، می‌توان نتیجه گرفت در سال‌هایی که دما افزایش داشته، پوشش برف نیز کاهش بیشتری داشته مانند سال ۲۰۱۰ که به دنبال افزایش دما، مساحت پوشش برف نیز کاهش یافته است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

جدول ۳. مساحت و روند تغییرات مساحت منطقه مورد مطالعه در ماه ژوئن از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ میلادی

تاریخ تصویر برداری	مساحت پوشش برف و یخ ماه ژوئن (km^2)	دوره زمانی	تغییرات مساحت (km^2)	درصد تغییرات مساحت
۰۴/۰۶/۱۹۹۰	۱۲۷.۸۶۶			
۰۹/۰۶/۱۹۹۲	۳۶۶.۰۲۹	۱۹۹۰-۱۹۹۲	۲۳۸.۱۶۳	۱۸۶.۲۶۰
۲۸/۰۶/۱۹۹۳	۹۳.۸۸۴	۱۹۹۲-۱۹۹۳	-۲۷۲.۱۴۵	-۷۴.۳۵۱
۱۵/۰۶/۱۹۹۴	۱۶۶.۵۶۹	۱۹۹۳-۱۹۹۴	۷۲.۶۸۵	۷۷.۴۲۰
۰۲/۰۶/۱۹۹۵	۲۳۹.۸۶۶	۱۹۹۴-۱۹۹۵	۷۳.۲۹۷	۴۴.۰۰۴
۱۰/۰۶/۱۹۹۸	۱۹۲.۴۵۳	۱۹۹۵-۱۹۹۸	-۴۷.۴۱۳	-۱۹.۷۶۶
۰۲/۰۶/۲۰۰۱	۷۰.۶۷۷	۱۹۹۸-۲۰۰۱	-۱۲۱.۷۷۶	-۶۳.۲۷۶
۱۹/۰۶/۲۰۰۷	۱۰۲.۷۱۶	۲۰۰۱-۲۰۰۷	۳۲.۰۳۹	۴۵.۳۳۲
۱۱/۰۶/۲۰۱۰	۸۶.۶۰۲	۲۰۰۷-۲۰۱۰	-۱۶.۱۱۴	-۱۵.۶۸۸
۲۷/۰۶/۲۰۱۰	۴۱.۴۰۹	۲۰۱۰-۲۰۱۰	-۴۵.۱۹۳	-۵۲.۱۸۵
۰۳/۰۶/۲۰۱۳	۱۵۱.۹۵۵	۲۰۱۰-۲۰۱۳	۱۱۰.۵۴۶	۲۶۶.۹۶۱
۱۹/۰۶/۲۰۱۳	۶۸.۴۳۴	۲۰۱۳-۲۰۱۳	-۸۳.۵۲۱	-۵۴.۹۶۴
۰۶/۰۶/۲۰۱۴	۱۱۷.۷۹۰	۲۰۱۳-۲۰۱۴	۴۹.۳۵۶	۷۲.۱۲۲
۰۹/۰۶/۲۰۱۵	۸۳.۹۰۱	۲۰۱۴-۲۰۱۵	-۳۳.۸۸۹	-۲۸.۷۷۱
۲۷/۰۶/۲۰۱۶	۸۸.۶۸۱	۲۰۱۵-۲۰۱۶	۴.۷۸۰	۵.۶۹۷
۳۰/۰۶/۲۰۱۷	۵۴.۹۳۰	۲۰۱۶-۲۰۱۷	-۳۳.۷۵۱	-۳۸.۰۵۹
۱۷/۰۶/۲۰۱۸	۱۱۳.۸۲۴	۲۰۱۷-۲۰۱۸	۵۸.۸۹۴	۱۰۷.۲۱۶
۰۴/۰۶/۲۰۱۹	۲۲۰.۶۰۸	۲۰۱۸-۲۰۱۹	۱۰۶.۷۸۴	۹۳.۸۱۵
۲۰/۰۶/۲۰۱۹	۱۳۴.۹۳۳	۲۰۱۹-۲۰۱۹	-۸۵.۶۷۵	-۳۸.۸۳۶
۲۲/۰۶/۲۰۲۰	۲۸۴.۳۴۴	۲۰۱۹-۲۰۲۰	۱۴۹.۴۱۱	۱۱۰.۷۳۰
۲۵/۰۶/۲۰۲۱	۲۲.۹۰۷	۲۰۲۰-۲۰۲۱	-۲۶۱.۴۳۷	-۹۱.۹۴۴
		۱۹۹۰-۲۰۲۱	-۱۰۴.۹۵۹	-۸۲.۰۸۵



شکل ۵. نمودار تغییرات سطح پوشش برف منطقه تخت‌سلیمان در بازه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱- ماه ژوئن

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

بررسی روند تغییرات پوشش برف و یخ مربوط به ماه ژوئن این منطقه در طول سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ بـا اسـتفاده از آزمون من-کندال نشان می‌دهد در طول دوره مورد مطالعه، مقدار Z برابر با -۱.۲۸۷ اسـت کـه یـک رونـد کاهشـی در سطح معناداری بین ۸۰ تا ۹۰ درصد را نشان می دهد.

- **نتایج اعتبارسنجی**

به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از برآورد سطح پوشش برف، با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل، عملیات صـحت سنجی با محاسبه صحت کلی و ضریب کاپا انجام شد. در

جدول مقادیر صحت کلی و ضریب کاپای شاخص NDSI نمایش داده‌شده اسـت. صـحت قابـل قبـول ایـن شـاخص‌ها، نشان از دقت طبقه بندی دارد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، صحت کلی و ضریب کاپا بـرای هـردو شـاخص بالاتر از ۰.۸۵ بوده که دلالت بر صحت قابل قبول نتایج دارد.

جدول ۴. صحت کلی و ضریب کاپای نقشه‌های طبقه بندی شده منطقه یخچالی تخت سلیمان

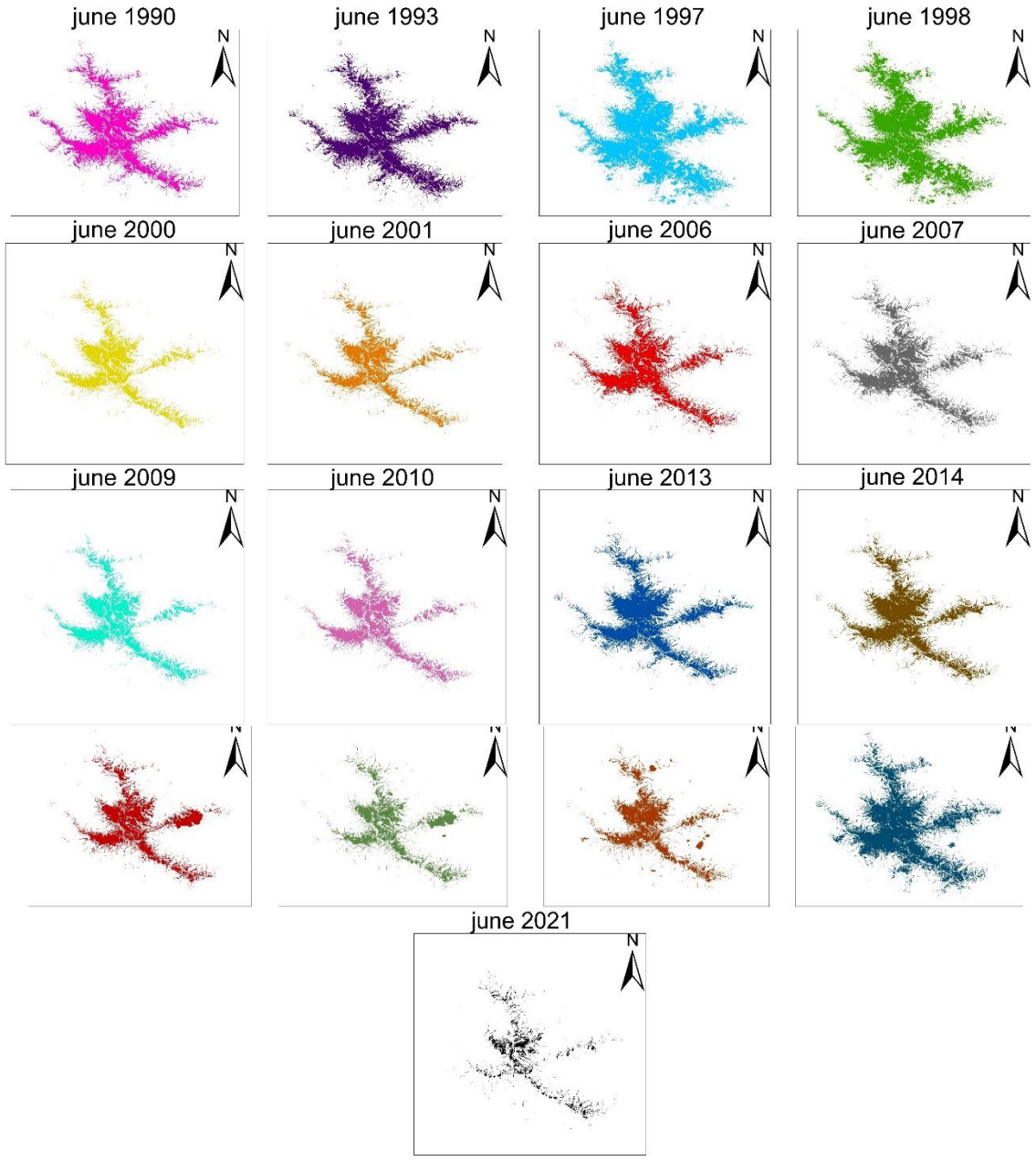
سال	صحت کلی	ضریب کاپا
۲۰۱۶	۰.۹۰۹	۰.۸۶۱
۲۰۲۱	۰.۹۴۷	۰.۸۹۹

- **لایه های خروجی سطح پوشش برف در گوگل ارث انجین**

لایه‌های سطح برف مربوط به منطقه مطالعه شده در ماه ژوئن سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل تغییرات سطح برف بصورت لایه های پلیگنی بوده که از پلتفرم گوگل ارث انجین بارگیری شده و در محیط GIS به تصاویر رستری تبدیل شده اند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]



شکل ۳. لایه‌های خروجی سطح پوشش برف منطقه تخت سلیمان درماه ژوئن ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱

نتیجه‌گیری

در این تحقیق در راستای مطالعه تغییرات پوشش برف ویخ مناطق کوهستانی دارای یخچال‌های طبیعی، تاثیرات تغییرات اقلیمی، با استفاده از فناوری سنجش از راه دور استفاده گردید برای این منظور با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۵ و ۸ در سامانه گوگل ارث انجین، بررسی این تغییرات، در یک بازه زمانی سی ساله مورد مطالعه قرار گرفت. در این رابطه با کد نویسی با زبان جاوا اسکریپت در محیط گوگل ارث انجین و محاسبه شاخص NDSI، تغییرات سطح پوشش برف و یخ بصورت جدول و نمودار محاسبه گردید. نتایج صحت کلی و ضریب کاپا در سامانه گوگل ارث انجین

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

برای سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ انجام گردید که برای سال ۲۰۲۱ صحت کلی ۹۴ درصد و ضریب کاپا ۸۹ درصد نشان از مطابقت بالای این روش با داده‌های واقعی است.

نتایج این بررسی‌ها نشان داد که پوشش برف و یخ این منطقه در این بازه زمانی دارای یک روند کاهشی در طی ماه ژوئن در بازه زمانی سی سال گذشته است به طوری که از مقدار ۱۲۷ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۰ به میزان ۲۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ رسیده است که نشان دهنده کاهش ۸۲ درصدی وسعت این پوشش در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ بوده‌است. همچنین دمای هوای این منطقه در طول سه دهه گذشته ۱.۵ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. نتایج حاصل از ارزیابی روند با آزمون من-کندال نشان داد سطح پوشش برف و یخ این منطقه دارای روند کاهشی در سطح معناداری بین ۸۰ تا ۹۰ درصد است و دمای هوای این منطقه در مقیاس سالانه در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. آمار های دبی رودخانه های پایین دست در دهه اخیر نشان می دهد که با ذوب سریعتر پوشش برف و یخ در یخچال‌های این منطقه، دبی رودخانه‌های پایین دست منطقه تخت سلیمان در فصل بهار افزایش یافته که این افزایش دبی، احتمال وقوع سیلاب‌های یخچالی را در این منطقه بالا می‌برد. با خطر اضمحلال کامل یخچال در فصل گرم، مخاطرات زیست محیطی در پایین دست این منطقه نیز افزایش خواهد یافت. این مخاطرات شامل، افزایش دمای هوا، کاهش هوای معتدل منطقه، ریسک افزایش خشکی در منطقه جنگلی پایین دست یخچال (جنگل عباس آباد) به دلیل کاهش دبی رودخانه های پایین دست مانند سردآبرود در فصل تابستان خواهد بود.

منابع

ترابی پوده، حسن؛ حسین یوسفی، آرمان صمدی، آزاده ارشیا، زهرا شمسی و یزدان یاراحمدی. ۱۴۰۰. ارزیابی روند تغییرات پوشش برف با استفاده از سامانه GEE و آزمون TFPW-MK (مطالعه موردی: حوضه ماربر اصفهان). *اکوهیدرولوژی*، **۸(۱)**: ۱۹۵-۲۰۴.

جمشیدزاده, ابوالفضل و معین زهری. ۱۳۹۴. تعیین سطح پوشش برف حوضه های آبریز با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه ی آبریز شیرین دره). *همایش ملی ژئوماتیک*، **۲۲**.

خسروی، رضا؛ رضا حسن‌زاده، مهدیه حسینجانی زاده و صدیقه محمدی. ۱۳۹۹. بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص های آبی و گوگل ارث انجین(مطالعه موردی: تالاب های شهرستان پلدختر، استان لرستان). *اکوهیدرولوژی*، **۷(۱)**:۱۳۱-۱۴۶.

رضایی، یوسف؛ محمد جواد ولدان زوج و فریبرز وزیری. ۱۳۸۸. بررسی یخچال طبیعی خرسان زردکوه بختیاری به وسیله تصاویر ماهواره ای. *علوم زمین*، **۱۸(۷۱)**: ۱۶۷-۱۷۲.

شیخ قادری، سیدهدایت و مصطفی مهدوی فرد. ۱۳۹۹. به کارگیری و پردازش داده‌های حجیم چند سنجنده‌ای در Earth Engine (EE) Explorer به منظور آشکارسازی تغییرات دریاچه ارومیه در فصول بارشی. *اولین کنفرانس ملی داده کاوی در علوم زمین*، **۱**.

فخاری، سعیده؛ فتح‌الله نادری و پرویز ضیاییان فیروزآبادی. ۱۳۹۰. بررسی میزان تغییرات یخچال طبیعی یخار دماوند با استفاده از RS و GIS. *زمین شناسی محیط زیست*، **۵(۱۷)**: ۳۵-۴۴.

مطیعی، همایون و محمد جواد تفکری. ۱۳۹۵. ارزیابی آماری تاثیر تغییر اقلیم بر رودخانه های پایین دست یخچال‌ها مطالعه موردی : رودخانه سردآبرود چالوس. *علوم مهندسی و آبیاری*، **۳۹(۳)**: ۸۵-۹۴.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

مطیعی، همایون؛ امیررضا مطیعی و سحر مرتاض هجری. ۱۴۰۰. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در دو دهه گذشته و دو دهه آینده بر پارامترهای دما و بارش یخچال علم‌کوه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سناریوهای CMIP۵. *تحقیقات منابع آب ایران*، **۱۷(۳)**: ۱۶۵-۱۸۰.

موسسه تحقیقات آب. (۱۴۰۰).: https://www.wri.ac.ir

نیک‌پور، علی و لیلا سرابیان. ۱۳۸۶. بررسی چالش‌های سیلاب در حوزه‌های یخچالی؛ (مطالعه موردی حوزه‌های سه‌هزار و سردآبرود). *چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران مدیریت حوزه‌های آبخیز*.

ولدان زوج، محمد جواد؛ یوسف رضایی، فریبرز وزیری و محمد رضا مباشری. ۱۳۸۷. بررسی یخچال طبیعی علم چال با استفاده از تصاویر ماهواره ای. *علوم زمین*، **۱۸(۷۰)**: ۲-۱۳.

یمانی، مجتبی. ۱۳۸۸. اندازه گیری حرکت سالیانه یخچال های علم کوه. *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، **۴۱(۶۷)**: ۵۲-۳۱.

Amani, M.; A. Ghorbanian, S.A. Ahmadi, M. Kakooei, A. Moghimi, S.M. Mirmazloumi, S.H. Alizade, S. Mahdavi, M. Ghahremanloo, S. Parsian, Q. Wu, and B. Brisco. ۲۰۲۰. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, ۱۳: ۵۳۲۶-۵۳۵۰. **DOI:** ۱۰,۱۱۰۹/JSTARS.۲۰۲۰,۳۰۲۱۰۵۲.

Banerjee, A.; R. Chen, M. Meadows, D. Sengupta, S. Pathak, Z. Xia, and S. Mal. ۲۰۲۱. Tracking ۲۱st century climate dynamics of the Third Pole: An analysis of topo-climate impacts on snow cover in the central Himalaya using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, ۱۰۳: ۱۰۲۴۹۰. **DOI:** ۱۰,۱۰۱۶/j.jag.۲۰۲۱,۱۰۲۴۹۰.

Berthier, E.; E. Schiefer, G. Clarke, B. Menounos, and F. Remy. ۲۰۱۰. Contribution of Alaskan glaciers to sealevel rise derived from satellite imagery. *Nature Geosci*, ۳: ۹۲-۹۵. **DOI:** ۱۰,۱۰۳۸/ngeo۷۳۷.

Carrivick, J.; J. Sutherland, M. Huss, H. Purdie, C. Stringer, M. Grimes, W.H. James, A. Lorrey. ۲۰۲۲. Coincident evolution of glaciers and ice-marginal proglacial lakes across the Southern Alps, New Zealand: Past, present and future, Global and Planetary Change. *Global and Planetary Change*, ۲۱۱: ۱۰۳۷۹۲. **DOI:** ۱۰,۱۰۱۶/j.gloplacha.۲۰۲۲,۱۰۳۷۹۲.

Di Tullio, M.; F. Nocchi, A. Camplani, N. Emanuelli, A. Nascetti, and M. Crespi. ۲۰۱۸. COPERNICUS BIG DATA AND GOOGLE EARTH ENGINE FOR GLACIER SURFACE VELOCITY FIELD MONITORING: FEASIBILITY DEMOSTRATION ON SAN RAFAEL AND SAN QUINTIN GLACIERS. *International Archivee of the Photogrammetry, Remote Sens ing and SpatialInformation Sciences*, ۴۲: ۲۸۹-۲۹۴. **DOI:** ۱۰,۵۱۹۴/isprs-archives-XLII-۳-۲۸۹-۲۰۱۸.

Gorelick, N.; M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore. ۲۰۱۷. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, ۲۰۲: ۱۸-۲۷. **DOI:** ۱۰,۱۰۱۶/j.rse.۲۰۱۷,۰۶,۰۳۱.

Guo, S.; D. Du, J. Xia, P. Tang, X. Wang, Y. Meng, and H. Wang. ۲۰۲۱. Spatiotemporal changes of glacier and seasonal snow fluctuations over the Namcha Barwa-Gyala Peri. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ۱۷۷: ۲۱-۳۷. **DOI:** ۱۰,۱۰۱۶/j.isprsjprs.۲۰۲۱,۰۴,۰۱۸.

Huang, L.; Z. Li, J. Zhou, and P. Zhang. ۲۰۲۱. An automatic method for clean glacier and nonseasonal snow area change estimation in High Mountain Asia from ۱۹۹۰ to ۲۰۱۸. *Remote Sensing of Environment*, ۲۵۸: ۱۱۲۳۷۶. **DOI:** ۱۰,۱۰۱۶/j.rse.۲۰۲۱,۱۱۲۳۷۶.

IPCC (۲۰۲۱) AR۶ Climate Change. ۲۰۲۱. The Physical science basis., https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i

Irshad, F.; J. Malik, and R. Khalil. ۲۰۱۹. Mapping Wet Snow using SAR C-Band through Google Earth Engine. *2019 Sixth International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE)*, ۱-۵. **DOI:** ۱۰,۱۱۰۹/ICASE۴۸۷۸۳,۲۰۱۹,۹۰۵۹۱۶۰.

Khadka, D.; M. Babel, S. Shrestha, and N Tripathi. ۲۰۱۴. Climate change impact on glacier and snow melt and runoff in Tamakoshi basin in the Hindu Kush Himalayan (HKH) region. *Journal of Hydrology*, ۵۱۱: ۴۹-۶۰. **DOI:** ۱۰,۱۰۱۶/j.jhydrol.۲۰۱۴,۰۱,۰۰۵.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]

Liang, D.; H. Guo, L. Zhang, Y. Cheng, Q. Zhu, and X. Liu. ۲۰۲۱. Time-series snowmelt detection over the Antarctic using Sentinel-۱ SAR images on Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, **۲۵۶**: ۱۱۲۳۱۸. **DOI:** ۱۰,۱۰۱٦/j.rse.۲۰۲۱,۱۱۲۳۱۸.

Matulla, C.; E. Watson, S. Wagner, and W. Schöner. ۲۰۰۹. Downscaled GCM projections of winter and summer mass balance for Peyto Glacier, Alberta, Canada (۲۰۰۰-۲۱۰۰) from ensemble simulations with ECHAM۵-MPIOM. *International Journal of Climatology*, **۲۹(۱۱)**: ۱۵۵۰-۱۵۵۹. **DOI:** ۱۰,۱۰۰۲/joc.۳۵۱۱.

Mutanga, O.; and k. Lalit. ۲۰۱۹. Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing*, **۱۱(۵)**: ۵۹۱. **DOI:** ۱۰,۳۳۹۰/rs۱۱۰۵۰۵۹۱.

Patel, L.; A. Sharma, P. Sharma, A. Singh, and M. Thamban. ۲۰۲۱. Glacier area changes and its relation to climatological trends over Western Himalaya between ۱۹۷۱ and ۲۰۱۸. *Journal of Earth System Science*, **۱۳۰(٤)**: ۲۱۷. **DOI:** ۱۰,۱۰۰۷/s۱۲۰٤۰-۰۲۱-۰۱۷۲۰-۰.

Racoviteanu, A.; Y. Arnaud, M. Williams, and J. Ordoñez. ۲۰۰۸. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, **٥٤(۱۸٦)**: ٤۹۹-٥۱۰. **DOI:** ۱۰,۳۱۸۹/۰۰۲۲۱٤۳۰۸۷۸٥۸۳٦۹۲۲.

Scherler, D.; B. Bookhagen, and M. Strecker. ۲۰۱۱. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geosci*, **٤(۳)**: ۱٥٦-۱٥۹. **DOI:** ۱۰,۱۰۳۸/ngeo۱۰٦۸.

Tamiminia, H.; B. Salehi, M. Mahdianpari, L. Quackenbush, S. Adeli, and B. Brisco. ۲۰۲۰. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **۱٦٤**: ۱٥۲-۱۷۰. **DOI:** ۱۰,۱۰۱٦/j.isprsjprs.۲۰۲۰,۰٤,۰۰۱.

Tielidze, L.; G. Nosenko, T. Khromova, and F. Paul. ۲۰۲۲. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between ۲۰۰۰ and ۲۰۲۰. *The Cryosphere*, **۱٦**: ٤۸۹-٥۰٤. **DOI:** ۱۰,٥۱۹٤/tc-۲۰۲۱-۳۱۲.

Wang, L.c.; K. Yu, L. Chang, J. Zhang, T. Tang, L.H. Yin, X.f. Gu, J.q. Dong, Y. Li, J. Jiang, B.c. Yang, Q. Wang. ۲۰۲۱. Response of glacier area variation to climate change in the Kaidu-Kongque river basin, Southern Tianshan Mountains during the last ۲۰ years. *China Geology*, **٤(۳)**: ۳۸۹-٤۰۱. **DOI:** ۱۰,۳۱۰۳٥/cg۲۰۲۱۰٥٥.

Wangchuk, S.; T. Bolch, B. Aubrey Robson. ۲۰۲۲. Monitoring glacial lake outburst flood susceptibility using Sentinel-۱ SAR data, Google Earth Engine, and persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing of Enviroment*, **۲۷۱**: ۱۱۲۹۱۰. **DOI:** ۱ ۰,۱۰۱٦/j.rse.۲۰۲۲,۱۱۲۹۱۰.

Wilson, R.; S. Harrison, J. Reynolds, A. Hubbard, N.F. Glasser, O. Wundrich, P. Iribarren Anacona, L. Mao, S. Shannon. ۲۰۱۹. The ۲۰۱٥ Chileno Valley glacial lake outburst flood, Patagonia. *Geomorphology*, **۳۳۲**: ٥۱-٦٥. **DOI:** ۱۰,۱۰۱٦/j.geomorph.۲۰۱۹,۰۱,۰۱٥.

Zhang, J.; L. Jia, M. Menenti, J. Zhou, and S. Ren. ۲۰۲۱. Glacier Area and Snow Cover Changes in the Range System Surrounding Tarim from ۲۰۰۰ to ۲۰۲۰ Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, **۱۳(۲٤)**: ٥۱۱۷. **DOI:** ۱۰,۳۳۹۰/rs۱۳۲٤٥۱۱۷.

Zhao, L.; R. Ding, and J. Moore. ۲۰۱٤. Glacier volume and area change by ۲۰٥۰ in high mountain Asia. *Global and Planetary Change*, **۱۳(۲٤)**: ۱۹۷-۲۰۷. **DOI:** ۱۰,۱۰۱٦/j.gloplacha.۲۰۱٤,۰۸,۰۰٦.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9]