

تحلیل عملکرد شاخص‌های پوشش برف در منطقه کوهستانی سهند

برومند صلاحی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
ابوذر صادقی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
حمید سلیمانی یوزبند- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸ تأیید نهایی: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

چکیده

این پژوهش باهدف بررسی و مقایسه شاخص‌های استخراج پوشش برف در سامانه گوگل ارث انجین (GEE) برای توده کوهستان سهند انجام شده است. در این مطالعه، پس از اعمال عملیات بهبود تصویر و افزایش وضوح تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ از ۳۰ متر به ۱۵ متر، شاخص‌های مختلف برف شامل NDSI، NDSII، NDSall، NBSIMS، SWI و S3 محاسبه و به کار گرفته شدند. نتایج حاصل از تحلیل تصاویر نشان داد که تمامی شاخص‌های مورد استفاده توانایی بالایی در شناسایی و تفکیک مناطق برفی به‌ویژه در نواحی با آلبیدوی پایین، سایه‌ها و توپوگرافی خشن دارند. شاخص‌های NDSInw و S3 با دقت کلی ۱۰۰ درصد و ضریب کاپای ۱ به‌عنوان بهترین شاخص‌ها برای تفکیک پوشش برف از سایر ویژگی‌های سطح زمین در این منطقه معرفی شدند. همچنین، شاخص‌های NBSIMS و SWI نیز به‌شکل مناسبی در شناسایی ویژگی‌های آبی و مرطوب در مناطق برفی عمل کردند و نشان دادند که می‌توانند در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب به کار روند. این مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره‌ای با شاخص‌های طیفی مناسب می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر پوشش برف، تخمین میزان آب موجود در برف و بررسی تغییرات فصلی برف کمک کند. این نتایج اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع آب، پیش‌بینی سیلاب‌ها و تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی فراهم می‌کند. در این پژوهش مشخص شد که شاخص‌های NDSInw و S3 با دقت کلی ۱۰۰ درصد و ضریب کاپای ۱، بهترین عملکرد را در تفکیک پوشش برف از سایر عوارض سطح زمین در منطقه کوهستان سهند دارند. همچنین شاخص‌های NBSIMS و SWI در شناسایی نواحی مرطوب و برف‌آب مؤثر ظاهر شدند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از فناوری‌های سنجش از دور را در پایش پوشش برف و مدیریت منابع طبیعی در مناطق کوهستانی به‌خوبی نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: سطح پوشش برف، سهند، شاخص برف، گوگل ارث انجین، لندست ۸.

مقدمه

پوشش زمین به عنوان یک عامل کلیدی در شکل‌دهی تغییرات محیطی جهانی، حاصل تعامل پیچیده عوامل طبیعی و انسانی است (لیائو و همکاران^۱، ۲۰۱۴). توزیع مکانی و پویایی پوشش زمین تأثیر بسزایی بر چرخه‌های مواد، تعادل آب، حرارت و ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها دارد (چن و شائو^۲، ۲۰۲۱). در نتیجه، درک دقیق تغییرات پوشش زمین در مقیاس‌های مختلف برای مطالعات محیطی و برنامه‌ریزی پایدار ضروری است (کایه و همکاران^۳، ۲۰۱۶). پوشش برف فصلی به عنوان یکی از اجزای حیاتی چرخه‌های شیمیایی، اقلیمی و زیستی زمین، به دلیل بازتاب بالای تابش خورشیدی و ضریب نفوذ گرمایی پایین، می‌تواند تراز بودجه تابشی جهانی و تأثیرات گردش عمومی جو را تحت سلطه خود قرار دهد. علاوه بر این، پوشش برف تأثیر قابل توجهی بر اقلیم، بیوژئوشیمی و چرخه‌های هیدرولوژیکی آینده دارد (هال و ریگز^۴، ۲۰۰۷. سانگ و همکاران^۵، ۲۰۲۲). ارزیابی پوشش برف در کوهستان‌ها همواره مورد توجه بوده است (حلبیان و صلی، ۱۳۹۹؛ سیف و بیرانوند، ۱۴۰۰ و کاوسی و نظری سامانی، ۱۴۰۲). آب حاصل از ذوب برف‌های فصلی و یخچال‌های دائمی، منبع اصلی تأمین آب شیرین برای حدود ۲۰ درصد از جمعیت کل کره زمین است (بارنت و همکاران^۶، ۲۰۰۵). تعیین دقیق و به موقع الگوی توزیع مکانی پوشش برف فصلی برای کشاورزی، تولید انرژی برق‌آبی، مدیریت منابع آب و حتی فعالیت‌های انسانی از اهمیت حیاتی برخوردار است (بارنت و همکاران، ۲۰۰۵ و چن و همکاران^۷، ۲۰۲۱). به طور کلی، دو رویکرد اصلی برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به پوشش برف وجود دارد: ۱. اندازه‌گیری‌های زمینی ۲. سنجش از دور ماهواره‌ای؛ اندازه‌گیری‌های زمینی به عنوان روش سنتی، بر پایه شبکه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی مستقر در مناطق مختلف انجام می‌شود. با این حال، به دلیل محدودیت تعداد ایستگاه‌ها و پراکندگی جغرافیایی آن‌ها، این روش قادر به ارائه تصویر کاملی از وضعیت پوشش برف در مقیاس منطقه‌ای یا ملی نیست. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های زمینی اغلب زمان‌بر و پرهزینه بوده و در مناطق صعب‌العبور با محدودیت‌های عملی مواجه می‌شوند. با این حال، این روش نیز با محدودیت‌های ذاتی همراه است، چراکه تنها قادر به اندازه‌گیری در نقاط مشخصی می‌باشد (گرولیک و همکاران^۸، ۲۰۱۷). چالش اصلی در برآورد دقیق پوشش برف در مقیاس حوضه آبخیز، مربوط به عدم قطعیت‌های ناشی از روش‌های درون‌یابی است که برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به اطلاعات مکانی استفاده می‌شوند. این عدم قطعیت‌ها ممکن است منجر به تخمین نادرست پتانسیل برف در حوضه مورد مطالعه گردد (گرولیک و همکاران، ۲۰۱۷). سنجش از دور ماهواره‌ای به عنوان یک ابزار کارآمد و ضروری در مطالعات پوشش برف مطرح است و نقش مهمی در مدیریت منابع آبی، پیش‌بینی سیلاب‌ها، ارزیابی تغییرات اقلیمی و سایر کاربردهای مرتبط ایفا می‌کند. محصولات با وضوح مکانی پایین‌تر توانایی کمتری در ثبت تغییرات محیطی در مناطق ناهمگن دارند. در مقابل، محصول سنجش از دور MODIS با وضوح مکانی ۵۰۰ متر، و وضوح زمانی یک‌روزه و پوشش جهانی، به عنوان یکی از منابع اصلی داده برای پایش پوشش برف در مقیاس منطقه‌ای و حوضه‌ای مطرح شده است. این سنجنده به دلیل سهولت استفاده در اکثر مناطق پوشیده از برف، به یکی از ابزارهای پرکاربرد در مطالعات برف تبدیل شده است. لازم به ذکر است که هر یک از این محصولات دارای ویژگی‌ها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. کارایی بالای داده‌های MODIS در تشخیص پوشش برف مطالعات متعددی نشان داده‌اند که داده‌های سنجنده MODIS عملکرد بسیار خوبی در تشخیص پوشش برف دارند و قادر به

1-Liao et al.

2-Chen and Shao

3-Kayet et al.

4-Hall and Riggs

5- Song et al.

6-Barentt et al.

7-Chen at al.

8-Gorelick et al.

دستیابی با دقت کلی بالا در سطح جهانی هستند (هوانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۶؛ وانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ گونار سون و همکاران^۳، ۲۰۱۹). گوگل ارث انجین (GEE) شیوه پردازش داده‌های سنجش از دور را به‌طور بنیادینی تغییر داده است و امکان تحلیل مناطق وسیع را با سرعتی بسیار بیشتر و کارآمدتر از گذشته فراهم می‌کند. از زمان آغاز به کار، بسیاری از قابلیت‌ها و کاربردها توسط یک جامعه رو به رشد به‌سرعت توسعه یافته‌اند (گولیک و همکاران^۴، ۲۰۱۷). GEE یک پلتفرم تحلیل جغرافیایی در مقیاس جهانی مبتنی بر رایانش ابری است که طیف گسترده‌ای از راه‌حل‌های گوگل را برای حل چالش‌های مهم اجتماعی مانند جنگل‌زدایی، خشک‌سالی، بلایا، بیماری، امنیت غذایی، مدیریت آب و پایش اقلیم ارائه می‌دهد (امانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کومار^۵، ۲۰۱۸؛ آیر و همکاران^۶، ۲۰۲۰؛ گوا و همکاران^۷، ۲۰۲۲). این پلتفرم امکان توسعه حجم عظیمی از کاربردها و پژوهش‌های مبتنی بر جغرافیا را فراهم کرده است (اوروسا و همکاران^۸، ۲۰۲۲). مطالعات نشان داده‌اند که محصولات پوشش برف دوتایی MODIS تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی و محصولات پوشش برف مبتنی بر ماهواره دارد (بارنت و همکاران^۹، ۲۰۰۵؛ ماورر و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۳؛ پاراجکا و بلوشل^{۱۱}، ۲۰۱۲). روزنتال و دوزیتر^{۱۲} (۱۹۹۶) با بهره‌گیری از داده‌های لندست TM و یک مدل طبقه‌بندی مبتنی بر درخت تصمیم، به نقشه‌برداری FSC پرداختند. شاخص برف مقاوم به آب (WSI) یکی از این روش‌های نوآورانه است که توسط شارما و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۶) معرفی شد. WSI با استفاده از یک الگوریتم کارآمد، قادر به استخراج پوشش برف بدون تداخل با اشیاء زمینی و سطوح آبی است. داده‌های ماهواره‌ای با وضوح مکانی بالاتر، مانند لندست با وضوح ۳۰ متر، پتانسیل بالایی برای بهبود دقت نقشه‌های پوشش برف دارند. داده‌های ماهواره‌ای نقش مهمی در علوم زمین برای پایش مداوم فرآیندهای طبیعی و فیزیکی دارند (کوتیر و همکاران^{۱۴}، ۲۰۱۶). سنسورهای لندست به‌عنوان کارآمدترین ابزار برای نقشه‌برداری و پایش تغییرات منطقه‌ای پوشش برف در نظر گرفته می‌شوند و می‌توان خطوط بیرونی پوشش برف را از چندین تکنیک نسبت بانندی استخراج کرد (پل^{۱۵}، ۲۰۰۲). مقایسه عملکرد شاخص‌های یخبندان در تصاویر لندست TM، ETM+ و OLI تاکنون به‌طور جامع انجام نشده است (وانگ و همکاران^{۱۶}، ۲۰۲۰). در همین راستا پژوهش‌هایی در داخل و خارج از کشور انجام داده شده است. صلاحی و همکاران (۱۴۰۳) به ارتباط پوشش برف با عوامل فیزیوگرافی در پهنه کوهستانی شمال غربی ایران در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های MODIS پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین ارتباط روزهای برفی (SCDs) با ارتفاع بوده و با افزایش ارتفاع (۱۳۰۰ تا ۳۷۰۰ متر) تعداد روزهای پوشش برفی به‌شدت افزایش می‌یابد؛ اما در ارتفاعات بالای ۳۷۰۰ متر به دلیل شیب زیاد، ناهنجاری‌هایی در روند افزایش SCDs مشاهده کردند. بررسی گستره‌های برف‌پوش (SCAs) نیز نشان داد که پراکنش برف با افزایش شیب کاهش می‌یابد و دامنه‌های شمالی و شمال شرقی بیشترین پوشش برف و دامنه‌های جنوب غربی و غربی کمترین پوشش

- 1-Huang et al.
- 2-Wang et al.
- 3-Gunnarsson et al.
- 4-Gorelick et al.
- 5-Kumar
- 6-Ayber et al.
- 7-Guo et al.
- 8-Orusa et al.
- 9-Barentt et al.
- 10-Maurer et al.
- 11-Parajka et al.
- 12-Rosenthal and Dozier
- 13-Sharma et al.
- 14-Kuter et al.
- 15-Pual
- 16-Wang et al.

را دارند. جمس و همکاران (۱۴۰۲) به مطالعه، تغییرات زمانی-مکانی پوشش برفی البرز مرکزی در بازه‌ی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) و نرم‌افزار ArcGIS، مساحت پهنه‌های برفی در فصل‌های مختلف استخراج و تحلیل شد. نتایج نشان داد که مساحت پوشش برفی از ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ به‌طور مداوم کاهش یافته است، به‌ویژه در زمستان و پاییز. در این مدت، ارتفاع شروع پوشش برفی نیز افزایش یافته است. همچنین، استفاده از تصاویر لندست و الگوریتم‌های طبقه‌بندی نسبت به شاخص طیفی NDSI و تصاویر MODIS دقت بیشتری در استخراج پوشش برفی داشته است. فرجی و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل فضایی سطح پوشش برف در غرب ایران با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. در این پژوهش، روند پوشش برف در غرب ایران طی زمستان‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر MODIS و شاخص NDSI بررسی شد. نتایج نشان داد که مساحت پوشش برف در این بازه زمانی روند کاهشی داشته و پراکندگی برف بیشتر در ارتفاعات بالای ۲۲۰۰ متر و در راستای شمال غربی به جنوب شرقی است. این یافته‌ها می‌توانند در مدیریت منابع آبی و پیش‌بینی خشک‌سالی مفید باشند. عبادی و همکاران (۱۳۹۹) به ارائه شاخص طیفی جدید به‌منظور استخراج سطوح برفی با استفاده از تصاویر اپتیکی سنجش از دور پرداختند. در این مطالعه به ارزیابی چهار شاخص طیفی مهم در برف‌سنجی و معرفی یک شاخص طیفی جدید به نام PCSWIRI پرداخته‌اند که مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است. در این پژوهش داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی با ضریب کاپای ۱ برای لندست ۸ دقت بیشتری در تفکیک شباهت‌های طیفی برف و سایر پدیده‌ها دارد و می‌تواند جایگزین شاخص‌های قبلی در مناطقی با اختلاط طیفی شود. دنگ و همکاران^۱ (۲۰۲۴) به مطالعه توسعه و ارزیابی محصول شاخص نرمال‌شده تفاضلی برف MODIS در آسیای کوهستانی مرتفع پرداختند. در این مطالعه، یک روش مؤثر برای پر کردن شکاف‌های داده‌ای در محصول شاخص برف MODIS توسعه داده شد. این روش با استفاده از درون‌یابی اسپلاین مکعب و روش وزنی فضایی-زمانی، شکاف‌های داده‌ای را برای منطقه آسیای مرتفع پر می‌کند. محصول تولید شده با این روش، پوشش برفی آسیای مرتفع را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ پوشش داده و دقت کلی بالایی بین ۹۳/۵۴ تا ۹۸/۰۸ را نشان داده است. همچنین، در مقایسه با تصاویر Landsat، این محصول دقت کلی ۸۸/۵۲ تا ۹۲/۴۰ را به دست آورده است. وانگ و وانگ^۲ (۲۰۲۴) به پژوهش پایش پوشش برف در مناطق جنگلی معمولی با استفاده از رویکرد ترکیب ویژگی‌های چندطیفی در چین پرداختند. پایش دقیق پوشش برف برای پژوهش‌های هیدرولوژی و تغییرات اقلیمی در شمال شرق چین اهمیت زیادی دارد، اما پایش زیر تاج درختان چالش‌برانگیز است. الگوریتم جهانی SNOWMAP برای مناطق جنگلی این منطقه کارایی ندارد، بنابراین در این مطالعه یک رویکرد جدید برای نقشه‌برداری برف با استفاده از داده‌های MODIS توسعه داده شد. این روش با ترکیب شاخص‌های مختلف مانند NDSI و NDVI، دقت نقشه‌برداری را بهبود داد و در مقایسه با تصاویر Landsat 8، خطاها را کاهش و دقت کلی را به ۸۱/۳۱٪ افزایش داد. این روش در بهبود نقشه‌برداری خودکار پوشش برف در جنگل‌های شمال شرق چین مؤثر بوده و از مدیریت منابع آب پشتیبانی می‌کند. بوسبا و همکاران^۳ (۲۰۲۲) به پایش با دقت بالا از پوشش برف در رشته‌کوه‌های اطلس مراکش از طریق ترکیب فضایی-زمانی تصاویر Landsat و Sentinel-2 پرداختند. این مطالعه به بررسی اثربخشی ترکیب حسگرهای نوری برای ثبت دینامیک‌های برف و تولید سری زمانی دقیق از شاخص تفاوت نرمالیزه برف (NDSI) در مناطق نیمه‌خشک می‌پردازد. سه مدل ترکیب داده‌ها (FSDAF، ESTARFM و FSDAF پیش‌طبقه‌بندی) آزمایش شده‌اند و نتایج نشان داد که مدل FSDAF پیش‌طبقه‌بندی بهترین دقت را دارد و می‌تواند کمبود داده‌های پوشش برف

1-Deng et al.

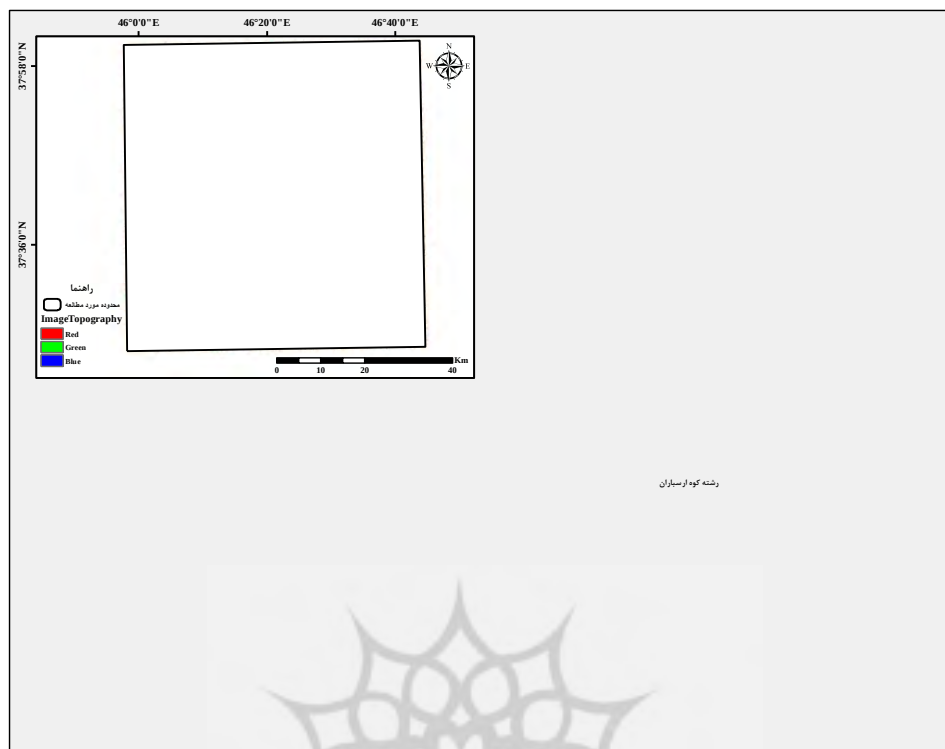
2-Wang and Wang

3-Bousbaa et al.

زمینی را جبران کند. رای و موکرجی^۱ (۲۰۲۱) به نقشه‌برداری تغییرات فضایی-زمانی و پیش‌بینی نواحی پوشیده از برف-یخ در هیمالیا با استفاده از ترکیب باندهای چندطیفی و حرارتی تصاویر لندست پرداختند. تغییرات در این نواحی نشان‌دهنده تهدید جدی برای اقلیم هستند و به همین دلیل، پایش پوشش برف به موضوعی کلیدی در مطالعات تغییرات اقلیمی تبدیل شده است. در حالی که مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل روند زمانی تغییرات پوشش برف در بازه‌های چند ساله تمرکز داشته‌اند، هدف این پژوهش بررسی مقایسه‌ای شاخص‌های طیفی برف در یک مقطع زمانی مشخص (بهار سال ۱۴۰۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ است؛ بنابراین، تمرکز بر کیفیت و دقت شاخص‌ها در شرایط یکسان اقلیمی و توپوگرافی می‌باشد، نه بررسی تغییرات زمانی پوشش برف. در پژوهش رای و موکرجی (۲۰۲۱)، تغییرات پوشش برف در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ در دوره انباشت و سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ در دوره ذوب بررسی شد. در این پژوهش، شاخص‌های S3، NDSTI و PSI برای تحلیل مناطق برف‌پوش به کار رفتند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده کاهش حدود ۱۰ درصدی وسعت پوشش برف طی دو دهه بود. در مطالعه حاضر، چنین تحلیل زمانی انجام نشده است. نوآوری اصلی این پژوهش در مقایسه جامع و هم‌زمان چند شاخص طیفی شناخته شده و نوین در تشخیص پوشش برف در بستر سامانه گوگل ارث انجین و با استفاده از وضوح ارتقاءیافته داده‌های لندست ۸ است. تمرکز ویژه این مطالعه بر ارزیابی عملکرد شاخص‌ها در محیط‌های پیچیده کوهستانی با آلودگی پایین، سایه‌دار و مرطوب بوده و از این نظر از سایر مطالعات مشابه متمایز می‌شود.

محدوده مورد مطالعه

کوهستان سهند، با قله‌های بلند و برف‌گیر خود، یکی از زیباترین و مرتفع‌ترین کوه‌های آتشفشانی خاموش ایران است که در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. این کوهستان در جنوب شرقی شهر تبریز و شمال شهرستان مراغه در محدوده بین طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۱ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت تقریبی این کوهستان تقریباً ۱۵۰۰ کیلومتر مربع است. سهند دارای قله‌های متعددی مانند قله کمال (قوچ‌گلی)، جام، سلطان، دمیرلی، آغ داغ، موتال داغی، شیر داغی، حرم داغی، گیرو داغی، آتاشان، درویش و سهند است. سهند به دلیل پوشش گیاهی غنی، چشمه‌های فراوان و دشت‌های سرسبز اطراف آن، یکی از مهم‌ترین مناطق گردشگری و طبیعی آذربایجان شرقی محسوب می‌شود. کوهستان سهند دارای آب و هوای سردسیری بوده و مقدار بارندگی در این منطقه بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. از نظر تقسیم‌بندی آب و هوایی، منطقه سهند در ردیف مناطقی است که ارتفاع آن‌ها بیش از ۲۰۰۰ متر است. وجود تابستان‌های ملایم و زمستان‌های سرد و طولانی از خصوصیات این مناطق می‌باشد (سیفی و قربانی، ۱۳۹۶). در ارتفاعات بالاتر از ۲۸۰۰ متر، دوره پوشش برف ممکن است تا اوایل خرداد ادامه داشته باشد. بر اساس داده‌های ایستگاه‌های اطراف، میانگین تعداد روزهای پوشیده از برف (SCDs) در منطقه بین ۵۰ تا ۹۰ روز در سال متغیر است. توپوگرافی ناهموار، شیب‌های تند و جهت‌گیری دامنه‌ها نیز در توزیع مکانی برف در سهند نقش مهمی دارند؛ دامنه‌های شمالی و شمال شرقی بیشترین تراکم برف را در زمستان‌ها نشان می‌دهند. وجود این ویژگی‌ها، سهند را به یکی از مناطق مناسب برای تحلیل شاخص‌های پوشش برف در مطالعات سنجش از دور تبدیل کرده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (کوهستان سه‌پند)

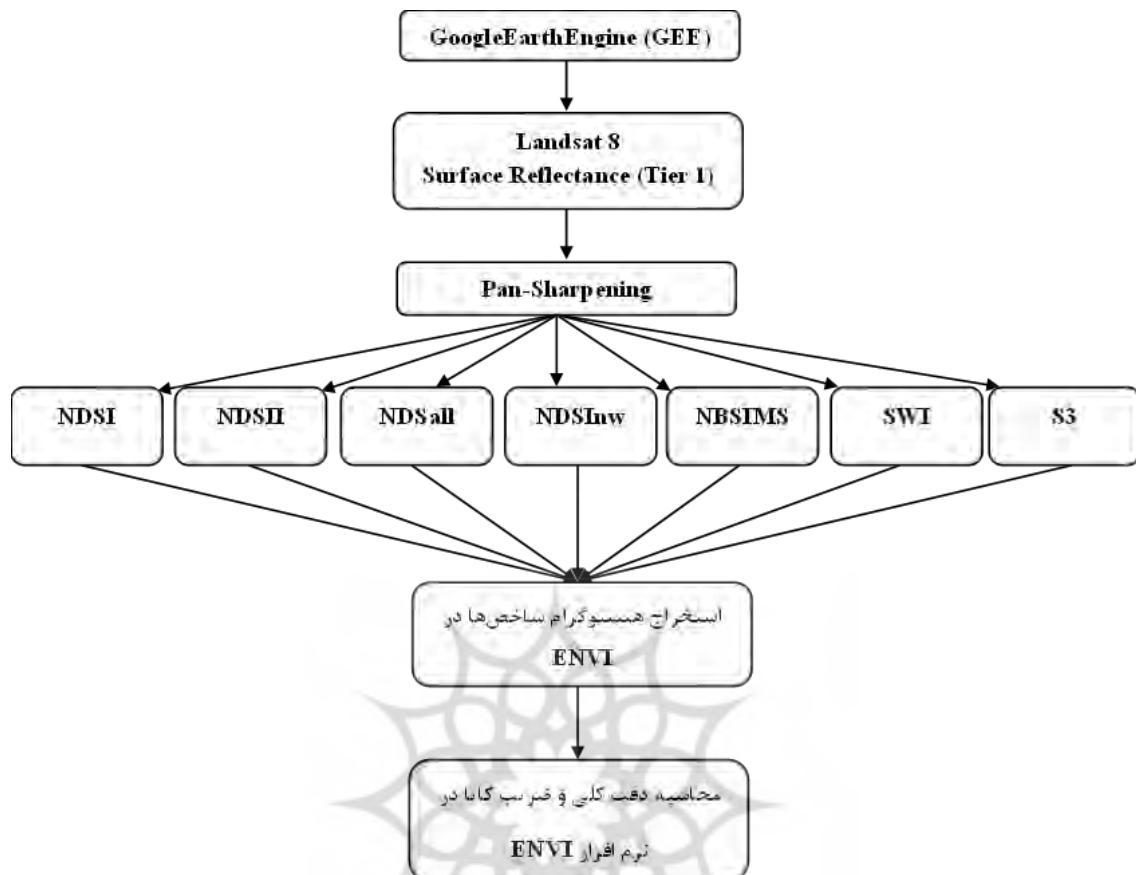
داده‌ها و روش

داده‌ها

در این پژوهش صرفاً از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استفاده شد و داده‌های کمکی مانند مدل ارتفاعی رقومی (DEM) یا مشاهدات میدانی به کار گرفته نشدند، چراکه هدف اصلی این تحقیق ارزیابی و مقایسه دقت شاخص‌های طیفی در تشخیص پوشش برف با استفاده از داده‌های طیفی و در محیط گوگل ارث انجام بود. ابتدا تصویر لندست ۸ مربوط به تاریخ ۱۵ فروردین ۱۴۰۳ از سامانه GEE فراخوانی شد. در ادامه، باندهای چندطیفی با وضوح مکانی ۳۰ متر از طریق فرایند Pan-Sharpening و با استفاده از باند پانکروماتیک (با وضوح ۱۵ متر) به وضوح مکانی بالاتر تبدیل شدند تا شاخص‌های طیفی موردنظر با دقت فضایی بیشتری محاسبه شوند (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات تصویر استفاده شده برای استخراج شاخص‌ها

ردیف	ماهواره	تاریخ به میلادی	تاریخ به شمسی	سطر	ستون	سنجنده
۱	لندست ۸	۲۰۲۴-۰۴-۰۳	۱۴۰۳-۰۱-۱۵	۳۴	۱۶۸	OLI



شکل ۲: فلوچارت مراحل پردازش و مراحل کار

روش

۱- شاخص NDSI

NDSI (Normalized Difference Snow Index) یک شاخص طیفی است که برای تشخیص برف و یخ در تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. این شاخص بر اساس تفاوت بازتاب طیفی برف و یخ در دو باند مختلف تعریف شده است. باند مرئی معمولاً سبز و باند SWIR در محدوده مادون قرمز کوتاه موج قرار دارد. شاخص NDSI به‌عنوان تفاضل بازتاب مشاهده شده در یک باند مرئی (معمولاً سبز) و باند مادون قرمز کوتاه موج (SWIR) تقسیم بر مجموع دو بازتاب تعریف می‌شود. این شاخص از ویژگی‌های طیفی برف / یخ استفاده می‌کند (هال و همکاران، ۱۹۹۵).

۲- شاخص NDSII

NDSII (Normalized Difference Snow Ice Index) بررسی شاخص‌های طیفی برف و یخ بین باندهای B1 و B3 نشان می‌دهد که این محدوده طیفی پتانسیل قابل توجهی برای تشخیص بین این دو عنصر دارد. این به دلیل آن است که بازتاب یخ به سمت باند مادون قرمز نزدیک B3 (NIR) کاهش می‌یابد، درحالی‌که بازتاب برف در این محدوده طیفی نسبتاً ثابت است. این شاخص به ما امکان می‌دهد تا تفاوت بین برف و یخ را بر اساس بازتاب آن‌ها در باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک تشخیص دهیم (کشری، ۲۰۰۸).

۳- شاخص NDSall

شاخص NDSall (شاخص تفاضلی نرمال شده برف) یک شاخص طیفی است که برای شناسایی و تفکیک پوشش برف در تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. این شاخص معمولاً از باندهای خاصی از سنسورهای ماهواره‌ای، مانند باندهای مرئی

و نزدیک به مادون قرمز (NIR)، بهره می‌برد تا حضور برف را با توجه به ویژگی‌های بازتابی منحصر به فرد برف در این نواحی طیفی برجسته کند. فرمولاسیون دقیق NDSall ممکن است بسته به کاربرد خاص متفاوت باشد، اما به طور کلی هدف آن افزایش کنتراست بین مناطق پوشیده از برف و سطوح دیگر مانند زمین‌های بایر یا پوشش گیاهی است (ژیائو و همکاران، ۲۰۰۱).

۴- شاخص NDSInw

فرمولاسیون شاخص تفاضلی نرمال شده SCG^۱ بدون اطلاعات آب (NDSInw) به این صورت است: اختلاف بین باند NIR و باند SWIR1 در مناطق SCG بالا و در مناطق آب دریاچه پایین باقی می‌ماند. نرمال سازی اختلاف بین باند NIR و باند SWIR1 باعث می‌شود که مقدار شاخص در مناطق SCG در سطح بالایی باقی بماند و در مناطق آب دریاچه در سطح پایینی باشد. برای کاهش بیشتر اطلاعات آب دریاچه، یک مقدار مثبت (۰/۰۵) از مقدار اختلاف بین باند NIR و باند SWIR1 کم می‌شود؛ بنابراین، NDSInw برای استخراج SCG و کاهش نویز ناشی از توده‌های آب دریاچه‌ها پیشنهاد می‌شود (یان و همکاران، ۲۰۲۰).

۵- شاخص NBSIMS

باند مادون قرمز که توسط یک حسگر نوری ثبت می‌شود، تابش حرارتی اشیاء در یک صحنه را ضبط می‌کند. در مقابل، یک باند مرئی عمدتاً اطلاعات بازتاب نوری را ثبت می‌کند. روش پیشنهادی NBSI-MS از شش باند طیفی برای دستیابی به بیشترین تفکیک پذیری بین پیکسل‌های برف و غیر برف بهره می‌برد. طبق گفته گونگ و همکاران^۲ (۲۰۱۳) پوشش زمین جهانی در LCT‌های مختلف (طبقه بندی پوشش زمین) قرار دارد، مانند پوشش گیاهی، آب، مناطق نفوذناپذیر (مانند مناطق شهری، جاده‌ها و مناطق صنعتی)، زمین بایر (مانند سواحل، بیابان‌ها، صخره‌ها و معادن شن و ماسه) و برف/یخ. شاخص NBSI-MS بر اساس ویژگی‌های طیفی این طبقه بندی‌های LCT جهانی به همراه HS-V و HS-BL بنا شده است. شاخص‌های طیفی این هفت LCT با استفاده از مقادیر بازتاب متوسط صد نمونه انتخاب شده از هر LCT در منطقه فرانسه-ایتالیا به دست آمده است. برای تصاویر لندست (Landsat)، هر باند باید در مقدار بازتابی که در فایل متادیتای MTL تخصیص داده شده است، ضرب شود. ضرایب تجربی ثابت می‌توانند بر اساس بررسی ویژگی‌های بازتابی LCT‌های مختلف تعیین شوند. مقدار $k = 0.36$ یک ضریب تجربی ثابت است که برای افزایش کنتراست شدت بین پیکسل‌های برف و سایر پیکسل‌های LCT استفاده می‌شود. مقدار k با استفاده از یک فرآیند تکراری برای شناسایی پارامتر در محدوده $[0/34 \text{ تا } 0/38]$ تعیین شد تا بیشترین تفکیک پذیری بین سطوح برف و غیر برف به دست آید. ما دریافتیم که مقدار $k = 0.36$ تفکیک پذیری را با بالا بردن پیکسل‌های برف به بالای صفر و سایر پیکسل‌های LCT به زیر صفر برای تثبیت نقشه‌های غیر دودویی بهبود می‌بخشد. عبارت کاهشی در فرمول NBSI-MS به عنوان ماسک LCT‌ها شناخته می‌شود. این ماسک اجازه می‌دهد تا با کارایی بالا، شش LCT مختلف به جز برف/یخ سرکوب شوند. عملکرد مؤثر روش NBSI-MS به ماسک LCT‌ها بستگی دارد که از باند BSWIR-2 استفاده می‌کند. این باند، دومین باند با کمترین بازتاب در شاخص طیفی برف است. هم‌زمان، این باند بازتاب بالایی در زمین‌های بایر، پوشش گیاهی نفوذناپذیر و HS-BL دارد، همان‌طور که در شکل a5 و b5 نشان داده شده است. علاوه بر این، باند BSWIR-2 به باند BB اضافه می‌شود تا بازتاب بالایی در LCT‌ها به جز برف ایجاد کند. باند سبز (BG) برای متعادل کردن مشارکت مقادیر BB و BSWIR-2 در نواحی برفی معرفی می‌شود. به این ترتیب، عبارت $(BB + BSWIR-2)/BG$ تمایل

1-Snow-Covered Ground

2-Gong et al.

دارد برای پوشش‌های برفی مقادیر نزدیک به ۱ و برای پس‌زمینه مقادیر بالاتر از ۱ بگیرد. در نهایت، باند BSWIR-1 با همان معیارهای باند BSWIR-2 در انتهای ماسک اضافه می‌شود. به این روش، روش NBSI-MS می‌تواند به‌طور مؤثری پس‌زمینه را با مقادیر منفی حذف کند، زیرا ماسک LCT ها کم می‌شود (آرلوا و همکاران^۱، ۲۰۲۱).

۶- شاخص SWI

نقشه‌برداری پوشش برف در مناطق ناهموار با شرایط فیزیکی و هواشناسی بسیار متغیر اغلب از مشکل مخلوط شدن برف و سایه، برف و ابر، برف و بقایا، برف و پوشش گیاهی و برف و آب رنج می‌برد؛ بنابراین، استخراج و نقشه‌برداری دقیق از منطقه پوشیده از برف در مناطق کوهستانی به ابزارهای ماهری نیاز دارد که تحت تأثیر متغیرهای دیگر پوشش زمین همسایه، به‌ویژه آب، قرار نگیرند. به‌منظور دستیابی به نقشه‌برداری دقیق‌تر پوشش برف، در مطالعه حاضر، شاخص جدیدی به نام SWI پیشنهاد شد. این شاخص جدید از ترکیب باندهای سبز، NIR و SWIR استفاده می‌کند و ویژگی‌های طیفی برف، ابر، پوشش گیاهی و به‌ویژه آب را در این مناطق تحلیل می‌کند. مشابه شاخص‌های قبلی، SWI قادر به حذف تأثیر کلاس‌های همسایه برجسته مانند ابر، خاک، پوشش گیاهی و آب است. این شاخص به‌عنوان یک توسعه شاخص‌های قبلی، روشی پیچیده‌تر برای حذف تأثیر پیکسل‌های همسایه آب دارد. ویژگی آب بازتاب بالاتری در ناحیه طول موج سبز نشان می‌دهد و حداکثر تابش را در ناحیه NIR جذب می‌کند. خاصیت جذب آب در ناحیه NIR امکان تشخیص آسان برف از آب را فراهم می‌کند (کولکاری و همکاران^۲، ۲۰۰۶)؛ بنابراین، برای ایجاد کنتراست قابل توجه بین برف و سایر ویژگی‌ها، به‌ویژه در مورد آب، SWI به حداکثر دقت می‌رسد. بازتاب بالای ابر در باندهای سبز و SWIR تشخیص آن از برف را آسان می‌کند. SWI از ویژگی‌های بازتاب برف و پوشش گیاهی در ناحیه طول موج سبز و NIR برای نقشه‌برداری دقیق برف زیر پوشش گیاهی استفاده می‌کند. نسبت (سبز/سبز + NIR) برای کاهش تأثیر پوشش گیاهی بر برف استفاده می‌شود. یکی از مزایای اصلی SWI نسبت $(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$ است که به‌عنوان ماسک آب عمل می‌کند. استخراج و نقشه‌برداری منطقه پوشش برف از SWI به‌تنهایی عملکرد و دقت بهتری را نسبت به NDSI، S3 و NDSII-1 ارائه می‌دهد. از مشاهدات مختلف، مشخص شد که مقدار آستانه شاخص SWI برای منطقه پوشش برف بیش از ۰/۲۱ است.

۷- شاخص S3

سایتو و یامازاکی^۳ در سال ۱۹۹۹ شاخص S3 را به‌عنوان یک شاخص بهبود یافته برای نقشه‌برداری برف پیشنهاد کردند که هم‌زمان با توسعه NDSI بود. در سال ۲۰۰۶، شیمامورا دقت S3 را نسبت به NDSI ارزیابی کرد، به‌ویژه در مناطقی که پوشش برف و نواحی جنگلی بر هم منطبق می‌شدند. شاخص S3 در اصل برای حسگر GLI (Global Imager) ماهواره ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite II) که در دسامبر ۲۰۰۲ پرتاب شد، طراحی شده بود. برخی مطالعات توسط محققان با استفاده از حسگر ADEOS-II برای اندازه‌گیری کارایی S3 در نقشه‌برداری پوشش برف انجام شده است (موتویا و همکاران^۴، ۲۰۰۱ و شیمامورا و همکاران^۵، ۲۰۰۳). از آنجایی که ADEOS-II در اکتبر ۲۰۰۳ از کار افتاد، محققان مختلف از Landsat ETM+ در مناطق مختلف جهان استفاده کردند و دریافتند که S3 قابلیت نقشه‌برداری دقیق از پوشش برف تحت نواحی جنگلی متراکم را بدون نیاز به داده‌های مرجع (NDVI) دارد. بازتاب

1-Arreloa et al.

2-Kulkarni et al.

3-Saito et al.

4-Motoya et al.

5-Shimamura et al.

برف در ناحیه مرئی بالا است، درحالی که در مورد پوشش گیاهی، بازتاب از لبه قرمز به طول موج ناحیه نزدیک به مادون قرمز (NIR) افزایش می‌یابد. با این حال، در ناحیه‌ای که برف زیر پوشش گیاهی قرار دارد، بازتاب برف و گیاهان مخلوط می‌شود؛ بنابراین، برای جلوگیری از تأثیر پیکسل‌هایی که دارای مقادیر برف و پوشش گیاهی هستند بر نقشه‌برداری پوشش برف، S3 از ویژگی‌های بازتابی برف در طول موج‌های قرمز، NIR و SWIR استفاده می‌کند (نگی و همکاران^۱، ۲۰۰۸ و شیمامورا و همکاران^۲، ۲۰۰۶). در ماهواره Landsat-8، باندهای نزدیک به مادون قرمز، قرمز و SWIR به ترتیب با باند ۵ (۰/۸۵ تا ۰/۸۹ میکرومتر)، باند ۴ (۰/۶۳ تا ۰/۶۸ میکرومتر) و باند ۶ (۱/۵۶ تا ۱/۶۶ میکرومتر) مطابقت دارند. فرمول محاسبه شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: شاخص‌های استفاده شده در پژوهش

ردیف	شاخص	فرمول	منبع
۱	NDSI	$(G - S1) / (G + S1)$	Riggs et al, 2002
۲	NDSII	$(G - N) / (G + N)$	Keshri, 2008
۳	NDSall	$(R - S1) / (R + S1)$	Xiao et al, 2001
۴	NDSInw	$(N - S1 - \text{beta}) / (N + S1)$	Yan et al, 2020
۵	NBSIMS	$0.36 * (G + R + N) - (((B + S2)/G) + S1)$	Arreola-Esquivel et al, 2021
۶	SWI	$(G * (N - S1)) / ((G + N) * (N + S1))$	Dixit et al, 2019
۷	S3	$(N * (R - S1)) / ((N + R) * (N + S1))$	Saito et al, 1999

• R: باند قرمز (Red Band)

• G: باند سبز (Green Band)

• B: باند آبی (Blue Band)

• N: باند مادون قرمز نزدیک (Near InfraRed Band)

• S1: باند مادون قرمز کوتاه‌موج اول (SWIR1)

• S2: باند مادون قرمز کوتاه‌موج دوم (SWIR2)

یافته‌ها

برف در طول موج مادون قرمز نزدیک (NIR) بازتاب بسیار کمی دارد، در حالی که بسیاری از سایر عوارض سطح زمین مانند پوشش گیاهی در این ناحیه بازتاب بالایی دارند. این تفاوت در بازتاب باعث می‌شود که برف به راحتی از سایر پدیده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای قابل تفکیک باشد. در این پژوهش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و به کارگیری مجموعه‌ای از شاخص‌های طیفی مرتبط با برف، پوشش برفی کوهستان سهند شناسایی شد. طبقه‌بندی تصاویر به دو کلاس برف و غیر برف با اعمال آستانه‌های مناسب صورت گرفت و همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، محدوده مورد مطالعه به خوبی استخراج شده است. بر اساس تفسیر بصری نقشه‌ها، آستانه‌های انتخاب شده در فرآیند طبقه‌بندی مناسب ارزیابی می‌شوند. در این تحقیق هفت شاخص استخراج برف استفاده شد. علاوه بر آن اعمال شاخص‌ها و آستانه‌گذاری نمی‌تواند

1-Negi et al.

2-Shimamura et al.

معیاری برای مقایسه شاخص‌ها باشد، زیرا تفاوت‌های جزئی به صورت بصری قابل تشخیص نیست. نتایج روش‌شناسی کاربردی نشان می‌دهد که هیچ شاخص برفی نمی‌تواند سطوح برفی را از سطوح سایه و سطوحی که آلبیدوی پایینی دارند، جدا کند. در محیط‌هایی، به‌ویژه سایه‌ها که سطوح غیر برف دارای بازتاب طیفی کمی هستند، روش‌های طبقه‌بندی ساده ممکن است پیکسل‌های برف را از پیکسل‌های غیر برف متمایز نکند (ورپوتر و همکاران، ۲۰۱۲). در حقیقت استخراج پهنه‌های برفی در مناطقی که پوشش زمینی دارای آلبیدوی پایین است، می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد.

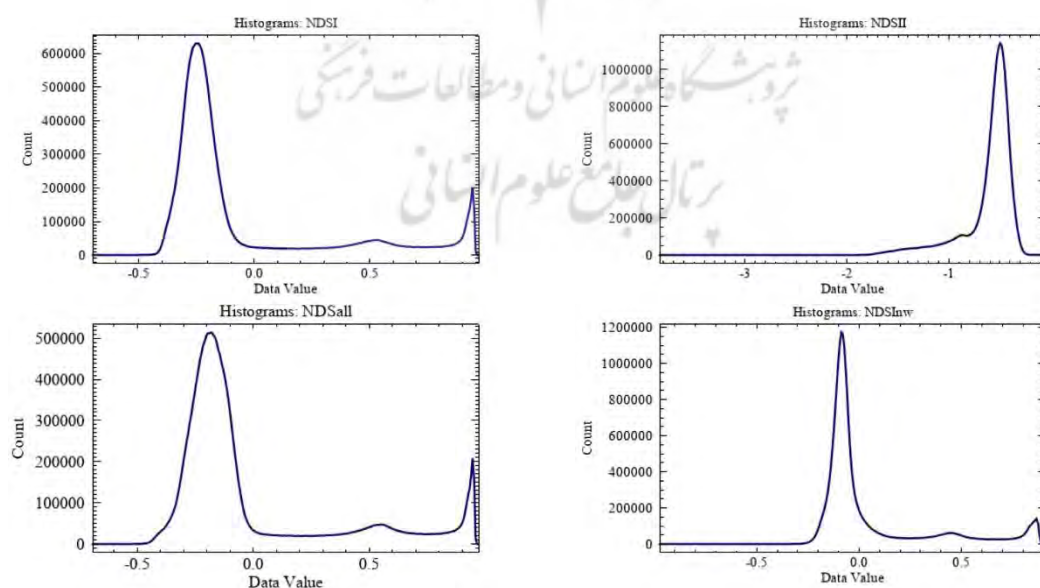
نتایج به‌دست‌آمده از اعمال شاخص‌های مختلف بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ به‌خوبی نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه در شناسایی و تفکیک پوشش برف توسط هر یک از این شاخص‌ها است. NDSI (شاخص تفاضلی نرمال‌شده برف) که یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در مطالعات پوشش برفی است، گسترده‌ترین مناطق پوشیده از برف را شناسایی می‌کند. این شاخص به دلیل دقت بالا در تشخیص برف، به‌ویژه در مناطق وسیع و مرتفع که تحت تأثیر شرایط اقلیمی سرد هستند، بسیار کاربرد دارد. نقشه به‌دست‌آمده از NDSI نشان می‌دهد که این شاخص می‌تواند حتی در مناطق کم‌ارتفاع نیز برف را به‌درستی تشخیص دهد و به همین دلیل برای شناسایی نواحی برفی بزرگ، به‌خصوص در مناطقی که پوشش برف زیادی دارند، مناسب است. NDSall که ترکیبی از شاخص‌های مختلف است، مشابه NDSI عمل کرده اما تفاوت‌هایی در دقت و حساسیت آن دیده می‌شود. این شاخص علاوه بر شناسایی نواحی برفی مشابه NDSI، به‌ویژه در مرزهای نواحی برفی دقت بیشتری دارد و می‌تواند برای تفکیک دقیق‌تر مرزهای برفی به‌کار رود. در مقابل، شاخص NDSII (شاخص تفاضلی نرمال‌شده برف پیشرفته) بیشتر برای شرایط خاص‌تر محیطی، مانند نواحی با تغییرات دمایی یا رطوبتی متغیر، طراحی شده است. نقشه حاصل از این شاخص نشان می‌دهد که برف‌های متراکم‌تر و با عمق بیشتر به‌خوبی شناسایی شده‌اند و نواحی با تراکم برفی کمتر به‌طور جزئی‌تر نمایان می‌شوند. این شاخص مناسب برای تحلیل مناطقی است که برف تحت تأثیر تغییرات سریع محیطی یا ذوب برف قرار دارد. همچنین NDSInw، شاخص دیگری است که مناطق برفی کوچک‌تر و با تراکم بیشتر را نسبت به NDSI شناسایی کرده و برای مناطقی که تغییرات سریع برفی (مانند ذوب یا تراکم) رخ می‌دهد، کاربرد دارد. شاخص SWI (شاخص آب برف) به‌طور خاص برای شناسایی میزان آب موجود در برف طراحی شده است. نقشه به‌دست‌آمده از این شاخص نشان می‌دهد که SWI قادر است میزان آب موجود در پوشش برف را به‌خوبی تخمین بزند و در تحلیل‌های مربوط به روان‌آب‌های فصلی، منابع آبی و پیش‌بینی سیلاب‌ها بسیار کاربردی است. همچنین، شاخص NBSIMS نیز عملکرد مشابهی با SWI دارد و بر توزیع برف با تأکید بر ویژگی‌های آبی آن تمرکز دارد. این شاخص‌ها در مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در نواحی که ذوب برف منبع اصلی تغذیه آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها است، بسیار مفید هستند. شاخص S3 نیز در شناسایی و تفکیک برف عملکرد قابل قبولی داشته و مشابه

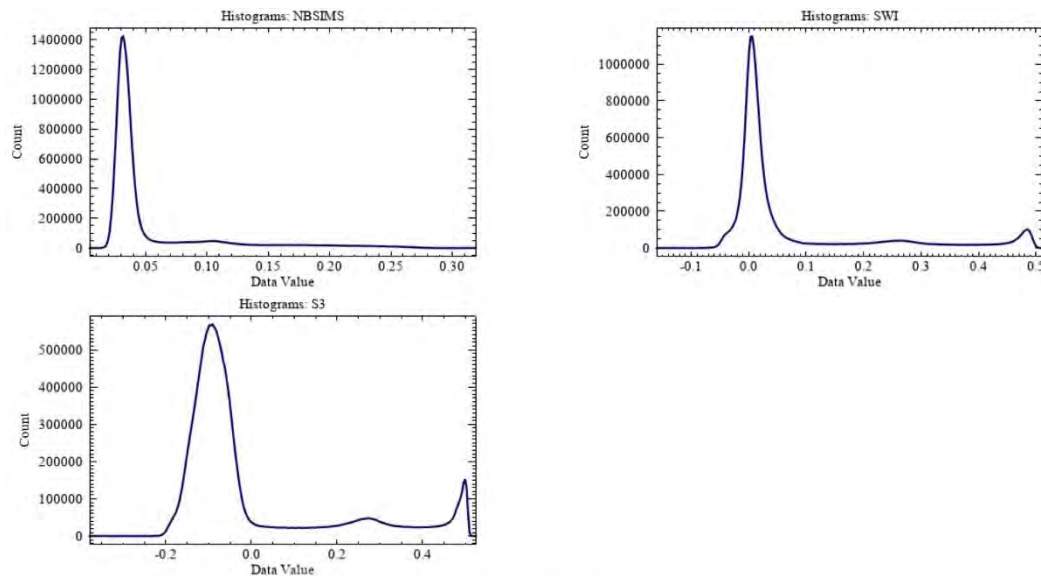
NDSInw است، هرچند که تفاوت‌های کوچکی در حساسیت و دقت آن مشاهده می‌شود. S3 ممکن است در شناسایی نواحی با تراکم کمتر برف حساس‌تر عمل کند و برای مناطقی که پوشش برفی نازکی دارند مفیدتر باشد (شکل ۳).



شکل ۳: اعمال شاخص‌های مدنظر در منطقه مورد مطالعه

هیستوگرام تصاویر، دامنه و طیفی از سطوح خاکستری را برای شاخص مربوطه را نشان می‌دهد که قله‌ها نشان‌دهنده‌ی مناطق برفی و مرطوب است. این هیستوگرام‌ها که شاخص‌های طیفی برف را نشان می‌دهند، در حقیقت یک پارامتر می‌باشند که از طریق عملیات ریاضی بر روی دو یا چند باند حاصل شده‌اند و بر اساس مشخصات طیفی، یک آستانه مناسب برای جدا کردن دو کلاس (برف و غیر برف) از یکدیگر بر روی تصویر اعمال می‌شود. شکل (۴) هیستوگرام شاخص‌های مطرح شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. باید خاطرنشان کرد که آستانه تعیین شده در پایین هر قله قرار دارد.





شکل ۴: هیستوگرام شاخص‌های اعمال شده در منطقه مورد مطالعه

بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های پیشین حاکی از آن است که افزایش واریانس بین بازتاب طیفی عوارض برفی و غیر برفی، منجر به افزایش تفکیک‌پذیری این پدیده‌ها در داده‌های ماهواره‌ای می‌شود. این امر به‌ویژه در مناطق کوهستانی که تنوع مکانی و ترکیب طیفی عناصر سطحی بالاست، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مطالعه نیز تلاش شد تا با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و شاخص‌های متنوع، توان تفکیک برف از سایر کلاس‌های سطح زمین ارزیابی گردد. در مرحله اول، از روش تفسیر بصری برای بررسی کیفیت استخراج پوشش برف استفاده شد. شکل (۳) نتایج اعمال شاخص‌های مختلف را نشان می‌دهد که در آن نقشه‌های حاصل از هر شاخص تفاوت‌هایی را در گستره برف نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها به‌خوبی بیانگر آن است که هریک از شاخص‌ها دارای حساسیت متفاوتی نسبت به شرایط طیفی و محیطی منطقه مورد مطالعه هستند. برخی شاخص‌ها مانند NDSI و NDSall در شناسایی گستره‌های وسیع عملکرد خوبی داشتند، درحالی‌که شاخص‌هایی نظیر NDSInw و SWI توانایی بیشتری در تفکیک نواحی مرطوب، مرزهای پوشش برف و مناطق سایه‌دار از خود نشان دادند. شکل (۴) به تحلیل هیستوگرام شاخص‌های منتخب اختصاص دارد و نحوه توزیع سطوح خاکستری در تصویر را برای هر شاخص به‌تفصیل نمایش می‌دهد. هیستوگرام‌ها ابزار مناسبی برای ارزیابی کارایی شاخص‌ها هستند، چراکه نقاط پیک هیستوگرام معمولاً بیانگر نواحی همگن در تصویر بوده و مکان‌یابی آستانه‌ها در آن‌ها نقش مهمی در طبقه‌بندی دقیق ایفا می‌کند. در این مطالعه، مشاهده شد که هیستوگرام شاخص‌ها دارای پیک‌های نسبتاً مشابهی بودند و اگرچه تفاوت‌هایی در شکل و دامنه توزیع وجود داشت، اما این تفاوت‌ها آن‌قدر چشمگیر نبودند که کارایی نسبی شاخص‌ها را کاملاً تحت تأثیر قرار دهند. با وجود این، نمی‌توان صرفاً بر اساس تحلیل هیستوگرام و تفسیر بصری، درباره دقت عملکرد شاخص‌ها قضاوت قطعی داشت. در این راستا، برای اعتبارسنجی دقیق‌تر عملکرد شاخص‌ها، از روش طبقه‌بندی آماری با الگوریتم کم‌ترین فاصله استفاده شد و صحت کلی و ضریب کاپا برای هر شاخص محاسبه گردید. همان‌طور که در جدول (۲) آمده است، شاخص‌های NDSInw و S3 بالاترین دقت را به‌دست آوردند، به‌طوری‌که دقت کلی آن‌ها ۱۰۰ درصد و ضریب کاپا برابر با ۱ برآورد شد. لازم به ذکر است که این مقادیر دقت، نه بر اساس تطبیق کامل نقشه‌های بصری بلکه بر پایه تطبیق طبقه‌بندی‌شده با داده‌های اعتبارسنجی استخراج شده‌اند؛ به بیان دیگر، ممکن است دو شاخص در ظاهر خروجی‌های متفاوتی تولید کنند، اما هر دو از دید آماری در طبقه‌بندی پیکسل‌های نمونه عملکرد موفق‌تری داشته باشند. این موضوع نشان می‌دهد که تکیه صرف بر ارزیابی بصری می‌تواند گمراه‌کننده باشد و تحلیل‌های کمی و آماری در تأیید نتایج نقشه‌برداری نقش کلیدی دارند.

جدول ۲: دقت کلی و ضریب کاپا

شاخص	دقت کلی (درصد)	ضریب کاپا
NBSIMS	۹۹/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۸
NDSI	۹۹/۹۸۶۸	۰/۹۹۲۴
NDSall	۹۹/۹۹۸۰	۰/۹۹۸۸
NDSII	۹۹/۹۴۶۲	۰/۹۶۸۵
NDSInw	۱۰۰	۱
S3	۱۰۰	۱
SWI	۹۹/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۷

در مجموع، استفاده از این شاخص‌های مختلف به پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی این امکان را می‌دهد که با دقت بیشتری وضعیت پوشش برفی، میزان آب موجود در برف و توزیع جغرافیایی آن را بررسی کنند. ترکیب این شاخص‌ها می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر پوشش برف در مناطق مختلف کمک کند و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع آبی، پیش‌بینی سیلاب‌ها، تحلیل تغییرات اقلیمی و حتی در زمینه کشاورزی و حفاظت از منابع طبیعی ارائه دهد. به‌ویژه در مناطقی که برف نقش کلیدی در تغذیه منابع آبی و تعیین الگوهای هیدرولوژیکی دارد، استفاده از این شاخص‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و مدیریت بحران‌های مرتبط با تغییرات آب و هوایی بسیار مؤثر باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و شاخص‌های طیفی متنوع می‌تواند راهکاری مؤثر و علمی برای شناسایی و تفکیک پوشش برف در نواحی کوهستانی، به‌ویژه مناطق با آلبیدوی پایین و شرایط توپوگرافی پیچیده، فراهم کند. در این تحقیق، هفت شاخص مهم شامل NBSIMS، NDSI، NDSall، NDSInw، S3 و SWI مورد بررسی قرار گرفتند که هر یک دارای نقاط قوت و کاربردهای خاص خود بودند. بررسی دقت شاخص‌ها با استفاده از معیارهای آماری از جمله دقت کلی و ضریب کاپا انجام شد که شاخص‌های NDSInw و S3 با کسب دقت کلی ۱۰۰ درصد و ضریب کاپای ۱، به‌عنوان شاخص‌های برتر معرفی شدند. این شاخص‌ها توانستند به‌طور کامل پوشش برفی منطقه را از دیگر کلاس‌های سطح زمین تفکیک نمایند و عملکرد بسیار دقیقی را به نمایش بگذارند.

با این حال، یافته‌ها نشان داد که در برخی نواحی، به‌ویژه در مرز بین نواحی برفی و غیر برفی، یا در مناطقی با تغییرات سریع اقلیمی و فیزیکی، همچنان چالش‌هایی در تعیین آستانه مناسب برای تفکیک برف وجود دارد. در چنین شرایطی، استفاده از شاخص‌هایی مانند NDSII و SWI که به‌طور خاص‌تر بر ویژگی‌های طیفی آب و رطوبت تمرکز دارند، می‌تواند تحلیل دقیق‌تری از وضعیت برف و میزان آب موجود در آن ارائه دهد.

تحلیل هیستوگرام‌ها و واریانس شاخص‌ها نشان داد که گرچه تفاوت فاحشی بین شاخص‌ها وجود ندارد، اما ترکیب اطلاعات آن‌ها و استفاده توأمان از چند شاخص می‌تواند در افزایش دقت نقشه‌برداری و کاهش خطاهای احتمالی مؤثر باشد؛ بنابراین، توصیه می‌شود در مطالعات مشابه از رویکرد چندشاخص به‌جای تکیه صرف بر یک شاخص استفاده شود، به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم، سایه‌های کوهستانی یا اختلاط طیفی زیاد.

مطالعه حاضر همچنین با نتایج پژوهش‌های پیشین نظیر عبادی و همکاران (۱۳۹۹) همخوانی دارد که در آن نیز شاخص‌های S3، NDSII و SWI برای شناسایی دقیق پوشش برف پیشنهاد شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش سیفی (۱۳۹۸) نیز مؤید آن است که داده‌های لندست قابلیت بالایی برای پایش نواحی برفی دارند و می‌توان با استفاده از آن‌ها به نقشه‌برداری دقیق‌تری از وضعیت سطح زمین در فصل زمستان پرداخت.

در نهایت، این تحقیق بار دیگر اهمیت بالای داده‌های سنجش از دور و به‌ویژه تصاویر لندست را در تحلیل‌های محیطی و کاربردهای عملی مانند مدیریت منابع آبی، ارزیابی خطر سیلاب، تحلیل تغییرات اقلیمی و برنامه‌ریزی کشاورزی به‌خوبی نشان داد. بهره‌گیری از چنین ابزارهایی در کنار روش‌های تحلیل پیشرفته، می‌تواند بستری قدرتمند برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی در حوزه منابع طبیعی، حفاظت محیط زیست و توسعه پایدار به‌ویژه در نواحی کوهستانی فراهم آورد.

منابع

- جمس، ح، یاراحمدی، د، نصیری، ا، و میرهاشمی، ح، ۱۴۰۲. پایش تغییرات فضایی گستره برفی البرز مرکزی با استفاده از تابع طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و تصاویر ماهواره‌ای سری لندست، پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۱۴، شماره ۲، صص ۳۷-۲۰.
- سیف، ع، بیرانوند، ح، ۱۴۰۰. بازسازی برف‌مرزهای دائمی کواترنر پایانی در ارتفاعات جنوبی ایران مرکزی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۳، صص ۱۱۱-۱۳۳.
- سیفی، ه، ۱۳۹۸. برآورد سطح پوشش برف از طریق تکنیک‌های شی‌گرا با استفاده از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS (مطالعه موردی: کوهستان سبلان)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۲۱، شماره ۶۳، صص ۳۷-۱۹.
- صلاحی، ب، حلبیان، ا، زینالی، ب، و کاشانی، ع، ۱۴۰۳. واکاوی پیوند برف‌پوش با عوامل فیزیوگرافی در پهنه کوهستانی شمال غرب ایران، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، 10.22034/gmpj.2024.456313.1501.
- عبادی، ی، افتخاری، ا، محمدخانلو، ح، و فخری، م، ۱۳۹۹. ارائه شاخص طیفی جدید به‌منظور استخراج سطوح برفی با استفاده از تصاویر اپتیکی سنجش از دور، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۳۰، شماره ۱۱۷، صص ۱-۱۶.
- فرجی، ع، کمانگر، م، و اشرفی، س، ۱۴۰۲. تحلیل فضایی سطح پوشش برف در غرب ایران با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای، نشریه آب و خاک، جلد ۳۸، شماره ۱، صص ۱۷۳-۱۶۱.
- کاوسی، ا، نظری سامانی، ع، ۱۴۰۲. ارزیابی نقش نوع داده‌های ورودی بر دقت نقشه خطر بهمن برفی با رویکرد داده محور آنتروپی شانون. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۲، شماره ۲، صص ۷۱-۵۹.
- لبیان، ا، صلحی، س، ۱۳۹۹. بررسی ارتباط برف-پوش (SC) و دمای سطح زمین (LST) با مؤلفه توپوگرافیکی ارتفاع در ارتفاعات البرز مرکزی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۲، صص ۲۴۹-۲۲۷.
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S.A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S.M., Moghaddam, S.H.A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S. et al., 2020. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 13, pp.5326-5350.
- Arreola-Esquivel, M., Toxqui-Quitl, C., Delgadillo-Herrera, M., Padilla-Vivanco, A., Ortega-Mendoza, G. and Carbone, A., 2021. Non-Binary snow Index for Multi-Component surfaces. *Remote Sensing*, 13(14), pp.2777. <https://doi.org/10.3390/rs13142777>
- Aybar, C., Wu, Q., Bautista, L., Yali, R., Barja, A. and Rgee. 2020. An R Package for Interacting with Google Earth Engine. *J. Open Source Softw.* 5, p.2272.
- Barnett, T.P., Adam, J.C. and Lettenmaier, D.P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, pp.303-309.

- Bormann, K.J., Brown, R.D., Derksen, C. and Painter, T.H. 2018. Estimating snow-cover trends from space. *Nature Clim. Chang.* 8, pp.924–928.
- Bousbaa, M., Htitiou, A., Boudhar, A., Eljabiri, Y., Elyoussfi, H., Bouamri, H., Ouatiqi, H. and Chehbouni, A. 2022. High-Resolution Monitoring of the Snow Cover on the Moroccan Atlas through the Spatio-Temporal Fusion of Landsat and Sentinel-2 Images. *Remote Sensing*, 14(22), p.5814. <https://doi.org/10.3390/rs14225814>
- Chen, Y., Shao, H. and Li, Y. 2021. Consistency analysis and accuracy assessment of multi-source land cover products in the Yangtze River Delta. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* 37, pp.142–150.
- Deng, G., Tang, Z., Dong, C., Shao, D. and Wang, X. 2024. Development and Evaluation of a Cloud-Gap-Filled MODIS Normalized Difference Snow Index Product over High Mountain Asia. *Remote Sensing*, 16(1), pp.192. <https://doi.org/10.3390/rs16010192>
- Dixit, A., Goswami, A and Jain, S. 2019. Development and evaluation of a new “Snow Water Index (SWI)” for accurate snow cover delineation. *Remote Sensing*, 11(23), p.2774. <https://doi.org/10.3390/rs11232774>
- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., Niu, Z., Huang, X., Fu, H., Liu, S., Li, C., Li, X., Fu, W., Liu, C., Xu, Y., Wang, X., Cheng, Q., Hu, L., Yao, W. and Chen, J. (2012). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), pp.2607–2654. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, pp.18–27
- Gunnarsson, A., Garðarsson, S.M. and Sveinsson, Ó.G. 2019. Icelandic snow cover characteristics derived from a gap-filled MODIS daily snow cover product. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, pp.3021–3036
- Guo, Y., Xia, H., Pan, L., Zhao, X. and Li, R. 2022. Mapping the Northern Limit of Double Cropping Using a Phenology-Based Algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sens.* 14, p.1004.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. and Salomonson, V. V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), pp.127–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-p](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-p)
- Huang, X., Deng, J., Ma, X., Wang, Y., Feng, Q., Hao, X. and Liang, T. 2016. Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China. *Cryosphere*, 10, pp.2453–2463.
- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A. and Sahoo, S. 2016. Spatial impact of land use/land cover change on surface temperature distribution in Saranda Forest, Jharkhand. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, p.127.
- Keshri, A. K., Shukla, A. and Gupta, R. P. 2008. ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), pp.519–524. <https://doi.org/10.1080/01431160802385459>
- Kulkarni, A. V., Singh, S. K., Mathur, P. and Mishra, V. D. 2006. Algorithm to monitor snow cover using AWiFS data of RESOURCESAT 1 for the Himalayan region. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), pp.2449–2457. <https://doi.org/10.1080/01431160500497820>
- Kumar, L. and Mutanga, O. 2018. Google Earth Engine Applications since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sens.* 10, p.1509.
- Kuter, S., Weber, G. and Akyürek, Z. 2016. A progressive approach for processing satellite data by operational research. *Operational Research*, 17(2), pp.371–393. <https://doi.org/10.1007/s12351-016-0229-x>

- Liao, A., Chen, L., Chen, J., He, C., Cao, X., Chen, J., Peng, S. and Sun, F. 2014. Gong, P. High-resolution remote sensing mapping of global land water. *Sci. China Earth Sci.* 57, pp.2305–2316.
- Maurer EP.; Rhoads JD.; Dubayah RO and Lettenmaier, DP. 2003. Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrol Process* 17. PP. 59–71
- Motoya, K., Yamazaki, T. and Yasuda, N. 2001. Evaluating the spatial and temporal distribution of snow accumulation, snowmelts and discharge in a multi basin scale: an application to the Tohoku Region, Japan. *Hydrological Processes*, 15(11), pp.2101–2129. <https://doi.org/10.1002/hyp.279>
- Negi, H. S., Kulkarni, A. V. and Semwal, B. S. 2008. Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), pp.315–325. <https://doi.org/10.1080/01431160802261197>
- Orusa, T., Cammareri, D. and Borgogno Mondino, E. A. 2022. Possible Land Cover EAGLE Approach to Overcome Remote Sensing Limitations in the Alps Based on Sentinel-1 and Sentinel-2: The Case of Aosta Valley (NW Italy). *Remote Sens.* 15, p.178.
- Orusa, T., Cammareri, D. and Borgogno Mondino, E. A. 2022. Scalable Earth Observation Service to Map Land Cover in Geomorphological Complex Areas beyond the Dynamic World: An Application in Aosta Valley (NW Italy). *Appl. Sci.* 13, p.390.
- Parajka, J., Holko, L., Kostka, Z. and Blöschl, G. 2012. MODIS snow cover mapping accuracy in a small mountain catchment–comparison between open and forest sites. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, pp.2365–2377.
- Paul, F. 2002. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 Thematic Mapper and Austrian Glacier Inventory data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(4), pp.787–799. <https://doi.org/10.1080/01431160110070708>
- Qin, Y., Abatzoglou, J.T., Siebert, S., Huning, L.S., AghaKouchak, A., Mankin, J.S., Hong, C., Tong, D., Davis, S.J. and Mueller, N.D. 2020. Agricultural risks from changing snowmelt. *Nature Clim. Chang.* 10, pp.459–465.
- Rai, S. C. and Mukherjee, N. R. 2021. Spatio-temporal change delineation and forecasting of snow/ice-covered areas of Sikkim Himalaya using multispectral and thermal band combinations of landsat imagery. *Environmental Challenges*, 4, p.100163. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100163>
- Riggs, G., Hall, D. and Salomonson, V. 2002. A snow index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *IEEE. https://doi.org/10.1109/igarss.1994.399618*
- Rittger, K., Painter, T.H. and Dozier, J. 2013. Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Adv. Water Resour.* 51, pp.367–380.
- Rosenthal, W.; Dozier, J. 1996. Automated Mapping of Montane Snow Cover at Subpixel Resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resour. Res.*, 32, pp.115–130.
- Saito, A. and Yamazaki, T. 1999. Characteristics of Spectral Reflectance for Vegetation Ground Surfaces with Snow-cover; Vegetation Indices and Snow Indices. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, 12(1), pp.8–38. <https://doi.org/10.3178/jjshwr.12.28>
- Sharma R.C., Tateishi, R., and Hara, K. 2016. A new water-resistant snow index for the detection and mapping of snow cover on a global scale. *Int J Remote Sens* 37. pp.706–723
- Shimamura, Y., Izumi, T. and Matsuyama, H. 2006. Evaluation of a useful method to identify snow covered areas under vegetation – comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International*

- Journal of Remote Sensing*, 27(21), pp.4867–4884.
<https://doi.org/10.1080/01431160600639693>
- Shimamura, Y., Izumi, T., Daichi, N. and Hiroshi, M. 2003. Estimation of snow water equivalent and snowmelt water using the Snow Index-A case study in the Kurobe Basin. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, 16(4), pp.331–348.
<https://doi.org/10.3178/jjshwr.16.331>
 - Song, Y., Li, Z., Zhou, Y., Bi, X., Sun, B., Xiao, T., Suo, L., Zhang, W., Xiao, Z. and Wang, C. 2022. The Influence of Solar Activity on Snow Cover over the Qinghai–Tibet Plateau and Its Mechanism Analysis. *Atmosphere*, 13, p.1499.
 - Wang, X., Gao, X., Zhang, X., Wang, W. and Yang, F. 2020. An Automated Method for Surface Ice/Snow Mapping Based on Objects and Pixels from Landsat Imagery in a Mountainous Region. *Remote Sensing*, 12(3), pp.485.
<https://doi.org/10.3390/rs12030485>
 - Wang, Y. and Wang, J. 2024. Monitoring snow cover in typical forested areas using a Multi-Spectral Feature Fusion approach. *Atmosphere*, 15(4), p.513.
<https://doi.org/10.3390/atmos15040513>
 - Wang, Y., Huang, X., Liang, H., Sun, Y., Feng, Q. and Liang, T. 2018. Tracking snow variations in the Northern Hemisphere using multi-source remote sensing data (2000–2015). *Remote Sens.* 10, p.136.
 - Xiao, X., Shen, Z. and Qin, X. 2001. Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: A Normalized Difference Snow and Ice Index. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), pp.2479–2487.
<https://doi.org/10.1080/01431160119766>
 - Yan, D., Huang, C., Ma, N. and Zhang, Y. 2020. Improved Landsat-Based water and snow indices for extracting lake and snow Cover/Glacier in the Tibetan Plateau. *Water*, 12(5), p.1339. <https://doi.org/10.3390/w12051339>