

صص ۱۳۵-۱۵۲

بررسی و مقایسه عملکرد شاخص‌های استخراج عوارض آبی و پوشش برف/یخ (SCG)**صیاد اصغری سراسکانرود***

دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

الهام ملانوری

دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

شیوا صفری

دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

احسان قلعه

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۳

چکیده

با توجه به تغییرات اقلیمی و کاهش عنصر بارش به‌عنوان یکی از اجزای اصلی آن، به‌ویژه در مناطق کوهستانی شمال غرب ایران، مطالعه و بررسی دقیق پدیده مهم آب و همچنین برف به دلیل اهمیت ذخیره‌گاه‌های برفی در تغذیه ذخایر آبی حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت شاخص‌های طیفی در سنجش‌ازدور و شباهت طیفی دو پدیده برف و آب، در مطالعه حاضر از شاخص‌های تفاضلی نرمال شده آب و برف و همچنین شاخص‌های تفاضلی نرمال شده، بدون پس‌زمینه برف/یخ و آب و روش آستانه‌گذاری Otsu بر روی تصویر لندست ۸ با انتخاب قسمتی از کوهستان سبلان و دریای خزر به‌عنوان منطقه مورد مطالعه، استفاده شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد، با توجه به هیستوگرام و واریانس باندها، شاخص‌های نرمال شده تفاضلی آب بدون برف و برف بدون آب، به ترتیب با صحت کلی ۱۰۰ درصد و ۹۷ درصد دقت بالایی در استخراج و تفکیک پدیده‌های آب و پوشش برفی نشان دادند. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم باینری Otsu نیز این موضوع را تأیید کرده و توانایی بالای شاخص‌های مورد نظر را در استخراج پدیده‌های برف و آب نشان داد.

واژگان کلیدی: شاخص‌های طیفی، $NDWI_{NS}$ ، $NDSI_{NW}$ ، آستانه‌گذاری Otsu**مقدمه**

وجود آب به‌عنوان بخش مهمی از زندگی بشر مطرح است. پوشش برف و یخ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده آب شیرین جهان، یک منبع حیاتی بوده و به تغییرات اقلیم بسیار حساس می‌باشد (زینالی و همکاران، ۱۴۰۰، ۸۰). پوشش برف به‌شدت بر میزان رواناب جاری شده در سطح زمین مؤثر بوده و بر اجزای بیوتیک و کیفیت آب

رودخانه و سیستم هیدرولوژی ارتفاعات مختلف در مناطق کوهستانی تأثیرگذار است (توماس^۱ و همکاران، ۲۰۱۴، ۱۵۳۹) (پاراجکا^۲ و همکاران، ۲۰۰۱، ۹) (دونمز^۳ و همکاران، ۲۰۲۰، ۲۸۲). به‌عنوان اجزای اصلی چرخه آب، دریاچه‌ها و برف/یخچال‌های طبیعی (SCG)^۴ به‌ویژه در مناطق کوهستانی شاخص‌های حیاتی تغییر آب و هوا هستند؛ بنابراین درک تغییرات کمیت و وسعت دریاچه‌ها و یخچال‌های طبیعی برای ارزیابی منابع آب منطقه‌ای و جهانی ضروری می‌باشد (یان^۵ و همکاران، ۲۰۲۰، ۱ به نقل از چانگ هونگ و همکاران، ۲۰۱۸). اهمیت پوشش برف و نظارت بر آن یکی از مباحث مهم در رابطه با مطالعه کره زمین است (اصغری و مدیرزاده، ۱۳۹۹، ۳۹۵). سنجش از راه دور با توجه به مزیتی که دارد می‌تواند مناطق بزرگ با وضوح مکانی و زمانی بالا را کنترل کند (منیکام^۶ و باروس^۷، ۲۰۲۰، ۲). این تکنولوژی توانایی اندازه‌گیری کمی خصوصیات فیزیکی برف و آب در مناطق دور افتاده و غیرقابل دسترس که اندازه‌گیری زمینی ممکن است گران قیمت و خطرناک باشد را فراهم می‌کند (هیو^۸ و همکاران، ۲۰۱۷، ۱). منطقه شمال غرب کشور منطقه‌ای کوهستانی بوده و به ترتیب دارای حداقل و حداکثر ارتفاع ۱۱۸۰ و ۳۰۲۰ از سطح دریا می‌باشد. برف حاصل از بارش‌های زمستانی نقش عمده‌ای در ایجاد جریان‌های فصلی و دائمی برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی و غیر کشاورزی در این منطقه ایفا می‌کند (بیات و همکاران، ۱۳۹۶، ۴۱۱). از طرفی قطعه‌بندی تصاویر به‌طور گسترده به‌عنوان یک گام اساسی در انواع کاربردهای پردازش تصویر می‌باشد (یانگ^۹ و همکاران، ۲۰۲۱، ۱۴۸)؛ که تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دوری از این قاعده مستثنا نیستند. با توجه تغییرات اقلیمی و بارشی و حاکمیت تدریجی اقلیم نیمه بیابانی سرد و گرایش به سمت اقلیم بیابانی در منطقه شمال غرب کشور به‌جای اقلیم برفی، بررسی پدیده آب و منابع تأمین‌کننده آن حائز اهمیت است (رضیئی، ۱۳۹۶، ۱۷). به‌دنبال این تغییرات مشکلاتی از جمله افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند زندگی مردم منطقه را با مشکلاتی مواجه کند. از جمله مناطق کوهستانی برف‌گیر ایران، کوهستان سبلان واقع در شمال غرب کشور می‌باشد. لذا تعیین سطح پوشش برف و سطح آب موجود در این منطقه و مناطق اطراف آن جهت استفاده در پژوهش‌های کارشناسان علوم طبیعی، جغرافیدانان، مهندسان آب و برق ضروری به نظر می‌رسد و سنجش از دور و تصاویر حاصل از آن و شاخص‌های قابل اعمال بر روی این تصاویر به‌عنوان ابزاری کارآمد در این امر محسوب می‌شوند. پژوهشگران در پژوهش‌های قبلی از روش‌های مشابهی برای استخراج پوشش برف و آب در باند مرئی و مادون قرمز استفاده کرده‌اند که به خاطر مشابهت بازتاب طیفی این دو پدیده مشکلاتی در تفکیک آن‌ها از یکدیگر وجود داشته است. چندین فاکتور از جمله کوه، برف، جزء موانعی برای استخراج نقشه پوشش آبی با داده ماهواره‌ای می‌باشند. اگرچه

¹ Thomas

² Parajka

³ Donmez

⁴ snow cover/glaciers

⁵ yan

⁶ Manickam

⁷ Barros

⁸ Hui

⁹ Yang

تحقیقاتی در مورد کم‌رنگ کردن تأثیر این عوامل انجام گرفته ولی توجه کمی به کالیبره کردن شاخص‌های آب و برف در تمایز بدنه آبی و SCG معطوف شده است؛ بنابراین توسعه شاخص جدید آب برای استخراج بدنه آبی با پس‌زمینه برف و شاخص جدید برف برای استخراج SCG با پس‌زمینه آبی ضروری می‌باشد. در مورد این مسئله شاخص‌های NDWI¹⁰ و شاخص NDWI^{NS} در مقایسه با شاخص‌های مطرح و معمول NDSI و NDWI دقت بهتری را نشان می‌دهند (یان و همکاران، ۲۰۲۰، ۳). در مطالعه‌ای گمشادزایی و همکاران (۱۳۹۵) به شناسایی پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های طیفی پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از چند شاخص مهم NDVI¹¹، NDWI، MNDWI¹² و DVW و AWEI¹³ استفاده کردند. با توجه به نتایج این پژوهش، شاخص NDVI به ترتیب با دقت کلی ۹۸، ۹۷ و ۹۹ برای هامون، چیتگر و میانکاله توانایی بهتری در استخراج سطوح آبی نشان داده است. کدخدایی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای به بررسی رواناب حاصل از برف در حوضه سهزاب در قسمت جنوبی سیلان پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از تصاویر سنجنده MODIS¹³ استفاده کرده‌اند و با استفاده از الگوریتم Snow Map بر پایه شاخص NDSI اقدام به استخراج سطح پوشش برف کردند. سیفی و قربانی (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به اهمیت بررسی سطوح برفی و تخمین سطح پوشیده شده از برف کوهستان سهند پرداختند. این پژوهشگران بدین منظور از تصاویر سنجنده OLI¹⁴ و TIRS¹⁵ با قدرت تفکیک به ترتیب ۳۰ و ۹۰ متر استفاده کردند و در ادامه برای استخراج نقشه سطح پوشش برف از الگوریتم‌های NDVI¹⁶، LST و Brightness استفاده کردند که این نتایج می‌تواند جایگزین ایستگاه‌های برف‌سنجی مختلف شود. شجاعی و همکاران (۱۳۹۸) با توجه به بحران آب در مطالعه‌ای به تحلیل تغییرات ذخیره‌گاه‌های برفی در حوضه سراب هلیل رود کرمان پرداختند. بدین منظور آن‌ها از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و شاخص تفاضلی نرمال شده برف (NDSI) استفاده کردند. در مطالعه‌ای که توسط سیفی و فیضی‌زاده (۱۳۹۸) برای برآورد عمق برف با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و آب حاصل از آن انجام شده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و شاخص NDSI و روش طبقه‌بندی شیء‌گرا موفق به برآورد سطح پوشش برف شدند. اصغری و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به ارزیابی شاخص‌های استخراج آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در منطقه گاماسیاب کرمانشاه پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از شاخص‌های NDWI، MNDWI، AWEI-nsh و AWEI-sh برای استخراج پهنه‌های آبی استفاده کردند و در پایان به این نتیجه رسیدند که شاخص AWEI با صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپای ۹۸ درصد بهترین جواب را در بین شاخص‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در مطالعه دیگر اصغری و مدیرزاده (۱۳۹۹) به اهمیت مطالعه پوشش برف اشاره کرده و با استفاده از داده‌های ماهواره sentinel1 با روش تداخل‌سنجی راداری به برآورد سطح و عمق برف

¹⁰ Normalized Difference Vegetation Index

¹¹ modified normalized water difference index

¹² automatic water extraction index

¹³ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

¹⁴ Operational Land Imager

¹⁵ Thermal Infrared Sensor

¹⁶ Land Surface Temperature

شهرستان اردبیل و سرعین پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال Sentinel2 و شاخص NDSI توانستند سطوح برف را استخراج کنند. جی^{۱۷} و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای به بررسی شاخص NDWI برای استخراج پوشش سطحی آبی پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود به تداخل آب با سایه‌ها و مشکل بودن استخراج سطوح آبی در مناطق شهری با استفاده از شاخص NDWI اشاره کردند. در پژوهشی لئو^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۷) اقدام به استخراج خطوط ساحلی در نیقبو چین کردند. آن‌ها با استفاده از شاخص NDWI بر روی تصویر چند طیفی لندست ۸ موفق به انجام این کار شدند. کاوگ^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای اقدام به استخراج پوشش‌های آبی با شاخص‌ها و مقایسه آن‌ها بر روی تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ در رودخانه ولتا نمودند. آن‌ها در این مطالعه از شاخص‌های NDWI، AWEI-nsh، MNDWI و AWEI-sh استفاده کرده‌اند. این پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که شاخص‌های NDWI و MNDWI بر روی تصویر لندست و شاخص‌های AWEI-nsh و AWEI-sh بر روی تصاویر سنتینل ۲ بهتر عمل می‌کنند. در پژوهشی واراده^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۹) به اهمیت تغذیه منابع آبی نظیر رودخانه‌ها از سطوح برفی اشاره کرده و به عمق سنجی برف در منطقه مهم هیمالیا هند با اعمال تصحیحات وزن‌دار در روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند و بدین منظور برای برآورد اولیه سطح برف از شاخص NDSI استفاده کردند. یان و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای از شاخص‌های اصلاح‌شده آب و برف برای استخراج پوشش دریاچه، برف / یخ در سه ناحیه متفاوت از فلات تبت استفاده کردند. در این مطالعه از تصاویر سنجنده OLI، ETM+ و TM استفاده شده است. پژوهشگران در این پژوهش دو شاخص جدید بانام‌های NDWI_{NS} برای شناسایی آب دریاچه و NDSI_{NW} برای شناسایی برف و یخ پیشنهاد دادند که به ترتیب با ضریب کلی ۹۴/۶، ۹۷ و ۹۴/۹ و ۹۷ درصد، توانایی این شاخص‌ها را در به تصویر کشیدن نقشه آب و برف و یخ در مقایسه با روش‌های قبلی استفاده شده نظیر NDSI و MNDWI به اثبات می‌رساند.

هدف از این مطالعه بررسی پوشش سطحی برف و آب با استفاده از شاخص‌های طیفی NDWI و NDSI و مقایسه آن‌ها با شاخص‌های NDWI_{NS} و NDSI_{NW} جهت تفکیک این دو پدیده از یکدیگر و انتخاب بهترین شاخص از میان آن‌ها است. نوآوری پژوهش حاضر استفاده از شاخص‌های جدید NDWI_{NS} و NDSI_{NW} مطرح‌شده توسطیان و همکاران (۲۰۲۰) جهت استخراج سطح پوشش برفی و عوارض آبی است.

¹⁷ Ji

¹⁸ Liu

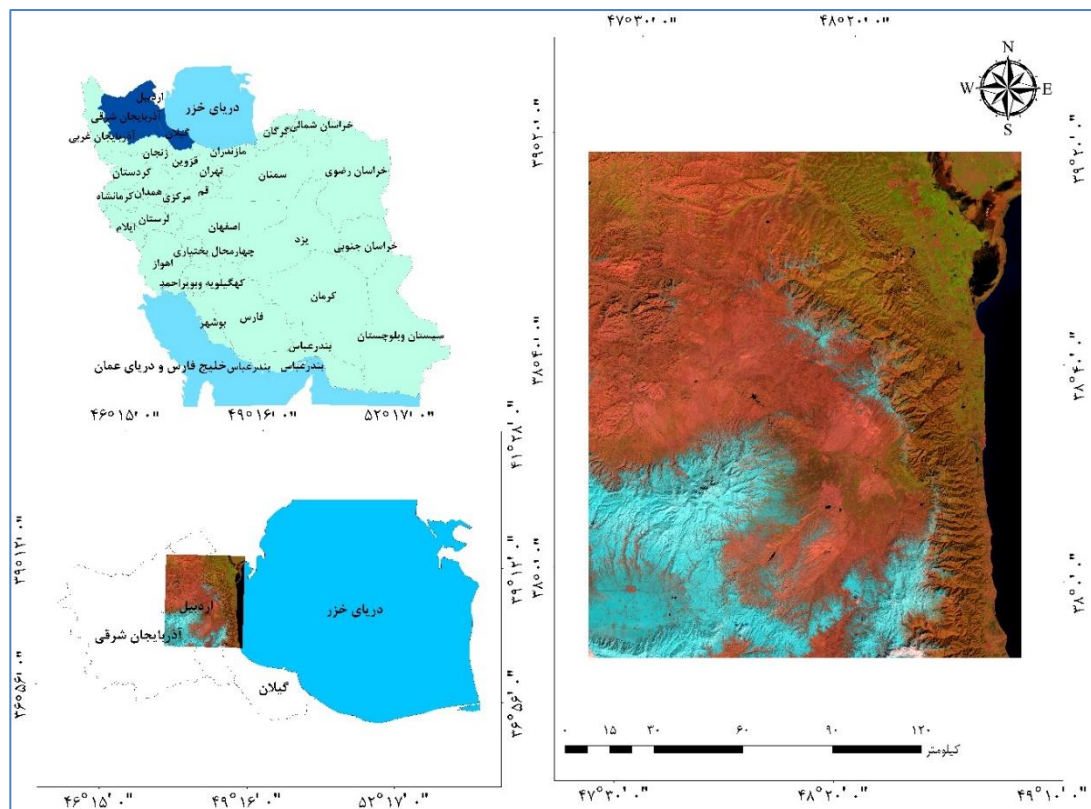
¹⁹ Kwang

²⁰ Varade

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

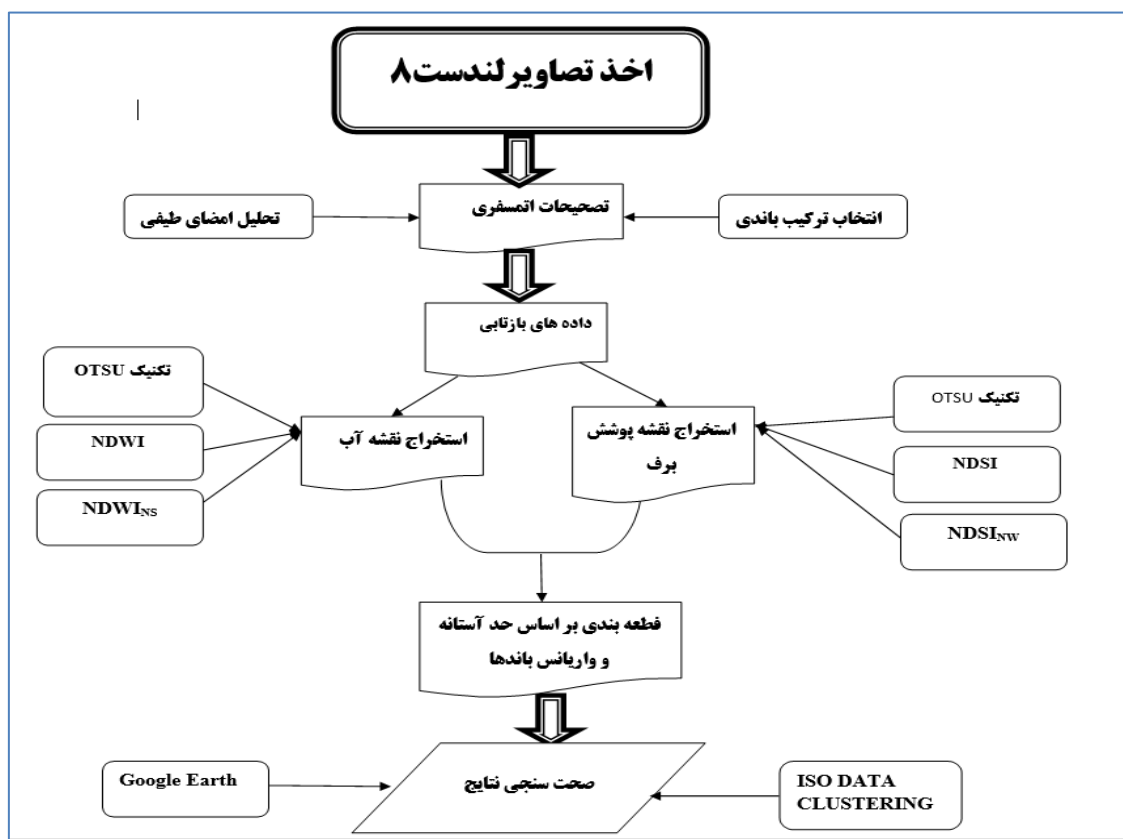
محدوده مورد مطالعه شامل کوهستان سبلان واقع در استان اردبیل و بخشی از استان آذربایجان شرقی به دلیل هم‌جواری با دامنه سبلان، همچنین قسمتی از سواحل دریای خزر واقع در استان گیلان (جهت حضور عارضه آبی در منطقه) است. بلندترین نقطه منطقه مورد مطالعه مربوط به کوه سبلان با ارتفاع ۴۸۱۱ متر از سطح دریا واقع در ۳۵ کیلومتری غرب شهر اردبیل و ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مشکین شهر می‌باشد. این کوه در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی واقع شده است و به‌عنوان سومین قله بلند ایران پس از دماوند و علم‌کوه به شمار می‌رود. پایین‌ترین نقطه منطقه نیز مربوط به قسمت‌هایی از سواحل دریای خزر با ارتفاع تقریباً ۶۰۰ متر واقع در استان گیلان با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۸۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی می‌باشد. همچنین شهرستان سراب واقع در شرق استان آذربایجان شرقی با ارتفاع تقریباً ۱۶۵۰ متر از سطح دریا با طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۹۰ دقیقه شمالی جزو منطقه مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۱).



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته در تهیه نقشه‌های آب و SCG وجود خطاهایی مانند ابر و سایه و... می‌تواند پاسخ‌های طیفی تصاویر سنجش‌ازدوری را تحت تأثیر قرارداد؛ بنابراین بهتر است تصاویری با حداقل خطا انتخاب شود. در این پژوهش تصویر لندست OLI برای تشخیص عملکرد شاخص‌های NDWI، NDSI، NDWI_{NS} و NDSI_{NW} استفاده شده است. تصویر لندست ۸ به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا برای سال ۲۰۱۹ با گذر ۱۶۸ و ردیف ۳۳ و ۳۴ اخذ و سعی شده از تصویر ماه فوریه ۲۰۱۹ به دلیل پربرف بودن این ماه استفاده شود. برای دستیابی به دقت بالاتر از تفسیر بصری تصاویر Google Earth نیز استفاده شده است. شکل ۲ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۲: روند کلی پژوهش

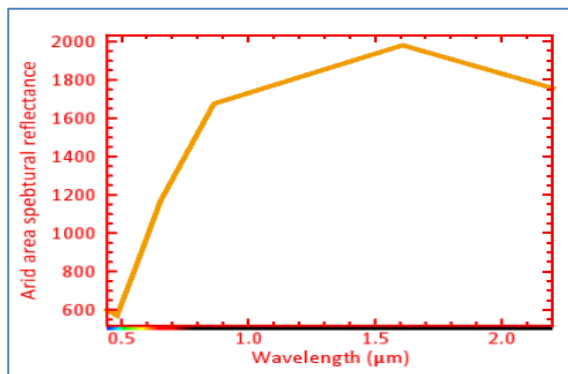
پیش‌پردازش تصاویر

تصاویر اخذشده پس از حصول اطمینان از عدم وجود خطاهای رایج، در نرم‌افزار ENVI 5.3 موزاییک شده، سپس قسمتی از تصویر بر اساس پژوهش که نیازمند وجود هم‌زمان عوارض مختلف آبی و برف بود برش داده شد و تصحیحات اتمسفری با محاسبه مقدار رادیانس و اعمال روش FLAASH²¹ بر روی آن‌ها انجام‌گرفته است.

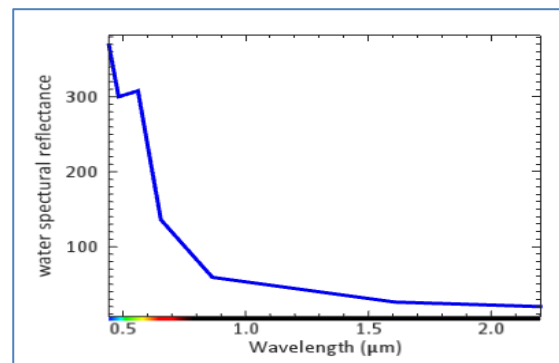
²¹ Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes

رفتار طیفی آب و SCG

بازتاب طیفی پدیده آب و SCG با استفاده از مدل FLAASH بر مبنای تصویر چند طیفی لندست ۸ بررسی شده است. آن چیزی که مشخص است این است که بازتاب پهنه آبی و SCG روند کاهشی و بازتاب زمین بایر روند افزایشی از باند مرئی به سمت باند مادون قرمز نشان می‌دهد (شکل‌های ۳، ۴، ۵). مطالعات قبلی از این ویژگی و با استفاده از نادیده گرفتن پس‌زمینه تصویر برای تشخیص دو پدیده آب و SCG استفاده می‌کردند. تفاوت‌های جزئی بین بازتاب طیفی این دو پدیده بررسی شده است که این تفاوت‌های جزئی عبارت‌اند از: (۱) بازتاب طیفی عوارض آبی از باند سبز به سمت مادون قرمز روند کاهشی، در حالی که بازتاب SCG حالت پایدار یا نوسانی از باند سبز به سمت باند مادون قرمز نشان می‌دهد؛ (۲) بازتاب طیفی SCG به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد درحالی که بازتاب پهنه آبی حالت پایدار یا کاهش ناچیزی را از باند مادون قرمز نزدیک به سمت مادون قرمز کوتاه نشان می‌دهد (یان و همکاران، ۲۰۲۰، ۴).



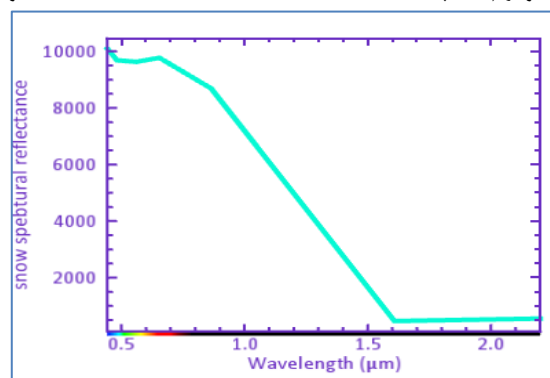
مأخذ: نگارندگان



مأخذ: نگارندگان

شکل ۴: هیستوگرام پدیده بایر

شکل ۳: هیستوگرام‌های پدیده‌های آب



مأخذ: نگارندگان

شکل ۵: هیستوگرام‌های پدیده برف

اعمال شاخص‌ها

چهار شاخص NDWI، NDSI، NDWI_{NS} و NDSI_{NW} بر روی تصویر اعمال شده و عوارض به سه گروه آب، برف و بایر در بررسی شاخص‌های NDWI و NDSI_{NW} و سه کلاس آب، برف، بایر در شاخص‌های NDWI_{NS} و NDWI

طبقه‌بندی شدند. سپس برای صحت‌سنجی نتایج، روش طبقه‌بندی نظارت‌نشده ISO-data Clustering بر روی نتایج شاخص‌ها انجام گرفته و با کلاس‌های اخذشده از شاخص‌ها با استفاده از ماتریس خطا^{۲۲} مقایسه شد.

شاخص تفاضلی نرمال شده آب با صرف‌نظر از SCG (NDWI_{NS}):

در رابطه با استخراج پهنه آبی با توجه اینکه یان و همکاران (۲۰۲۰) شاخص NDWI_{NS} را شاخص خوبی در استخراج انواع عوارض آبی با محدود کردن پهنه برفی معرفی کرده‌اند. در این مطالعه ما نیز عملکرد شاخص NDWI_{NS} را بررسی کرده‌ایم. در شاخص NDWI_{NS} تفاضل نرمال شده بین باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک در مورد عوارض آبی بالا و در مورد عارضه برف و یخ پایین است؛ بنابراین می‌تواند توانایی بالایی در استخراج عارضه آبی با محدود کردن پهنه برفی در منطقه‌ای با عوارض مختلف آبی و با حضور برف داشته باشد. با توجه به اینکه انعکاس طیفی آب در باند مادون قرمز نزدیک ناچیز و انعکاس طیفی SCG در همین باند بالاتر از ۰.۵ است، تفاضل دو برابری باند مادون قرمز نزدیک از بازتاب باند سبز، قدرت شاخص را در استخراج آب بالا برده و مقدار شاخص SCG را بیشتر کاهش می‌دهد؛ بنابراین شاخص NDWI_{NS} برای استخراج عوارض آبی نويز دار از SCG طراحی شده است (رابطه ۱) (یان و همکاران، ۲۰۲۰، ۶).

$$NDWI_{ns} = (p_{GREEN} - \alpha \times p_{NIR}) / (p_{green} + p_{NIR}) \quad (1)$$

p_{GREEN} : انعکاس طیفی باند سبز؛

p_{NIR} : انعکاس طیفی باند مادون قرمز نزدیک؛

α : یک پارامتر تجربی بوده که بر اساس منطقه مورد مطالعه مقداردهی می‌شود، در اینجا مقدار ۲ در نظر گرفته شده است.

شاخص نرمال شده تفاضلی آب (NDWI):

اولین شاخص پیشنهادی استخراج آب است. این شاخص توسط مک فیتز^{۲۳} در سال ۱۹۹۶ پیشنهاد شده است تا آب را در تصاویر و داده‌های سنجش‌ازدوری آشکارسازی کند. وی از اختلاف انعکاسی آب در باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و سبز برای این منظور استفاده کرد. با توجه به اینکه آب در باند سبز دارای انعکاس بالا و در باند مادون قرمز نزدیک دارای انعکاس پایین است شاخص NDWI به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (اصغری و همکاران ۱۳۹۹، ۵۸)

$$NDWI = (p_{GREEN} - p_{NIR}) / (p_{GREEN} + p_{NIR}) \quad (2)$$

p_{GREEN} : انعکاس طیفی باند سبز؛

p_{NIR} : انعکاس باند مادون قرمز نزدیک.

²² Confusion matrix

²³ Mcfeeters

شاخص تفاضلی نرمال شده SCG با صرف نظر از آب (NDSI_{NW}):

تفاضل بین باندهای مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه در ناحیه SCG بالا و در مناطق آبی پایین می ماند. نرمال سازی تفاضل باند مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه مقدار شاخص را برای مناطق SCG با سطح بالا و برای مناطق آبی با سطح پایین حفظ می کند. برای کاهش چشمگیر تأثیر آب در این شاخص مقدار مثبت (۰/۰۵) از تفاضل مقدار بین باند مادون قرمز نزدیک و باند مادون قرمز کوتاه (SWIR1) کم می شود؛ بنابراین شاخص NDSI_{NW} برای استخراج SCG و نادیده گرفتن نویز حاصل از عوارض آبی استفاده می شود (رابطه ۳) (یان و همکاران، ۲۰۲۰، ۶).

$$NDSI_{nw} = (p_{NIR} - p_{SWIR1} - b) / (p_{NIR} + p_{SWIR1}) \quad (3)$$

p_{NIR} : انعکاس باند مادون قرمز نزدیک؛

p_{SWIR1} : انعکاس طیفی باند مادون قرمز کوتاه؛

b : یک پارامتر تجربی بوده که بر اساس منطقه مورد مطالعه مقداردهی می شود، در اینجا مقدار ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. البته با توجه به منطقه مورد مطالعه می توان از مقدار b صرف نظر کرد.

شاخص نرمال شده تفاضلی برف (NDSI / MNDWI):

شاخص NDSI بر مبنای نرمال سازی تفاضل باندهای سبز و SWIR1 بر روی تصاویر مودیس پیشنهاد شد (هال^{۲۴} و همکاران، ۱۹۹۵، ۴). مطابق با فیزیک سنجش اوردور، NDSI بر مبنای این واقعیت است که بازتاب طیفی برف در باند مرئی بیشتر از بازتاب آن در محدوده مادون قرمز میانی است. بعد از یک دهه شاخص MNDW از ترکیب این دو باند برای استخراج عوارض آبی بر مبنای داده های لندست استفاده کرد (ژو، ۲۰۰۶، ۳۲۰۷). شاخص های NDSI و MNDWI جزو مطرح ترین روش ها برای پیاده سازی نقشه های آبی و SCG می باشند (رابطه ۴).

$$NDSI/MNDWI = (p_{GREEN} - p_{SWIR1}) / (p_{GREEN} + p_{SWIR1}) \quad (4)$$

p_{GREEN} : انعکاس طیفی باند سبز؛

p_{SWIR1} : انعکاس باند مادون قرمز کوتاه.

آستانه گذاری تصویر با استفاده از تکنیک Otsu:

وجه تمایز و برتری شاخص های متفاوت در پایداری آستانه ها برای تفکیک پدیده مورد نظر در مناطق و زمان های گوناگون است. هر چه این آستانه ها پایدارتر باشند، استفاده از شاخص شمول بیشتری می یابد و قابلیت کشف تغییرات افزایش پیدا می کند (اصغری و همکاران، ۱۳۹۹، ۵۵). آستانه گذاری فاکتور مهمی در استخراج پوشش اراضی با استفاده از روش های مبتنی بر شاخص است. با وجود مقادیر حد آستانه پیش فرض شاخص ها در استخراج عوارض، این نوع از حد

آستانه‌ها می‌تواند در نتیجه خروجی نقشه‌ها تأثیرگذار باشد (یان و همکاران، ۲۰۲۰، ۳)؛ بنابراین جهت بررسی دقیق‌تر پدیده برف و آب در مطالعه حاضر از طبقه‌بندی باینری تصویر نیز با استفاده از روش Otsu (۱۹۷۹) که به‌طور گسترده در جداسازی پس‌زمینه از پیش‌زمینه کاربرد دارد، در نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. روش Otsu یکی از تکنیک‌های آستانه‌گذاری شناخته شده و کاربردی تصویر است (اوتسو، ۱۹۷۹) (بهاندراری و همکاران، ۲۰۲۰، ۲۰۱). ایده اصلی این رویکرد بر مبنای جداسازی پیکسل‌های تصویر به دو گروه تعداد پیکسل‌ها (ω_0) و متوسط سطح خاکستری (μ_0) می‌باشد. به‌طور مشابه پس‌زمینه تصویر نیز شامل دو پارامتر ω_1 و μ_1 است. از این‌رو میانگین کل سطح خاکستری تصویر به صورت زیر تعریف می‌شود رابطه ۵ (هانگ، ۲۰۱۸، ۳). رابطه ۶ تابع مربوط به باینری‌زه کردن بهینه تصویر است (هانگ، ۲۰۱۸، ۳).

$$\mu = \omega_0(t)\mu(t) + \omega_1(t)\mu(t) \quad (5)$$

t: سطح خاکستری تصویر؛

$$Arg \max f_s(t) = \omega_0(t)(\mu_0(t) - \mu)^2 + \omega_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 \quad (6)$$

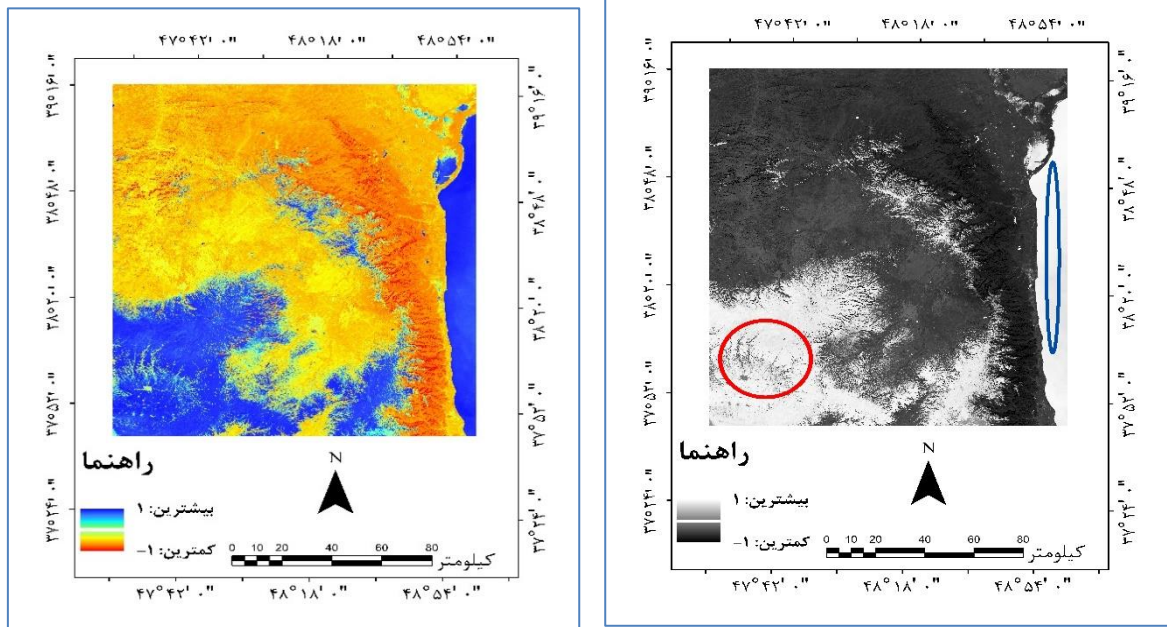
مقدار بالای سطح خاکستری مربوط به حداکثر مقدار f_s به‌عنوان مقدار حد آستانه‌گذاری برای باینری کردن تصویر انتخاب می‌شود. در واقع سمت راست رابطه ۶ مربوط به واریانس بین کلاسی می‌باشد (به‌طور مثال برف با پس‌زمینه آب یا حالت برعکس). الگوریتم Otsu به دنبال حد آستانه بهینه t می‌گردد تا واریانس بین کلاسی را پیشینه کند (صادقی و همکاران، ۱۳۹۳، ۱۹). اگر هیستوگرام سطح خاکستری پدیده‌های تصویر دو قله قابل تفکیک داشته باشد، روش Otsu می‌تواند به راحتی مقدار آستانه بهینه بین دو قله که حاصل از واریانس بین کلاسی و حداقل واریانس درون کلاسی است را تعیین کند (خداسکار و همکاران، ۲۰۱۸، ۲).

بحث و یافته‌ها

تهیه نقشه پوشش برف

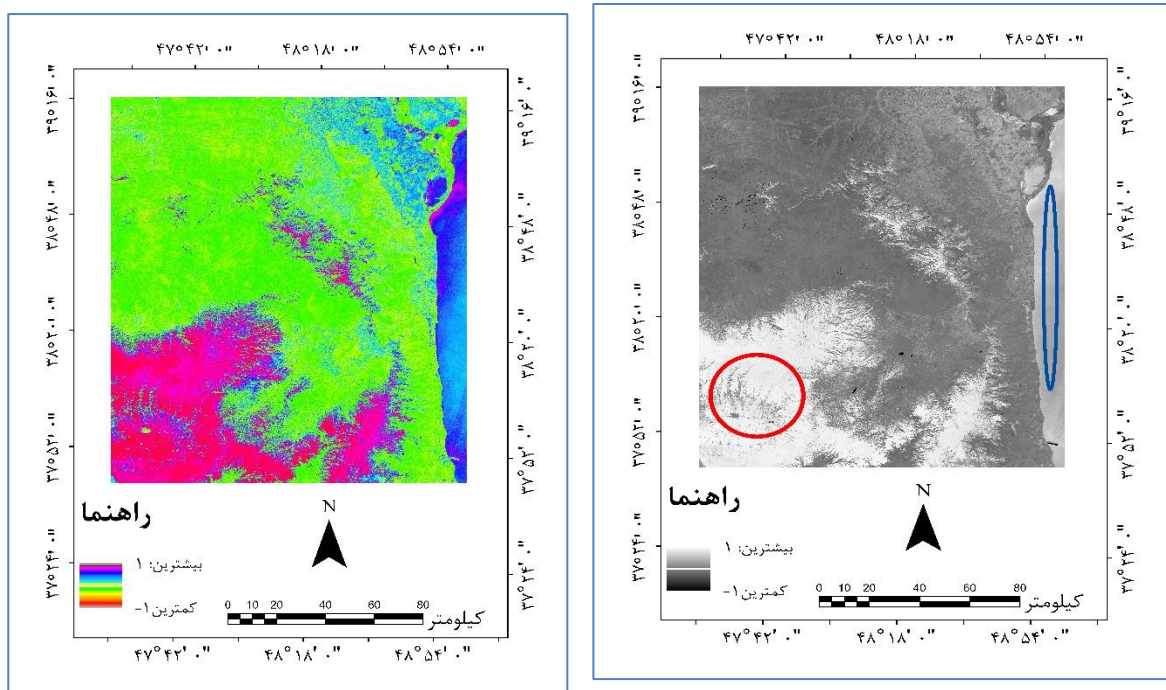
با توجه به نتایج اعمال شاخص‌ها جهت استخراج پهنه برفی، در نقشه مربوط به شاخص NDSI هر دو عارضه آب و برف مقادیر مثبت و تن سفیدرنگی را به خاطر تشابه انعکاس آن‌ها در باندهای سبز و مادون قرمز کوتاه نشان می‌دهند (شکل ۶). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با اعمال شاخص NDSI هر دو پدیده آب و برف به‌عنوان عارضه یکسان استخراج شده‌اند و این می‌تواند در مطالعات نظیر استخراج پوشش برفی و محاسبه دقیق مساحت تحت پوشش برف مشکل‌ساز بوده و باعث خطا در محاسبات شود. در مقابل شاخص $NDSI_{NW}$ به دلیل تفاوت باندهای مادون قرمز کوتاه (SWIR1) و مادون قرمز نزدیک (NIR) در مناطق برفی نسبت به مناطق آبی، توانسته با محدود کردن پهنه آبی، پهنه برفی را به خوبی استخراج کند. شاخص $NDSI_{NW}$ مقادیر مثبت و بزرگ‌تر از ۰/۵ را به‌عنوان SCG نشان می‌دهد (شکل ۷). دلیل این امر کاهش چشمگیر بازتاب SCG از باند مادون قرمز نزدیک به سمت مادون قرمز کوتاه است.

درحالی که بازتاب آب در محدوده کوچکتر از ۰/۵ است. علاوه بر این تصویر $NDSI_{NW}$ مقادیر منفی را به عنوان پوشش خاک یا مناطق بایر استخراج می کند.



مآخذ: نگارندگان

شکل ۶: نقشه شاخص NDSI

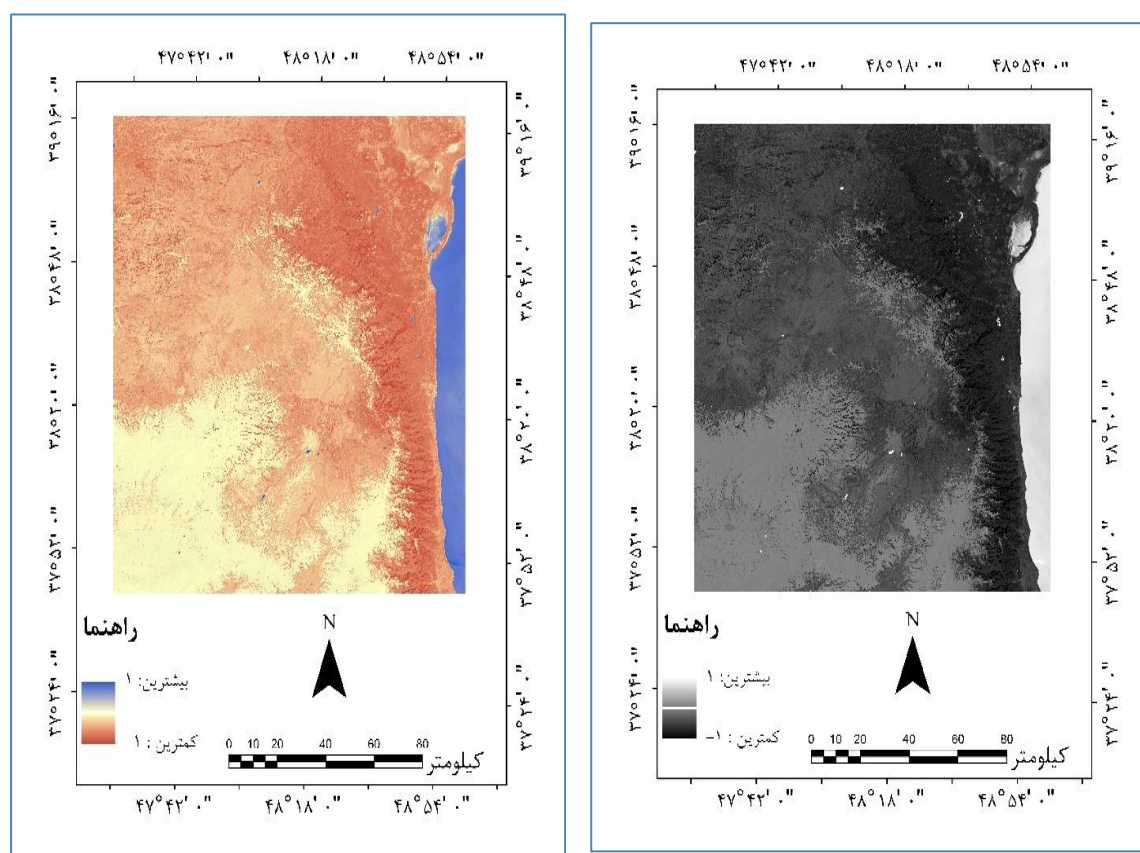


مآخذ: نگارندگان

شکل ۷: نقشه شاخص $NDSI_{NW}$

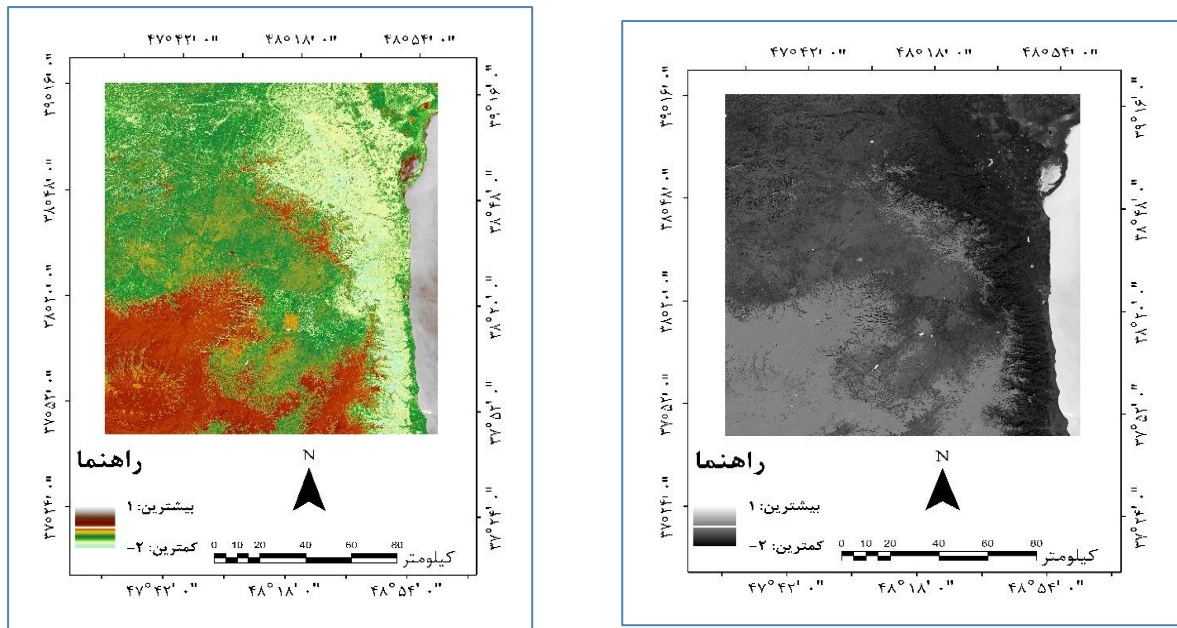
تهیه نقشه عوارض آبی

بررسی نتایج اعمال شاخص‌های NDWI و NDWI_{INS} بر روی تصویر نشان می‌دهد (شکل ۸ و ۹). شاخص NDWI_{INS} استخراج عوارض آبی را بهبود بخشیده و پوشش برف را کاملاً نادیده گرفته است. دلیل این امر این است که بازتاب عارضه آبی کاهش پیوسته و بازتاب SCG حالت پایدار یا نوسان کم از باند سبز به سمت باند مادون قرمز میانی نشان می‌دهند. علاوه بر این NDWI_{INS} مقادیر منفی کمتر از $-0/5$ را به عنوان زمین بایر در نظر می‌گیرد. در حالت کلی شاخص NDWI_{INS} عملکرد بهتری در مناطقی که از عوارض آبی گوناگون تشکیل شده‌اند با استفاده از ترکیب‌های باندهای مادون قرمز نزدیک و سبز می‌تواند داشته باشد.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۸: نقشه شاخص NDWI

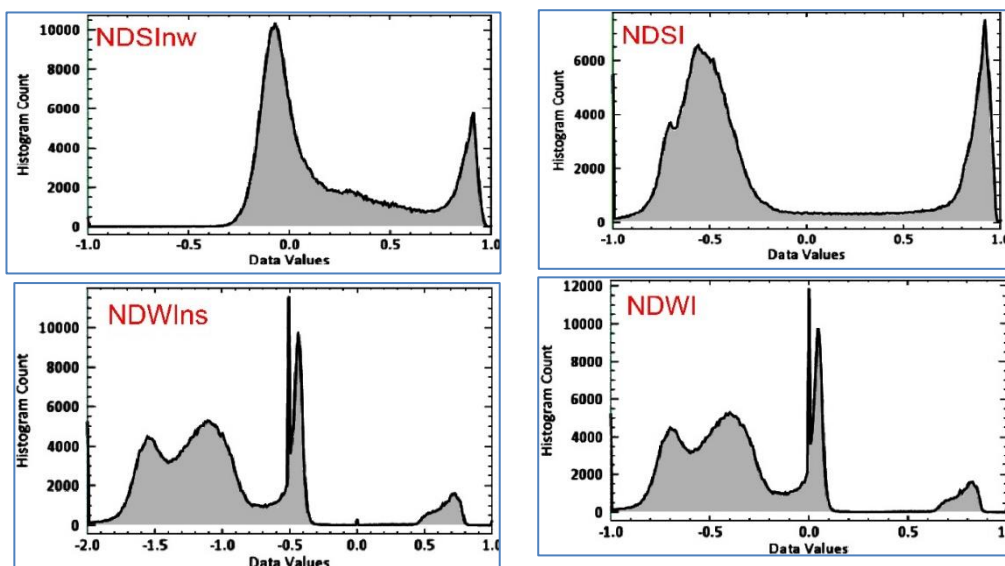


مآخذ: نگارندگان

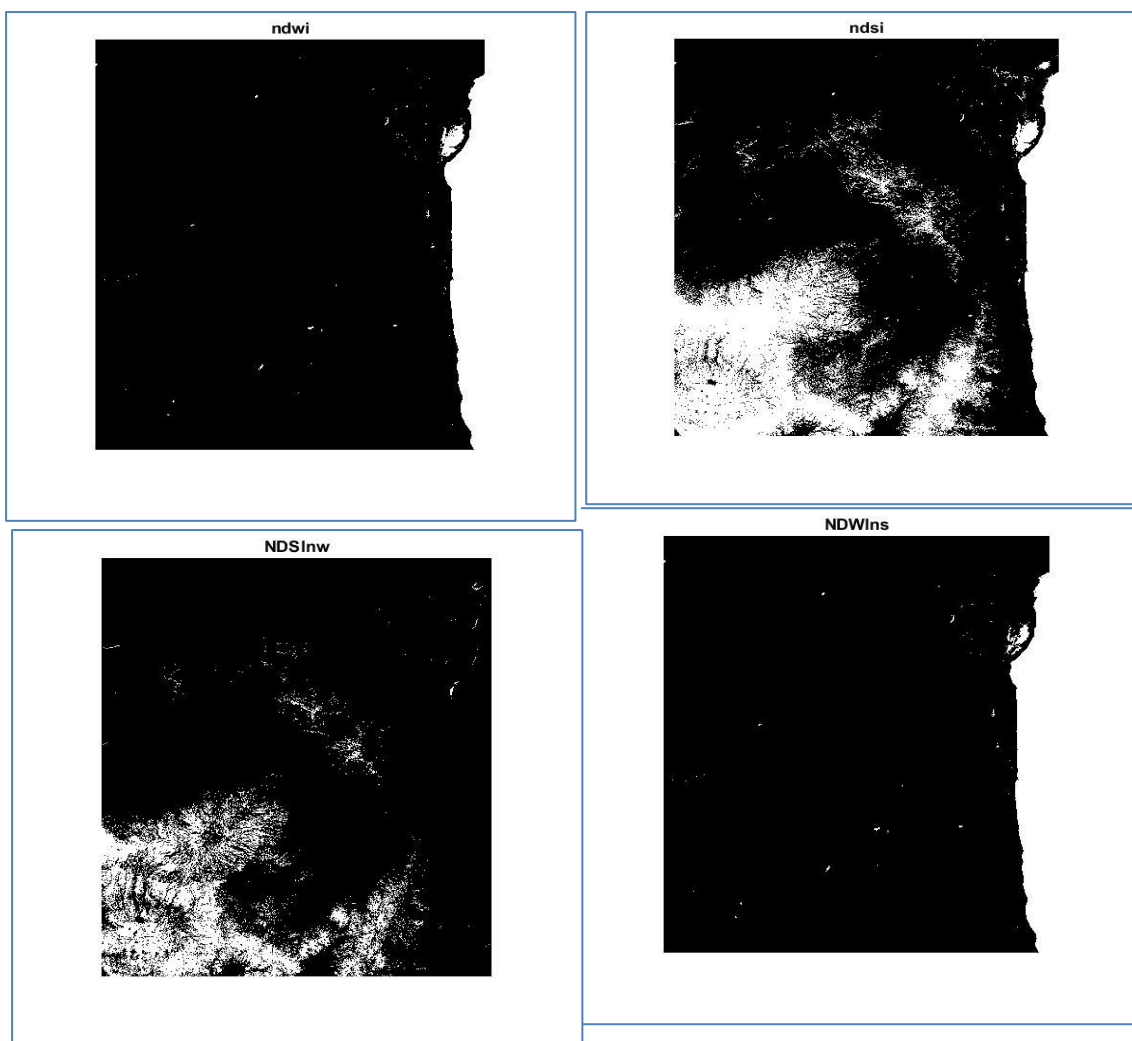
شکل ۹: نقشه شاخص NDWI_{NS}

تفکیک پدیده‌ها با استفاده از حد آستانه و واریانس باندهای حاصل از اجرای شاخص‌ها

آستانه‌های هر شاخص با آزمون و خطا و مقایسه با نقشه‌های مرجع و همچنین تفسیر بصری تعیین می‌شوند (اصغری و همکاران، ۱۳۹۹، ۶۰). شکل ۱۰ هیستوگرام اعمال شاخص بر روی تصویر منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نتایج اجرای روش آستانه گذاری Otsu را نشان می‌دهد. همان‌طور که از تصاویر مشخص است، در نتیجه اعمال تکنیک Otsu شاخص‌های NDWI_{NS} و NDSI_{NS} عملکرد بهتری در استخراج عوارض آبی و برفی نشان دادند.



شکل ۱۰: حد آستانه‌های شاخص‌های اجرا شده



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱۱. نتیجه اعمال روش باینری OTSU

صحت‌سنجی نتایج اعمال شاخص‌ها

به دست آوردن داده مرجع به خاطر تغییر سریع در پهنه‌های آبی ممکن نیست. راه حل معقول استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک مکانی بالا هم‌زمان با تصویر لندست می‌باشد. با توجه به عدم امکان دسترسی به تصاویر با قدرت تفکیک بالا و مقایسه آن‌ها با نتیجه اعمال شاخص در این مطالعه از روش طبقه‌بندی ISODATA Clustering با کلاس آب و برف و بایر برای شاخص‌های NDWI و NDSI و سه کلاس آب، برف و بایر برای شاخص‌های NDWI_{INS} و NDSI_{INW} استفاده شده است. سپس نتیجه طبقه‌بندی با کلاس‌بندی شاخص‌ها با استفاده از گزینه Confusion Matrix مقایسه شده و ضریب کاپا و صحت کلی برای هر شاخص به دست آمد. البته نکته قابل‌ذکر این است که این نوع طبقه‌بندی جهت ارزیابی نتایج اعمال شاخص‌های جدید (NDWI_{INS} و NDSI_{INW}) در بدترین شرایط

(طبقه‌بندی نظارت نشده) می‌باشد. جدول ۱ مقادیر صحت‌سنجی شاخص‌ها را نشان می‌دهد. همچنین برای حصول اطمینان و دقت بالاتر از تفسیر بصری در پایگاه Google earth استفاده شده است.

جدول ۱: ضرایب کاپا و صحت کلی در تصاویر به‌دست‌آمده از شاخص‌های پوشش برف و آب

شاخص پوشش برف	ضریب صحت کلی	ضریب کاپا
NDSI	۸۵	۰/۷۱
NDWI	۹۸	۰/۹۸
NDWINS	۱۰۰	۱
NDSINW	۹۷	۰/۹۴

مآخذ نگارندگان

نتیجه‌گیری

دقت و پاسخ‌های طیفی روش‌های مبتنی بر شاخص در درجه اول به کیفیت داده سنجش‌ازدوری بستگی دارد. در مطالعه حاضر از چهار شاخص NDSI، NDWI، NDWI_{NS} و NDSI_{NW} بر مبنای ترکیب باندهای ایتیکال بر روی تصویر لندست ۸ در منطقه‌ای با حضور عارضه برف و آب استفاده شده است. با توجه به اجرای روش باینری Otsu و جداسازی پس‌زمینه از پیش‌زمینه و صحت‌سنجی نتایج با استفاده از طبقه‌بندی ISO Data Clustering و بررسی نقشه‌ها، شاخص‌های NDSI_{NW} و NDWI_{NS} نسبت به شاخص‌های NDSI و NDWI عملکرد بهتری در استخراج عوارض برفی و آبی نشان دادند. نتایج حاصل در ارتباط با صحت سنجی نتایج با مطالعه لئو و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. طبق نتایج پژوهش، شاخص‌های NDSI_{NW} و NDWI_{NS} به ترتیب می‌توانند پیشنهاد خوبی برای استخراج SCG با حذف پس‌زمینه عوارض آبی و استخراج عوارض آبی با حذف پس‌زمینه برفی باشند که نتایج به دست آمده با پژوهشیان و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. به‌طوری‌که این پژوهشگران شاخص‌های NDWI_{NS} و NDSI_{NW} را مطرح کرده و به توانایی بالای این شاخص‌ها در استخراج پدیده‌های برف و آب و انواع عارضه‌های آبی اشاره کرده‌اند و به محدودیت شاخص NDSI در استخراج عارضه برف به دلیل عدم توانایی در محدود کردن عارضه آبی و محدودیت نسبی شاخص NDWI_{NS} در تشخیص انواع عارضه‌های آبی اشاره کرده‌اند. این پژوهشگران همچنین روش قطعه‌بندی Otsu را روشی مناسب برای آستانه گذاری و بازسازی عوارض معرفی کرده‌اند. دو شاخص مطرح شده در این پژوهش، فرصت مناسبی برای مطالعه و استخراج عوارض آبی و SCG در مناطقی با حضور هر دو عارضه، جهت تفکیک آن‌ها می‌تواند باشد. استفاده از شاخص‌های استخراج عوارض آبی و برف و یخ و به‌ویژه NDWI_{NS} و NDSI_{NW} می‌تواند به درک بهتر چرخه هیدرولوژی و مطالعه منابع آبی نظیر یخچال‌ها و انواع عوارض آبی و پاسخ آن‌ها به تغییرات اقلیم کمک کند. خاطرنشان می‌شود جهت مطالعه دقیق‌تر و استخراج سطح پوشش برفی و عوارض مختلف آب تنها اعمال شاخص‌ها و استفاده از حد آستانه آن‌ها و واریانس باندها نمی‌تواند کافی باشد و نیاز به بررسی‌های بیشتر از جمله مطالعه پوشش‌های اطراف بسترهای آبی به‌ویژه در مناطقی با شوری ساحل می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از روش‌های ترکیبی شامل

داده‌های راداری و اپتیک و مدل رقومی ارتفاع و همچنین نقشه دمای سطح زمین جهت تهیه نقشه پدیده‌های برف و آب استفاده شود. همچنین اعمال روش‌های مطرح شده در مناطق مختلف با توپوگرافی و موقعیت‌های مختلف پیشنهاد می‌شود.

منابع

- ۱- اصغری سراسکانرود، صیاد، جلیلیان، روح اله، پیروزی نژاد، نوشین، مددی، عقیل، یادگاری، میلاد (۱۳۹۹): ارزیابی شاخص‌های استخراج آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (مطالعه موردی: رودخانه گاماسیاب کرمانشاه) نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره بیستم، شماره پنجم، صص ۷۰-۵۳.
- ۲- اصغری سراسکانرود، صیاد، مدیرزاده، ریحانه (۱۳۹۹): برآورد تغییرات عمق برف در سطح شهرستان اردبیل و سرعت با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel با روش تداخل سنجی راداری، نشریه تحقیقات منابع آب ایران، سال شانزدهم، شماره یک، صص ۴۰۷-۳۹۴.
- ۳- بیات ورکشی، مریم، ایلدرومی، علیرضا، نوری، حمید، زارع ابیانه، حمید (۱۳۹۶): برآورد مشخصه‌های برف به روش موجک و زمین‌آمار (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز شمال غرب کشور)، نشریه پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، دوره چهل‌ونهم، شماره سه، صص ۴۰۹-۴۲۲.
- ۴- رضیئی، طیب (۱۳۹۶): شناسایی رژیم‌های دمایی ایران با استفاده از روش‌های چند متغیره، مجله ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۱، شماره ۲، صص ۳۵-۱۵.
- ۵- زینالی، بتول؛ قلعه، احسان؛ صفری، شیوا (۱۴۰۰): استخراج مساحت تحت پوشش برف کوهستان سیلان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست به روش طبقه‌بندی شیء‌گرا، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۸، شماره ۲۶، صص ۷۹-۹۷.
- ۶- سیفی، هوشنگ؛ فیضی زاده، بختیار (۱۳۹۸): کاربرد روش تداخل سنجی راداری و تصاویر سنجش از دوری رادار در برآورد عمق برف و آب قابل استحصال از آن در حوضه آبریز یامچی، تحقیقات منابع آب ایران، سال پانزدهم، شماره یک، صص ۳۵۵-۳۴۱.
- ۷- سیفی، هوشنگ؛ قربانی، اسماعیل (۱۳۹۸): برآورد سطح پوشش برف از طریق تکنیک‌های شیء‌گرا با استفاده از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS مطالعه موردی: کوهستان سهند، فصل‌نامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره بیست و هشت، شماره صد و نه صص ۹۱-۷۶.
- ۸- شجاعی اناری، مهلا، خبازی، مصطفی، کریمی، صادق (۱۳۹۸): تحلیل تغییرات ذخیره‌گاه‌های برفی به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت کم‌آبی (مطالعه موردی: منطقه سراب هلیل رود-استان کرمان)، فصل‌نامه علمی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره نه شماره سی‌وشش، صص ۱۸۴-۱۶۷.
- ۹- کدخدایی، سکینه؛ جهانبخش اصل، سعید؛ ولی زاده کامران، خلیل (۱۳۹۵): برآورد رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از مدل *SRTM* (مطالعه موردی: حوضه آبریز سهزاب)، نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره بیست و چهار، شماره هفتاد و یک، صص ۳۳۷-۳۱۹.
- ۱۰- گمشادزایی، محمدحسین؛ رحیم زادگان، مجید (۱۳۹۵): بررسی و ارزیابی شاخص‌های طیفی استخراج نقشه سطح آب از تصاویر ماهواره‌ای Landsat، ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، سنج،

- ۱۱- صادقی، وحید، عبادی، حمید، صاحبی، محمود رضا، مقصودی، یاسر، فرنود احمدی، فرشید (۱۳۹۳). آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه مبتنی بر حد آستانه گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات. *سنجش از دور و GIS ایران*، دوره ۶ شماره ۱، صص ۳۴-۱۷.
- 12- A. Thomas, C. Reager, J. Famiglietti, M. Rodell (2014): A GRACE-Based Water Storage Deficit Approach For Hydrological Drought Characterization. *Geophysical Research Letters*, 41(5), Pp 1537–1545.
- 13- A. Bhandari, A. Ghosh, I. Vinod Kumar (2020): A Local Contrast Fusion Based 3D Otsu Algorithm For Multilevel Image Segmentation. *JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA*, 7(1), Pp. 200- 2013.
- 14- C. Kwang, E M. Osei Jnr, A S. Amoah (2018): Comparing Of Landsat 8 And Sentinel 2A Using Water Extraction Indexes Over Volta River, *Journal Of Geography And Geology*, Vol. 10, No. 1, PP 1-7.
- 15- C. Donmez, S. Çiçekli, A. Cilek, A. Arslan (2020): Mapping Snow Cover Using Landsat Data: Toward A Fine-Resolution Water-Resistant Snow Index. *Meteorology And Atmospheric Physics*. 47, Pp 243-252.
- 16- D. Varade, A K. Maurya, O. Dikshit, G. Singh, S. Manickam(2019): Snow Depth In Dhundi: An Estimate Based On Weighted Bias Corrected Differential Phase Observations Of Dual Polarimetric Bi-Temporal Sentinel-1 Data *Journal Of Remote Sensing*, <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1698076>
- 17- D. Yan, C. Huang, N. Ma, Y. Zhang (2020): Improved Landsat-Based Water And Snow Indices For Extracting Lake And Snow Cover/Glacier In The Tibetan Plateau, *Journal Water*, 12, 1339, Pp 1-16.
- 18- D. Hall, G. Riggs, V. Salomonson, (1995): Development Of Methods For Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data. *Remote Sensing Of Environment*, 54, Pp127–140.
- 19- J. Parajka, L. Holko, Z. Kostka (2001): Distributed Modelling Of Snow Water Equivalent - Coupling A Snow Accumulation And Melt Model And GIS. *Institute Of Hydrology. Slovak Academy Of Sciences*, 14, PP 86-102.
- 20- L. Ji, L. Zhang, B. Wylie (2009): Analysis Of Dynamic Thresholds For The Normalized Difference Water Index, *Journal Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 75, No. 11, Pp 1307-1317.
- 21- L. Hui, W. Zou, H. Guangjun, M. Wang (2017): Estimating Snow Depth And Snow Water Equivalence Using Repeat-Pass Interferometry SAR In The Northern Piedmont Region Of The Tianshan Mountains, *Journal Of Sensors*, 20(17), 16-33.
- 22- N. Otsu (1979): A Threshold Selection Method From Gray-Level Histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B* 1979, 9, 62–66.
- 23- N. Hang (2018): Detection Of Surface Crack In Building Structures Using Image Processing Technique With An Improved Otsu Method For Image Thresholding, *Advances In Civil Engineering*, Pp 1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/3924120>.
- 24- P. Yang, W. Song, X. Zhao, R. Zheng, L. Qingge (2021): An Improved Otsu Threshold Segmentation Algorithm. *Computational Science And Engineering*, 22(1), Pp 145-153.
- 25- S. Manickam, A. Barros (2020): Parsing Synthetic Aperture Radar Measurements Of Snow In Complex Terrain: Scaling Behavior And Sensitivity To Snow Wetness And Land Cover, *Journal Remote Sensing*, 12, 483, Pp 1-31.
- 26- S. K. Mcfeeters (1996): The Use Of The Normalized Difference Water Index (NDWI) In The Delineation Of Open Water Features, *International Journal Of Remote Sensing*, 17(7), Pp 1425- 1432

- 27- V. Khedaskar¹, A. Rokade, R. Patil P. Tatwadarshi (2018): A Survey Of Image Processing And Identification Techniques. Journal For Research And Innovation 1(1), Pp 1-10.
- 28- Xu, H. 2006. Modification Of Normalized Difference Water Index (NDWI) To Enhance Open Water Features In Remotely Sensed Imagery, International Journal Of Remote Sensing, 27(14): Pp. 3025-3033.
- 29- Y. Liu, X. Wang, F. Ling, S. Xu Tc. Wang (2017): Analysis Of Coast Line Extraction From Landsat OLI Imagery. Journal Water 2017, 9, 816, Pp 1-26.