

ارائه شاخص طیفی جدید به منظور استخراج سطوح برفی با استفاده از تصاویر اپتیکی سنجش از دور

اکرم افتخاری^۲

یوسف عبادی^۱

مجید فخری^۴

حکمت الله محمدخانلو^۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۵/۰۴

چکیده

ارزش و اهمیت ریزش‌های جوی و به‌خصوص حالت غیرمابیع آن مانند برف؛ در بحث تأمین آب مورد نیاز مجتمعات انسانی غیرقابل انکار است. در کشور ما که منطقه‌ای نیمه‌خشک محسوب می‌شود، ویژگی‌های برف و ذوب تأخیردار آن اهمیت بالایی در تأمین آب در فصول کم‌آب سال دارد. از این رو مطالعه کمیت این پدیده همواره مورد توجه بوده است. داده‌های سنجش از دوری به دلیل داشتن پوشش تکراری در زمینه پایش سطوح برفی به خوبی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. روش‌های آشکارسازی مختلفی قابلیت استفاده در این زمینه را دارا هستند. شاخص‌های طیفی که به نوعی مبتنی بر استخراج بازتاب طیف‌های جذب و انعکاس برف هستند، به‌صورت خودکار قابلیت سطوح برفی را دارا هستند. در این مطالعه که به منظور ارزیابی چهار شاخص مهم در برف‌سنجی و معرفی یک شاخص طیفی جدید انجام شده است، از داده‌های ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ بهره گرفته شده است. شاخص‌های طیفی برف مورد استفاده عبارت هستند از NDSI-S3-NDSII-SWI و شاخص پیشنهادی PCSWIRI که مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است، بر روی تصاویر مورد استفاده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی شاخص‌ها با استفاده از معیارهای ضریب کاپا و صحت کلی؛ نشان‌دهنده دقت بالاتر شاخص پیشنهادی (ضریب کاپای ۱ برای تصویر لندست ۸ منطقه اصلی، و ۰/۹۶ برای تصویر منطقه ارزیابی ۱) در تفکیک شباهت‌های طیفی برف و سایر پدیده‌ها در منطقه مورد مطالعه است. از این رو شاخص جدید می‌تواند جایگزین شاخص‌های برف؛ در مناطقی که اختلاط طیفی پدیده‌ای مانند نمک، باعث خطا در استخراج سطوح برفی می‌شود؛ باشد. همچنین برای محاسبه خودکار شاخص‌ها و شاخص پیشنهادی؛ برنامه کاربردی در محیط نرم‌افزار MatLAB توسعه داده شده و به‌صورت رابط گرافیکی تهیه گردید.

واژه‌های کلیدی: سطح برف، PCA، PCSWIRI، دریاچه ارومیه و دریاچه نمک

۱- کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گرایش مطالعات آب و خاک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول) yousef.ebadi1373@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه تهران akrameftekhary@gmail.com

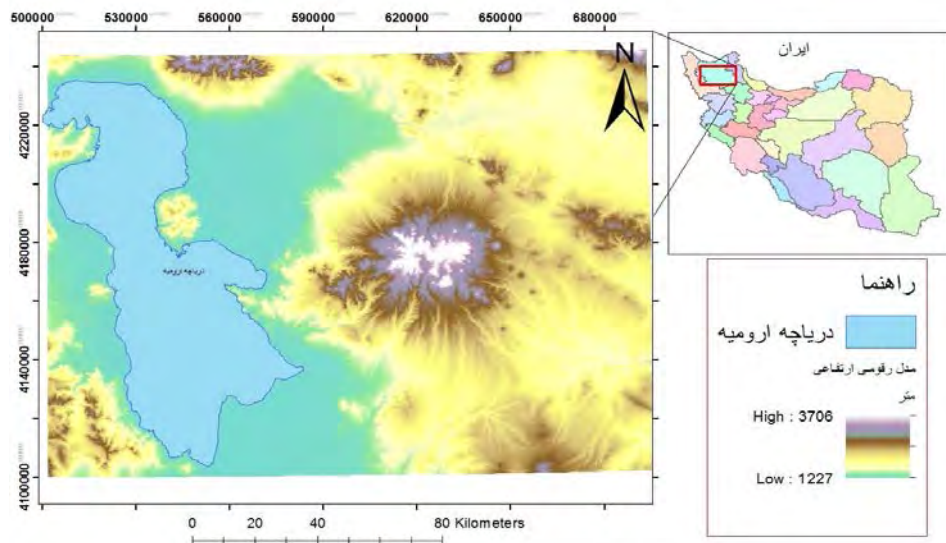
۳- کارشناسی ارشد ژئودزی H.m.khanlu@gmail.com

۴- دکتری مدیریت راهبردی پدافند غیرعامل ma.fakhri@chmail.ir

۱ - مقدمه

درجه شمالی و جنوبی کره زمین، یکی از اساسی ترین منابع آب محسوب می شود (دممی، ۱۳۸۴)، هم چنین پوشش برفی و آب معادل آن حدود یک سوم از آب مورد نیاز برای فعالیت های کشاورزی و آبیاری را در کره زمین تأمین می کند (رایگانی، ۱۳۸۴). یکی از مناسب ترین و در عین حال شناخته شده ترین روش ها برای استخراج نقشه های پوشش برفی در سال های اخیر استفاده از تکنیک های سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای است. تحقیقات بسیاری در داخل و خارج از کشور در این زمینه انجام شده است که از جمله آن می توان به تحقیقات فتاحی و وظیفه دوست (۱۳۹۰)؛ معمار راست (۱۳۹۲)؛ ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۴)؛ خسروی و همکاران (۱۳۹۶)؛ تصدیقیان و رحیم زادگان (۱۳۹۶)؛ رئیس پور (۱۳۹۷)؛ سلیمانی و همکاران (۱۳۹۷)؛ یوسفی و همکاران (۱۳۹۷)؛ سیفی و قربانی (۱۳۹۸)؛ Ahmad Tahir et al, 2015؛ Antonio et al, 2016؛ Immerzeel Rango et al, 1977؛ et al, 2009؛ Deitz et al, 2018؛ Naghajtii et al, 2019 اشاره کرد. رویکرد اصلی مشترک در این مطالعات؛ استفاده از شاخص های طیفی شناخته شده هم چون NDSI در تصاویر اپتیک سنجش از دور از جمله داده های مادیس و لندست بوده است. این شاخص در مناطق بسیاری از جهان مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج قابل قبولی در استخراج خودکار پوشش برف از تصاویر را ارائه نموده است. اما یکی از مشکلات و معضلاتی که در این مسیر وجود دارد؛ شباهت طیفی بازتاب برف و سایر پدیده ها همچون آب و نمک است که باعث استخراج اشتباه برف در تصاویر می شود. برای رفع این مشکل از آستانه های طیفی برای باندهای مورد استفاده در شاخص و آستانه گذاری برای شاخص استخراج شده استفاده می شود، اما گاهی با توجه به شرایط و ویژگی های منطقه مورد بررسی و وجود پدیده های خاص، این جداسازی برف به خوبی انجام نشده و باعث به وجود آمدن خطا در روند کار می شود. در مطالعه حاضر؛ به منظور استخراج نقشه های سطح پوشش برف؛ از چهار شاخص طیفی پر کاربرد در بحث استخراج سطح پوشش برف استفاده شده است؛ علاوه

برف یکی از اشکال بارش است که به دلیل طبیعت ایجاد تأخیر در تبدیل آن به رواناب، تفاوت خاصی با سایر مؤلفه های بیلان آب دارد. پوشش برفی در یک حوضه بر بیلان آب و انرژی آن حوضه اثر می گذارد؛ بنابراین عامل مهمی در تغییرات آب و هوایی یک منطقه محسوب می شود. تعیین تغییرات زمانی ذوب برف و آب معادل برف برای پیش بینی سیلاب، مدیریت مخازن و کشاورزی یک منطقه بسیار اهمیت دارد (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۹۳: ۱۶۸). بارش برف به ویژه در مناطق کوهستانی به عنوان یکی از اصلی ترین منابع آبی برای ذخیره آب فصول گرم سال محسوب شده و قسمت عمده نزولات جوی در مناطق کوهستانی و در عرض های جغرافیایی بالا را تشکیل می دهد، و با داشتن عکس العمل کند هیدرولوژیکی، نقش خاصی از نظر تغذیه سفره های آب زیرزمینی و تأخیر در جریان آب رودخانه ها را ایفا می کند (Engman & Gurney, 1992). ذخایر برفی در بالادست کوه ها الگوی رواناب فصلی پایین دست را تحت تأثیر قرار می دهد، به خصوص در مناطق با فصل تابستان خشک که در آن رواناب حاصله از ذوب برف یکی از منابع اساسی برای تأمین آب می باشد (Yang, 2005:3). آب حاصل از ذوب برف فصلی و یخچال های طبیعی منبع تأمین آب بیش از یک ششم جمعیت جهان می باشد، که ممکن است به علت بروز پدیده گرمایش کره زمین در معرض خطر بی آبی باشند و بنابراین پایش سطح برف به منظور درک سیکل های هیدرولوژیکی منطقه ای مهم می باشد (Li, 2008: 211). ایران سرزمین کم آبی است که در منطقه خشک و نیمه خشک کره زمین قرار گرفته است و لذا بارش برف مهم ترین عامل تأثیرگذار در میزان ذخایر آب، به ویژه در فصول گرم سال محسوب می گردد (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۰۳). طبق مطالعات انجام شده حدود ۶۰ درصد آب های سطحی و ۵۷ درصد آب های زیرزمینی کشور در مناطق برف گیر قرار داشته و از آب حاصل از ذوب آن تغذیه می کنند (مشایخی، ۱۳۶۹). آب حاصل از ذوب برف در مناطق واقع در عرض های جغرافیایی ۳۰ تا ۶۰



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

است. این ماهواره خورشید آهنگ بوده و هر ۹۹ دقیقه یکبار به دور زمین می‌گردد. در حدود ساعت ۹ و ۴۵ دقیقه به وقت محلی از بالای خط استوا می‌گذرد. این ماهواره از دو سنجنده اصلی (OLI & TIRS) تشکیل شده است. توان تفکیک مکانی باندهای سنسور چندطیفی؛ ۳۰ متر و یک باند پانکروماتیک با تفکیک مکانی ۱۵ متر است. این تفکیک برای سنسور حرارتی ماهواره ۱۰۰ متر است. این ماهواره در هر گذر، نواری به عرض ۱۸۵ کیلومتر را پوشش می‌دهد. تفکیک زمانی این ماهواره ۱۶ روز است.

سنسور ۲ بهره‌گیری از سنجنده طیفی MSI و با دارا بودن ۱۳ باند طیفی (با تفکیک رادیومتریکی ۱۲ بیتی) از ۴۴۳ نانومتر تا ۲۱۹۰ نانومتر، یکی از داده‌های سنجنش‌ازدوری با تفکیک متوسط به شمار می‌رود که به منظور مطالعات مربوط به کاربری اراضی، پوشش گیاهی و منابع طبیعی، مطالعات مربوط به آب و حفاظت خاک و غیره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تعبیه ۴ باند طیفی با تفکیک مکانی ۱۰ متر، ۶ باند با تفکیک ۲۰ متر و ۳ باند با تفکیک ۶۰ متر که به صورت رایگان تحت برنامه کوپرنیکس آژانس فضایی اروپا در اختیار محققان و برنامه‌ریزان قرار می‌گیرد. این ماهواره شامل دو سری سنسور 2A و 2B است که به ترتیب در ژوئن ۲۰۱۵ و مارس ۲۰۱۷ در مدار قرار

بر آن در این مطالعه شاخص طیفی جدیدی معرفی شده و مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش

۲-۱- معرفی عرصه مورد پژوهش

منطقه مورد بررسی و پژوهش در مطالعه حاضر؛ بخشی از شمال غرب کشور که در موقعیت ۳۶/۷۵ الی ۳۸/۹۰ درجه عرض شمالی و ۴۴/۹۷ الی ۴۸/۱۴ درجه طول شرقی قرار گرفته است؛ می‌باشد. وجود دو عارضه مهم یعنی توده کوهستانی سهند و فروافتادگی دریاچه ارومیه شرایط ویژه‌ای را برای منطقه از لحاظ وضعیت اقلیمی ایجاد کرده است. ریزش برف در این منطقه در فصل زمستان پدیده غالب بوده و نقش زیادی در تعیین رژیم‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌ها در فصل ذوب برف ایفا می‌کند. از این رو پایش برف در این منطقه از کشور اهمیت بالایی دارد. میانگین بارندگی در این منطقه از ۳۰۰ الی ۶۰۰ میلی‌متر در سال متغیر بوده و از لحاظ آب‌وهوایی جزء مناطق سرد به حساب می‌آید (نگاره ۱).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

لندست ۸ آخرین سری از ماهواره‌های سری لندست است که در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ در مدار قرار گرفته

Landsat-8 OLI bands			Sentinel-2 MSI bands		
Bands (SRID(m))	Wavelength (nm)	Label	Bands/GS D(m)	Central wavelength (nm)	Label
B1 (30)	0.43-0.45	Coastal aerosol	B1 (60)	0.443	Coastal aerosol
B2 (30)	0.45-0.51	Blue	B2 (10)	0.490	Blue
B3 (30)	0.53-0.59	Green	B3 (10)	0.560	Green
B4 (30)	0.64-0.67	Red	B4 (10)	0.665	Red
B5 (30)	0.85-0.88	Near Infrared	B5 (20)	0.705	Red Edge 1
B6 (30)	1.57-1.65	SWIR1	B6 (20)	0.740	Red Edge 2
B7 (30)	2.11-2.29	SWIR2	B7 (20)	0.763	Red Edge 3
B8 (15m)	0.50-0.68	Panromatic	B8 (10)	0.842	Near Infrared
B9 (30)	1.36-1.38	Cirrus	B8A (60)	0.865	Red Edge 4
B10 (100m)	10.50-11.19	Thermal IR 1	B9 (60)	0.945	Water vapour
B11 (100m)	11.50-12.51	Thermal IR 2	B10 (60)	1.375	SWIR -Cirrus
			B11 (20)	1.610	SWIR 2
			B12 (20)	2.190	SWIR 3

نگاره ۲: مشخصات طیفی تصاویر مورد استفاده

شاخص برمنای این حقیقت که برف دارای بازتابندگی بالا در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیس (محدوده طیفی ۰/۵۶۵ - ۰/۵۴۵ میکرومتر) و بازتابندگی پایین در محدوده فرورسرخ میانی (۱/۶۵۲ - ۱/۶۲۸ میکرومتر)؛ پایه ریزی شده است (نولین و لیانگ، ۲۰۰۰: ۳۱۰). فرمول محاسباتی این شاخص به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$$

رابطه (۱)

این شاخص صرفاً تقسیم محدوده‌های طیفی بین مقادیر بازتاب مناطق برفی و غیربرفی نیست؛ بلکه به کاهش اثرات ابرهای کومولوس (نگی و همکاران، ۲۰۰۹)، تأثیرات اتمسفریک (سالومونسون، ۲۰۰۴) نیز کمک می‌کند. از دیگر مزایای شاخص NDSI این است که می‌تواند اثرات توپوگرافیک را نیز ملاحظه کند (نگی و همکاران، ۲۰۱۰). بازه تغییرات این شاخص بین ۱- تا ۱+ متغیر است، با این حال اکثر محققان آستانه ۰/۴ را یک آستانه مناسب و بهینه برای استخراج مناطق برفی در نظر می‌گیرند (مال و همکاران، ۱۹۹۵). که البته می‌تواند با در نظر گرفتن شرایط منطقه آستانه عددی متناسب را به دست آورد.

۲-۳-۲- شاخص S3

شاخص S3 در سال ۱۹۹۹ توسط سایتو و یامازاکی به عنوان یک شاخص بهبود یافته معرفی شد. در سال ۲۰۰۶

گرفته‌اند. این ماهواره خورشید آهنگ بوده و در ارتفاع ۷۸۶ کیلومتری قرار گرفته است. زمان محلی عبور از نقطه گرهی نزولی (LTDN) در ماهواره‌های سنتینل ۲ برابر با ۱۰ و نیم قبل از ظهر است (نگاره ۲). پس از تهیه تصاویر ماهواره‌ای؛ تصحیحات اولیه بر روی داده‌ها انجام گرفت. این تصحیحات شامل تصحیح رادیومتریکی (تبدیل DN خام سنجنده به تابش طیفی و سپس تبدیل به بازتاب طیفی) و تصحیح اتمسفریک (روش جزئی Flaash) برای داده‌های لندست ۸ است. به منظور اعمال تصحیحات برای داده‌های سنتینل ۲ از افزونه Sen2Corr نرم‌افزار SNAP استفاده گردید، و پس از آن تصاویر به منظور محاسبه شاخص‌های طیفی به کار برده شدند.

۲-۳-۳- شاخص‌های طیفی برف

در این تحقیق از چهار شاخص طیفی شناخته شده برای استخراج سطح پوشش برف؛ به اضافه یک شاخص پیشنهادی جدید استفاده شده است. ابتدا چهار شاخص مورد استفاده شرح داده شده و پس از آن به تشریح شاخص پیشنهادی جدید پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- شاخص NDSI

این شاخص به عنوان یک الگوریتم استخراج اتوماتیک برف به همراه مجموعه‌ای از آستانه‌ها به کار می‌رود. این

۲-۳-۳- شاخص NDSII-1

شاخص NDSII-1 توسط جیانو و همکارانش در سال ۲۰۰۱ برای سنجنده VGT ماهواره SPOT4 طراحی شد، که در سال ۱۹۹۸ به منظور تهیه نقشه‌های پوشش برف و یخ در مدار قرار گرفته بود. سنجنده VGT دارای چهار باند طیفی شامل (باندهای آبی، قرمز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی) بوده که معادل باندهای سنجنده TM می‌باشد. شاخص NDSII-1 مبتنی بر VGT یک روش نسبتاً ساده و خودکار برای پایش و نقشه‌سازی پوشش‌های برف و یخ در مقیاس جهانی بوده است. مفهوم اولیه این شاخص، برپایه اختلاف بازتابش برف در طیف‌های قرمز و مادون قرمز کوتاه تعبیه شده در سنسور VGT است (دیگزیت و همکاران، ۲۰۱۹). با این حال با توجه به این که سنجنده‌های اپتیکی در دسترس که بسیار توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ دارای باندهای مشابه سنجنده VGT هستند، پس چنین شاخصی برای سایر سنجنده‌ها از جمله سری لندست‌ها، سنتینل ۲ و مادیس قابل استفاده می‌باشد. این شاخص نتایج مشابهی مانند شاخص NDSI دارد و با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$NDSII = 1 = \frac{(Red - SWIR)}{(Red + SWIR)}$$

رابطه (۳)

بازه تغییرات این شاخص نیز مانند NDSI از -۱ تا +۱ متغیر بوده و میزان آستانه عددی برای استخراج برف نیز ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود (جیانو و همکاران، ۲۰۰۱).

۲-۳-۴- شاخص SWI

نقشه سطح پوشش برفی در مناطق ناهموار دارای تغییرپذیری زیاد فیزیکی و در شرایط هواشناسی اغلب دارای مشکلاتی از قبیل اختلاط طیفی همچون ابر و سایه ابر، اختلاط پوشش گیاهی و اختلاط آب است. بنابراین استخراج نقشه‌های دقیق از سطح پوشش برف در مناطق

شیمامورا (شیمامورا، ۲۰۰۶) دقت الگوریتم S3 را نسبت به الگوریتم NDSI به‌طور خاص در منطقه‌ای که هم‌پوشانی بین برف و مناطق جنگلی وجود داشت؛ مورد ارزیابی قرار داد. شاخص S3 برای اولین بار برای داده‌های سنجنده ADEOS-II که در دسامبر سال ۲۰۰۲ پرتاب شده است، مورد استفاده قرار گرفت.

برخی از محققان مطالعاتی را با استفاده از داده‌های این سنجنده برای اندازه‌گیری کمی پوشش برف انجام دادند. این سنجنده در اکتبر سال ۲۰۰۳ به کار خود پایان داد. برخی از محققان در این زمینه از داده‌های لندست ۷ برای تخمین پوشش برف در مناطق جنگلی در صورتی که داده‌های مرجع پوشش گیاهی وجود ندارد؛ استفاده کرده‌اند. مقدار بازتاب برف در محدوده مرئی طیف الکترومغناطیسی بالا است، در حالی که بازتاب پوشش گیاهی در باند لبه قرمز مادون قرمز نزدیک (Near Infrared) نیز بالاست. با این وجود در مناطقی که برف در زیر پوشش گیاهی قرار دارد؛ اختلاط طیفی ایجاد خواهد شد.

بنابراین در نقشه پوشش برف از اثر پیکسل‌هایی که هر دو مقدار برف و پوشش گیاهی را دارند؛ صرف نظر می‌شود. الگوریتم S3 از مقادیر بازتاب برف در باندهای طیفی قرمز (Red)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز کوتاه (SWIR) استفاده می‌کند (نگی و همکاران، ۲۰۰۹). شاخص S3 با استفاده از رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$S3 = \frac{NIR(Red - SWIR)}{(NIR + Red)(NIR + SWIR)}$$

رابطه (۲)

در تحقیقاتی همچون (نگی و همکاران، ۲۰۱۰؛ شیمامورا و همکاران، ۲۰۰۳) آستانه عددی برای شاخص S3 تعیین شده است. در این آستانه مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۱۸ به‌عنوان پوشش برف و مقادیر ۰/۱۸ - ۰/۰۵ به‌عنوان برفی که زیر پوشش گیاهی قرار دارد، در نظر گرفته می‌شود.

به کار می‌رود. یکی از مهم‌ترین مزایای شاخص SWI نسبت طیفی (NIR - SWIR / NIR + SWIR) است که مانند یک ماسک آب عمل می‌کند. آستانه عددی برای تهیه نقشه پوشش برف در این شاخص طیفی؛ مقادیر بالاتر از ۰/۲۱ تعریف شده است (دیکزیت و همکاران، ۲۰۱۹).

۲-۳-۵- شاخص پیشنهادی PCSWIR

شاخص‌های طیفی معرفی شده - با وجود توانایی بالایی که در آشکارسازی برف از سایر پدیده‌ها به علت بازتاب بالای آن دارند - در مواقعی به دلیل وجود پدیده آب در تصویر باعث اختلاط طیفی می‌شوند. این باعث می‌شود آب به عنوان برف در نظر گرفته شود.

البته آستانه‌های تعریف شده برای شاخص‌ها تا حدودی قابلیت این را دارند تا آب خالص و نسبتاً عمیق را جدا کنند، اما در صورت وجود پدیده‌های دیگر مانند نمک که بازتاب بالایی دارند، کاملاً در کلاس برف قرار می‌گیرند. در منطقه مورد مطالعه شاخص‌های طیفی معرفی شده با اعمال آستانه‌هایی می‌توانند نواحی آبی را از برف تفکیک کنند. وجود عارضه مهم دریاچه ارومیه به عنوان یک دریاچه شور که دارای مقادیر بالایی نمک است، شباهت طیفی بسیار بالایی با برف داشته و همین امر باعث می‌شود؛ حتی با اعمال آستانه بر روی شاخص‌های طیفی، کاملاً برف و آب (آب کم عمق و نواحی نمکی) مخلوط شوند.

از این رو شاخص طیفی جدیدی در این مطالعه ارائه گردید، که به صورت مناسب توانایی تفکیک برف و آب از سایر پدیده‌ها را دارد. این شاخص پیشنهادی برپایه بازتاب باندهای سبز (۰/۶۰۰-۰/۵۲۵)، قرمز (۰/۶۸۰-۰/۶۳۰)، مادون قرمز نزدیک (۰/۸۸۵-۰/۸۴۵) و مادون قرمز کوتاه (۰/۶۶۰-۱/۵۶۰) پایه‌گذاری شده است. مشارکت طیف‌های جذب و بازتاب برف و باند مادون قرمز کوتاه در این شاخص باعث می‌شود پدیده برف از آب و نمک و آب مخلوط به نمک به خوبی تفکیک شده و هم‌چنین استفاده از باند مادون قرمز کوتاه موجب جداسازی برف از ابر شده تا

کوهستانی و ناهموار نیازمند ابزارهای حرفه‌ای است که تحت تأثیر سایر شرایط پوشش زمین بالاخص آب قرار نگیرند (دیکزیت و همکاران، ۲۰۱۹). به منظور دستیابی به دقت‌های بیشتر در تهیه نقشه‌های پوشش برفی شاخص جدیدی در این زمینه توسط دیکزیت و همکارانش در سال ۲۰۱۹ معرفی شده است. این شاخص جدید با استفاده از باندهای طیفی Green - NIR and SWIR و تحلیل بازتابش پدیده برف و در نظر گرفتن ابر، پوشش گیاهی و مخصوصاً آب محاسبه می‌شود. به مانند شاخص‌های طیفی گذشته، شاخص SWI توانایی حذف و فشرده‌سازی کلاس‌های همسایگی پدیده برف مانند ابر، خاک و پوشش گیاهی و آب را دارد. مزاد بر شاخص‌های پیشین در این زمینه؛ این شاخص از روش‌های پیچیده‌تری برای حذف و کاهش اثرات پیکسل‌های آب استفاده می‌کند. آب بازتاب بالایی در محدوده طیفی طول موج سبز و در مقابل جذب بالاتری در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک دارد. خصوصیت جذب آب در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک (NIR) این امکان را فراهم می‌کند تا به سادگی برف و آب قابلیت تفکیک داشته باشند (هال و همکاران، ۱۹۹۵؛ ژوزف و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین یک بازتاب معناداری بین برف و سایر پدیده‌ها مخصوصاً آب ایجاد می‌شود تا شاخص SWI به دقت بالاتری دست یابد (دیکزیت و همکاران، ۲۰۱۹). برای محاسبه این شاخص از رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$SWI = \frac{Green(NIR - SWIR)}{(Green + NIR)(NIR + SWIR)}$$

رابطه (۴)

خصوصیت بازتاب بالایی ابر در باند Green و SWIR امکان تشخیص آن از برف را امکان‌پذیر می‌کند. شاخص SWI از خصوصیت بازتاب برف و پوشش گیاهی در باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک برای تشخیص برف زیر پوشش گیاهی استفاده می‌کند. نسبت (green / green + NIR) به منظور کاهش فشرده‌گی و تراکم پوشش گیاهی روی برف

۳- یافته‌ها و بحث

پس از آماده سازی تصاویر؛ با استفاده از پنج شاخص بحث شده؛ سطح برف برای چند تاریخ مختلف برای تصاویر در منطقه مورد مطالعه محاسبه گردید. به منظور ارزیابی دقت از ضریب کاپا^۱ و ضریب صحت کلی^۲ استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده از ارزیابی شاخص‌ها؛ شاخص پیشنهادی PCSWIRI در تمامی تصاویر مورد استفاده، دقت و صحت بالاتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. این دقت بالاتر به صورت بصری در تفکیک و جداسازی مناطق آبی و نمکی دریاچه ارومیه نیز مشهود است. با وجود این که شاخص SWI نتایج نزدیک تری نسبت به سایر شاخص‌ها با الگوریتم پیشنهادی دارد؛ باز هم اختلاط‌هایی در محدوده دریاچه ارومیه در تفکیک برف به وجود می‌آید. با این وجود آستانه‌هایی که برای شاخص‌ها به صورت تجربی تعیین شده است، نقش مهمی در استخراج برف دارد.

محدودیتی که در چهار شاخص معرفی شده وجود دارد، این است که با اعمال آستانه برای استخراج برف در هر کدام از الگوریتم‌ها؛ علاوه بر استخراج برف پدیده‌های دیگر هم چون نمک نیز برف شناسایی می‌شود. با تغییر آستانه به اعداد بیشتر پهنه‌های برفی دیگر به خوبی استخراج نخواهند شد. همین موضوع باعث گردید تا در شاخص پیشنهادی از تحلیلی استفاده شود تا حداکثر اختلاف بازتابی بین پدیده‌ها آشکار شده و از همین رو بتوان پدیده برف را که دارای بازتاب بسیار بالایی در طیف‌های مرئی است را به صورت خودکار استخراج کرد. جدول (۱) نتایج ارزیابی دقت شاخص‌های محاسبه شده را نشان می‌دهد.

به دلیل زیاد بودن تعداد تصاویر و شاخص‌ها و مناسب نبودن درج تمامی آن‌ها به دلیل محدودیت صفحات مقاله؛ تنها دو مورد از تصاویر برای تاریخ ۲۹ ژانویه ۲۰۱۸ (برای هر دو تصویر؛ لندست ۸ و سنتینل ۲) در این جا ارائه شده است (نگاره ۳ و نگاره ۴).

ابر در کلاس برف قرار نگیرد. این شاخص علاوه بر باند طیفی مادون قرمز کوتاه؛ از تجزیه مؤلفه‌های اصلی این چهار باند و به خصوص مؤلفه اول که دارای بیشترین اطلاعات طیفی است؛ استفاده می‌کند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی ابتدا در سال ۱۹۰۱ توسط پیرسون (پیرسون، ۱۹۰۱) معرفی شد و پس از آن در سال ۱۹۳۳ هلتنینگ روش‌های محاسباتی آن را پیشنهاد نمود.

این تحلیل در اصل تعریف ریاضی یک تبدیل خطی متعامد است که داده را به دستگاه مختصات جدید می‌برد، به طوری که بزرگ‌ترین واریانس داده‌ها بر روی اولین محور مختصات قرار می‌گیرد و واریانس مرتبه بعدی بر روی دومین محور مختصات و این روند تا انتها ادامه دارد (بزرگ‌نیا، ۱۳۷۳).

بدین ترتیب مؤلفه‌هایی که بیشترین سهم واریانس را دارند، برای تعیین روند تغییرات باقی می‌مانند. از طرفی این روش برای تحلیل و طبقه‌بندی داده‌هایی با حجم زیاد نیز کاربرد دارد، چرا که بین تعداد زیادی از متغیرهایی که به ظاهر ارتباط ندارند، رابطه خاصی را به صورت یک مدل برقرار می‌سازد (فتاحی و بهیار، ۱۳۹۰).

پس از انجام تحلیل PCA بر روی چهار باند طیفی تعیین شده؛ بردار ویژگی اول (PC1) از مجموعه تفکیک می‌گردد تا وارد رابطه شاخص پیشنهادی PCSWIRI شود. رابطه محاسباتی شاخص معرفی شده به صورت رابطه (۵) معرفی می‌شود:

$$PCSWIRI = \left(\frac{(PC1 - SWIR)}{(PC1 + SWIR)} \right) \times PC1$$

رابطه (۵)

آستانه عددی تعیین شده‌ی این شاخص برای استخراج برف ۰/۴ است که می‌توان با توجه به شرایط منطقه مقادیری بین ۰/۲ الی ۰/۵ را نیز دربرگیرد. به دلیل حساسیت شاخص به مقدار حد آستانه؛ با آزمون و خطا می‌توان مقدار آستانه مناسب برای منطقه مورد بررسی را به دست آورد.

1- Kappa Coefficient

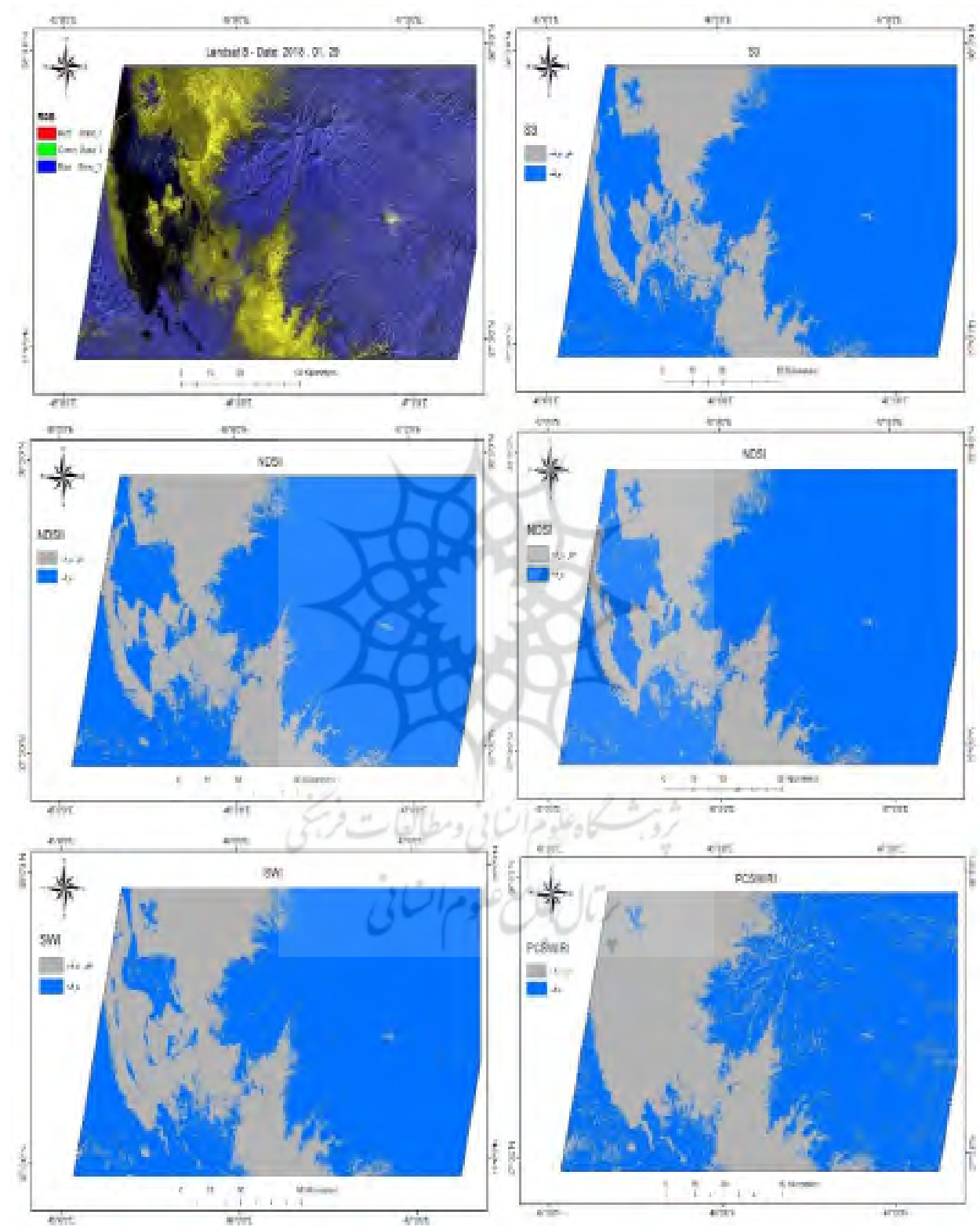
2- Overall Accuracy

جدول ۱: نتایج ارزیابی دقت شاخص های استفاده شده

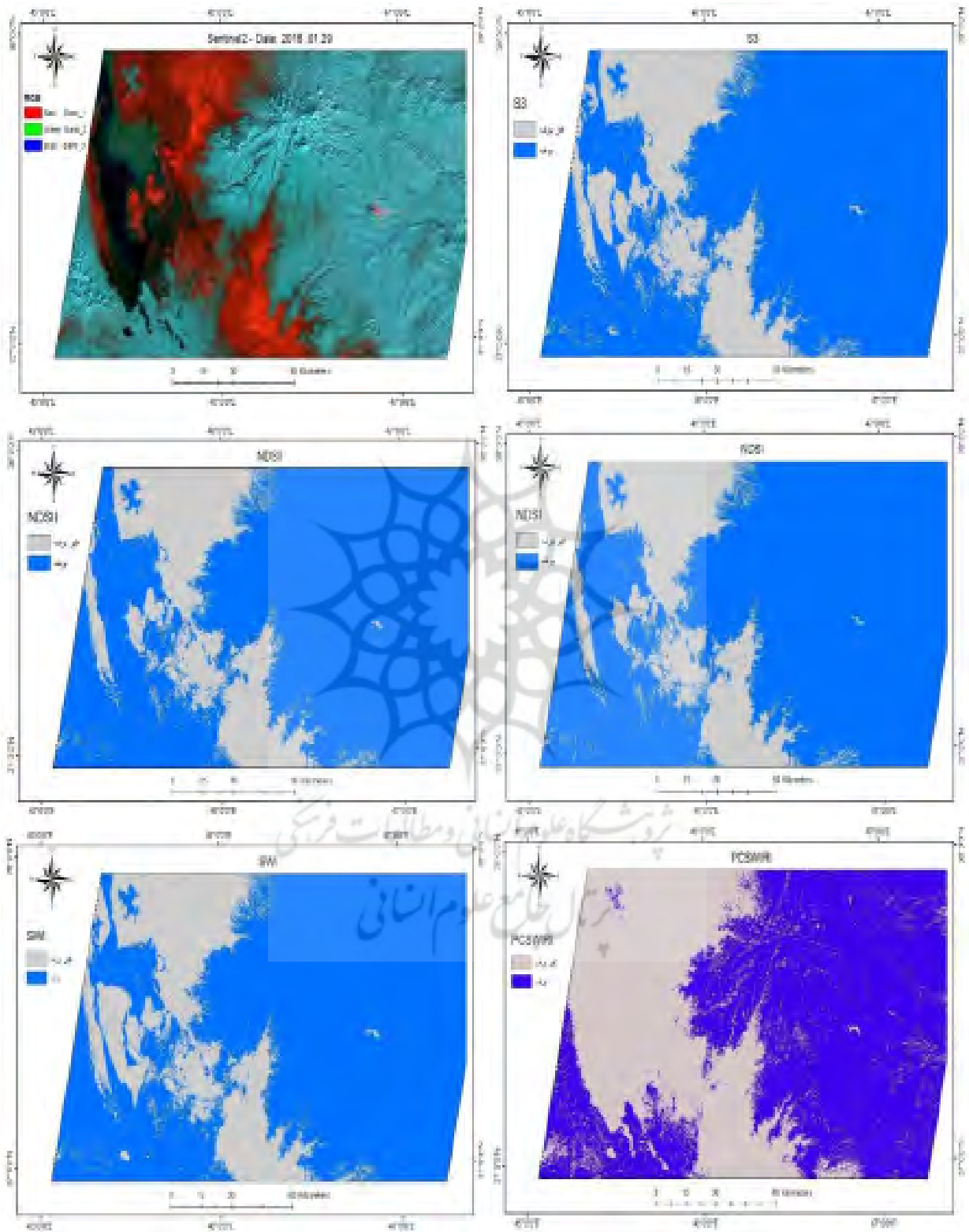
<i>Landsat8</i>		2017.12.12			
	NDSI (>0.4)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.4)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.4)
kappa	0.8687	0.8858	0.8971	0.9313	1
overall accuracy	0.9341	0.9427	0.9484	0.9656	1
2018.01.13					
	NDSI (>0.4)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.4)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.3)
kappa	0.8529	0.8676	0.8897	0.9485	0.9559
overall accuracy	0.9262	0.9338	0.9449	0.9743	0.9779
2018.01.29					
	NDSI (>0.4)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.4)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.4)
kappa	0.8453	0.8643	0.8957	0.9453	0.9641
overall accuracy	0.9271	0.9359	0.9504	0.9738	0.9825
2018.03.18					
	NDSI (>0.5)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.5)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.4)
kappa	0.9512	0.9064	0.9512	0.9367	0.9758
overall accuracy	0.9772	0.9567	0.9772	0.9704	0.9886
<i>Sentinel 2</i>		2018.01.09			
	NDSI (>0.4)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.4)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.4)
Kappa	0.8226	0.8658	0.8308	0.8919	0.9401
overall accuracy	0.9143	0.9336	0.9165	0.9465	0.97
2018.01.29					
	NDSI (>0.4)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.4)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.35)
Kappa	0.8198	0.8957	0.8198	0.9144	0.976
overall accuracy	0.9155	0.9504	0.9155	0.9592	0.9883
2018.03.20					
	NDSI (>0.4)	S3 (>0.18)	NDSII (>0.4)	SWI (>0.21)	PCSWRI (>0.35)
kappa	0.9123	0.9122	0.9368	0.9467	0.976
overall accuracy	0.9573	0.9573	0.9692	0.9739	0.9882

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

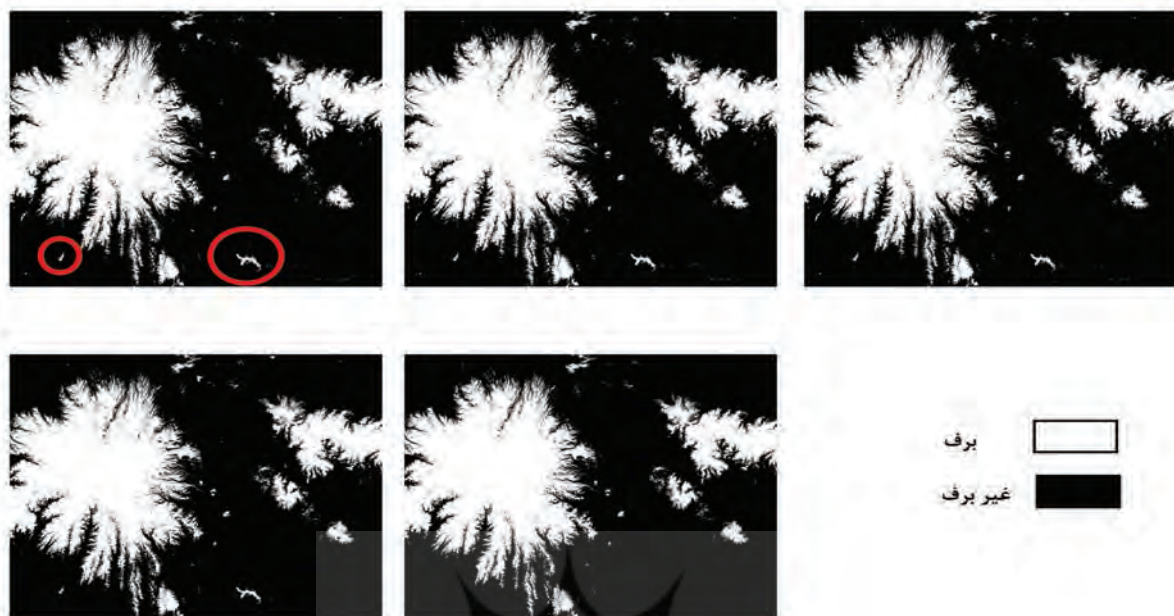
ارائه شاخص طیفی جدید به منظور استخراج سطوح برفی ... / ۸۷



نگاره ۳: سطح برف استخراج شده برای تصویر لندست ۸



نگاره ۴: سطح برف استخراج شده برای تصویر سنتینل ۲

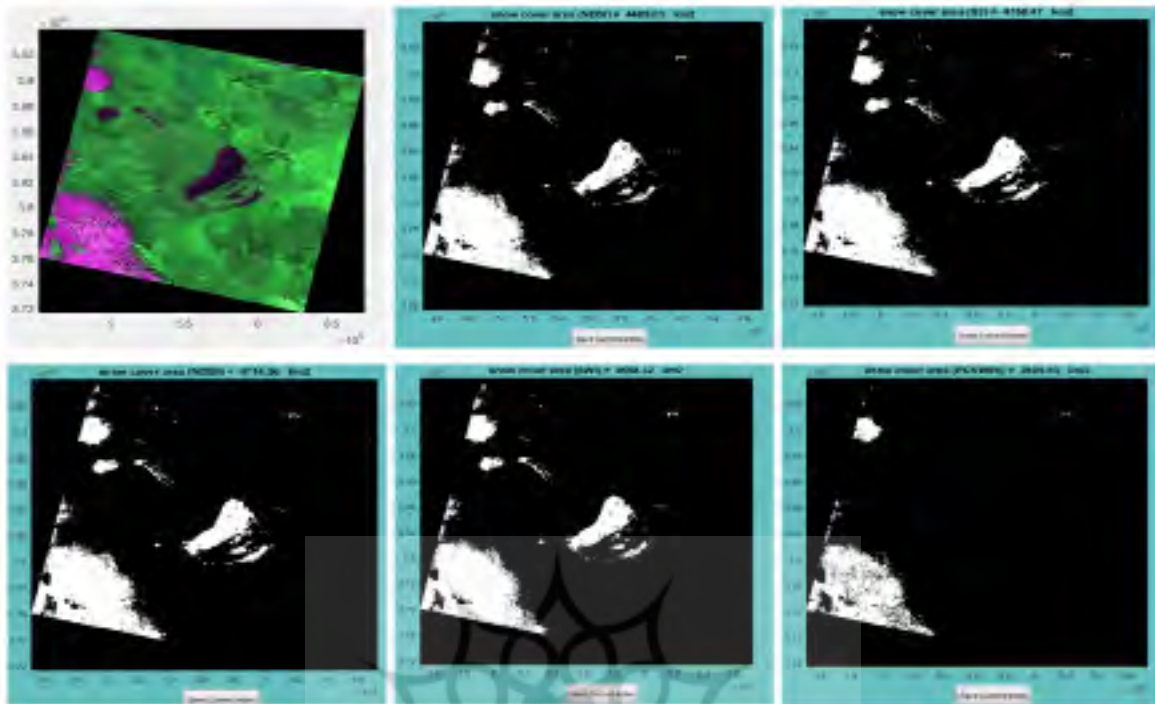


نگاره ۵: جداسازی آب و برف در شاخص‌های مورد مطالعه

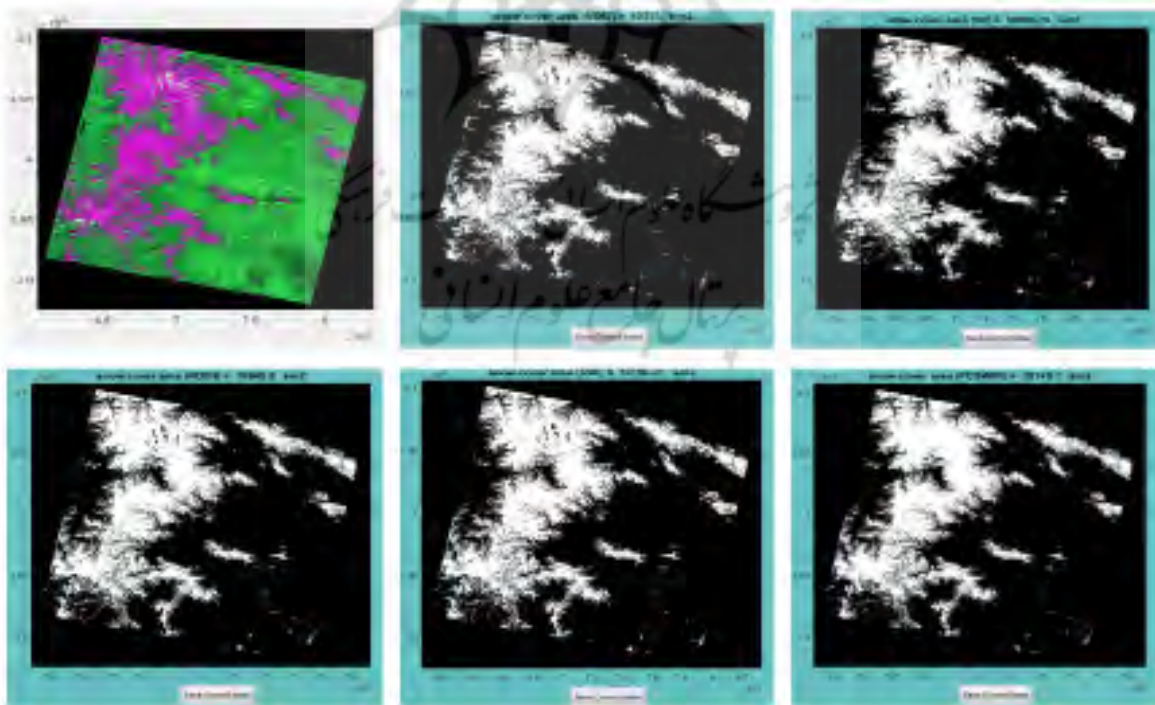
علاوه بر ارزیابی شاخص‌ها با معیارهای عددی (ضریب کاپا و شاخص صحت کلی) با بررسی و ارزیابی بصری شاخص‌ها و تصاویر اصلی در ترکیب‌های باندی اصلی و کاذب؛ دقت بالاتر و کارایی بهتر شاخص پیشنهادی نسبت به سایر شاخص‌ها در منطقه مورد مطالعه تأیید می‌شود. به عبارت دیگر جداسازی و تفکیک برف و آب (دریاچه ارومیه، نمک‌زارهای آن و چندین دریاچه ایجاد شده در پشت سد مانند دریاچه سد سهند هشتگرد، دریاچه سد علویان مراغه؛ که در نگاره ۵ با دایره‌های قرمز مشخص شده‌اند) در شاخص پیشنهادی بهتر انجام شده است. پس از محاسبه شاخص‌های معرفی شده و شاخص پیشنهادی برای منطقه اصلی مورد مطالعه (شمال غرب کشور) به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی بهتر شاخص پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق (PCSWIRI)، از دو سری تصویر ماهواره لندست ۸ برای دو منطقه مجزا در کشور استفاده گردید تا توانایی و میزان اعتمادپذیری شاخص پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. منطقه اول در محدوده‌ای بین استان‌های اصفهان، قم و سمنان واقع شده است که شامل دریاچه نمک و ارتفاعات جنوب غربی می‌باشد. برای

این منطقه تصویر لندست ۸ برای تاریخ ۴ ژانویه ۲۰۱۹ مصادف با ۱۴ دی ماه ۱۳۹۷ اخذ شده و آماده محاسبه شاخص‌ها گردید. منطقه دوم محدوده بین استان‌های آذربایجان غربی، کردستان و زنجان می‌باشد. تصویر اخذ شده برای این منطقه متعلق به ۲۶ فوریه ۲۰۱۹ مصادف با ۷ اسفند ماه ۱۳۹۷ می‌باشد. نتایج بررسی در نگاره‌های (۶ و ۷) و جدول (۲) ارائه شده است. در ادامه به منظور خودکار سازی محاسبه شاخص‌ها و ارزیابی دقت آن‌ها؛ ابزاری کاربردی در محیط نرم‌افزار MatLAB به صورت رابط گرافیکی (GUI) توسعه داده شد.

در نگاره (۸) نمایی از نرم‌افزار تهیه شده و بخش‌های مختلف آن ارائه شده است. این ابزار به منظور محاسبه خودکار شاخص‌ها؛ چهار باند طیفی مورد استفاده را اخذ کرده و با محاسبه شاخص و امکان تعریف آستانه عددی؛ شاخص به دست آمده را نمایش می‌دهد. در ادامه در صورت وجود داده‌های واقعیت زمینی (gcp) امکان محاسبه شاخص‌های آماری کاپا و صحت کلی وجود دارد. پس از مشاهده و ارزیابی شاخص‌ها؛ می‌توان شاخص‌های محاسبه شده را در فرمت ژئوتیف در پایگاه داده ذخیره‌سازی کرد.



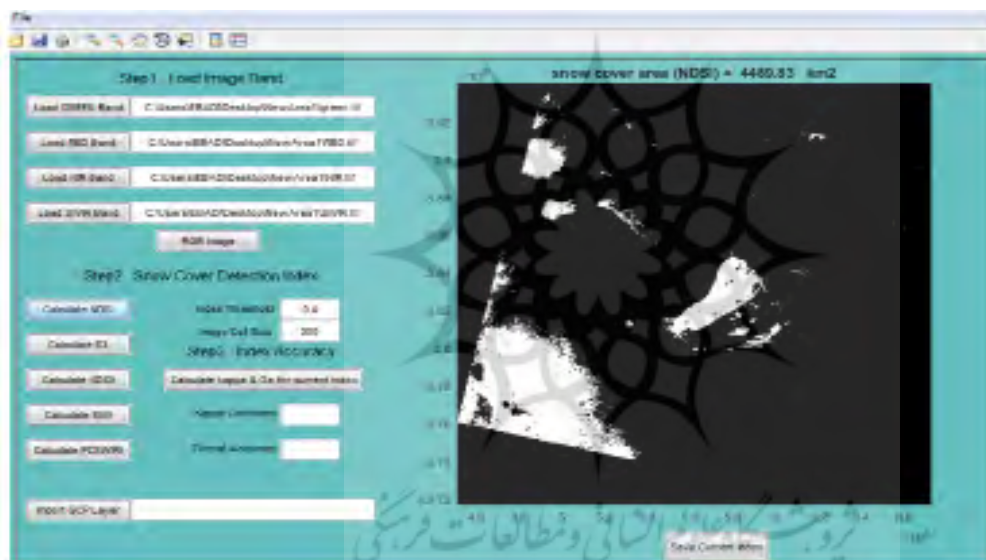
نگاره ۶: نتایج بصری شاخص‌های طیفی استخراج پوشش برف برای منطقه ارزیابی ۱



نگاره ۷: نتایج بصری شاخص‌های طیفی استخراج پوشش برف برای منطقه ارزیابی ۲

جدول ۲: نتایج ارزیابی دقت شاخص‌های سطح پوشش برف برای دو منطقه ارزیابی

منطقه ارزیابی ۱					
	NDSI	S3	NDSII	SWI	PCSWIRI
Kappa	0.85	0.85	0.85	0.85	0.96
Overall Accuracy	0.92	0.92	0.92	0.92	0.98
منطقه ارزیابی ۲					
	NDSI	S3	NDSII	SWI	PCSWIRI
Kappa	0.87	0.9	0.91	0.91	0.91
Overall Accuracy	0.94	0.95	0.96	0.96	0.96



نگاره ۸: نمایی از نرم‌افزار تهیه شده در ارتباط با محاسبه شاخص‌های برف و شاخص پیشنهادی

۴ - نتیجه‌گیری

بازتاب بالا در طیف‌های مرئی قابل آشکارسازی است، اما وجود پدیده‌هایی همچون آب (اختلاط طیفی در بخش جذب) و نمک (اختلاط طیفی در بخش انعکاس) موجب می‌شود تا سایر پدیده‌ها در کلاس برف قرار گیرند. این درحالی است که با اعمال آستانه برای شاخص‌های محاسبه شده؛ این مشکل چندان مرتفع نمی‌شود. با توجه به این مسئله و ویژگی منطقه مورد مطالعه؛ شاخص جدیدی برای رفع این مشکل توسط نگارندگان مقاله حاضر معرفی شده است. این شاخص جدید بر پایه استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و طیف مادون‌قرمز کوتاه تعریف شده است. استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و استخراج بیشترین

هدف از انجام این مطالعه؛ بررسی و ارزیابی دقت شاخص‌های طیفی سنجش‌ازدور در استخراج سطح پوشش برف در منطقه شمال‌غرب کشور و دو منطقه ارزیابی بوده است. برای این منظور از چهار شاخص پرکاربرد طیفی و یک شاخص پیشنهادی جدید بهره گرفته شد. چهار شاخص بررسی شده که شامل NDSI - S3 - NDSII - SWI هستند، همگی بر پایه بازتاب برف در طیف‌های مرئی و باندهای سبز (Green)، قرمز (Red)، مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و مادون‌قرمز کوتاه (SWIR) پایه‌ریزی شده‌اند. با وجود این‌که به کمک نسبت‌های باندهای پدیده برف به دلیل

(مطالعه موردی حوضه آبخیز بهار). فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی دانشگاه اهر، سال ۱۵، شماره ۵۰ صص ۱۲۵ - ۱۴۰.

۳- بزرگ‌نیا، و (۱۳۷۳) آمار چندمتغیره کاربردی (تألیف سریواستاوا کارتر)، انتشارات بنیاد فرهنگی رضوی.

۴- تصدیقیان، م؛ و رحیم‌زادگان، م (۱۳۹۶) ارزیابی و بهبود الگوریتم تشخیص پوشش برف از تصاویر سنجنده MODIS، تحقیقات منابع آب ایران، سال سیزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صص ۱۷۷-۱۶۳.

۵- خسروی، م؛ طاوسی، ت؛ رئیس‌پور، ک؛ و قلعه محمودی، م (۱۳۹۶) بررسی تغییرات سطوح پوشش برف در ارتفاعات زردکوه بختیاری با استفاده از سنجش‌ازدور. نشریه هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۳، پاییز ۱۳۹۶، صص ۴۴-۲۵.

۶- رایگانی، ب (۱۳۸۴). بررسی تغییرات سطح پوشیده از برف و برآورد رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در حوضه آبخیزداری سد زاینده رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۷- رئیس‌پور، ک (۱۳۹۷) پایش تغییرات پوشش برف ایران با به‌کارگیری الگوریتم NDSI در تصاویر مادیس. دومین کنفرانس ملی آب‌وهواشناسی ایران، ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۷.

۸- سلیمانی، ک؛ درویشی، ش؛ شکران، ف؛ و رشیدپور، م (۱۳۹۷) پایش تغییرات زمانی مکانی پوشش برف با استفاده از تصاویر MODIS. نشریه سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال دهم، پاییز ۱۳۹۷، شماره ۳.

۹- سیفی، ه؛ قربانی، ا (۱۳۹۸). برآورد سطح پوشش برف از طریق تکنیک های شیء‌گرا با استفاده از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS - مطالعه موردی: کوهستان سهند، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۰۹، بهار ۱۳۹۸، صص ۹۱-۷۷.

۱۰- فتاحی، ا؛ و وظیفه‌دوست، م (۱۳۹۰) برآورد دمای سطح برف و گستره پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس، مطالعه موردی حوضه‌های استان گلستان.

مقادیر واریانس بین باندی؛ باعث آشکار شدن اختلاف بین پدیده‌هایی چون آب و نمک نسبت به برف می‌شود. ارزیابی شاخص‌ها به کمک معیارهای ارزیابی تأییدکننده این مطلب است. علاوه بر این به‌علت استفاده از طیف مادون‌قرمز کوتاه؛ توده‌های ابر در تصویر در محاسبه شاخص استفاده نشده و در کلاس برف قرار نمی‌گیرند. برای ارزیابی بهتر شاخص معرفی‌شده پیشنهادی؛ از دو مجموعه تصویر بهره گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده توانایی و دقت بالاتر شاخص پیشنهادی در استخراج سطح برف؛ مخصوصاً در مناطقی که پدیده نمک وجود دارد؛ می‌باشد. این مطلب در ارزیابی تصاویر منطقه اصلی مطالعه (محدوده دریاچه ارومیه و کوهستان سهند) و تصویر ارزیابی ۱ (مربوط به محدوده دریاچه نمک) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور سهولت در محاسبه شاخص‌ها؛ نرم‌افزار کاربردی (.exe) برپایه نرم‌افزار Matlab نیز برای استخراج و ارزیابی دقت شاخص‌ها تهیه شده است؛ که با در دست بودن چهار کانال طیفی مورد نیاز؛ امکان محاسبه شاخص‌ها و علی‌الخصوص شاخص پیشنهادی (PCSWIRI) فراهم می‌باشد.

تقدیر و تشکر

این مقاله بخشی از یک طرح پژوهشی در سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح می‌باشد. بدین وسیله نویسندگان؛ از تمامی حمایت‌های مادی و معنوی این سازمان در روند انجام تحقیق نهایت قدردانی و تشکر را دارند.

۵ - منابع و مأخذ

۱- ادهمی، سلام (۱۳۸۴). کاربرد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه‌بندی پوشش برف، مطالعه موردی: حوضه آبی‌چای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

۲- ایلدرمی، ع؛ حبیب‌نژاد روشن، م؛ صفری شاد، م؛ و دلال اوغلی، ع (۱۳۹۴) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مادیس و شاخص NDSI به منظور تهیه نقشه پوشش برف

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

ارائه شاخص طیفی جدید به منظور استخراج سطوح برفی ... / ۹۳

19- Dietz, A. J., Hu, Z., & Tsai, Y. L. (2018). Remote Sensing of Snow Cover in The Alps-an Overview of Opportunities and Constraints. In Proceedings of the EO4Alps on the Alps from Space Workshop, Innsbruck, Austria (pp. 27-29).

20- Dixit, A., Goswami, A., & Jain, S. (2019). Development and Evaluation of a New "Snow Water Index (SWI)" for Accurate Snow Cover Delineation. *Remote Sensing*, 11(23), 2774.

21- Engman, E. T. Gurney, R. J. (1992). *Remote Sensing in Hydrology*, Chapman and Hall, pp.225.

22- Hall, D.K.; Riggs, G.A.; Salomonson, V.V (1995). Development of methods for mapping global snow-cover using moderate resolution spectroradiometer data. *Remote Sens. Environ.* 54, 127-140.

23- Immerzeel, W. W., Droogers, P., De Jong, S. M., & Bierkens, M. F. P. (2009). Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 113(1), 40-49.

24- Joseph, G.; Navalgund, R.R (1991) Remote sensing-physical basis and its evolution. In *Glimpses of Science in India*; National Academy of Sciences: Allahabad, India; pp. 357-385.

25- Li, X., (2008), "Cryospheric change in China", *Global and Planetary Change*, 62, 210-218.

26- Nagajothi, V., Priya, M. G., & Sharma, P. (2019). Snow Cover Estimation of Western Himalayas using Sentinel-2 High Spatial Resolution Data. *Indian Journal of Ecology*, 46(1), 88-93.

27- Negi, H.S.; Singh, S.K.; Kulkarni, A.V.; Semwal, B.S (2010) Field-based spectral reflectance measurements of seasonal snow cover in the Indian Himalaya. *Int. J. Remote Sens.* 2010, 31, 2393-2417.

28- Negi, H.S.; Kulkarni, A.V.; Semwal, B.S (2009) Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer. *Int. J. Remote Sens.* 30, 315-325.

29- Nolin, A., Liang, S., (2000), "Progress in bidirectional reflectance modeling and application for surface particulate media: snow and soil", *Remote Sensing Review*, 14: 307-342.

فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۶، شماره ۳.

۱۱- فتاحی، ا؛ و بهیار، م. ب (۱۳۹۰) بررسی الگوهای سینوپتیکی خشکسالی‌های فراگیر در استان چهارمحال و بختیاری، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۶ (۲): ۷۹-۱۰۰.

۱۲- قنبرپور، م ر؛ محسنی ساروی، م؛ تقفیان، ب؛ احمدی، ح و؛ عباس‌پور، ک (۱۳۸۴). تعیین مؤثر درانباشت و ماندگاری سطح پوشش برف و سهم ذوب برف در رواناب. مجله منابع طبیعی، شماره ۵۸-۳.

۱۳- کارآموز، م؛ و عراقی‌نژاد، ش (۱۳۹۳). هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، چاپ سوم.

۱۴- مشایخی، ت (۱۳۶۹). استفاده از هیدرولوژی برف در بررسی‌های منابع آب. دفتر بررسی‌های منابع آب، بخش آب‌های سطحی.

۱۵- معماراست، ف (۱۳۹۲) پردازش تصاویر ماهواره‌ای جهت ارزیابی و تشخیص سطح برف کوهستان سهند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گرایش مطالعات آب و خاک، دانشکده علوم انسانی، پردیس بین‌المللی ارس دانشگاه تبریز.

۱۶- یوسفی، ح؛ کیانی، آ؛ حقی زاده، ع؛ و یاراحمدی، ی (۱۳۹۷) استفاده از ضریب آلبیدوی سطحی مستخرج از الگوریتم سبال به منظور برآورد سطح پوشش برف (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز کشکان). نشریه اکوهیدرولوژی، دوره ۵، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صص ۶۳۷ - ۶۲۷.

17- Ahmad T, Chevallier, A, A, Tousif Bhatti, A, Pierre, Yves, M, M (2015), Snow Cover Trend and Hydrological Characteristics of the Astore River Basin (Western Himalayas) and its Comparison to the Hunza Basin (Karakoram Region), *Science of the Total Environment*, 505, 748-761.

18- Antonio, E, David; Juan Co-Lara, Pardo-I, Pulido-V (2016), Estimation of Snowpack Matching Ground-Truth Data and MODIS Satellite-Based Observations by Using Regression Kriging, EGU General Assembly, EPSC2016-14368.

30- Pearson, K (1901) On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. Philosophical Magazine 2 (6): 559–572.

31- Rango, A. (1977). Remote sensing: snow monitoring tool for today and tomorrow.

32- Salomonson, V.V.; Appel, I (2004) Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. Remote Sens. Environ. 2004, 89, 351–360.

33- Shimamura, Y.; Izumi, T.; Matsumaya, 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. Int. J. Remote Sens. 2006, 27, 4867–4884.

34- Shimamura, Y.; Izumi, T.; Nakayama, D.; Matsumaya, H (2003) Estimation of snow water equivalent and snowmelt water using the snow index -A case study in the Kurobe basin. J. Jpn. Soc. Hydrol. Water Resour. 2003, 16, 331–348.

35- Xiao, X.; Shen, Z.; Qin, X (2001) Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: A normalized difference snow and ice index. Int. J. Remote Sens. 2001, 22, 2479–2487.

36- Yang, D.B., (2005), “The Urumqi River source Glacier No. 1, Tianshan, China: changes over the past 45 years”, Geophysical Research Letters, 32: L21504. Doi: 10.1029/2005GL024178.

