



Research Article

Monitoring the spatial changes of the snow cover of Central Alborz using the SVM algorithm and landsat images

Hasan Jems¹, Daryosh Yarahmadi*¹ , Abuzar Nasiri², Hamid Mirhashem¹

1-Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2-Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Firouzabad Institute of Higher Education, Firouzabad, Iran

Received: 14 Feb 2022 Accepted: 7 Jul 2023

Extended Abstract

Introduction: The snows of the Alborz mountain range play an important role in providing underground and surface water for the settlements around it and the densely populated Caspian Plain. Global warming has caused changes in the atmospheric-climatic parameters of Iran. These changes will cause changes in the dependent variable, which is the snow cover of the high points of the Alborz Mountains. Its consequences can be accelerating the melting of snow, increasing the process of flooding of rivers and the destruction of habitats and settlements downstream. Therefore, the monitoring of Alborz snow area can be used in formulating water management strategies and sustainable development.

Materials and methods: In this study, the temporal-spatial variations of the Central Alborz snow cover on a seasonal scale for the years 1985 to 2020 were monitored using Landsat TM, ETM+ and OLI for 1985, 1995, 2005, 2015 and 2020. SVM algorithm was used to extract the snow cover.

Results and discussion: The average snow covers for winter, autumn, spring and summer were 1.19, 0.47, 0.14 and 0.004 million hectares, respectively. Snow covers have been declining from 1985 to 2020, reaching 1.98 million hectares in 2020 from 1.68 in 1985 to 1.68 in winter. In the autumn, it increased from 0.84 in 1985 to 0.15 million hectares in 2020. In the winter of 1985, snow started at an altitude of 1,500 meters, but by 2020 it reached 2,500 meters. In the summer, snow was more than 3,900 meters high in 1985, but peaks more than 4,200 meters in 2015 and 2020. The area of snow cover in Central Alborz has a decreasing trend, which has the highest rate in winter.

Conclusion: The results of this study showed that the accuracy of the support vector machine algorithm is more than 0.91% in the classification of Landsat images, this method can be used to extract snow patches; in such a way that it separated the shadow snow and cloud from the snow and identified the accumulation of snow in the valleys. Also using images with spatial resolution of 30 meters and applying classification algorithms for snow extraction is better than using NDSI index and MODIS images. On the other hand, the process of snow cover in central Alborz has been such that during 25 years, the area of snow has decreased from about 0.7 million hectares and a large amount of fresh water storage in Alborz has been lost.

Keywords: Alborz, SVM algorithm, Snow, Landsat.

Citation: Hasan Jems, Daryosh Yarahmadi, Abuzar Nasiri, Hamid Mirhashem (2023). Monitoring the spatial changes of the snow cover of Central Alborz using the SVM algorithm and landsat images, *Res. Earth. Sci.* 14(2), (17-31) DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103194

* Corresponding author E-mail address: d.yarahmadi@gmail.com



پایش تغییرات فضایی گستره برفی البرز مرکزی با استفاده از تابع طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و تصاویر ماهواره‌ای سری لندست

حسن جمس^۱، داریوش یاراحمدی^{۱*} , ابوذر نصیری^۲، حمید میرهاشمی^۱

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، مرکز آموزش عالی فیروزآباد، فارس، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶

چکیده گسترده

مقدمه: برف‌های رشته‌کوه البرز در تأمین آب‌های زیرزمینی و سطحی سکونتگاه‌های اطراف آن و جلگه‌ی پرجمعیت خزر نقش مهمی دارد. گرمایش جهانی موجب تغییراتی در فراسنج‌های جوی- اقلیمی کشور ایران شده است. این تغییرات موجب تغییراتی در متغیر وابسته که پوشش برفی نقاط مرتفع کوهستان البرز می‌باشد، خواهد شد. پیامدهای آن می‌تواند تسریع در ذوب برف‌ها، افزایش روند سیلابی‌شدن رودخانه‌ها و تخریب زیستگاه‌ها و سکونتگاه‌های پایین‌دست گردد. بنابراین پایش گستره برفی البرز می‌تواند در تدوین راهبردهای مدیریتی آب و توسعه پایدار مورد استفاده قرار بگیرد.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر، کوهستان البرز مرکزی به‌عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید. در این مطالعه، به‌منظور پایش تغییرات پهنه‌های برفی البرز مرکزی در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ در مقیاس زمانی فصلی، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای لندست، سنجنده‌های TM، ETM و OLI برای فصل‌های مربوطه در سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا تهیه گردید. به‌منظور استخراج پهنه‌های برفی از روی تصاویر لندست، از روش طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده گردید.

بحث و نتایج: مساحت پهنه‌های برفی در زمستان بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و کمترین آن نیز مربوط به تابستان است. در فصل زمستان، بیشترین مساحت پهنه‌های برفی در سال ۱۹۸۵ با ۱/۶۸ میلیون هکتار و کمترین آن در سال ۲۰۱۵ با ۰/۷۳ میلیون هکتار بود. در بهار بیشترین گستره برفی با ۰/۲۳ میلیون هکتار در سال ۱۹۹۵ و کمترین آن با ۰/۰۶ میلیون هکتار در سال ۲۰۱۵ بود. در تابستان میانگین آن ۰/۰۴ میلیون هکتار (۴ هزار هکتار) بوده و بیشترین پهنه با ۰/۰۱ میلیون هکتار (۱۰ هزار هکتار) در سال ۱۹۸۵ و کمترین آن با ۰/۰۱ میلیون هکتار (یک هزار هکتار) در سال ۲۰۲۰ مشاهده گردید. در پاییز میانگین پهنه‌های برفی طی ۳۵ سال حدود ۰/۴۷ میلیون هکتار (۴۷۰ هزار هکتار) بوده که بیشترین آن با مساحت ۰/۸۴ میلیون هکتار (۸۴۰ هزار هکتار) در سال ۱۹۸۵ و کمترین آن با ۰/۱۵ میلیون هکتار (۱۵۰ هزار هکتار) در سال ۲۰۲۰ بوده است. به‌طور کلی، بررسی روند سالانه پهنه‌های برفی بیان‌گر این است که از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ از مساحت آن کاسته شده و روند خطی آن نزولی می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که دقت بیش از ۰/۹۱ درصدی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی تصاویر لندست، می‌تواند از این روش برای استخراج پهنه‌های برفی استفاده نمود؛ به‌گونه‌ای که برف‌های سایه و ابر را نیز از برف جدا نموده و در دره‌ها نیز تجمع برف را شناسایی نمود. همچنین استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و اعمال الگوریتم‌های طبقه‌بندی برای استخراج برف بهتر از اعمال شاخص NDSI و همچنین تصاویر MODIS می‌باشد. از طرف دیگر روند پوشش برفی البرز مرکزی به‌گونه‌ای بوده که طی ۲۵ سال از حدود ۰/۷ میلیون هکتار از مساحت برف‌ها کاسته شده است و حجم بالایی از ذخیره آب شیرین در البرز از بین رفته است.

واژگان کلیدی: البرز، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، پهنه برفی، لندست.

استناد: حسن جمس، داریوش یاراحمدی، ابوذر نصیری، حمید میرهاشمی (۱۴۰۲). پایش تغییرات فضایی گستره برفی البرز مرکزی،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۴ (۲)، (۳۱-۱۷)، ۱۰۳۱۹۴. DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103194

مقدمه

پوشش‌های برفی در نواحی کوهستانی، بزرگ‌ترین منبع تأمین آب‌شیرین برای اکوسیستم‌های محیطی است (Wipf et al, 2015)؛ به‌گونه‌ای که در حوزه‌های آبریز، بیش از ۹۰ درصد رواناب‌های آن، از ذوب برف‌های کوهستان تأمین شده و یا این که کوهستان‌ها بیش از ۲ برابر دشت‌های مسطح در تأمین آب زیرزمینی و سطحی نقش دارند (Voigt et al, 2010). در کوهستان عرض‌های میانی، اغلب بارش‌های پاییزه و زمستانه به شکل برف بوده و موجب انباشت آب‌شیرین و قابل استحصال به صورت منجمد در کوهستان می‌شود. در این شرایط، آب‌شیرین منجمدشده، با اوج‌گیری دمای هوا در اواسط فصل بهار شروع به ذوب شدن نموده و به صورت رواناب پیوسته از کوهستان و نقاط مرتفع در جهت شیب زمین به سمت مناطق پایین دست جریان می‌یابد و آب قابل استفاده برای اکوسیستم‌های پایین دست، کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی را تأمین می‌نماید (Musselman et al, 2018). بنابراین کوهستان‌های برفی نه تنها به‌عنوان مخزن تأمین بهینه آب برای اکوسیستم‌های محیطی محسوب می‌شود، بلکه از هدر رفتن آب به شکل سیلاب و همچنین تخریب سازه‌ها و چشم‌اندازهای طبیعی و انسانی نیز جلوگیری می‌نماید (Kwon et al, 2016). مکانیسم تشکیل برف و انباشت آن در نقاط کوهستانی دارای مولفه‌های اصلی و بنیادی است که تغییر در هر یک از این مولفه‌ها، موجب تغییر در تعادل برف می‌گردد. در واقع، ارتباط فضایی بین برف و مولفه‌های محیطی وجود دارد که به‌عنوان متغیر مستقل شناخته شده و بر برف که متغیر وابسته است، تأثیر می‌گذارد (Horner et al, 2020). از مهم‌ترین متغیرهای مستقل در این رابطه فضایی می‌توان به تابش خورشید و نحوه برخورد آن با پوشش برفی، عرض جغرافیایی، ارتفاع و توپوگرافی کوهستان، دامنه‌ای که برف بر آن انباشته شده است، شیب، دما و روند تغییرات زمانی گرمایش هوا، میزان بارش و رژیم برفی، فشار اتمسفری، بخار آب جوی و تبخیر از سطح برف اشاره نمود (Shafiq et al, 2019). تغییر در هر یک از این مولفه‌ها، بر مشخصات و ویژگی‌های برف نیز اثر می‌گذارد (tang et al, 2017). تغییر در ذخیره و گستره برف‌های کوهستانی بر منابع آبی حوزه‌های آبریز اثر گذاشته و چرخه بیلان آبی و اکوسیستم‌های محیطی را موثر می‌سازد (Ohashi et al,

2016). پایش پوشش‌های برفی به‌ویژه در نواحی کوهستانی می‌تواند این تغییرات را شناسایی نموده و میزان ذخیره برف و منابع آبی را محاسبه نماید. پایش پوشش‌های برفی از طریق علم سنجش از دور قابل انجام است و پژوهشگران با استفاده از داده‌های خروجی از سنجنده‌ها قادر به استخراج پهنه‌های برفی کوهستان هستند (Dong and Menzel, 2020). امروزه در مدیریت منابع آبی، استفاده روزافزون از داده‌های اپتیکی با هدف استخراج و تحلیل پهنه‌های برفی کمک قابل‌توجهی به علم مدیریت آب نموده است. سنجنده‌های متعددی به‌منظور پایش تغییرات جوی و علوم زمینی طراحی شده و به فضا ارسال گردیده است. ماهواره MODIS با توجه به قابلیت‌های اپتیکی و مکانی متنوعی که در باندهای مختلف دارد، کاربرد زیادی در بحث پوشش‌های برفی داشته و توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang et al, 2020). در مناطقی که نیاز به استخراج پهنه‌های برفی با دقت بالاتر نیاز است، سنجنده‌هایی که تفکیک مکانی بهتری نسبت به سنجنده‌های ماهواره MODIS دارند، توانایی بیشتری داشته که یکی از مهم‌ترین ماهواره‌ها، LANDSAT بوده که توان تفکیک مکانی آن ۳۰ متر است و می‌تواند حتی در یک دامنه کوهستانی و دره‌ها نیز پهنه برفی را استخراج نماید (Wang et al, 2020). یکی از مهم‌ترین شاخص‌های استخراج برف از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص NDSI است که به دلیل انعکاس پایین برف در باندهای مادون قرمز و انعکاس بالا در باندهای مرئی، این شاخص می‌تواند در تشخیص پوشش برف از سایر پدیده‌ها بسیار مفید باشد (عفیفی، ۱۴۰۰). در شبه جزیره برانزویک در جنوب پاتاگونیا آرژانتین، پژوهشگران برای استخراج پهنه‌های برفی در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ از اعمال شاخص طیفی NDSI بر روی تصاویر MODIS استفاده نموده و نشان دادند که این شاخص توانایی استخراج پهنه‌های برفی را داشته و طی بازه زمانی مربوطه، مساحت پهنه‌های برفی ۱۹ درصد کاهش یافته است (Aguirre et al, 2018). در جنوب مرکزی کوهستان بریتیش کلمبیا در آمریکا، پهنه‌های برفی با شاخص NDSI استخراج شد که نتایج نشان داد تصاویر LANDSAT قابلیت بهتری در شناسایی پهنه‌های برفی دارند، اما تصاویر MODIS به دلیل تفکیک مکانی پایین در نواحی سایه دارای خطاهای زیادی بوده و نمی‌تواند خروجی

جهانی موجب تسریع فرایند ذوب برف‌های این کوهستان شده و بررسی آن با تصاویر ماهواره‌ای از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۱ نشان می‌دهد که سطح پوشش‌های برفی این کوهستان روند کاهشی دارد و هرساله با افزایش دما، سطح پوشش برفی زردکوه بختیاری کاهش می‌یابد (خسروی و همکاران، ۱۳۹۶). در بازه زمانی ۱۶ ساله (۲۰۱۵-۲۰۰۰) مساحت سطوح برفی در مناطق مرتفع استان‌های آذربایجان غربی و شرقی و همچنین استان اردبیل روند کاهشی داشته است که این موضوع باعث کاهش ذخیره برفی در حوضه آبریز منطقه شده است (فتاحی و مقیمی، ۱۳۹۸). تصاویر ماهواره‌ای حاصل از سنجنده‌های MODIS و همچنین تصاویر NOAA-AVHRR کاربرد زیادی در سنجش برف‌های کوهستانی دارد که نتایج استفاده از آن در کوهستان البرز طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۶ بیان‌گر این است که بیش‌ترین مساحت برف در البرز طی ماه آوریل سال ۲۰۱۵ با مقدار ۱۲۰۵۹ کیلومتر مربع و کم‌ترین مساحت برف در ژوئن ۲۰۰۸ با مقدار ۳۳ کیلومتر مربع دیده شده است (پاراحمدی و همکاران، ۱۳۹۹). نتایج حاصل از پایش سطح برف در حوضه سد شاه‌چراغی در دامغان نشان داد که استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR-3 در حدود ۴ درصد سطح برف را بیش از سنجنده AVHRR-2 برآورد می‌کند (بنی‌حبیب و همکاران، ۱۳۹۵). وفاخواه و همکاران (۱۳۹۰) نیز به منظور مقایسه سطح پوشش برف در تصاویر ماهواره نوآ و سنجنده MODIS در حوضه آبخیز طالقان، از ۱۴ تصویر هم‌زمان ماهواره طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ استفاده کردند و نشان دادند که خطای برآورد مساحت پوشش برف در ماهواره نوآ نسبت به سنجنده مودیس، در حدود ۵۷/۹۷ درصد و در دامنه بین ۳/۸۷ درصد و ۲۶۷/۴۲ درصد است و از نظر هم‌پوشانی برف استخراج شده نیز هر دو تصویر هم‌پوشانی بالایی دارند. دینی و همکاران (۱۳۸۶) به‌منظور پایش و اندازه‌گیری سطوح برفی کوهستان البرز مرکزی از داده‌های ماهواره‌ای NOAA سنجنده AVHRR و ماهواره TERRA سنجنده MODIS و به کارگیری دو روش قراردادن آستانه در داده‌های AVHRR و MODIS استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از داده‌های AVHRR مساحت سطوح برف‌گیر ۵۳۰۳ کیلومتر مربع و با استفاده از داده‌های MODIS سطوح برف-گیر البرز مرکزی با پوشش کامل، ناقص و پوشش ابر به

قابل قبولی داشته باشد (Mityok et al, 2018); اما در حوضه رودخانه‌ای ایندوس که منابع آبی خود را از برف‌های هیمالیا تأمین می‌نماید، نتایج برف‌سنجی با سنجنده‌های MODIS و اعمال شاخص NDSI برای سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ نشان داد که آستانه ۰/۳۴ برای این شاخص، در هیمالیا توانایی استخراج برف را دارد (Ali et al, 2020). در کوهستان قره‌قورام پژوهشگران به‌منظور استخراج پهنه‌های برفی از الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصاویر LANDSAT روش شیء‌گرا و پیکسل‌گرا استفاده نموده و نشان دادند که ضریب کاپا حدود ۰/۹۳ بوده و دقت طبقه‌بندی مناسب است (Wang et al, 2020). در فلات تبت، پژوهشگران به‌منظور شناسایی و جداسازی آب و برف از شاخص NDSI بر روی تصاویر LANDSAT استفاده نموده و دقت عملکرد آن ۹۵ درصد بود و این شاخص را برای جداسازی آب و برف معرفی مناسب ارزیابی نمودند (Yan et al, 2020). در کوهستان جنوبی ترکیه که برف‌های آن سرچشمه‌های رودخانه دجله و فرات است، با شاخص NDSI بر روی تصاویر MODIS استخراج گردید و نتایج نشان داد که این تصاویر با پیکسل-های ۵۰۰ متری نمی‌تواند برای پایش تغییرات برف طی چندین سال کاربرد داشته باشد (Abdulkadhim, 2019). در ارتفاعات آلمان و اتریش، پژوهشگران به‌منظور استخراج پهنه‌های برفی از اعمال شاخص NDSI بر روی تصاویر LANDSAT استفاده نمودند، اما اعتبار این شاخص ۲۴ درصد بود که نتوانست پهنه‌های برفی سایه و جنگل را شناسایی نماید؛ به همین دلیل این پژوهشگران با طبقه‌بندی تصاویر لندست، پهنه‌های برفی را با ضریب کاپای ۰/۹۶ استخراج نمودند (Härer et al, 2018). در کوهستان مدیترانه‌ای ترکیه، پژوهشگران با استفاده از سنجنده‌های لندست و طبقه‌بندی تصویر، پهنه‌های برفی را استخراج طی سال‌های مورد مطالعه، پایش نمودند و ضریب کاپای طبقه‌بندی ۰/۹۳ تا ۰/۹۷ بود (Donmez et al, 2021). پوشش‌های برفی کوهستان منبع اصلی آب در حوضه رودخانه بلخاب در رودخانه شمالی افغانستان است که پژوهشگران به‌منظور استخراج و پایش برف از تصاویر LANDSAT OLI 8 استفاده نموده و در روزهایی که پوشش ابری کمتر از ۲۰ درصد بوده، نتایج مناسبی دارد (Wahidullah, 2020). زردکوه بختیاری یکی از کوهستان‌های مرتفع زاگرس است؛ اما تغییرات آب‌وهوایی و گرمایش

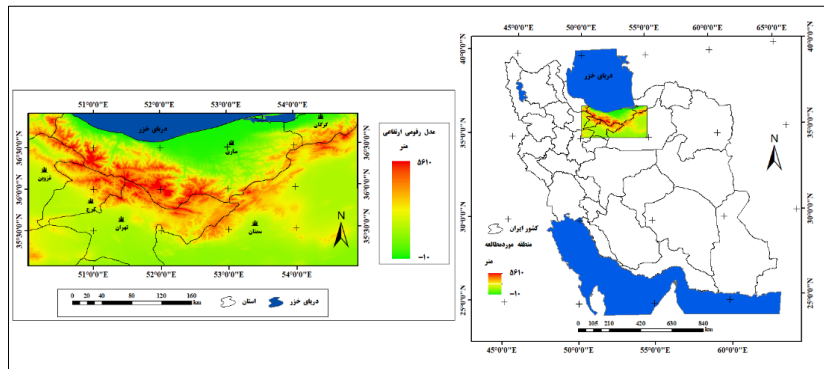
سکونتگاه‌های اطراف آن و جلگه پرجمعیت خزر نقش مهمی دارد و رودخانه‌های دائمی دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز هم‌چون بابل‌رود، چالوس، کرج، کن و هزار از برف‌های نقاط مرتفع البرز تغذیه می‌شوند. گرمایش جهانی موجب تغییراتی در فراسنج‌های جوی - اقلیمی کشور ایران شده است؛ به گونه‌ای که دما و تبخیر افزایش یافته و بارش به‌ویژه برف کاهش یافته است. این تغییرات که به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شوند، موجب تغییراتی در متغیر وابسته که پوشش برفی نقاط مرتفع کوهستان البرز می‌باشد، خواهد شد. پیامدهای آن می‌تواند تسریع در ذوب برف‌ها، افزایش روند سیلابی شدن رودخانه‌های حوزه‌های آبریز منطقه مورد مطالعه و تخریب زیستگاه‌ها و سکونتگاه‌های پایین دست گردد. بنابراین پایش گستره برفی البرز می‌تواند در تدوین راهبردهای مدیریتی آب و توسعه پایدار مورد استفاده قرار بگیرد.

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر، کوهستان البرز مرکزی که یکی از مناطق برف‌گیر ایران می‌باشد، به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید. از لحاظ جغرافیایی، محدوده مورد مطالعه در چارچوب جغرافیایی ۳۵ تا ۳۷ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۵ درجه طول شرقی قرار دارد و به شکل یک پهنه در ابعاد ۲۱۰×۴۴۲ کیلومتر در شمال کشور ایران و نواحی جنوبی دریای خزر قرار دارد. از لحاظ ارتفاعی، البرز مرکزی در دامنه ۱۵۰۰ تا ۵۶۷۱ متری از سطح دریا قرار دارد. دامنه البرز به سمت شمال و دریای خزر، جلگه خزری قرار دارد که بیشترین عرض جلگه در دشت ساری قرار گرفته است. دامنه جنوبی البرز مرکزی به فلات مرکزی ایران متصل است که شهرهای سمنان، شاهرود، تهران، کرج و قزوین در دامنه جنوبی آن گسترده شده‌اند (شکل ۱).

جبهه شمالی البرز را جنگل‌های سبز پوشانده و جبهه جنوبی آن خشک است که دلیل اصلی آن مانع توپوگرافی کوهستان البرز در برابر رطوبت دریای خزر است که از نفوذ آن به فلات ایران ممانعت می‌نماید. بلندترین قله البرز، کوه دماوند با ارتفاع ۵۶۱۰ متر است و دیگر قله‌های مرتفع آن شامل علم‌کوه، خلنو، آزادکوه، توچال و پهنه حصار می‌باشد. در البرز مرکزی میانگین روزهای برفی حدود ۱۰ روز در سال که عمدتاً در اواخر پاییز و زمستان می‌بارد.

ترتیب ۹۹۴، ۲۵۷۰ و ۲۵۰۵ کیلومتر مربع محاسبه گردید. در اغلب مطالعات صورت گرفته در پایش و استخراج پهنه‌های برفی، از تصاویر سنجنده MODIS استفاده گردیده است و یا اینکه با اجرای شاخص طیفی NDSI بر روی تصاویر LANDSAT، پهنه‌های برفی را استخراج نموده‌اند. تصاویر MODIS برای پهنه‌های برفی در محدوده‌های جغرافیایی کلان و بسیار وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای بررسی تغییرات پهنه‌های برفی با دقت بالا و در توزیع مکانی کاربرد زیادی ندارد. از طرف دیگر به‌منظور افزایش دقت در پیکسل‌های برفی، تصاویر LANDSAT به دلیل وضوح بالاتر (پیکسل‌های ۳۰ متری) نسبت به تصاویر MODIS که اندازه‌ی پیکسل‌های آن ۵۰۰ متر است، کاربرد بیشتری دارد. در تصاویر LANDSAT نیز پژوهشگران از شاخص NDSI برای استخراج پهنه‌های برفی استفاده نموده‌اند، اما این الگوریتم در استخراج پیکسل‌های برفی در نواحی دامنه‌ای که در سایه قرار گرفته‌اند و همچنین ابرناکی تصویر، بسیار ناقص بوده و ضعیف عمل می‌کند. الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصویر به‌ویژه الگوریتم دو کلاسه، به دلیل استفاده از نقاط آموزشی توسط کاربر، در استخراج پهنه‌های برفی در نواحی کوهستانی، دامنه‌ها و قرارگیری در سایه و حتی لکه‌های ابری بسیار دقیق عمل کرده و خطای شناسایی برف در این روش بسیار کم بوده و یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در استخراج پهنه‌های برفی می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای با روش‌های دو کلاسه‌ی برفی و غیربرفی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، یک نوآوری در استخراج پهنه‌های برفی در کوهستان البرز مرکزی است که دارای ناهمواری زیادی می‌باشد. اگرچه پروداکت‌های آماده برای برف‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما این پروداکت‌ها نیز عمدتاً از شاخص NDSI برای استخراج پیکسل‌های برفی استفاده می‌کنند که در این پژوهش نشان داده شده است که این شاخص در مناطق کوهستانی با ناهمواری متنوع و قرارگیری پیکسل‌های برفی در دامنه‌ها، دارای خطای زیادی بوده و نمی‌تواند به‌طور دقیق، پیکسل‌های برفی را استخراج نماید. به همین دلیل در این پژوهش از روش طبقه‌بندی دو کلاسه با روش ماشین‌ردار پشتیبان برای استخراج پهنه‌های برفی البرز مرکزی استفاده گردید. برف‌های رشته کوه البرز در تأمین آب‌های زیرزمینی و سطحی



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (البرز مرکزی)

مواد و روش‌ها

به منظور استخراج پهنه‌های برفی، از تصاویر ماهواره‌ای سری LANDSAT استفاده گردید و با اجرای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) بر روی تصاویر، پهنه‌های برفی استخراج گردید که به شرح ذیل بررسی شده است.

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

تصاویر ماهواره‌ای سری LANDSAT برای استخراج پهنه‌های برفی در کوهستان البرز مرکزی مورد استفاده قرار گرفت؛ به گونه‌ای که از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا، تصاویر ماهواره‌ای سری لندست شامل سنجنده‌های TM، ETM⁺ و OLI برای فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان در سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ دانلود گردید که برای سال ۱۹۸۵ تصاویر سنجنده TM برای روزهای ۱۹۸۵/۰۲/۱۹، ۱۹۸۵/۰۶/۱۱، ۱۹۸۵/۰۸/۱۴ و ۱۹۸۵/۱۱/۲۰؛ برای سال ۱۹۹۵ تصاویر ETM برای روزهای ۱۹۹۵/۰۱/۱۶، ۱۹۹۵/۰۵/۲۰، ۱۹۹۵/۰۹/۰۳ و ۱۹۹۵/۱۲/۱۱؛ برای سال ۲۰۰۵ تصاویر ETM برای روزهای ۲۰۰۵/۰۲/۱۳، ۲۰۰۵/۰۵/۱۴، ۲۰۰۵/۰۸/۱۷ و ۲۰۰۵/۱۲/۱۷؛ برای سال ۲۰۱۵ تصاویر OLI برای روزهای ۲۰۱۵/۰۲/۱۴، ۲۰۱۵/۰۵/۲۱، ۲۰۱۵/۰۸/۱۳ و ۲۰۱۵/۱۱/۲؛ برای سال ۲۰۲۰ تصاویر OLI برای روزهای ۲۰۲۰/۰۱/۱۲، ۲۰۲۰/۰۵/۱۸، ۲۰۲۰/۰۹/۱۱ و ۲۰۲۰/۱۱/۵ تهیه گردید. محدوده مورد مطالعه در گستره چهار تصویر ماهواره‌ای قرار گرفته که برای چسباندن تصاویر و یکی کردن آن‌ها برای محدوده مورد مطالعه از تابع Seamless Mosaic در نرم‌افزار ENVI استفاده گردید. برای هر فصل، یک تصویر جامع از چسباندن چهار تصویر به دست آمد و بر روی این محدوده پردازش‌های تحلیلی انجام شد. با توجه به این که در فصل زمستان روزهای ابری زیاد

است، سعی گردید از تصاویری استفاده شود که میزان ابرناکی آن کمتر از ۳۰ درصد باشد.

پیش پردازش و طبقه‌بندی تصاویر برای استخراج پهنه‌های برفی

پس از دانلود تصاویر سری لندست، عملیات پیش پردازش تصاویر شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریکی، طبقه‌بندی تصاویر برای استخراج پهنه‌های برفی و غیر برفی با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان انجام شد که به شرح ذیل بررسی شده است. پس از این که برای هر فصل از سال‌های مورد نظر، یک تصویر جامع تهیه گردید، عملیات پس-پردازش شامل تصحیحات رادیومتریکی و هندسی بر روی تصاویر انجام شد. اگرچه تصاویر لندست تصحیح هندسی شده است، اما به دلیل کوهستانی بودن منطقه و همچنین طبقه‌بندی تصویر و استخراج پهنه‌های برفی، تصحیحات هندسی بر پایه نقاط کنترلی در سطح زمین با دستگاه GPS، لایه‌های برداری جاده‌ها و آبراهه‌های اصلی روی تصویر لندست قرار داده شد. با اجرای این روش، تصحیح هندسی تصاویر صحت‌سنجی شد و نتایج آن با شاخص RMSE ارزیابی شد. در ادامه به منظور استخراج پهنه‌های برفی از روی تصاویر لندست، از روش طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده گردید. اگرچه شاخص NDSI نیز برای استخراج پهنه‌های برفی با کمترین زمان انجام می‌شود، اما این شاخص برای لکه‌های ابری و پهنه‌های برفی در نواحی سایه، کاربردی نیست و خطاهای زیادی در این پهنه‌ها به وجود می‌آورد، به گونه‌ای که در این پژوهش ابتدا از شاخص NDSI برای استخراج پهنه‌های برفی استفاده شد، اما مقایسه آن با تصویر واقعی لندست نشان داد که دامنه‌های برف‌گیری که در سایه، دره-ها و لکه‌های ابری قرار دارد، در خروجی شاخص NDSI به

دره‌ها زیاد باشد تا این‌که پهنه‌های برفی در دره‌ها و دامنه‌های کوهستانی با برف‌های قله‌های شبیه باشد و در یک طبقه به عنوان طبقه برفی قرار بگیرد. ماشین بردار پشتیبان یک روش کلاسه‌بندی الگو است که اولین بار توسط ویپنیک معرفی شد (Burgess, 1998). ماشین بردار پشتیبان یا SVM در واقع یک طبقه‌کننده دودویی است. در مورد دو کلاس که در این مطالعه کلاس یک (پهنه برفی) و کلاس صفر (پهنه غیر برفی) بود، روش SVM سعی دارد یک ابرصفحه ایجاد نماید که فاصله هر کلاس را تا ابرصفحه حداکثر می‌نماید. داده‌های نقطه‌ای که به ابرصفحه نزدیک‌ترند، برای اندازه‌گیری این فاصله به کار می‌روند. از این‌رو، این داده‌های نقطه‌ای، بردارهای پشتیبان نام دارند (Vapnik, 1991). در شکل ۲، دو کلاس و بردارهای پشتیبان مربوط به آن‌ها نشان داده شده است. داده‌ها از دو کلاس برفی و غیر برفی تشکیل شده و کلاس‌ها در مجموع دارای $x_i, i = 1, \dots, L$ نقطه آموزشی می‌باشند که x_i یک بردار است. این دو کلاس با $y_i = \pm 1$ برچسب زده می‌شوند. برای محاسبه مرز تصمیم‌گیری دو کلاس کاملاً جدا از هم، از روش حاشیه بهینه استفاده می‌شود (Huang et al, 2002). در این روش مرز خطی بین دو کلاس به گونه‌ای محاسبه می‌شود که:

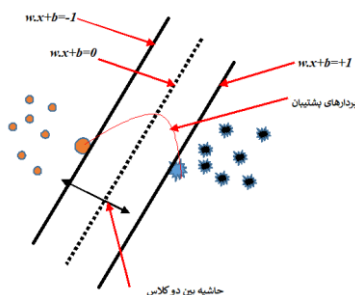
رابطه (۱)

$$\left[y_i \frac{(W \cdot X_i + b)}{|W|} \right]$$

تمام نمونه‌های کلاس +۱ در یک طرف مرز و تمام نمونه‌های کلاس -۱ در طرف دیگر مرز واقع شوند.

(۱) مرز تصمیم‌گیری به گونه‌ای است که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی هر دو کلاس از یک‌دیگر در راستای عمود بر مرز تصمیم‌گیری تا جایی که ممکن است حداکثر شود.

عنوان پهنه‌های غیربرفی شناسایی شده است. شاخص طیفی NDSI بر مبنای این واقعیت که برف در باند مرئی دارای بازتابندگی بالا و در باند مادون قرمز میانی دارای بازتابندگی پایین می‌باشد، برای تشخیص برف از مناطق فاقد برف به کار می‌رود و تنها از رفتار طیفی دو باند برای تشخیص برف استفاده می‌کند، اما در تکنیک طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست برای استخراج برف، از رفتار طیفی ترکیبی از باندهای حرارتی و مرئی استفاده می‌شود که برف را از ابر و دیگر نقاط سفیدرنگ جدا می‌کند. همچنین با توجه به انتخاب نقاط آموزشی، برف در سایه و یا برف در دره‌ها را نیز با توجه به نوع طبقه‌بندی نظارت شده، می‌توان به عنوان برف شناسایی کرد. بنابراین، مناسب‌ترین روش برای استخراج پهنه‌های برفی، طبقه‌بندی تصاویر و تهیه نقشه کاربری برفی و غیربرفی بود که استخراج نقاط آموزشی برف باعث شد تا نقشه خروجی به خوبی پهنه‌های برفی را تشخیص نماید. از بین توابع طبقه‌بندی نیز تابع ماشین بردار پشتیبان (SVM) بیشترین دقت را در طبقه‌بندی داشته و به این دلیل از این تابع به منظور طبقه‌بندی تصاویر و استخراج پهنه و لکه‌های برفی در البرز مرکزی استفاده شد. در ضمن، در انتخاب تصاویر و روزهای برفی، سعی شد تا از تصاویری استفاده شود که کمترین میزان ابرناکی را داشته باشد. از دیدگاه علم آب‌وهواشناسی همدید، پس از وقوع بارش‌های برفی، به دلیل پایداری هوا ناشی از آنتی‌سیکلون‌های سرد، اتمسفر منطقه پایدار گردیده و میزان ابرناکی نیز به حداقل می‌رسد. در این پژوهش نیز پس از وقوع بارش‌های برفی و به حداقل رسیدن میزان ابرناکی، روزهای مورد مطالعه برای استخراج پهنه‌های برفی انتخاب گردید. در استخراج پهنه‌های برفی در دره‌ها و دامنه‌های کوهستانی که اثر ارتفاع و ناهمواری در برف‌ها تأثیرگذار است، سعی گردید که تعداد نقاط آموزشی در



شکل ۲: مرز خطی بهینه برای حالتی که دو کلاس کامل از یک‌دیگر جدا هستند.

برای هر کاربری) و N : مجموع کل مشاهدات ماتریس طبقه‌بندی می‌باشد. در محاسبه ضریب کاپا، علاوه بر پیکسل‌هایی که درست طبقه‌بندی شده‌اند، پیکسل‌هایی که نادرست طبقه‌بندی شده‌اند نیز دخالت داده می‌شود. از این رو معیار مناسبی برای مقایسه نتایج طبقه‌بندی‌های مختلف می‌باشد. پس ضریب کاپا برای صحت‌سنجی طبقه‌بندی معیار مناسبی بوده و نشان می‌دهد که طبقه‌بندی تصویر با دو کلاس پهنه‌های برفی و غیر برفی چقدر با نقاط آموزشی و واقعیت مطابقت دارد.

به همین دلیل در این مطالعه از ضریب کاپا برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی دو کلاسه تصاویر و صحت‌سنجی آن استفاده گردید. بنابراین، در این پژوهش برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در البرز مرکزی به منظور استخراج پهنه‌های برفی از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد و لایه‌های آن در نرم‌افزار ArcGIS به نقشه برفی تبدیل شد. سپس مساحت پهنه‌های برفی در فصول چهارگانه برای سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ در جدول توصیفی ArcGIS به دست آمد و نمودارهای ستونی برای آنها ترسیم گردید (شکل ۳).

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به دلیل ایجاد مرز خطی بهینه با نقاط آموزشی محدود که همان بردارهای پشتیبان هستند، کلاس‌های برف را به راحتی از کلاس‌های غیر برفی جدا می‌نماید. این الگوریتم برای نقشه‌های دو کلاسه که در این پژوهش کلاس برفی و غیر برفی است، بسیار کاربردی بوده و با نقاط آموزشی محدود، نقشه طبقه‌بندی را ایجاد می‌کند.

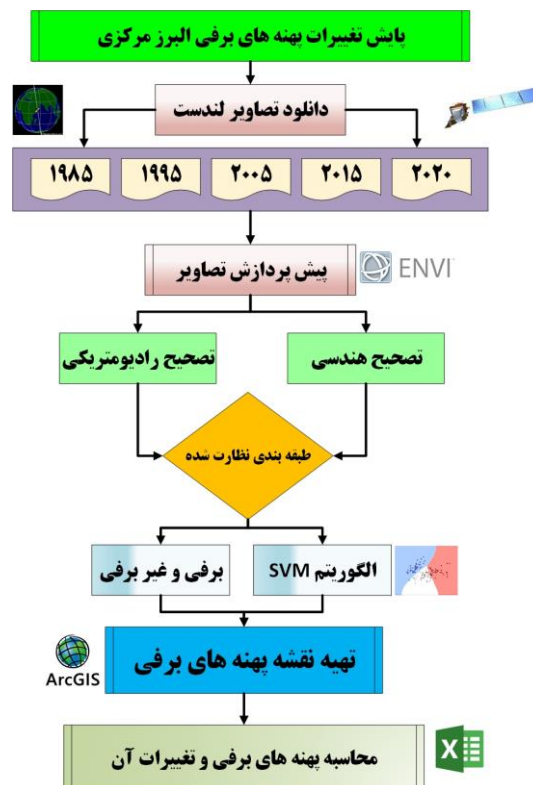
ضریب کاپا

با توجه به این که برای نهایی نمودن نقشه کاربری اراضی، باید همه شاخص‌های دقت طبقه‌بندی با یک و یا چند شاخص آماری معتبر برازش داده شود. ضریب کاپا از جمله روش‌های آماری می‌باشد که با رابطه ۲ قابل بیان است.

رابطه ۲)

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i0} \times X_{0i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i0} \times X_{0i})}$$

K : شاخص کاپا، r تعداد ردیف ماتریس طبقه‌بندی، X_{ii} : تعداد مشاهدات در ردیف و ستون (محور اصلی ماتریس)؛ X_{i0} : مجموع مشاهدات در ردیف (مجموع ردیف برای هر کاربری)؛ X_{0i} : مجموع مشاهدات در ستون (مجموع ستون



شکل ۳: مراحل روش کار به منظور تحلیل پهنه‌های برفی در البرز مرکزی

بحث و نتایج

جدول ۱ ارائه شده است که در ماه‌های گرم سال (اواخر فصل بهار، تابستان و اوایل پاییز) شاخص RMSE بیان‌گر تصحیح بسیار دقیق تصاویر لندست با واقعیت هندسه زمین است.

میزان صحت تصحیح هندسی تصاویر لندست برای برف-سنجی کوهستان البرز که با نقاط کنترلی به دست آمد، در

جدول ۱: میزان شاخص RMSE تولید شده در فرآیند تصحیح هندسی تصاویر لندست

ردیف	تاریخ تصویر لندست	تعداد نقاط کنترلی	RMSE
۱	۱۹۸۵/۰۲/۱۹	۱۷	۰/۹۷۱
۲	۱۹۸۵/۰۶/۱۱	۱۱	۰/۹۱۳
۳	۱۹۸۵/۰۸/۱۴	۲۶	۰/۸۱۱
۴	۱۹۸۵/۱۱/۲۰	۲۹	۰/۷۹۸
۵	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	۱۸	۰/۸۲۱
۶	۱۹۹۵/۰۵/۲۰	۱۳	۰/۹۸۵
۷	۱۹۹۵/۰۹/۰۳	۲۱	۰/۹۱۱
۸	۱۹۹۵/۱۲/۱۱	۲۲	۰/۸۱۳
۹	۲۰۰۵/۰۲/۱۳	۱۸	۰/۷۸۵
۱۰	۲۰۰۵/۰۵/۱۴	۱۶	۰/۹۳۶
۱۱	۲۰۰۵/۰۸/۱۷	۱۹	۰/۹۷۷
۱۲	۲۰۰۵/۱۲/۱۷	۲۸	۰/۷۶۹
۱۳	۲۰۱۵/۰۲/۱۴	۳۳	۰/۷۵۸
۱۴	۲۰۱۵/۰۵/۲۱	۱۴	۰/۹۶۳
۱۵	۲۰۱۵/۰۸/۱۳	۲۷	۰/۹۹۱
۱۶	۲۰۱۵/۱۱/۲	۱۹	۰/۸۶۱
۱۷	۲۰۲۰/۰۱/۱۲	۱۵	۰/۷۹۲
۱۸	۲۰۲۰/۰۵/۱۸	۱۶	۰/۹۱۸
۱۹	۲۰۱۵/۰۹/۱۱	۲۲	۰/۹۲۰
۲۰	۲۰۲۰/۱۱/۱۵	۲۷	۰/۷۴۸

دست آمده است. بیشترین میزان ضریب کاپا مربوط به فصول بهار و تابستان و کمترین آن در زمستان و پاییز بوده که به دلیل وجود ابر در زمستان و پاییز، دقت طبقه‌بندی و استخراج برف کمتر از بهار و تابستان بود (جدول ۲).

اعتبار طبقه‌بندی تصاویر سری لندست با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان دو کلاسه با ضریب کاپا محاسبه گردید که نتایج آن نشان داد مقدار این ضریب بیش از ۰/۹۱ بوده و نشان می‌دهد طبقه‌بندی بر مبنای نقاط آموزشی صحیح به

جدول ۲: میزان عددی ضریب کاپا برای صحت‌سنجی طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

سال	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
۱۹۸۵	۰/۹۱	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۳
۱۹۹۵	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۴
۲۰۰۵	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۱
۲۰۱۵	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۳
۲۰۲۰	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۱

مساحت پهنه‌های برفی در البرز مرکزی

کمترین آن نیز مربوط به تابستان است. در فصل زمستان، بیشترین مساحت پهنه‌های برفی در سال ۱۹۸۵ با ۱/۶۸ میلیون هکتار و کمترین آن در سال ۲۰۱۵ با ۰/۷۳ میلیون هکتار بود. در بهار که میانگین مساحت پهنه‌های برفی ۰/۱۴ میلیون هکتار بود، بیشترین گستره برفی با ۰/۲۳ میلیون هکتار در سال ۱۹۹۵ و کمترین آن با ۰/۰۶ میلیون

پس از استخراج پهنه‌های برفی از روی تصاویر ماهواره‌ای با روش طبقه‌بندی تصاویر، مساحت پهنه‌ها در محیط پردازشی ArcGIS محاسبه گردید و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس، مساحت پهنه‌های برفی در زمستان بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و

سامانه‌های برفی در البرز همراه است، میانگین پهنه‌های برفی طی ۳۵ سال حدود ۰/۴۷ میلیون هکتار (۴۷۰ هزار هکتار) بوده که بیشترین آن با مساحت ۰/۸۴ میلیون هکتار (۸۴۰ هزار هکتار) در سال ۱۹۸۵ و کمترین آن با ۰/۱۵ میلیون هکتار (۱۵۰ هزار هکتار) در سال ۲۰۲۰ بوده است.

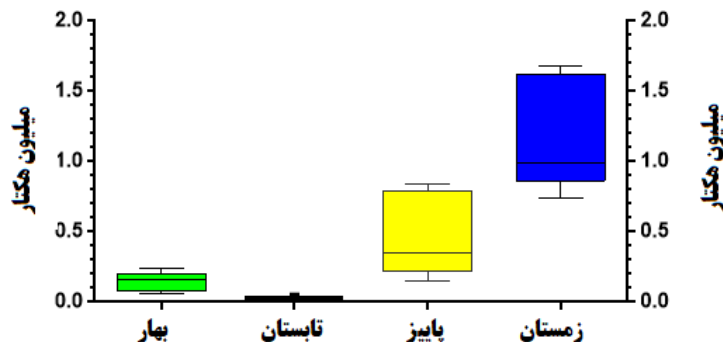
هکتار در سال ۲۰۱۵ بود. در تابستان که مساحت برفی به کمترین میزان خود می‌رسد، میانگین آن ۰/۰۴ میلیون هکتار (۴ هزار هکتار) بوده و بیشترین پهنه با ۰/۰۱ میلیون هکتار (۱۰ هزار هکتار) در سال ۱۹۸۵ و کمترین آن با ۰/۰۱ میلیون هکتار (یک هزار هکتار) در سال ۲۰۲۰ مشاهده گردید. در پاییز که با شروع سرمایش هوا و ورود

جدول ۳: مساحت پهنه‌های برفی مستخرج از تصاویر سری لندست در مقیاس زمانی فصلی (میلیون هکتار)

سال	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
۱۹۸۵	۱/۶۸	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۸۴
۱۹۹۵	۱/۵۵	۰/۲۳	۰/۰۰۳	۰/۲۸
۲۰۰۵	۰/۹۸	۰/۱۶	۰/۰۰۲	۰/۷۳
۲۰۱۵	۰/۷۳	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۰/۳۵
۲۰۲۰	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۰۰۱	۰/۱۵
میانگین	۱/۱۹	۰/۱۴	۰/۰۰۴	۰/۴۷

هکتار است که در زمستان حدود ۳۶ درصد آن پوشیده از برف است. در پاییز حدود ۱۵ درصد از البرز مرکزی را برف پوشانده است (شکل ۴).

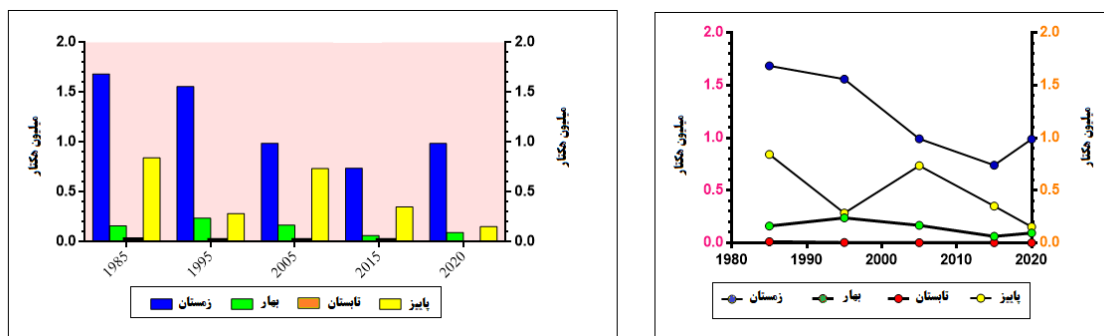
بیشترین پهنه‌های برفی در فصل زمستان بوده که میانگین آن ۱/۲ میلیون هکتار می‌باشد. پهنه کوهستانی البرز در محدوده مورد مطالعه حدود ۳ میلیون و ۳۲۶ هزار و ۲۲۰



شکل ۴: نمودار جعبه‌ای مساحت فصلی پهنه‌های برفی در البرز مرکزی

مساحت پهنه‌های برفی کاسته شده است. در سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ درصد پوشش پهنه‌های برفی در فصل پاییز در البرز مرکزی به ترتیب ۲۵، ۹، ۲۱، ۱۰ و ۴ درصد را شامل می‌شود که بیشترین آن در سال ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ بوده است. فصل بهار که در رتبه سوم قرار دارد، تغییرات زیادی نداشته است و بیشترین مساحت پهنه‌های برفی بهار در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۵ به دست آمد. کمترین گستره برف در تابستان بوده که عمدتاً مربوط به برف در قله‌های مرتفع دماوند و علم‌کوه می‌باشد. مساحت پهنه‌های برفی تابستان در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ به ترتیب ۱۱، ۳، ۲، ۲ و یک هزار هکتار است که روندی کاملاً نزولی داشته است (شکل ۵).

بررسی روند سالانه پهنه‌های برفی بیان‌گر این است که از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ مساحت آن کاسته شده و روند خطی آن نزولی می‌باشد (شکل ۵). همان‌طور که بیان شد، بیشترین پهنه‌های برفی در زمستان و پاییز مشاهده گردید. بررسی سالانه‌ی پوشش‌های برفی نشان داد که بیشترین پهنه برفی زمستان در سال‌های ۱۹۸۵ و ۱۹۹۵ بوده که ۵۰ و ۴۶ درصد از البرز مرکزی را برف پوشانده است. مساحت پهنه‌های برفی در زمستان از سال ۲۰۰۵ روند کاهشی محسوسی داشته است و تا سال ۲۰۱۵ ادامه داشته، اما در سال ۲۰۲۰ مساحت پهنه‌های برفی نسبت به سال ۲۰۱۵ روند افزایشی داشته است. گستره برف در پاییز نیز روند نزولی داشته و از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ هر ساله از



شکل ۵: روند تغییرات گستره برفی البرز مرکزی در مقیاس فصلی بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰

۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ بوده است. در بهار، پوشش‌های برفی عمدتاً در ارتفاعات البرز مرتفع وجود دارد. در ناحیه شرقی کوهستان، طی ۳۵ سال (۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰)، پوشش برفی در بهار تقریباً از بین رفته و تنها در نوک قله‌های مرتفع وجود دارد، اما در البرز مرتفع میانی، گستره برف بهاره بیشتر از نواحی غربی و شرقی می‌باشد. به‌طور کلی، پهنه‌های برفی در البرز مرکزی در فصل بهار، در ارتفاعات بیش از ۲۸۰۰ متری قابل مشاهده است (شکل ۶).

- پراکنش پهنه‌های برفی در فصل تابستان

فصل تابستان اوج گرمایش هوا در ایران است و برف‌های البرز از اردیبهشت‌ماه شروع به ذوب شدن نموده و تا مهرماه ادامه می‌یابد. در تابستان، پوشش‌های برفی در نوک قله‌ها و به‌ویژه دماوند مشاهده می‌گردد. در این فصل، گستره برف در سال ۱۹۸۵ حدود ۱۱ هزار هکتار برآورد گردید که در ارتفاعات بیش از ۳۹۰۰ متری مشاهده شد؛ اما در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ مساحت آن به کمتر از ۲ هزار هکتار رسید که در ارتفاعات بیش از ۴۲۰۰ متری برف مشاهده گردید (شکل ۷).

- پراکنش پهنه‌های برفی در فصل پاییز

با شروع سرمایش هوا در مهرماه (اکتبر) و نفوذ الگوهای اتمسفری بارش‌زا به ایران به‌ویژه عرض‌های جغرافیایی میانه و همچنین سیستم‌های بارشی دریای خزر و وجود رطوبت فراوان، امکان وقوع بارش‌های برفی افزایش می‌یابد. در این فصل، مساحت پهنه‌های برفی در البرز مرکزی نسبت به بهار و تابستان افزایش یافته و این روند افزایشی تا اواخر زمستان ادامه می‌یابد. میانگین مساحت پوشش‌های برفی در پاییز سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰، ۰/۴۸ میلیون هکتار است که پس از زمستان در رتبه دوم قرار دارد (شکل ۷).

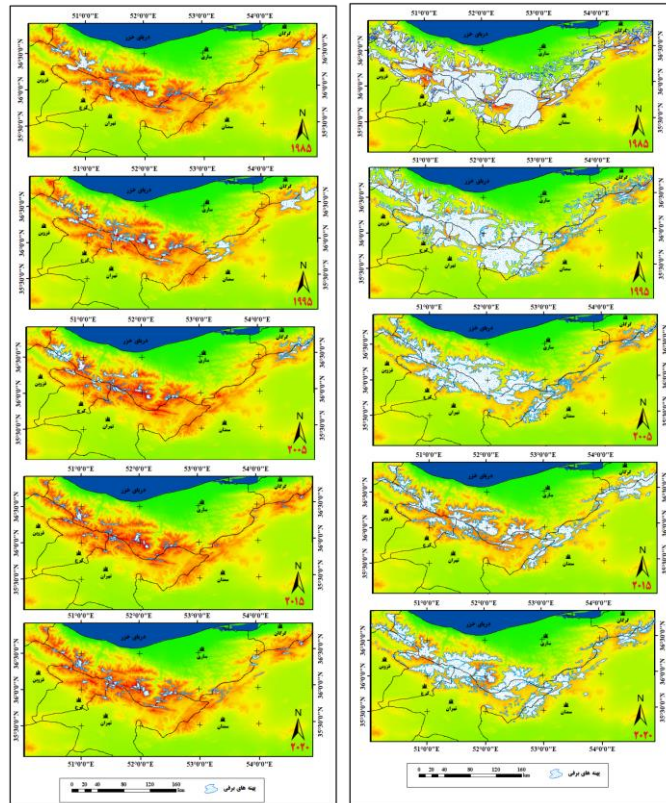
پراکنش مکانی پهنه‌های برفی البرز مرکزی در مقیاس فصلی

- پراکنش پهنه‌های برفی در فصل زمستان

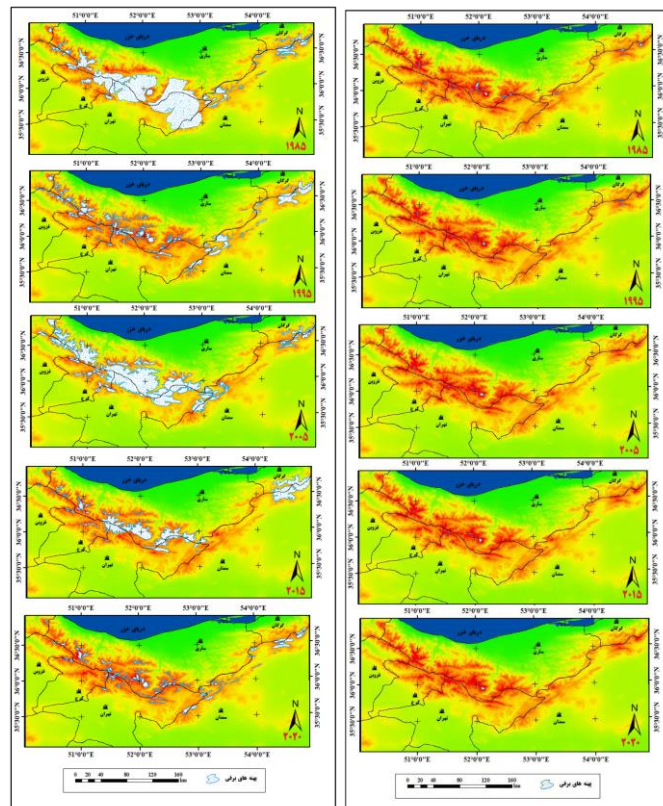
بیشترین میزان پوشش برفی در البرز مرکزی طی فصل زمستان است. مساحت پهنه‌های برفی در سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ در زمستان به ترتیب ۱/۵۵، ۰/۹۸، ۰/۷۳، ۰/۹۸ و ۰/۹۸ میلیون هکتار است. نقشه‌های پوشش برفی در شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین کاهش برف در بخش‌های شرقی محدوده مورد مطالعه اتفاق افتاده است که در دامنه‌های جنوبی در استان سمنان و دامنه‌های شمالی البرز در شرق استان مازندران مشاهده می‌شود. در البرز مرتفع در دماوند و قله مرتفع اطراف آن، زمستان همیشه پوشیده از برف است و تغییرات قابل توجهی نداشته است. در بخش غربی محدوده مورد مطالعه نیز کاهش پوشش برفی اغلب در دامنه ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر مشاهده می‌شود که در این دامنه از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ پهنه‌های برفی کاملاً حذف شده و برف زمستان اغلب در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متری گسترده شده است.

- پراکنش پهنه‌های برفی در فصل بهار

با شروع گرمایش هوا در بهار و کاهش ورود الگوهای اتمسفری که منجر به بارش برف می‌شوند، در کوهستان البرز مرکزی، مساحت پهنه‌های برفی کاهش می‌یابد. نقشه‌های پوشش برفی در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که مساحت پهنه‌های برفی در بهار نسبت به زمستان، کاهش شدیدی داشته است و میانگین مساحت آن نسبت به زمستان در البرز از ۱/۲ میلیون هکتار در زمستان، به ۰/۱۴ میلیون هکتار در بهار رسیده است. بیشترین گستره برف در بهار در سال ۱۹۹۵ با مساحت ۰/۲۳ میلیون هکتار بوده و کمترین آن ۰/۰۶ و ۰/۰۹ میلیون هکتار در سال‌های



شکل ۶: توزیع مکانی پهنه‌های برفی در کوهستان البرز مرکزی طی فصل زمستان (سمت راست) و بهار (سمت چپ) در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰



شکل ۷: توزیع مکانی پهنه‌های برفی در کوهستان البرز مرکزی طی فصل تابستان (سمت راست) و پاییز (سمت چپ) در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰

نشان داد تغییر اقلیم باعث کاهش مساحت پهنه‌های برفی در البرز مرکزی شده است و طی ۳۵ سال، مساحت آن در زمستان ۱۹۸۵ از ۱/۶۸ میلیون هکتار به ۰/۹۸ میلیون هکتار در سال ۲۰۲۰ رسیده است؛ بدین معنی که طی ۳۵ سال حدود ۰/۷ میلیون هکتار از مساحت پهنه‌های برفی در البرز مرکزی کاسته شده است. بیشترین تغییرات پهنه‌های برفی نیز در زمستان و پاییز بوده است. روند فصلی پهنه‌های برفی نیز بیان‌گر این است که روند آن طی ۳۵ سال کاهش یافته و هر ساله از مساحت پهنه‌های برفی کاسته شده است. در زمستان و پاییز، بیشترین کاهش پهنه‌های برفی مربوط به نواحی شرقی البرز مرکزی بوده که حجم بالایی از برف در این کوهستان طی ۳۵ سال از بین رفته است. اگرچه پژوهشگران از تصاویر MODIS برای استخراج پهنه‌های برفی استفاده می‌نمایند، اما با توجه به دقت محدودی که پیکسل‌های ۵۰۰ متری آن دارند، پژوهش حاضر جهت افزایش دقت مکانی برف از تصاویر سری لندست با پیکسل‌های ۳۰ متری استفاده نمود و نتایج آن مطلوب‌تر از خروجی تصاویر MODIS می‌باشد. بنابراین نتایج این مطالعه نشان داد که دقت بیش از ۰/۹۱ درصدی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی تصاویر لندست، می‌تواند از این روش برای استخراج پهنه‌های برفی استفاده نمود؛ به‌گونه‌ای که برف‌های سایه و ابر را نیز از برف جدا نموده و در دره‌ها نیز تجمع برف را شناسایی نمود. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و اعمال الگوریتم‌های طبقه‌بندی برای استخراج برف بهتر از اعمال شاخص NDSI و همچنین تصاویر MODIS می‌باشد. از طرف دیگر روند پوشش برفی البرز مرکزی به‌گونه‌ای بوده که طی ۲۵ سال از حدود ۰/۷ میلیون هکتار از مساحت برف‌ها کاسته شده است و حجم بالایی از ذخیره آب شیرین در البرز از بین رفته است.

در پژوهش حاضر، به دلیل محدودیت‌های تصاویر MODIS و شاخص NDSI جهت استخراج پهنه‌های برفی، از تصاویر سری لندست و الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برای استخراج برف استفاده شد که ضریب کاپای طبقه‌بندی‌ها بیشتر از ۰/۹۱ بود که نشان دهنده‌ی اعتبار بالایی طبقه‌بندی در استخراج پهنه‌های برفی در البرز مرکزی می‌باشد. در استخراج پهنه‌های برفی کوهستان سهند در فلات آذربایجان نیز از تصاویر لندست و الگوریتم‌های طبقه‌بندی شی‌گرا استفاده گردید (سیفی و قربانی، ۱۳۹۸). البرز مرکزی، مرتفع‌ترین کوهستان ایران بوده و در نیمه‌ی سرد سال، پوشیده از برف است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بیشترین گستره برفی آن در زمستان و سپس پاییز بوده که مساحت آن به ترتیب حدود ۱/۲ و ۰/۴۷ میلیون هکتار می‌باشد. در نیمه گرم سال با افزایش دما، عمده برف‌های کوهستانی در البرز مرکزی ذوب شده و تنها در نقاط مرتفع بیش از ۳۵۰۰ متری، در قله ارتفاعات، برف مشاهده گردید. در ارتفاعات زاگرس در چهارم‌هال بختیاری نیز عمده گستره برف در زمستان و بهمن‌ماه وجود دارد که در اواخر زمستان از مساحت آن کاسته می‌شود (عقیفی، ۱۴۰۰). در کوهستان‌های سهند، سبلان و ارتفاعات زاگرس شمالی نیز بیشترین گستره برفی در زمستان بوده و با شروع گرمایش هوا در بهار، از مساحت پوشش‌های برفی کاسته می‌شود. تغییرات زمانی - مکانی پوشش برف استان کردستان بیان‌گر این است که مساحت پهنه‌های برفی طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۶ روند کاهش داشته و بیشترین پهنه‌های برف نیز در دی‌ماه بوده است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۷).

نتیجه‌گیری

تغییرات آب‌وهوایی و گرمایش هوا باعث تسریع ذوب برف‌های نواحی کوهستانی می‌شود که نتایج پژوهش حاضر

منابع (References)

- Abdulkadhim, A.H., 2019. Estimating snow cover area in south of Turkey using the Normalized Difference Snow Index (NDSI) form MODIS Satellite Images, In Journal of Physics: Conference Series, v. 1279(1), p. 012047. IOP Publishing.
- Afifi, M.E., 2021. Investigation of changes in snow cover and determination of snowmelt line in mountainous areas using MODIS images and NDSI index (Case study of Zagros Glaciers), Geography and Environmental Studies, v. 10(38), p. 25-36 (in Persian).
- Aguirre, F., Carrasco, J., Sauter, T., Schneider, C., Gaete, K., Garín, E. and Casassa, G., 2018. Snow cover change as a climate indicator in Brunswick Peninsula, Patagonia. Frontiers in Earth Science, v. 6, 130 p.

- Ali, S., Cheema, M.J.M., Waqas, M.M., Waseem, M., Awan, U.K. and Khaliq, T., 2020. Changes in Snow Cover Dynamics over the Indus Basin: Evidences from 2008 to 2018 MODIS NDSI Trends Analysis. *Remote Sensing*, v. 12(17), <https://doi.org/10.3390/rs12172782>
- Banihabib, M.E., Hasani, K. and Bavani, A.M., 2016. Assessment of climate change effects on Shahcheraghi Reservoir inflow, *Journal of water and soil*, v. 30(1) (in Persian).
- Burges, C.J., 1998. A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data mining and knowledge discovery*, v. 2(2), p. 121-167.
- Dong, C. and Menzel, L., 2020. Recent snow cover changes over central European low mountain ranges, *Hydrological Processes*, v. 34(2), p. 321-338.
- Donmez, C., Berberoglu, S., Cicekli, S.Y., Cilek, A. and Arslan, A.N., 2021. Mapping snow cover using landsat data: toward a fine-resolution water-resistant snow index. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 133, p. 281-294.
- Fattahi, E., 2019. Investigation of snow cover changes affected by climate change in North West of Iran. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, v. 19(54), p. 47-63 (in Persian).
- Harer, S., Bernhardt, M., Siebers, M. and Schulz, K., 2018. On the need for a time-and location-dependent estimation of the NDSI threshold value for reducing existing uncertainties in snow cover maps at different scales, *The Cryosphere*, v. 12(5), p. 1629-1642.
- Horner, I., Branger, F., McMillan, H., Vannier, O. and Braud, I., 2020. Information content of snow hydrological signatures based on streamflow, precipitation and air temperature, *Hydrological Processes*.
- Huang, C., Davis, L.S. and Townshend, J.R.G., 2002. An assessment of support vector
- Dewi, R.S. and Bijker, W., (2019). Dynamics of shoreline changes in the coastal region of Sayung, Indonesia, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*.
- Kwon, Y., Yang, Z.L., Zhao, L., Hoar, T.J., Toure, A.M. and Rodell, M., 2016. Estimating snow water storage in North America using CLM4, DART, and snow radiance data assimilation, *Journal of Hydrometeorology*, v. 17(11), p. 2853-2874.
- Khosravi, M., Tavousi, T., Raeespour, K. and Omidi Ghaleh Mohammadi, M., 2017. A survey on snow cover variation in mount zardkooh-bakhtyare using remote sensing (RS). *Hydrogeomorphology*, v. 4(12), p. 25-44 (in Persian).
- Mityók, Z.K., Bolton, D.K., Coops, N.C., Berman, E.E. and Senger, S., 2018. Snow cover mapped daily at 30 meters resolution using a fusion of multi-temporal MODIS NDSI data and Landsat surface reflectance, *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 44(5), p. 413-434.
- Musselman, K.N., Lehner, F., Ikeda, K., Clark, M.P., Prein, A.F., Liu, C. and Rasmussen, R., 2018. Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America. *Nature Climate Change*, v. 8(9), p. 808-812.
- Ohashi, H., Kominami, Y., Higa, M., Koide, D., Nakao, K., Tsuyama, I. and Tanaka, N., 2016. Land abandonment and changes in snow cover period accelerate range expansions of sika deer, *Ecology and evolution*, v. 6(21), p. 7763-7775.
- Seifi, H. and Gorbani, I., 2019. Estimating snow cover trends using Object-Oriented Methods and images received from OLI and TIRS sensors (Case Study: Sahand Mountain). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, v. 28(109), p. 77-91 (in Persian).
- Solaimani, K., Darvishi, S., Shokrian, F. and Rashidpour, M., 2018. Monitoring of temporal-spatial variations of snow cover using the MODIS image (Case Study: Kurdistan Province), *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, v. 10(3), p. 77-104 (in Persian).
- Shafiq, M.U., Ahmed, P., Islam, Z.U., Joshi, P.K. and Bhat, W.A., 2019. Snow cover area change and its relations with climatic variability in Kashmir Himalayas, India, *Geocarto International*, v. 34(6), p. 688-702.
- Tang, Z., Wang, X., Wang, J., Wang, X., Li, H. and Jiang, Z., 2017. Spatiotemporal variation of snow covers in Tianshan Mountains, Central Asia, based on cloud-free MODIS fractional snow cover product, 2001–2015. *Remote Sensing*, v. 9(10), <https://doi.org/10.3390/rs9101045>.
- Vafakhah, M.A.H.D.I., Mohseni Saravi, M., Mahdavi, M.O.H.A.M.A.D. and Alavipanah, S.K., 2011. Comparison of snow cover area (SCA) in NOAA and MODIS Images (A case

- study: Taleghsn Watershed). Watershed Management Research (in Persian).
- Vapnik, V. and Chervonenkis, A., 1991. The necessary and sufficient conditions for consistency in the empirical risk minimization method, *Pattern Recognition and Image Analysis*, v. 1(3), p. 283-305.
- Voigt, T., Füssel, H.M., Gärtner-Roer, I., Huggel, C., Marty, C. and Zemp, M., 2010. Impacts of climate change on snow, ice, and permafrost in Europe: Observed trends, future projections, and socio-economic relevance, *ETC/ACC Technical Paper*, v. 13, p. 1-117.
- Wahidullah, H., Lee, H. and Bhanage, V., 2020. snow cover mapping for sustainable water resource management in the balkhab river basin in afghanistan using modis satellite normalized difference snow index (ndsi) products, Conference: IAHR-APD-2020At: Hokkaido, Japan.
- 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*, v. 12(3), 485 p.
- Wipf, S., Sommerkorn, M., Stutter, M.I., Wubs, E.J. and Van Der Wal, R., 2015. Snow cover, freeze-thaw, and the retention of nutrients in an oceanic mountain ecosystem, *Ecosphere*, v. 6(10), p. 1-16.
- 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*, v. 12(5), DOI: 10.3390/w12051339.
- Yarahmadi, D. and Sherafat, M., 2020. The thermal evaluation of snow line and identification of potential areas of snow falling in the Alborz Mountains with NOAA-AVHRR images, *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, v. 20(56), p. 193-204 (in Persian).
- Zhang, H., Zhang, F., Che, T. and Wang, S., 2020. Comparative evaluation of VIIRS daily snow cover product with MODIS for snow detection in China based on ground observations. *Science of The Total Environment*, v. 724, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138156.