

Analysis of Snow Cover Changes in the Western Watersheds of Lake Urmia Through Optimization and Fusion of Sentinel-2 and Landsat (8 and 9) Images

Narges Samadi^{1✉}, Ali Akbar Rasouli Pirouzian², Mokhtari, Davood³, Khalil Valizadeh Kamran⁴

1. Corresponding Author, PhD Student in Meteorology, Marand Islamic Azad University, Marand, Iran.

E-mail: samadinarges6565@gmail.com

2. Professor of Climatology, Macquarie University Sydney, Sydney, Australia. E-mail: rasouli@tabrizu.ac.ir

3. Professor, Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: d.mokhtari@tabrizu.ac.ir

4. Professor, Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: valizadeh@tabrizu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 19 February 2024 Revised: 7 April 2024 Accepted: 17 April 2024 Published: 21 June 2025 Keywords: Snow cover changes, the western watersheds of Lake Urmia, Landsat and Sentinel satellite images, integrated processing methods.	The main aim of the current study was to detect changes in snow cover within the Western watersheds of Lake Urmia, situated in the Silvaneh mountain range, using the processing of multi-sensor and multi-spectral satellite images for high-precision identification of snow-covered areas. Sentinel-2 and Landsat (8 and 9) satellite images were acquired and underwent preprocessing operations, such as atmospheric and radiometric corrections, using ENVI software version 1/10. Projects for the May months of the years 2016 to 2023 were then established. Initially, normalized difference snow indices were employed to independently generate snow cover maps for Landsat and Sentinel images for the entire watersheds of Nazluchay, Ruzechay, Shahrchay, and Barandozchay. In the next stage, an optimized color-sensitive object-based approach, based on object-oriented functions, was applied to the main bands of the Sentinel-2 sensor. To enhance the accuracy of the final results, Landsat images were fused with Sentinel images through a coordinated fusion method, producing various products, especially high-resolution optimized color images and classified scene maps. Ultimately, high-precision snow cover maps for temporal series were extracted for each of the mentioned watersheds through processing the fused images. Examination of the snow cover maps revealed that despite its smaller area compared to the Nazluchay and Barandozchay watersheds, the Shahrchay watershed has a higher snow accumulation coefficient, allowing for greater snow cover storage. Additionally, the comparison of the snow cover density map (years 2016 to 2023) with the elevation model of Alouspalsar at a resolution of 5/12 meters indicates a significant distribution of snow cover in higher elevations above 2300 meters in the study area. Therefore, accurate identification of snow cover, even on a daily and weekly scale, can provide essential and precise information for proactive water resource management, resulting from snowmelt, with multiple objectives in the watersheds surrounding Lake Urmia.
Cite this article: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2025). Title of paper in lower case letters (except for initial letter of first word, initial of first word after a colon, and proper nouns). <i>Journal of Geography and Planning</i>, 29 (91), 371-392. http://doi.org/10.22034/gp.2024.60313.3230 DOI: http://doi.org/10.22034/gp.2024.60313.3230	
 © The Author(s). Publisher: University of Tabriz.	

Introduction

The main aim of the current study was to detect changes in snow cover within the Western watersheds of Lake Urmia, situated in the Silvaneh mountain range, using the processing of multi-sensor and multi-spectral satellite images for high-precision identification of snow-covered areas. Sentinel-2 and Landsat (8 and 9) satellite images were acquired and underwent preprocessing operations, such as atmospheric and radiometric corrections, using ENVI software version 1/10. Projects for the May months of the years 2016 to 2023 were then established. Initially, normalized difference snow indices were employed to independently generate snow cover maps for Landsat and Sentinel images for the entire watersheds of Nazluchay, Ruzechay, Shahrchay, and Barandozchay. In the next stage, an optimized color-sensitive object-based approach, based on object-oriented functions, was applied to the main bands of the Sentinel-2 sensor. To enhance the accuracy of the final results, Landsat images were fused with Sentinel images through a coordinated fusion method, producing various products, especially high-resolution optimized color images and classified scene maps. Ultimately, high-precision snow cover maps for temporal series were extracted for each of the mentioned watersheds through processing the fused images. Examination of the snow cover maps revealed that despite its smaller area compared to the Nazluchay and Barandozchay watersheds, the Shahrchay watershed has a higher snow accumulation coefficient, allowing for greater snow cover storage. Additionally, the comparison of the snow cover density map (years 2016 to 2023) with the elevation model of Alouspalsar at a resolution of 5/12 meters indicates a significant distribution of snow cover in higher elevations above 2300 meters in the study area. Therefore, accurate identification of snow cover, even on a daily and weekly scale, can provide essential and precise information for proactive water resource management, resulting from snowmelt, with multiple objectives in the watersheds surrounding Lake Urmia.

Material and Methods

According to the main objectives of the current research, in the first stage, after receiving Sentinel and Landsat satellite images from the mentioned sites, all images were pre-processed, processed and post-processed in the ERDAS, iCognition and ArcGIS software environments, respectively (Rasouli and Mamdavi, 2020). The main objective was to investigate the temporal and spatial changes in snow cover in the western catchment area of Lake Urmia for the months of "May" available for the years 2016 to 2023. In the first stage, in order to produce snow cover maps by processing Sentinel-2 images, an optimized and enhanced color image (HONC) was produced for each specific image taken on a specific day. The main objective of implementing this method was to produce very clear images of the scene of each satellite image by combining a specific spectral range of bands 2, 3 and 4 of the Sentinel-2 sensor (Hagol et al., 2017). For this purpose, in the equation writer environment of the iCognition software (Trimble iCognition 6, 2019), by implementing Equation 1, it was possible to calculate the cube root values of the lower limit of the visible bands of Sentinel images (especially the L2A series) in the color-optimized mode.

Results and Discussion

Snow cover is of great importance as one of the most important suppliers of water resources. In the present study, in order to extract the temporal and spatial changes of snow cover in the western catchment area of Lake Urmia as accurately as possible, two types of medium-scale satellite images, Landsat (sensors 8 and 9) and Sentinel-2, were processed in different ways. First, based on the different products of Landsat and Sentinel sensors, snow cover maps were independently produced by applying normalized differential indices, which, while having similarities (with a correlation of 89 percent), also have certain differences. In order to improve the accuracy of the results in snow cover maps, the images received from both sensors were combined by implementing fusion algorithms and processed in the iCognition software environment. By producing various output products, such as classified maps, it was possible to separate the classes of vegetation cover, water levels, cloud cover, cloud shadow, and snow cover for selected years (only for May). In the next steps, by applying normalized differential index equations, the snow cover limits for each year were extracted in different ways and the resulting maps were produced in raster format.

It should be noted that, in most geographical areas of our beloved country of Iran, snowfall is a common climatological and hydrological phenomenon that accumulates mostly in the highlands and throughout the year in the form of snow cover and plays a significant role in the water resource cycle (as a very important parameter) (Sari-Saraf et al., 2019). Therefore, snow cover should be considered as one of the key variables of great importance in the Silvaneh range, because its temporal and spatial changes effectively and undeniably affect other hydroclimatic resources, especially the water intake process of Lake Urmia, and of course the life of human communities living in this special geographical area. In order to obtain valuable information about the

nature and changes of this hydroclimatic variable, satellite images and, of course, accurate digital image processing methods can play a very effective role in the process of estimating the level of snow cover. However, the low spatial and spectral resolution of medium-scale satellite images can be criticized in some cases (Mir Yaghoubzadeh et al., 2010). Similarly, the presence of cloud cover in mountainous areas often makes the whole or part of the image unsuitable for processing and extracting information related to snow cover due to widespread cloudiness (Soleimani et al., 2018). Therefore, reducing calculation errors in the snow cover modeling process requires access to high-precision data, specialized software, and the use of object-oriented processing methods, especially the supervised classification method of the support vector machine type (Burgess, 1998).

Conclusion

The main objective of the current study was to investigate the temporal and spatial changes in snow cover in the western catchment area of Lake Urmia by implementing object-oriented processing methods and standardized normalized differential snow indices for the years 2016 to 2023. Therefore, by processing available Sentinel-2 images and Landsat 8 and 9 images, an attempt was made to produce high-precision snow cover maps by implementing fusion methods. Based on different methods, the final results indicate that, despite the slight difference in snow cover values, optimization and fusion methods of Landsat and Sentinel sensors can be very effective in the process of extracting and identifying snow cover.

The results show that snow cover has varied significantly in the study area over the past years. It seems that the rapid melting of snow areas over the past years due to climate change has had catastrophic hydroclimatic and ecological effects, especially on the water intake capacity of Lake Urmia. Certainly, each of these issues requires more detailed and comprehensive research. However, based on current knowledge, it is possible to process Landsat and Sentinel image series and even other sensors by implementing deep knowledge base methods in specialized software environments. It is worth noting that in order to study the snow cover level more precisely, it is not enough to apply only relevant indicators and there is a need to apply more detailed algorithms (and access to field observations) with the aim of separating ice cover from snow, especially in specific topographic areas and deep sheltered valleys in all watersheds overlooking Lake Urmia. In the case of continuous multi-purpose and multi-sensor monitoring, prudent management of the very valuable natural resources of the Silvaneh mountain range will be provided even on short-term time scales.



بررسی تغییرات پوشش برف حوضه‌های آبریز غربی دریاچه ارومیه از طریق بهینه‌سازی و همجوشی تصاویر سنتینل-۲ و لندست (۸ و ۹)

نرگس صمدی^۱✉، علی اکبر رسولی^۲، داود مختاری^۳، خلیل ولیزاده کامران^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی مرند، مرند، ایران. رایانامه: samadinarges6565@gmail.com

۲. استاد آب و هواشناسی دانشگاه مک کواری سیدنی، سیدنی، استرالیا، رایانامه: rasouli@tabrizu.ac.ir

۳. استاد، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: d.mokhtari@tabrizu.ac.ir

۴. استاد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: valizadeh@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

کلیدواژه‌ها:

تغییرات پوشش برف،

حوضه‌های آبریز غربی دریاچه ارومیه،

تصاویر ماهواره‌های لندست و سنتینل،

روش‌های پردازش تلفیقی

هدف اصلی تحقیق فعلی، تشخیص تغییرات سطح پوشش برف در حوضه‌های غربی دریاچه ارومیه، واقع در رشته کوه سیلوانه، با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای چند سنجنده‌ای و چند طیفی برای شناسایی دقیق مناطق پوشش برف می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست (۸ و ۹) قابل دسترس عملیات پیش‌پردازش از قبیل تصحیحات جوی و رادیومتریک با استفاده از نرم‌افزار ENVI نسخه ۱۰/۱ انجام شد. پروژه‌ها برای ماه‌های مه سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ ایجاد گردید. ابتدا، با استفاده از شاخص‌های تفاضلی نرمال شده برف، نقشه‌های پوشش برف مستقل برای تصاویر لندست و سنتینل برای کل حوضه‌های آبریز نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای تولید گردید. در مرحله بعد، با بکارگیری یک روش بهینه‌سازی شده بر اساس توابع شیء‌گرا وابسته به رنگ بر روی باندهای اصلی سنجنده سنتینل-۲، تصاویر لندست با تصاویر سنتینل تلفیق شدند. این تلفیق به تولید محصولات متنوع، به ویژه تصاویر بهینه رنگی با وضوح بالا و نقشه‌های طبقه‌بندی صحنه مطالعه منجر شد. در نهایت، نقشه‌های سطح پوشش برف با دقت بالا برای دوره‌های زمانی مختلف برای هر یک از حوضه‌های گفته شده از تصاویر تلفیق شده استخراج گردید. بررسی نقشه‌های پوشش برف نشان داد که حوضه آبریز شهرچای علیرغم مساحت کمتر نسبت به حوضه‌های نازلوچای و باراندوزچای، دارای ضریب تجمع برف بالاتری بوده و در نتیجه امکان ذخیره پوشش برف بیشتری را دارا است. همچنین، مقایسه نقشه تراکم پوشش برف (سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳) با مدل ارتفاعی آلوس پالسا با وضوح ۱۲/۵ متر نشان می‌دهد که مساحت قابل توجهی از پوشش برف در ارتفاعات بالاتر از ۲۳۰۰ متر در محدوده مطالعه توزیع شده است. بنابراین، شناسایی دقیق پوشش برف، حتی در مقیاس روزانه و هفتگی، اطلاعات ضروری و دقیقی را برای مدیریت پیشگیرانه منابع آب به دنبال ذوب برف با اهداف متعدد در حوضه‌های آبریز اطراف دریاچه ارومیه فراهم می‌آورد.

استناد: صمدی، نرگس؛ رسولی، علی اکبر؛ و مختاری، داود؛ ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۴). بررسی تغییرات پوشش برف حوضه‌های آبریز غربی دریاچه ارومیه از طریق بهینه‌سازی و همجوشی تصاویر سنتینل-۲ و لندست (۸ و ۹). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۹ (۹۱)، ۳۹۲-۳۷۱.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.60313.3230>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

طبق تحقیقات محققان متعدد، مدل‌های مکانی و زمانی پوشش برف می‌تواند خیلی از اطلاعات ضروری را برای مدیریت اصولی و بهینه منابع آبی فراهم کند (فاستر و همکاران^۱، ۱۳۶۵: ۱۹۸۷). لذا با توجه به اینکه بارش‌های برف سنگین و فراگیر از پدیده‌های بحران‌ساز اقلیمی - هیدرولوژیکی است که وقوع ناگهانی و شدید آن منجر به خسارت‌های هنگفت مالی و جانی می‌شود، شناخت و آگاهی از سازوکار رخداد، وقوع، شدت، مدت و تداوم اینگونه بارش‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ها در فواصل مختلف زمانی، کمک بسزایی جهت مقابله، ذخیره‌سازی و استفاده بهینه از این پدیده شده و منجر به تصمیم‌گیری مناسب در سطوح شهری و غیرشهری می‌شود (کاشکی و همکاران، ۱۴۰۱). بطور معمول، از اواسط فصل بهار به ویژه در طول فصل تابستان چنین اطلاعاتی برای نیازهای آبی در محدوده حاشیه‌ای مناطق کوهستانی، از جمله کوهستان سیلوانه واقع در غرب دریاچه ارومیه، از اهمیت حیاتی برخوردار است (رسولی و همکاران، ۱۳۹۴). به طور حتم، تخمین دقیق کمیت منابع آب، به ویژه تشخیص تغییرات مکانی و زمانی پوشش برف در گذشته، به دلیل محدودیت‌های تکنولوژیکی سنجش از دور با محدودیت‌هایی همراه بود. اما در حال حاضر، با ظهور سنجنده‌های با وضوح طیفی و مکانی بالا نه تنها امکان پایش دقیق محدوده‌های کوهستانی میسر شده است، بلکه در محیط نرم‌افزارهای تخصصی پردازش دانش پایه تصاویر ماهواره‌ای امکان پذیر گشته است (یان و همکاران^۲، ۱۳۹۳: ۲۰۱۵). معمولاً، پردازش تصاویر حاصله منحصر از یک ماهواره برای کسب اطلاعات دقیق از شرایط دینامیک برف کافی نیست، به‌ویژه در مناطق کوهستانی منطقه مورد مطالعه با دارا بودن اقلیم‌های نیمه‌خشک که در آن حوادث بارش برف در مقیاس‌های زمانی و مکانی بسیار متغیر است (حیدری، ۱۳۹۵). با توجه به این محدودیت‌ها، ترکیب داده‌های حسگر چندطیفی سنتینل-۲ و لندست‌های ۸ و ۹ با تفکیک مکانی ۱۰ الی ۳۰ متری، فرصت‌های بی سابقه‌ای برای بهبود پایش پوشش برف در مناطق کوهستانی را فراهم نموده است (فیلیپ و همکاران^۳، ۱۳۹۲: ۲۰۱۴). تاکنون مطالعات زیادی در ارتباط با مطالعات و تحلیل پوشش برف و حتی یخچال‌های کوهستانی توسط محققان داخلی و خارجی صورت گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌گردد (میرموسوی و صبور، ۱۳۹۳). با پردازش تصاویر ماهواره‌ای MODIS تغییرات سطح پوشش برف منطقه شمالغرب ایران را در طی سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۰۹ میلادی بر اساس شاخص تفاضلی نرمال شده برف، طبقه‌بندی نظارت نشده و طبقه‌بندی نظارت شده بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در میزان پوشش برف شمالغرب ایران در طول یک دهه بود. همچنین، (جویباری مقدم و همکاران، ۱۳۹۳) به تخمین سطح پوشش برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ در منطقه بهروان پرداختند. آنها، با بررسی رفتار طیفی برف، شاخص و حد آستانه مطلوب بر روی باندهای محدوده مرئی، مادون قرمز میانی و حرارتی طیف الکترومغناطیس، طراحی و پیکسل‌های برفی را شناسایی و محدوده پوشیده شده از برف را تخمین زدند. در یک تحقیق دیگر، (امیدی و محمدی، ۱۳۹۳) تغییرات سطوح پوشش برف در ارتفاعات دنا را با استفاده از داده‌های ماهواره لندست (سنجنده‌های TM و ETM+) طی سال‌های ۱۹۹۲ الی ۲۰۱۳ میلادی با پیاده‌سازی شاخص NDSI در ماه‌های آوریل و سپتامبر را استخراج نمودند. نتایج نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه مکانی و زمانی پوشش برف در محدوده مورد مطالعه بود. در محدوده حوضه دریاچه ارومیه، (متین نیا، ۱۳۹۷) روند تغییرات سطح پوشش برف با تصاویر سنجنده مودیس طی دوره آماری ۱۸ ساله (۲۰۰۰ الی ۲۰۱۷ میلادی) را مطالعه و نشان داد که سطح پوشش برف با مجموع بارش و دما همبستگی معنی داری دارد. (ختامی، ۱۳۹۹) پوشش برف حوضه آبریز دریاچه ارومیه را با استفاده از محصولات سنجنده مودیس در بازه زمانی ۱۷ ساله (۱۳۸۳ الی ۱۳۹۷) بررسی نمود. نتایج نهایی نشان داد که این تصاویر (با تفکیک مکانی حدود ۲۵۰ متری) بطور کامل معرف سطوح برف نیستند. همچنین، (سیفی، ۱۴۰۰) با هدف تخمین سطح پوشش برف کوهستان سبلان با پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های OLI و TIRS لندست-۸ با استناد به روش‌های مختلف شیء‌گرا اقدام و از طریق استخراج سطح برف در دامنه‌ها و دره‌های مستقر در منطقه مورد مطالعه، پیشنهاد نمود از نتایج حاصله می‌توان به عنوان جایگزین ایستگاه‌های

برف سنجی استفاده کرد. (زینالی و همکاران، ۱۴۰۰) در پژوهشی اقدام به استخراج سطح پوشش برف کوهستان سبلان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ برای سال ۲۰۰۰ و لندست ۸ برای سال ۲۰۲۰ با استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا و همچنین با استفاده از شاخص‌های طیفی متفاوت نمودند. نتایج بررسی نقشه‌های طبقه‌بندی مستخرج نشان داد که این نوع شاخص‌ها قادر به استخراج سطح پوشش برف با دقت نسبی مناسب در منطقه سرد و زمستانی هستند. با این وجود شاخص NDSI به دلیل اینکه تمایزی میان برف و آب قائل نمی‌شود نتایج متفاوتی در مناطقی با حضور سطوح آب در ارتباط با مساحت تحت پوشش برف ارائه می‌دهد. در بررسی و مدل‌سازی و تغییرات پوشش برف در خارج از کشور مطالعات بسیار زیادی صورت گرفته است که به اختصار به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. (وانگ و همکاران، ۲۰۰۳) با پردازش تصویر ماهواره‌ای لندست-۸ و شاخص NDSI، سطح پوشش برف در حوضه آبریز "هیاهی" را محاسبه و تحقیقات آن‌ها نشان داد که این شاخص، می‌تواند سطوح پوشیده از پوشش برف در جنگل‌های سوزنی برگ و جنگل‌های همیشه سبز را با دقت بالا تشخیص دهد. (سینگ و همکاران، ۲۰۲۰) در مطالعه‌ای، برای شناسایی خودکار و نقشه‌برداری از بقایای بهمن برف بخشی از منطقه هیمالیای غربی را با پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ بررسی نمودند. آن‌ها با بکارگیری و تکنیک‌هایی مانند روش نسبت‌گیری، ماتریس همزمانی سطح خاکستری مبتنی بر روش‌های دانش پایه بقایای بهمن را شناسایی و اعلام کردند که روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های شیء‌گرا با پردازش تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی متوسط، مناسب‌ترین روش برای شناسایی و نقشه‌برداری از بقایای بهمن است. همچنین، (رسولی و همکاران، ۲۰۲۰) با پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل ارتفاعی ماهواره استر، تغییرات مکانی و زمانی در مقادیر پوشش برف منطقه کوه‌های برفی نیوسات ولز استرالیا، در بازه زمانی ۳۶ ساله را با دقت ۹۶ درصد استخراج کردند. در این تحقیق از روش‌های شیء‌گرا با استناد بر توابع قطعه‌بندی پیکسل‌های تصویری، طبقه‌بندی نظارت‌شده و آستانه‌گذاری برای استخراج پوشش برف، در محیط نرم افزار اگکانیشن استفاده گردید. با بررسی اجمالی منابع تحقیقاتی قبلی در داخل کشور به نظر می‌رسد که هیچکدام از محققان مذکور علیرغم نتایج بسیار قابل قبول حاصله در محدوده کوهستان سیلوانه و با تاکید بر حوضه های آبریز غربی دریاچه ارومیه مبادرت به پردازش همزمان ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست های ۸ و ۹ با اعمال روش‌های تلفیقی نه نموده‌اند.

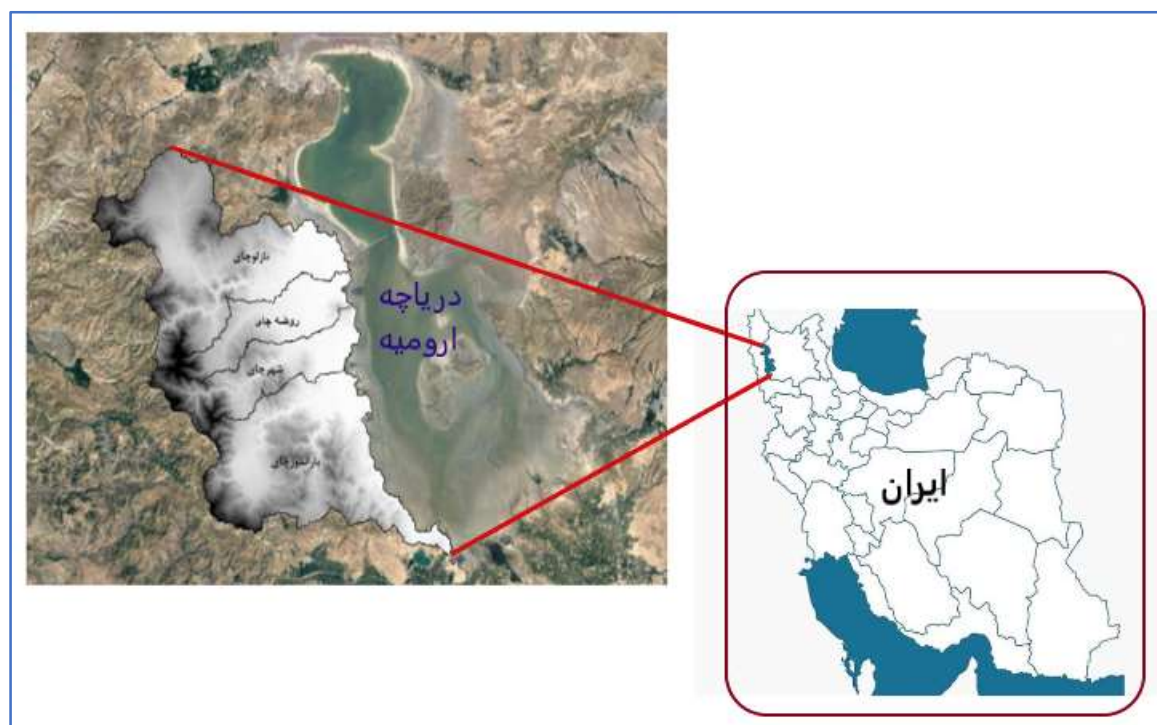
مواد و روشها

منطقه جغرافیایی مورد مطالعه

دریاچه ارومیه به عنوان بزرگترین دریاچه داخلی ایران، از مهمترین و با ارزشترین اکوسیستم های آبی ایران و جهان به شمار می‌آید (جان پرور و همکاران، ۱۳۹۹). اکوسیستم این دریاچه، نمونه ای خاص از یک حوضه آبریز بسته است که کلیه روان آب‌های جاری ناشی از بارش باران به آن تخلیه و شرایط خاصی را برای زیستگاه‌های متنوع به وجود می‌آورند (محرمی و همکاران، ۱۳۹۵). ضمناً این حوضه، نمونه‌ای مشخص از یک حوضه داخلی بسته است که تمامی آب‌های حاصل از ذوب برف از طریق شبکه‌های آبراهه در درون حوضه‌های آبریز واقع در غرب دریاچه ارومیه بطرف دریاچه تخلیه می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است؛ تحقیق حاضر با لحاظ حوضه‌های غربی دریاچه ارومیه شامل چهار حوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای صورت گرفته است.

بطور کلی، اقلیم محدوده مورد مطالعه با زمستانهای سرد و تابستانهای نسبتاً گرم شناخته می‌شود (شکیبا و همکاران، ۱۳۹۴). حوضه های منتخب از نکته نظرهای توپوگرافیک و هیدرومورفولوژیک در طول هزاران سال تشکیل شده است که از مهمترین فرآیندهای اصلی آنها می‌توان به زهکشی جریانات بارش‌های فصلی به ویژه آب‌های ذوب شده از ذخایر برف اشاره نمود (جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۵). چرخه آب در طبیعت رابطه مستقیم با اقلیم آن منطقه دارد، استفاده‌ی منطقی و صحیح از منابع آب، مستلزم شناخت دقیق کمی و کیفی و جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مناسب اقلیمی است (نیکوخصال و همکاران،

۱۴۰۱). یادآور می‌گردد که در منطقه شمال غرب مطالعات متعددی در ارتباط با مقوله اقلیم‌شناسی برف صورت گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌گردد (امینی نیا و همکاران، ۱۳۸۹).
به منظور تحلیل و بررسی تغییرات بارش برف سنگین در منطقه شمال غرب کشور، آمار روزانه دما و بارش ۱۰ ایستگاه سینوپتیک را بررسی و نشان دادند که بارش برف سنگین در همه ایستگاه‌ها و در طول دوره آماری مشترک دارای نوسانات زیاد و روند کاهشی بوده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در کشور ایران و حوضه‌های آبریز منتخب در غرب دریاچه ارومیه

آن‌ها با کاربرد آزمون رتبه‌ای من‌کندال وجود روند نزولی در بارش برف سنگین را برای ایستگاه‌های تبریز و ارومیه را مطرح نمودند. (حیدری، ۱۳۹۵) در مطالعه‌ای مشخص نمود که آذربایجان غربی به‌عنوان یکی از استان‌های کوهستانی و فاقد بارش‌های تابستانی است که بخش مهمی از بارش خود را به صورت برف دریافت می‌کند. محقق نامبرده بر مبنای آزمون‌های آماری مختلف اثبات نمود که طی سال‌های اخیر تغییرات شدید و ناگهانی بارش در ایستگاه‌های خوی و ارومیه رخ داده است. (هوشیار و جوانبخت، ۱۳۹۷) به منظور مطالعه سینوپتیکی و دینامیکی روزهای دارای بارش برف سنگین در شهرستان ارومیه، داده‌های مربوط به بارش برف (بیشتر از ۱۵ میلیمتر) را تحلیل و نشان دادند که ورود توده‌های هوای شمال غربی و غربی باعث انتقال رطوبت قابل توجه به منطقه شمال غرب ایران شده و در نتیجه موجبات ریزش برف سنگین در محدوده شهرستان ارومیه می‌شوند. بنابراین، با توجه به اهمیت بارش برف در تامین آب در مناطق کوهستانی، بررسی تغییرات سطح پوشش مربوطه، در بخش‌های کشاورزی، انرژی، مدیریت مخزن و هشدار سیل بسیار مهم است.

تصاویر ماهواره‌ای

در تحقیق جاری، در مرحله اول، تصاویر سنجنده‌های سنتینل-۲ و لندست (۸ و ۹) برای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ دریافت و مورد پردازش قرار گرفتند. این نوع تصاویر با داشتن قابلیت پردازش مناسب، استخراج طیف گسترده‌ای از پارامترهای مشخص‌کننده پوشش سطح زمین به‌ویژه پوشش برف در مناطق کوهستانی را امکان پذیر می‌نمایند (رسولی و همکاران، ۲۰۲۱). در این ارتباط، تصاویر ماهواره‌های لندست (سنجنده OLI) و سنتینل (سنجنده MSI) در بازه زمانی ۴ الی ۶ روزه با

پوشش مشترک بطور هماهنگ تهیه و در سطوح متفاوت در سیستم تصویری UTM بازیابی و تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی بر روی آن‌ها اعمال گردید (یو.اس.ژئولوژیکال سروی^۱، ۲۰۱۸). با توجه به اهداف اصلی تحقیق جاری تصاویر ماهواره‌ای نمونه در تحقیق جاری قابل دسترس برای ماه "می" (مطابق با اواخر اردیبهشت ماه) تهیه و مورد پردازش قرار گرفتند. در جدول ۱ به روزهای دریافت تصاویر ماهواره ای از هر دو سنجنده اشاره شده است. متخصصین پردازش تصاویر ماهواره‌ای به این نتیجه رسیده‌اند که ماهواره‌های سنتینل-۲ می‌توانند به عنوان یک مکمل کاربردی برای داده‌های ماهواره‌های سری لندست، خصوصاً لندست‌های ۸ و ۹، مورد استناد قرار گیرند (لی و روی^۲، ۲۰۱۷).

جدول ۱: تصاویر ماهواره‌ای نمونه و قابل دسترس در تحقیق جاری برای ماه می سال میلادی

تلفیق تصاویر لندست و سنتینل	تصاویر سنتینل-۲	تصاویر لندست ۸ و ۹
۲۰۱۶-۴-۲۰:۱۷	۲۰۱۶-۴-۱۷	۲۰۱۶-۴-۲۰
۲۰۱۷-۴-۲۰:۲۳	۲۰۱۷-۴-۲۰	۲۰۱۷-۴-۲۳
۲۰۱۸-۴-۱۷:۲۱	۲۰۱۸-۴-۱۷	۲۰۱۸-۴-۲۱
۲۰۱۹-۴-۱۷:۲۰	۲۰۱۹-۴-۱۷	۲۰۱۹-۴-۲۰
۲۰۲۰-۴-۲۰:۲۲	۲۰۲۰-۴-۲۰	۲۰۲۰-۴-۲۲
۲۰۲۱-۴-۱۸:۲۱	۲۰۲۱-۴-۲۱	۲۰۲۱-۴-۱۸
۲۰۲۲-۴-۲۱:۲۳	۲۰۲۲-۴-۲۱	۲۰۲۲-۴-۲۳
۲۰۲۳-۴-۲۲:۲۳	۲۰۲۳-۴-۲۲	۲۰۲۳-۴-۲۳

از این رو، با هدف دسترسی به اهداف اصلی تحقیق جاری، تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ از سایت <https://www.usgs.gov/landsat> و تصاویر سنتینل-۲ از سایت <https://dataspace.copernicus.eu/> در سطوح ۱ دریافت شد. یادآور می‌گردد که تصاویر ماهواره‌ای لندست (دارای ۱۱ باند با تفکیک مکانی ۳۰ متر) و سنتینل-۲ (دارای ۱۳ باند با تفکیک‌های مکانی ۱۰ و ۲۰ متر) در محدوده‌های طیف مرئی، مادون قرمز، طول موج کوتاه و طول موج‌های بلند مورد پردازش قرار گرفتند (قازکویین و همکاران^۱، ۲۰۱۷). هدف اصلی این ماهواره‌ها نظارت بر تغییرات پوشش سطح زمین است که یکی از جنبه‌های کاربردی مهم مربوطه پایش و بررسی تغییرات پهنه‌های یخ و برفی کوهستان‌های مرتفع می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های طیفی متعدد ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ شایان ذکر است که این نوع تصاویر (قابل دریافت از سایت رسمی ناسا) به همدیگر شباهت‌های زیادی دارند، اما تفاوت‌هایی نیز دارند که از نظر رادیومتری و هندسی نسبت به ماهواره‌های نسل قبلی لندست با کیفیت طیفی بهتری همراه هستند (ماسک و همکاران^۲، ۲۰۲۰). در این نوع ماهواره‌ها سنجنده OLI-2 مشاهدات سطح زمین را در باندهای مادون قرمز مرئی، نزدیک مادون قرمز و موج کوتاه با دقت رادیومتری بهبود یافته ضبط می‌کند. اما سنجنده TIRS-2 تابش مادون قرمز حرارتی (یا گرمای سطح زمین) را با دو باند حرارتی لندست ۸ بهبود یافته اندازه‌گیری می‌کند (یو.اس.ژئولوژیکال سروی^۳، ۲۰۲۲).

مراحل پردازش تصاویر ماهواره‌ای

با توجه به اهداف اصلی تحقیق جاری، در مرحله اول، بعد از دریافت تصاویر ماهواره‌ای سنتینل و لندست از سایت‌های مذکور کلیه تصاویر در محیط نرم افزارهای ERDAS، ایکاگنیشن و ArcGIS به ترتیب مورد پیش-پردازش، پردازش و پس-پردازش قرار گرفتند (رسولی و ممدو^۴، ۲۰۲۰). هدف اصلی بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف در محدوده حوضه‌های آبریز غرب دریاچه ارومیه برای ماه‌های "می" قابل دسترس به ازای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ میلادی بود. در مرحله اول، به منظور تولید نقشه‌های پوشش برف با پردازش تصاویر سنتینل-۲ برای هر تصویر خاص اخذ شده در یک روز خاص یک تصویر بهینه

سازی و تقویت شده رنگی (HONC) تولید شد. هدف اصلی از اجرای این روش تولید تصاویر بسیار واضح از صحنه هر تصویر ماهواره‌ای از طریق ترکیب محدوده طیفی خاصی از باندهای ۲، ۳ و ۴ سنجنده سنتینل-۲ بود (هاگول و همکاران^۵، ۲۰۱۷). برای این منظور، در محیط معادله نویسن نرم افزار ایکاگنیشن (تریمبل ایکاگنیشن^۶، ۲۰۱۹). از طریق اجرای رابطه ۱ امکان محاسبه مقادیر ریشه سوم حد پایین باندهای مرئی تصاویر سنتینل (به ویژه سری L2A) در حالت بهینه شده رنگی فراهم گردید.

$$S2_HONCL2A = \{(0.6 * B04), (0.6 * B03) \& (0.6 * B02)\}$$

(رابطه ۱)

به منظور افزایش کیفی تصاویر و با هدف حذف بازتابش‌های ناخواسته پیکسل‌ها و افزایش میزان آشکارسازی سنجنده سنتینل-۲ از رابطه ۲ نیز استفاده شد.

$$S2 - HONCL2A = \{(0.6 * B04 - 0.035), (0.6 * B03 - 0.035) \& (0.6 * B02 - 0.035)\}$$

(رابطه ۲)

در مرحله دوم، در محیط نرم افزار ایکاگنیشن از طریق اجرای الگوریتم محاسبه پوشش برف (رابطه های ۳ و ۴) شاخص های تفاضلی نرمال شده برف تصاویر لندست ۸ و ۹ (Landsat) و سنتینل-۲ (SNDSI) بطور جداگانه اقدام شد (سیباندزه و همکاران^۱، ۲۰۱۴).

$$NDSI_{Landsat\ 8\ \&\ 9} = \{(B03 - B6) / (B03 + B6)\}$$

(رابطه ۳)

$$NDSI_{Sentinel-2} = \{(B03 - B11) / (B03 + B11)\}$$

(رابطه ۴)

با اجرای رابطه های فوق، در شاخص خروجی، پوشش برف در نور مادون قرمز موج کوتاه جذب، اما نور مرئی منعکس می‌گردد. در این حالت، پوشش برفی به رنگ آبی روشن و یا روشن متمایل به آبی نمایش داده می‌شود. به منظور شناسایی دقیق تر پوشش برف آستانه گذاری در حد ($NDSI \leq 0.4$) در رابطه های فوق اعمال گردید تا پیکسل‌های معرف پوشش برف با اطمینان بیشتری شناسایی گردد (رسولی و همکاران^۲، ۲۰۲۲). از دیگر محصولات ترکیبی مذکور می‌توان به ترکیب مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) اشاره نمود که بر اساس ترکیب باندهای قرمز (باند ۴) مادون قرمز مرئی و نزدیک (باند ۸ الف) و موج کوتاه مادون قرمز (باند ۱۲) تولید می‌شود. با اجرای این نوع ترکیب مابین باندهای مختلف، می‌توان بین انواع ابرها (ابرهای آبی در مقابل ابرهای یخی) و پوشش برف و یخ (که همه سفید به نظر می‌رسند) تمایز قایل شد.

در مرحله سوم، به منظور استخراج دقیق تر سطح پوشش برف در منطقه مورد مطالعه با دقت مکانی بالا سعی شد تا فرآیند همجوشی بین باندهای متعدد سنتینل و لندست با اجرای توابع شیء‌گرا در محیط نرم افزار ایکاگنیشن اجرا گردد. نحوه همجوشی باندهای مختلف سنجنده های لندست و سنتینل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: نحوه همجوشی باندهای مختلف تصاویر لندست و سنتینل برای پیاده‌سازی روش HLS

ترکیب سنجنده‌های لندست و سنتینل (HLS)	تفکیک مکانی (متر)	نحوه مشارکت باندها	نام باند
---------------------------------------	-------------------	--------------------	----------

هر دو سنجنده	۳۰	۱	ماورای آبی (اُتروسل ساحلی)
هر دو سنجنده	۳۰	۲	آبی
هر دو سنجنده	۳۰	۳	سبز
هر دو سنجنده	۳۰	۴	قرمز
سنتینل	۲۰	۵	مادون قرمز مرئی نزدیک
سنتینل	۲۰	۶	مادون قرمز مرئی نزدیک
سنتینل	۲۰	۷	مادون قرمز مرئی نزدیک
سنتینل	۱۰	۸	مادون قرمز نزدیک باند پهن
هر دو سنجنده	۳۰	باند ۵ از لندست و باند ۸ الف از سنتینل	مادون قرمز نزدیک بند باریک
هر دو سنجنده	۳۰	باند ۶ از لندست و باند ۱۱ از سنتینل	موج کوتاه مادون قرمز ۱
هر دو سنجنده	۳۰	باند ۷ از لندست و باند ۱۲ از سنتینل	موج کوتاه مادون قرمز ۲
هر دو سنجنده	۳۰	باند ۹ از لندست و باند ۱۰ از سنتینل	ابره‌ای سیروس
لندست	۳۰	باند مادون قرمز حرارتی اول – باند ۱۰ از لندست	مادون قرمز حرارتی ۱
لندست	۳۰	باند مادون قرمز حرارتی دوم – باند ۱۱ از لندست	مادون قرمز حرارتی ۲

بعد از ترکیب باندهای منتخب از هر دو سنجنده و با اجرای الگوریتم‌های قطعه‌بندی مشروط، در مرحله نهایی در روند شناسایی دقیق‌تر محدوده‌های پوشش برف با دقت و صحت بالا شاخص تفاضلی نرمال شده برف $NDSI_{HLS}$ با لحاظ رابطه ی ۵ اجرا شد.

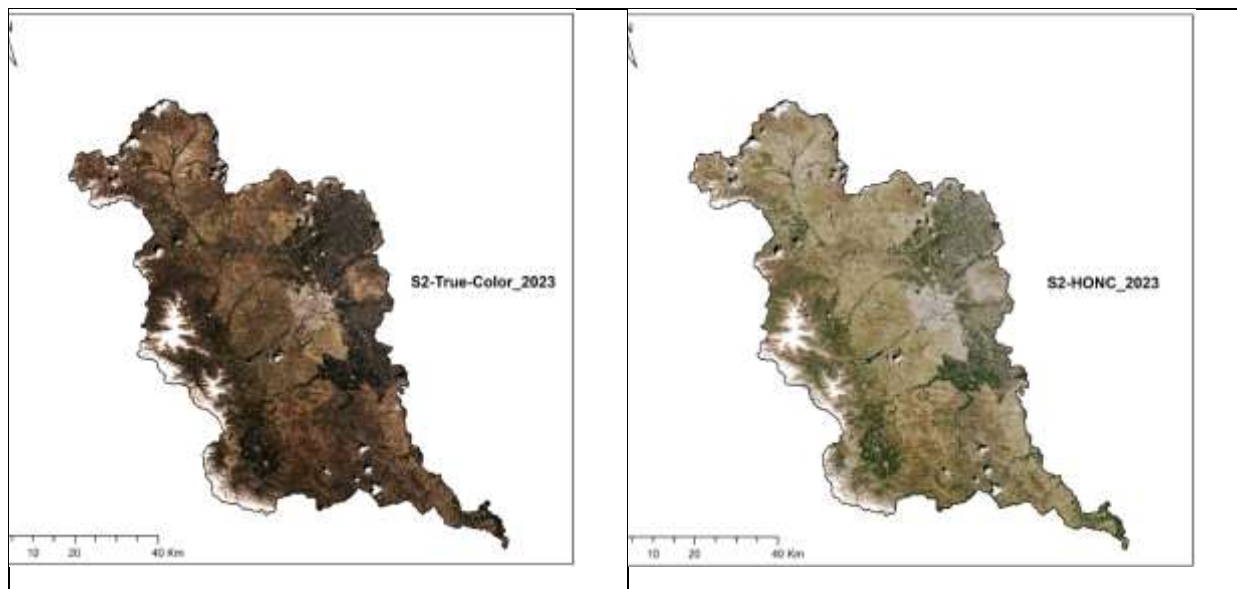
$$NDSI_{HLS} = \{(B_{RED} - B_{SWIR1}) / (B_{RED} + B_{SWIR1})\} \quad (رابطه ۵)$$

در فرمول فوق B_{RED} نشان دهنده ترکیب باندهای قرمز (باند ۴) لندست و سنتینل و B_{SWIR1} نشان دهنده ترکیب باندهای موج کوتاه مادون قرمز ۱ (باند ۶ لندست و باند ۱۱ سنتینل) می‌باشد. هدف اصلی از ترکیب باندهای مورد نظر از هر دو سنجنده بهبود کیفی بالاتر در شاخص پوشش برف خروجی نسبت به هر کدام از سنجنده‌های مورد نظر بود.

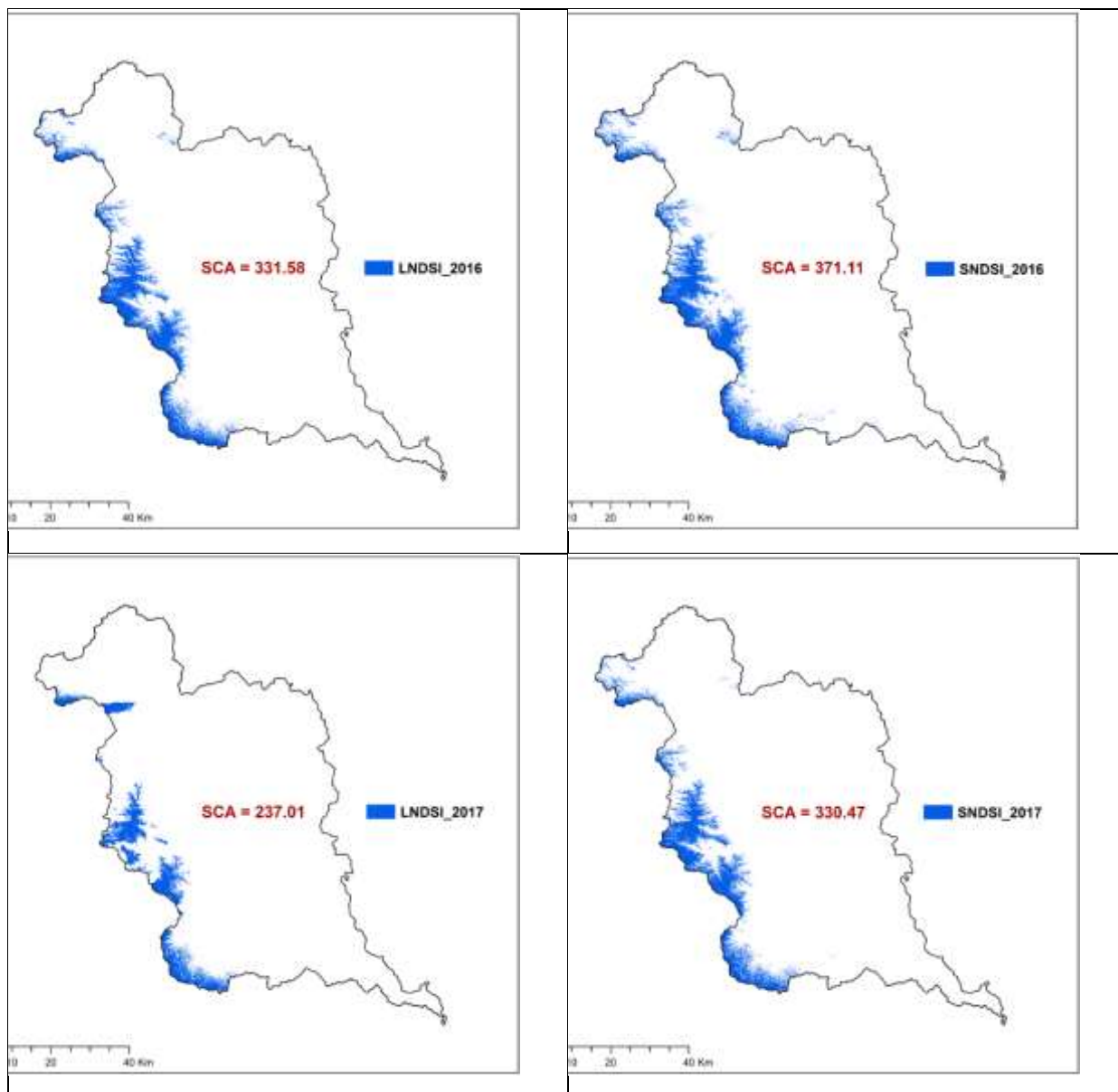
نتایج تحقیق

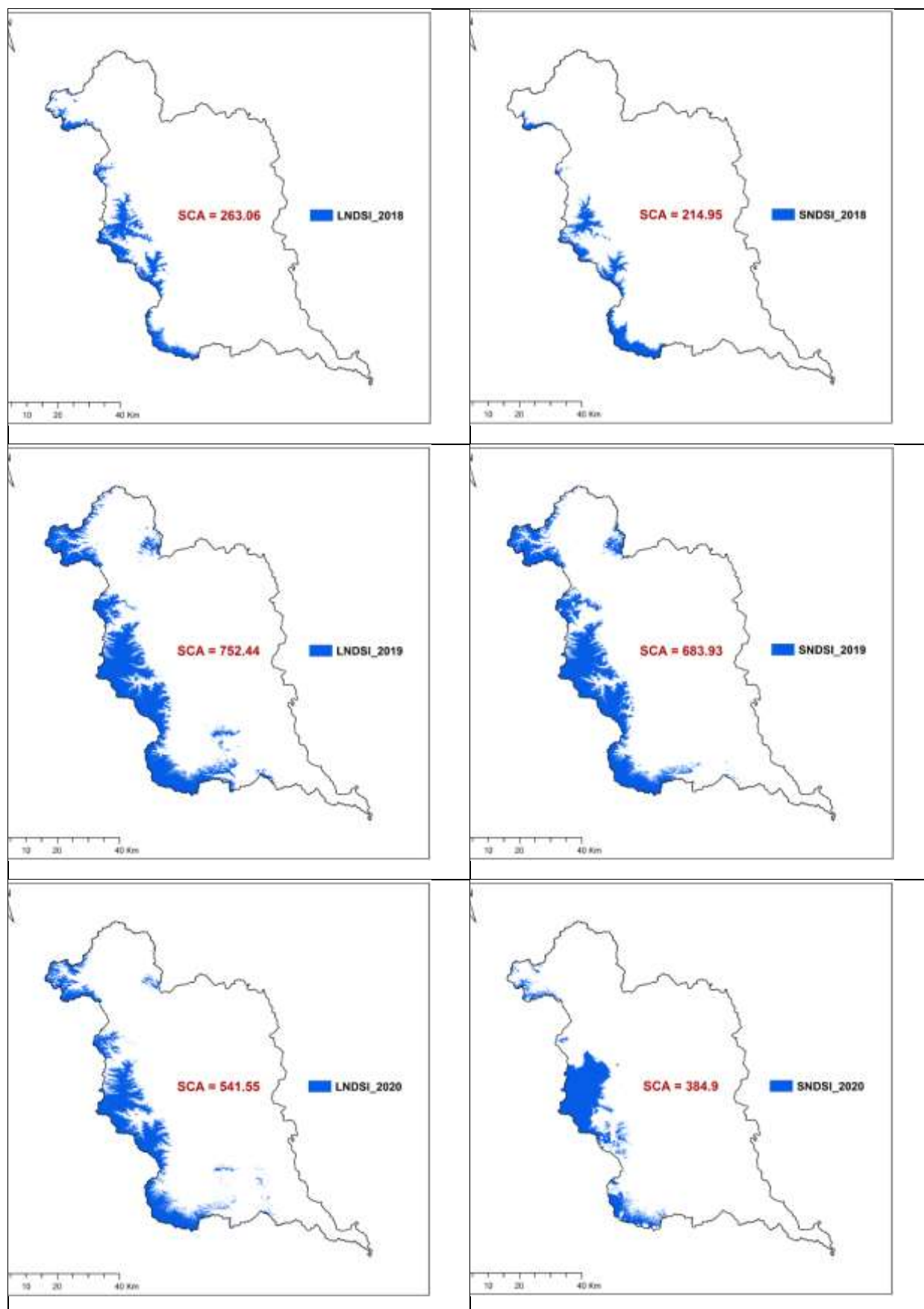
تولید محصولات تصویری

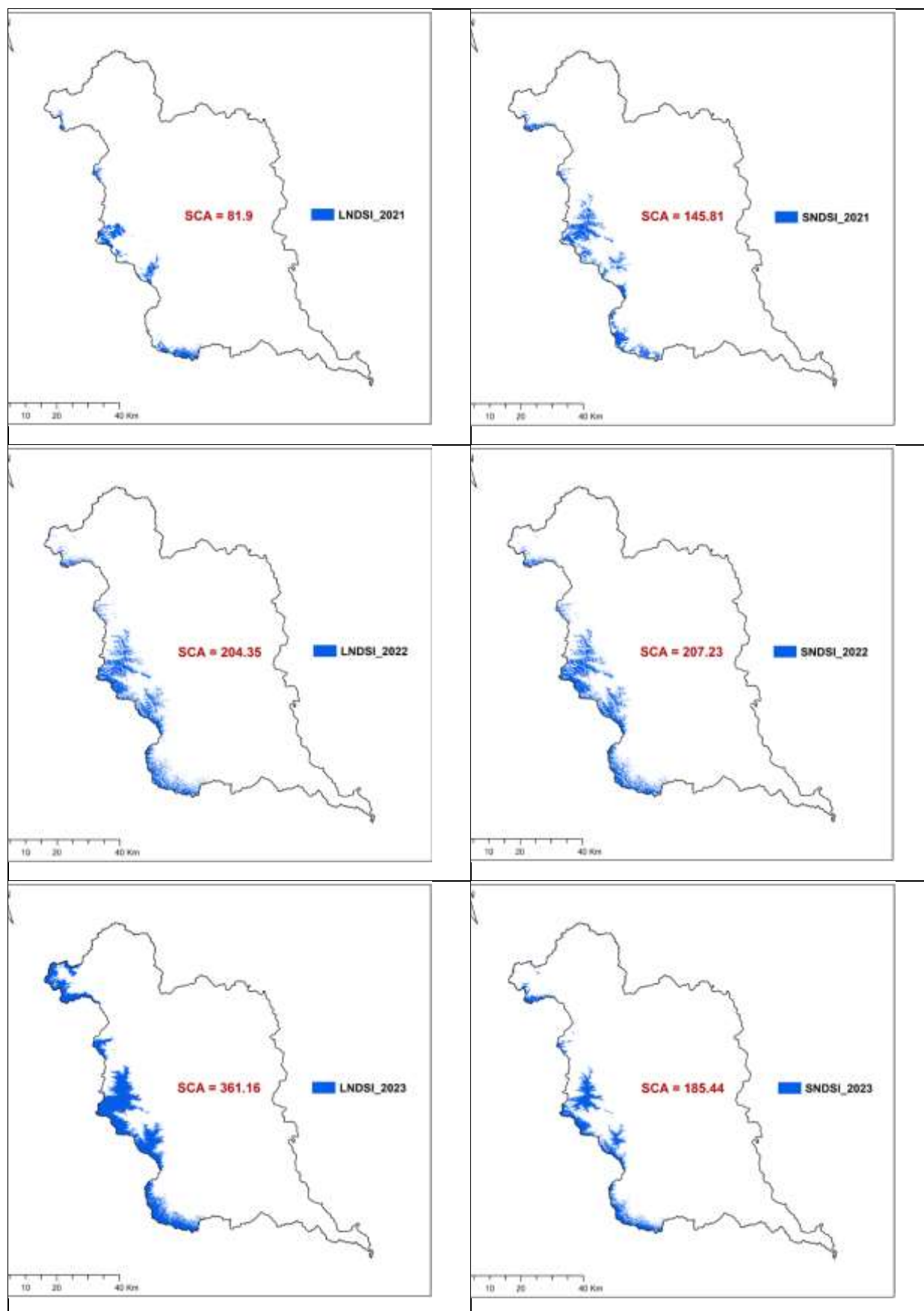
با اجرای مراحل اولیه پردازش تصاویر چندین نوع از محصولات شامل تصاویر رنگی واقعی، رنگی کاذب، تصاویر بهینه شده رنگی و نقشه طبقه‌بندی از صحنه تصاویر در حالت ترکیبی تولید گردید که در شکل ۲ برخی از آنها ارایه شده است.



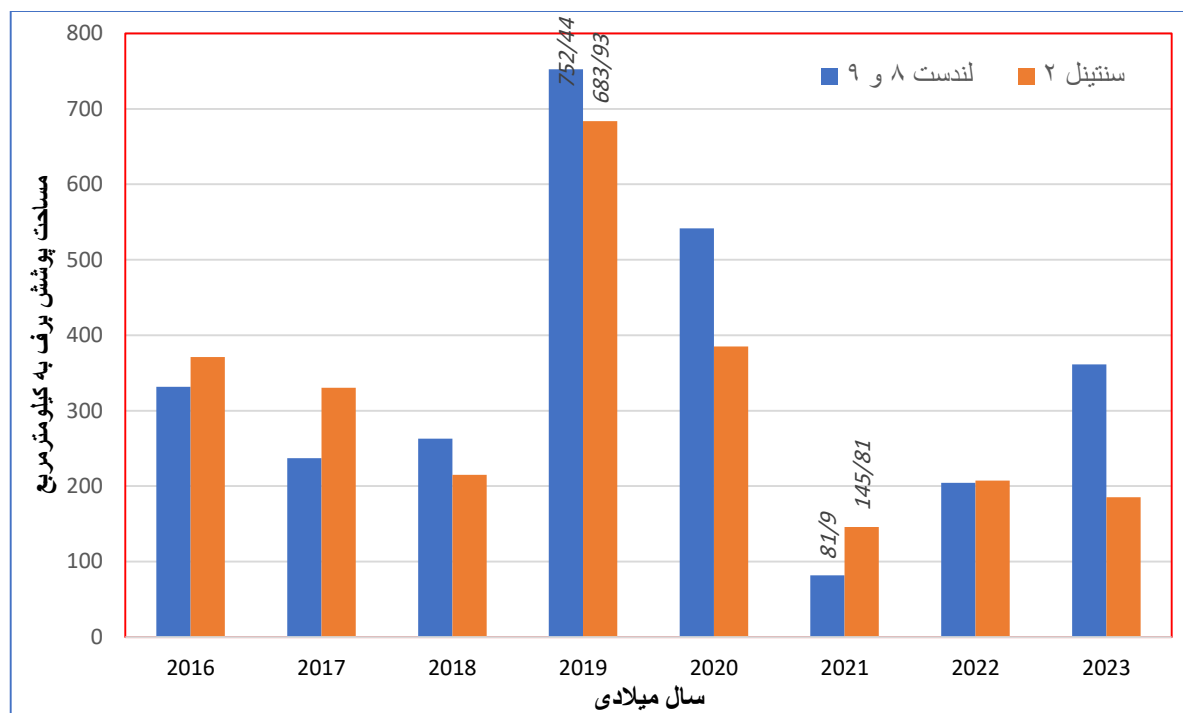
همینطور نحوه بکارگیری توابع مرتبط قابل توجه می باشد. در شکل ۴ تغییرات مقادیر پوشش برف مستخرج از پردازش تصاویر لندست و سنتینل به ازای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ نشان داده شده است.







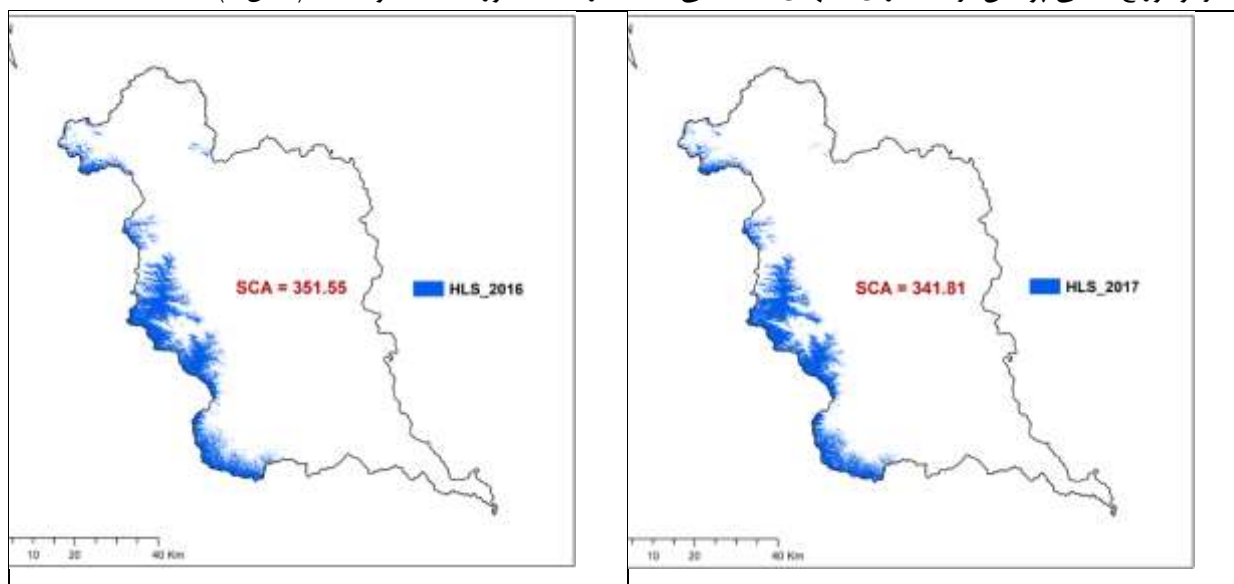
شکل ۳: نقشه های پوشش برف مستخرج از تصاویر ماهواره ای لندست (LND SI) و سنتینل (SND SI)

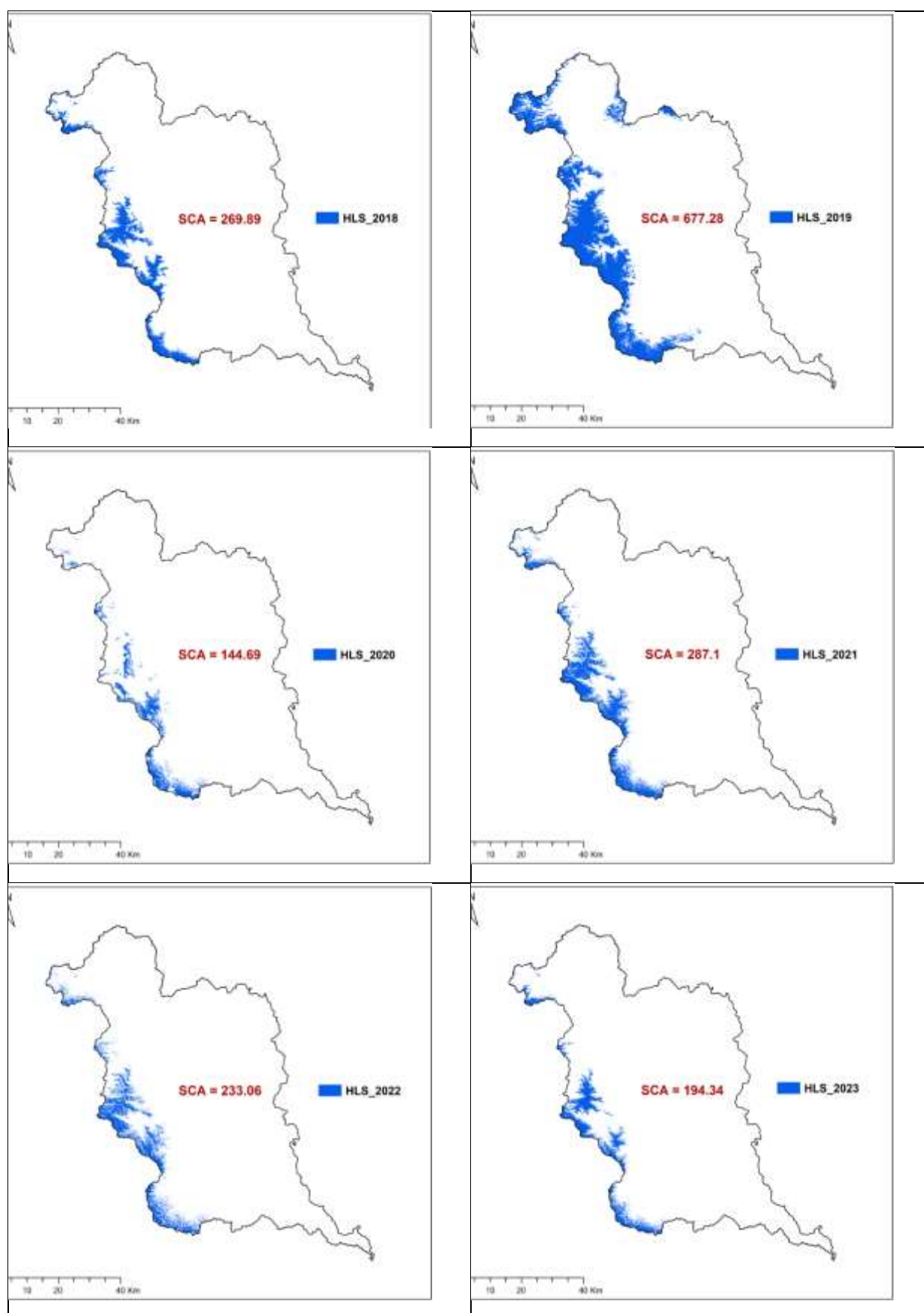


شکل ۴: تغییرات مقادیر پوشش برف مستخرج از پردازش تصاویر لندست و سنتینل ماه "می" سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳

تغییرات پوشش برف با پردازش تصاویر ترکیبی

به منظور افزایش دقت نتایج تابع شاخص تفاضلی نرمال شده (معادله ۵) بر روی تصاویر همجوش لندست و سنتینل (HLS) اجرا و توزیع مکانی پوشش برف به ازای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ در منطقه مورد مطالعه تولید شد (شکل ۵).

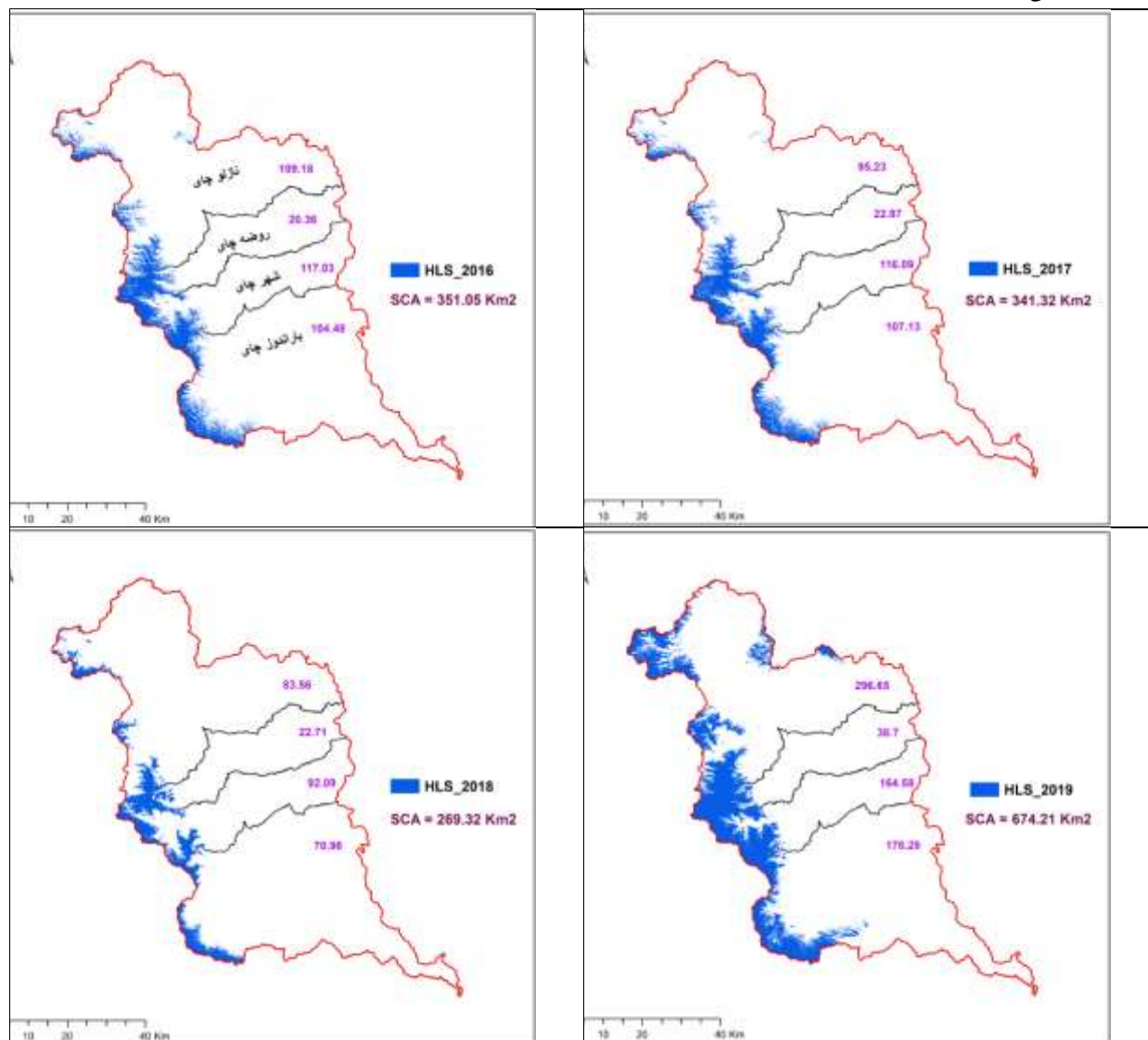


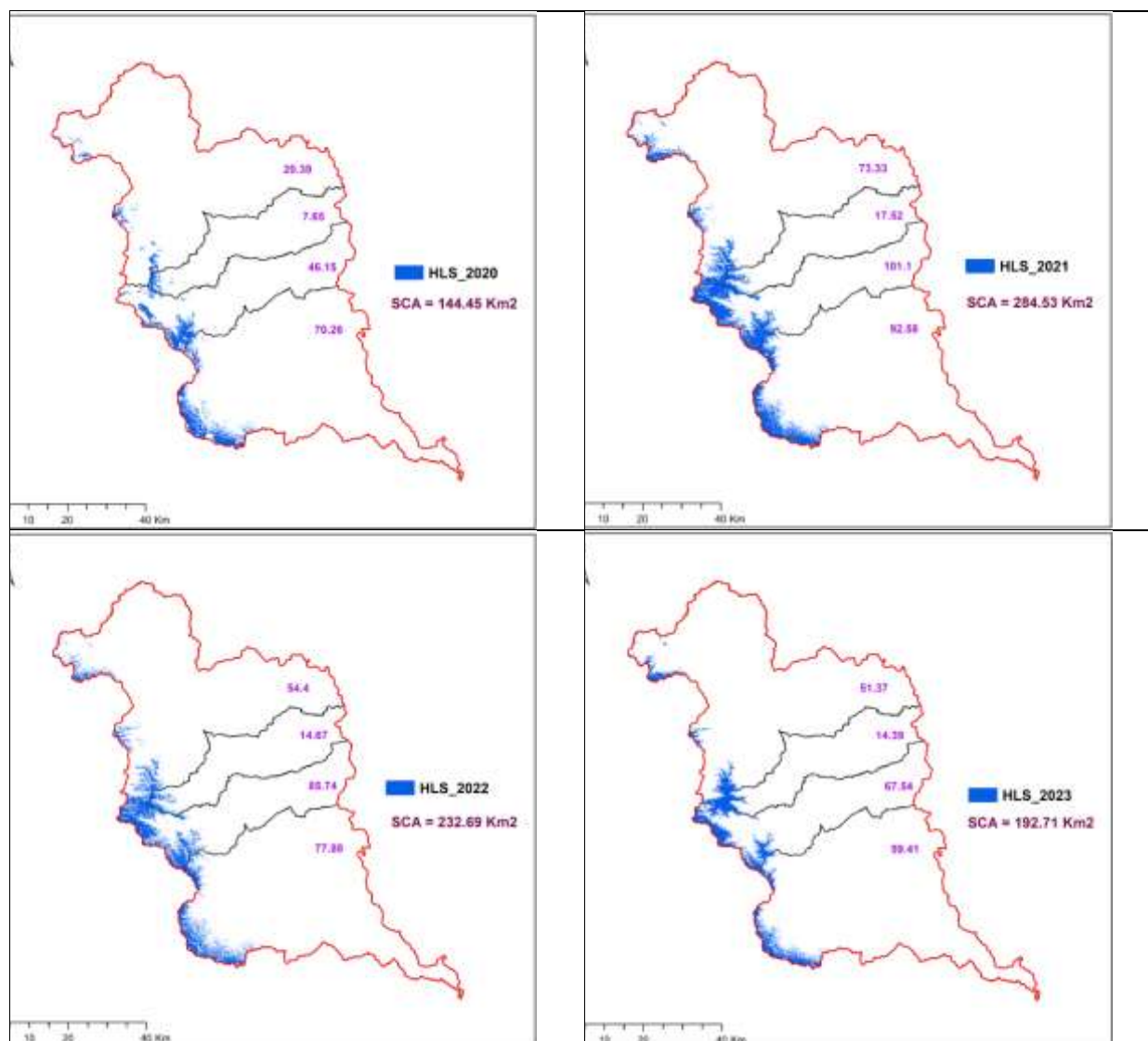


شکل ۵- نقشه‌های پوشش برف مستخرج از روش همجوشی تصاویر ماهواره‌های لندست و سنتینل (HLS) در محدوده حوضه‌های آبریز غربی دریاچه ارومیه - مقادیر مساحت پوشش برف (SCA) برای هر سال در متن نقشه مربوطه ذکر شده است.

تفکیک پوشش برف در حوضه‌های آبریز

در مرحله نهایی با اجرای روش‌های متعدد تحلیل‌های مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS سهم هر کدام از حوضه‌های آبریز در کل محدوده مورد مطالعه بطور مجزا تفکیک گردید. در شکل ۶ نتایج توزیع مکانی پوشش برف به ازای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ نمایش داده شده است.





شکل ۶: توزیع مکانی پوشش برف به تفکیک محدوده حوضه‌های آبریز غربی دریاچه ارومیه به ازای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳

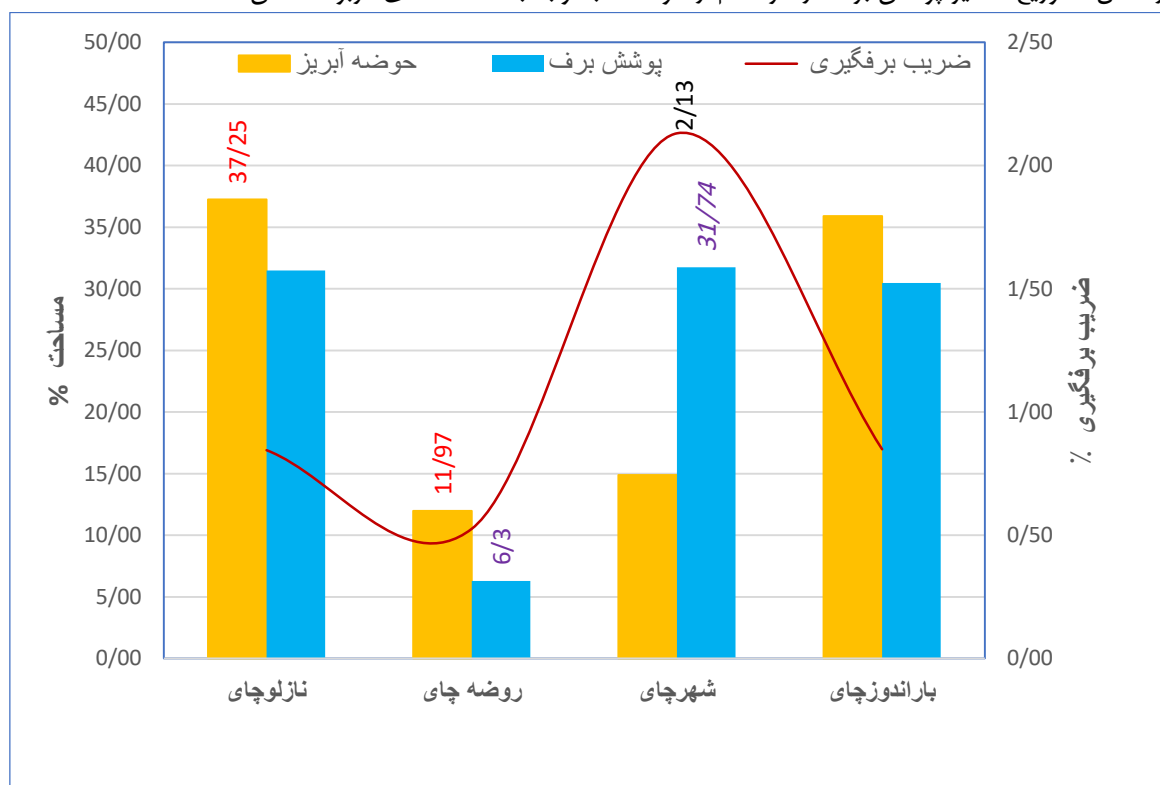
توزیع مقادیر پوشش برف برای هر سال در هر کدام از حوضه‌های آبریز غرب دریاچه ارومیه در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲: توزیع مقادیر پوشش برف به ازای سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ میلادی

سال	باراندوز چای	شهرچای	روضه چای	نازلوچای	جمع
۲۰۱۶	۱۰۴/۴۸	۱۱۷/۰۳	۲۰/۳۶	۱۰۹/۱۸	۳۵۱/۰۵
۲۰۱۷	۱۰۷/۱۳	۱۱۶/۰۹	۲۲/۸۷	۹۵/۲۳	۳۴۱/۳۲
۲۰۱۸	۷۰/۹۶	۹۲/۰۹	۲۲/۷۱	۸۳/۵۶	۲۶۹/۳۲
۲۰۱۹	۱۷۶/۲۸	۱۶۴/۵۸	۳۶/۷	۲۹۶/۶۵	۶۷۴/۲۱
۲۰۲۰	۷۰/۲۶	۴۶/۱۵	۷/۶۵	۲۰/۳۹	۱۴۴/۴۵
۲۰۲۱	۹۲/۵۸	۱۰۱/۱	۱۷/۵۲	۷۳/۳۳	۲۸۴/۵۳
۲۰۲۲	۷۷/۸۸	۸۵/۷۴	۱۴/۶۷	۵۴/۴	۲۳۲/۶۹
۲۰۲۳	۵۹/۴۱	۶۷/۵۴	۱۴/۳۹	۵۱/۳۷	۱۹۲/۷۱
جمع	۷۵۸/۹۸	۷۹۰/۳۲	۱۵۶/۸۷	۷۸۴/۱۱	۲۴۹۰/۲۸

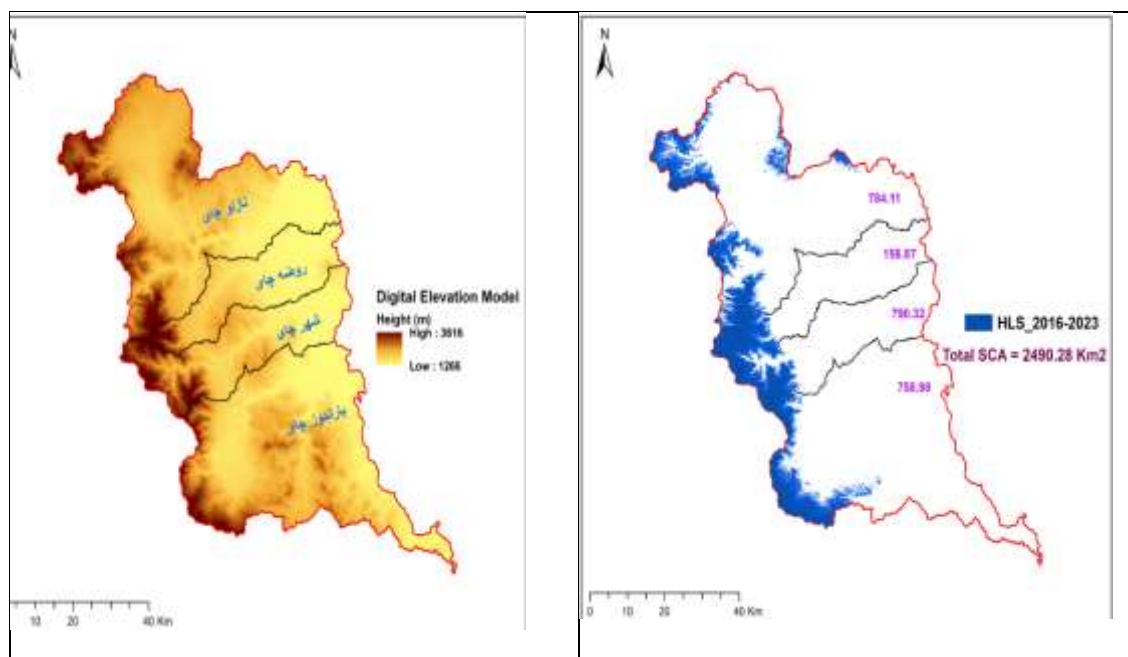
میانگین	۹۴/۸۷	۹۸/۷۹	۱۹/۶۱	۹۸/۰۱	۳۱۱/۲۸
درصد	۳۰/۴۸	۳۱/۷۴	۶/۳۰	۳۱/۴۹	۱۰۰

در شکل ۷ توزیع مقادیر پوشش برف در هر کدام از حوضه‌ها با توجه به مساحت‌های مربوطه نشان داده شده است.



شکل ۷: توزیع پوشش برف در حوضه‌های آبریز غرب دریاچه ارومیه و ضریب برف‌گیری حاصله

همان‌طوری که از جدول ۲ و شکل ۷ مشخص می‌باشد، حوضه آبریز شهرچای علیرغم دارا بودن مساحت کم نسبت به حوضه‌های نازلوچای و باراندوز چای دارای سهم بیشتری از پوشش برف در طول سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ داشته است که توسط ضریب برف‌گیری قابل استناد می‌باشد. یادآور می‌گردد این ضریب از تقسیم درصد پوشش برف به درصد مساحت هر کدام از حوضه‌های مذکور حاصل شده است. به احتمال زیاد یکی از دلایل اصلی این نوع توزیع مکانی پوشش برف در محدوده مورد مطالعه بالا بودن میانگین ارتفاع این حوضه نسبت به بقیه حوضه‌ها می‌باشد. بررسی بصری و شماتیک توزیع مکانی مجموع پوشش برف (از سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳) و مدل ارتفاعی توسط شکل ۸ این نظر را تایید می‌کند.



شکل ۸: توزیع مکانی مجموع پوشش برف از سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ و مدل ارتفاعی در حوضه‌های آبریز غرب دریاچه ارومیه

بحث و استدلال

میزان پوشش برف به عنوان یکی از مهمترین تأمین‌کننده‌های منابع آبی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در تحقیق حاضر، به منظور استخراج هر چه دقیق‌تر تغییرات زمانی و مکانی پوشش برفی در محدوده حوضه آبریز غربی دریاچه ارومیه دو نوع از تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس متوسط لندست (سنجنده‌های ۸ و ۹) و سنتینل-۲ به روش‌های متفاوت مورد پردازش قرار گرفتند. ابتدا، با استناد بر محصولات مختلف سنجنده‌های لندست و سنتینل با اعمال شاخص‌های تفاضلی نرمال شده بطور مستقل نقشه‌های پوشش برف تولید شدند که ضمن دارا بودن تشابهات (با همبستگی ۸۹ درصد) دارای تمایزات مشخصی هم هستند. با هدف بهبود دقت نتایج در نقشه‌های پوشش برف تصاویر دریافتی از هر دو سنجنده از طریق اجرای الگوریتم‌های همجوشی ترکیب و در محیط نرم‌افزار ایکاگنیشن مورد پردازش قرار گرفتند. با تولید محصولات خروجی متنوع، مانند نقشه‌های طبقه‌بندی شده، امکان تفکیک کلاس‌های پوشش گیاهی، سطوح آب، پوشش ابری، سایه ابرها و پوشش برف برای سال‌های منتخب (فقط برای ماه می) میسر گردید. در مراحل بعد، با اعمال معادله‌های شاخص تفاضلی نرمال شده محدودهای پوشش برف برای هر سال به روش‌های مختلف استخراج و نقشه‌های حاصله در فرمت رستری تولید شد.

باید یادآور شد که، در اغلب محدوده‌های جغرافیایی کشور عزیزمان ایران بارش برف یک پدیده رایج اقلیم‌شناسی و هیدرولوژیکی محسوب می‌گردد که بیشتر در ارتفاعات و در طول سال بصورت پوشش برفی تجمع و در چرخه منابع آبی (به عنوان پارامتر بسیار مهم) نقش بسزایی ایفا می‌نماید (ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین، باید در محدوده رشته‌های سیلوانه پوشش برف به عنوان یکی از متغیرهای کلیدی بسیار مهم تلقی گردد، به دلیل اینکه تغییرات زمانی و مکانی آن سایر منابع هیدروکلیماتیک به ویژه روند آبریزی دریاچه ارومیه و البته حیات جوامع انسانی ساکن در این محدوده جغرافیایی ویژه را بطور موثر و غیرقابل انکاری تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور کسب اطلاعات ارزشمند از ماهیت و تغییرات این متغیر هیدروکلیماتیک تصاویر ماهواره‌ای و البته روش‌های دقیق پردازش رقومی تصاویر می‌توانند در روند برآورد سطح پوشش برف نقش بسیار مؤثری ایفا نمایند. با این وجود، پایین بودن قدرت تفکیک مکانی و طیفی تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس متوسط در برخی موارد می‌توانند مورد نقد قرار گیرند (میر یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین وجود پوشش ابری در مناطق کوهستانی

در اغلب اوقات باعث می‌شود کل و یا بخشی از تصویر به علت ابرناکی گسترده مناسب پردازش و استخراج اطلاعات مربوط به پوشش برفی نباشد (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین، کاهش خطاهای محاسبات در روند مدلسازی پوشش برف نیازمند دسترسی به داده‌های با دقت بالا، نرم افزارهای تخصصی و بکارگیری روش‌های پردازش شیء‌گرا به ویژه روش طبقه‌بندی نظارت شده از نوع ماشین بردار پشتیبان را می‌طلبد. (بورگس^۱، ۱۹۹۸).

با وجود امکان ترکیب تصاویر لندست و سنتینل، تفاوت‌هایی نیز در میان داده‌های آن‌ها به ویژه باندهای طول موج کوتاه وجود دارد. به عنوان مثال، تمامی باندهای ماهواره سنتینل-۲ در محدوده مرئی و مادون قرمز بازتابی با باندهای ماهواره لندست ۸ و یا ۹ بطور کامل همخوانی ندارند. در عین حال، ماهواره سنتینل-۲ علیرغم تفکیک مکانی بالاتر نسبت به تصاویر لندست ۸ و ۹ فاقد باندهای حرارتی است (سانچز-اسپینوسا و اسپرودر^۲، ۲۰۱۹). با وجود چنین تفاوت‌هایی، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تصاویر ترکیبی حاصله از این دو نوع سنجنده متفاوت در بسیاری از زمینه‌ها بصورت مکمل در محیط نرم‌افزار تخصصی ایگانشین و با اعمال روش‌های شیء‌گرا قابل پردازش بوده و از این طریق امکان مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف فراهم می‌گردد (رسولی و همکاران^۳، ۲۰۲۱). همچنین توان تفکیک زمانی این دو سنجنده (حداکثر ۴ الی ۶ روز برای لندست و ۲ الی ۴ روز برای سنتینل) امکان اخذ اطلاعات کاربردی و بهینه در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر را میسر می‌سازد. در حال حاضر، اگرچه داده‌های بدست آمده از ماهواره سنتینل-۲ از قدمت زمانی زیادی برخوردار نیستند اما مزیت‌های آن‌ها به ویژه تفکیک مکانی بالا (۱۰ متری در برخی از باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک) مورد تأیید تحقیقات کاربردی قرار گرفته است. با این حال، به نظر می‌رسد به منظور کسب اطلاعات دقیق‌تر از پوشش زمین و متغیرهای مرتبط، باید روند پردازش این نوع تصاویر از طریق اجرای شیوه‌های ترکیبی و همجوشی بصورت موثرتری مورد تقویت قرار بگیرد (لی و چن^۴، ۲۰۲۰).

از دیگر امتیازات مهم همجوشی داده‌های لندست و سنتینل می‌توان به دقت رادیومتریکی بسیار نزدیک این نوع سنجنده‌ها در مطالعات پوشش اراضی به ویژه پوشش گیاهی، منابع آب سطحی و پوشش برف اشاره نمود، ضمن اینکه استفاده ترکیبی داده‌های لندست و سنتینل افزایش توان تفکیک زمانی مطالعه مورد نظر را به همراه خواهد داشت (رسولی و همکاران^۵، ۲۰۲۰). بطورحتم، در برخی از کاربردها (مانند بررسی تغییرات حرارت سطح زمین) شاید نتوان فقط به تصاویر سنتینل-۲ به دلیل عدم وجود باندهای حرارتی استناد نمود. ضمناً عدم وجود باندهای حرارتی در سنجنده سنتینل-۲، باعث شده تا امکان حذف کامل برخی از انواع ابرها به طور موثری فراهم نباشد. با وجود آنکه گفته می‌شود این دو ماهواره نسبت به یکدیگر مکمل هستند، ضرورت دارد حتماً پیش از انجام هر پژوهشی (به منظور اجرای روش‌های پردازش ترکیبی) به مواردی مانند اختلاف در طول موج باندها، توان تفکیک مکانی تصاویر، ساعت تصویر برداری و سیستم‌های جغرافیایی هر دو سنجنده دقت لازم را مبذول داشت.

نتیجه گیری

هدف اصلی تحقیق جاری بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف محدوده حوضه های آبریز غربی دریاچه ارومیه با اجرای روش های پردازش شیء گرا و شاخص های استاندارد تفاضلی نرمال شده برف به ازای سال های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ میلادی بود. بنابراین، با پردازش تصاویر قابل دسترس سنتینل-۲ و تصاویر لندست ۸ و ۹ تلاش شد تا از طریق پیاده سازی روش های تلفیقی نقشه های پوشش برف با دقت بالا تولید گردد. با استناد بر روش های متفاوت، نتایج نهایی نشان دهنده این واقعیت هستند که، علیرغم اختلاف اندک در مقادیر پوشش برف، روش های بهینه سازی و همجوشی سنجنده های لندست و سنتینل می توانند در فرآیند استخراج و شناسایی پوشش برف بسیار موثر باشند.

نتایج حاصله نشان می دهد در محدوده مورد مطالعه در طول سال های گذشته پوشش برف به میزان قابل توجهی متغیر بوده است. به نظر می رسد، ذوب سریع پهنه های برفی در طول سال های گذشته بنا به دلایل تغییرات اقلیمی، اثرات هیدروکلیماتیک و اکولوژیک فاجعه باری به ویژه بر توان آب گیری دریاچه ارومیه گذاشته باشد. بطور حتم، هر کدام از این مسایل نیاز به تحقیقات دقیق و جامع تری دارد. با این وجود، بر اساس دانش فعلی امکان پردازش توأم سری تصاویر لندست و سنتینل و حتی سایر سنجنده ها با پیاده سازی روش های دانش پایه عمیق در محیط نرم افزارهای تخصصی فراهم گشته است. یادآور می شود به منظور مطالعه دقیق تر سطح پوشش برف تنها اعمال شاخص های مرتبط کافی نیست و نیاز به اعمال الگوریتم های دقیق تر (و دسترسی به مشاهدات میدانی) با هدف تفکیک پوشش یخ از برف به ویژه در محدوده های توپوگرافیک خاص و دره های عمیق پناهگاهی در تمامی حوضه های آبریز مشرف به دریاچه ارومیه ضرورت دارد. در صورت پایش مستمر چند منظوره ای و چند سنجنده ای مدیریت مدبرانه منابع طبیعی بسیار ارزشمند رشته کوه های سیلوانه حتی در مقیاس های زمانی کوتاه مدت فراهم می گردد.

منابع:

- امیدی، قلعه؛ محمدی، محبوبه (۱۳۹۳) بررسی تغییرات سطح پوشش برف در ارتفاعات زردکوه بختیاری با استفاده از سنجش از دور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان بلوچستان.
- امینی نیا، کریم؛ لشکری، حسن؛ علیجانی، بهلول (۱۳۸۹) بررسی و تحلیل نوسانات بارش برف سنگین در شمال غرب ایران، نشریه فضای جغرافیایی، شماره ۲۹.
- جان پرور، محسن؛ عباسی، فرید؛ قباسفیدی، الهام؛ مازندرانی، دریا (۱۳۹۹) پارامترهای مؤثر بر مسائل زیست‌محیطی در شمال غرب ایران (مطالعه موردی: خشک شدن دریاچه ارومیه)؛ نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۹، شماره ۳ (پیاپی ۳۵)، ۱۵۷-۱۴۳.
- جهانبخش اصل، سعید؛ دین پڑوه، یعقوب؛ عالی نژاد، محمدحسین؛ ولی زاده کامران، خلیل؛ پرهیزکار، مرتضی (۱۳۹۵) شبیه سازی رواناب ذوب برف در حوضه شهرچای با استفاده از مدل SRM، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان) دوره ۲۷، شماره ۳ (پیاپی ۶۳)، ۱-۱۴.
- جویباری مقدم، یاسر؛ اخوندزاده، مهدی؛ سراجیان، محمدرضا (۱۳۹۳) تخمین سطح پوشش برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸. اولین کنفرانس بین المللی مهندسی محیط زیست، تهران، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.
- حیدری، حسن (۱۳۹۵) تحلیل روند تغییرات بارش برف و باران در ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان غربی، مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۷، شماره ۲۶، ۱۱۰-۹۲.
- ختمی، مهدیه (۱۳۹۹) تحلیل فضایی پوشش برف در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سنجنده مودیس. پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.
- رسولی، علی اکبر؛ عبدیان، محمد؛ رنجبر، فرهاد (۱۳۹۴) مطالعه تغییرات پوشش برف و یخ ارتفاعات کوهستان سبلان در طی سه دهه گذشته با استفاده از سنجش از دور و GIS. اولین کنگره بین المللی زمین، فضا و انرژی پاک، ۱۴ آبان ۱۳۹۴، شهر اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.
- زینالی، بتول؛ قلعه، احسان؛ صفری، شیوا (۱۴۰۰) استخراج مساحت تحت پوشش برف کوهستان سبلان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست به روش طبقه بندی شیء‌گرا. مجله هیدروژئومورفولوژی، ۸ (۲۶).
- ساری صراف، بهروز؛ نقی زاده، حبیبه؛ رسولی، علی اکبر؛ جهانبخش، سعید؛ باباییان، ایمان (۱۳۹۸) مدل سازی و تحلیل فضایی عمق برف در پهنه شمالی ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی دوره ۵، شماره ۴، ۶۷۱-۶۵۱.
- سلیمانی، کریم؛ درویشی، شادمان؛ شکریان، فاطمه؛ رشیدپور، مصطفی (۱۳۹۷) پایش مکانی-زمانی پوشش برف در استان کردستان با استفاده از تصاویر ماهواره ای مودیس. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۰ (۳)، ۷۷-۱۰۴.
- سیفی، هوشنگ (۱۴۰۰) برآورد سطح پوشش برف از طریق تکنیکهای شیء‌گرا با استفاده از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS مطالعه موردی: کوهستان سبلان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۱ (۶۳).
- شکیبا، امینه؛ صادقی، سلیمان؛ دوستان، رضا (۱۳۹۴) مراکز فعالیت و الگوهای سینوپتیکی بارش برف سنگین در شمال غرب ایران، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۶، ۱۰۴-۸۷.
- کاشکی، عبدالرضا؛ حسینی، سیدمحمد؛ زندی، رحمان؛ حاجی محمدی، حسن (۱۴۰۱) بررسی ماهواره‌ای-همدید بارشهای فراگیر برف در غرب ایران، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۶، شماره ۸۲، ۲۱۰-۱۸۹.

متین نیا، وحید (۱۳۹۷) بررسی روند تغییرات سطح پوشش برف در حوضه دریاچه ارومیه. پایاننامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود.

محرمی، میثم؛ رسولی، علی اکبر؛ رستم زاده هاشم (۱۳۹۵) مدل سازی تاثیرات پسروی دریاچه ارومیه بر روستاهای ساحل شرقی دریاچه ارومیه با پردازش شیء گرای تصاویر ماهواره ای. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی؛ جلد ۳ شماره ۳، ۸۱-۹۸.

میرموسوی، سیدحسین؛ صبور، لیلا (۱۳۹۳) پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه شمالغرب ایران. جغرافیا و توسعه، شماره ۳۵.

میریعیقوب زاده، میرحسین؛ قنبرپور، محمدرضا (۱۳۸۹) بررسی کاربرد نقشه های پوشش برفی حاصل از تصاویر ماهواره های MODIS در مدل سازی رواناب ذوب برف (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد کرج). شماره ۷۶، ۲۱۴-۱۴۱.

نیکوخصال، یونس؛ رسولی، علی اکبر؛ مختاری، داود؛ ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۱) تحلیل روابط تغییرات بارش و سطح آبهای زیرزمینی دشت مرند با روش NRMC. نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی؛ سال ۲۶، شماره ۸۱، ۲۶۶-۲۶۵.

هوشیار، محمود؛ جوانبخت شین آباد، نسرين (۱۳۹۷) تحلیل سینوپتیکی بارش برف سنگین شهرستان ارومیه، دومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران.

References

- Amidi, Qale; Mohammadi, Mahboobeh (2014) Investigation of changes in snow cover levels in the heights of Zardkouh Bakhtiari using remote sensing. Master's thesis, University of Sistan and Baluchestan. [In Persian]
- Amininia, Karim; Lashkari, Hassan; Alijani, Bahloul (2010) Investigation and analysis of heavy snowfall fluctuations in northwest Iran, Geographical Space Journal, No. 29. [In Persian]
- Janparvar, Mohsen; Abbasi, Farid; Ghabasfidi, Elham; Mazandarani, Darya (2010) Parameters affecting environmental issues in northwest Iran (case study: drying of Lake Urmia); Scientific Journal of Geography and Environmental Hazards, Volume 9, No. 3 (35th issue), 143-157. [In Persian]
- Jahanbakhsh Asl, Saeed; Dinpajouh, Yaghoub; Alinejad, Mohammadhossein; Valizadeh Kamran, Khalil; Parhizkar, Morteza (2016) Simulation of snowmelt runoff in Shahrchay basin using SRM model, Journal of Geography and Environmental Planning (Humanities Research Journal of Isfahan University) Volume 27, Issue 3 (63), 1-14. [In Persian]
- Jooybari Moghadam, Yaser; Akhondzadeh, Mehdi; Sarajian, Mohammad Reza (2014) Estimation of snow cover using Landsat 8 satellite images. First International Conference on Environmental Engineering, Tehran, Center for Sustainable Development Solutions. [In Persian]
- Heydari, Hassan (2016) Analysis of changes in snowfall and rainfall in selected stations of West Azerbaijan Province, Journal of Geographical Studies of Arid Regions, Volume 7, Issue 26, 110-92. [In Persian]
- Khatami, Mahdiah (2019) Spatial analysis of snow cover in the Urmia Lake watershed using MODIS sensor. Thesis for obtaining a master's degree in the field of water and meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz. [In Persian]
- Rasouli, Ali Akbar; Abdian, Mohammad; Ranjbar, Farhad (2015) Study of changes in snow and ice cover of Sabalan Mountain heights during the past three decades using remote sensing and GIS. The First International Congress on Earth, Space and Clean Energy, November 5, 2015, Ardabil, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]
- Zeinali, B.; Ghale, E.; Safari, Shiva (2017) Extraction of snow cover area of Sabalan Mountain using Landsat satellite images using object-oriented classification method. Journal of Hydrogeomorphology, 8 (26). [In Persian]

- Sari-Saraf, Behrouz; Nagizadeh, Habibeh; Rasouli, Ali Akbar; Jahanbakhsh, Saeed; Babaiyan, Iman (2019) Spatial modeling and analysis of snow depth in the northern part of Iran. *Physical Geography Research*, Volume 5, Issue 4, 651-671. [In Persian]
- Soleimani, Karim; Darvishi, Shadman; Shokrian, Fatemeh; Rashidpour, Mustafa (2018) Spatial-temporal monitoring of snow cover in Kurdistan province using MODIS satellite images. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 10(3), 104-77. [In Persian]
- Seifi, Houshang (2019) Estimating snow cover level through object-oriented techniques using OLI and TIRS sensor images, case study: Sabalan Mountain, *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 21(63). [In Persian]
- Shakiba, Amineh; Sadeghi, Soleiman; Dostan, Reza (2015) Activity centers and synoptic patterns of heavy snowfall in northwest Iran, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, No. 4, serial number 16, 104-87. [In Persian]
- Kashki, Abdolreza; Hosseini, Seyed Mohammad; Zandi, Rahman; Hajimohammadi, Hassan (2018) Satellite-synoptic survey of widespread snowfall in western Iran, *Scientific Journal of Geography and Planning*; Year 26, Issue 82, 189-210. [In Persian]
- Matinnia, Vahid (2018) Study of the trend of changes in the snow cover level in the Urmia Lake basin. Master's thesis in civil engineering, Shahrood University of Technology. [In Persian]
- Moharrami, Meysam; Rasouli, Ali Akbar; Rostamzadeh Hashem (2016) Modeling the effects of Lake Urmia's recession on the villages on the eastern shore of Lake Urmia using object-oriented processing of satellite images. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*; Volume 3, Issue 3, 81-98. [In Persian]
- Mirmousavi, Seyed Hossein; Sabour, Leila (2014) Monitoring snow cover changes using MODIS sensor images in the northwest region of Iran. *Geography and Development*, Issue 35. [In Persian]
- Miriaghobzadeh, Mir Hossein; Ghanbarpour, Mohammad Reza (2010) Study of the application of snow cover maps obtained from MODIS satellite images in snowmelt runoff modeling (case study: Karaj Dam watershed). No. 76, 214-141. [In Persian]
- Nikokhsal, Younes; Rasouli, Ali Akbar; Mokhtari, Davud; Valizadeh Kamran, Khalil (2013) Analysis of the relationship between precipitation changes and groundwater levels in the Marand Plain using the NRMC method. *Scientific Journal of Geography and Planning*; Year 26, No. 81, 265-276. [In Persian]
- Hoshyar, Mahmoud; Javanbakht Shinabad, Nasrin (2018) Synoptic analysis of heavy snowfall in Urmia County, Second National Conference of Iran on Water and Meteorology. [In Persian]
- Burges, C. (1998) *A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition, Data Mining, and Knowledge Discovery*. Kluwer Academic Publishers.
- Foster, J.L.; Hall, D.K.; Chang, Z. (1987) Remote sensing of snow. *Eos Trans. Amer. Geophys. Union*, 68, 682-684.
- Gascoin, S.; Grizonnet, M.; Bouchet, M.; Salgues, G.; Hagolle, O. (2019) Theia Snow collection: High-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 493-514.
- Li, J.; Chen, B. (2020) Global Revisit Interval Analysis of Landsat-8 -9 and Sentinel-2A -2B Data for Terrestrial Monitoring, *Sensors*, 20 (22), 6631.
- Li, J.; Roy, D.P. (2017) A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sens*, 9, 902.
- Masek, J.G.; Wulder, M.A.; Markham, B.; McCorkel, J.; Crawford, C.J.; Storey, J.; Jenstrom, D.T. (2020) Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sens. Environ*, 248, 111968.
- Philipp, R.; Tobias, B.; Claudia, N.; Frank, P. A. (2014) Comparison of Pixel- and Object-Based Glacier Classification with Optical Satellite Images. *IEEE J.-Stars*, 3, 853-862.
- Rasouli, A. A.; Milani, M.; Milani, B. (2021) *Mastering Object-Based Image Analysis: "Imaging the Azerbaijan Geo-Environment"*. iKSAD Publishing House, Turkey.

- Rasouli, A.A.; Cheung, K.K.W.; Mohammadzadeh Alajujeh, K.; Ji, F. (2022) On the Detection of Snow Cover Changes over the Australian Snowy Mountains Using a Dynamic OBIA Approach. *Journal of Atmosphere*. 25 P.
- Rasouli, A.A.; Mammadov, R. (2020) Preliminary Satellite Image Analysis Inside the ArcGIS Setting; Lambert Academy Publishing: Chis- inau, Republic of Moldova.
- Sanchez-Espinosa, A.; Schroder, C. (2019) Land use and land cover mapping in wetlands one step closer to the ground: Sentinel-2 versus Landsat 8. *J. Environ. Manag*, 247, 484–498.
- Sibandze, P. Mhangara, P. Odindi, J. Kganyago, M. (2014) A comparison of Normalized Difference Snow Index (NDSI) and Normalized Difference Principal Component Snow Index (NDPCSI) techniques in distinguishing snow from related land cover types. *South African Journal of Geomatics*, Vol. 3, No. 2. 197.
- Singh, K. K., Singh, D. K., Thakur, N. K., Dewali, S. K., Negi, H. S., Snehmani, & Mishra, V. D. (2020) Detection and mapping of snow avalanche debris from Western Himalaya, India using remote sensing satellite images. *Geocarto International*, 37(9), 2561-2579.
- Trimble eCognition Suite (2019) eCognition Developer 10.1 Reference Book, Munich, Germany. All rights reserved. Trimble Documentation, Munich, Germany.
- U.S. Geological Survey (2022) Landsat 9 Data Users Handbook, Department of the Interior U.S.
- U.S. Geological Survey. (2018) Landsat Analysis Ready Data: U.S. Geological Survey Fact Sheet; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Wang, J., Li, W. (2003) Comparison of methods of snow cover mapping by analyzing the solar spectrum of satellite remote sensing data in China. *Int. J. Remote Sens.*, 24, 4129–4136.
- Yan, L., D.P. Roy, H. Zhang, J. Li, and H. Huang (2016) An Automated Approach for Sub-Pixel Registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi-Spectral Instrument (MSI) imagery. *Remote Sens.* 8, 520.