



Spatiotemporal Monitoring and Analysis of Snow Cover and Its Related Components in the Alborz Mountain Range

Vahid Safarian ^{1*}

¹ Assistant Professor in Climatology, Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 July 2025

Revised: 23 September 2025

Accepted: 24 September 2025

Available Online:

27 September 2025

Keywords:

Spatiotemporal Analysis

Snow Cover

Normalized Difference Snow Index (NDSI)

MODIS

FLDAS

Alborz Mountain Range

ABSTRACT

This study aimed to analyze the temporal and spatial patterns of snow cover in the Alborz Mountains Range during the cold months, from December to April, over the period 2001–2024. Satellite data from the MODIS sensor and the FLDAS model were utilized within the Google Earth Engine platform, and the Normalized Difference Snow Index (NDSI) was applied to monitor snow cover. In addition, snow depth, snow water equivalent, and instantaneous snowfall rate were estimated and analyzed. The results showed that maximum snow cover was generally observed in January and February, with 2008 exhibiting the largest snow-covered area across all temporal scales (daily, monthly, and annual). In contrast, 2012 recorded the highest values for snow depth (21.70 cm), snow water equivalent (4.96 cm), and instantaneous snowfall rate (0.058 mm/h), indicating that intense snowfall events were concentrated in more localized areas that year. Temporal patterns were analyzed using a linear regression model, with coefficients of determination (R^2) of 0.037, 0.038, and 0.007 reported for snow depth, snow water equivalent, and instantaneous snowfall rate, respectively. These generally low values suggest that seasonal variability and atmospheric conditions play a more significant role than temporal trends in driving fluctuations in snow storage. Spatial assessments further indicated that the western, central, and northern highlands of the Alborz Mountains exhibited the highest snow accumulation, whereas the southern slopes, due to lower elevations and higher temperatures, displayed more scattered snow cover. This study highlights the importance of simultaneously monitoring multiple snow related variables to improve understanding of winter water resources and underscores the implications of climate change in Iran's mountainous regions.

* Corresponding author: Vahid Safarian

E-mail address: V.Safarian@uok.ac.ir

How to cite this article: Safarian, V. (2025). Spatiotemporal Monitoring and Analysis of Snow Cover and Its Related Components in the Alborz Mountain Range. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 105-128. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94771.1601>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Snow is one of the primary sources of streamflow in many regions, and an accurate understanding of its temporal and spatial patterns is essential for the optimal management of limited water resources (Soleimani et al., 2018). Variations in snow cover especially in areas with high spatial heterogeneity have significant impacts on ecosystem structure, soil characteristics, and vegetation diversity (Faraji et al., 2024). Given that snow is a key source of freshwater in many parts of the world, its continuous and precise monitoring holds particular importance in water resource studies (Ahmadi & Seyedmirzaei, 2022). This study seeks to identify snow cover trends across different time intervals through the analysis of satellite data and related modeling approaches.

Material and Methods

The aim of this study was to examine the temporal and spatial variations in snow cover and its associated parameters including snow depth, snow water equivalent (SWE), and instantaneous snowfall rate across the Iranian sector of the Alborz Mountain Range during the cold months (December, January, February, March, and April) from 2001 to 2024. To this end, daily remote sensing data (MODIS product) were used for NDSI, and modeled data from the FLDAS dataset were utilized for snow-related variables. Data processing was carried out using JavaScript within the Google Earth Engine environment, and statistical analyses were performed in Python.

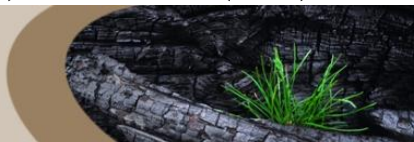
Results and Discussion

The findings of this study regarding snow-covered area at three temporal scales daily, monthly average, and annual (with temporal uniqueness) indicate significant variability. At the daily scale, the largest snow covered areas occurred on a few specific days within the study period. These days and their corresponding snow covered extents are as follows: the highest snow covered area was observed on February 6, 2008, with 197,478 km²; followed by January 17, 2006, with 152,741 km²; and January 30, 2001, with 139,546 km². At the monthly average scale, the greatest snow-covered area was recorded in January, reaching 244,161.867 km². At the annual scale (based on temporal uniqueness), the year 2008 had the maximum snow-covered area of 343,435.132 km², while the minimum was observed in 2010, with an area of 138,759.11 km². However, the analysis of the three parameters mean snow depth, average snow water equivalent, and average snowfall intensity rate indicates that their highest values were recorded on specific winter days. The maximum average snow depth was observed on February 1, 2012, with a value of 21.70 cm; the highest average snow water equivalent was also recorded on the same day, at 4.96 cm; and the peak average instantaneous snowfall rate reached 0.058 mm per hour on February 1, 2012. The coefficients of determination (R^2) for temporal trends were low (ranging from 0.007 to 0.038), suggesting a weak role of time in explaining snow variability and emphasizing the importance of atmospheric, seasonal, and spatial factors.

Conclusion

The analysis of snow cover in the Alborz Mountain Range over the period 2001 to 2024, using daily, monthly, and annual data, revealed that snow variations do not follow a uniform pattern and have experienced significant fluctuations over time. At the annual scale, 2008 and 2010 were identified as notable years, with the highest and lowest snow-covered areas, respectively. Meanwhile, at daily and monthly scales, the greatest snow cover predominantly occurred in January and February, reflecting the concentration of snowfall during the winter season. Furthermore, the analysis of three key snow-related variables snow depth, snow water equivalent, and instantaneous snowfall rate revealed that their highest values were recorded in 2012. This indicates that the intensity and physical characteristics of snowfall in that year were notably significant, even though the snow-covered area was smaller compared to 2008. This discrepancy highlights the importance of a comprehensive, multifaceted examination of both qualitative and quantitative snow parameters. Although the snow-covered area peaked in 2008, the snow depth, snow

water equivalent, and instantaneous snowfall intensity were notably higher in 2012. This discrepancy is likely attributable to variations in the spatial distribution and intensity of snowfall. Statistical analyses and descriptive charts also indicate that the data distribution is right-skewed, with outliers observed primarily in the cold months, especially January and February. Positive correlations exist between snow depth and both snow water equivalent and snowfall rate, while these variables show a negative correlation with the progression of the months throughout the year, reflecting a gradual decline in snow characteristics during the warmer seasons.



پایش و تحلیل زمانی- مکانی پوشش برف و مؤلفه‌های مرتبط با آن در پهنه رشته‌کوه البرز

وحدید صفریان^{۱*}

^۱ استادیار اقلیم‌شناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲ کلمات کلیدی: تحلیل زمانی- مکانی پوشش برف شاخص تفاضل نرمال شده پوشش برف (NDSI) مودیس مدل FLDAS رشته کوه البرز	این تحقیق با هدف تحلیل زمانی و مکانی پوشش برف در رشته‌کوه البرز در ماه‌های سرد سال از دسامبر تا آوریل طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ انجام شد. در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و مدل FLDAS در محیط تحت وب Google Earth Engine استفاده گردید و شاخص NDSI برای نظارت پوشش برف به کار گرفته شد. همچنین متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای برف برآورد و تحلیل شدند. نتایج تحقیق نشان داد که حداکثر پوشش برف غالباً در ماه‌های ژانویه و فوریه مشاهده شد و سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین پهنه پوشش برف را در همه مقیاس‌های زمانی (روزانه، ماهانه و سالانه) به خود اختصاص داد. از سوی دیگر، سال ۲۰۱۲ دارای حداکثر مقدار عمق برف ۲۱/۷۰ سانتی‌متر، آب معادل برف ۴/۹۶ سانتی‌متر و نرخ بارش لحظه‌ای ۰/۰۵۸ میلی‌متر بر ساعت بود. این موضوع نشان دهنده تمرکز بارش‌های شدید در بخش‌های محدودتر در این سال است. الگوهای زمانی با بهره‌گیری از مدل رگرسیون خطی مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر ضریب تعیین R^2 برای متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای به ترتیب ۰/۰۳۷، ۰/۰۳۸ و ۰/۰۰۷ گزارش شده‌اند. این مقادیر که اغلب پایین هستند، بیانگر آن می‌باشد که نوسانات فصلی و وضعیت جوی نقش مؤثرتری نسبت به زمان در نوسانات ذخایر برف ایفا می‌کنند. ارزیابی‌های مکانی نیز حاکی از آن بود که نواحی مرتفع غربی، مرکزی و شمالی البرز حداکثر تراکم برف را دارند، در حالی که دامنه‌های جنوبی به دلیل ارتفاع کم‌تر و دمای بالاتر، پوشش برفی پراکنده‌تری دارند. این پژوهش اهمیت ویژه نظارت هم‌زمان متغیرهای مختلف برف را در شناخت بهتر از ذخایر آبی زمستان آشکار می‌سازد و پیامدهای تغییر اقلیم در مناطق کوهستانی ایران را نشان می‌دهد.

مقدمه

برف یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی در حوضه‌های کوهستانی جهان به‌شمار می‌آید که به‌دلیل تأخیر در تبدیل به رواناب، نقشی متمایز در گردش آب ایفا می‌کند و از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. بارش‌های سنگین برف از جمله مخاطرات مهم جوی هستند که پیش‌بینی شدت و گستره مکانی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. اگرچه مناطق کوهستانی بخش محدودی از سطح زمین را در بر می‌گیرند، اما در چشم‌انداز هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. این اهمیت به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران نمود دارد، جایی که ذخایر برفی نواحی

مرتفع، نقشی بنیادی در تأمین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و نیازهای اکولوژیکی ایفا می‌کنند و به‌مثابه ذخیره‌ای راهبردی در مدیریت بحران آب تلقی می‌شوند. از این رو، اطلاعات دقیق درباره پوشش برف که در تغذیه آب‌های زیرزمینی و برنامه‌ریزی منابع آبی نقش دارد، برای مدیریت پایدار این منبع اساسی ضروری می‌باشد. از میان روش‌ها و منابع موجود، داده‌های ماهواره‌ای MODIS¹ به دلیل پوشش گسترده، پیوستگی زمانی و قابلیت تفکیک مناسب، ابزاری کارآمد برای پایش سطح پوشش برف به‌شمار می‌روند (Abbasi Jandani & Fathzadeh, 2015; Ghafarian et al., 2016; Roustayi, Rahimpour & Nokhostin Rouhi, 2016; Ebrahimi, Hamzeh & Marofi, 2016; Abdam, Fathzadeh, Taghizadeh Mehrjardi & Mahjoubi, 2016; Haghizadeh, Kiani & Kiani, 2017; Kashki & Haji Mohammadi, 2017; Tasdighian & Rahimzadegan, 2017; Montazeri, 2018).

برف یکی از عوامل کلیدی در جریان آب در بسیاری از مناطق به‌شمار می‌رود و شناخت دقیق الگوی زمانی و مکانی آن برای مدیریت بهینه منابع محدود آبی امری ضروری است (Solaimani, Darvishi, Shokrian & Rashidpour, 2018). تغییرات پوشش برف، به‌ویژه در نواحی با پراکندگی مکانی بالا، تأثیرات چشم‌گیری بر ساختار زیست‌بوم‌ها، ویژگی‌های خاک و تنوع پوشش گیاهی برجای می‌گذارد (Faraji, Kamangar & Ashrafi, 2024). از آن‌جا که برف یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین در بسیاری از نقاط جهان است، بررسی دقیق و مستمر آن اهمیت ویژه‌ای در مطالعات ذخایر آبی دارد (Ahmadi & Seyedmirzaei, 2022). در این میان، تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیست عصر حاضر، تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای طبیعی مانند ذوب یخچال‌ها و تجمع برف دارد. پایش دقیق این پدیده‌ها از طریق فناوری‌های سنجش از دور و بهره‌گیری از حسگرهای ماهواره‌ای مانند MODIS، AVHRR²، GEOS³ و MERIS⁴ امکان‌پذیر شده است که قابلیت ارزیابی جامع و مستمر برف در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی را فراهم می‌سازد (Seydi Shahivandi, Omidvar, Mozafari & Mazidi, 2025). در مناطق مرتفع، برف یکی از ارکان بنیادین چرخه آب‌شناسی به‌شمار می‌آید؛ چرا که با ذخیره‌سازی آب در فصل زمستان و آزادسازی تدریجی آن در ماه‌های گرم‌تر، نقشی اساسی در تأمین منابع آبی بخش‌هایی مانند کشاورزی، صنعت، منابع سطحی آب و مصرف شهری ایفا می‌کند. پوشش برف در حوضه‌های رودخانه‌ای، به‌طور مستقیم بر میزان رطوبت سطحی خاک تأثیر می‌گذارد و از این طریق، در شکل‌گیری رواناب و شدت آن نقش مؤثری دارد. این پیوند بین برف، رطوبت خاک و رواناب، اهمیت پایش دقیق و مستمر پوشش برفی را در مطالعات ذخایر آبی و مدیریت سیلاب دوچندان می‌سازد (Ozdogan, 2011; Tekeli & Tekeli, 2012; Berezowski, Chormanski & Batelaan, 2015). رشته‌کوه البرز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نواحی کوهستانی ایران، نقش مهمی در فراهم کردن منابع آب شیرین کشور ایفا می‌کند. این منطقه با ارتفاعات متنوع و پراکندگی مکانی بارش‌های برفی، منبع اصلی ذخیره آب در فصل زمستان و پاییز می‌باشد. در ایران به دلیل پراکندگی نواحی برفی و محدودیت دسترسی به داده‌های زمینی، استفاده از داده‌های سنجش از دور مانند MODIS با پوشش گسترده و پیوستگی زمانی بالا، و مدل‌های سطح زمین مانند FLDAS، امکان پایش مستمر و دقیق پوشش برف در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه را فراهم می‌آورد. ترکیب این داده‌ها با تحلیل‌های مکانی و زمانی، نه تنها امکان شناسایی روندهای بلندمدت پوشش برف را می‌دهد، بلکه به درک بهتر ارتباط بین تغییرات اقلیمی و ذخایر برفی منطقه نیز کمک می‌کند.

مرور ادبیات موضوع و پیشینه تحقیق، نشان‌دهنده گستردگی و تنوع مطالعات انجام‌شده در زمینه پایش مساحت پوشش برف و سنجش‌های مربوط به آن است. این تنوع، نشان‌دهنده توجه و اهمیت بالای این موضوع در محافل علمی و اجرایی می‌باشد. در پیشینه این پژوهش، مطالعات متعددی بررسی شده است که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: سلیمانی و همکاران (Solaimani et al., 2018) با استفاده از تصاویر MODIS، تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف در استان کردستان را پایش کردند. نتایج نشان داد بیش‌ترین وسعت پوشش برف در دی‌ماه ۱۳۸۶ با مساحت ۲۸۹۱۴/۲ کیلومتر مربع رخ داده است. یاراحمدی و همکاران (Yarahmadi, Fathnia & Sherafat, 2020) با استفاده از تصاویر NOAA⁵-AVHRR به ارزیابی دمایی

1- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

2- Advanced Very High-Resolution Radiometer

3- Goddard Earth Observing System

4- Medium Resolution Imaging Spectrometer

5- National Oceanic and Atmospheric Administration

خط برف و شناسایی مناطق دارای پتانسیل ریزش برف در کوه‌های البرز پرداختند. نتایج نشان داد طی دوره مورد مطالعه، بیش‌ترین وسعت پوشش برف در آوریل ۲۰۱۵ به میزان ۱۲۰۵۹ کیلومتر مربع و کم‌ترین آن در ژوئن ۲۰۰۸ با ۳۳ کیلومتر مربع ثبت شده است. عالی‌نژاد و همکاران (Aalinejad, Jahanbakhsh & Mohammad Khorshiddoust, 2021) با استفاده از مدل SRM¹، رواناب ناشی از ذوب برف را در حوضه قره‌سو شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد سهم ذوب برف در جریان رودخانه طی اسفند و فروردین قابل‌توجه بود، اما در اردیبهشت‌ماه با افزایش دمای هوا، نقش بارش در تولید رواناب غالب می‌شود. سیفی (Seifi, 2021) با بهره‌گیری از تکنیک‌های شیء‌گرا و تصاویر سنجنده‌های OLI² و TIRS³، سطح پوشش برف در کوهستان سبلان را برآورد کرد. نتایج نشان داد مساحت پوشش برف در این محدوده، برابر با ۲۱۴۲/۶۲ کیلومتر مربع بوده است. عبادی و همکاران (Ebadi, Eftekhary, Mohammad Khanlu & Fakhri, 2021) شاخص طیفی جدیدی را برای استخراج سطوح برفی با استفاده از تصاویر اپتیکی سنجش از دور ارائه کردند. ارزیابی شاخص با معیارهای ضریب کاپا و صحت کلی نشان داد شاخص پیشنهادی از دقت بالایی برخوردار است (ضریب کاپا ۱ برای تصویر لندست ۸ منطقه اصلی، و ۰/۹۶ برای منطقه ارزیابی ۱) و توانایی مناسبی در تفکیک برف از سایر پدیده‌ها دارد. مطیعی و احراری (Motiee & Ahrari, 2022) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در سامانه گوگل ارث انجین، روند تغییرات پوشش برف منطقه تخت سلیمان را بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش برف و یخچال‌های این منطقه در خرداد از ۱۲۷ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۰ به ۲۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ کاهش ۸۰ درصدی داشته است. احمدی و سید میرزایی (Ahmadi & Seyedmirzaei, 2022) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS، تغییرات پوشش برف در دوره سرد سال ایران را پایش کردند. نتایج نشان داد بیش‌ترین پوشش برف مربوط به ماه ژانویه با ۱۵/۱۶ درصد و کم‌ترین آن مربوط به ماه اکتبر با کم‌تر از ۱ درصد است. مریانجی و همکاران (Maryanji, Toulabi & Nejad & Dolatshahi, 2023) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش برف و پیش‌بینی آن در شهرستان همدان پرداختند. نتایج شاخص NDSI⁴ نشان داد پوشش برف در همدان کاهش یافته و از ۲۰ درصد مساحت کل شهرستان به ۷ درصد در دهه اخیر رسیده است. فرجی و همکاران (Faraji et al., 2024) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل فضایی پوشش برف در غرب ایران را انجام دادند. نتایج نشان داد جهت بیضی پراکندگی برف در راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی بوده و مطابق آرایش ارتفاعات گسترش یافته است. صیدی‌شاهیوندی و همکاران (Seydi-Shahivandi et al., 2025) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های برف‌پوشان زاگرس میانی با استفاده از داده‌های سنجش از دور پرداختند. تحلیل روند پوشش برف در فصول مختلف بر اساس تصاویر MODIS نشان داد که اکثر مناطق، به‌ویژه نواحی مرتفع، دارای روند کاهشی معنی‌دار هستند؛ با این حال، در نواحی غربی و جنوب‌غربی، روند کاهشی قابل توجهی مشاهده نشد. جین و همکاران (Jin, Ke, Xu & Li, 2015) روند پوشش برف در فلات اُوس چین را بررسی کردند و دریافتند که فقط در ۷/۱۶ درصد از این منطقه کاهش معنادار در تعداد روزهای برف‌پوش رخ داده است. ایران‌نژاد و همکاران (Irannezhad, Ronkanen & Kløve, 2016) عوامل کنترل اقلیم زمستان و کاهش بارش برف را در سه ایستگاه فنلاند بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش بارش زمستانی با شاخص‌های اطلس شرقی - روسیه غربی، نوسان قطبی و آرام غربی مرتبط است و افزایش دما تا ۴ درجه در این قرن نیز تأثیرگذار بوده است. عاطف و همکاران (Atif, Mahboob & Iqbal, 2015) روند تغییرات گستره پوشش برف در بالادست حوضه آوندوس را از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ بررسی کردند و متوجه شدند که تغییر معناداری در گستره برف رخ نداده است. داریان و همکاران (Darlane, Santi & Amin, 2017) سطح برف در منطقه کوهستانی البرز مرکزی را طی ۱۳ سال مطالعه کردند و کاهش قابل توجهی در سطح برف مشاهده کردند. دی مارکو و همکاران (Di Marco et al., 2021) با استفاده از داده‌های پوشش برف MODIS و مدل ذوب برف مبتنی بر تابع توزیع توپوگرافی، عدم قطعیت مدل‌سازی هیدرولوژیکی را کاهش دادند. در خروجی حوضه اصلی نسبت پوشش‌دهی ۰/۵۴ و میانگین تیزی ۰/۱۱ و در حوضه فرعی (منطقه اعتبارسنجی) به‌ترتیب ۰/۰۶۵ و ۰/۱۷ به‌دست آمد.

1- Snow Reflectance Model

2- Operational Land Imager

3- Thermal Infrared Sensor

4- Normalized Difference Snow Index

این نتایج نشان‌دهنده توان بالای نقشه‌های MODIS در بهبود کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی و کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی دبی جریان است. وی و همکاران (Wei et al., 2021) با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و عوامل محیطی، داده‌های عمق برف با وضوح مکانی یک کیلومتر را برای فلات چین - تبت بازسازی کردند. نتایج نشان داد تعداد روزهای پوشش برف و پارامترهایی چون طول و عرض جغرافیایی، شیب و نوسانات سطحی، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عمق برف دارند. بازسازی عمق برف دقت مناسبی با RMSE برابر ۲/۲۶ سانتی‌متر نسبت به داده‌های میدانی داشت. پاسانگ و همکاران (Passang, Schmidt & Nüsser, 2022) تأثیر توپوگرافی بر توزیع پوشش برف در منطقه فرا هیمالیا (Trans-Himalaya) لداخ، هند را بررسی کردند. میانگین سالانه پوشش برف حدود ۴۲ درصد بود که از ۱۵ درصد در ماه اوت تا ۷۱ درصد در فوریه متغیر مشاهده شد. حسین و همکاران (Hussain et al., 2023) کاهش مساحت پوشش برف در دره‌های پاسو و گلکین را بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش برف این مناطق به طور متوسط سالانه ۰/۴۲ کیلومترمربع کاهش یافته و مجموع کاهش در دوره مذکور حدود ۱۱/۴۶ کیلومترمربع بوده است. سونیتا و همکاران (Sunita et al., 2023) با استفاده از داده‌های MODIS و ERA5^۱ به تحلیل پوشش برف و عوامل اقلیمی در حوضه رودخانه بیاس (هیمالیای غربی) پرداختند. نتایج نشان داد میانگین مساحت پوشش برف حدود ۵۶ درصد از کل منطقه است، که بیش‌ترین مقدار سالانه آن با حدود ۶۱/۸۴ درصد در سال ۲۰۱۴ و کم‌ترین مقدار آن با حدود ۴۹/۲ درصد در سال ۲۰۱۶ به دست آمد. بانرجی و همکاران (Banerjee, Sati, Almazroui & Chakraborty, 2024) به ارزیابی پراکندگی مکانی- زمانی و حجم پوشش برف در هیمالیای مرکزی با شاخص NDSI پرداختند. نتایج نشان داد پوشش برف ضخیم تا سال ۲۰۰۶ نوساناتی همراه با روند کاهشی داشته، سپس افزایشی خفیف داشته و در سال ۲۰۲۱ دوباره کاهش یافته است. دیکسیت و همکاران (Dixit, Goswami, Jain & Das, 2024) الگوهای پوشش برف در حوضه‌های رودخانه‌ای ایندوس، گنگ و برهماپوترا را با شاخص‌های پایداری و خط برف بررسی کردند. نتایج، نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه پوشش برف در مناطق اقلیمی و فصول مختلف بوده است. گرمایش جهانی تأثیر واضحی بر انتقال پوشش برف از مناطق دائمی و فصلی به مناطق پراکنده یا فاقد برف دارد. شیائو و لیانگ (Xiao & Liang, 2024) الگوریتم‌های نقشه‌برداری پوشش برف با استفاده از داده‌های بازتاب سطحی لندست را ارزیابی و کاربرد آن‌ها را در تعیین خودکار خط برف بررسی کردند. نتایج نشان داد اختلاف ارتفاع خط برف میان هشت الگوریتم نسبت به ارتفاع مرجع قابل توجه است؛ که میانگین ارتفاع خط برف بین ۱۲۱ تا ۲۵۸ متر، پایین‌ترین ۱۰ درصد بین ۲۵۳ تا ۵۱۲ متر و بالاترین ۱۰ درصد بین ۲۰۶ تا ۳۴۴ متر متغیر بود. گائو و همکاران (Gao, Liu, Han & Zhang, 2024) روند زمانی و مکانی پوشش برف در سه استان شمال شرق چین را با داده‌های MODIS عاری از ابر بررسی کردند. نتایج نشان داد میانگین سالانه درصد پوشش برف تا سال ۲۰۰۹ با نرخ ۱/۲۷ درصد در سال افزایش و پس از آن با نرخ ۱/۸۰ درصد در سال کاهش یافته است. خان و لی (Khan & Li, 2025) روند پوشش برف جهانی را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ با داده‌های MODIS بررسی کردند، نتایج نشان داد میانگین سالانه SCF^۲ به طور متوسط سالانه ۰/۳۷ - درصد در حال کاهش است.

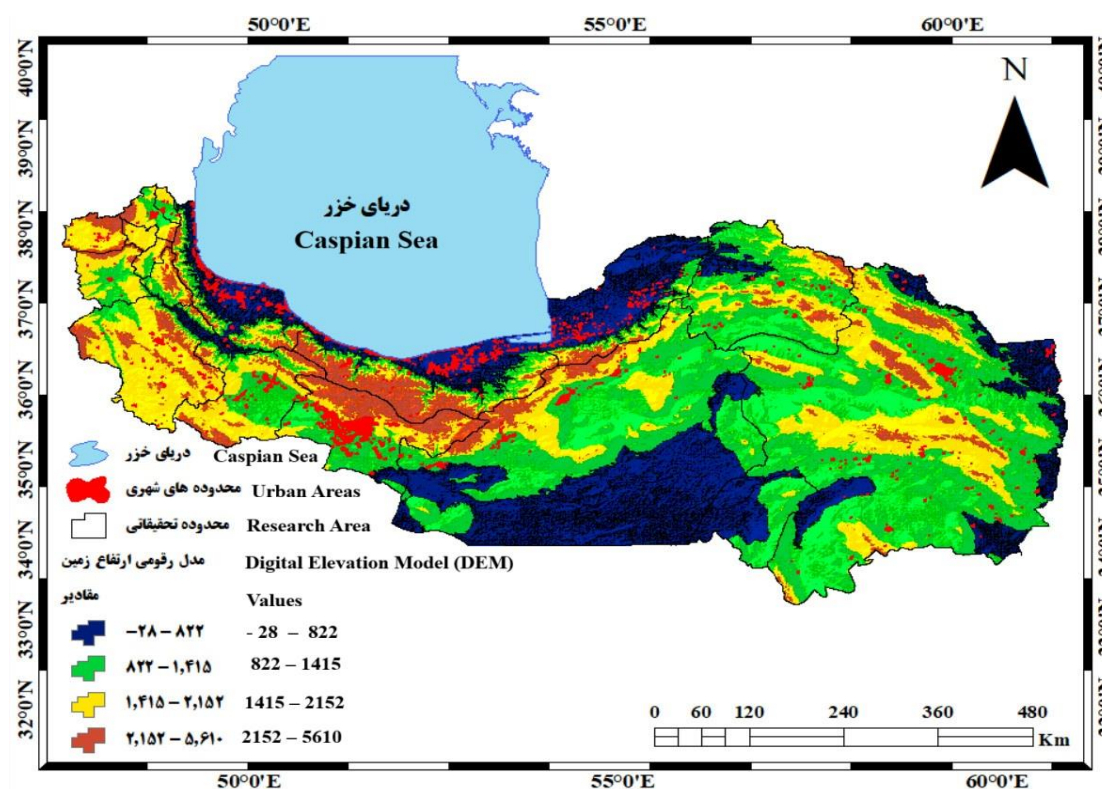
با توجه به بررسی مطالعات پیشین در ایران و سایر مناطق نشان می‌دهند که پایش پوشش برف و پارامترهای مرتبط دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بسیاری از تحقیقات تنها بخش‌هایی از رشته‌کوه البرز یا سایر مناطق را مورد بررسی قرار داده‌اند و تحلیل جامع منطقه‌ای ارائه نشده است، تمرکز اکثر مطالعات بر مساحت پوشش برف بوده و پارامترهای مرتبط مانند عمق برف، آب معادل ذوب برف و نرخ لحظه‌ای بارش کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و یکپارچگی داده‌های سنجنش از دور و مدل‌سازی سطح زمین (MODIS و FLDAS) و تحلیل هم‌زمان چند پارامتر به ندرت در مطالعات پیشین انجام شده است. هدف از تحقیق حاضر به بررسی الگوهای زمانی و فضایی پوشش مساحت برف در پهنه رشته کوه البرز با استفاده از داده‌های سنجنش از دور در محیط سامانه تحت وب گوگل ارث انجین با پوشش کامل منطقه، تحلیل چند پارامتر مرتبط با برف و استفاده از داده‌های یکپارچه، درصد پر کردن این شکاف‌ها و ارائه تصویری جامع از روندهای مکانی و زمانی پوشش برف در رشته‌کوه البرز می‌باشد.

1- ECMWF Reanalysis

2- Snow Cover Frequency

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی و تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف در گستره ایرانی رشته‌کوه البرز، به‌منظور شناخت الگوهای فضایی-زمانی آن طی ماه‌های سرد سال (دسامبر تا آوریل) انجام شده است. محدوده مورد مطالعه، با مساحت دقیق ۳۹۵۲۸۱/۳۸۰۸۱۱ کیلومتر مربع، در قلمرو جغرافیایی ایران واقع شده است (شکل ۱). برای اجرای این تحلیل، از داده‌های سنجش از دور و داده‌های جوی در محیط پردازشی GEE^۱ استفاده گردید. بازه زمانی بررسی، سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ را شامل می‌شود و تمرکز اصلی بر ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل بوده است؛ ماه‌هایی که بیش‌ترین احتمال وقوع و گسترش پوشش برف در منطقه وجود دارد.



شکل ۱- نقشه محدوده تحقیقاتی

Fig. 1. Map of Study Area

در این تحقیق، به منظور شناخت وضعیت آمار توصیفی پارامترهای مورد مطالعه و بررسی همبستگی میان میانگین متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای، اقدام به ترسیم نمودارهای آماری و انجام تحلیل‌های سری زمانی شده است. برای اجرای این تحلیل‌ها از نسخه ۳.۱۲.۲ زبان برنامه‌نویسی Python بهره گرفته شد. کتابخانه‌های تخصصی و کارآمدی هم‌چون پانداس^۲ برای مدیریت و پردازش داده‌های جدولی (دیتافریم)، نامپای^۳ برای محاسبات عددی و ماتریسی، و مت‌پلات‌لیب^۴ برای بصری‌سازی و تجسم داده‌ها به‌منظور تسهیل تحلیل‌های آماری و نمایشی داده‌ها در این پژوهش به‌کار گرفته شدند. در این تحقیق، متغیرهای وابسته به برف شامل مساحت پوشش برف، عمق برف، آب معادل ذوب برف و نرخ بارش لحظه‌ای برف مورد تحلیل قرار گرفتند. در پژوهش حاضر، ابتدا با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای و پیاده‌سازی آن‌ها از طریق

1- Google Earth Engine

2- Pandas

3- Numpy

4- Matplotlib

کدنویسی در محیط GEE و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی JavaScript API^۱، واحدهای پارامترهای اولیه موجود در پروداکت‌های ماهواره‌ای به واحدهای رایج مورد استفاده در تحقیقات اقلیم‌شناسی تبدیل شدند (جدول ۱). این تبدیل با هدف بهبود مقایسه بین پارامترها و افزایش دقت در محاسبه همبستگی میان آن‌ها انجام گرفت. در ادامه، تحلیل‌های مورد نظر بر اساس داده‌های یکپارچه‌شده انجام شد.

جدول ۱- تبدیل واحد متغیرهای برفی

Table 1 - Unit Conversion of Snow Variables

پارامترها	واحد اولیه	واحد تبدیل شده برای تحلیل
Parameters	Primary Unit	Converted Unit for Analysis
عمق برف Snow Depth	M	cm
آب معادل ذوب برف Snow Water Equivalent	kg/m ²	cm
نرخ بارش برف لحظه‌ای Instantaneous Snowfall Rate	kg/m ² /s	mm/hr

در این مطالعه، برای استخراج مساحت پوشش برفی، از داده‌های مشاهده شده شاخص تفاضل نرمال‌شده برف (NDSI^۲) استفاده شد. پارامتر NDSI_SC^۳ که نمایان‌گر درصد پوشش برف در هر پیکسل است، از محصول روزانه MODIS/061/MOD10A1 با دقت مکانی ۵۰۰ متر استخراج گردید. این داده‌ها به دلیل رزولوشن نسبتاً بالا و پوشش زمانی مناسب، امکان پایش دقیق تغییرات مکانی و زمانی پوشش برف را فراهم می‌کنند. شاخص NDSI برای شناسایی و تفکیک نواحی پوشیده از برف محاسبه شده است. این شاخص بر اساس ترکیب بازتاب‌های باند سبز (Green) و مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR^۴) تصاویر ماهواره‌ای طبق رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$NDSI = \frac{MODIS_{Band4} - MODIS_{Band6}}{MODIS_{Band4} + MODIS_{Band6}} = \frac{green - SWIR}{green + SWIR} \quad (1)$$

برای تفکیک نواحی برفی از سایر پوشش‌های سطح زمین، آستانه‌ای برابر با ۰.۴۰^۵ (در مقیاس ۰ تا ۱۰۰ درصد پوشش برف) در نظر گرفته شد. این مقدار بر اساس مطالعات پیشین به‌عنوان حد مناسب برای تشخیص پوشش برف تازه تعیین شده است (Hall, Riggs & Salomonson, 2002). با اعمال این آستانه، نقشه‌های دودویی برف/ غیر برف تولید و مساحت نواحی برفی در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه گردید. تمامی مراحل پردازش تصاویر، اعمال آستانه و محاسبه مساحت پوشش برف در سه مقیاس روزانه، میانگین ماهانه و سالانه (با یکتای زمانی) در محیط (GEE) انجام شد.

در این تحقیق، برای برآورد عمق برف^۶، آب معادل ذوب برف^۷ و نرخ بارش لحظه‌ای برف^۸ (در هر ساعت، بر روی هر متر مربع زمین، چند کیلوگرم برف باریده است)، از داده‌های مدل‌سازی‌شده سامانه‌ی FLDAS^۹ استفاده شد. داده‌های این سامانه حاصل اجرای مدل فیزیکی NOAA (LSM^{۱۰}) بوده که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی مختلف، مجموعه‌ای منسجم از پارامترهای سطح زمین را تولید می‌کند. مزایای کلیدی داده‌های FLDAS شامل پوشش زمانی پیوسته، مقاومت در برابر اختلال ناشی از پوشش ابری، نبود شکاف‌های زمانی در داده‌ها و دقت بالای مدل در بازنمایی فرآیندهای سطحی است.

1- Application Programming Interface

2- Normalized Difference Snow Index

3- NDSI_Snow_Cover

4- Shortwave Infrared

5- NDSI_Snow_Cover > 40

6- Snow Depth_inst

7- SWE_inst

8- Snowf_tavg

9- Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System

10- Land Surface Model

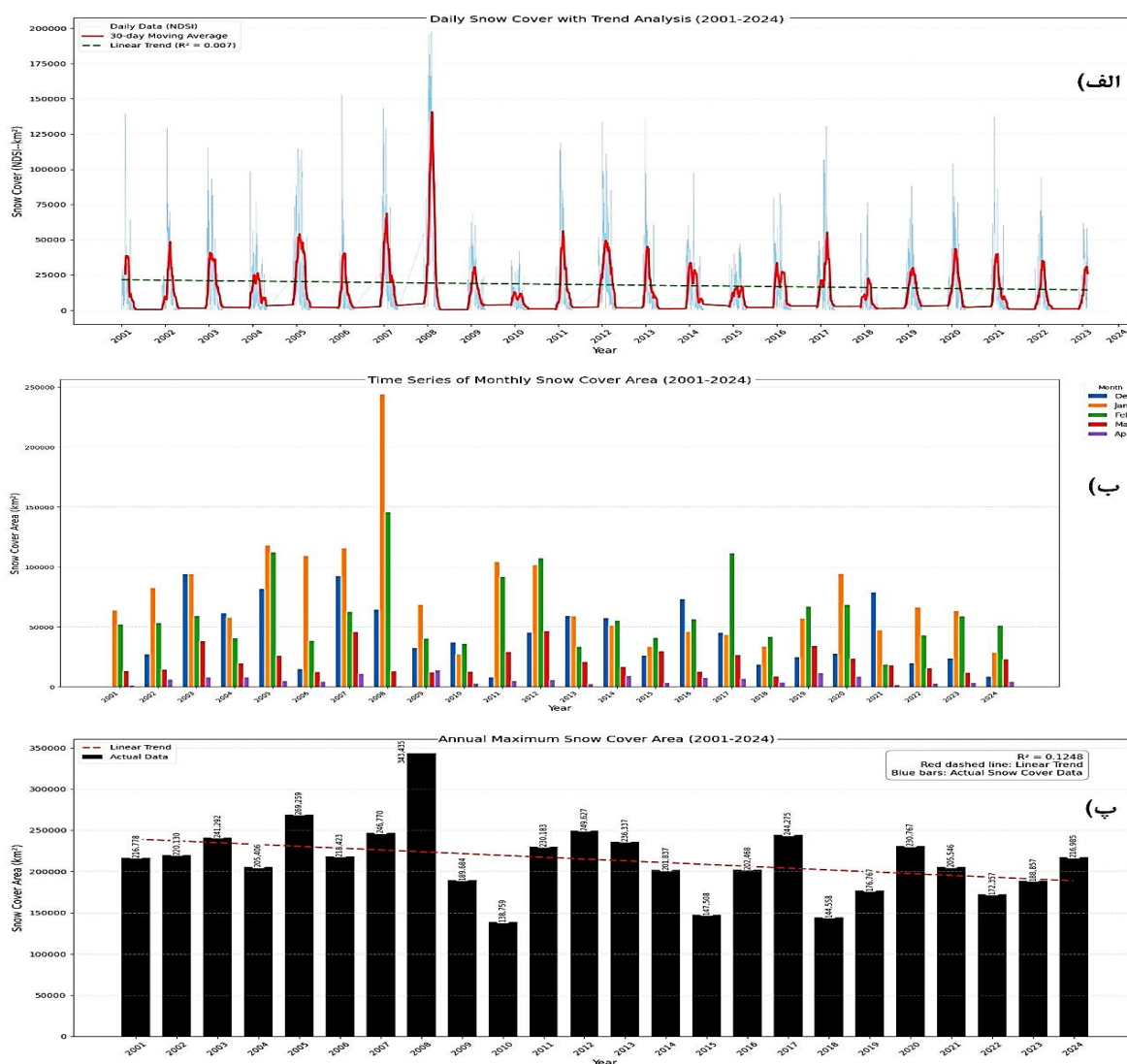
این ویژگی‌ها باعث می‌شود داده‌های FLDAS گزینه‌ای مناسب برای مطالعات اقلیمی و بلندمدت در مقیاس منطقه‌ای، از جمله ارزیابی روندهای برف، باشند (McNally et al., 2017). هم‌چنین به‌منظور درک بهتر رفتار آماری سه متغیر کلیدی مرتبط با برف شامل عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف مجموعه‌ای از تحلیل‌های گرافیکی شامل هیستوگرام^۱، نمودار پراکنش^۲، باکس‌پلات^۳ و بارپلات^۴ در مقیاس میانگین ماهانه انجام شد.

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، پایش تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف و پارامترهای مرتبط آن شامل: عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش در منطقه تحقیقاتی رشته‌کوه البرز طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های انجام شده در بازه‌های روزانه، ماهانه و سالانه (با یکتای زمانی) با استفاده از روش‌های آماری توصیفی و همبستگی، امکان شناسایی روندهای اقلیمی و اثرات نوسانات آب‌وهوایی بر چگونگی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف را فراهم آورد. نتایج بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌های مذکور، با بازنمایی‌های نموداری و گرافیکی ارائه شد. در ادامه، خلاصه‌ای فشرده از یافته‌های پژوهش و خروجی‌های به‌دست‌آمده از این بررسی‌ها و تحلیل‌ها ارائه می‌گردد. یافته‌های تحقیق حاضر در مساحت پوشش برف در سه مقیاس روزانه، میانگین ماهانه و سالانه (با یکتای زمانی) حاکی از آن می‌باشد. در مقیاس روزانه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مساحت پوشش برف در چند روز مشخص در بازه زمانی مورد مطالعه رخ داده است. این روزها و مساحت‌های مربوط به آن بدین شرح می‌باشند: بیش‌ترین مساحت پوشش برف به ترتیب مربوط به روز ششم فوریه با مقدار ۱۹۷۴۷۸/۱۸۸ کیلومتر مربع، روز پنج فوریه با مقدار ۱۹۶۳۹۲/۳۷ کیلومتر مربع و روز هجده ژانویه با مقدار ۱۹۵۷۳۶/۵۹۳ کیلومتر مربع)، در سال ۲۰۰۸؛ روز هفده ژانویه با مقدار ۱۵۲۷۴۰/۵۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۶ و روز ۳۰ ژانویه با مقدار ۱۳۹۵۴۶/۳۵۴ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۱ به دست آمد (شکل الف - ۲). اکثر روزها با بیش‌ترین پوشش برف در ماه‌های ژانویه و فوریه قرار دارند که با الگوی طبیعی بارش برف در فصل زمستان در رشته‌کوه البرز همخوانی دارد. این ماه‌ها سردترین بازه زمانی سال بوده و شرایط لازم برای حفظ و گسترش برف فراهم است. سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین مساحت پوشش برف را در مقیاس روزانه در چند روز متوالی ثبت کرده است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده شرایط خاص اقلیمی یا نوسانات جوی آن سال باشد. این موضوع می‌تواند به عوامل مختلفی مانند افزایش بارش برف، کاهش دما یا ترکیبی از هر دو مرتبط باشد. مقادیر مساحت پوشش برف در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۶ به نسبت سال ۲۰۰۸ پایین‌تر است، که این تفاوت ممکن است به دلیل نوسانات طبیعی اقلیمی یا تأثیرات تغییرات اقلیمی منطقه باشد. تحلیل این تفاوت‌ها می‌تواند به درک بهتر روند بلندمدت پوشش برف و پایداری منابع آبی کمک کند. برای بررسی روند تغییرات روزانه پوشش برف در رشته‌کوه البرز در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، از روش میانگین متحرک استفاده شد تا نوسانات کوتاه‌مدت کاهش یافته و روند کلی بهتر قابل مشاهده باشد. با این حال، مقدار ضریب تعیین (R^2) به مقدار بسیار پایین ۰/۰۰۷ رسید که نشان می‌دهد روند کلی روزانه پوشش برف در این بازه زمانی بسیار ضعیف و تقریباً فاقد الگوی قوی برای پیش‌بینی است. یعنی تنها ۰/۷ درصد از تغییرات پوشش برف روزانه توسط روند خطی (گذشت زمان) قابل توضیح است و ۹۹/۳ درصد از تغییرات تحت تأثیر عوامل دیگر است. بنابراین، نتایج حاکی از آن است که برای تحلیل روندهای پوشش برف در این منطقه، بهتر است به جای بررسی روزانه، از مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر مانند ماهانه یا سالانه استفاده شود تا روندهای بلندمدت قابل تشخیص‌تر و معنادارتر باشند. در مقیاس میانگین ماهانه بیش‌ترین مقدار مساحت پوشش برف به ترتیب مربوط به ماه‌های ژانویه با مقدار ۲۴۴۱۶۱/۸۶۷ کیلومتر مربع و فوریه با مقدار ۱۴۵۹۲۰/۵۹۷ کیلومتر مربع به دست آمد (شکل ب - ۲). تحلیل میانگین مساحت پوشش برف در مقیاس ماهانه نشان داد که بیش‌ترین مقدار پوشش برف در رشته‌کوه البرز مربوط به ماه‌های زمستانی است. این نتایج با الگوی فصلی طبیعی بارش برف و دمای پایین‌تر در این ماه‌ها همخوانی دارد و نشان‌دهنده اوج پوشش برف در نیمه اول زمستان است. در مقیاس سالانه (با یکتای زمانی) بیش‌ترین مقدار مساحت پوشش

1- Histogram
2- Scatterplot
3- Boxplot
4- Barplot

برف به ترتیب سال ۲۰۰۸ با مقدار ۳۴۳۴۳۵/۱۳۲ کیلومترمربع و سال ۲۰۰۵ با مقدار ۲۶۹۲۵۹/۵۵ کیلومتر مربع و کمترین مقدار مساحت پوشش برف به ترتیب سال ۲۰۱۰ با مقدار ۱۳۸۷۵۹/۱۱ کیلومترمربع و سال ۲۰۱۸ با مقدار ۱۴۴۵۵۸/۲۷۶ کیلومتر مربع به دست آمد (شکل پ - ۲). مقدار ضریب تعیین (R^2) تغییرات مساحت پوشش برف سالانه با مقدار ۰/۱۲۴۸ به دست آمد. افزایش مقدار R^2 در مقیاس سالانه نسبت به مقیاس روزانه، بیانگر این است که روندهای بلندمدت پوشش برف قابل تشخیص تر و معنادارتر هستند و این مقیاس زمانی برای تحلیل روندهای اقلیمی کمی مناسب تر است. سال ۲۰۰۸ به عنوان سال اوج پوشش برف مشخص شده که احتمالاً متأثر از شرایط جوی و اقلیمی خاص همان دوره بوده است. سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ با کمترین پوشش برف، ممکن است نشان دهنده دوره های خشکسالی یا تغییرات اقلیمی موقت در منطقه باشند که می تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب و مدیریت محیطی در منطقه تحقیقاتی رشته کوه البرز داشته باشد.



شکل ۲- نمودارهای مقادیر مساحت پوشش برف روزانه، ماهانه و سالانه در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۴

Fig. 2. Graphs of Daily, Monthly, and Annual Snow Cover Area Values in the Alborz Mountain Range during the 2001-2024 Period

یافته ها نشان داد که بیشترین پوشش برف در تمامی مقیاس ها (روزانه، ماهانه و سالانه) در ماه های زمستان، به ویژه ژانویه و فوریه، رخ داده است. این موضوع با چرخه طبیعی آب و هوای منطقه و اوج بارش های برفی در فصل زمستان مطابقت دارد.

تمرکز حداکثری پوشش برف در همین بازه زمانی، اهمیت پایش و مدیریت منابع آب را در ماه‌های زمستانی دو چندان می‌کند. تکرار سال ۲۰۰۸ در تمام مقیاس‌ها (روزانه، ماهانه و سالانه) به‌عنوان سال اوج پوشش برف، نشان‌دهنده شرایط اقلیمی ویژه در آن سال است. سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ به‌عنوان سال‌های دارای کم‌ترین پوشش برف ثبت شده‌اند که می‌تواند نشان‌دهنده دوره‌های خشک، افزایش دمای زمستان یا کاهش بارش برف باشد. این سال‌ها باید به‌عنوان سال‌های بحرانی از نظر ذخایر برف و منابع آب در مطالعات مدیریت ریسک مورد توجه قرار گیرند.

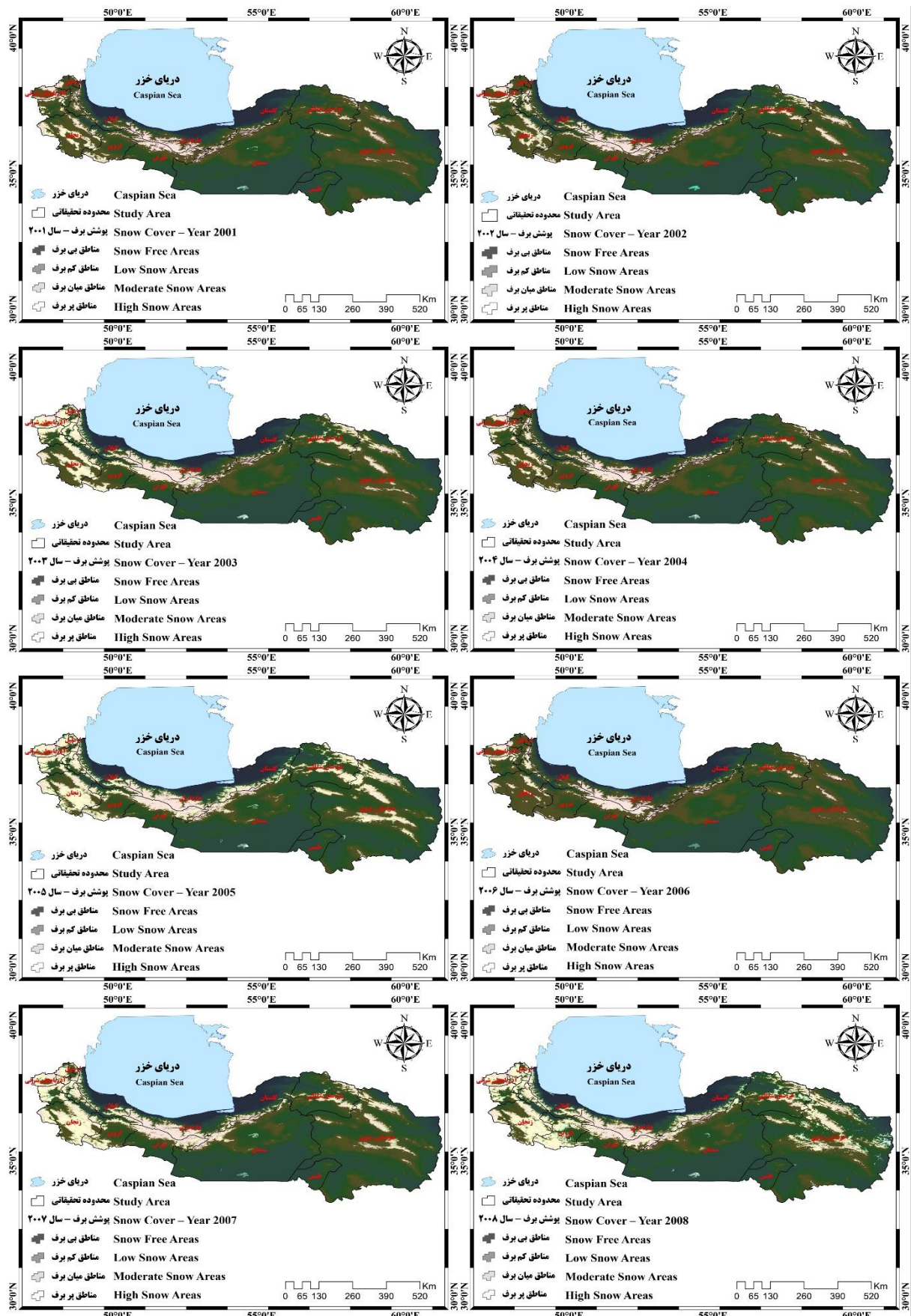
در پژوهش حاضر بعد از این که تغییرات مساحت پوشش برف در منطقه مورد مطالعه محاسبه شدند، نقشه‌های بصری تغییرات پوشش برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور در محیط ArcGIS ترسیم شدند. با توجه به نتایج پژوهش که سال ۲۰۰۸ با مقدار ۳۴۳۴۳۵/۱۳۲ کیلومتر مربع بیش‌ترین مساحت پوشش برفی سال را در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ طی ماه‌های سرد سال (دسامبر تا آوریل) به خود اختصاص داد. نقشه ارائه‌شده نشان‌دهنده توزیع مکانی پوشش برف در سال ۲۰۰۸ در امتداد رشته‌کوه البرز است. در این سال، گستره برف در این ناحیه بسیار وسیع بوده و بخش‌های قابل‌ملاحظه‌ای از نواحی کوهستانی را در برگرفته است. مناطق پوشیده از برف با رنگ سفید مشخص شده‌اند و طبق راهنمای نقشه، می‌توان آن‌ها را به چهار دسته از نظر تراکم برف تقسیم کرد. نواحی غربی رشته‌کوه البرز شاهد تراکم بالای پوشش برف هستند. در این نواحی، الگوی مکانی برف بیش‌تر با ارتفاعات بالادست و عرض‌های جغرافیایی بالاتر همبستگی دارد. این منطقه به‌دلیل تأثیر پذیرفتن از جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای، معمولاً بیش‌ترین میزان بارش برف را دارد. در نواحی مرکزی البرز، پوشش برف به‌صورت نوار ممتدی در ارتفاعات دیده می‌شود. تراکم برف در این منطقه نیز قابل توجه است، به‌ویژه در دامنه‌های شمالی البرز که بیش‌تر در معرض رطوبت دریای خزر قرار دارند. این الگو نشان می‌دهد که سال ۲۰۰۸ با وقوع بارش‌های سنگین و سرمای شدید، شرایط مناسبی برای انباشت برف در این مناطق فراهم کرده است. در بخش‌های شرقی البرز، علیرغم اینکه عموماً بارش برف نسبت به بخش‌های غربی کم‌تر است، اما در سال ۲۰۰۸ نیز شاهد گستره نسبتاً وسیعی از پوشش برف در این نواحی هستیم. این موضوع نشان‌دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت سیستم‌های بارشی در این سال بوده است که توانسته به شرق البرز نیز نفوذ کند. در دامنه‌های جنوبی البرز، به‌ویژه مناطق پایین‌دست استان‌هایی مانند سمنان، قم و بخش‌هایی از تهران و مرکزی، پوشش برف به‌صورت پراکنده و با تراکم کم دیده می‌شود. این مناطق به‌دلیل ارتفاع کم‌تر و دمای بالاتر، اغلب پوشش برفی پایداری ندارند. در مجموع، الگوی مکانی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۸ شرایط اقلیمی خاصی بر منطقه حاکم بوده که باعث گسترش بی‌سابقه پوشش برف در تمام پهنه البرز شده است. ترکیب عرض جغرافیایی، ارتفاع، فاصله از دریا و جهات توپوگرافی در شکل‌گیری این الگو نقش مهمی داشته‌اند (شکل ۳). در نقشه تغییرات مساحت پوشش برف که برای سال ۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های سنجش از دور در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شده، اطلاعات ارزشمندی از الگوی مکانی برف برای منطقه مورد مطالعه ارائه شد. نقشه سال ۲۰۱۲ توزیع فضایی پوشش برف را با دسته‌بندی مناطق بی‌برف تا پربرف در محدوده رشته‌کوه البرز به‌خوبی نشان می‌دهد. اگرچه از نظر مساحت کلی برف، سال ۲۰۱۲ به اندازه سال ۲۰۰۸ گسترده نیست، اما در این سال بر اساس داده‌های تحلیلی، شدت بارش‌های برفی، عمق برف و محتوای آب معادل برف در نقاط مشخصی به اوج خود رسیده‌اند.

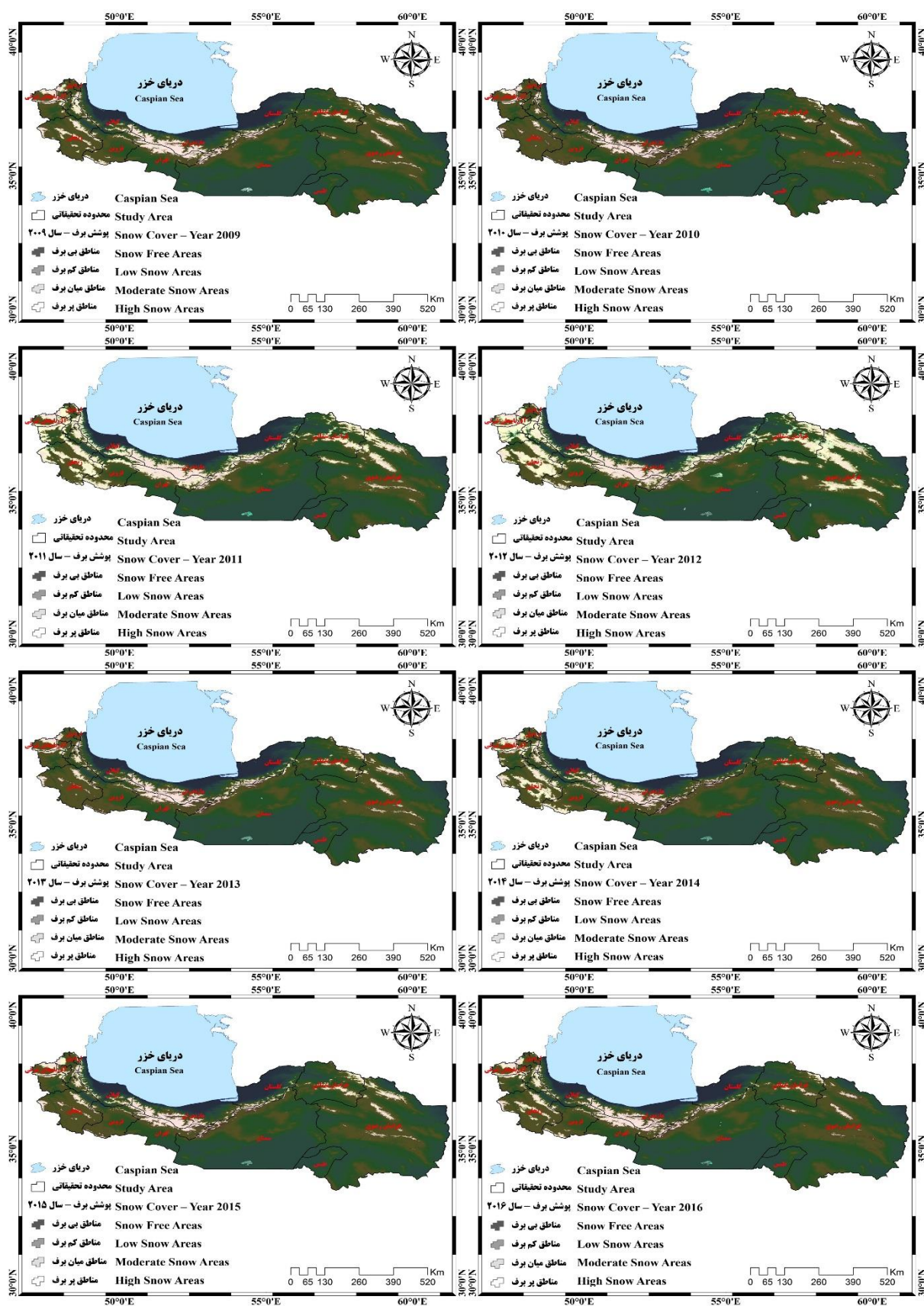
بخش‌های شرقی البرز نسبت به سال ۲۰۰۸، پوشش برف بیش‌تری را نشان می‌دهند. نواحی مرتفع در این استان‌ها دارای تراکم بالاتری از برف هستند که می‌تواند ناشی از نفوذ توده‌های هوای سرد همراه با رطوبت از شمال‌شرق باشد. این ناحیه بیش‌ترین عمق برف و آب معادل برف را در سال ۲۰۱۲ تجربه کرده است. نواحی مرکزی البرز، پوشش برف نسبتاً پیوسته‌ای دارند، اما تراکم و گستردگی آن نسبت به سال ۲۰۰۸ اندکی کاهش یافته است. با این حال، به‌واسطه ارتفاع بالا و موقعیت جغرافیایی، این مناطق هم‌چنان در زمره نواحی میان‌برف تا پربرف قرار می‌گیرند. در نواحی غربی البرز، کاهش قابل توجهی در گستره پوشش برف نسبت به سال ۲۰۰۸ دیده می‌شود؛ این ممکن است ناشی از تضعیف جبهه‌های غربی یا تمرکز بارش‌ها در بخش شرقی کشور در آن سال باشد. دامنه‌های جنوبی کل البرز، مشابه سال ۲۰۰۸ هم‌چنان دارای پوشش برف محدود هستند و در اغلب موارد در دسته‌های کم‌برف یا بی‌برف قرار دارند. این الگو عمدتاً به علت ارتفاع کم‌تر، تابش مستقیم خورشید و دمای بالاتر در این دامنه‌ها است. در مجموع، سال ۲۰۱۲ اگرچه از نظر مساحت پوشش برف گستردگی کم‌تری نسبت به سال ۲۰۰۸

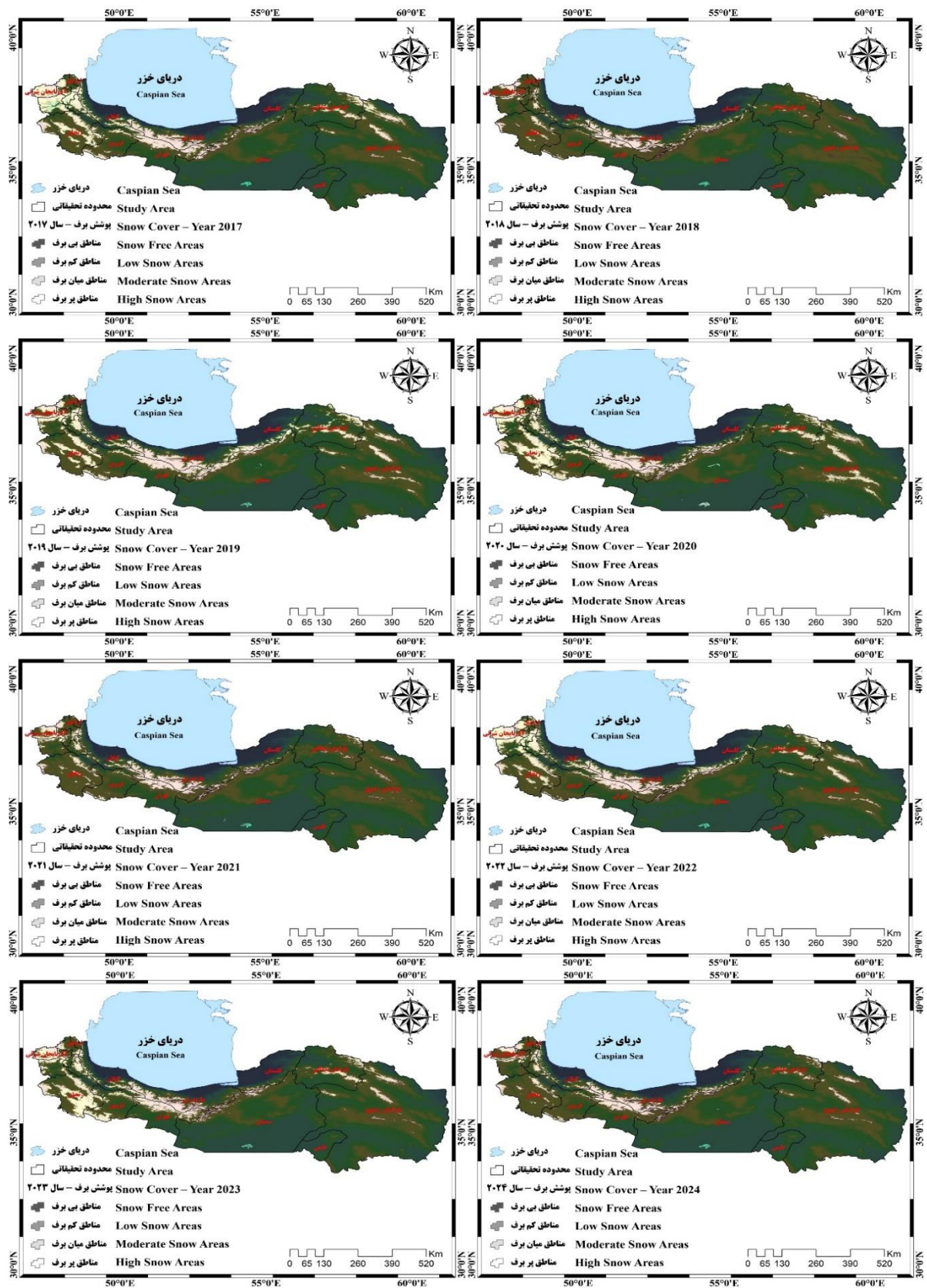
دارد، اما حضور برف در نواحی شرقی با تراکم بالا و پارامترهای کیفی قوی‌تر (عمق، آب معادل برف و نرخ بارش)، نشان‌دهنده رخداد بارش‌های سنگین برف در نواحی خاص است. (شکل ۳). با وجود آن‌که مساحت پوشش برف در سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین مقدار را نشان داد، پارامترهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ شدت لحظه‌ای بارش در سال ۲۰۱۲ به طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر بودند. این تفاوت می‌تواند ناشی از پراکنش مکانی و شدت بارش باشد؛ به طوری که در سال ۲۰۰۸ بارش برف گسترده ولی کم‌عمق‌تر و در مساحت وسیع‌تری رخ داده است، در حالی که در سال ۲۰۱۲ بارش‌های متمرکزتر و شدیدتری منجر به افزایش عمق و تجمع برف در مناطق محدودتری شده است. علاوه بر این، عوامل دمایی و سامانه‌های جوی مختلف نیز نقش مهمی در تغییر الگوهای بارش و پوشش برف ایفا کرده‌اند. این یافته‌ها بر اهمیت بررسی همزمان پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی برای درک کامل روندهای بارش برف تأکید دارند.

یافته‌های بررسی سه پارامتر میانگین عمق برف، میانگین آب معادل برف و میانگین نرخ بارش برف، بیانگر این می‌باشد که میانگین عمق برف در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیش‌ترین مقادیر آن در روزهای خاص زمستانی ثبت شده‌اند. به طور مشخص به ترتیب در روزهای یک فوریه سال ۲۰۱۲ با مقدار ۲۱/۷۰ سانتی‌متر، یک ژانویه سال ۲۰۰۸ با مقدار ۱۸/۱۴ سانتی‌متر و یک فوریه ۲۰۰۵ با مقدار ۱۵/۲۸ سانتی‌متر حاصل شد (شکل الف - ۴). بالاترین مقادیر عمق برف در ماه‌های ژانویه و فوریه مشاهده شده‌اند، که مطابق با اوج فصل سرد و فعالیت سامانه‌های بارشی در منطقه البرز است. سال ۲۰۱۲ با ثبت بیشینه ۲۱/۷۰ سانتی‌متر، احتمالاً تحت تأثیر یک یا چند سامانه قوی بارشی زمستانه بوده است. مقادیر قابل ملاحظه میانگین عمق برف در بین سال‌ها نشان‌دهنده نوسانات بین‌سالی در میزان ذخیره برف است، که می‌تواند ناشی از تغییر الگوهای گردش جو، دمای سطح زمین، و حتی تغییر اقلیم منطقه باشد. عمق برف یکی از شاخص‌های مهم برای برآورد ذخایر آبی آینده (ذوب برف‌ها در بهار) می‌باشد. کاهش روند عمق برف در سال‌های اخیر می‌تواند زنگ خطری برای منابع آب حوضه‌های پایین‌دست باشد. نمودار سری زمانی عمق برف در دوره‌ی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار عمق برف در سال ۲۰۱۲ به ثبت رسیده است. برای بررسی روند تغییرات در طول زمان، یک مدل رگرسیون خطی بین متغیر زمان (سال) و عمق برف برازش داده شد که ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۰۳۷ به دست آمد. مقدار مذکور به این معناست که تنها ۳/۷ درصد از تغییرات عمق برف توسط روند زمانی قابل تبیین است، در حالی که ۹۶/۳ درصد از تغییرات تحت تأثیر سایر عوامل (از جمله نوسانات طبیعی بالا مانند عمق برف به شدت تحت تأثیر تغییرات فصلی، شدت و الگوی بارش‌های سالانه و سایر شرایط جوی متغیر است. این نوسانات ذاتی می‌تواند باعث کاهش قدرت توضیح‌دهندگی مدل خطی شود) قرار دارد.

بررسی میانگین آب معادل برف در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیشینه این پارامتر در ماه‌های زمستان و اوایل بهار رخ داده است: نتایج میانگین آب معادل نیز نشان دهنده این بود که بیش‌ترین مقدار آن به ترتیب ۴/۹۶ سانتی‌متر در یک فوریه سال ۲۰۱۲، مقدار ۳/۶۲ سانتی‌متر در یک فوریه ۲۰۰۵ و مقدار ۳/۴۵ سانتی‌متر در یک مارس سال ۲۰۰۷ به دست آمد (شکل ب - ۴). مقادیر بالای میانگین آب معادل برف در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۰۵ با همان سال‌هایی که بیش‌ترین عمق برف ثبت شد هم‌زمان است. این موضوع تأیید می‌کند که بیش‌ترین عمق برف معمولاً با افزایش مقدار آب ذخیره‌شده در قالب برف همراه است. مقدار ۴/۹۶ سانتی‌متر میانگین آب معادل برف در یکم فوریه ۲۰۱۲ بیانگر یک ذخیره آبی مهم در آن سال است. این مقدار برای یک منطقه کوهستانی مانند رشته کوه البرز قابل توجه است و احتمالاً به دنبال بارش‌های سنگین و دمای پایین در آن بازه رخ داده است. ثبت سومین بیشینه در ماه مارس نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۷ بخشی از بارش‌های برفی در اواخر زمستان یا حتی اوایل بهار رخ داده‌اند. این می‌تواند به دلیل کشیدگی فصل سرما یا تأخیر در ذوب باشد. میانگین آب معادل برف مستقیماً به ذخایر آبی بالقوه مربوط است، زیرا نشان می‌دهد پس از ذوب برف، چه حجمی از آب در دسترس خواهد بود. مقادیر بالای آب معادل برف در برخی سال‌ها (مانند ۲۰۱۲) می‌تواند برای مدیریت منابع آب اهمیت داشته باشد. اگر مقادیر میانگین آب معادل برف در سال‌های پایانی (مثلاً ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴) روند کاهشی داشته باشد، ممکن است نشان‌دهنده اثرات تغییر اقلیم، افزایش دمای زمستان، یا کاهش بارش‌های برف‌زا باشد که باید بررسی شود.







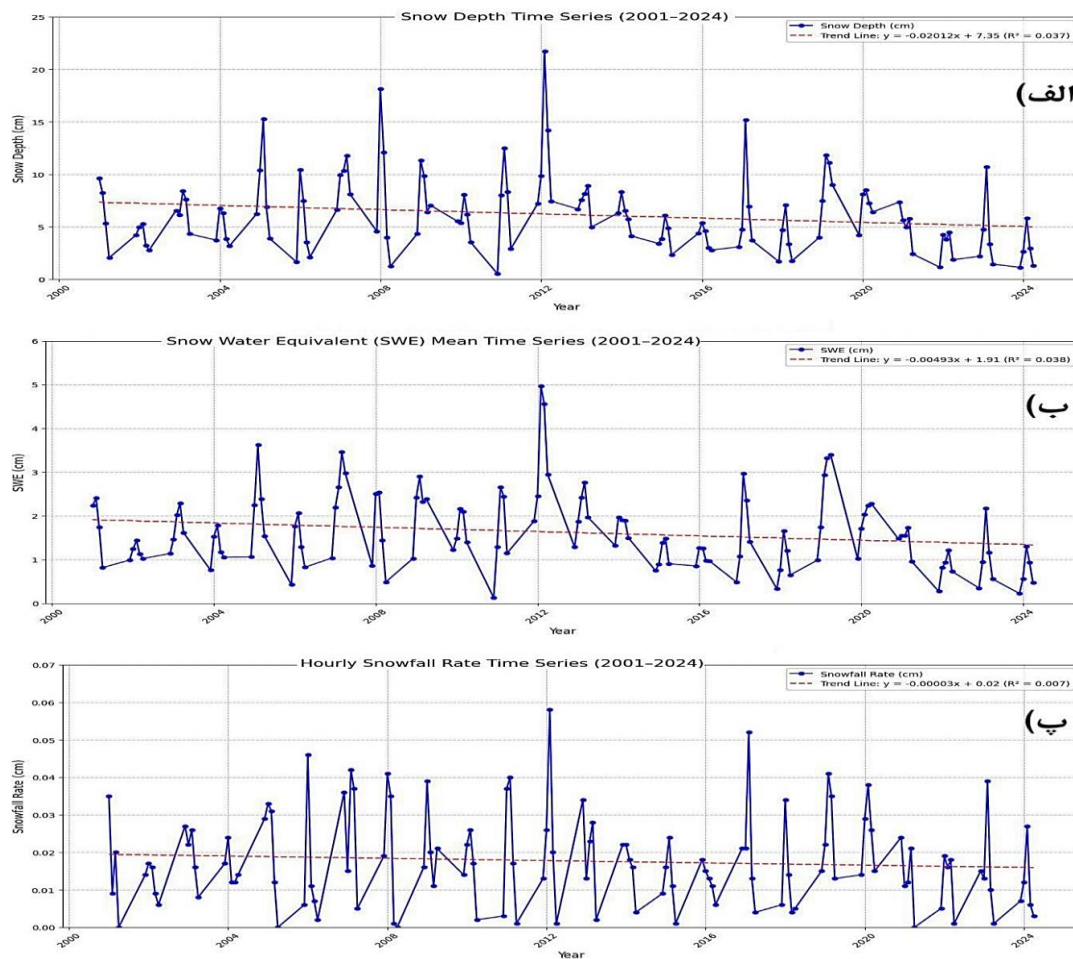
شکل ۳- تغییرات مساحت پوشش برف رشته کوه البرز در طی سال‌های ۲۰۱۷ - ۲۰۲۴

Fig. 3. Changes in Snow Cover Area of the Alborz Mountain Range during 2017–2024

نمودار سری زمانی آب معادل برف در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آب معادل برف در سال ۲۰۱۲ رخ داده است. به منظور بررسی روند تغییرات در طول زمان، یک مدل رگرسیون خطی بین متغیر زمان (سال) و مقدار آب معادل برف برازش داده شد که ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۰۳۸ به دست آمد. این مقدار بدین معناست که تنها ۳/۸ درصد از تغییرات آب معادل برف قابل تبیین توسط روند خطی زمان است؛ به بیان دیگر، ۹۶/۲ درصد از نوسانات آب معادل برف تحت تأثیر سایر عوامل غیر زمانی قرار دارند. براساس نتایج به دست آمده از میانگین شدت لحظه‌ای بارش، به ترتیب بیشترین مقدار آن ۰/۰۵۸ میلی‌متر در ساعت در یک فوریه سال ۲۰۱۲، ۰/۰۵۲ میلی‌متر در ساعت در یک فوریه ۲۰۱۷ و ۰/۰۴۶ میلی‌متر در ساعت در یک ژانویه سال ۲۰۰۶ به دست آمد (شکل پ - ۴). براساس نتایج به دست آمده از تحلیل میانگین نرخ شدت لحظه‌ای بارش برف در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، سال ۲۰۱۲ در هر سه پارامتر (عمق برف، آب معادل برف، و نرخ بارش) بیشینه یا نزدیک به بیشینه را دارد. این همگرایی نشان می‌دهد که این سال احتمالاً دارای رخدادهای قوی و سنگین بارش برف با دمای مناسب برای بارش جامد بوده است. تکرار بیشینه‌ها در ماه فوریه (در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷) نشان می‌دهد که اوج شدت بارش برف معمولاً در نیمه دوم زمستان (حدود بهمن) اتفاق افتاده است، زمانی که شرایط دینامیکی جو برای بارش سنگین مناسب‌تر است. نرخ بارش برف، به‌ویژه زمانی که همراه با دمای پایین و رطوبت کافی باشد، می‌تواند سبب انباشت سریع برف روی زمین شود. با توجه به این که در سال‌های پایانی دوره مطالعه، چنین نرخ‌هایی مشاهده نشده است، می‌تواند نشان‌دهنده گرم‌تر شدن زمستان‌ها و کاهش فراوانی بارش‌های برف شدید باشد. نمودار سری زمانی مربوط به نرخ بارش لحظه‌ای برف در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این متغیر در سال ۲۰۱۲ ثبت شده است. برای بررسی وجود روند زمانی، یک مدل رگرسیون خطی بین سال (زمان) و نرخ بارش ترسیم شد که مقدار (R^2) برابر با ۰/۰۰۷ حاصل شد. این مقدار بسیار پایین بیانگر آن است که تنها ۰/۷ درصد از تغییرات نرخ بارش برف با گذر زمان (روند خطی) قابل توجیه است و در مقابل، ۹۹/۳ درصد از نوسانات نرخ بارش تحت تأثیر عوامل دیگری هستند که بیانگر این می‌باشد که مدل خطی توضیح‌دهی اندکی دارد؛ بنابراین تحلیل‌های غیرخطی یا مدل‌های پیچیده‌تر ممکن است مناسب‌تر باشند.

بررسی سه پارامتر کلیدی مرتبط با پوشش برف شامل میانگین عمق برف، میانگین آب معادل برف و میانگین نرخ شدت لحظه‌ای بارش برف در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، تصویر جامعی از وضعیت بارش و ذخیره برفی در منطقه رشته‌کوه البرز ارائه می‌دهد. تحلیل دقیق این شاخص‌ها نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ بین متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی منطقه می‌باشد. داده‌های هر سه پارامتر حاکی از وقوع سال ۲۰۱۲ به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین سال‌های دوره مورد مطالعه است. در این سال، بیشینه میانگین عمق برف (۲۱/۷۰ سانتی‌متر)، بیشینه میانگین آب معادل برف (۴/۹۶ سانتی‌متر) و بالاترین نرخ شدت لحظه‌ای بارش (۰/۰۵۸ میلی‌متر بر ساعت) به ثبت رسیده است. این هماهنگی آماری قوی نشان‌دهنده شرایط جوی مساعد برای بارش‌های سنگین و تجمع قابل توجه برف در منطقه است که می‌تواند ناشی از ترکیب عوامل سینوپتیکی مانند نفوذ سامانه‌های بارشی فعال، دمای پایین هوا و رطوبت مناسب باشد. تمامی پارامترها نشان می‌دهند که ماه‌های ژانویه و فوریه بیشترین میزان بارش و پوشش برف را دارند. این بازه زمانی، دوره اوج سرمای زمستان و فعالیت سامانه‌های جوی سرد و مرطوب است که موجب بارش برف گسترده در رشته‌کوه البرز می‌شود.

نتایج آمار توصیفی سه متغیر عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای برف نشان داد که کم‌ترین و بیشترین مقدار نرخ بارش لحظه‌ای در بازه صفر تا ۰/۰۵۸ میلی‌متر در ساعت قرار دارد. همچنین، حداقل و حداکثر مقدار عمق برف به ترتیب برابر با ۰/۵۱۲ سانتی‌متر و ۲۱/۷۰۸ سانتی‌متر و برای آب معادل برف نیز در بازه ۰/۱۲۹ تا ۴/۹۶۹ سانتی‌متر مشاهده شد. میانگین و انحراف معیار سه متغیر مذکور به ترتیب برای عمق برف، میانگین ۶/۱۶۳ سانتی‌متر با انحراف معیار ۳/۶۱۱ سانتی‌متر؛ آب معادل برف، میانگین ۱/۶۲۲ سانتی‌متر با انحراف معیار ۰/۸۶۷ سانتی‌متر و نرخ بارش لحظه‌ای؛ میانگین ۰/۰۱۷ میلی‌متر بر ساعت با انحراف معیار ۰/۰۱۲ میلی‌متر بر ساعت حاصل شد. همچنین، ۷۵ درصد مقادیر عمق برف کم‌تر یا مساوی ۸/۰۳۹ سانتی‌متر است. مقادیر مشابه برای آب معادل برف و نرخ بارش نیز با توجه به جدول آمار توصیفی قابل استخراج و تفسیر می‌باشند (جدول - ۲).



شکل ۴- نمودارهای سری زمانی مقادیر عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۱

Fig. 4. Time Series Graphs of Snow Depth, Snow Water Equivalent, and Instantaneous Snowfall Rate in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

آمار توصیفی نشان داد که عمق برف در بازه بسیار گسترده‌ای (از حدود نیم سانتی‌متر تا بیش از ۲۱ سانتی‌متر) در طول دوره مطالعه تغییر کرده است. میانگین عمق برف حدود ۶ سانتی‌متر است که بیانگر بارش‌های برفی متوسط تا کم‌عمق در بیش‌تر روزهاست، ولی وجود مقادیر حداکثر بالا نشان‌دهنده دوره‌های بارش شدید برف در برخی روزهاست. آب معادل برف نیز دامنه‌ای مشابه ولی با مقادیر کم‌تر دارد، که نمایانگر تراکم برف و میزان آب ذخیره شده در برف است. انحراف معیار نسبتاً بالا در هر دو متغیر نشان از تغییرات قابل توجه در شرایط بارش و تجمع برف در بازه زمانی مطالعه دارد. نرخ بارش لحظه‌ای دارای میانگین بسیار پایین (حدود ۰/۰۱۷ میلی‌متر بر ساعت) است، که نشان‌دهنده این است که بارش برف در اغلب مواقع با شدت کم تا متوسط رخ داده است. با این حال، مقدار حداکثر ۰/۰۵۸ میلی‌متر بر ساعت، بیانگر وجود دوره‌های کوتاه مدت بارش شدیدتر است. در نهایت، درصدهای مختلف (مانند ۷۵ درصد مقادیر کم‌تر یا مساوی) کمک می‌کند تا توزیع داده‌ها بهتر درک شود و نشان‌دهنده این است که بیشتر مقادیر بارش و تجمع برف در محدوده پایین تا متوسط قرار دارند، اما نوسانات شدید و مقادیر بالا نیز در برخی دوره‌ها رخ داده‌اند. هم‌چنین به رفتار آماری سه متغیر کلیدی مرتبط با برف شامل عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف ادامه به صورت مجزا برای هر متغیر اقدام شد که در آنها توزیع عمق برف چوله به راست است و بیش‌ترین فراوانی بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد. داده‌ها در پراکندگی خود ناهمگون‌اند و اغلب زیر ۱۰ سانتی‌متر متمرکز شده‌اند. میانه حدود ۵ سانتی‌متر است و مقادیر بالای ۱۵ سانتی‌متر به عنوان پرت شناخته می‌شوند. بیش‌ترین میانگین ماهانه در فوریه دیده شده و از آن پس تا آوریل روند تقریباً کاهش دارد (شکل الف - ۵). آب معادل برف نیز دارای توزیع چوله به

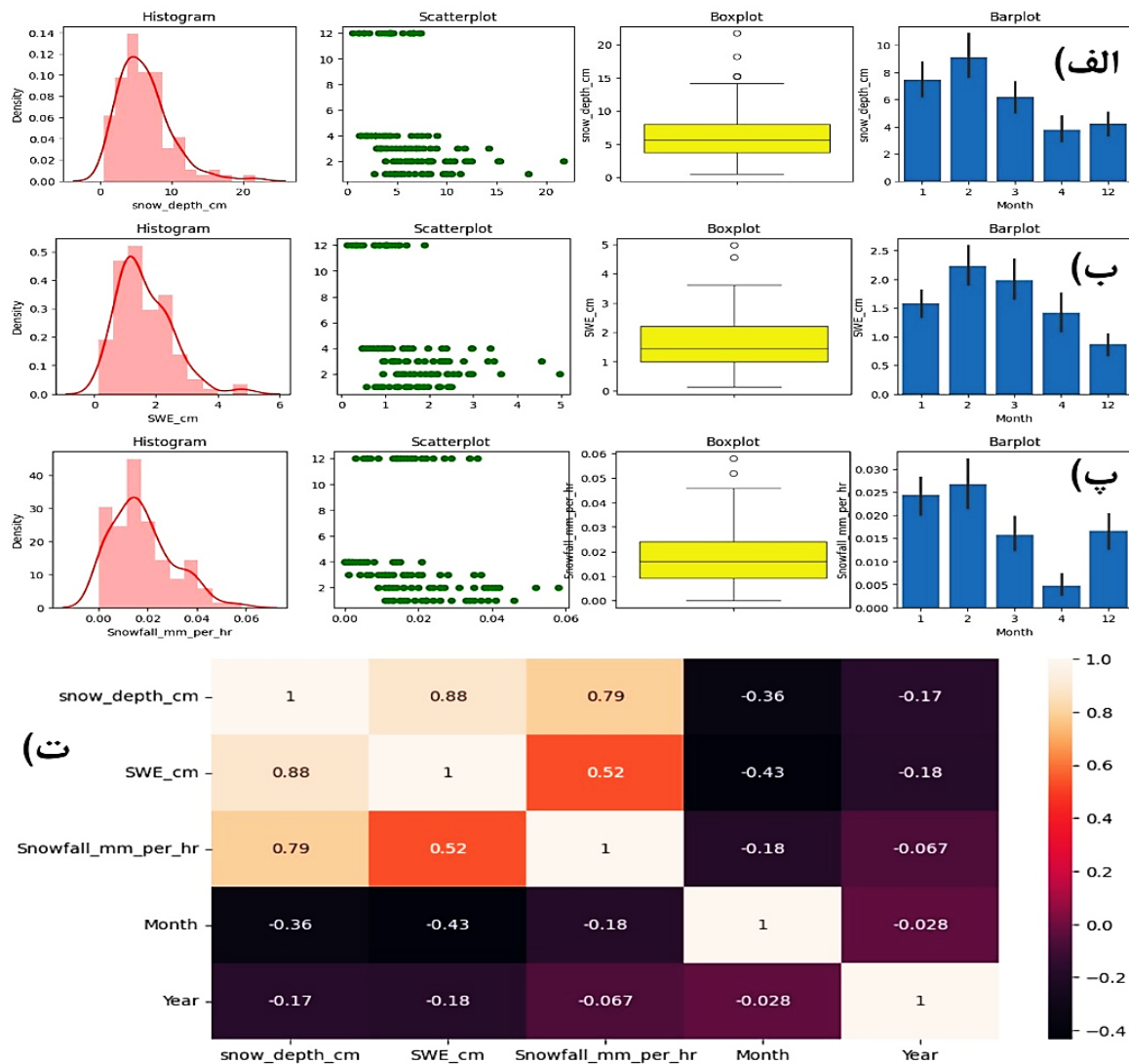
راست است و بیشتر داده‌ها در بازه ۱ تا ۲/۵ سانتی‌متر قرار دارند. تراکم بالا در مقادیر کم‌تر از ۲ سانتی‌متر دیده می‌شود و میانه تقریباً بین حدود ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر سانتی‌متر است. مقادیر بالای ۴ سانتی‌متر نادر و پرت هستند. دامنه بین چارکی کوچک‌تر از عمق برف است که پایداری بیشتری را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار ماهانه در فوریه ثبت شده و احتمالاً به حفظ برف فشرده در سطح اشاره دارد (شکل ب - ۵).

جدول ۲- آمار توصیفی متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۱

Table 2 – Descriptive Statistics of Snow Depth, Snow Water Equivalent, and Instantaneous Snowfall Rate Variables in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

نرخ بارش لحظه‌ای برف (mm/hr)	آب معادل برف (cm)	عمق برف (cm)	
Instantaneous Snowfall Rate (mm/hr)	Snow Water Equivalent (cm)	Snow Depth (cm)	
119	119	119	فراوانی یا تعداد Frequency or Count
0.017	1.622	6.163	میانگین Mean
0.012	0.876	3.611	انحراف معیار Standard Deviation (SD)
0.000	0.129	0.512	حداقل Minimum
0.009	0.987	3.718	Percent 25
0.016	0.459	5.639	Percent 50
0.024	2.212	8.039	Percent 75
0.058	4.969	21.708	حداکثر Maximum

در نرخ لحظه‌ای بارش برف توزیع این پارامتر به شدت چوله به راست است و بیش‌تر داده‌ها در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ میلی‌متر بر ساعت قرار دارند. تمرکز داده‌ها در مقادیر پایین است و فقط چند نرخ بالا (بیش از ۰/۰۴ mm/hr) به عنوان رویداد شدید ثبت شده‌اند. میانه حدود ۰/۰۲ mm/hr است. بیش‌ترین میانگین ماهانه در فوریه دیده شده و با گرم‌تر شدن هوا تا مارس کاهش محسوسی دارد (شکل پ - ۵). هم‌زمانی بیشینه میانگین ماهانه در عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای در ماه فوریه نشان می‌دهد که این ماه، نقطه اوج فعالیت‌های برفی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. چنین رفتاری بیانگر نقش کلیدی فوریه در انباشت و پایداری ذخایر برفی و به تبع آن، تأمین منابع آبی ذوب‌شونده در فصل بهار است. بر اساس نتایج و تحلیل هیت‌مپ، متغیر عمق برف با نرخ بارش و آب معادل برف رابطه خطی مثبت و نسبتاً قوی دارد؛ به طوری که ضریب همبستگی آنها به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۸ محاسبه شده است. این بدان معناست که با افزایش نرخ بارش، عمق برف و میزان آب معادل برف نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، عمق برف با ماه‌های سال رابطه خطی معکوس (منفی) دارد (با ضریب همبستگی ۰/۳۶ -)، به این معنا که با گذر ماه‌های سال، عمق برف کاهش می‌یابد. مشابه این روند برای متغیر آب معادل برف نیز مشاهده شده است، که با ماه‌های سال همبستگی منفی ۰/۴۳ - دارد و نشان می‌دهد میزان آب معادل برف در طول سال کاهش می‌یابد. علاوه بر این، متغیرهای آب معادل برف و نرخ بارش نیز با ماه‌های سال رابطه خطی معکوس (منفی) دارند که ضریب همبستگی آنها به ترتیب برابر با ۰/۴۳ - و ۰/۱۸ - گزارش شده است (شکل ت - ۵). نتایج همبستگی نشان می‌دهد که عمق برف و آب معادل برف به شدت تحت تأثیر نرخ بارش قرار دارند؛ افزایش شدت بارش به افزایش تجمع برف و مقدار آب معادل آن منجر می‌شود. این همبستگی مثبت، تأییدی بر پیوند مستقیم بین شدت بارش و حجم تجمع برف است. رابطه منفی عمق برف و آب معادل با ماه‌های سال نمایان‌گر تغییرات فصلی است. با پیشرفت فصل سرما به سمت بهار، دما افزایش یافته و باعث ذوب تدریجی برف‌ها می‌شود که کاهش عمق و آب معادل برف را در پی دارد. هم‌چنین کاهش نرخ بارش در ماه‌های گرم‌تر موجب کاهش تجمع برف و آب معادل آن می‌گردد. این روابط همبستگی به درک بهتر روندهای زمانی و مکانی پوشش برف و بارش در منطقه کمک می‌کند و می‌تواند در مدل‌سازی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی کاربردی باشد.



شکل ۵- نمودارهای آماری متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۱

۲۰۰۱

Fig. 5. Statistical Graphs of Snow Depth, Snow Water Equivalent, and Instantaneous Snowfall Rate Variables in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه و برآورد مساحت پوشش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های سنجش از دور در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه اقدام شد. براساس نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، ارزیابی مساحت پوشش برف بیان‌گر این بود که سیر تغییرات برف از الگوی یکسان و ثباتی تبعیت نمی‌کند و در طول زمان دچار نوسانات چشم‌گیری شده است. در مقیاس سالانه، بیشترین مقدار مساحت پوشش برف در سال ۲۰۰۸ و سال ۲۰۱۰ با کمترین میزان مساحت پوشش برف در منطقه تحقیقاتی به‌عنوان سال‌های شاخص شناسایی شدند. همچنین در مقیاس‌های روزانه و ماهانه، بیشترین مساحت پوشش برف به طور غالب در ماه‌های ژانویه و فوریه به وقوع پیوسته است که نشان دهنده تمرکز بارش‌های برفی در فصل زمستان در سال‌های مورد مطالعه می‌باشد. علاوه بر این، واکاوی سه پارامتر کلیدی مرتبط با برف شامل عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف آشکار ساخت که بیشترین مقادیر این متغیرها در سال ۲۰۱۲ مشخص شدند. این موضوع بیانگر این می‌باشد که شدت و مشخصه‌های فیزیکی بارش‌های برفی در سال مذکور کاملاً برجسته و محسوس

بوده‌اند، اگرچه مساحت پوشش برف در همان سال نسبت به سال ۲۰۰۸ پایین می‌باشد. این عدم تطابق، اهمیت بررسی چند جانبه متغیرهای کیفی و کمی برف را آشکار می‌سازد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری و نمودارهای توصیفی بیان‌گر آن می‌باشد که توزیع داده‌ها چوله به راست می‌باشد. همبستگی مثبت بین عمق برف با متغیرهای آب معادل برف و نرخ بارش، و هم‌چنین همبستگی منفی این متغیرها با پیش‌روی ماه‌های سال، مشخص‌کننده کاهش تدریجی خصوصیات برفی در فصول گرم‌تر است. هم‌چنین یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که نوسانات پوشش برف و خصوصیات وابسته به آن به شدت تحت تأثیر عوامل پیچیده، غیر بازگشتی و غیرخطی نظیر نوسانات اقلیمی، تغییرات جوی، بارش‌های نامنظم و حتی تأثیرات و فعالیتهای انسانی هستند. تحقیق حاضر ضمن نمایان ساختن روندهای تحلیل فضایی و زمانی پوشش برف، بر ضرورت استفاده از مدل‌های پیشرفته و غیرخطی در ارزیابی‌های آینده و پیش‌بینی رفتار برف در مناطق کوهستانی تأکید دارد؛ چرا که تنها با نگاهی چند بعدی می‌توان به درکی دقیق‌تر از تغییرات زمانی برف در شرایط تغییر اقلیم به دست آورد. بررسی الگوهای فضایی مشخص کرد که تمرکز پوشش برف در نواحی مرتفع شمالی، مرکزی و غربی البرز بیشتر است و عواملی چون ارتفاع، عرض جغرافیایی، و جهت دامنه‌ها تأثیر اساسی در الگوی مکانی برف دارند. این نتایج می‌توانند در برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر مناطق کوهستانی ایران اثر بسزایی داشته باشد. هم‌چنین یافته‌ها نشان داد که ترکیب شاخص‌های وسعت اوج و شاخص‌های تجمعی برف، دید بهتری نسبت به الگوی جریان آب در منطقه فراهم می‌کند. با توجه به مطالعه‌های انجام شده در تحقیقات گذشته در زمینه پوشش برف براساس روش‌های مختلف، در پژوهش حاضر به پایش و تحلیل تغییرات پوشش برف و متغیرهای مرتبط با آن در منطقه مورد مطالعه انجام شد. یافته‌های حاصل شده تحقیق حاضر با نتایج سایر پژوهشگران مانند: عزیزی و همکاران (Azizi, Rahimi, Mohammadi & Khoshakhlagh, 2017؛ نوروز ولاشدی و بهرامی پیچاقچی (Norooz Valashedi & Bahrami Pichaghchi, 2023؛ یاراحمدی و همکاران (Yarahmadi et al., 2020؛ یوسفی‌زاده و همکاران (Yousefzadeh, Sehatkashani, Gholamnia, Maleki & Einali, 2022) و جمس و همکاران (Jems, Yarahmadi, Nasiri & Mirhashemi, 2023) مورد ارزیابی، تحلیل و مقایسه قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین، به ویژه در زمینه روند کلی تغییرات پوشش برف و تمرکز برف در فصول سرد، همسو است، که نشان‌دهنده تأیید تجربی روندهای اقلیمی مشاهده شده در منطقه است. با این حال، تفاوت‌های مهمی نیز مشاهده می‌شود: برخلاف تحقیقات گذشته که معمولاً تنها بر آورد مساحت پوشش برف یا به یکی مؤلفه‌های مرتبط برف تمرکز داشته‌اند و غالباً بخش محدودی از رشته‌کوه البرز را پوشش داده‌اند، در حالی که نتایج به دست آمده در این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین دارای مزایای چشمگیری داشت، از جمله پوشش کامل پهنه رشته‌کوه البرز در مطالعه حاضر به جای تمرکز محدود بر بخش‌هایی از آن، امکان تحلیل جامع‌تری را فراهم کرده است. برخلاف تحقیقات قبلی که فقط به برآورد پوشش برف اقدام کرده‌اند، در این مطالعه متغیرهای مرتبط با پوشش برف مانند عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برتری دیگر پژوهش حاضر استفاده همزمان از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و مدل‌سازی FLDAS در بستر سامانه تحت وب GEE است که امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تری از پوشش برف و مؤلفه‌های مرتبط با آن را فراهم می‌کند. این جامعیت در تحلیل مؤلفه‌ها سبب شده است که نتایج، دقیق‌تر و کاربردی‌تری از پیامد تغییرات اقلیمی بر منابع آبی در منطقه ارائه شود.

References

- Aalinejad, M. H., Jahanbakhsh, S., & Mohammad Khorshiddoust, A. (2021). Simulation of runoff from Qarashoo basin snowmelt By Using SRM model. *Journal of Geography and Planning*, 25(76), 87-97. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gp.2021.13139>
- Abbasi Jandani, S., & Fathzadeh, A. (2015). Assessing of interpolation methods in order to snow water equivalent estimation. *Journal of Range and Watershed Managment*, 68(4), 779-793. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jrwm.2015.56959>

- Abdam, S., Fathzadeh, A., Taghizadeh Mehrjardi, R., & Mahjoubi, J. (2016). Digital Mapping of Snow Water Equivalent using an Artificial Neural Network and Geomorphometric Parameters (Case study: Sakavid watershed, Yazd). *Journal of Watershed Manage Research*, 7(13), 149-138. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.149>
- Ahmadi, M., & Seyedmirzaei, Z. (2022). Snow Cover Variability in the Cold Period of the Year in Iran Based on MODIS Measurements. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 14(1), 59-72. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/gisj.14.1.59>
- Atif, I., Mahboob, M., & Iqbal, J. (2015). Snow cover area Change assessment in 2003 and 2013 using MODIS data of the Upper Indus Basin, Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 48, 117-128. <http://ojs.uop.edu.pk/jhes/article/view/1952>
- Azizi, G., Rahimi, M., Mohammadi, H., & Khoshakhlagh, F. (2017). Spatio-temporal variations of snow cover in the southern slope of central Alborz. *Physical Geography Research*, 49(3), 381-393. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.217393.1006943>
- Banerjee, S., Sati, V. P., Almazroui, M., & Chakraborty, S. (2024). Spatio-Temporal assessment of areal fragmentation and volume of snow cover in the central himalaya. *Earth Systems and Environment*, 8(4), 1639-1656. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00469-y>
- Berezowski, T., Chormanski, J., & Batelaan, O. (2015). Skill of remote sensing snow products for distributed runoff prediction. *Journal of Hydrology*, 524, 718- 732 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.025>
- Darlane, K., Santi, A., & Amin, E. (2017). Investigating Spatiotemporal snow cover variability via cloud free MODIS snow cover product in central Alborz region. *Remote Sensing of Environment*, 202, 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.042>
- Di Marco, N., Avesani, D., Righetti, M., Zaramella, M., Majone, B., & Borga, M. (2021). Reducing hydrological modelling uncertainty by using MODIS snow cover data and a topography-based distribution function snowmelt model. *Journal of Hydrology*, 599, 126020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126020>
- Dixit, A., Goswami, A., Jain, S., & Das, P. (2024). Assessing snow cover patterns in the Indus-Ganga-Brahmaputra River Basins of the Hindu Kush Himalayas using snow persistence and snow line as metrics. *Environmental Challenges*, 14, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100834>
- Ebadi, Y., Eftekhary, A., Mohammad Khanlu, H., & Fakhri, M. (2021). Providing a new spectral index to extract snow cover using optical remote sensing images. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(117), 79-94. [In Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.244452>
- Ebrahimi, R., Hamzeh, S., & Marofi, S. (2016). Modeling the snow cover and snowmelt runoff using a combination of SRM hydrological model and satellite imagery. *Irrigation and Water Engineering*, 6(3), 66-77. [In Persian] https://www.waterjournal.ir/article_73957.html?lang=en
- Faraji, A., Kamangar, M., & Ashrafi, S. (2024). Spatial Analysis of Snow Cover in Western Iran Using Satellite Imagery. *Water and Soil*, 38(1), 161-173. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83893.1323>
- Gao, Z., Liu, Z., Han, P., & Zhang, C. (2024). Investigating spatial-temporal trend of snow cover over the three provinces of Northeast China based on a cloud-free MODIS snow cover product. *Journal of Hydrology*, 645(Part A), 132044. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132044>
- Ghafarian, P., Farid Mojtahedi, N., Moradi, M., Khosh Akhlagh, F., Abed, H., & Negah, S. (2016). Studying of Regional Scale Forcing on the Spatial Pattern Formation of Heavy Snowfall Hazard in the Gilan Plain (Case Study Feb 2014). *Journal of Oceanography*, 7(26), 85-97. [In Persian] <http://joc.inio.ac.ir/article-1-977-fa.html>
- Haghizadeh, A., Kiani, A., & Kiani, M. (2017). Performance Evaluation of Geo-Statistical Methods to Estimate the Spatial Distribution of Snow Depth and Density in Mountainous Areas (Case Study: Gush Bala Watershed, Mashhad). *Journal of Hydrogeomorphology*, 4(12), 45-66. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1396.4.12.3.6>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 181-194. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0)
- Hussain, I., Ali, M., Muhammad, S., Hassan, W., Ali, S., Hussain, Z., ... & Khan, M. Y. (2023). A decline in snow cover area of Passu and Ghulkin valleys between 1995 and 2022. *Journal of Mountain Science*, 20(12), 3542-3551. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8037-2>
- Irannezhad, M., Ronkanen, A. K., & Kløve, B. (2016). Wintertime climate factors controlling snow resource decline in Finland. *International Journal of Climatology*, 36(1).

- Jems, H., Yarahmadi, D., Nasiri, A., & Mirhashemi, H. (2023). Monitoring the spatial changes of the snow cover of Central Alborz using the SVM algorithm and landsat images. *Researches in Earth Sciences*, 14(2), 20-37. [In Persian] <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103194>
- Jin, X., Ke, C. Q., Xu, Y. Y., & Li, X. C. (2015). Spatial and temporal variations of snow cover in the Loess Plateau, China. *International Journal of Climatology*, 35(8).
- Kashki, A., & Haji Mohammadi, H. (2017). Synoptic systems analysis took occurrence of heavy snow in the northern provinces of Iran A case study is January 31 to February 3, 2014. *Iran-Water Resources Research*, 13(2), 1770-181. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_43177.html?lang=en
- Khan, A. A., & Li, X. (2025). Recent global snow cover trends using the MODIS dataset from 2000 to 2021. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 39, 101662. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101662>
- Maryanji, Z., Toulabi Nejad, M., & Dolatshahi, Z. (2023). The effect of climate change on snowfall and its prediction in Hamadan county. *Physical Geography Research*, 55(1), 113-129. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.358026.1007765>
- McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., ... & Verdin, J. P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific Data*, 4(1), 1-19. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.12>
- Montazeri, M. (2018). Frequency analysis of snowfall in Iran over the past decades. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 279-283. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_56938.html
- Motiee, H., & Ahrari, S. (2022). Assessment of the effect of periodic changes on Takhte Soleiman glaciers using Google Earth Engine (GEE). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(2), 179-194. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9>
- Norooz Valashedi, R., & Bahrami Pichaghchi, H. (2023). Detection of the effect of climate change on the snow areas of the Northern Alborz Watershed by CPA method. *Watershed Engineering and Management*, 15(3), 386-403. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357000.1937>
- Özdoğan, M. (2011). Climate change impacts on snow water availability in the Euphrates-Tigris basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2789-2803. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2789-2011>
- Passang, S., Schmidt, S., & Nüsser, M. (2022). Topographical Impact on Snow Cover Distribution in the Trans-Himalayan Region of Ladakh, India. *Geosciences*, 12(8), 311. <https://doi.org/10.3390/geosciences12080311>
- Roustayi, Sh., Rahimpour, T., & Nokhostin Rouhi, M. (2016). Detection of snow cover extent in the Tabriz watershed using AVHRR-NOAA satellite images. In *Proceedings of the 2nd International Congress on Earth Sciences and Urban Development (Tabriz, Iran)*. Kian Tarh Danesh Co., Research Institute of Jihad Daneshgahi, East Azerbaijan Branch. [In Persian] <https://civilica.com/doc/525994/>
- Seifi, H. (2021). Estimation of snow cover through object-oriented techniques using image sensors OLI and TIRS (Case Study: Sabalan Mountain). *Journal Applied Researches in Geographical Sciences*, 21(63), 19-37. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.63.19>
- Seydi Shahivandi, M., Omidvar, K., Mozafari, G., & Mazidi, A. (2025). Analysis of the consequences of climate change on the characteristics of middle Zagros snow cover using remote sensing data. *Journal Applied Researches in Geographical Sciences*, 25(77), 22-43. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.77.9>
- Solaimani, K., Darvishi, S., Shokrian, F., & Rashidpour, M. (2018). Monitoring of temporal-spatial variations of snow cover using the MODIS image (Case Study: Kurdistan Province). *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 10(3), 77-104. [In Persian] https://gisj.sbu.ac.ir/article_96603.html?lang=en
- Sunita, Gupta, P. K., Petropoulos, G. P., Gusain, H. S., Sood, V., Gupta, D. K., ... & Singh, A. K. (2023). Snow cover response to climatological factors at the Beas River Basin of W. Himalayas from MODIS and ERA5 Datasets. *Sensors*, 23(20), 8387. <https://doi.org/10.3390/s23208387>
- Tekeli, Y., & Tekeli, A. E. (2012). A technique for improving MODIS standard snow products for snow cover monitoring over Eastern Turkey. *Arabian Journal of Geoscience*, 5, 353-363. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0274-3>
- Tasdighian, M., & Rahimzadegan, M. (2017). Evaluation and improvement of snow cover detection from MODIS images. *Iran-Water Resources Research*, 13(1), 163-177. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_39359.html

- Wei, P., Zhang, T., Zhou, X., Yi, G., Li, J., Wang, N., & Wen, B. (2021). Reconstruction of snow depth data at moderate spatial resolution (1 km) from remotely sensed snow data and multiple optimized environmental factors: a case study over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 13(4), 657. <https://doi.org/10.3390/rs13040657>
- Xiao, X., & Liang, S. (2024). Assessment of snow cover mapping algorithms from Landsat surface reflectance data and application to automated snowline delineation. *Remote Sensing of Environment*, 307, 114163. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114163>
- Yarahmadi, D., Fathnia, A., & 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 Applied Researches in Geographical Sciences*, 20(56), 193-204. [In Persian] <https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.193>
- Yousefizadeh, R., Sehatkashani, S., Gholamnia, K., Maleki, A., & Einali, G. (2022). Investigating the trend of changes and snow prediction in Alborz heights of Mazandaran province in winter, using satellite image processing. *Journal of Climate Research*, 1400(48), 157-175. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_147865.html?lang=en