

Analysis of long-term changes in snow cover and snow water equivalent using MODIS satellite data and the FLDAS system in Razavi Khorasan Province

ABSTRACT

Snow cover area (SCA) and snow water equivalent (SWE) are critical variables for understanding water resource status and river flows from snowmelt in mountainous regions. However, accurate estimation of the spatial and temporal variations of these variables remains a major challenge in hydrological and climatic studies due to the scarcity of ground-based observations and the inherent limitations of satellite data. This study investigated the long-term spatial and temporal variations of SCA and SWE over the 2000–2025 period in Razavi Khorasan Province, Iran, utilizing MODIS satellite data and the FLDAS in the Google Earth Engine (GEE). To evaluate the accuracy of the results, the estimated data were validated against field measurements from snow-gauge stations. The satellite-derived estimates were evaluated using statistical metrics, including linear correlation (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and bias. Furthermore, the SWE-to-precipitation ratio (SPR) index was calculated to investigate long-term changes in the contribution of snowfall to total precipitation. The annual Standardized Precipitation Index (SPI) was also employed to analyze the relationship between SCA and SWE, with drought and wet events. The results indicated that the maximum snow cover areas occurred in 2005 and 2008, 10775.7 km² and 6697.7 km², respectively. Conversely, the minimum snow cover area was recorded in 2018 at 632.4 km². The overall trend of both SCA and SWE in the study area was downward. The negative slope of trend revealed a significant annual decrease of approximately -31.9 km²/year in snow cover area (at the 5% statistical significance level). The long-term SPR index also exhibited a decreasing trend with a slope of -0.0004/year, indicating a declining share of snowfall relative to total precipitation in the region. Overall, the persistence of this declining trend and the gradual reduction in strategic snow storage, even at a low rate, may affect snow reserves, snowmelt-driven runoff, and the management of snow-dependent water resources in the region over longer time scales.

Keywords: *Snow Cover Area (SCA), Snow Water Equivalent (SWE), FLDAS, SWE-to-precipitation ratio (SPR).*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Snow is a dynamic natural element and a vital component of the hydrological cycle. In arid and semi-arid regions, water availability during dry seasons heavily depends on mountain snow storages. Monitoring snow dynamics in mountainous watersheds via traditional field measurement methods is highly challenging due to complex topography and data scarcity. Satellite remote sensing has emerged as an effective and practical tool for the monitoring and assessment of mountainous watersheds. The Snow Water Equivalent to Precipitation Ratio (SPR) represents the ratio of snow water equivalent (SWE) to total precipitation during the cold season. The SPR provides a more comprehensive indicator for evaluating snow storage efficiency and the actual contribution of snow to water resources in mountainous regions. In contrast, traditional indices such as S/P and S/(S+R) express only the proportion of solid precipitation relative to total precipitation and are primarily used to assess precipitation phase transitions (snow versus rain) and the impacts of climate warming on precipitation type.

Method

This study investigates the long-term changes in snow cover area and snow water equivalent (SWE) in Razavi Khorasan Province using MODIS satellite imagery and the FLDAS system (Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System). To delineate snow-covered areas, the Normalized Difference Snow Index (NDSI) was calculated. By applying a threshold value of 0.5, monthly and annual raster maps of snow cover area were generated. The FLDAS-estimated SWE data were evaluated against in-situ SWE measurements using statistical metrics, including the Pearson correlation coefficient, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Bias. To investigate long-term trends in the partitioning of precipitation into snowfall and rainfall, the SWE-to-Precipitation Ratio (SPR) was calculated for the study area. In addition, the Standardized Precipitation Index (SPI) was used to monitor meteorological drought conditions and to examine their relationship with snow cover area and snow water equivalent (SWE).

Result

The maximum annual snow cover area was recorded in 2005, 2008, and 2012, with areas of 10775.7, 6697.7, and 7745.7 km², respectively. The minimum snow cover area was observed in 2018 (632.4 km²). Trend analysis showed a significant decline ($p = 0.03$) in snow cover area over the study period, with a slope of $-31.9 \text{ km}^2 \text{ year}^{-1}$. The results revealed a strong and statistically significant correlation between the annual snow cover variations of the Binalud and Hezar Masjed mountain ranges ($r = 0.95$, $P < 0.01$), indicating that they exhibited similar temporal patterns throughout the study period. The SWE time series exhibited a decreasing trend during 2000–2025; however, the trend was not statistically significant. Similarly, the SWE-to-precipitation ratio (SPR) showed a negative trend with a slope of $-0.0004 \text{ year}^{-1}$. This trend was not statistically significant ($p = 0.34$), and the coefficient of determination was low ($R^2 = 0.01$). To examine the relationship between snow conditions and drought, annual SPI values from the Bolghor and Dizbadeolya stations were analyzed. Moderate to severe drought conditions were identified during 2000, 2010, 2016, 2017, and 2020 to 2024. These periods coincided with lower snow cover area and SWE values. The accuracy of SWE data of FLDAS was evaluated against observations from the Karimabad and Ferizi snow stations using correlation coefficient (R), RMSE, MAE, and Bias statistics. The results showed good agreement between FLDAS and ground observations, with correlation coefficients more than 0.79. The RMSE values were 11.1 mm and 6.8 mm for the Karimabad and Ferizi stations, respectively, while negative Bias values at both stations indicated an underestimation of SWE by FLDAS.

Conclusion

This study investigated the long-term variations in snow cover area (SCA), snow water equivalent (SWE), and the snow water equivalent-to-precipitation ratio (SPR) under meteorological drought conditions in Razavi Khorasan Province during 2000–2025. The highest annual snow cover areas were observed in 2005, 2008, and 2012, whereas the minimum value occurred in 2018. The annual snow cover dynamics extracted for the Binalud and Hezar Masjed mountain ranges showed a strong and statistically significant correlation ($r = 0.95$, $P < 0.01$). The long-term decline in SPR indicates a gradual reduction in the contribution of snow to total cold-season precipitation, suggesting a progressive shift from snowfall toward rainfall under a warming climate. The validation results demonstrated that FLDAS provides reliable estimates of SWE ($R > 0.79$) despite a systematic underestimation associated with the coarse spatial resolution of the model over complex mountainous terrain. Therefore, FLDAS can be considered a useful dataset for monitoring snow variables in data-scarce mountainous regions, although bias correction is recommended for applications requiring higher accuracy.

تحلیل تغییرات بلندمدت پوشش برف و آب معادل برف با استفاده داده‌های ماهواره‌ای MODIS و سامانه FLDAS در استان خراسان رضوی

چکیده

سطح پوشش برف و آب معادل برف از متغیرهای بسیار مهم در شناخت وضعیت منابع آب و جریان‌های رودخانه‌ای ناشی از ذوب برف در مناطق کوهستانی است. با این حال، برآورد دقیق تغییرات مکانی و زمانی این متغیرها به دلیل کمبود مشاهدات زمینی و محدودیت‌های ذاتی داده‌های ماهواره‌ای، همچنان یکی از چالش‌های مهم مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیمی محسوب می‌شود. در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات بلند مدت مکانی و زمانی سطح پوشش برف و آب معادل برف (SWE) طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ در خراسان رضوی از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و سامانه FLDAS در محیط تحت وب Google Earth Engine استفاده گردید. به منظور ارزیابی دقت نتایج، داده‌های برآورد شده با اندازه‌گیری‌های میدانی ایستگاه‌های برف‌سنجی صحت‌سنجی شدند. نتایج برآوردی داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از شاخص‌های همبستگی خطی (Correlation)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و بایاس (Bias) مقایسه و ارزیابی گردید. همچنین جهت بررسی تغییرات بلندمدت سهم بارش برف از کل بارش (بارش برف و باران) در منطقه مورد مطالعه، شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) محاسبه گردید. از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI سالانه نیز برای بررسی ارتباط سطح پوشش برف و آب معادل برف با وقایع خشکسالی و ترسالی استفاده گردید. نتایج نشان داد که بیشترین مساحت سطح پوشش برف متعلق به سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ با مساحت $10775/7$ کیلومتر مربع و $6697/7$ کیلومتر مربع بوده است. کمترین سطح پوشش برف مربوط به سال ۲۰۱۸ با مساحت $632/4$ کیلومتر مربع بوده است. روند کلی پوشش برف و آب معادل برف (SWE) در استان کاهش یافته و شیب منفی روند بیان می‌کند که به‌طور متوسط سالانه حدود $31/9 \text{ Km}^2/\text{year}$ - از سطح پوشش برف به‌طور معنی‌دار (در سطح آماری ۵ درصد) کاسته شده است. شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) در بلندمدت دارای روند کاهشی با شیب $-0/004$ - در سال بوده است که نشان دهنده کاهش سهم بارش‌های برف نسبت به بارش در منطقه می‌باشد. به‌طور کلی، تداوم این شیب نزولی و کاهش ذخایر استراتژیک برف در منطقه، حتی با نرخ اندک، می‌تواند در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر، بر میزان ذخایر برفی، رواناب ناشی از ذوب برف و مدیریت منابع آب وابسته به برف در منطقه اثرگذار باشد.

کلمات کلیدی: آب معادل برف (SWE)، سطح پوشش برف، سامانه FLDAS، شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR)

مقدمه

برف یک عنصر طبیعی پویا و یکی از مؤلفه‌های مهم در چرخه هیدرولوژیکی است که امروزه تغییرات اقلیمی تاثیر چشمگیری در الگوهای بارش برف و فصل بارش برف گذاشته است. این تغییر الگوی ریزش‌های جوی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که وابستگی شدیدی به منابع آب دارند و ذخایر برفی نقش مهمی در تامین آب به ویژه در فصول خشک دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (صفریان، ۱۴۰۴). تغییرات در سطح پوشش برف بر روی زمان و میزان دسترسی به منابع آب شیرین برای ساکنان مناطق پایین‌دست تأثیر می‌گذارد. سطح تحت پوشش برف یکی از پارامترهای مهم در بررسی الگوی تغییرات بارش برف در هر منطقه است. رویکردهای مختلفی برای اندازه‌گیری تغییرات در میزان و زمان بارش برف، از جمله مشاهدات ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های زمینی، اتخاذ شده است (Dong, 2018). با توجه به مشکلات و سختی پایش و اندازه‌گیری میزان سطح تحت پوشش برف در حوزه‌های آبخیز کوهستانی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری کارآمد و کاربردی برای پایش و ارزیابی‌ها در حوزه‌های آبخیز مطرح شده‌اند (میریعیوب زاده و قنبرپور، ۱۳۸۹). امروزه تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده‌های مختلفی از جمله Landsat، MODIS^۲، NOAA^۳ برای پایش ویژگی‌های برف توسعه یافته‌اند (Seydi Shahivandi et al., ۲۰۲۵). از میان روش‌ها و منابع موجود، داده‌های ماهواره‌ای MODIS به دلیل پوشش گسترده، پیوستگی زمانی و قابلیت تفکیک مناسب، ابزاری کارآمد برای پایش سطح پوشش برف به‌شمار می‌روند (Tasdigian, & Rahimzadegan, 2017; Tang et al., 2022; Khan & Li, 2025; Moradi et al., 2025).

سطح پوشش برف دارای تغییرات مکانی و زمانی زیادی در هر منطقه است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تغییرات پوشش برف از نظر زمانی و مکانی، تحت تأثیر عوامل اقلیمی و توپوگرافی، الگوهای متفاوتی دارد. صفریان (۱۴۰۴) با بررسی پوشش برف در رشته‌کوه البرز در ماه‌های سرد سال طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان دادند که بیشترین پوشش برف در ماه‌های ژانویه و فوریه و در سال ۲۰۰۸ بوده است. امامی و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از تصاویر Landsat8 برای یک دوره ۵ ساله (۲۰۱۹-۲۰۲۴) نقش مهم ارتفاع و شیب را در توزیع پوشش برف حوزه کارون شمالی نشان دادند. عسکری سراسکانرود و مدیرزاده (۱۳۹۹) به بررسی سطح پوشش برف با استفاده از شاخص NDSI در شهرستان اردبیل و سرعین با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ پرداختند. نتایج نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای قابلیت مناسبی در برآورد سطح پوشش برف در منطقه داشته‌اند. میرموسوی و صبور (۱۳۹۳) در بررسی تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه‌ی شمال غرب ایران نشان دادند که بیشترین مساحت پوشش برف مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بوده است. Notarnicola (۲۰۲۰) در بررسی جامعی درخصوص تغییرات سطح پوشش برف در مقیاس جهانی در ۱۸ سال گذشته (۲۰۰۰-۲۰۱۸) نشان داد که ۷۸ درصد از مناطق مطالعه شده دارای روند کاهشی در سطح پوشش برف بودند. مطالعات مشابهی در ارتباط با تغییرات سطح پوشش برف برای مناطق کوهستانی مختلفی در جهان انجام شده است (Smith and Tang et al., 2017; Bookhagen, 2018; Wang et al., 2018). Tang و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی سطح پوشش برف (SCE^۴) و روزهای پوشیده از برف (SCD^۵) را از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ در منطقه کوهستانی آسیا نشان دادند که SCD و SCE روند کلی کاهشی را نشان می‌دهد. Bormann و همکاران (۲۰۱۸) و Hammond و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای در مورد پوشش برف در مقیاس جهانی انجام دادند. آنها روند تغییرات ترکیبی از سطح پوشش برف منطقه‌ای را ارائه دادند. به عنوان مثال، بر اساس مجموعه داده‌های ۱۶ ساله MODIS، آنها نتیجه گرفتند که در قره قروم روند مثبتی وجود دارد، در حالی که روندهای نزولی در مناطق کوهستانی آسیا مشاهده شده است. این رفتارهای مکانی متفاوت، ناشی از پیچیدگی‌های اقلیمی محلی و توپوگرافی مناطق است.

۱. Geostationary Operational Environmental Satellites

۲. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

۳. National Oceanic and Atmospheric Administration

۴. Snow-covered Extent

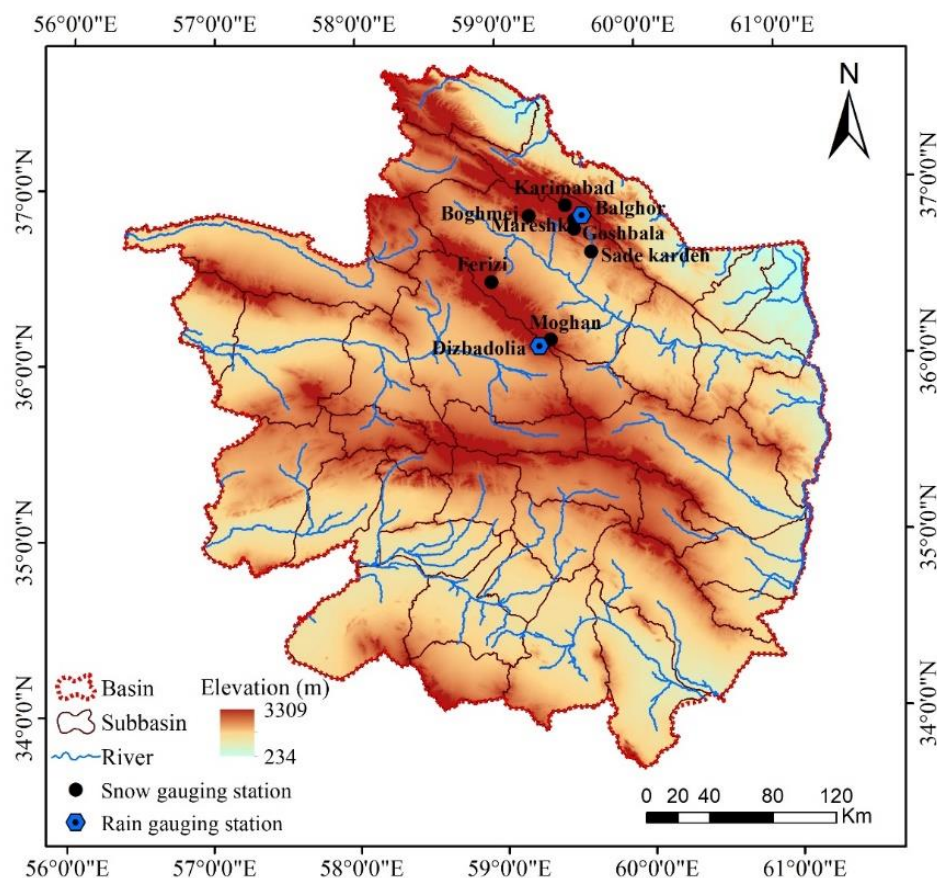
۵. Snow-covered Days

مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات اقلیمی، همواره یکی از چالش‌های اساسی در علوم هیدرولوژی، منابع طبیعی و محیط زیست بوده است (Kazemzadeh et al., 2022). در این مناطق، بارش‌های زمستانی به‌صورت برف، نقش حیاتی در ذخیره‌سازی آب و تغذیه سفره‌های زیرزمینی و جریان رودخانه‌ها در فصول خشک ایفا می‌کند. با این حال، سنجش دقیق سهم و تأثیر برف در چرخه آب، به‌خصوص در تحلیل‌های بلندمدت، با پیچیدگی‌های فراوانی همراه است. روش مورد استفاده در پژوهش حاضر، معرفی و به‌کارگیری شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) به همراه پایش و ارزیابی تغییرات بلند مدت سطح پوشش برف است. این شاخص، با محاسبه نسبت مجموع آب معادل برف (SWE) به مجموع بارش در ماه‌های فصل سرد (دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل)، امکان کمی‌سازی دقیق سهم بارش برف از کل بارش را فراهم می‌آورد. در روش‌های پیشین مانند شاخص S/P یا $S/(S+R)$ نسبت بارش جامد به کل بارش را بیان می‌کنند و عمدتاً برای بررسی تغییر فاز بارش (باران به برف) و اثر گرمایش اقلیم بر نوع بارش استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها تنها اطلاعاتی درباره سهم برف از کل بارش ارائه می‌دهند و قادر به نمایش میزان واقعی ذخیره آب موجود در برف نیستند (Huntington et al., 2004; Zhu et al., 2017; Dong and Ming, 2022, Su et al., 2022). در مقابل، شاخص SPR نسبت آب معادل برف (SWE) به بارش در فصل سرد را بیان می‌کند، بنابراین علاوه بر وقوع بارش برفی، فرآیندهای تجمع، تراکم، ذوب و ماندگاری برف را نیز به‌صورت غیرمستقیم در خود منعکس می‌کند. همچنین این شاخص برای بررسی تغییرات بلندمدت ذخیره برف در شرایط تغییر اقلیم کاربرد بیشتری نسبت به نسبت‌های کلاسیک S/P دارد. بنابراین، این پژوهش با تکیه بر این شاخص، روند تغییرات فاز بارش را در استان خراسان رضوی در یک دوره زمانی بلندمدت ۲۰۰۰-۲۰۲۵ مورد واکاوی قرار داده است. هدف اصلی، پایش و ارزیابی بلندمدت تغییرات سطح پوشش برف و سهم برف در رژیم بارش منطقه تحت تأثیر خشکسالی هواشناسی و تحلیل پیامدهای احتمالی این تغییرات بر مدیریت منابع آب و اکوسیستم‌های وابسته است. نتایج این پژوهش درک دقیق‌تری از پویایی‌های اقلیمی، به‌ویژه سهم برف در منابع آب و رفتار هیدرولوژیکی منطقه، ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی علمی برای تدوین راهبردهای سازگاری و مدیریت منابع آب در شرایط آینده متغیر اقلیمی باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی با وسعت حدود ۱۱۹ هزار کیلومتر مربع در شمال شرق کشور واقع گردیده است. این استان بین مدارهای ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. میانگین بلندمدت ۳۰ ساله بارش در این استان ۱۸۷/۱ میلی‌متر و میانگین بلندمدت دما ۲۰ سانتیگراد است. اقلیم غالب استان خراسان رضوی بر اساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی، در زمره اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. از نظر توپوگرافی، این استان دارای منطقه کوهستانی و دشتی است. رشته‌کوه‌های اصلی استان شامل ارتفاعات هزار مسجد در شمال و شمال شرق و رشته‌کوه بینالود در مرکز و شمال غرب هستند که به عنوان مهم‌ترین کانون‌های برف‌گیر و سازنده‌های هیدرولوژیکی منطقه شناخته می‌شوند. بلندترین نقطه استان در قله بینالود با ارتفاع ۳۳۳۹ متر و پست‌ترین آن در دشت سرخس با ارتفاع ۲۹۹ متر از سطح دریا قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های برف‌سنجی و باران‌سنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های برف‌سنجی و باران‌سنجی در استان خراسان رضوی

روش انجام پژوهش

داده‌های سنجش از دور: در این پژوهش برای استخراج سطح پوشش برف از داده‌های ماهواره‌ای MODIS (محصول MOD10A1) و سامانه گوگل ارث انجین (GEE) با دقت مکانی ۵۰۰ متر در ماه‌های دسامبر تا آوریل (آذر تا اردیبهشت) در بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۰ استفاده گردید. برای برآورد آب معادل برف (SWE) داده‌های بارش ماهانه به ترتیب از داده‌های (SWE_inst) و (Rainf_f_tavg) سامانه‌ی FLDAS^۳ ارائه شده در سامانه گوگل ارث انجین GEE استفاده گردید. FLDAS یک نمونه سفارشی از سیستم اطلاعات زمینی ناسا (LIS) است و با استفاده از سیستم (LIS) و ترکیب مشاهدات میدانی پراکنده و داده‌های ماهواره‌ای، مجموعه‌ای از داده‌های مربوط به تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، بارش، برف و غیره تولید می‌کند. مجموعه داده‌های FLDAS در نسخه‌های مختلف با مقیاس زمانی روزانه و ماهانه و با قدرت تفکیک مکانی $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ تا $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ درجه تولید می‌شوند و در مقیاس روزانه از اکتبر سال ۲۰۰۰ تا کنون در دسترس هستند (Slinski & Sarmiento., 2023). دارا بودن پوشش زمانی و قدرت تفکیک مکانی مناسب داده‌های FLDAS سبب شده که کارایی مناسبی برای مطالعات اقلیمی و بلندمدت در مقیاس منطقه‌ای مولفه‌های

۱. Google Earth Engine

۲. Snow Water Equivalent (SWE)

۳. Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System (FLDAS)

۴. NASA Land Information System (LIS)

هیدرولوژیکی از جمله برف باشند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های مشاهده‌ای: جهت ارزیابی داده‌های برآوردی سامانه‌ی FLDAS از داده‌های میدانی ایستگاه‌های برف سنجی (In-situ) شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی استفاده گردید. خراسان رضوی دارای ۷ ایستگاه فعال برف سنجی در محدوده مطالعاتی مشهد است که مشخصات ایستگاه‌های برف سنجی در جدول ۲ و شکل ۱ ارائه شده است. داده‌های برف سنجی ایستگاه‌ها به صورت ماهانه است و در هر واقعه برف که در استان رخ داده نمونه‌برداری برف انجام شده است. به منظور بررسی آماری داده‌های موجود ایستگاه‌های برف سنجی استان، مقادیر میانگین، حداقل (Min)، حداکثر (Max)، ضریب تغییرات (CV) و انحراف معیار (Std) محاسبه گردید. با بررسی داده‌های ایستگاه‌های برف سنجی از نظر ضرایب آماری و طول دوره آماری، دو ایستگاه فریزی و کریم آباد طول دوره آماری بهتری (۱۳۸۵-۱۴۰۴) نسبت به سایر ایستگاه‌ها داشتند و همچنین به پهنه‌های برف گیر منطقه نیز نزدیک بودند و جهت ارزیابی داده‌های FLDAS استفاده گردید.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش و دقت مکانی و زمانی آنها

Date set	Description	Unit	Spatial resolution	Temporal resolution	Source
DEM	SRTM	-	30 m	-	GEE
Snow cover_NDSI	Snow cover	-	500 m	Monthly	MODIS
SWE_inst	Snow Water Equivalent (SWE)	Kg/m ²	0.1×0.1 Degree	Monthly	NASA/FLDAS/NOAH01/C/GL/M/V001
Rainf_f_tavg	Total precipitation rate	Kg/m ² /s	0.1×0.1 Degree	Monthly	NASA/FLDAS/NOAH01/C/GL/M/V001
In-situ measurement	Snow gauge	mm	Station based - Point	Monthly	شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی
In-situ measurement	Rain gauge	mm	Station based - Point	Monthly	شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های برف سنجی و باران سنجی خراسان رضوی

نام	محدوده مطالعاتی	ارتفاع (متر)	X	Y	شهر	روستا
بقمج		۱۹۷۹	۷۰۰۲۲۹	۴۰۷۷۹۸۷	چناران	بقمج
فریزی		۱۷۱۸	۶۷۶۲۸۷	۴۰۳۹۵۳۶	گلمکان	فریزی
کریم آباد		۲۶۸۳	۷۲۱۲۵۹	۴۰۸۶۸۴۷	مشهد	کریم آباد
گوش		۱۹۰۹	۷۲۷۰۶۷	۴۰۷۱۹۷۳	مشهد	گوش
مغان	مشهد	۲۱۸۰	۷۱۳۱۲۵	۴۰۰۰۹۲۲	مشهد	مغان
مارشک		۱۹۴۶	۷۲۶۸۷۶	۴۰۷۷۲۸۷	مشهد	مارشک
سد کارده		۱۳۷۱	۷۳۸۰۸۰	۴۰۵۷۰۱۱	مشهد	سد کارده
بلغور		۱۹۵۰	۷۳۱۸۴۳	۴۰۸۰۵۰۷	مشهد	کلاته نوری
دیزباد علیا	نیشابور	۱۹۶۶	۷۰۵۵۳۷	۳۹۹۷۶۶۸	نیشابور	دیزباد علیا

سطح پوشش برف

به منظور بررسی تغییرات بلندمدت سطح پوشش برف در استان خراسان رضوی، از تصاویر ماهانه محصول پوشش برف ماهواره MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ استفاده شد. با توجه به اینکه بخش عمده بارش‌های برفی استان در فصل سرد رخ می‌دهد، تصاویر مربوط به ماه‌های مصادف با فصل برفی در هر سال میلادی (January, February, March, April, and December) انتخاب و مورد پردازش قرار گرفت. برای تعیین نواحی پوشیده از برف، شاخص تفاضل نرمال شده برف (NDSI)

محاسبه گردید. به علت انعکاس پایین برف در باندهای مادون قرمز و انعکاس بالای آن در کانال‌های مرئی این شاخص به‌خوبی می‌تواند تمایز پهنه‌ی برف‌گیر از سایر سطوح را انجام دهد. چگونگی محاسبه این شاخص نرمال شده توسط رابطه‌ی (۱) قابل بیان است:

$$NDSI = \frac{Band_4 - Band_6}{Band_4 + Band_6} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

Band 4 بازتاب باند ۴ (Green Band) و B6 بازتاب باند ۶ (باند مادون قرمز کوتاه‌موج - SWIR^۱) است. مقادیر بالای NDSI نشان‌دهنده پوشش برفی است. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که آستانه‌ای بین ۰/۴ تا ۰/۵ برای تفکیک پهنه برف مناسب است (Hall et al, 2002).

ابتدا بر اساس شاخص NDSI، نقشه‌های دودویی پوشش برف تولید گردید، به‌طوری‌که پیکسل‌های با $NDSI \geq 0.5$ به‌عنوان پیکسل‌های برفی (مقدار ۱) و سایر پیکسل‌ها به‌عنوان مناطق فاقد پوشش برف (مقدار ۰) طبقه‌بندی شدند. سپس از نقشه‌های دودویی ماهانه، میانگین سالانه پوشش برف برای هر سال محاسبه شد تا اثر نوسانات کوتاه‌مدت ماهانه کاهش یابد. در ادامه، تعداد پیکسل‌های برفی موجود در نقشه میانگین سالانه استخراج شد و مساحت سالانه سطح پوشش برف محاسبه گردید. در نهایت، از سری زمانی مساحت سالانه سطح پوشش برف برای تحلیل روند به روش من - کندال و بررسی تغییرات بلندمدت استفاده شد.

به‌منظور بررسی الگوی تغییرات سطح پوشش برف در مهم‌ترین نواحی برف‌گیر استان خراسان رضوی، تحلیل جداگانه‌ای برای دو رشته‌کوه بینالود و هزارمسجد انجام شد. بدین منظور، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری (DEM)، نواحی با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر در هر یک از این دو رشته‌کوه استخراج گردید. سپس نقشه‌های سالانه سطح پوشش برف حاصل از داده‌های MODIS (با آستانه $NDSI \geq 0.5$) برای این نواحی استخراج و مساحت سالانه سطح پوشش برف برای هر رشته‌کوه محاسبه شد. در ادامه، روند تغییرات زمانی سطح پوشش برف هر منطقه با استفاده از آزمون من - کندال (Mann, 1945; Kendall, 1975) و برآوردگر شیب سن مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، به‌منظور بررسی میزان همزمانی تغییرات سطح پوشش برف در دو رشته‌کوه، ضریب همبستگی پیرسون بین سری‌های زمانی سالانه آن‌ها محاسبه شد.

نسبت آب معادل برف (SWE) به بارش (Precipitation)

به‌منظور بررسی تغییرات بلندمدت سهم بارش برف از بارش باران (تغییر فاز بارش از جامد به مایع) در منطقه مورد مطالعه، شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) تعریف و محاسبه شد. این شاخص به‌عنوان ابزاری برای کمی‌سازی سهم نسبی آب معادل برف از کل بارش، امکان ارزیابی نوسانات و روند تغییرات فاز بارش در دوره‌های زمانی بلندمدت را فراهم می‌آورد. برای محاسبه این شاخص، داده‌های مجموع آب معادل برف (SWE) و بارش (Pre) به دست آمده از سامانه FLDAS برای ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل در یک بازه زمانی بلندمدت ۲۰۲۵-۲۰۰۰ استخراج گردید. رابطه SPR برای هر سال به‌صورت رابطه ۲ تعریف گردید.

$$SPR = \frac{\sum (Dec. Jan. Feb. Apr) SWE_{i,m}}{\sum (Dec. Jan. Feb. Apr) Pre_{i,m}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن i بیانگر سال مورد نظر و m بیانگر ماه‌های منتخب است. با محاسبه سری زمانی سالانه این شاخص، روند تغییرات سهم آب معادل برف از بارش در دوره مورد مطالعه با استفاده از آزمون من-کندال (Mann, 1945; Kendall, 1975) بررسی شد تا تغییرات فاز بارش به صورت آماری و در سطح معنی‌داری ۵ درصد در منطقه مطالعه ارزیابی شود.

تحلیل ارتباط مولفه‌های برف با خشکسالی

به منظور پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی در منطقه مورد مطالعه، و بررسی ارتباط آن با سطح پوشش برف و آب معادل برف (SWE) از شاخص استاندارد شده بارش ۱۲ ماهه (SPI) در ایستگاه‌های باران‌سنجی بلغور و دیزباد علیاد (به تاریخ میلادی) طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۴ که از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ گردید استفاده شد. دلیل انتخاب این ایستگاه‌ها نزدیکی به پهنه‌های برف‌گیر استان در ارتفاعات هزار مسجد و ارتفاعات بینالود جهت پایش تغییرات سطح پوشش برف و آب معادل برف (SWE) می‌باشد. **شاخص استاندارد شده بارش (SPI)**: این شاخص که نخستین بار توسط مک‌کی و همکاران (McKee et al., 1993) توسعه یافت، بر اساس احتمال وقوع بارش در هر گام زمانی دلخواه استوار است. در این مطالعه از شاخص SPI ۱۲ ماهه که از رابطه زیر محاسبه می‌شود استفاده گردید.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad \text{رابطه ۳}$$

P_i مقدار بارش در سال مورد نظر (میلی‌متر)، $\bar{P}$ میانگین بارش طولانی‌مدت منطقه در آن گام زمانی (میلی‌متر) و σ انحراف معیار بارش طولانی‌مدت منطقه است. مقادیر مثبت این شاخص نشان‌دهنده دوره‌های مرطوب (ترسالی) و مقادیر منفی آن گویای دوره‌های خشک (خشکسالی) هستند.

مقایسه و ارزیابی شاخص‌های آماری خطا

ارزیابی کیفیت داده‌ها و محاسبه ضرایب خطا، برای شناسایی عدم قطعیت و افزایش قابلیت اعتماد نتایج، به‌ویژه در داده‌های ناقص یا دوره‌های آماری کوتاه، ضروری است. جهت ارزیابی صحت داده‌های برآوردی توسط داده‌های سامانه‌ی FLDAS، برای هر یک از اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی (In-situ) که به صورت ماهانه است، مقدار آب معادل برف (SWE) داده‌های سامانه‌ی FLDAS، همان ماه، از طریق استخراج مقدار پیکسلی که ایستگاه در آن قرار گرفته است، بدست آمد. سپس، این داده‌های جفت‌شده جهت تحلیل خطا مورد مقایسه قرار گرفتند. داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و FLDAS که در ماه‌های منطبق و مکان‌های یکسان ثبت شده بودند، تطبیق داده شدند. در نهایت، عملکرد تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از شاخص‌های همبستگی خطی (Correlation) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و بایاس (Bias) ارزیابی گردید.

$$Correlation = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \bar{O}| \quad \text{رابطه ۶}$$

۱. Standardized Precipitation Index (SPI)

۲. Root Mean Square Error

۳. Mean Absolute Error

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - O_i) \quad \text{رابطه ۷}$$

Y_i یعنی اندازه‌گیری‌های مشاهداتی (In-situ)، O_i مقادیر برآوردی، $\bar{Y}$ میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر برآوردی و n اندیس مشاهدات و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

تحلیل آماری داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی و سامانه FLDAS

نتایج بررسی آماری داده‌های موجود ایستگاه‌های برف‌سنجی استان، شامل مقادیر میانگین، حداقل، حداکثر، ضریب تغییرات و انحراف معیار در طول دوره ۱۴۰۴-۱۳۸۵ در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس یافته‌های این جدول، میانگین آب معادل برف (SWE) به ترتیب در ایستگاه کریم‌آباد و فریزی برابر با ۴۳/۶ میلی‌متر و ۱۹/۷ میلی‌متر می‌باشد. در همین راستا، میانگین داده‌های برآورد شده توسط سامانه FLDAS برابر با ۱۵/۳ میلی‌متر می‌باشد که نشان‌دهنده نزدیکی مقادیر حجمی این محصول با مشاهدات ایستگاهی به‌ویژه در ایستگاه فریزی است. مقدار انحراف معیار برای ایستگاه‌های کریم‌آباد، فریزی و داده‌های سامانه FLDAS به ترتیب برابر با ۳۶/۳، ۱۵/۶ و ۱۷/۱ میلی‌متر به‌دست آمده است. علاوه بر این، بررسی ضریب تغییرات (CV) نشان می‌دهد که بالاترین میزان پراکندگی نسبی داده‌ها مربوط به خروجی FLDAS با مقدار ۱۴۰/۲ درصد است. این موضوع نشان‌دهنده حساسیت بالای داده‌های سامانه FLDAS به تغییرات حدی و نوسانات شدید بین‌سالی در اقلیم نیمه‌خشک منطقه است، جایی که مقادیر حداقل نزدیک به صفر (۰/۲ میلی‌متر) و مقادیر حداکثر انباشت برف بسیار چشمگیر (۱۸۰/۶ میلی‌متر) در یک دوره زمانی تجربه می‌شوند.

جدول ۳. ضرایب آماری مقدار آب معادل برف (SWE) برحسب میلی‌متر در ایستگاه‌های برف‌سنجی و تصاویر FLDAS

ایستگاه	Mean	Max	Min	CV (%)	Std
کریم‌آباد	۴۳/۶	۱۶۰	۲	۸۳/۲	۳۶/۳
فریزی	۱۹/۷	۶۳	۱	۷۹/۲	۱۵/۶
FLDAS	۱۵/۳	۱۸۰/۶	۰/۲	۱۴۰/۲	۱۷/۱

نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که سامانه FLDAS تمایل ساختاری به کم‌برآوردی متغیر آب معادل برف (SWE) در منطقه مورد مطالعه دارد. این رفتار سیستماتیک مدل باعث شده است که برآوردهای آن در ایستگاه فریزی (با ارتفاع ۱۷۱۸ متر) نسبت به ایستگاه مرتفع کریم‌آباد (با ارتفاع ۲۶۸۳ متر) انطباق بهتری را با داده‌های زمینی نشان دهد. در واقع، از آنجا که مدل مقادیر SWE را کمتر از واقعیت بازسازی می‌کند، خروجی‌های آن به طور طبیعی به مقادیر کمتر و رژیم برف سبک‌تر در ایستگاه پایین‌دست (فریزی) نزدیک‌تر شده و عملکرد بهتری را ثبت کرده است. مطالعات متعددی در سراسر جهان تایید کرده‌اند که محصولات خانواده^۲ LDAS^۲ (مانند^۳ GLDAS^۳ و FLDAS) به دلیل عدم قطعیت در گرادیان بارش-ارتفاع و همچنین ضعف در شبیه‌سازی دقیق فرایندهای ذوب و فشردن برف، مقادیر SWE را در مناطق کوهستانی مرتفع کمتر از واقعیت تخمین می‌زنند (Caiserman et al., 2026; Wrzesien et al., 2019).

تحلیل تغییرات زمانی-مکانی سطح پوشش برف

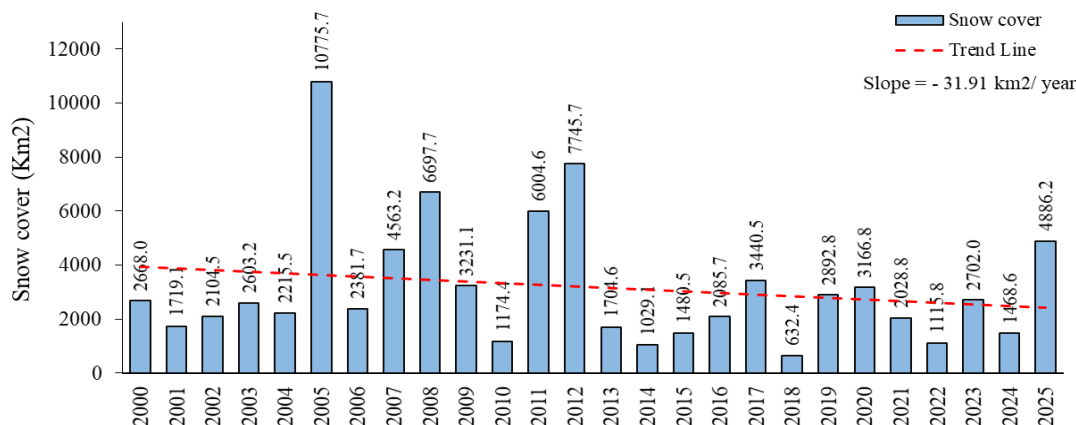
در این بخش به بررسی تغییرات سطح پوشش برف در منطقه مورد مطالعه طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ پرداخته شده و در شکل ۲ ارائه است. نتایج نشان داد که بیشترین مساحت پوشش برف مربوط به سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ با مساحت ۱۰۷۷۵/۷ کیلومتر مربع، ۶۶۹۷/۷ کیلومتر مربع و ۷۷۴۵/۷ کیلومتر مربع و کمترین پوشش برف مربوط به سال ۲۰۱۸ با مساحت ۶۳۲/۴ کیلومتر مربع بوده است.

۱. Underestimation

۲. Land Data Assimilation System

۳. Global Land Data Assimilation System

همچنین بیشترین سطح پوشش برف در منطقه در ماه‌های ژانویه و فوریه قرار دارند که بررسی داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی منطقه و تمرکز بارش برف در فصل زمستان نیز این مورد تایید می‌کند. در مطالعات مختلفی نشان داده شده که سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ کشور ایران به‌ویژه شمال شرق کشور تحت تاثیر ورود سامانه‌های بارشی دینامیکی سرد و ورود زبانه پرفشار سیبری زمستان‌های سختی را تجربه کرده است (لشکری، ۱۳۸۷، عساکره و همکاران، ۱۳۹۵، عساکره و شاهبایی کوتنایی، ۱۳۹۶ Parvin et al., 2026) به‌طوریکه در سال ۲۰۰۸ (دی و بهمن ماه ۱۳۸۶) خراسان رضوی با ۴۳ روز بیشترین سهم از روزهای سرد با دماهای حداقل بحرانی را دارا بوده است که ناشی از گسترش فرابر سیبری بر روی خراسان بوده است (عزیزی و همکاران، ۱۳۸۸؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۱). یافته‌های این تحقیق در خصوص معرفی سال ۲۰۰۸ به عنوان سالی با بیشترین مساحت پوشش برف، کاملاً با نتایج Ghasemifar و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد. آن‌ها با واکاوی داده‌های ماهواره MODIS (محصول MOD10A2) در بازه ۲۰۱۵-۲۰۰۱ در کل فلات ایران، سال ۲۰۰۸ را به عنوان گسترده‌ترین سال از نظر سطح پوشش برف معرفی کردند. شکل ۳ نقشه‌های مربوط به تغییرات سطح پوشش برف در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۵ را نشان می‌دهد که به دلیل تعداد زیاد تصاویر، فقط تصاویر سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۵ ارائه شده است. باتوجه به شکل مناطقی که بیشترین سطح پوشش برف را دارند مربوط به ارتفاعات هزار مسجد و کلات نادری در شمال و شمال شرق استان، ارتفاعات رشته کوه‌های بینالود در شمال نیشابور و ارتفاعات دشت رخ و تربت جام می‌باشد. بررسی سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای MODIS نشان داد که روند کلی پوشش برف در استان کاهشی معنی‌دار ($P = 0/03$) است و شیب منفی روند بیان می‌کند که به‌طور متوسط سالانه حدود $-31/9 \text{ km}^2/\text{year}$ از سطح پوشش برف کاسته شده است. این روند کاهشی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴ به‌صورت بارز نمایان گردیده است. این افت مداوم در پهنه‌های برف‌گیر نشان می‌دهد که افزایش موقت و نوسانی پوشش برف در سال‌های خاص (مانند ۲۰۰۵، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۵) نتوانسته است بر روند کلی و بلندمدت کاهش ذخایر استراتژیک برف منطقه غلبه کند. Sadeqi و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که در طول دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۲ سطح پوشش برف و عمق برف در مناطق کوهستانی خراسان رضوی کاهش یافته است که با نتایج این مطالعه همسو می‌باشد.

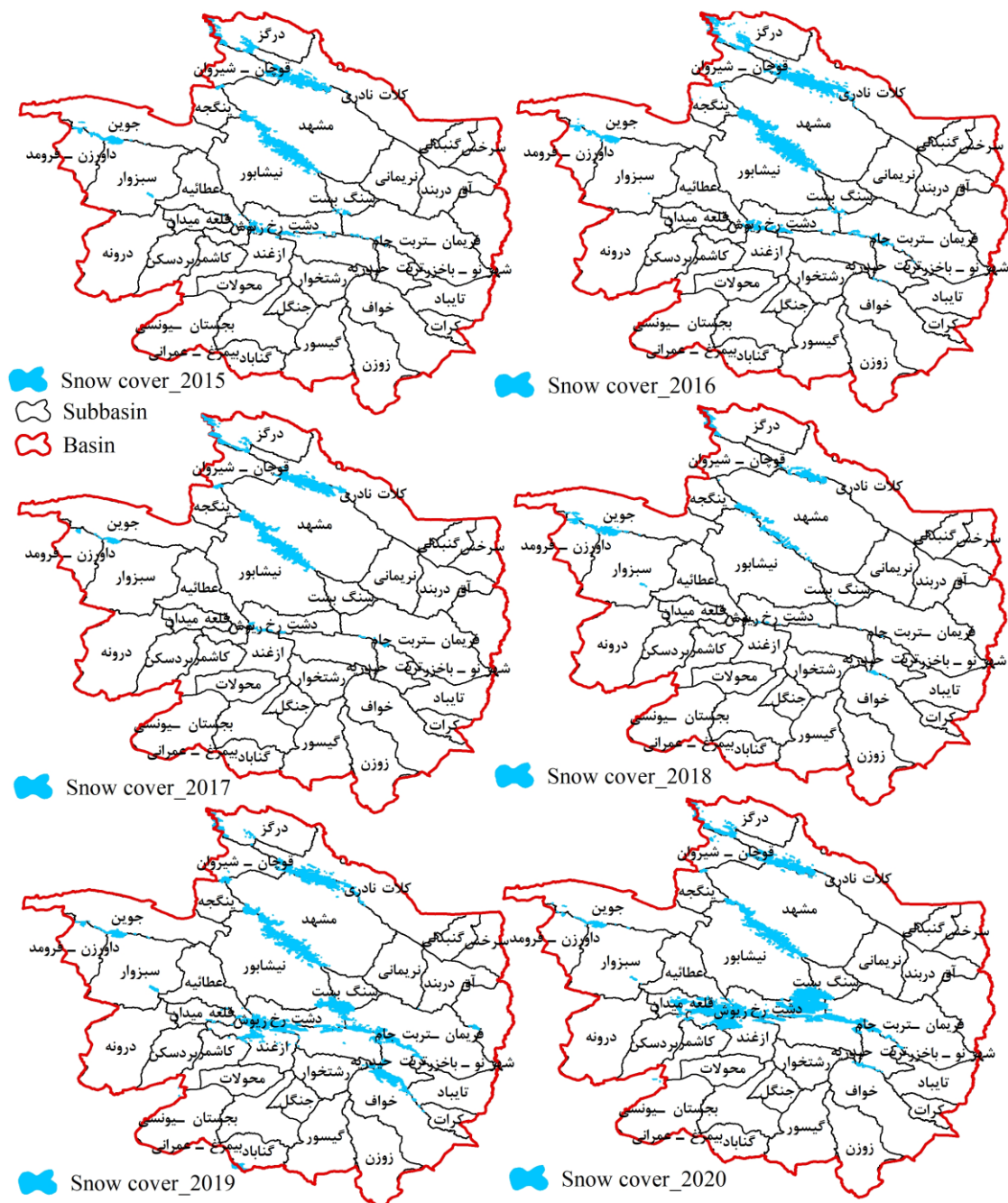


شکل ۲. نمودار تغییرات مساحت سطح پوشش برف سالانه استان خراسان رضوی در طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۰

بررسی همبستگی تغییرات سطح پوشش برف در ارتفاعات بینالود و هزار مسجد

به‌منظور بررسی همزمانی تغییرات مکانی سطح پوشش برف در مهم‌ترین مناطق برف‌گیر استان، سطح پوشش برف برای دو رشته‌کوه بینالود و هزارمسجد به‌صورت جداگانه استخراج شد. روند تغییرات سطح پوشش برف در ارتفاعات بینالود و هزار مسجد در شکل (۴a) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که هر دو منطقه طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۰ دارای روند کاهشی معنی‌دار در سطح پوشش برف بوده‌اند. آزمون من-کنندال روند کاهشی معنی‌داری را برای ارتفاعات بینالود ($Z = -3/39, P < 0/01$) و هزار مسجد ($Z = -2/87, P < 0/01$) نشان داد. همچنین شیب سن به‌ترتیب برابر با $-63/86$ و $-71/86$ کیلومتر مربع در سال برای بینالود و هزار مسجد به‌دست آمد.

که بیانگر کاهش تدریجی سطح پوشش برف در هر دو رشته کوه است. علاوه بر این، تحلیل همبستگی بین سری زمانی دو منطقه نشان داد که تغییرات سالانه سطح پوشش برف در بینالود و هزارمسجد دارای همبستگی مثبت و معنی دار ($R = 95\%$) است که بیانگر پاسخ نسبتاً مشابه این دو سامانه کوهستانی به نوسانات اقلیمی منطقه است (شکل ۴b).



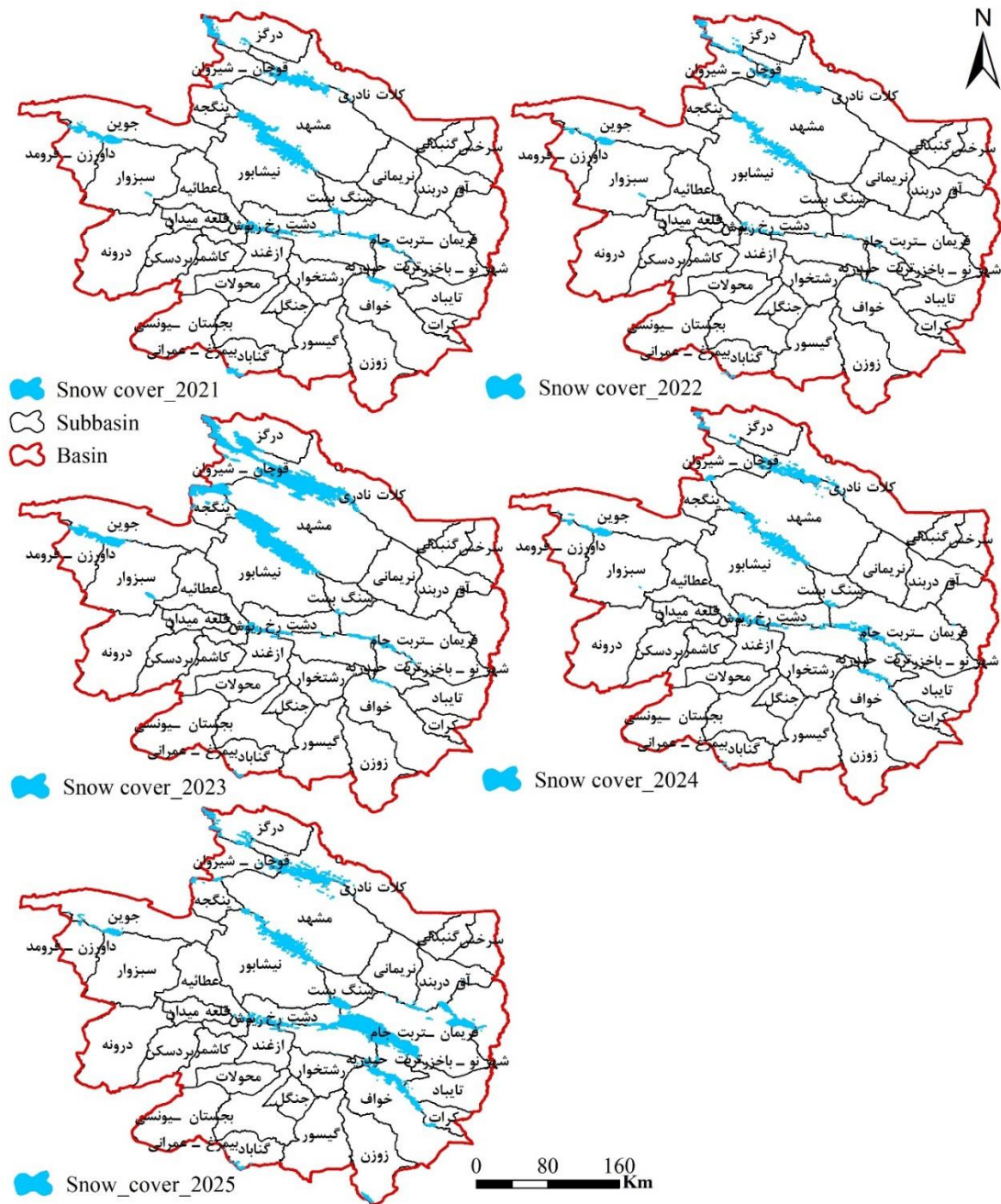
شکل ۳. تغییرات سطح پوشش برف در استان خراسان رضوی از سال ۲۰۱۵-۲۰۲۵

تحلیل تغییرات آب معادل برف (SWE)

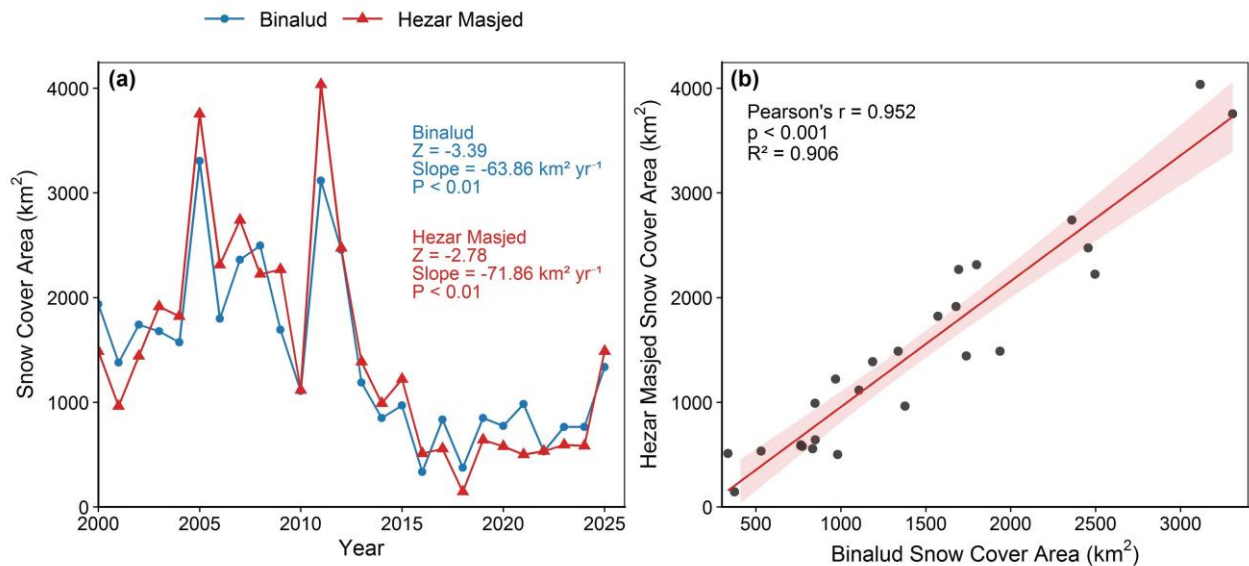
شکل ۵ میانگین ماهانه آب معادل برف (SWE) در طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۰ را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که SWE در خراسان رضوی طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۰ دارای نوسان زیاد و وابسته به رخداد‌های اقلیمی داشته است. در بیشتر ماه‌ها مقدار SWE کمتر از ۲ میلی‌متر است که نشان‌دهنده اقلیم نیمه‌خشک منطقه و محدود بودن ذخیره برفی می‌باشد. بیشترین مقدار SWE در ژانویه ۲۰۰۸ مشاهده شده که حدود ۱۵ میلی‌متر بوده است. در حالی که در سال‌های اخیر، به‌ویژه بعد از ۲۰۲۰، مقادیر SWE عمدتاً کمتر از ۲ میلی‌متر بوده‌اند و چندین ماه مقدار نزدیک صفر مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده کاهش ذخیره برفی و تضعیف پایداری برف در منطقه است. این روند نزولی می‌تواند ناشی از کاهش سطح پوشش برف در زمستان و افزایش میانگین دمای زمستانه که باعث تغییر شکل بارش‌ها از برف به باران و ذوب زود هنگام پوشش برف باشد. در مطالعه‌ای که توسط عرفانیان و همکاران (۱۳۹۳) در خراسان رضوی انجام شده نشان دادند که تعداد روزهای یخبندان و وقوع دوره‌های سرد در بلندمدت کاهش یافته و دما دارای روند افزایشی است.

ویدئو استادی

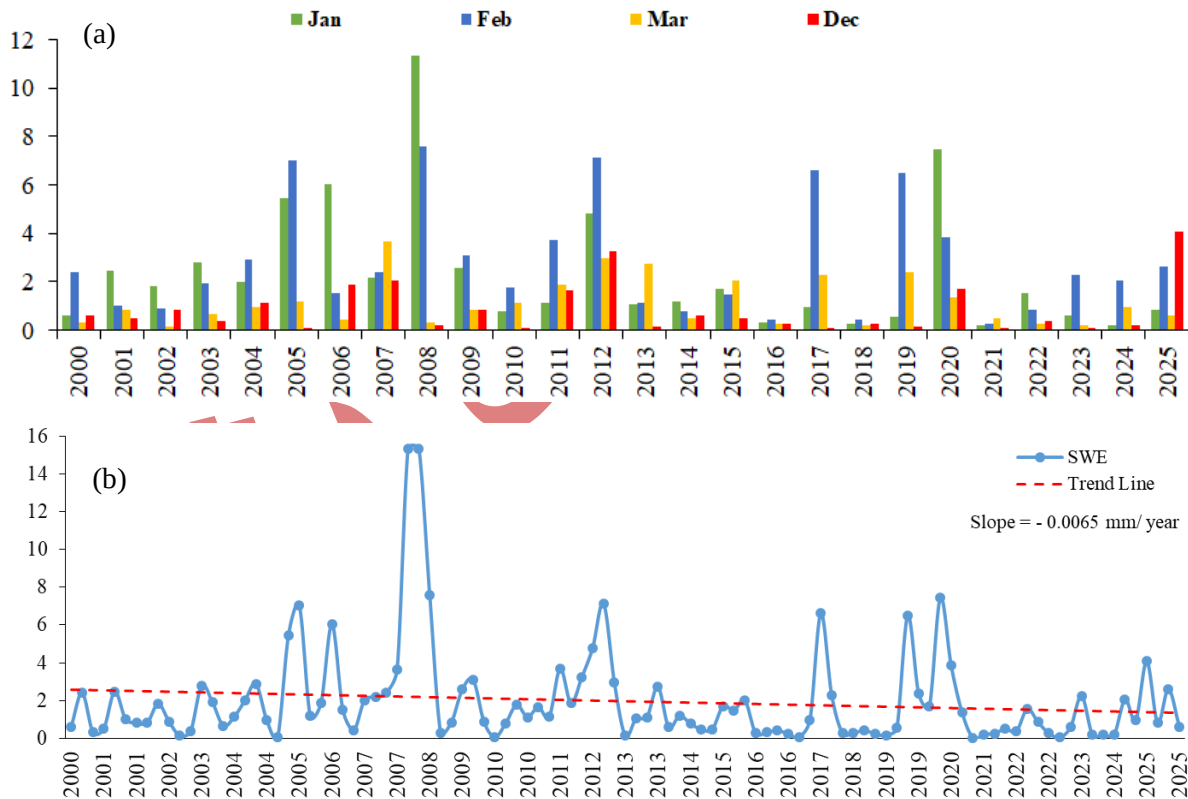
پیشرفته



ادامه شکل ۳. تغییرات سطح پوشش برف در استان خراسان رضوی از سال ۲۰۲۵-۲۰۲۵



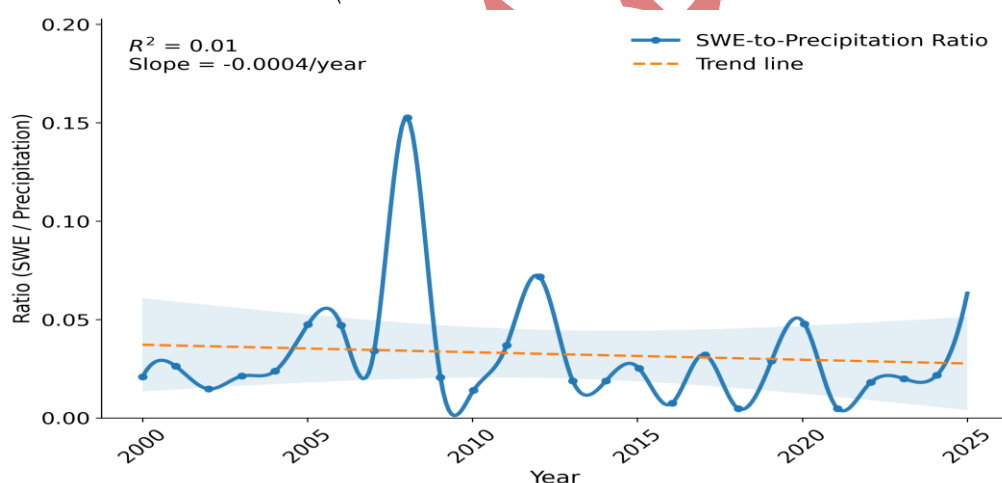
شکل ۴. تغییرات سطح پوشش برف (a) و همبستگی بین سطح پوشش برف سالانه (b) در ارتفاعات هزار مسجد و بینالود طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۰



شکل ۵. نمودار میانگین ماهانه سری زمانی آب معادل برف (SWE) (a) و روند تغییرات بلند مدت آن (b) در طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۰

تحلیل تغییرات نسبت آب معادل برف (SWE) به بارش^۱

نسبت بارش برف به باران شاخص مهمی است که به‌طور گسترده برای شناسایی و پایش پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییر اقلیم در مناطق کوهستانی استفاده می‌شود. نتایج بررسی سهم آب معادل برف (SWE) از بارش، روند آن و شیب تغییرات در هر سال منطقه مورد مطالعه در شکل (۶) ارائه شده است. بررسی سری زمانی نسبت آب معادل برف (SWE) به بارش طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ نشان‌دهنده یک روند کاهشی با شیب -0.0004 در سال است. هر چند نتایج، روند کاهشی را برای نسبت آب معادل برف به بارش را نشان داد اما روند کاهشی طی دوره مطالعاتی به لحاظ آماری در سطح 0.05 معنی‌دار نبوده است ($P = 0.34$). اگرچه شیب منفی خط روند بر وقوع تغییرات در راستای کاهش سهم بارش‌های برف تأکید دارد، اما مقدار پایین ضریب تعیین ($R^2 = 0.01$) بیانگر آن است که سیستم هیدرولوژیکی منطقه پیرو یک الگوی خطی ساده نیست و تغییرات به‌شدت تحت تأثیر نوسانات شدید بین‌سالی است. به‌طور کلی، تداوم این شیب نزولی، حتی با نرخ اندک، می‌تواند در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر، نشانه آشکاری از کاهش ذخایر برفی و تغییر رژیم رواناب بهاره در منطقه باشد. روند کاهشی مشاهده‌شده در نسبت آب معادل برف به بارش (شاخص SWE/P) در استان خراسان رضوی، با یافته‌های مطالعه Dong و Ming (۲۰۲۲) که به بررسی نسبت بارش برف به بارندگی (S/P) در منطقه کوهستانی آسیا پرداختند کاملاً همخوانی دارد. آنها گزارش دادند که این شاخص روندی به شدت نزولی را طی دهه‌های اخیر تجربه کرده است و محرک اصلی این کاهش، تبدیل فاز فیزیکی بارندگی از برف به باران بر اثر افزایش دما بوده است. تغییر فاز تدریجی الگوی بارش از برف به باران و کاهش سهم پوشش برفی در مطالعات انجام شده در سایر نقاط جهان و به‌ویژه آسیا نیز نشان داده شده است (Wang et al., 2016; Zhu et al., 2017; Li et al., 2018; Shi & Liu, 2021, Li et al., 2025).

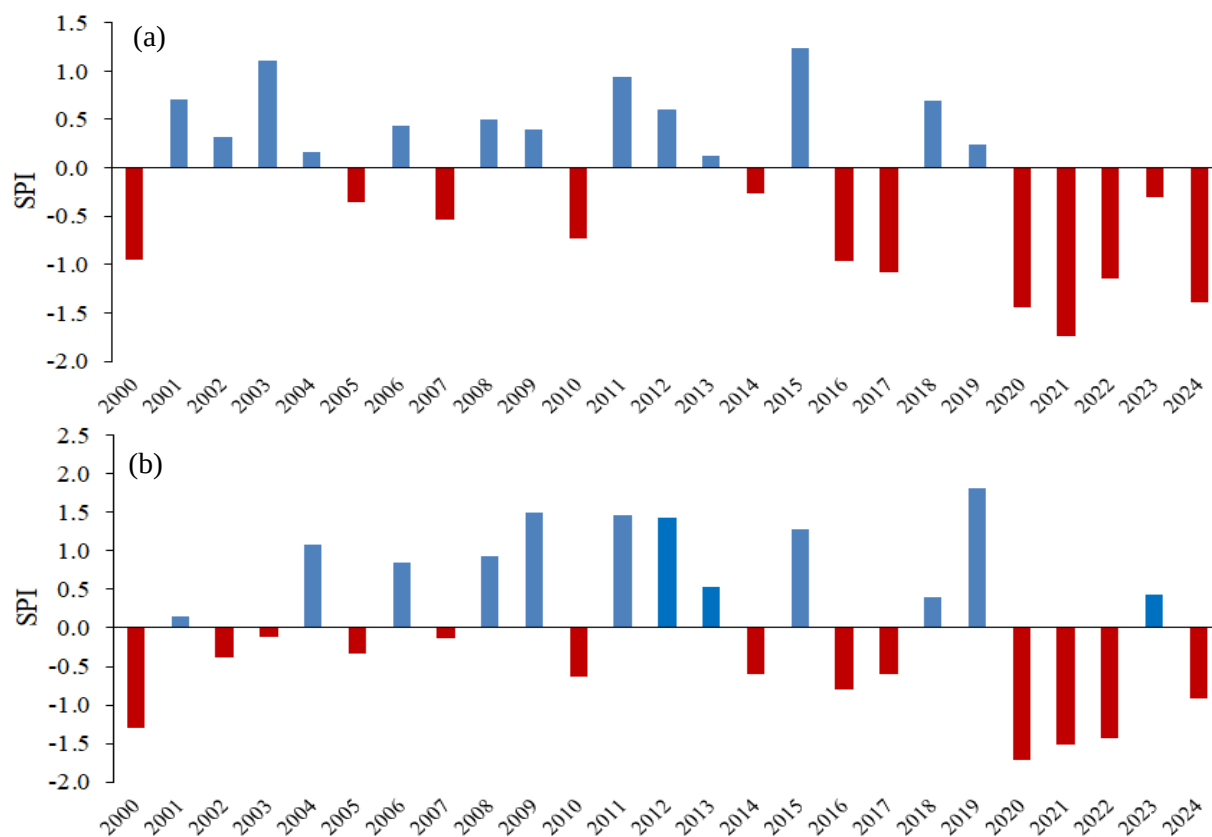


شکل ۶. نسبت آب معادل برف (SWE) به بارش سالانه (Rainfall) در طول دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۵

تحلیل ارتباط مؤلفه‌های برف با رخداد‌های خشکسالی

جهت بررسی ارتباط کاهش سطح پوشش برف و مقادیر آب معادل برف (SWE) با خشکسالی، از شاخص بارش استاندارد شده SPI سالانه ایستگاه‌های بلغور و دیزباد علیا استفاده گردید (شکل b و a). باتوجه به نمودارها در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ منطقه تحت تأثیر خشکسالی متوسط تا شدید بوده است که با کاهش سطح پوشش برف و آب معادل برف (SWE) همخوانی دارد. تحلیل هم‌زمان شاخص خشکسالی SPI با متغیرهای برف‌شناختی نشان می‌دهد که بین فازهای خشکسالی و کاهش هیدرولوژیکی برف در منطقه ارتباط وجود دارد. در سال‌هایی که شاخص SPI وارد فاز منفی شدید (خشکسالی) می‌شود (نظیر سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ منطقه)، اثرات آن در کاهش مساحت سطح پوشش برف ماهواره MODIS و همچنین کاهش آب معادل برف (SWE) منعکس می‌گردد. این همسویی رفتاری تأیید می‌کند که پدیده خشکسالی در اقلیم نیمه‌خشک استان، نه تنها از طریق کاهش کل

ریزش‌های جوی، بلکه از طریق تغییر در الگوی بارش (تبدیل برف به باران) و جلوگیری از ذوب حرارتی پوشش برف، می‌تواند منابع آب استراتژیک و پایداری رواناب‌های بهاره را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



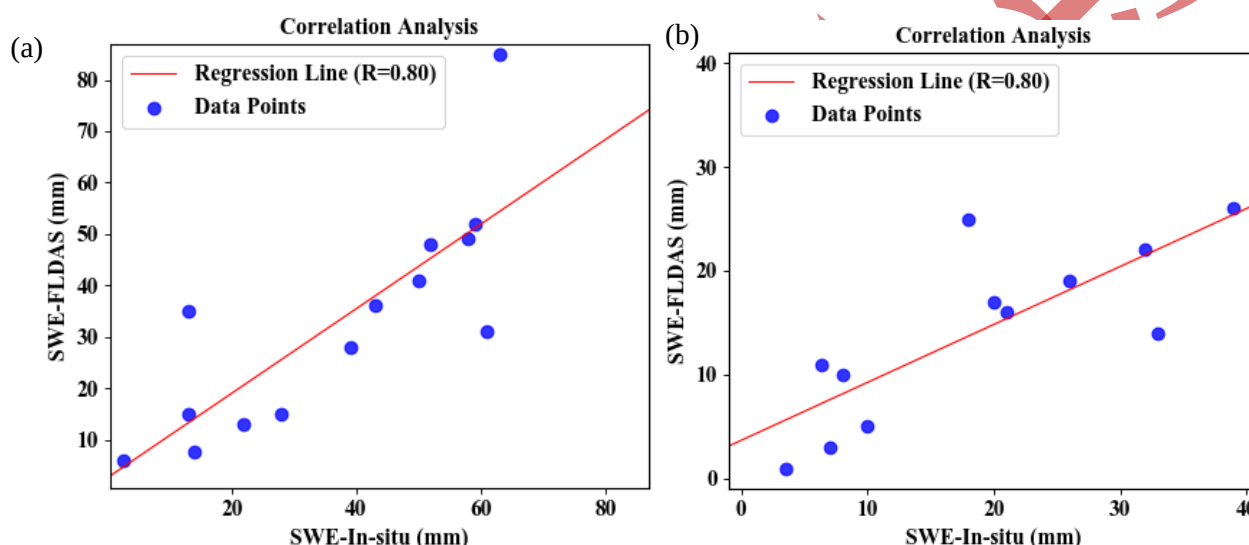
شکل ۷. مقادیر شاخص SPI سالانه (۱۲ ماهه) در ایستگاه بلغور (a) و در ایستگاه دیزباد علیا (b) طی سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۰۰

اعتبارسنجی و ارزیابی دقت داده‌های سامانه FLDAS در برآورد آب معادل برف (SWE)

به منظور ارزیابی دقت برآورد داده‌های ماهواره‌ای از چندین شاخص آماری مانند همبستگی خطی (R)، ریشه میانگین مجذور خطا ($RMSE$)، میانگین مجذور خطا (MAE) و بایاس ($Bias$) بین داده‌های سامانه FLDAS و داده‌های دو ایستگاه برف‌سنجی کریم‌آباد و فریزی، استفاده گردید (جدول ۴). نتایج حاصل از شاخص‌های آماری در ایستگاه کریم‌آباد و فریزی نشان داد که مقادیر ضریب همبستگی (R) به ترتیب برابر با 0.79 و 0.80 میلی‌متر نشان‌دهنده وجود یک رابطه نسبتاً قوی و مثبت بین داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی است و تغییرات SWE ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های زمینی به خوبی توسط سامانه FLDAS برآورد شده است (شکل ۸). میزان ریشه میانگین مجذور خطا ($RMSE$) در دو ایستگاه کریم‌آباد و فریزی به ترتیب برابر با $11/5$ و $8/3$ میلی‌متر به دست آمده است. مقدار منفی ضریب $Bias$ در هر دو ایستگاه نشان‌دهنده کم برآوردی مقدار SWE توسط ماهواره است. به طور کلی داده‌های سامانه FLDAS توانایی نسبتاً مناسبی در برآورد مقدار SWE در منطقه مورد مطالعه داشته است و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش مولفه‌های برف در بازه‌های زمانی که داده‌ای در دسترس نیست و مناطقی که به دلیل صعب‌العبور بودن امکان دسترسی ندارند مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، وجود خطاهای مشاهده‌شده نشان می‌دهد که برای افزایش دقت، استفاده از روش‌های تصحیح توپوگرافی، تلفیق داده‌های زمینی و بهبود تفکیک مکانی و زمانی محصولات ماهواره‌ای ضروری است.

جدول ۴. مقادیر ضرایب ارزیابی خطا بین مقدار آب معادل برف (SWE) داده‌های سامانه FLDAS و داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی (In-situ)

SWE (mm)		
ضرایب	کریم آباد	فریزی
Correlation	۰/۸۰	۰/۷۹
RMSE	۱۱/۵	۸/۳
MAE	۱۱/۱	۶/۸
Bias	-۴/۰	-۴/۵



شکل ۸. نمودار همبستگی بین آب معادل برف (SWE) داده‌های ماهواره (FLDAS) و ایستگاه‌های برف‌سنجی (In-situ) در ایستگاه فریزی (a) و کریم آباد (b)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه و برآورد روند تغییرات بلندمدت سطح پوشش برف، آب معادل برف (SWE) و شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) تحت تاثیر خشکسالی هواشناسی طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ در استان خراسان رضوی پرداخته شد. جهت بررسی تغییرات سطح پوشش برف از تصاویر ماهانه ماهواره MODIS و برای آب معادل برف از داده‌های ماهانه سامانه FLDAS در بستر تحت وب GEE استفاده گردید. همچنین به منظور پایش تغییرات سهم بارش برف از بارش کل منطقه، شاخص نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) در فصل سرد استفاده گردید. روند تغییرات سطح پوشش برف در منطقه از الگوی یکسانی نداشته و متأثر از نوسانات بین‌ساله، تغییرات دما و رخداد‌های خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها بوده است. بیشترین میزان پوشش برف سالانه در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ بوده است، در حالی که کمترین مقدار آن (۶۳۲/۶ کیلومتر مربع) در سال ۲۰۱۸ ثبت شده که نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه گستره پهنه‌های برف‌گیر منطقه است. همچنین بررسی تغییرات سطح پوشش برف در رشته‌کوه‌های بینالود و هزارمسجد نشان دهنده وجود همبستگی قوی ($P < 0.01$ و $R = 0.95$) و همزمانی تغییرات برف در مهم‌ترین نواحی برف‌گیر استان خراسان رضوی است. بررسی تغییرات سطح پوشش برف و آب معادل برف (SWE) در خراسان رضوی نشان داد که در سال‌های دارای خشکسالی شدید، کاهش سطح پوشش برف و SWE نیز مشاهده شده است. به‌طوریکه در سال‌هایی که شاخص SPI وارد فاز منفی شدید (خشکسالی) می‌شود (نظیر سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و بازه متوالی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴)، اثرات آن در کاهش مساحت سطح پوشش برف و همچنین کاهش

آب معادل برف (SWE) نیز مشاهده می‌شود. بررسی نسبت آب معادل برف به بارش (SPR) نشان‌دهنده یک روند کاهشی مداوم با شیب -0.004 در سال است. این روند بیانگر کاهش تدریجی سهم ذخیره آب برف نسبت به بارش بوده و می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در رژیم برف و بارش منطقه باشد. صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای با ایستگاه‌های برف‌سنجی زمینی (کریم‌آباد و فریزی) نشان داد که این سامانه با ضریب همبستگی بالا ($R > 0.79$) و خطای RMSE قابل قبول است. منفی بودن شاخص Bias در هر دو ایستگاه بیانگر کم‌برآوردی سیستماتیک سامانه FLDAS است که می‌تواند ناشی از محدودیت تعداد ایستگاه‌های برف‌سنجی زمینی و طول دوره آماری کوتاه آنها، محدودیت تفکیک مکانی داده‌ها و نمایش ناکامل فرآیندهای برف در مناطق با توپوگرافی پیچیده باشد. به طور کلی روند کاهشی سطح پوشش برف، آب معادل برف و شاخص SPR بیانگر کاهش تدریجی ظرفیت ذخیره برف در منطقه است. این تغییرات می‌تواند در بلندمدت بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه و مدیریت منابع آب وابسته به ذوب برف اثرگذار باشد. با این حال، تعیین آستانه‌های بحرانی این تغییرات مستلزم تحلیل همزمان داده‌های برف و متغیرهای هیدرولوژیکی مانند رواناب است و پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- آذرخشی، مریم، و فرزاد مهر، جلیل. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در استان خراسان رضوی. مرتع و آبخیزداری، ۶۹۸-۷۰۲، (۴) ۷۴.
- اصغری سرسکانرود، صیاد، و مدیرزاده، ریحانه. (۱۴۰۰). برآورد سطح پوشش برف در شهرهای اردبیل و سرعین با استفاده از داده‌های سنجنده Sentinel 2 ماهواره MSI. مجله علوم آب و خاک، ۲۵(۳)، ۱۱۵-۱۳۰.
- انتظامی، هیرش، مجرد، فیروز، داراند، محمد، و شهابی، هیمن. (۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات سطح پوشش برف در حوضه سفیدرود با استفاده از سنجنش از دور. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۱(۲)، ۱-۱۸. <https://doi.org/10.22126/ges.2021.6068.2363>
- امامی، صدیقه، مصطفی کابلی‌زاده، کاظم رنگزن، و سجاد زارعی. (۱۴۰۴). کمی‌سازی توزیع پوشش برف با تصاویر ماهواره‌ای و بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون شمالی). جغرافیا، ۳۳(۸۷)، ۱۰۵-۱۲۶.
- <https://doi.org/10.22034/jiga.2026.2059090.1398>
- تصدیق‌ن، مسعود، و رحیم‌زادگان، مجید. (۱۳۹۶). ارزیابی و بهبود الگوریتم تشخیص پوشش سطح برف از تصاویر سنجنده MODIS. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳ (۱)، ۱۶۳-۱۷۷. https://www.iwrr.ir/article_39359.htm
- خسروی، محمود، طاوسی، تقی، رئیس‌پور، کوهزاد، و امید قلع‌محمدی، محبوبه. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات سطح پوشش برف در ارتفاعات زردکوه بختیاری با استفاده از سنجنش از دور. مجله هیدروژئومورفولوژی، ۴(۱۲)، ۲۵-۳۴. <https://doi.org/20.1001.1.23833254.1396.4.12.2.5>
- سیدی‌شهوندی، مسلم، امیدوار، کمال، مظفری، غلامعلی، و مزیدی، احمد. (۱۴۰۴). واکاوی پیامدهای تغییر اقلیم بر ویژگی‌های برف پوشان زاگرس میانی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۵ (۷۷)، ۲۲-۴۳. <https://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.77.92>
- صادقی، سلیمان، حسین‌زاده، سیدرضا، دوستان، رضا، و آهنگرزاده، زهرا. (۱۳۹۱). تحلیل هم‌پیدی وقوع امواج سرمای در شمال شرق ایران. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱ (۳)، ۱۰۷-۱۲۴. <https://doi.org/10.22067/geo.v1i3.17466>
- صفریان، وحید. (۱۴۰۴). پایش و تحلیل زمانی - مکانی پوشش برف و مولفه‌های مرتبط با آن در پهنه رشته کوه البرز. نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴(۵۶)، ۱۰۵-۱۲۸. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94771.1601>
- ظهیری، عبدالرضا، شریفان، حسین، ابارشی، فرزانه، و رحیمیان، مهدی. (۱۳۹۳). ارزیابی پدیده‌های ترسالی و خشکسالی در استان خراسان با استفاده از نمایه‌های (SPI، PNPI و NITZCHE). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۸ (۴)، ۸۴۵-۸۵۶.
- اکبری، طیبه، عزیزی، قاسم، داوودی، محمود، و اکبری، مهری. (۱۳۸۸). تحلیل هم‌دید سرمای شدید دی‌ماه ۱۳۸۶ در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۷۰(۴۱)، ۱۱۲-۱۳۲.
- عساکره، حسین، و شهبازی کوتنایی، علی. (۱۳۹۶). تحلیل هم‌دید الگوهای جوی توام باموج‌های سرمای زمستانه در ایران. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۳، ۱۰۹-۱۲۴. <https://doi.org/10.22067/geo.v6i3.59919>

عساکره، حسین، خوش خلق، فرامرز، و شاه محمدی، زینب. (۱۳۹۵). استخراج الگوهای همدید توام با فاز مثبت اطلس شمالی (NAO) و تأثیر آن بر بارش زمستانه ایران. *مجله هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۹)، ۱۱۳-۱۳۷. <https://doi.org/20.1001.1.23833254.1395.3.9.6.6>

عرفانیان، مریم، انصاری، حسین، علیزاده، امین، و بنایان اول، محمد. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات شاخص‌های حدی هواشناسی در استان خراسان رضوی. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۸(۴)، ۸۱۷-۸۲۵.

لشکری، حسن. (۱۳۸۷). تحلیل سینوپتیکی موج سرمای فراگیر سال ۱۳۸۲ در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۶۶، ۹۳-۸۷.

میرموسوی، سیدحسن، و صبور، لیلان. (۱۳۹۳). پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه شمال غرب ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۱۲(۳۵)، ۱۸۱-۲۰۰. <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1562>

میریعیوبزاده، میرحسن، و قنبرپور، محمدرضا. (۱۳۸۹). بررسی کاربرد نقشه‌های پوشش برفی حاصل از ماهواره‌های MODIS در مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد کرج). *فصلنامه علمی علوم زمین*، ۱۹(۷۶)، ۱۴۸-۱۴۱. <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.55672>

REFERENCES

- Asakereh, H., & Shahbazi Kotenaei, A. (2016). Synoptic analysis of atmospheric patterns associated with winter cold waves in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 23, 109-124. Doi: 10.22067/geo. v6i3.59919. (In Persian).
- Asakereh, H., Khoshakhlag, F. and shamohamadi, Z. (2017). Phase Extraction of Synoptic Patterns with Positive North Atlantic Oscillation (NAO) and its Impact on the Winter Precipitation in Iran. *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(9), 113-137. doi: 20.1001.1.23833254.1395.3.9.6.6. (In Persian).
- Asghari Saraskanroud, A. & Modirzadeh, R. (2021). Estimation of Snow Cover Level in Ardebil and Sarein Cities Using Sensor Data Sentinel2 MSI Satellite. *Journal of Water and Soil Science*, 25(3), 115-130. (In Persian).
- Akbari, T., Azizi, Q., Davoodi, M., & Akbari, M. (2009). Synoptic analysis of the severe cold of Dey 1386 in Iran. *Journal of Natural Geography Research*, 70(41), 112-132. (In Persian).
- Azarakhshi, M. & Farzadmehr, J. (2021). Assessment the relation of meteorological and hydrological drought in Khorasan Razavi province. *Range and Watershed*, 74(4), 702-698. (In Persian).
- Bormann, K. J., Brown, R. D., Derksen, C., & Painter, T. H. (2018). Estimating snow-cover trends from space. *Nature Climate Change*, 8(11), 924-928.
- Caiserman, A., Sadyrov, S., Sidle, R. C., Asadi, H., Jarihani, B., Qadamov, A., & Muzafari, S. (2026). Long time series analysis of snow water equivalent across the Amu Darya water towers from remote sensing and in-situ records. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 64, 103224. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103224>.
- Dong, C. (2018). Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review. *Journal of Hydrology*, 561, 573-583.
- Dong, W., & Ming, Y. (2022). Seasonality and variability of snowfall to total precipitation ratio over High Mountain Asia simulated by the GFDL high-resolution AM4. *Journal of Climate*, 35(17), 5703-5718. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0038>.
- Entezami, H., Mojarad, F., Darand, M., & Shahabi, H. (2021). Investigating the Changes in Snow Cover in Sefidrood Drainage Basin using Remote Sensing. *Geography and Environmental Sustainability*, 11(2), 1-18. doi: 10.22126/ges.2021.6068.2363. (In Persian).
- Emami, S., Kabolizadeh, M., Rangzan, K. and Zareie, S. (2025). Quantifying Snow Cover Distribution with Satellite Images and Investigating the Impact of Land Features (Case Study of North Karun Watershed). *Geography*, 23(87), 105-126. doi: 10.22034/jiga.2026.2059090.1398. (In Persian).
- Erfanian, M., Ansari, H., Alizadeh, A. and Banayan Aval, M. (2014). Assessment of Climatic Extreme Events Variations in Khorasan Razavi province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(4), 817-825. (In Persian).
- Ghasemifar, Elham & Mohammadi, Chenour & Farajzadeh, Manuchehr. (2019). Spatiotemporal analysis of snow cover in Iran based on topographic characteristics. *Theoretical and Applied Climatology*. 10.1007/s00704-018-2690-3.
- 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).
- Hammond, J. C., Saavedra, F. A., & Kampf, S. K. (2018). Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001-2016. *International Journal of Climatology*, 38(12), 4369-4383.

- Huntington, T. G., Hodgkins, G. A., Keim, B. D., & Dudley, R. W. (2004). Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in New England (1949–2000). *Journal of Climate*, 17(13), 2626–2636. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017).
- Kazemzadeh M, Hashemi H, Jamali S, Uvo CB, Berndtsson R, Huffman GJ. (2022). Detecting the Greatest Changes in Global Satellite-Based Precipitation Observations. *Remote Sensing*. 14(21):5433. <https://doi.org/10.3390/rs14215433>.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- 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*, 101662.
- Khosravi, M., Tavousi, T., Raeespour, K. and Omid Ghaleh Mohammadi, M. (2017). A Survey on Snow Cover Variation in Mount Zardkooh-Bakhtyare Using Remote Sensing (R.S). *Journal of Hydrogeomorphology*, 4(12), 25–44. Doi: 20.1001.1.23833254.1396.4.12.2.5. (In Persian).
- Lashkari, H. (2008). Synoptic analysis of the pervasive cold wave of 2003 in Iran. *Journal of Natural Geography Research*, 66(2), 78–93. (In Persian).
- Li, Q., W. Li, Yang, T., Fan, Y., & Li, L. (2025). Contribution of snow water equivalent to the terrestrial water storage changes in High Mountain Asia based on multiple datasets. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102401.
- Li, Q., T. Yang, Z. M. Qi, and L. H. Li (2018). Spatiotemporal variation of snowfall to precipitation ratio and its implication on water resources by a regional climate model over Xinjiang, China. *Water*, 10, 1463, <https://doi.org/10.3390/w10101463>.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- Moradi, E., Muchová, Z., Darabi, H., Hafezi, S. M., Karimidastenaie, Z., Moravcova, J., & Haghighi, A. T. (2025). Assessment of snow cover dynamics and the effects of environmental drivers in High Mountain ecosystems. *Environmental Impact Assessment Review*, 114, 107969.
- Mirmousavi, S. H. and Saboor, L. (2014). Monitoring the Changes of Snow Cover by Using MODIS Sensing Images at North West of Iran. *Geography and Development*, 12(35), 181–200. doi: 10.22111/gdij.2014.1562. (In Persian).
- Mir Yaghoubzadeh, M. H., & Ghanbarpour, M. R. (2010). Investigation to MODIS snow cover maps usage in snowmelt runoff modeling (Case study: Karaj Dam Basin). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 19(76), 141–148. Doi: 10.22071/gsj.2010.55672. (In Persian).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179–183).
- Notarnicola, C. (2020). Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018. *Remote Sensing of Environment*, 243, 111781.
- Parvin, S., Irannezhad, M., Marttila, H., & Minaei, M. MODIS-Based Assessment of Snow Cover Variability in Iran's Mountain Ranges via Google Earth Engine. Available at SSRN 6138761.
- 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. doi: 10.22067/geoh.2025.94771.1601. (In Persian).
- Sadeghi, S., Hosseinzadeh, S. R., Doostan, R., & Ahangarzadeh, Z. (2012). Synoptic analysis of cold waves in northeastern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(3), 107–124. (DOI): 10.22067/geovli3.17466. (In Persian).
- Sadeqi, A., Irannezhad, M., Bahmani, S., Azad Jelodarlu, K., Varandili, S. A., Pham, Q. B., & Kløve, B. (2024). Long-Term Variability and Trends in Snow Depth and Cover Days throughout Iranian Mountain Ranges. *Water Resources Research*, 60(1), e2023WR035411. <https://doi.org/10.1029/2023WR035411>
- Smith, T., & Bookhagen, B. (2018). Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009). *Science advances*, 4(1), e1701550.
- 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. <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.77.9>. (In Persian).
- Slinski, K., & Sarmiento, D. NASA/GSFC/HSL. (2023). FLDAS2 Noah-MP GDAS Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed [Data Access Date], 10.5067/C4IOYF41EEZB.
- Su, B., Xiao, C., Zhao, H., Huang, Y., Dou, T., Wang, X., & Chen, D. (2022). Estimated changes in different forms of precipitation (snow, sleet, and rain) across China: 1961–2016. *Atmospheric Research*, 270, 106078. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106078>.

- Shi, S., & Liu, G. (2021). The latitudinal dependence in the trend of snow event to precipitation event ratio. *Scientific Reports*, 11(1), 18112. DOI 10.5067/C4IOYF41EEZB.
- Tang, Z., Wang, X., Wang, J., Wang, X., Li, H., & Jiang, Z. (2017). Spatiotemporal variation of snow covers in Tianshan Mountains, Central Asia, based on cloud-free MODIS fractional snow cover product, 2001–2015. *Remote Sensing*, 9(10), 1045.
- Tang, Z., Deng, G., Hu, G., Zhang, H., Pan, H., & Sang, G. (2022). Satellite observed spatiotemporal variability of snow cover and snow phenology over high mountain Asia from 2002 to 2021. *Journal of hydrology*, 613, 128438.
- Tasdighian, M., & Rahimzadegan, M. (2017). Evaluation and improvement of snow cover detection from MODIS images. *Iran-Water Resources Research*, 13(1), 163-177. https://www.iwrr.ir/article_39359.htm(In Persian).
- Wang, Y., Huang, X., Liang, H., Sun, Y., Feng, Q., & Liang, T. (2018). Tracking snow variations in the Northern Hemisphere using multi-source remote sensing data (2000–2015). *Remote Sensing*, 10(1), 136.
- Wang, J., Zhang, M. J., Wang, S. J., Ren, Z. G., Che, Y. J., Qiang, F., & Qu, D. Y. (2016). Decrease in snowfall/rainfall ratio in the Tibetan Plateau from 1961 to 2013. *Journal of Geographical Sciences*, 26(9), 1277–1288. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1326-8>.
- Wrzesien, M., Pavelsky, T., Durand, M., Dozier, J., & Lundquist, J. (2019). Characterizing Biases in Mountain Snow Accumulation From Global Data Sets. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.17615/r1xz-ky92>.
- Zahiri, A R , Sharifan,H , Abareshti,F and Rahimian,M . (2014). Assessment the Phenomena of Wet and Drought in Khorasan Province by using (PNPI, SPI, NITZCHE) (Case study: Khorasan Province). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(4), 845-856. (In Persian).
- Zhu, X. F., Zhang, Y. L., Wang, Z. B., Chiang, C. H., & Coauthors. (2017). Characteristics of the ratios of snow, rain and sleet to precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau during 1961–2014. *Quaternary International*, 444, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.030>.
- Zhu, Z., Tang, X., Zhang, J., Gao, C., Zhang, S., Liu, L. & Zhao, B. (2025). Characterizing biases in accuracy comparison of multiple snow products by error decomposition over the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 134232. doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.134232.
- Zhu, X., Wu, T., Li, R., Wang, S., Hu, G., Wang, W., Qin, Y., & Yang, S. (2017). Characteristics of the ratios of snow, rain and sleet to precipitation on the Qinghai–Tibet Plateau during 1961–2014. *Quaternary International*, 444, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.036>.