Analysis of snow depth and snow water equivalent in relation to precipitation and topographic factors in Marivan County, Iran

Extended Abstract

Introduction

Snow is a key component of the hydrological cycle in mountainous regions because it temporarily stores cold-season precipitation and gradually releases water during the melting period. This seasonal storage contributes to streamflow, groundwater recharge, spring discharge, and agricultural water supply. Reliable assessment of snow resources is therefore essential in mountainous and data-scarce regions, particularly where water availability depends strongly on cold-season precipitation. Snow-covered area alone cannot adequately represent the amount of water stored in a snowpack. Snow depth indicates the vertical thickness of the snow layer, whereas snow water equivalent (SWE) represents the depth of water produced by the complete melting of the snowpack. Because SWE is also influenced by snow density, moisture content, and compaction, the simultaneous analysis of snow depth and SWE provides a more comprehensive assessment of snow storage. Ground-based measurements of these variables are limited in many mountainous regions because of sparse monitoring networks, difficult access, high field-survey costs, and pronounced spatial variability. Gridded land-surface model products can partly overcome these limitations by providing spatially continuous and temporally consistent estimates. However, their outputs must be interpreted cautiously because of their relatively coarse spatial resolution and model-related uncertainties. This study investigated the monthly and between-period variations in snow depth and SWE, evaluated the performance of two satellite precipitation products, and examined the relationship between snow storage and topographic factors in Marivan County, western Iran, during three four-month cold periods extending from December to March in 2021–2022, 2022–2023, and 2023–2024.

Materials and Methods

Marivan County covers approximately 2,337 km² in western Kurdistan Province near the Iran–Iraq border. The county is located in the western Zagros Mountains and is characterized by complex topography, with elevations ranging from approximately 1,191 to 3,153 m above sea level. Monthly snow depth and SWE data were obtained from the FLDAS-Noah land-surface modeling system at a spatial resolution of 0.1°. Daily precipitation estimates were acquired from CHIRPS at a spatial resolution of 0.05° and PERSIANN-CDR at 0.25°. The daily precipitation data were aggregated into monthly totals and compared with monthly observations from the Marivan meteorological station. Elevation, slope, and aspect were derived from the 30 m Shuttle Radar Topography Mission digital elevation model. Because the spatial resolution of SRTM was considerably finer

than that of FLDAS-Noah, the topographic data were aggregated and analyzed at a scale compatible with the FLDAS grid. Consequently, the topographic results were interpreted as regional patterns rather than direct snow estimates at the 30 m pixel scale. Data preparation and extraction were performed in Google Earth Engine, whereas ArcGIS, Excel, and Python were used for spatial processing, statistical analysis, and graphical presentation. Descriptive statistics, including the mean, median, standard deviation, coefficient of variation, minimum, maximum, and quartiles, were calculated for snow depth and SWE. The relationship between monthly snow depth and SWE was examined using Pearson's correlation coefficient and the coefficient of determination. The performance of CHIRPS and PERSIANN-CDR was evaluated using R^2, root mean square error, mean absolute error, bias, and the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient. Area-weighted mean snow depth and SWE were also calculated for elevation, slope, and aspect classes.

Results and Discussion

The results revealed substantial temporal variability in snow storage. Over the 12-month study period, the mean snow depth and SWE were 2.563 cm and 4.569 mm, respectively, with coefficients of variation of 107.45% and 96.44%. The highest values occurred in February 2023, when snow depth reached 10.120 cm and SWE reached 16.362 mm, followed by a sharp decline in March 2023. Overall, the 2022–2023 four-month cold period had the greatest snow storage, whereas the 2023–2024 period had the lowest, despite recording the highest station precipitation. This finding indicates that total precipitation alone does not determine snow storage; precipitation phase, air temperature, timing of precipitation, and intermittent melting during the cold period are also important. Snow depth and SWE were strongly and significantly correlated (r=0.985, R2=0.971), indicating close temporal agreement between the two FLDAS-Noah variables. Nevertheless, SWE also depends on snow density and compaction and therefore cannot be fully represented by snow depth alone. Both satellite precipitation products substantially underestimated observed precipitation. The 12-month totals were 1,696.93 mm at the Marivan station, 980.72 mm for CHIRPS, and 731.45 mm for PERSIANN-CDR, corresponding to underestimations of 42.2% and 56.9%, respectively. CHIRPS produced lower RMSE, MAE, and absolute bias values and a less negative NSE than PERSIANN-CDR; however, neither product performed sufficiently well to replace station observations without local evaluation and bias correction. Elevation showed the clearest relationship with snow storage, with the highest mean snow depth and SWE recorded in the 2,624.1–3,153 m elevation class. Snow storage increased up to the 35–40° slope class and then declined on steeper terrain. Differences among aspect classes were comparatively limited, although southeastern slopes showed the highest mean values.

Conclusion

Snow storage in Marivan County varied considerably among months and across the three four-month cold periods. The 2022–2023 period, particularly February 2023, had the greatest snow depth and SWE, whereas the 2023–2024 period had the lowest snow storage despite high observed precipitation. Snow depth and SWE were strongly correlated, although SWE remained the more direct indicator of the amount of water stored in the snowpack. Both CHIRPS and PERSIANN-CDR substantially underestimated station precipitation, with CHIRPS showing relatively better overall performance. Elevation was the topographic factor most consistently associated with increasing snow storage, whereas slope showed a nonlinear relationship and differences among aspect classes were limited. The integration of FLDAS-Noah data, satellite precipitation products, station observations, and topographic information can support regional snow monitoring in data-scarce mountainous areas. However, the relatively coarse model resolution, spatial-scale mismatch among datasets, reliance on a single meteorological station, and absence of ground-based snow observations should be considered when interpreting the results.

Keywords: Snow depth; Snow water equivalent; FLDAS-Noah; Satellite precipitation; Topographic factors; Marivan County.

بررسی تغییرات عمق و آب معادل برف و ارتباط آن با بارش و عوامل توپوگرافی در شهرستان مریوان

چکیده

برف یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه آب در مناطق کوهستانی است و بررسی عمق برف و آب معادل برف می‌تواند شناخت دقیق‌تری از مقدار آب ذخیره‌شده در توده برفی فراهم کند. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی عمق برف و آب معادل برف، ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای و تحلیل ارتباط ذخیره برفی با عوامل توپوگرافی در شهرستان مریوان انجام شد. دوره مطالعه شامل دوره‌های سرد چهارماهه دسامبر تا مارس در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۱، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲۴-۲۰۲۳ بود. داده‌های ماهانه عمق برف و آب معادل برف از FLDAS-Noah ، داده‌های روزانه بارش از CHIRPS و PERSIANN-CDR و داده مرجع بارش از ایستگاه هواشناسی مریوان گردآوری شد. همچنین، ارتفاع، شیب و جهت دامنه از مدل رقومی ارتفاع SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد. تحلیل‌ها با استفاده از آمار توصیفی، ضریب همبستگی پیرسون، ضریب تعیین و شاخص‌های RMSE، MAE، Bias و NSE انجام گرفت. نتایج نشان داد میانگین عمق برف و آب معادل برف در کل دوره به‌ترتیب ۲/۵۶۳ سانتی‌متر و ٤/٥٦٩ میلی‌متر بود و بیشترین مقادیر در فوریه ۲۰۲۳، به‌ترتیب ۱۰/۱۲۰ سانتی‌متر و ۱٦/۳٦۲ میلی‌متر ثبت شد. میان عمق برف و آب معادل برف رابطه‌ای مستقیم و بسیار قوی وجود داشت (r = ۰/۹۸۵ و R^2 = ۰/۹۷۱). محصولات CHIRPS و PERSIANN-CDR بارش ایستگاهی را به‌ترتیب حدود ٤۲/۲ و ٥٦/۹ درصد کم‌برآورد کردند و CHIRPS براساس شاخص‌های خطا عملکرد مناسب‌تری داشت. تحلیل توپوگرافی نشان داد ارتفاع منظم‌ترین ارتباط را با ذخیره برف دارد و بیشترین مقادیر در طبقه ارتفاعی ۲٦۲٤/۱ تا

مقاله در حوزه انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۳۱۵۳ متر مشاهده شد. اثر شیب تا طبقه ۳۵ تا ٤٠ درجه افزایشی و پس از آن کاهشی بود، درحالی‌که اختلاف میان جهت‌های دامنه محدودتر بود.

واژه‌های کلیدی: عمق برف، آب معادل برف،FLDAS ، بارش ماهواره‌ای، عوامل توپوگرافی، شهرستان مریوان.

۱- مقدمه

برف یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه آب در مناطق کوهستانی است که بخشی از بارش فصل سرد را به‌صورت موقت ذخیره کرده و در ماه‌های گرم‌تر، هم‌زمان با فرایند ذوب، وارد رودخانه‌ها، چشمه‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌کند (Yang et al., 2025). این نقش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که بخش مهمی از منابع آب آن‌ها به ذخایر برفی وابسته است، اهمیت بیشتری دارد (Asghari et al., 2024). تغییر در مقدار، مدت ماندگاری و زمان ذوب برف می‌تواند حجم و زمان‌بندی جریان‌های سطحی را تغییر دهد و بر وقوع کم‌آبی، خشکسالی و سیلاب‌های ناشی از ذوب سریع اثر بگذارد (Schilling et al., 2024). همچنین، افزایش دما و تبدیل بخشی از بارش برف به باران موجب کاهش ذخیره برفی و آغاز زودهنگام ذوب می‌شود (Nouri & Homaee, 2021). شناخت وضعیت برف تنها با تعیین سطح پوشیده از برف کامل نمی‌شود، زیرا سطح پوشش برف اطلاعات مستقیمی درباره مقدار آب ذخیره‌شده در توده برفی ارائه نمی‌دهد. برای ارزیابی کمی این ذخیره، دو متغیر عمق برف و آب معادل برف اهمیت ویژه‌ای دارند. عمق برف، ضخامت قائم توده برفی را نشان می‌دهد، درحالی‌که آب معادل برف یا SWE بیانگر مقدار آبی است که از ذوب کامل آن حاصل می‌شود. تفاوت در چگالی و میزان فشردگی برف ممکن است سبب شود دو منطقه با عمق برف مشابه، مقادیر متفاوتی از SWE داشته باشند؛ بنابراین، بررسی هم‌زمان این دو متغیر شناخت دقیق‌تری از وضعیت ذخیره برفی فراهم می‌کند (Winkler et al., 2021). اندازه‌گیری زمینی عمق برف و SWE معمولاً از طریق ایستگاه‌های برف‌سنجی و پیمایش‌های میدانی انجام می‌شود، اما کمبود ایستگاه‌ها، دشواری دسترسی به ارتفاعات و تغییرپذیری زیاد برف، تعمیم نتایج نقطه‌ای را محدود می‌کند. در چنین شرایطی، داده‌های شبکه‌ای و مدل‌های سطح زمین امکان بررسی منظم تغییرات زمانی و مکانی برف را فراهم می‌کنند. سامانه FLDAS با تلفیق داده‌های هواشناسی، ویژگی‌های سطح زمین و مدل‌های شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از متغیرهای هیدروکلیماتیک ازجمله عمق برف و آب معادل برف را در بازه‌های زمانی منظم ارائه می‌دهد و برای مطالعه مناطق کم‌داده مناسب است (McNally et al., 2017). توزیع عمق برف و SWE در مناطق کوهستانی یکنواخت نیست و علاوه بر مقدار و نوع بارش، از عوامل توپوگرافی تأثیر می‌پذیرد. افزایش ارتفاع معمولاً با کاهش دما، افزایش سهم بارش جامد و تأخیر در ذوب همراه است؛ ازاین‌رو، ارتفاعات بالاتر شرایط مناسب‌تری برای تجمع و ماندگاری برف دارند (Tong et al., 2009). شیب نیز از طریق تأثیر بر تابش، جابه‌جایی و پایداری توده برف مؤثر است و جهت دامنه با کنترل مقدار انرژی خورشیدی دریافتی، بر سرعت ذوب و مدت ماندگاری برف اثر می‌گذارد. بااین‌حال، شدت اثر این

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

عوامل به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های محلی هر منطقه وابسته است (Gao et al., 2021). بارش مهم‌ترین ورودی تشکیل ذخیره برف است، اما شبکه ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق کوهستانی معمولاً تراکم کافی ندارد. ازاین‌رو، محصولات بارش ماهواره‌ای مانند CHIRPS و PERSIANN-CDR به دلیل پوشش مکانی پیوسته و دسترسی زمانی منظم، کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (Funk et al., 2015). محصول CHIRPS از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات اقلیم‌شناختی و مشاهدات ایستگاهی تولید می‌شود، درحالی‌که PERSIANN-CDR بر مشاهدات چندماهواره‌ای و الگوریتم PERSIANN مبتنی است (Ashouri et al., 2015). بااین‌حال، دقت این محصولات در مناطق کوهستانی ممکن است تحت تأثیر ناهمواری، ارتفاع، نوع بارش و تراکم ایستگاه‌های زمینی قرار گیرد؛ بنابراین، ارزیابی آن‌ها در برابر داده‌های مشاهداتی برای استفاده در مطالعات محلی ضروری است.

در ایران، مطالعات مختلفی به بررسی پوشش، عمق و ذخیره برف و نقش عوامل محیطی در تغییرات آن پرداخته‌اند. نتایج طبری و همکاران (۲۰۱۰) و قرایی‌منش و همکاران (۲۰۱٦) نشان داد که متغیرهای اقلیمی و توپوگرافی در توزیع مکانی ذخیره برف نقش مهمی دارند و روش‌های داده‌محور می‌توانند بخشی از این تغییرات را برآورد کنند. اصغری سراسکانرود و مدیرزاده (۱۳۹۹) با استفاده از داده‌های Sentinel-1 و روش تداخل‌سنجی راداری، تغییرات عمق برف شهرستان‌های اردبیل و سرعین را بررسی کردند و قابلیت داده‌های راداری را برای پایش عمق برف نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر، اصغری سراسکانرود و مدیرزاده (۱٤۰۰) با استفاده از تصاویر Sentinel-2، تغییرات سطح پوشش برف این دو شهرستان را برآورد کردند. همچنین، اصغری سراسکانرود و همکاران (۱٤۰۰) با اندازه‌گیری عمق برف و بررسی مؤلفه دما نشان دادند که شرایط حرارتی نقش مهمی در تغییر ویژگی‌های برف دارد. این مطالعات اهمیت استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور را برای پایش برف تأیید کرده‌اند، اما عمدتاً بر یک ویژگی مشخص مانند سطح پوشش یا عمق برف متمرکز بوده‌اند. نوری و همایی (۲۰۲۱) کاهش عمق و مدت ماندگاری برف را در بخش گسترده‌ای از مناطق کوهستانی ایران گزارش کردند. وفاخواه و همکاران (۲۰۲۲) و مجیدی و همکاران (۲۰۲۵) نیز بر توانایی روش‌های یادگیری ماشین و محصولات بازتحلیل در برآورد متغیرهای برفی تأکید کردند، هرچند محدودیت این داده‌ها در مناطق ناهموار همچنان قابل‌توجه است. در شهرستان مریوان، زینالی و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که شاخص S3 در تصاویر Sentinel-2 و شاخص SWI در تصاویر Landsat دقت مناسبی در استخراج پوشش برف دارند و بیشترین تجمع برف در ارتفاعات بالاتر، شیب‌های ملایم و دامنه‌های شمالی مشاهده می‌شود. بااین‌حال، تمرکز این مطالعه بر شناسایی سطح پوشش برف بوده و تغییرات عمق برف و آب معادل برف و ارتباط آن‌ها با بارش بررسی نشده است. مطالعات خارجی نیز نقش ارتفاع، شیب، جهت دامنه، مدل‌های سطح زمین، داده‌های ارتفاع‌سنجی و روش‌های یادگیری عمیق را در برآورد و تحلیل ذخیره برف تأیید کرده‌اند (Tong et al., 2009; Shrestha et al., 2012; Treichler & Kääb, 2017; Gao et al., 2021; Cui et al., 2023). بااین‌حال، تفکیک مکانی محدود داده‌ها، پیچیدگی توپوگرافی و کمبود مشاهدات زمینی همچنان

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

از مهم‌ترین منابع عدم‌قطعیت در برآورد متغیرهای برفی به شمار می‌روند (Schilling et al., 2024). مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تغییرات زمانی و مکانی عمق برف و آب معادل برف، عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای و ارتباط ذخیره برف با عوامل توپوگرافی در شهرستان مریوان تاکنون در یک چارچوب یکپارچه بررسی نشده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات ماهانه و بین‌سالانه عمق برف و آب معادل برف، ارزیابی محصولات بارش CHIRPS و PERSIANN-CDR در برابر داده‌های ایستگاه هواشناسی مریوان و تحلیل ارتباط ذخیره برفی با ارتفاع، شیب و جهت دامنه انجام شد. دوره مطالعه شامل دوره‌های سرد چهارماهه دسامبر تا مارس در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۲، ۲۰۲۲-۲۰۲۳ و ۲۰۲۳-۲۰۲٤ است.

مقاله در نوبت انتشار

۲- داده‌ها و روش پژوهش

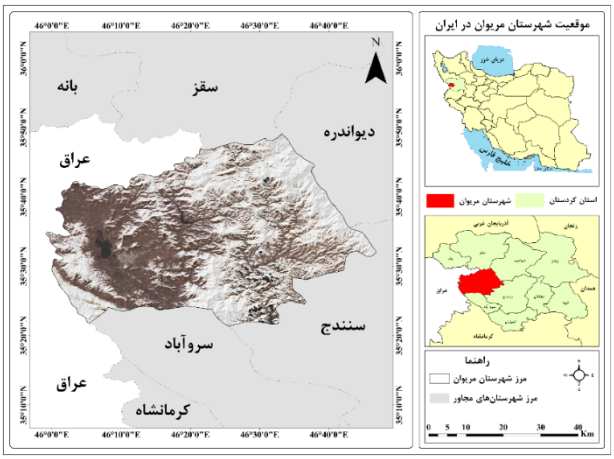
چارچوب پژوهش حاضر بر تلفیق داده‌های شبکه‌ای عمق برف و آب معادل برف، محصولات بارش ماهواره‌ای، داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی و اطلاعات توپوگرافی استوار است. مراحل پژوهش شامل گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، استخراج و تحلیل متغیرهای برف، ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای و بررسی ارتباط عمق برف و آب معادل برف با عوامل توپوگرافی بود. پردازش داده‌های شبکه‌ای در محیط Google Earth Engine انجام شد و نرم‌افزارهای ArcGIS، Excel و Python برای پردازش‌های مکانی، محاسبات آماری و تهیه نقشه‌ها، نمودارها و سایر خروجی‌های پژوهش به کار رفتند. فرایند کلی گردآوری، آماده‌سازی و تحلیل داده‌ها در نگاره ۳ ارائه شده است.

نشریه علمی پژوهشی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان مریوان با مساحت حدود ۲۳۳۷ کیلومترمربع در غرب استان کردستان و در مجاورت مرز ایران و عراق قرار دارد. تحلیل‌های مکانی پژوهش در سیستم مختصات UTM، زون ۳۸ شمالی انجام شد. شهرستان مریوان بخشی از زاگرس غربی است و ارتفاع آن از حدود ۱۱۹۱ تا ۳۱۵۳ متر از سطح دریا تغییر می‌کند. نواحی مرتفع عمدتاً در بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی شهرستان قرار گرفته‌اند، درحالی‌که بخش‌های مرکزی و غربی از ارتفاع کمتری برخوردارند. تنوع ارتفاع، شیب و جهت دامنه می‌تواند موجب تفاوت در نوع بارش، میزان تجمع و ماندگاری برف و زمان آغاز ذوب شود و درنتیجه، ناهمگنی مکانی ذخیره برفی منطقه را افزایش دهد. موقعیت جغرافیایی شهرستان مریوان در نگاره ۱ ارائه شده است.

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



نگاره ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان مریوان

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

دوره زمانی پژوهش شامل سه دوره سرد چهارماهه دسامبر تا مارس در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۱، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲۴-۲۰۲۳ بود. در هر دوره، ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس بررسی شدند. اگرچه مارس در تقسیم‌بندی هواشناختی نخستین ماه فصل بهار محسوب می‌شود، این ماه با هدف پوشش مرحله گذار از انباشت برف به آغاز ذوب و بررسی تداوم ذخیره برفی در انتهای دوره سرد در تحلیل‌ها لحاظ شد. ازاین‌رو، دوره‌های مورد بررسی در سراسر پژوهش با عنوان «دوره سرد چهارماهه» معرفی شدند. داده‌های ماهانه عمق برف و آب معادل برف از محصول FLDAS-Noah[1] با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه استخراج شدند (McNally et al., 2017). داده‌های روزانه بارش نیز از محصولات CHIRPS[2] با تفکیک مکانی ۰/۰۵ درجه و PERSIANN-CDR[3] با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه دریافت و پس از تجمیع در مقیاس ماهانه، با داده‌های ماهانه ایستگاه هواشناسی مریوان مقایسه شدند. محصول CHIRPS از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات اقلیم‌شناختی و مشاهدات ایستگاهی تولید می‌شود، درحالی‌که PERSIANN-CDR بر مشاهدات چندماهواره‌ای و الگوریتم PERSIANN مبتنی است (Funk et al., 2015; Ashouri et al., 2015). همچنین، متغیرهای ارتفاع، شیب و جهت دامنه از مدل رقومی ارتفاع SRTM[4] با تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شدند (Farr et

[1] . Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System–Noah (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_FLDAS_NOAH01_C_GL_M_V001).
[2] . Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY).
[3] . Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks–Climate Data Record (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_PERSIANN-CDR).
[4] Shuttle Radar Topography Mission (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003).

مقاله
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

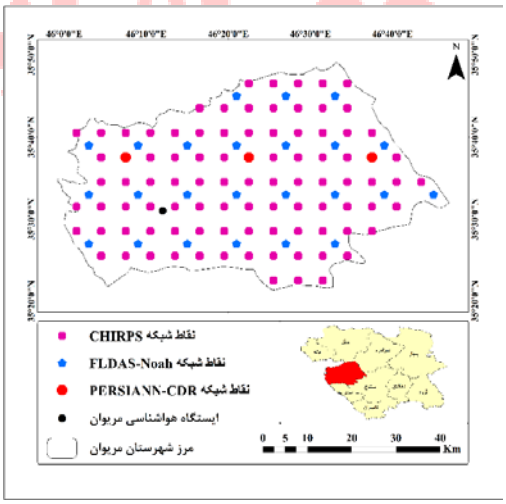
al., 2007). مشخصات کامل داده‌های مورد استفاده، تفکیک مکانی و زمانی، تعداد نقاط شبکه‌ای و کاربرد هر داده در پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده و تعداد نقاط شبکه‌ای واقع در محدوده شهرستان مریوان

نوع داده	محصول یا منبع	تفکیک مکانی	تفکیک زمانی	تعداد نقاط/سلول‌ها در محدوده مریوان	کاربرد در پژوهش
داده شبکه‌ای برف	FLDAS-Noah	۰/۱ درجه	ماهانه	۲٤	استخراج عمق برف و آب معادل برف
بارش ماهواره‌ای	CHIRPS	۰/۰۵ درجه	روزانه، تجمیع ماهانه	۹۳	بررسی و ارزیابی بارش
بارش ماهواره‌ای	PERSIANN-CDR	۰/۲۵ درجه	روزانه، تجمیع ماهانه	۳	بررسی و ارزیابی بارش
بارش مشاهده‌ای	ایستگاه هواشناسی مریوان	نقطه‌ای	ماهانه	۱ ایستگاه	داده مرجع ارزیابی محصولات بارش
مدل رقومی ارتفاع	SRTM DEM	۳۰ متر	ثابت	-	استخراج ارتفاع، شیب و جهت دامنه

مقاله در نوبت انتشار
نسخه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

به‌منظور بررسی پوشش مکانی پایگاه‌های داده مورد استفاده، مراکز پیکسل‌های شبکه اصلی هر محصول استخراج و نقاطی که مرکز آن‌ها در داخل مرز شهرستان مریوان قرار داشت، شمارش شدند. بر این اساس، در محدوده شهرستان مریوان ۲٤ نقطه شبکه‌ای از محصول FLDAS-Noah، ۹۳ نقطه از محصول CHIRPS و ۳ نقطه از محصول PERSIANN-CDR شناسایی شد. همچنین، داده‌های مشاهداتی بارش از تنها ایستگاه هواشناسی شهرستان مریوان دریافت شد. پراکنش مکانی مراکز پیکسل‌های سه محصول شبکه‌ای به همراه موقعیت ایستگاه هواشناسی مریوان در نگاره ۲ ارائه شده است.



نگاره ۲- موقعیت ایستگاه هواشناسی مریوان و پراکنش نقاط شبکه‌ای محصولات FLDAS-Noah ، CHIRPSو PERSIANN-CDR در محدوده شهرستان مریوان

همان‌گونه که در نگاره ۲ مشاهده می‌شود، محصول CHIRPS به دلیل برخورداری از تفکیک مکانی ریزتر، بیشترین تراکم مراکز سلول‌های شبکه‌ای را در محدوده شهرستان مریوان دارد. در مقابل، به دلیل تفکیک مکانی درشت‌تر محصول PERSIANN-CDR، مرکز تنها سه سلول از شبکه اصلی این محصول در داخل مرز شهرستان قرار گرفته است. در این نگاره صرفاً مراکز سلول‌هایی نمایش داده شده‌اند که در داخل مرز شهرستان مریوان واقع شده‌اند.

۲-۳- استخراج و تحلیل عمق برف و آب معادل برف

لایه‌های ماهانه عمق برف و آب معادل برف از مجموعه‌داده FLDAS-Noah برای محدوده شهرستان مریوان استخراج شدند. پس از برش لایه‌ها براساس مرز منطقه مورد مطالعه، میانگین مکانی هر متغیر برای هر ماه محاسبه شد. سپس واحد عمق برف به سانتی‌متر و واحد آب معادل برف به میلی‌متر تبدیل شد و تغییرات زمانی آن‌ها در سه دوره سرد چهارماهه بررسی گردید. برای توصیف تغییرات زمانی عمق برف و آب معادل برف، شاخص‌های آماری شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، ضریب تغییرات، کمینه، بیشینه و چارک‌های اول و سوم محاسبه شدند. ضریب تغییرات از نسبت انحراف معیار به میانگین و ضرب حاصل در ۱۰۰ به دست آمد:

رابطه (۱)
$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

که در آن، CV ضریب تغییرات، SD انحراف معیار و $\bar{X}$ میانگین متغیر مورد بررسی است. همچنین، ارتباط میان میانگین ماهانه عمق برف و آب معادل برف براساس ۱۲ مشاهده ماهانه و با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. ضریب تعیین نیز برای مشخص‌کردن سهم تغییرات مشترک میان این دو متغیر محاسبه گردید.

۲-٤- پردازش و ارزیابی محصولات بارش

داده‌های روزانه CHIRPS و PERSIANN-CDR برای دوره پژوهش استخراج و به مجموع بارش ماهانه تبدیل شدند. سپس مقادیر پیکسل متناظر با موقعیت ایستگاه هواشناسی مریوان با داده‌های مشاهده‌ای همان ایستگاه مقایسه شدند. پیش از انجام محاسبات، تقویم زمانی و واحد اندازه‌گیری سه مجموعه‌داده یکسان‌سازی شد. عملکرد محصولات بارش با استفاده از ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدرمطلق خطا، اریب و ضریب کارایی نش ـ ساتکلیف ارزیابی شد. اریب منفی نشان‌دهنده کم‌برآوردی و اریب مثبت بیانگر بیش‌برآوردی محصول نسبت به داده ایستگاهی است. مقادیر ضریب کارایی نش ـ ساتکلیف نزدیک به یک نشان‌دهنده عملکرد بهتر محصول است، درحالی‌که مقادیر منفی بیان

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

می‌کنند که میانگین مشاهدات ایستگاهی برآورد مناسب‌تری از محصول مورد بررسی ارائه می‌دهد. شاخص‌های ارزیابی بر پایه روابط زیر محاسبه شدند:

رابطه (۲)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}$$

رابطه (۳)
$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i|$$

رابطه (٤)
$$Bias = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)$$

رابطه (٥)
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$$

مقاله در نوبت انتشار

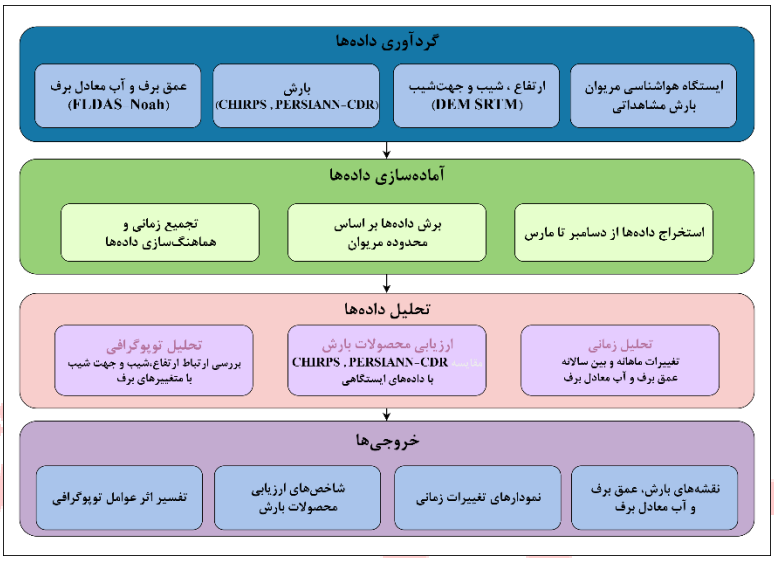
که در این روابط، P_i مقدار برآوردشده محصول بارش، O_i مقدار مشاهده‌شده در ایستگاه، $\bar{O}$ میانگین مشاهدات و n تعداد ماه‌های بررسی‌شده است.

۲-۵- تحلیل عوامل توپوگرافی

نشریه علمی پژوهشی

مدل رقومی ارتفاع SRTM پس از برش براساس مرز شهرستان مریوان برای استخراج لایه‌های ارتفاع، شیب و جهت دامنه به کار رفت. با توجه به تفاوت تفکیک مکانی داده‌های SRTM و FLDAS، تحلیل ارتباط متغیرهای برف با عوامل توپوگرافی در مقیاس شبکه اصلی FLDAS انجام شد. به‌منظور هماهنگ‌سازی مقیاس داده‌ها، اطلاعات ۳۰ متری SRTM در محدوده هر سلول FLDAS تجمیع شدند. برای هر سلول، ارتفاع و شیب به‌صورت میانگین و جهت دامنه به‌صورت طبقه غالب تعیین شد. سپس سلول‌های FLDAS براساس ویژگی‌های توپوگرافی آن‌ها طبقه‌بندی شدند و میانگین عمق برف و آب معادل برف در هر طبقه محاسبه گردید. ارتفاع و شیب در قالب طبقات پیوسته و جهت دامنه در قالب سطوح تخت و هشت جهت اصلی شامل شمال، شمال‌شرقی، شرق، جنوب‌شرقی، جنوب، جنوب‌غربی، غرب و شمال‌غربی طبقه‌بندی شدند. برای کاهش تأثیر تفاوت مساحت طبقات توپوگرافی، میانگین‌های هر طبقه با وزن‌دهی براساس مساحت آن طبقه محاسبه شدند. با توجه به اینکه داده‌های عمق برف و آب معادل برف دارای تفکیک مکانی ۰/۱ درجه هستند، نتایج این بخش بیانگر الگوهای منطقه‌ای ارتباط متغیرهای توپوگرافی با خروجی‌های FLDAS هستند و نباید به‌عنوان برآورد مستقیم عمق برف یا آب معادل برف در تفکیک مکانی ۳۰ متر تفسیر شوند.

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

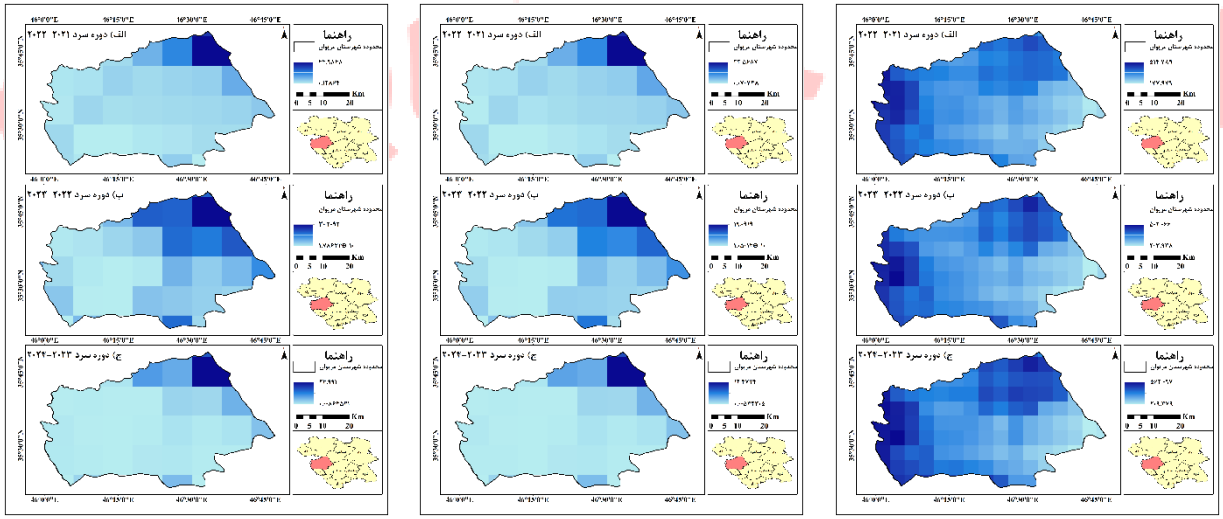


نگاره ۳- فرایند گردآوری، آماده‌سازی، ارزیابی و تحلیل داده‌های پژوهش

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- توزیع مکانی بارش، عمق برف و آب معادل برف

به‌منظور بررسی الگوی مکانی متغیرهای اصلی پژوهش، توزیع مجموع بارش، میانگین عمق برف و میانگین آب معادل برف طی سه دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۲-۲۰۲۱، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲۴-۲۰۲۳ ترسیم شد. با توجه به عملکرد نسبی مناسب‌تر محصول CHIRPS در مقایسه با PERSIANN-CDR براساس شاخص‌های ارزیابی، تحلیل مکانی بارش با استفاده از داده‌های CHIRPS انجام گرفت. نقشه‌های بارش، عمق برف و آب معادل برف به‌ترتیب در نگاره‌های ٤، ٥ و ٦ ارائه شده‌اند.



نگاره ٤- توزیع مکانی مجموع بارش طی دوره‌های سرد چهارماهه ۲۰۲۲-۲۰۲۱، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲٤-۲۰۲۳ در شهرستان مریوان براساس محصول CHIRPS

نگاره ٥- توزیع مکانی میانگین عمق برف طی دوره‌های سرد چهارماهه ۲۰۲۱- ۲۰۲۲، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲٤-۲۰۲۳ در شهرستان مریوان براساس محصول FLDAS-Noah

نگاره ٦- توزیع مکانی میانگین آب معادل برف طی دوره‌های سرد چهارماهه ۲۰۲۱- ۲۰۲۲، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲٤-۲۰۲۳ در شهرستان مریوان براساس محصول FLDAS-Noah

۳-۱-۱- توزیع مکانی بارش

بررسی نقشه‌های مجموع بارش CHIRPS نشان داد که توزیع بارش در هر سه دوره سرد چهارماهه یکنواخت نبوده است. در بیشتر دوره‌ها، مقادیر بالاتر بارش در نواحی غربی و شمال‌غربی شهرستان مشاهده شد، درحالی‌که بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی عموماً مقادیر کمتری داشتند. این الگو می‌تواند با ورود عمده سامانه‌های بارشی از سمت غرب و نحوه تعامل آن‌ها با ناهمواری‌های زاگرس غربی مرتبط باشد. بااین‌حال، به دلیل استفاده‌نشدن از داده‌های جوّی و تحلیل مسیر سامانه‌های بارشی، نمی‌توان سهم مستقل این عوامل را به‌طور قطعی تعیین کرد. مقایسه سه دوره نشان داد که شدت و گستره پهنه‌های پربارش ثابت نبوده است. در دوره ۲۰۲۳-۲۰۲۲، مقادیر نسبتاً زیاد بارش در بخش‌هایی از غرب، شمال و شمال‌شرق شهرستان گسترش بیشتری داشت؛ در دوره ۲۰۲٤-۲۰۲۳ نیز نواحی غربی و شمالی در مقایسه با بخش‌های شرقی بارش بیشتری دریافت کردند. با وجود این، الگوی مکانی ارائه‌شده بیانگر برآورد محصول CHIRPS با تفکیک مکانی ۰/۰۵ درجه است و ممکن است تغییرات محلی بارش در ارتفاعات، دره‌ها و دامنه‌های کوچک را به‌طور کامل بازنمایی نکند.

۳-۱-۲- توزیع مکانی عمق برف

نقشه‌های میانگین عمق برف نشان دادند که در هر سه دوره سرد، مقادیر بیشتر عمدتاً در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی شهرستان متمرکز بوده‌اند. در مقابل، بخش‌های مرکزی، غربی و جنوبی عموماً عمق برف کمتری داشتند. تمرکز مقادیر بیشتر در شمال و شمال‌شرق با استقرار ارتفاعات بالاتر شهرستان در این نواحی همخوان است و می‌تواند تحت تأثیر کاهش دما با افزایش ارتفاع، افزایش سهم بارش جامد و ماندگاری بیشتر برف قرار گرفته باشد. از نظر مقادیر موضعی، بیشترین عمق برف در دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۱ در بخش شمال‌شرقی مشاهده شد؛ بااین‌حال، میانگین منطقه‌ای عمق برف در دوره ۲۰۲۳-۲۰۲۲ بیشتر بود. این تفاوت نشان می‌دهد که بیشینه موضعی یک متغیر لزوماً بیانگر میانگین بیشتر آن در کل شهرستان نیست. در دوره ۲۰۲٤-۲۰۲۳، شدت و گستره پهنه‌های دارای عمق برف زیاد کاهش یافت و بخش بیشتری از شهرستان در طبقات کم‌مقدار قرار گرفت. الگوی درشت و بلوکی نقشه‌ها ناشی از تفکیک مکانی ۰/۱ درجه محصول

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

FLDAS-Noah است. بنابراین، این نقشه‌ها برای شناسایی الگوهای عمومی و مقایسه دوره‌ها مناسب‌اند، اما نباید به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم عمق برف در دامنه‌ها یا نقاط مشخص تفسیر شوند.

۳-۱-۳- توزیع مکانی آب معادل برف

الگوی مکانی آب معادل برف شباهت زیادی به توزیع عمق برف داشت. در هر سه دوره، بیشترین مقادیر عمدتاً در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی شهرستان و کمترین مقادیر در بخش‌های مرکزی، غربی و جنوبی مشاهده شد. این هم‌پوشانی مکانی نشان می‌دهد نواحی دارای عمق برف بیشتر، در بیشتر موارد ذخیره آبی بیشتری نیز داشته‌اند. بیشترین مقدار موضعی آب معادل برف در دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۱ مشاهده شد، اما همانند عمق برف، میانگین منطقه‌ای SWE در دوره ۲۰۲۳-۲۰۲۲ بیشتر بود. در دوره ۲۰۲٤-۲۰۲۳، مقادیر آب معادل برف در بخش عمده شهرستان کاهش یافت و فقط نواحی محدودی در شمال‌شرق دارای مقادیر نسبتاً بیشتر بودند. کاهش هم‌زمان عمق برف و آب معادل برف در این دوره، کاهش ذخیره برفی منطقه را در مقایسه با دو دوره پیشین نشان می‌دهد. با وجود شباهت نقشه‌های عمق برف وSWE ، این دو متغیر یکسان نیستند؛ زیرا آب معادل برف علاوه بر عمق، به چگالی، فشردگی، رطوبت و ساختار توده برف نیز وابسته است. همچنین، به دلیل تفکیک مکانی داده‌های FLDAS-Noah ، نتایج این بخش باید در مقیاس منطقه‌ای تفسیر شوند. در مجموع، الگوی مکانی بارش با توزیع عمق برف و آب معادل برف انطباق کامل نداشت. برخی نواحی دارای بارش بیشتر، الزاماً بیشترین ذخیره برفی را نشان ندادند. این تفاوت بیانگر آن است که مقدار بارش تنها عامل کنترل‌کننده ذخیره برف نیست و نوع بارش، ارتفاع، شرایط حرارتی و فرایندهای ذوب نیز می‌توانند در شکل‌گیری الگوی مکانی برف مؤثر باشند.

۳-۲- تغییرات زمانی عمق برف و آب معادل برف

خلاصه آماری عمق برف و آب معادل برف در سه دوره سرد چهارماهه و کل دوره پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. در مجموع ۱۲ ماه، میانگین عمق برف برابر با ۲/٥٦۳ سانتی‌متر و میانگین آب معادل برف برابر با ٤/٥٦۹ میلی‌متر بود. میانه این دو متغیر به‌ترتیب ۱/۸۱۷ سانتی‌متر و ۳/۳۲۸ میلی‌متر به دست آمد. کمتر بودن میانه از میانگین نشان می‌دهد که توزیع هر دو متغیر تحت تأثیر چند ماه با مقادیر زیاد، به‌ویژه فوریه ۲۰۲۳، قرار گرفته است. ضریب تغییرات عمق برف ۱۰۷/٤٥ درصد و ضریب تغییرات آب معادل برف ۹٦/٤٤ درصد بود که تغییرپذیری زمانی زیاد ذخیره برفی شهرستان مریوان را نشان می‌دهد. این نوسان زیاد بیانگر آن است که شرایط برف در منطقه نه‌تنها میان دوره‌های سرد چهارماهه مختلف، بلکه میان ماه‌های یک زمستان نیز تفاوت قابل‌توجهی دارد. تغییرات دما، نوع و زمان وقوع بارش، ذوب بین‌دوره‌ای و شرایط سطح زمین می‌توانند در شکل‌گیری این تفاوت‌ها مؤثر باشند. نتایج مطالعات انجام‌شده در مناطق کوهستانی ایران

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

نیز نشان داده‌اند که عمق، ماندگاری و زمان ذوب برف تحت تأثیر تغییرات دما و نوع بارش، نوسان مکانی و زمانی زیادی دارند (Nouri & Homaee, 2021; Majidi et al., 2025).

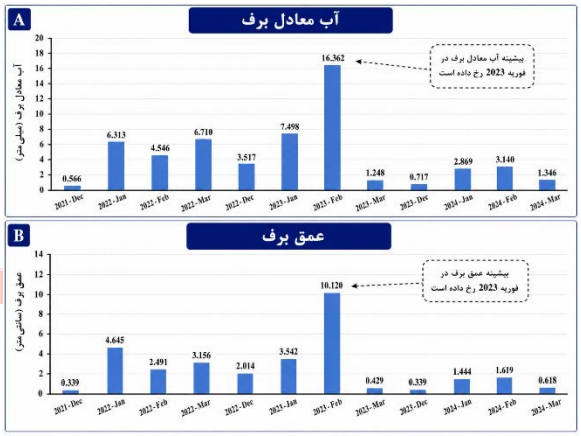
جدول ۲- خلاصه آماری عمق برف و آب معادل برف در سه دوره سرد چهارماهه و کل دوره پژوهش

دوره	متغیر	میانگین	میانه	انحراف معیار	ضریب تغییرات (٪)	حداقل	حداکثر	چارک اول	چارک سوم
۲۰۲۱-۲۰۲۲	عمق برف (cm)	۲/٦٥٧٧	۲/۸۲۳۷	۱/۷۸۹۱	٦٧/۳۱۸۹	۰/۳۳۸٦	٤/٦٤٤٦	۱/٤۱٤۸	۳/۹۰۰٥
۲۰۲۱-۲۰۲۲	SWE (mm)	٤/٥۳۳٦	٥/٤۲۹٤	۲/۸۰۷٦	٦۱/۹۲۸٦	۰/٥٦٥۷	٦/۷۰۹۸	۲/٥٥٥٦	٦/٥۱۱٥
۲۰۲۲-۲۰۲۳	عمق برف(cm)	٤/۰۲٦۱	۲/۷۷۷۹	٤/۲٥٦٦	۱۰٥/۷۲٥٥	۰/٤۲۸۸	۱۰/۱۱۹۸	۱/۲۲۱٥	٦/۸۳۰۷
۲۰۲۲-۲۰۲۳	SWE (mm)	۷/۱٥٦۲	٥/٥۰۷٥	٦/٦٥۸٥	۹۳/۰٤٥٤	۱/۲٤۸۰	۱٦/۳٦۱۸	۲/۳۸۲۷	۱۱/۹۲۹۷
۲۰۲۳-۲۰۲٤	عمق برف(cm)	۱/۰۰٥۲	۱/۰۳۱۲	۰/٦۲۲٦	٦۱/۹۳٦۸	۰/۳۳۹۳	۱/٦۱۹۰	۰/٤۷۸۷	۱/٥۳۱۷
۲۰۲۳-۲۰۲٤	SWE (mm)	۲/۰۱۷۸	۲/۱۰۷۳	۱/۱۷۲۸	٥۸/۱۲۲۹	۰/۷۱۷۱	۳/۱۳۹٦	۱/۰۳۱٤	۳/۰۰٤۳
کل دوره ۱۲ماهه	عمق برف(cm)	۲/٥٦۳۰	۱/۸۱٦٦	۲/۷٥٤۰	۱۰۷/٤٥۱۱	۰/۳۳۸٦	۱۰/۱۱۹۸	۰/٥۲۳٥	۳/۳٤۹۰
کل دوره ۱۲ماهه	SWE (mm)	٤/٥٦۹۲	۳/۳۲۸٤	٤/٤۰٦٥	۹٦/٤٤۰٥	۰/٥٦٥۷	۱٦/۳٦۱۸	۱/۲۹٦۸	٦/٥۱۱٥

بررسی تغییرات ماهانه در نگاره ۷ نشان داد که بیشترین عمق برف و آب معادل برف در فوریه ۲۰۲۳ ثبت شده است. در این ماه، میانگین عمق برف به ۱۰/۱۲۰ سانتی‌متر و آب معادل برف به ۱٦/۳٦۲ میلی‌متر رسید. این مقادیر به‌طور محسوسی بیشتر از سایر ماه‌های دوره بودند و نشان‌دهنده شکل‌گیری بیشترین ذخیره برفی منطقه در میانه دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۲-۲۰۲۳ است. پس از این بیشینه، عمق برف در مارس ۲۰۲۳ به ۰/٤۲۹ سانتی‌متر و SWE به ۱/۲٤۸ میلی‌متر کاهش یافت. کاهش سریع این دو متغیر می‌تواند با افزایش دما، ذوب سریع توده برف، فشردگی برف یا تغییر سهم بارش جامد به مایع در پایان دوره سرد مرتبط باشد. بااین‌حال، به دلیل نبود داده‌های دمایی و مشاهدات زمینی مستقیم برف، تعیین سهم مستقل هر عامل امکان‌پذیر نیست. در دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۲-۲۰۲۱، میانگین عمق برف ۲/٦٥۸ سانتی‌متر و میانگین SWE برابر با ٤/٥۳٤ میلی‌متر بود. در دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۳-۲۰۲۲، این مقادیر به‌ترتیب به ٤/۰۲٦ سانتی‌متر و ۷/۱٥٦ میلی‌متر افزایش یافت و این دوره بیشترین ذخیره برفی را در دوره پژوهش داشت. در مقابل، دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۳-۲۰۲٤ با میانگین عمق برف ۱/۰۰٥ سانتی‌متر و SWE برابر با ۲/۰۱۸ میلی‌متر، کمترین ذخیره برفی را نشان داد. کاهش ذخیره برف در دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۳-۲۰۲٤ با وجود ثبت بیشترین مجموع بارش ایستگاهی در همین زمستان، نشان می‌دهد که مجموع بارش به‌تنهایی تعیین‌کننده مقدار ذخیره برفی نیست. زمان وقوع بارش، سهم بارش جامد، دمای

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

هوا و شدت ذوب میان‌دوره‌ای نیز در تبدیل بارش به ذخیره برف نقش دارند. بنابراین، بارش زیاد لزوماً به افزایش هم‌زمان عمق برف و SWE منجر نمی‌شود. این نتیجه با یافته‌های نوری و همایی (۲۰۲۱)، همخوان است که افزایش دما و تغییر زمان ذوب را از عوامل اصلی کاهش شاخص‌های برفی در مناطق کوهستانی ایران معرفی کردند.



نگاره ۷- تغییرات ماهانه میانگین عمق برف و آب معادل برف در شهرستان مریوان

ازآنجاکه FLDAS یک محصول مدل‌محور با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه است، مقادیر به‌دست‌آمده باید در مقیاس منطقه‌ای تفسیر شوند. این مقادیر معادل اندازه‌گیری مستقیم عمق برف در یک نقطه یا دامنه مشخص نیستند، اما برای مقایسه نسبی ماه‌ها و دوره‌های سرد چهارماهه مختلف و شناسایی دوره‌های دارای ذخیره برفی بیشتر یا کمتر مناسب‌اند (McNally et al., 2017).

۳-۳- رابطه عمق برف و آب معادل برف

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد میان میانگین ماهانه عمق برف و آب معادل برف رابطه مستقیم، بسیار قوی و معنی‌داری وجود دارد. ضریب همبستگی پیرسون برابر با ۰/۹۸۵ و ضریب تعیین برابر با ۰/۹۷۱ به دست آمد و رابطه در سطح کمتر از ۰/۰۰۱ معنی‌دار بود:

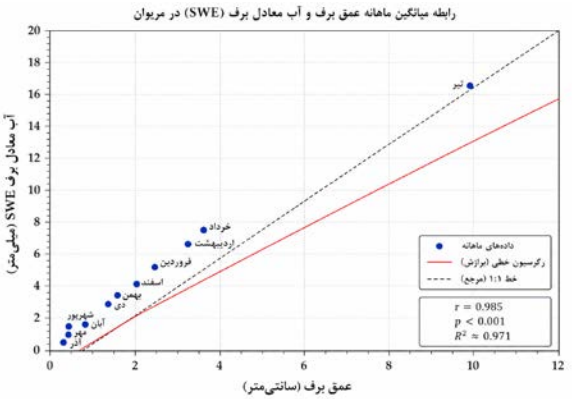
$$r = 0.985 \qquad R^2 = 0.971 \qquad p < 0.001$$

براساس مدل رگرسیون خطی، رابطه میان این دو متغیر به‌صورت زیر به دست آمد:

$$SWE = 0.528 + 1.577(SD)$$

مقاله منتشر شده در نشریه علمی پژوهشی «اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

که در آن SD عمق برف بر حسب سانتی‌متر و SWE آب معادل برف بر حسب میلی‌متر است. ضریب تعیین نشان می‌دهد حدود ۹۷/۱ درصد تغییرات ماهانه SWE در مجموعه داده مورد بررسی با تغییرات عمق برف همراه بوده است. بنابراین، ماه‌هایی که عمق برف بیشتری داشته‌اند، معمولاً دارای آب معادل برف بیشتری نیز بوده‌اند.



نگاره ۸- رابطه میانگین ماهانه عمق برف و آب معادل برف در شهرستان مریوان

با وجود این ارتباط قوی، عمق برف و SWE دو مفهوم یکسان نیستند. آب معادل برف علاوه بر عمق، به چگالی، میزان فشردگی، رطوبت و ساختار توده برف وابسته است. به همین دلیل، دو توده برفی با عمق یکسان ممکن است ذخیره آبی متفاوتی داشته باشند. ارتباط بسیار قوی مشاهده‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات زمانی عمق و SWE در خروجی FLDAS هماهنگ بوده است، اما برای تبدیل عمق برف به ذخیره آبی در مطالعات کاربردی، توجه به تغییرات چگالی برف همچنان ضروری است (Winkler et al., 2021).

۳-٤- ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای

خلاصه آماری بارش ایستگاه مریوان و محصولات CHIRPS و PERSIANN-CDR در جدول ۳ ارائه شده است. مجموع بارش ثبت‌شده در ایستگاه مریوان طی ۱۲ ماه برابر با ۱۶۹۶/۹۳ میلی‌متر بود. در همین دوره، CHIRPS مجموع بارش را ۹۸۰/۷۲ میلی‌متر و PERSIANN-CDR آن را ۷۳۱/٤٥ میلی‌متر برآورد کردند. در نتیجه، CHIRPS حدود ٤۲/۲ درصد و PERSIANN-CDR حدود ٥٦/۹ درصد کمتر از مقدار ایستگاهی بارش را ثبت کرده‌اند. میانگین ماهانه بارش ایستگاهی برابر با ۱٤۱/٤۱ میلی‌متر بود، درحالی‌که میانگین CHIRPS و PERSIANN-CDR به‌ترتیب ۸۱/۷۳ و ٦۰/۹٥ میلی‌متر به دست آمد. بیشینه بارش ماهانه ایستگاه ۲۷٦/۱۱ میلی‌متر بود، اما بیشینه‌های ثبت‌شده در CHIRPS و PERSIANN-CDR به‌ترتیب ۱۷۲/۸٤ و ۱۱۹/۹۷ میلی‌متر بودند. این اختلاف‌ها تمایل هر دو محصول به کم‌برآوردی بارش منطقه را نشان می‌دهند.

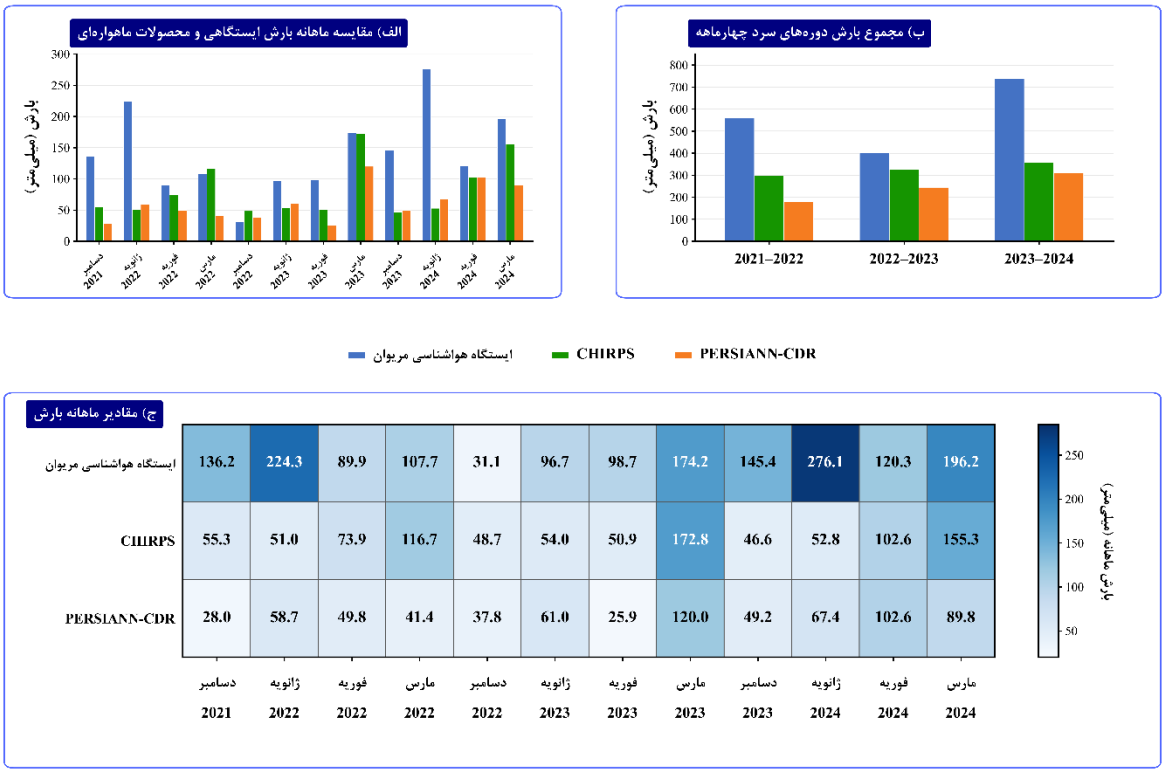
جدول ۳- خلاصه آماری بارش ایستگاهی و محصولات CHIRPS و PERSIANN-CDR در دوره پژوهش

مقاله منتشر
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

منبع داده	مجموع ۱۲ ماهه (میلی‌متر)	میانگین‌ماهانه (میلی‌متر)	میانه (میلی‌متر)	انحراف معیار	ضریب تغییرات (٪)	کمینه (میلی‌متر)	بیشینه (میلی‌متر)
ایستگاه زمینی	۱۶۹۶/۸	۱۴۱/۴۰	۱۲۸/۲۵	۶۶/۹۹	۴۷/۳۷	۳۱/۱	۲۷۶/۱
CHIRPS	۹۸۰/۶	۸۱/۷۲	۵۴/۶۵	۴۴/۶۷	۵۴/۶۷	۴۶/۶	۱۲۷/۸
PERSIANN-CDR	۷۳۱/۶	۶۰/۹۷	۵۴/۲۵	۲۹/۵۳	۴۸/۴۴	۲۵/۹	۱۲۰/۰

بررسی مقادیر بارش در سه دوره سرد چهارماهه نشان داد که مجموع بارش ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی مریوان طی دوره‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۱، ۲۰۲۳-۲۰۲۲ و ۲۰۲۴-۲۰۲۳ به‌ترتیب برابر با ۵۵۸/۱۴، ۴۰۰/۷۷ و ۷۳۸/۰۲ میلی‌متر بوده است. مقادیر متناظر برآوردشده توسط محصول CHIRPS به‌ترتیب ۲۹۶/۹۸، ۳۲۶/۴۱ و ۳۵۷/۳۴ میلی‌متر و مقادیر برآوردشده توسط محصول PERSIANN-CDR به‌ترتیب ۱۷۷/۷۹، ۲۴۴/۶۴ و ۳۰۹/۰۲ میلی‌متر به‌دست آمد. بیشترین اختلاف میان داده‌های ایستگاهی و محصولات ماهواره‌ای در دوره سرد ۲۰۲۴-۲۰۲۳ مشاهده شد. در این دوره، ایستگاه هواشناسی مریوان بیشترین مقدار بارش را ثبت کرد، اما افزایش متناظر در برآوردهای دو محصول ماهواره‌ای بسیار محدودتر بود. برای نمونه، در ژانویه ۲۰۲۴ مقدار بارش ایستگاهی ۲۷۶/۱۱ میلی‌متر ثبت شد، درحالی‌که محصولات CHIRPS و PERSIANN-CDR به‌ترتیب تنها ۵۲/۷۷ و ۶۷/۴۱ میلی‌متر بارش را برآورد کردند. در مقابل، در مارس ۲۰۲۳، مقدار CHIRPS برابر با ۱۷۲/۸۴ میلی‌متر و بسیار نزدیک به بارش ایستگاهی ۱۷۴/۲۰ میلی‌متر بود. این نتایج نشان می‌دهد عملکرد محصولات از یک ماه به ماه دیگر ثابت نیست و بخش مهمی از خطای کلی آن‌ها به ضعف در بازنمایی بعضی ماه‌های پربارش مربوط است.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



نگاره ۹- مقایسه بارش ماهانه و دوره سرد چهارماهه ایستگاه مریوان با محصولات CHIRPS و PERSIANN-CDR

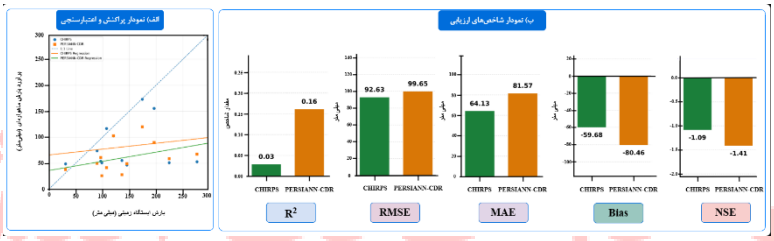
شاخص‌های ارزیابی محصولات در جدول ٤ و نگاره ۱۰ ارائه شده‌اند. ضریب تعیین برای CHIRPS برابر با ۰/۰۳ و برای PERSIANN-CDR برابر با ۰/۱٦ بود. اگرچه PERSIANN-CDR از نظر ضریب تعیین ارتباط خطی بیشتری با داده ایستگاهی نشان داد، مقادیر خطای آن بیشتر بود. RMSE برای CHIRPS و PERSIANN-CDR به‌ترتیب ۹۲/٦۳ و ۹۹/٦۵ میلی‌متر و MAE آن‌ها به‌ترتیب ٦٤/۱۳ و ۸۱/۵۷ میلی‌متر به دست آمد. اریب هر دو محصول منفی بود. مقدار Bias برای CHIRPS برابر با ۵۹/٦۸- میلی‌متر و برای PERSIANN-CDR برابر با ۸۰/٤٦- میلی‌متر بود که کم‌برآوردی نظام‌مند هر دو محصول را تأیید می‌کند. مقادیر NSE نیز برای CHIRPS و PERSIANN-CDR به‌ترتیب ۱/۰۹- و ۱/٤۱- محاسبه شد. منفی‌بودن NSE نشان می‌دهد که در دوره بررسی‌شده، استفاده از میانگین بارش مشاهده‌ای نسبت به مقادیر ماهانه این محصولات، برآورد مناسب‌تری فراهم می‌کرد.

جدول ٤- شاخص‌های ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای در مقایسه با ایستگاه مریوان

محصول	R^2	RMSE (mm)	MAE (mm)	Bias (mm)	NSE
CHIRPS	۰/۰۳	۹۲/٦۳	٦٤/۱۳	-۵۹/٦۸	-۱/۰۹
PERSIANN-CDR	۰/۱٦	۹۹/٦۵	۸۱/۵۷	-۸۰/٤٦	-۱/٤۱

سریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

در مجموع، هیچ‌یک از دو محصول عملکرد مطلوبی در بازنمایی بارش ماهانه مریوان نداشتند. بااین‌حال، CHIRPS براساس RMSE، MAE، Bias و NSE عملکرد کلی مناسب‌تری نسبت به PERSIANN-CDR ارائه کرد. بنابراین، بالاتر بودن R^2 در PERSIANN-CDR به‌تنهایی برای معرفی آن به‌عنوان محصول برتر کافی نیست؛ زیرا ضریب تعیین فقط میزان همراهی خطی تغییرات را بیان می‌کند و اندازه خطا یا اریب را نشان نمی‌دهد.

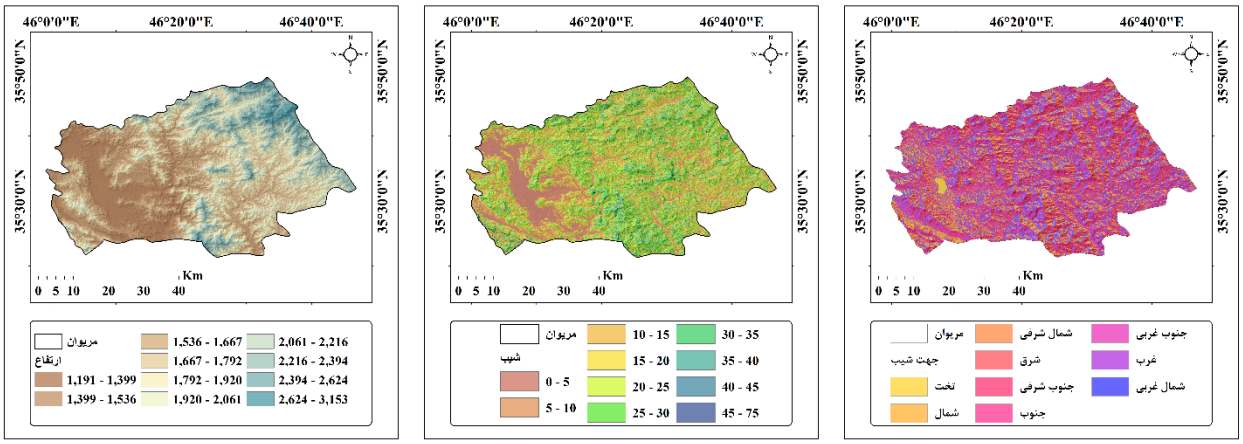


نگاره ۱۰- نمودار پراکنش و مقایسه شاخص‌های ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای

ضعف محصولات در منطقه مریوان می‌تواند با ناهمواری پیچیده، وقوع بارش‌های کوهستانی، تفاوت مقیاس نقطه‌ای ایستگاه با پیکسل محصولات و محدودیت الگوریتم‌های ماهواره‌ای در تشخیص بارش‌های شدید و جامد مرتبط باشد. نتایج مطالعات انجام‌شده در ایران نیز نشان داده‌اند که عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای از نظر مکانی و زمانی یکنواخت نیست و محصولات ممکن است در مناطق کوهستانی و ماه‌های پربارش با کم‌برآوردی مواجه شوند (Saeidizand et al., 2018; Tosan et al., 2026; Nikoo et al., 2026). بر این اساس، استفاده از CHIRPS و PERSIANN-CDR در مدل‌سازی برف و منابع آب مریوان به تصحیح اریب و ارزیابی محلی نیاز دارد و این محصولات نباید بدون کالیبراسیون جایگزین مستقیم داده‌های ایستگاهی شوند.

۳-۵- ارتباط عوامل توپوگرافی با عمق برف و آب معادل برف

نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت دامنه استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع SRTM در نگاره ۱۱ و توزیع مساحت طبقات و میانگین متغیرهای برف در جدول ۵ ارائه شده‌اند. نتایج نشان داد که رابطه عمق برف و SWE با طبقات توپوگرافی در همه عوامل یکسان نیست. ارتفاع منظم‌ترین الگو را نشان داد، درحالی‌که اثر شیب غیرخطی بود و اختلاف میان جهت‌های اصلی دامنه محدودتر مشاهده شد.



نگاره ۱۱- نقشه‌های توپوگرافی شهرستان مریوان: الف) ارتفاع، ب) شیب و ج) جهت دامنه

جدول ۵- توزیع مساحت طبقات توپوگرافی و میانگین عمق برف و آب معادل برف در شهرستان مریوان

الف) توزیع طبقات ارتفاعی و میانگین متغیرهای برف				
طبقه	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت	میانگین عمق برف (سانتی‌متر)	میانگین آب معادل برف (میلی متر)
۱۱۹۱-۱۳۹۹	۳٤۰/۸۳	۱٤/۵۸	۰/٤۳٤	۰/۷۷٤
۱۳۹۹/۱- ۱۵۳٦	۳۱۳/۰۲	۱۳/۳۹	۰/٦۲٦	۱/۱۲
۱۵۳٦/۱-۱٦٦۷	۳۱۱/٤	۱۳/۳۲	۱/۰۲۵	۱/۸٤۱
۱٦٦۷/۱-۱۷۹۲	۳۳٦/۸۳	۱٤/٤۱	۱/۵۱۷	۲/۷۱۳
۱۷۹۲/۱-۱۹۲۰	۳۰۸/۳۵	۱۳/۱۹	۲/۱۵۲	۳/۸۲٦
۱۹۲۰/۱-۲۰٦۱	۲٤۵/۹۹	۱۰/۵۲	۳/۳۵۵	۵/۹٤٦
۲۰٦۱/۱-۲۲۱٦	۱۹۲/٦٦	۸/۲٤	٤/۵۷۵	۸/۱۳۱
۲۲۱٦/۱-۲۳۹٤	۱۵۸/٦۲	٦/۷۹	٦/۱۱۲	۱۰/۸۸۵
۲۳۹٤/۱-۲٦۲٤	۹۰/۰۵	۳/۸۵	۹/۹۷۹	۱۷/۸۵٦
۲٦۲٤/۱-۳۱۵۳	۳۹/۵۸	۱/٦۹	۱۵/۱۹۷	۲۷/۱۸۱
ب) توزیع طبقات شیب و میانگین متغیرهای برف				
طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت	میانگین عمق برف (سانتی متر)	میانگین آب معادل برف (میلی متر)
۵-۰	۲۵۵/۷۵	۱۰/۹٤	۰/۹٤۳	۱/٦٦۸

نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۵–۱۰	۲۵٤/۵٦	۱۰/۸۹	۱/۹٤۷	۳/٤٦٤
۱۰–۱۵	۳۲۷/۲۸	۱٤	۲/٤۱	٤/۲۸۵
۱۵–۲۰	٤۳۱/٦۵	۱۸/٤۷	۲/۷۱۷	٤/۸۳۷
۲۰–۲۵	٤۷۲/۲۲	۲۰/۲	۳/۰٦	۵/٤۵۸
۲۵–۳۰	۳۵٤/۵۵	۱۵/۱۷	۳/۳٤٦	۵/۹۸۵
۳۰–۳۵	۱٦٤/۵۷	۷/۰٤	۳/٤۹۲	٦/۲٦۵
۳۵–٤۰	۵۳/۲٤	۲/۲۸	۳/۵۹۱	٦/٤۵٦
٤۰–٤۵	۱٤/۷۹	۰/٦۳	۳/۲٤۳	۵/۸٤٦
٤۵–۷٦	٦/۰۹	۰/۲٦	۱/۷۵۸	۳/۱۷٤
ج) توزیع جهت‌های دامنه و میانگین متغیرهای برف				
طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت	میانگین عمق‌برف (سانتی متر)	میانگین آب معادل برف (میلی متر)
تخت	۱٦/٦۱	۰/۷۱	۰/۵۹٦	۱/۰۳۲
شمال	۲۵۸/٦۳	۱۱/۰۷	۲/۵۳٤	٤/۵۲٤
شمال شرقی	۲٦۵/۳۹	۱۱/۳۵	۲/۳۷	٤/۲۳۵
شرق	۲۹۳/۱۱	۱۲/۵٤	۲/۵۰۳	٤/٤۵٤
جنوب شرق	۲۹۰/٦۱	۱۲/٤۳	۲/۷۷۱	٤/۹۲۹
جنوب	۳۳۵/۱۱	۱٤/۳٤	۲/٦۳۸	٤/٦۹٦
جنوب غرب	۳۱۳/۸٦	۱۳/٤۳	۲/۵۲٦	٤/۵۱
غرب	۳۰٦.۷۲	۱۳/۱۲	۲/٦۲	٤/٦۷۵
شمال غرب	۲۵٤/٦۵	۱۰/۹	۲/٦٦٤	٤/۷۵

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۳–۵–۱– اثر ارتفاع

با افزایش ارتفاع، میانگین عمق برف و آب معادل برف به‌صورت پیوسته افزایش یافت. در پایین‌ترین طبقه ارتفاعی، یعنی ۱۱۹۱ تا ۱۳۹۹ متر، میانگین عمق برف ۰/٤۳٤ سانتی‌متر و میانگین SWE برابر با ۰/۷۷٤ میلی‌متر بود. این مقادیر در طبقه

۱۹۲۰/۱ تا ۲۰۶۱ متر به‌ترتیب به ۳/۳۵۵ سانتی‌متر و ۵/۹٤٦ میلی‌متر و در طبقه ۲۳۹٤/۱ تا ۲٦۲٤ متر به ۹/۹۷۹ سانتی‌متر و ۱۷/۸۵٦ میلی‌متر افزایش یافتند. بیشترین مقادیر در طبقه ۲٦۲٤/۱ تا ۳۱۵۳ متر ثبت شد؛ به‌طوری‌که میانگین عمق برف به ۱۵/۱۹۷ سانتی‌متر و SWE به ۲۷/۱۸۱ میلی‌متر رسید. بنابراین، مقدار هر دو متغیر در بالاترین طبقه ارتفاعی حدود ۳۵ برابر پایین‌ترین طبقه بود. این طبقه تنها ۱/٦۹ درصد از مساحت شهرستان را شامل می‌شود، اما بیشترین میانگین ذخیره برفی را در خود جای داده است. افزایش ذخیره برف با ارتفاع می‌تواند ناشی از کاهش دما، افزایش احتمال بارش جامد و تأخیر در آغاز ذوب باشد. نتایج تونگ و همکاران (۲۰۰۹)، شرستا و همکاران (۲۰۱۲) و گائو و همکاران (۲۰۲۱) نیز ارتفاع را یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تجمع و ماندگاری برف در حوضه‌های کوهستانی معرفی کرده‌اند. بااین‌حال، الگوی مشاهده‌شده باید در مقیاس منطقه‌ای تفسیر شود و به معنای اندازه‌گیری مستقیم برف در همه پیکسل‌های ۳۰ متری نیست.

۳-۵-۲- اثر شیب

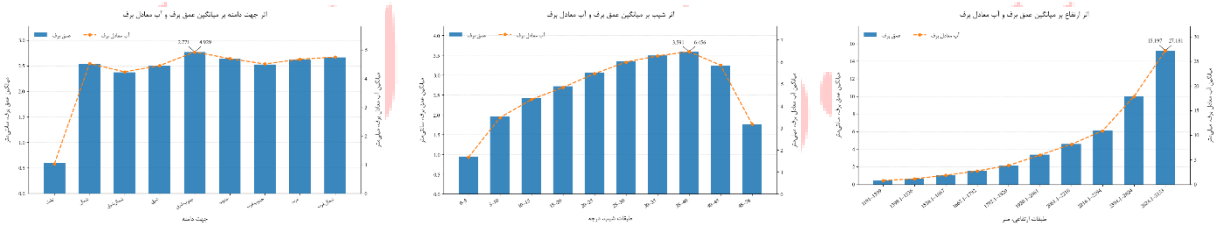
رابطه عمق برف و SWE با شیب، الگویی افزایشی و سپس کاهشی نشان داد. میانگین عمق برف از ۰/۹٤۳ سانتی‌متر در شیب صفر تا ۵ درجه به ۱/۹٤۷ سانتی‌متر در طبقه ۵ تا ۱۰ درجه و ۳/۰٦۰ سانتی‌متر در طبقه ۲۰ تا ۲۵ درجه افزایش یافت. بیشترین عمق برف، معادل ۳/۵۹۱ سانتی‌متر، در طبقه شیب ۳۵ تا ٤۰ درجه مشاهده شد. میانگین SWE نیز در همین طبقه به بیشترین مقدار، یعنی ٦/٤۵٦ میلی‌متر، رسید. پس از این طبقه، عمق برف و SWE کاهش یافتند؛ به‌طوری‌که در شیب ٤۰ تا ٤۵ درجه، مقادیر به ۳/۲٤۳ سانتی‌متر و ۵/۸٤٦ میلی‌متر و در شیب ٤۵ تا ۷٦ درجه به ۱/۷۵۸ سانتی‌متر و ۳/۱۷٤ میلی‌متر رسیدند. کاهش مقادیر در دامنه‌های بسیار پرشیب می‌تواند با ناپایداری توده برف، جابه‌جایی برف به‌وسیله باد و گرانش و کاهش امکان تجمع پایدار مرتبط باشد. بیشترین مساحت شهرستان در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه قرار داشت. بنابراین، اگرچه بیشترین میانگین عمق و SWE در طبقه ۳۵ تا ٤۰ درجه ثبت شد، بخش قابل‌توجهی از ذخیره برفی کل منطقه احتمالاً در دامنه‌های متوسط قرار دارد؛ زیرا این دامنه‌ها سطح بسیار بیشتری را پوشش می‌دهند. ازاین‌رو، میانگین هر طبقه و مقدار کل ذخیره برف در آن طبقه نباید یکسان در نظر گرفته شوند.

۳-۵-۳- اثر جهت دامنه

در میان طبقات جهت دامنه، سطوح تخت کمترین مقدار عمق برف و SWE را داشتند؛ میانگین عمق برف در این سطوح ۰/۵۹٦ سانتی‌متر و SWE برابر با ۱/۰۳۲ میلی‌متر بود. در میان جهت‌های اصلی، بیشترین مقادیر در دامنه‌های جنوب‌شرقی مشاهده شد که میانگین عمق برف آن‌ها ۲/۷۷۱ سانتی‌متر و میانگین SWE آن‌ها ٤/۹۲۹ میلی‌متر بود. پس از دامنه‌های جنوب‌شرقی، بیشترین مقادیر در دامنه‌های شمال‌غربی ثبت شد که عمق برف و SWE آن‌ها به‌ترتیب ۲/٦٦٤ سانتی‌متر و ٤/۷۵۰ میلی‌متر بود. کمترین مقادیر میان جهت‌های اصلی در دامنه‌های شمال‌شرقی مشاهده شد؛ بااین‌حال، دامنه تغییرات

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

عمق برف میان جهت‌های اصلی فقط از ۲/۳۷۰ تا ۲/۷۷۱ سانتی‌متر و تغییرات SWE از ٤/۲۳۵ تا ٤/۹۲۹ میلی‌متر بود. این اختلاف محدود نشان می‌دهد که جهت دامنه در مقایسه با ارتفاع، ارتباط ضعیف‌تری با تغییرات ذخیره برف داشته است. بیشتربودن مقادیر در دامنه‌های جنوب‌شرقی برخلاف انتظار عمومی درباره ماندگاری بیشتر برف در دامنه‌های شمالی است. این نتیجه می‌تواند ناشی از توزیع نامتوازن ارتفاع و شیب در جهت‌های مختلف، مسیر باد، بازتوزیع برف یا تفکیک مکانی درشت داده‌های FLDAS باشد. بنابراین، نباید اثر مشاهده‌شده را صرفاً به جهت دامنه نسبت داد و برای تعیین اثر مستقل آن، استفاده از تحلیل چندمتغیره و داده‌های برف با تفکیک مکانی بالاتر ضروری است.



نگاره ۱۲- تغییرات میانگین عمق برف و آب معادل برف در طبقات ارتفاع، شیب و جهت دامنه

٤- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی و مکانی عمق برف و آب معادل برف، ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای و تحلیل ارتباط ذخیره برفی با عوامل توپوگرافی در شهرستان مریوان طی سه دوره سرد چهارماهه ۲۰۲۲-۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳-۲۰۲٤ انجام شد. نتایج نشان داد ذخیره برفی منطقه از تغییرپذیری زمانی زیادی برخوردار است؛ به‌طوری‌که دوره سرد ۲۰۲۳-۲۰۲۲ بیشترین و دوره ۲۰۲٤-۲۰۲۳ کمترین میانگین عمق برف و آب معادل برف را داشت و بیشینه هر دو متغیر در فوریه ۲۰۲۳ ثبت شد. میان عمق برف و آب معادل برف رابطه‌ای مستقیم، بسیار قوی و معنی‌دار وجود داشت؛ بااین‌حال، به دلیل وابستگی آب معادل برف به چگالی، فشردگی و ویژگی‌های فیزیکی توده برفی، عمق برف به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر کامل ذخیره آبی برف باشد. ارزیابی محصولات بارش نشان داد CHIRPS و PERSIANN-CDR بارش ایستگاه مریوان را به‌ترتیب حدود ٤۲/۲ و ٥٦/۹ درصد کم‌برآورد کردند. اگرچه PERSIANN-CDR ضریب تعیین بیشتری داشت، CHIRPS براساس شاخص‌های RMSE، MAE، Bias و NSE عملکرد نسبی مناسب‌تری نشان داد؛ بااین‌حال، هیچ‌یک از این محصولات بدون تصحیح اریب و ارزیابی محلی، جایگزین مناسبی برای داده‌های ایستگاهی نیستند. در میان عوامل توپوگرافی، ارتفاع منظم‌ترین ارتباط را با متغیرهای برف داشت و بیشترین مقادیر در طبقه ارتفاعی ۲٦۲٤/۱ تا ۳۱٥۳ متر مشاهده شد. اثر شیب تا طبقه ۳٥ تا ٤۰ درجه افزایشی و پس از آن کاهشی بود، درحالی‌که اختلاف میان جهت‌های دامنه محدودتر بود. در مجموع، تلفیق داده‌های FLDAS-Noah، محصولات بارش، داده‌های ایستگاهی و اطلاعات توپوگرافی می‌تواند شناخت مناسبی از تغییرات ذخیره برفی مریوان فراهم کند؛ هرچند به دلیل تفکیک مکانی داده‌ها، استفاده از یک ایستگاه و نبود مشاهدات زمینی مستقیم برف، نتایج باید در مقیاس منطقه‌ای تفسیر شوند.

نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

منابع

Asghari saraskanrood S, Modirzadeh R. Estimation of Snow Cover Level in Ardebil and Sarein Cities Using Sensor Data Sentinel2 MSI Satellite. jwss 2021; 25 (3) :115-130.

Asghari Saraskanrood, S. , Safari, S. and Mollanouri, E. (2021). Measuring snow depth and investigating the temperature component about snow characteristics. *Journal of Water and Soil Conservation*, *28*(4), 187-206.

Asghari Saraskanroud, S. , khonkham, S. and abdi, O. (2024). Evaluation of water indicators using Landsat and Sentinel satellite images (case area: Zaribar Lake). *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, *4*(12), 115-95. doi: 10.22034/rsgi.2024.64194.1111

Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., ... & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *96*(1), 69-83.

Cui, G., Anderson, M., & Bales, R. (2023). Mapping of snow water equivalent by a deep-learning model assimilating snow observations. *Journal of Hydrology*, *616*, 128835.

Fair, Z., Vuyovich, C., Neumann, T., Pflug, J., Shean, D., Enderlin, E. M., ... & Treichler, D. (2025). using spaceborne lidar for snow depth retrievals: recent findings and utility for hydrologic applications. *The Cryosphere*, *19*(11), 5671-5691.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, *45*(2).

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, *2*(1), 150066.

Gao, L., Zhang, L., Shen, Y., Zhang, Y., Ai, M., & Zhang, W. (2021). Modeling snow depth and snow water equivalent distribution and variation characteristics in the Irtysh River Basin, China. *Applied Sciences*, *11*(18), 8365.

Gharaei-Manesh, S., Fathzadeh, A., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2016). Comparison of artificial neural network and decision tree models in estimating spatial distribution of snow depth in a semi-arid region of Iran. *Cold Regions Science and Technology*, *122*, 26-35.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, *202*, 18-27.

Maheswor Shrestha, M. S., Wang Lei, W. L., Koike, T., Xue, Y. K., & Hirabayashi, Y. (2012). Modeling the spatial distribution of snow cover in the Dudhkoshi region of the Nepal Himalayas.

Majidi, F., Sabetghadam, S., Gharaylou, M., & Rezaian, R. (2025). Evaluation of the performance of ERA5, ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis to estimate snow depth over a mountainous semi-arid region in Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *58*, 102246.

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), 170012.

Nikoo, M. R., Tosan, M., Nazari, R., Vahabzadeh, M., Karimi, M., & Zarrinabadi, E. (2026). Assessing the fidelity of multi-satellite precipitation estimates for drought monitoring in a mountain water tower to arid basin system. *Journal of Arid Environments*, *232*, 105519.

Nouri, M., & Homaee, M. (2021). Spatiotemporal changes of snow metrics in mountainous data-scarce areas using reanalyses. *Journal of Hydrology*, *603*, 126858.

Sabetghadam, S., Fletcher, C., & Erler, A. (2024). The importance of model horizontal resolution for improved estimation of snow water equivalent in a mountainous region of western Canada. *EGUsphere*, *2024*, 1-19.

Saeidizand, R., Sabetghadam, S., Tarnavsky, E., & Pierleoni, A. (2018). Evaluation of CHIRPS rainfall estimates over Iran. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144*(S1), 282–291.

Schilling, S., Dietz, A., & Kuenzer, C. (2024). Snow Water Equivalent Monitoring—A Review of Large-Scale Remote Sensing Applications. *Remote Sensing*, *16*(6), 1085. https://doi.org/10.3390/rs16061085

Tabari, H., Marofi, S., Abyaneh, H. Z., & Sharifi, M. R. (2010). Comparison of artificial neural network and combined models in estimating spatial distribution of snow depth and snow water equivalent in Samsami basin of Iran. *Neural Computing and Applications*, *19*(4), 625-635.

Tong, J., Déry, S. J., & Jackson, P. L. (2009). Topographic control of snow distribution in an alpine watershed of western Canada inferred from spatially-filtered MODIS snow products. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(3), 319-326.

Tosan, M., Gharib, M. R., Mardani, M., & Sabbagh, A. (2026). Spatiotemporal performance and error analysis of satellite precipitation products over a topographically complex semi-arid region in Iran. *Journal of Mountain Science*, *23*(1), 118-138.

Treichler, D., & Kääb, A. (2017). Snow depth from ICESat laser altimetry—A test study in southern Norway. *Remote Sensing of Environment*, *191*, 389–401.

Vafakhah, M., Nasiri Khiavi, A., Janizadeh, S., & Ganjkhanlo, H. (2022). Evaluating different machine learning algorithms for snow water equivalent prediction. *Earth Science Informatics*, *15*(4), 2431–2445.

Winkler, M., Schellander, H., & Gruber, S. (2021). Snow water equivalents exclusively from snow depths and their temporal changes: the Δ snow model. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(3), 1165-1187.

Yang, T., Chen, X., Hamdi, R., Li, L., Cui, F., De Maeyer, P., & Duan, W. (2025). Rainfall-driven extreme snowmelt will increase in the Tianshan and Pamir regions under future climate projection. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *130*(1), e2024JD042323.

Zeinali, B., Khonkham, S., & Asghari Saraskanroud, S. (2025). Integrated remote sensing analysis of snow cover and topographic influences in mountainous regions (Case study: Marivan County, Iran). *پژوهشهای دانش زمین 16*, 182-192.

Zhang, J., Yang, M., Dong, N., & Wang, Y. (2025). Machine-learning-based ensemble prediction of the snow water equivalent in the upper Yalong River basin. *Sustainability*, *17*(9), 3779.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»