



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 36, Issue 3, No.99, 2025, pp. 93- 126

Received: 23/09/2024 Accepted: 15/07/2025

Impacts of Solar Irradiance and Geopotential Height on Snow Cover in the Karun and Marun River Basins

Nezam Tani

Ph.D. student, Department of Meteorology, University of Yazd, Yazd, Iran
nezamyas@gmail.com

Kamal Omidvar  *

Ph.D., Department of Meteorology, University of Yazd, Yazd, Iran
komidvar@yazd.ac.ir

Golamali Mozafari Mozafari

Ph.D., Department of Meteorology, University of Yazd, Yazd, Iran
gmozafari@ yazd.ac.ir

Ahmad Mazidi

Associate Professor, Department of Meteorology, Yazd University, Yazd, Iran
mazidi@ yazd.ac.ir

Abstract

Solar irradiance and synoptic patterns are critical factors influencing the distribution of snow cover in a region. Variations in these elements can significantly impact regional snow cover. This study explored the effects of downward and upward solar radiation, as well as geopotential height, on the snow cover extent of the Karun and Marun river basins. Daily snow cover data were extracted from MODIS Terra satellite observations and compiled on a monthly basis. Data on geopotential height and solar radiation (both downward and upward) were sourced from the NOAA National Centers for Environmental Prediction over a 22-year period (2001–2022) and subsequently processed. The synoptic analysis confirmed that atmospheric patterns, geopotential height, and solar radiation significantly influenced the snow cover in the study area, particularly during colder months. Specifically, a negative correlation was observed between geopotential height and downward solar radiation at the 0.05 and 0.01 significance levels. Conversely, during the cold months, an increase in upward solar radiation was directly associated with an expansion of snow cover extent. Notably, synoptic maps indicated higher upward solar radiation values during periods of substantial snow cover compared to those with diminished snow cover. Overall, from November to March, a decrease in geopotential height and solar radiation correlated with an

*Corresponding Author

Tani, N. , Omidvar, K. , Mozafari, G. M. and Mazidi, A. (2025). The Impact of Solar Radiation and Geopotential Height on Snow Cover in the Karun and Marun Rivers Basins: A Synoptic Statistical Analysis. *Geography and Environmental Planning*, 36 (3), 93 - 126 .



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2025.142875.1668

increase in snow cover. This study highlighted a robust relationship between fluctuations in snow cover and variations in geopotential height and solar radiation within the examined watershed. The ability to predict these variables offered valuable insights for forecasting snow cover changes, which is crucial for effective water resource management, especially in tackling challenges, such as droughts and floods.

Keywords: Snow Cover, Karun and Marun River Basins, Geopotential Height, Solar Radiation Flux.

Introduction

Solar radiation, or solar irradiance, refers to the radiant energy emitted by the sun. This energy is a fundamental component of the Earth's climate system and plays a crucial role in various biological and physical processes on our planet. Both solar irradiance and synoptic patterns are essential for determining the distribution of snow cover in a region as changes in either factor can significantly affect regional snow cover. The primary objective of this research was to evaluate the impact of shifting atmospheric circulation patterns on fluctuations in snow cover within the Karun and Marun river basins with a particular focus on key parameters, such as geopotential height and solar irradiance. The findings of this study will provide valuable insights for both short-term and long-term planning, addressing challenges posed by climate change, including droughts and floods.

Materials & Methods

This study examined the relationship between atmospheric patterns—including geopotential height, downward and upward solar irradiance, and snow cover extent—in the Karun and Marun river basins located in the southern Zagros region. Data were collected as outlined in Table 1. Utilizing MODIS satellite data with a spatial resolution of 500 m and the powerful Google Earth Engine (GEE) platform, we analyzed the river basins over a time series from 2001 to 2022. After applying necessary corrections to the data, satellite images were processed on a monthly, seasonal, and annual basis. These images were then converted into binary formats to distinguish between snow-covered and snow-free areas. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) was calculated for each pixel to assess snow cover extent. Following this, snow cover images were converted from pixel values to binary values (0 and 1) and the NDSI snow cover was categorized into 6 distinct classifications. To further investigate the atmospheric structure at upper levels and its relationship with snow cover in the study area, we obtained data on geopotential height, downward solar irradiance, and upward solar irradiance with a spatial resolution of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ from the NCEP/NCAR database. The quantitative relationship between snow cover across various categories (low, medium, high, dense, and total snow cover) and the synoptic patterns corresponding to the Karun and Marun river basins was analyzed using Pearson correlation methods.

Research Findings

In this study, data related to snow cover in the Karun and Marun river basins were collected from the MODIS satellite, along with information on geopotential height and upward and downward solar irradiance at various atmospheric levels. The data were organized and analyzed accordingly. The results revealed a significant relationship at the 0.05 and 0.01 confidence levels between geopotential height, downward solar irradiance, and snow cover extent, particularly during the winter months, especially in January and February. This correlation persisted throughout most of the cold season. In contrast to the previous two variables, upward solar irradiance—which reflected energy from the snow surface—exhibited a direct relationship with increasing snow cover. For instance, in January 2014, snow cover extent was above the normal average, while in January 2019, it was below average. During this same period, the average geopotential height in January 2019 was notably higher than in January 2014, indicating differing atmospheric patterns for that month. This trend also applied to February. A comparative analysis of maps and atmospheric diagrams confirmed an inverse correlation between fluctuations in geopotential height and downward solar irradiance with snow cover extent in April. Specifically, an increase in geopotential height at the 700-hPa level in April, similar to the patterns observed in colder months, was associated with greater atmospheric stability and a reduction in snow cover extent.

Conversely, an increase in downward solar irradiance resulted in higher temperatures and accelerated snowmelt, leading to a decrease in snow cover. From May to October, a significant reduction in snow cover occurred as temperatures rose and the rainy season receded, resulting in no notable correlation between the studied variables. However, starting in November, as precipitation increased and snow cover expanded, the correlation between the variables strengthened. In November, a negative correlation was observed between snow cover extent and both geopotential height and upward solar irradiance. Specifically, as geopotential height increased, there was a confirmed decrease in snow cover extent, particularly in the medium category. Additionally, during this month, an increase in downward solar irradiance corresponded to a decline in snow cover across all classifications. Conversely, an increase in low-class snow cover showed a significant correlation

with rising upward solar irradiance. Thus, during the cold period from November to March, a decrease in geopotential height and solar irradiance was associated with an increase in snow cover. From December onwards, the correlation between these variables and snow cover reached its peak. In essence, varying atmospheric patterns during periods of high and low snow cover significantly influenced the overall snow cover extent.

Discussion of Results & Conclusion

Overall, the strength of the correlation between the variables fluctuated across different seasons. This correlation was notably stronger in autumn and winter. The analysis indicated that geopotential height and solar radiation were two primary factors influencing snow cover. A decrease in geopotential height, along with a reduction in downward solar irradiance, contributed to an increase in snow cover. During the cold months, snow acted as a reflective surface, reflecting a significant portion of solar radiation back into space. This reflection resulted in higher upward solar irradiance, which helped maintain lower temperatures and supported the persistence of snow. The findings from the synoptic analysis reinforced the impact of geopotential height and atmospheric patterns of solar irradiance on snow cover in the study basin, particularly during colder periods. In essence, geopotential height and downward solar irradiance demonstrated a negative correlation with snow cover extent at the 0.05 and 0.01 confidence levels. Conversely, during the cold months, an increase in upward solar irradiance was directly associated with an increase in snow cover extent. This relationship was evident as the rise in upward solar irradiance values observed in synoptic maps during periods of high snow cover was markedly distinct compared to periods of low snow cover in the study basin.

مقاله پژوهشی

اثرگذاری شار تابشی خورشیدی و ارتفاع ژئوپتانسیل بر پوشش برف حوضه آبریز رودخانه‌های کارون و مارون

نظام تنی، دانشجوی دکتری گروه آب و هواشناسی، مخاطرات طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

nezamyas@gmail.com

کمال امیدوار* ، استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

komidvar@yazd.ac.ir

غلامعلی مظفری، استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

gmozafari@ yazd.ac.ir

احمد مزیدی، دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

mazidi@ yazd.ac.ir

چکیده

شار تابشی خورشید و الگوهای همدیدی عامل بسیار مهمی در تعیین توزیع پوشش برف در یک منطقه هستند. تغییر در هریک از این عوامل می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر روی پوشش برف منطقه داشته باشد. هدف این پژوهش بررسی اثرات شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی و ارتفاع ژئوپتانسیل بر وسعت پوشش برفی حوضه آبریز رودخانه کارون و مارون است؛ بدین منظور، با استفاده از داده‌های دریافتی ماهواره‌ای مودیس سنجنده ترا داده‌های روزانه پوشش برف استخراج و به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه تنظیم شد. سپس، داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی از مرکز ملی پیش‌بینی محیطی نواا طی دوره زمانی ۲۲ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۲) دریافت و تنظیم شد. نتایج همدیدی تأییدکننده اثرگذاری الگوهای جوی ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی خورشیدی بر پوشش برف حوضه مطالعه‌شده به‌ویژه در دوره‌های سرد سال است؛ به‌عبارت‌دیگر ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی روبه‌پایین خورشیدی با وسعت پوشش برف ارتباط معکوسی در سطح اطمینان ۰/۰۵ و ۰/۰۱ ایجاد کرده است. از طرفی طی ماه‌های سرد سال، افزایش شار تابشی روبه‌بالا با افزایش وسعت پوشش برف ارتباط مستقیم داشته است؛ به‌صورتی‌که افزایش مقادیر شار تابشی روبه‌بالا در نقشه‌های همدیدی طی دوره‌های پوشش برفی زیاد در مقایسه با دوره‌های پوشش کم در حوضه مطالعه‌شده به‌وضوح مشخص است. به‌طورکلی در ماه‌های سرد سال (نوامبر تا مارس) با کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی خورشیدی، پوشش برف افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نوسانات پوشش برف در حوضه آبریز مطالعه‌شده به‌شدت متأثر از نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل و تابش خورشیدی قرار دارد. باتوجه‌به قابلیت پیش‌بینی این متغیرها می‌توان از نتایج این مطالعه برای پیش‌بینی تغییرات پوشش برف و مدیریت بهتر منابع آب در منطقه استفاده کرد. این امر به‌ویژه برای مدیریت بحران‌های ناشی از کمبود یا فراوانی آب، طی دوره‌های خشک‌سالی و سیلاب حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: پوشش برف، حوضه آبریز کارون و مارون، ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی خورشیدی

*نویسنده مسؤول

تنی، نظام، امیدوار، کمال، مظفری، غلامعلی و مزیدی، احمد. (۱۴۰۴). اثرگذاری شار تابشی خورشیدی و ارتفاع ژئوپتانسیل بر پوشش برف حوضه آبریز رودخانه‌های کارون و مارون با رویکرد آماری همدیدی، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۶ (۳)، ۱۲۶-۹۳.



مقدمه

تابش خورشیدی یا شار خورشیدی انرژی تشعشعی است که خورشید منتشر می‌کند. این نوع انرژی یکی از عوامل اساسی در سیستم آب‌وهوایی زمین است و نقش حیاتی در فرایندهای زیست‌شناسی و فیزیکی مختلف روی کره زمین ایفا می‌کند. شار خورشیدی شامل طیف گسترده‌ای از امواج از جمله نور رؤیت‌شونده، تابش مادون‌قرمز و تابش فرابنفش است که از فضا عبور می‌کند و به جو زمین و سطح آن می‌رسد (Renno & Miglietta., 2009). مطالعات تغییرات اقلیمی برف، با مطالعه ضریب سپیدایی و دما جزء جدایی‌ناپذیر است؛ زیرا آن‌ها به‌عنوان شاخص‌های مهم اثرگذار اقلیمی شناخته شده‌اند (Kittel et al., 1998). به‌ویژه، بازخورد مثبت بین برف و سپیدایی اثرات گرمایش جهانی را تشدید می‌کند (Fyfe & Flato, 1999; Serreze & Francis, 2006). برای شناسایی کمی اثرات تغییرات اقلیمی، تشخیص روند آن‌ها با رکورد داده‌های بلندمدت مهم است (Verbesselt et al., 2012; De Jong et al., 2012). بررسی تابش خورشیدی در قطب شمال در طول گرمایش اوایل قرن بیستم (ETCW) نشان داد که میانگین تابش خورشیدی جهانی سالانه در قطب شمال روسیه در اوایل قرن بیستم کمی بیشتر از دوره ۱۹۶۴-۱۹۹۰ (حدود ۱-۲ W/m²) و به‌طور چشمگیری بیشتر از دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۱ (حدود ۱۶ W/m²) بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در دوره ۱۹۲۰-۲۰۱۹ سه مرحله از تغییرات تابش خورشیدی وجود داشت (Przybylak et al., 2021). بنابراین، تابش سطحی خورشیدی (SSR) پایه انرژی زمین یک پارامتر ورودی اساسی از مدل‌های بیوفیزیک و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی است (Jiang et al., 2019) و نقش مرکزی در سیستم اقلیمی و تعادل انرژی جهانی دارد (IPCC, 2013).

برف که به‌صورت فصلی در سرچشمه‌های کوهستانی جمع می‌شود، به‌طور سنتی مخزن طبیعی وسیع و ثابتی است که با ذوب‌شدن در فصول بهار و تابستان، آب مناطق اطراف و پایین‌دست را تأمین می‌کند. این منبع به دلیل کاهش و نوسانات زیاد در معرض خطر است و نیاز به پیش‌بینی دقیق ذوب آن، ضروری است (Meyer et al., 2024). بنابراین، برف نقش حیاتی در تعامل بین زمین و جو در مدل‌های پیشرفته سطح زمین و دنیای واقعی ایفا می‌کند و به‌عنوان شرطی مرزی در کاربردهای هواشناسی نقش مهمی دارد (Lee et al., 2024). از طرفی ضریب بازتاب برف جزئی حیاتی از مدل‌های پیوند بین زمین-جو است که نقش مهمی در تنظیم تبادل انرژی سطح زمین با کنترل تابش خورشیدی و تأثیرگذاری مؤثری بر زمان و سرعت ذوب برف دارد (Liu & Ma, 2024). مدت ماندگاری پوشش برف نیز نتیجه بسیاری از فرایندهای متفاوتی است که بر وسعت سطح برف اثر می‌گذارند؛ بنابراین، مدت پوشش برف دارای تغییرات مکانی-زمانی زیادی است که برخی از این فرایندها به سیستم جو-کریوسفر بازخورد می‌دهند و باعث ایجاد تعاملات غیرخطی می‌شوند (Strum et al., 2023).

مطالعه حساسیت پوشش برف به افزایش دما و تابش موج‌کوتاه در رشته‌کوه‌های شبه‌جزیره ایبری نشان داد که اثر افزایش تابش موج‌کوتاه بر پوشش برف از حدود ۲- درصد در هر ۱۰ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۵۰۰ متری تا ۱- درصد در هر ۱۰ وات بر مترمربع در ارتفاع ۲۵۰۰ متری متغیر است (Alonso-González et al., 2020). همچنین نتایج یک مطالعه نشان داد که تابش موج‌کوتاه سطحی پایین، منبع اصلی انرژی برای ذوب بیشتر یخچال‌ها است. برای این مطالعه از داده‌های سنجنده تصویربرداری طیفی با وضوح متوسط (MODIS) استفاده شده است (Zhang et al.,).

(2020). همچنین بررسی همدیدی بارش برف زمستانی در کوه‌های آپنین (ایتالیا)، از سال ۱۸۸۴ تا ۲۰۱۵ نشان داد که تغییرپذیری بارش برف با دو متغیر اساسی جوی از جمله ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و فشار سطح دریا با وجود یک آنومالی فشار بالای مسدودکننده بر فراز اسکاندیناوی و شمال اطلس همبستگی معنی‌داری دارد (Capozzi et al., 2022). مطالعه همدیدی تغییرات دهه‌ای بارش برف سنگین بر فراز شمال چین نشان داد که یک ناهنجاری ارتفاع منفی بر منطقه‌ای از دریاچه بالخاش تا دریاچه بایکال تسلط دارد و یک ناهنجاری ارتفاع مثبت در عرض‌های میانی اقیانوس آرام در تروپوسفر میانی قرار دارد. چنین الگوهای ناهنجاری در تروپوسفر میانی و بالا تقریباً با حالت شمالی موسون زمستانی شرق آسیا (EAWM) مطابقت دارد و ممکن است تعامل هوای سرد با جریان‌های هوای مرطوب در شمال چین را تقویت کند که به افزایش بارش سنگین برف محلی کمک می‌کند (Zhou et al., 2021). همچنین مطالعه پوشش برف فلات تبت (TP) نشان داد که هرچه ارتفاع منطقه بالاتر باشد، وسعت پوشش برف (SCF) و مدت‌زمان ماندگاری آن بیشتر با تغییرات درون‌سالی پایدارتر است. همچنین به دلیل تفاوت در تابش خورشیدی و شرایط رطوبت ناشی از شیب و جهت کوهستان، میانگین پوشش برف به‌طور کلی با شیب کوهستان افزایش می‌یابد و در جهت شمال بیشترین و در جهت جنوب کمترین است (Chu et al., 2023).

برسی امواج گرمای بهاری و تأثیرگذاری آن بر ذوب پوشش برف غرب ایالات متحده در سال ۲۰۲۱ نشان داد که موج گرمای اول آوریل به داخل خشکی کوه‌های راکی و موج گرمای اواخر آوریل بر وسعت پوشش برف منطقه کاسکادها و شمال کالیفرنیا تأثیر گذاشته و شدت ذوب برف این منطقه با افزایش تابش خورشیدی و افزایش دمای هوا از عوامل محرک ذوب سریع‌تر برف بوده است (McEvoy & Hatchett, 2023). مطالعه تأثیر شار انرژی خورشیدی بر روی پوشش برفی کانادا نشان داد که تابش طولانی‌مدت تأثیر بیشتری بر تغییرات تعادل انرژی داشته است. همچنین در دوره ذوب برف، شارهای گرمای نهان و جذب تابش خورشیدی بر تغییرات تعادل انرژی و ذوب برف تسلط داشته است (Dharmadasa et al., 2024). بررسی رابطه بین ضریب بازتاب و وسعت برف در ایران به مدت ۶۷۷۰ روز نشان داد که در فصل‌های زمستان و پاییز که به‌عنوان فصول برفی ایران شناخته می‌شوند، ضریب بازتاب سطح زمین با افزایش پوشش برف افزایش می‌یابد؛ بنابراین، در این فصول، همبستگی بین ضریب بازتاب و برف در کوه‌های ایران قویاً مثبت است (Motlagh et al., 2024).

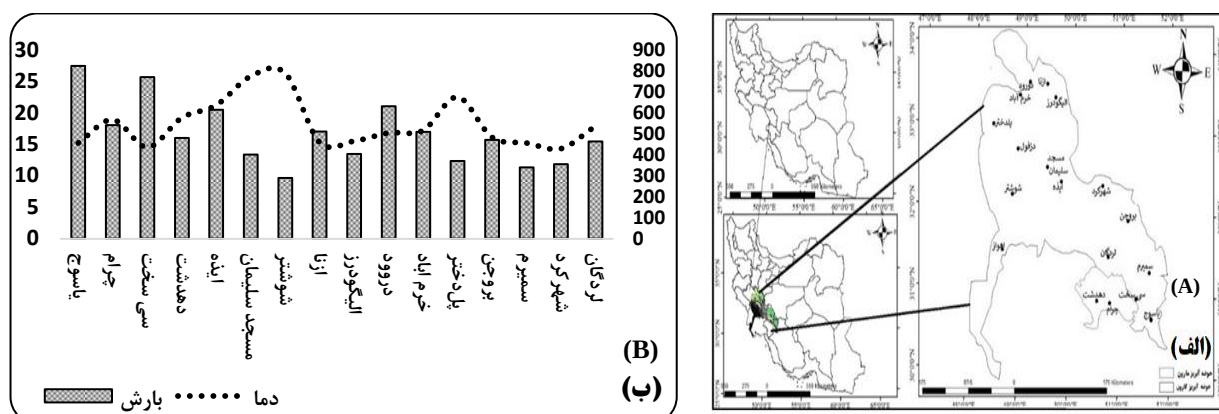
از تأثیر شار تابشی خورشیدی روبه‌پایین و روبه‌بالا (منعکس‌شده) بر مناطق پوشیده از برف در بررسی‌های بودجه انرژی نمی‌توان چشم‌پوشی کرد. با این وجود، باتوجه به پیشینه پژوهش‌های مطالعه‌شده مشخص شد که در مناطق پوشیده از برف این انرژی، تأثیرگذاری مؤثری بر پوشش حوضه‌های مختلف داشته که این مهم در ایران و حوضه مطالعه‌شده بررسی نشده است. باتوجه به پیش‌بینی‌پذیر بودن این نوسانات هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیرگذاری پارامترهای کلیدی شار تابشی خورشیدی و ارتفاع ژئوپتانسیل بر نوسانات وسعت پوشش برف حوضه آبریز رودخانه‌های کارون و مارون با استفاده از خروجی ابزارهای مانند Google Earth Engine، GIS، SPSS و GRADS است. نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت برای مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی از جمله خشک‌سالی و سیلاب، مدیریت بهینه منابع آب و به‌عنوان پایه‌ای برای مطالعات آینده در

زمینه تأثیر تغییرات اقلیمی (شار تابشی خورشیدی و ارتفاع ژئوپتانسیل) بر پوشش برف و منابع آب در ایران و سایر مناطق مشابه استفاده شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز رودخانه کارون از نظر مختصات جغرافیایی در حدفاصل ۵۸° الی ۴۷° طول شرقی و ۲۹° الی ۳۴° عرض شمالی و با وسعتی بالغ بر ۶۷۲۵۷ کیلومترمربع، در جنوب غرب ایران (زندى‌فر و همکاران، ۱۴۰۰) و حوضه آبریز مارون با مساحت حدود ۳۸۲۴ کیلومترمربع در مختصات جغرافیای (۴۹° الی ۵۱°) طول شرقی، (۳۰° الی ۳۱°) عرض شمالی در استان خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد قرار دارد (احمدپور و همکاران، ۱۳۹۸). آبدهی رودخانه کارون به شدت از ذخایر برف در بخش‌های شمالی آن تأثیر می‌گیرد (رحیمی و هاشمی‌نسب، ۱۳۹۷). براساس داده‌های سازمان هواشناسی ایران، میانگین بارش برف در ارتفاعات حوضه کارون و مارون در فصل زمستان متفاوت است؛ برای مثال، در ایستگاه‌های هواشناسی کوه‌رنگ و بروجن، میانگین بارش برف سالانه بین ۱۵۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر نیز گزارش شده است (شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۰). پربارش‌ترین ماه‌های سال به ترتیب مربوط به ماه دی، بهمن و اسفند است که $۱۷/۵$ ، $۱۷/۲$ و $۱۵/۸$ درصد بارش سالانه را به خود اختصاص داده‌اند. در مقیاس فصلی $۵۰/۵$ درصد بارش سالیانه این حوضه در فصل زمستان است (شاکریان و همکاران، ۱۳۹۸). در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی، دمای حوضه آبریز کارون افزایش و بارش‌ها کاهش یافته است که این امر به کاهش پوشش برفی و در نتیجه کاهش رواناب‌های ناشی از ذوب برف منجر شده و در دهه اخیر، دبی ورودی حوضه کارون بزرگ حدود ۲۷ درصد کاهش یافته است (سعیدی‌فر و همکاران، ۱۴۰۰)؛ بنابراین، مطالعه پوشش برفی حوضه‌های آبریز کارون و مارون و تأثیر نوسانات همدیدی بر روی آن به دلیل اهمیت استراتژیک تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت به عنوان منطقه مطالعاتی ایدئال ضروری است. شکل (۱_الف) موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه کارون و مارون را نشان می‌دهد. براساس تحلیل داده‌های اقلیمی حوضه آبریز رودخانه کارون و مارون طی سری زمانی ۲۲ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۲) ایستگاه‌های یاسوج و سی سخت در رده پربارش‌ترین ایستگاه‌ها و در مقابل، ایستگاه شوشتر و مسجدسلیمان کمترین میزان بارندگی را در بازه مطالعاتی داشته‌اند. از منظر پارامترهای حرارتی، نیز ایستگاه‌های شوشتر و مسجدسلیمان با میانگین دمای سالانه فراتر از ۲۵ درجه سانتیگراد (C°) به عنوان گرم‌ترین نقاط این حوضه هستند. همچنین ایستگاه‌های کوه‌رنگ، شهرکرد، سمیرم نیز جزو سردترین ایستگاه‌های این حوضه هستند شکل (۱_ب).



شکل (۱_الف): موقعیت جغرافیایی و نمودار نوسانات دما و بارش شکل (۱_ب) در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کارون و مارون
Figure 1a presents the geographical location, and Figure 1b displays the temperature and precipitation variability at selected stations within the Karun and Maroon river basins.

داده‌ها و روش‌ها

تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر متغیرهای جوی و فعالیت‌های خورشیدی بر پوشش برفی حوضه‌های آبریز رودخانه کارون و مارون با ترکیب داده‌های سنجنش‌ازدور، محصولات بازتحلیل اقلیمی و داده‌های مشاهداتی ایستگاهی انجام شده است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل در مناطق کوهستانی مانند زاگرس به دلیل محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای ایجاد و نگهداری شبکه پایش زمینی پیوسته، روشی کارآمد و ضروری محسوب می‌شود (میرموسوی و صبور، ۱۳۹۳)؛ بنابراین، برای تحلیل شرایط همدیدی و عوامل ترمودینامیکی مؤثر بر تغییرات پوشش برف حوضه مطالعه‌شده از داده‌های روزانه بازتحلیل مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی و مرکز ملی تحقیقات جوی (NCEP/NCAR Reanalysis) طی دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. متغیرهای کلیدی استخراج شده عبارت‌اند از:

شار تابش خورشیدی روبه‌پایین^۱ که میزان انرژی دریافت خورشیدی در سطح زمین را نشان می‌دهد، نقش مستقیمی در فرایندهای ذوب برف دارد. متغیر شار تابش خورشیدی روبه‌بالا^۲ که بیانگر میزان بازتاب (آلبدو) سطح است و در تعادل انرژی سطحی و تأثیر آن بر ماندگاری برف اهمیت دارد و همچنین متغیر ارتفاع ژئوپتانسیل^۳ تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز استخراج شد که نماینده مناسبی برای تحلیل الگوهای جوی در ارتفاعات میانی مؤثر بر شرایط سطحی است. تحلیل این متغیر به شناسایی الگوهای هوای سرد و گرم کمک می‌کند که بر بارش و ذوب برف تأثیر دارد. پوشش جهانی و دسترسی به این داده‌ها امکان تحلیل الگوهای همدیدی در مقیاس بزرگ را فراهم کرده است. داده‌های فوق با تفکیک مکانی $2/5^{\circ} \times 2/5^{\circ}$ درجه‌ای (معادل حدود ۲۷۵ کیلومتر در هر نقطه شبکه‌ای با فرض متوسط ۱۱۰ کیلومتر برای یک درجه عرض/طول جغرافیایی) دریافت شده‌اند. مطالعات متعدد، دقت و قابلیت اطمینان این داده‌ها را تأیید کرده‌اند؛ برای مثال (Kalnay et al., 1996) در پروژه بازتحلیل ۴۰ ساله NCEP/NCAR نشان دادند

¹ Downward Shortwave Radiation Flux

² Upward Shortwave Radiation Flux

³ Geopotential Height

که این داده‌ها برای تحلیل الگوهای همدیدی و متغیرهای جوی از دقت بالایی برخوردارند. در ادامه داده‌ها به سه بازه زمانی ماهانه، فصلی و سالانه تقسیم شدند تا امکان تحلیل دقیق‌تر روندها و الگوهای زمانی فراهم شود.

همچنین با استفاده از محصولات آماده تصحیح و اعتبارسنجی شده پوشش برف روزانه (NDSI)، حاصل از ماهواره‌ی ترا (MOD10A1) منطبق بر حوضه آبریز کارون و مارون با دقت مکانی ۵۰۰ متر، داده‌ها طی سری زمانی ۲۲ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۲) مبتنی بر طبقه‌بندی پیکسل‌ها به صورت باینری (برف و فاقد برف) یا سیستم شمارشی (۰ و ۱) به صورت ماهانه، فصلی و سالانه تنظیم و پردازش شد. سپس تصاویر پوشش برفی ($NDSI > 0.4$) با توجه به نوع جغرافیا و توپوگرافی حوضه مطالعه شده (Raghubanshi et al., 2015, Wang et al., 2023)، به صورت ماهانه (ماه‌های تجمعی ۲۶) تنظیم و با استفاده از نرم‌افزار GIS ترسیم و ارزیابی شده است. داده‌های این محصول نمایانگر بیشترین پوشش برف و کمترین پوشش ابر در مقیاس زمانی روزانه است (Riggs et al., 2006). بدین صورت که هر قدر عمق برف بیشتر باشد، عدد مدنظر به ۱ نزدیک‌تر و هر چه کم عمق‌تر باشد به صفر متمایل می‌شود (Ashraf et al., 2012). انتخاب مقادیر حد آستانه کاملاً به شرایط منطقه، مقادیر پیکسل‌ها و نوع تصاویر به کاررفته بستگی دارد. معمولاً مقادیر حد آستانه به صورت سعی و خطا تعیین می‌شود که با توجه به سنگینی و سبکی (بسته به عمق پوشش برف) ضرایب مثبت را به خود اختصاص می‌دهد (عقیقی، ۱۴۰۰). آستانه عددی تعیین شده شاخص NDSI برای استخراج برف $0.4 >$ است که می‌تواند با توجه به شرایط منطقه مقادیری را در برگرد (عبادی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج مطالعه‌ای بر روی پوشش برف مناطق مختلف ایران نشان داد که مقادیر کوچک‌تر از 0.4 شاخص NDSI به عنوان مناطق غیربرفی و بیشتر از 0.7 نیز مناطق کاملاً پوشیده از برف است (شمس و همکاران، ۱۳۹۳).

بنابراین، دسته‌بندی پوشش برف با توجه به نتایج تحقیقات فراوان در زاگرس به صورت دسته برف درخور توجه ($0.6 > NDSI \geq 0.4$)، برف تازه و نسبتاً خالص با حداقل آلودگی ($0.8 > NDSI \geq 0.6$)، برف خالص و کاملاً تازه، بدون آلودگی ($1 \geq NDSI$) و پوشش کلی برف ($1 \geq NDSI$) تقسیم شد.

در ادامه به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای از داده‌های موجود مشاهداتی عمق برف، طی سری زمانی ۱۵ ساله (۲۰۰۸-۲۰۲۲) مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه (یاسوج، سی سخت، بروجن، کوهرنگ لردگان و شهرکرد) استفاده شد. این داده‌ها به عنوان واقعیت زمینی برای مقایسه برآوردهای ماهواره‌ای ضروری هستند. لازم به ذکر است که داده‌های ایستگاهی مشاهدات نقطه‌ای هستند و لزوماً نماینده کل مساحت یک پیکسل ماهواره‌ای یا کل حوضه نیستند، اما برای ارزیابی عملکرد کلی الگوریتم ماهواره‌ای در شناسایی برف در مکان‌های خاص بسیار ارزشمند هستند. با توجه به عدم تطابق کامل دوره‌های زمانی این دو مجموعه داده، اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای تنها برای بازه مشترک (۲۰۰۸-۲۰۲۲) طی ماه‌های سرد سال (نوامبر تا مارس) انجام شده است. این انتخاب به منظور تضمین دقت تحلیل و امکان مقایسه مستقیم داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی صورت گرفته است (جدول ۱).

جدول (۱): مجموعه داده‌های استفاده‌شده در حوضه آبریز رودخانه کارون و مارون طی سری زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Table 1: Dataset used in the Karun and Maroon river basins over the 2001–2022 time period

نوع داده	نوع سنجنده	سری زمانی	قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک مکانی	پارامتر
دریافتی ماهواره‌ای	مودیس (MOD10A2)	۲۰۰۱-۲۰۲۲	روزانه	۵۰۰ متر	پوشش برف
دریافتی ماهواره‌ای NOAA	AVHRR	۲۰۲۲-۲۰۰۱	روزانه	۲/۵*۲/۵ درجه‌ای	شار تابشی روبه‌پایین، شار تابشی روبه‌بالا، و ارتفاع ژئوپتانسیل
داده‌های پوشش برف ایستگاهی	ایستگاه زمینی	۲۰۲۲-۲۰۰۸	روزانه	نقطه‌ای	برف

روش‌ها

در ادامه ارتباط کمی بین نوسانات وسعت پوشش برف در دسته‌های مختلف (برف خالص تا برف تازه بدون آلودگی) با متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی با استفاده از روش همبستگی پیرسون بررسی شد. این روش به محققان پژوهش حاضر این امکان را می‌دهد تا قدرت و جهت ارتباط بین دو متغیر کمی را تعیین کنند؛ بدین منظور، همبستگی بین پوشش برف با متغیر ذکرشده محاسبه و تحلیل شد. به‌منظور درک بهتر ارتباط میان پوشش برف و الگوهای مدنظر، در مواردی که همبستگی معنی‌داری بین داده‌های مشاهداتی ایجاد شده باشد، نمودارهای مقایسه‌ای آن‌ها نیز ترسیم شد. این نمودارها به‌صورت بصری، تغییرات هم‌زمان این دو متغیر را نشان می‌دهند و الگوهای پنهان داده‌ها را آشکار می‌سازند (محمدی احمدمحمودی و خورانی، ۱۳۹۸). همچنین، با استفاده از نقشه‌های همدیدی ارتفاع ژئوپتانسیل، شارتابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی الگوهای همدیدی مؤثر بر نوسانات پوشش برف در حوضه‌های آبریز کارون و مارون نیز تحلیل و تفسیر شد. در ادامه روش‌های آماری به‌کاررفته و نحوه محاسبه هر متغیر در این پژوهش، نیز به‌صورت کامل تشریح شده است.

اعتبارسنجی

اعتبارسنجی بین پوشش برف و تصاویر ماهواره‌ای شامل مقایسه داده‌های پوشش برف به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای با منابع داده‌های مستقل ایستگاهی برای ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان محصولات ماهواره‌ای است. این فرایند برای درک نقاط قوت و ضعف الگوریتم‌های نقشه‌برداری از برف ماهواره‌ای و بهبود آن‌ها در طول زمان بسیار مهم است. بایاس یا تورش (ME) میانگین تفاوت بین مقادیر تخمینی و مقادیر مشاهده‌شده را اندازه‌گیری می‌کند. این معیار نشان می‌دهد که آیا مدل، به‌طور سیستماتیک تمایل به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد دارد که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$ME = \left(\frac{1}{N}\right) \times \sum (X_O - X_S) \quad \text{رابطه (۱)}$$

میانگین قدر مطلق خطا (MAE) تفاوت‌ها (خطاها) بین مقادیر تخمینی و مقادیر مشاهده‌شده است. این معیار بزرگی متوسط خطاها را بدون در نظر گرفتن جهت آن‌ها (مثبت یا منفی) نشان می‌دهد (Houghton & Hackler, 2001).

$$MAE = \left(\frac{1}{N}\right) \times \sum |X_O - X_S| \quad \text{رابطه (۲)}$$

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): این معیار نشان‌دهنده انحراف استاندارد تفاوت‌ها بین داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی است. مقدار کمتر نشان‌دهنده تطابق بهتر است (Lenhart et al., 2003).

$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\right) \times \sqrt{\sum (X_O - X_S)^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

ضریب همبستگی (R)

این معیار نشان‌دهنده میزان ارتباط خطی بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاهی است و معمولاً به صورت R نمایش داده می‌شود. مقدار آن بین ۱- تا ۱ قرار دارد (صداقت‌کردار و فتاحی، ۱۳۷۸).

$$R = \frac{(X_O - \bar{X}_O)(X_S - \bar{X}_S) \sum_{i=1}^N}{\sqrt{(X_O - \bar{X}_O)^2 \sum_{i=1}^N \cdot (X_S - \bar{X}_S)^2 \sum_{i=1}^N}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در روابط فوق X_O داده‌های مشاهداتی، X_S داده‌های ماهواره‌ای، X_O میانگین داده‌های مشاهداتی و N تعداد داده‌ها است که در پایان نتایج بین داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای به صورت جدول تجزیه و تحلیل شد.

شاخص NDSI

شاخص تفاوت نرمال‌شده برف یا NDSI شاخصی عددی است که برای تخمین و نقشه‌برداری از پوشش برف روی سطح زمین به کار می‌رود. این شاخص با مقایسه میزان بازتاب نور در دو باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود که توسط ماهواره‌ها دریافت می‌شود. شاخص نرمال‌شده پوشش برفی (NDSI) برای شناسایی مناطق پوشیده از برف در تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. فرمول محاسبه NDSI به صورت زیر است (Hall et al., 2000):

Green مقدار بازتابش در باند سبز (معمولاً باند ۲)، SWIR مقدار بازتابش در باند مادون قرمز کوتاه (معمولاً باند ۶). برف در طیف مرئی (به‌ویژه باند سبز) بازتاب بسیار زیادی دارد، درحالی‌که در بخش مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) به شدت تابش را جذب می‌کند. درمقابل، بسیاری از پدیده‌های دیگر مانند خاک، پوشش گیاهی و حتی ابرها اگرچه بازتاب زیادی در SWIR دارند، الگوی متفاوتی از برف را نشان می‌دهند، رفتار طیفی متفاوتی دارند؛ بنابراین، شاخص NDSI از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad \text{رابطه (۵)}$$

شار تابشی خورشید

اساساً تعادل انرژی سطحی بدین معناست که مجموع شارهای تابشی ورودی و خروجی به سطح، برابر با تغییرات انرژی داخلی سیستم است؛ به عبارت دیگر، انرژی تابشی دریافتی توسط سطح به صورت گرما (محسوس و نهان) به محیط اطراف منتقل می‌شود یا در سیستم ذخیره می‌شود. یکی از مهم‌ترین اجزای این تعادل، تابش خالص (Rn) است که از تفاضل تابش خالص موج کوتاه (نور خورشید) و تابش خالص موج بلند (تابش زمین) به دست می‌آید. توازن

¹ Normalized Difference Snow Index

تابشی در جهت قائم به این صورت بیان می‌شود: R_N تابش خالص (برحسب Wm^{-2}) که نشان‌دهنده میزان انرژی خالص دریافتی توسط سطح زمین است، از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. این رابطه، تابش خالص را براساس این چهار مؤلفه اصلی بیان می‌کند؛ یعنی $RS_{\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (برحسب Wm^{-2})، $RS_{\uparrow}$ تابش موج کوتاه خروجی (برحسب Wm^{-2})، $RL_{\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (برحسب Wm^{-2}) و $RL_{\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (برحسب Wm^{-2}) و ضریب بازتاب سطح (α) و ضریب تابش سطح (ε) نیز در این رابطه نقش مهمی دارند (Liou, 2002).

$$R_N + H_L + H_S + H_G = 0 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$R_N = R_{S\downarrow}(1 + \alpha) + \varepsilon(R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\alpha = \frac{R_{S\uparrow}}{R_{S\downarrow}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (برحسب Wm^{-2}) و $R_{S\uparrow}$ تابش موج کوتاه خروجی (برحسب Wm^{-2}) است. تابش موج بلند از سطح زمین به دما و گسیلایی سطح آن وابسته است و از رابطه زیر برآورد می‌شود. ε گسیلایی سطح زمین است و در این مطالعه برابر رابطه زیر است.

$$R_{LT} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\varepsilon = \frac{R_{L\uparrow}}{R_{L\downarrow}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

شار تابشی روبه بالا و روبه پایین خورشید

شار تابشی روبه پایین خورشید ($S_{\downarrow}$)

$$S_{\downarrow} = S_0 \times \cos(\theta) \times (1 - A) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

θ ، زاویه خورشیدی S_0 ثابت خورشیدی (مترمربع بر وات ۱۳۶۱ تقریباً) و A ضریب جذب جوی

شار تابشی روبه بالای خورشید ($S_{\uparrow}$) (Liou, 2002).

$$S_{\uparrow} = S_{\downarrow} \times \alpha \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

α آلبدو (نسبت بازتاب)

همچنین به دلیل تفاوت ذاتی در تفکیک مکانی داده‌های MODIS (۵۰۰ متر) و داده‌های $(2.5 \times)$ NCEP/NCAR (۲.۵°)، نیز لازم بود تا این داده‌ها برای تحلیل‌های مقایسه‌ای و همبستگی به شبکه مشترکی منتقل شوند؛ بدین منظور، داده‌های پوشش برف MODIS با استفاده از روش درونیابی نزدیک‌ترین همسایه^۱ تبدیل شدند. این روش یکی از روش‌های متداول برای تغییر تفکیک مکانی داده‌های رستری در مطالعات اقلیمی است؛ زیرا مقدار اصلی داده در پیکسل مبدأ را حفظ کرده و از ایجاد مقادیر مصنوعی جلوگیری می‌کند و تنها مقدار نزدیک‌ترین پیکسل معلوم را به پیکسل مقصد نسبت می‌دهد که برای حفظ ماهیت طبقه‌بندی شده داده‌های پوشش برف مناسب است (Chen et al., 2012). در مقیاس محلی، داده‌های پوشش برفی با استفاده از روش‌های آماری تحلیل شدند تا روابط کمی بین

¹ Nearest Neighbor Resampling

متغیرهای جوی و پوشش برفی ارزیابی شود. در مقیاس فراسرزیمینی، نیز نقشه‌های الگوهای همدیدی به صورت بصری تحلیل شدند تا تأثیر الگوهای بزرگ مقیاس بر حوضه مطالعه شده شناسایی شود. این رویکرد ترکیبی، امکان بررسی جامع روابط بین پدیده‌های همدیدی و شرایط محلی را فراهم کرده است. پژوهش حاضر برای نخستین بار در ایران تغییرات مکانی-زمانی وسعت پوشش برف یک حوضه آبریز را با در نظرگیری تأثیر متقابل عوامل دینامیکی (مانند نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل) و ترمودینامیکی (مانند شار تابشی خورشیدی ورودی و خروجی) هم‌زمان بررسی کرده است. همچنین تحلیل همدیدی و ارتباط بین تغییرات محلی پوشش برف با الگوهای کلی ارتفاع ژئوپتانسیل و نوسانات خورشیدی ارزیابی شد.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج اعتبارسنجی داده‌های پوشش برفی استخراج شده از تصاویر ماهواره مودیس (MODIS/Terra) با داده‌های ایستگاهی در حوضه مطالعه شده در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ نشان داد که میزان همبستگی بین داده‌های سنجش از دور و مشاهدات زمینی در بیشتر موارد قوی و در ایستگاه‌های با ارتفاعات بالاتر (کوه‌رنگ)، همبستگی‌ها معمولاً بیشتر از ایستگاه‌های با ارتفاع کمتر (یاسوج) است. این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیر دما، نوع پوشش زمین و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه باشد. طبق نتایج میانگین اریب (Bias) برای کل ایستگاه‌های مطالعه شده، معادل ۰/۱۲ به دست آمده است. این مقدار حاکی از تمایل سیستماتیک داده‌های MODIS به بیش‌برآورد در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی است. براساس نتایج، ایستگاه پراارتفاع کوه‌رنگ کمترین میزان اریب (۰/۰۸) و ایستگاه‌های یاسوج و سی‌سخت به ترتیب با ارتفاع کمتر اریب‌های بیشتری را نشان داده‌اند. براساس نتایج حاصل از تحلیل خطای میانگین مطلق (MAE)، ارزیابی دقت داده‌ها در ایستگاه‌های مختلف، متفاوت است. کمترین میزان خطا در ایستگاه کوه‌رنگ مشاهده شد که دلالت بر بالاترین سطح تطابق بین داده‌های MODIS و ایستگاه‌های زمینی است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز در ایستگاه کوه‌رنگ با توجه به اینکه در منطقه‌ای بسیار پربرف واقع شده است و به عنوان یکی از نقاط مهم پوشش برفی در زاگرس محسوب می‌شود، دقت بهتری داشته است. ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و سی‌سخت نیز دارای مقادیر RMSE پذیرفته شده‌ای هستند که نشان می‌دهد داده‌های ماهواره‌ای در این مناطق نسبتاً دقیق هستند، اما همچنان بهبودپذیر است. به طور کلی ایستگاه کوه‌رنگ دارای بهترین تطابق را بین داده‌های ایستگاهی و ماهواره‌ای دارد که می‌تواند به دلیل ثبات بیشتر پوشش برف و کیفیت بهتر داده‌های ایستگاهی باشد (جدول ۲).

جدول (۲): نتایج اعتبارسنجی تصاویر پوشش برفی حاصل از ماهواره تراا و ایستگاه‌های منتخب حوضه مطالعه شده طی سری زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۸ ماه‌های نوامبر تا مارس

Table 2: Validation results of snow cover imagery derived from Terra satellite against observations from selected stations within the study basin during the 2008–2022 period (November to March)

ردیف	ایستگاه	ارتفاع	ضریب همبستگی (R)	اریبی (Bias)	خطای مطلق میانگین (MAE)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین خطا (Mean Error)
۱	شهرکرد	۲۱۸۰	۰/۸۳	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۲۷	۰/۰۵
۲	کوه‌رنگ	۳۱۷۶	۰/۸۷	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۰۴
۳	بروجن	۲۱۹۷	۰/۸۱	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۰۶
۴	سی سخت	۲۱۶۳	۰/۷۹	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۰۸
۵	یاسوج	۱۸۸۶	۰/۷۲	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۳۲	۰/۰۹

همبستگی بین ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی با وسعت پوشش برف حوضه آبریز کارون و مارون و نقشه‌های ترسیمی داده‌های مدنظر واکاوی شد. نتایج نشان داد که بین ارتفاع ژئوپتانسیل ماه ژانویه با پوشش برف چشمگیر و خالص ($0.4_0.6$ NDSI) و پوشش کلی برف (0.4_1 NDSI)، همبستگی منفی معنی‌داری در سطح اطمینان مختلف وجود دارد؛ بنابراین، هرچه ارتفاع ژئوپتانسیل بر روی حوضه مطالعه‌شده افزایشی باشد، به‌طور طبیعی باعث افزایش بیشتر دما و در نتیجه کاهش وسعت پوشش کلی برف در حوضه مطالعه‌شده می‌شود. این شرایط برای شار تابشی روبه‌پایین نیز به‌صورت همبستگی منفی با پوشش برف درخور توجه و خالص در ماه ژانویه صدق می‌کند؛ بنابراین، اگر شار تابشی روبه‌پایین (انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد) بیشتر باشد، باتوجه به همبستگی معکوس، وسعت پوشش برفی در ارتفاعات حوضه مطالعه‌شده کاهش می‌یابد. در رابطه با شار تابشی روبه‌بالا (انرژی که از سطح زمین به سمت بالا تابش می‌شود) در ماه ژانویه برعکس شار تابشی روبه‌پایین همبستگی مثبت بسیار قوی با پوشش برف تازه و بدون آلودگی ($0.6_0.8$ NDSI) و پوشش کلی برف ایجاد شده است؛ بنابراین، شار تابشی روبه‌بالا با پوشش برف حوضه مدنظر رابطه مستقیم دارد. به‌صورتی که هرچه پوشش برف بیشتر باشد، انرژی بیشتری از سطح زمین بازتاب می‌شود (جدول ۳).

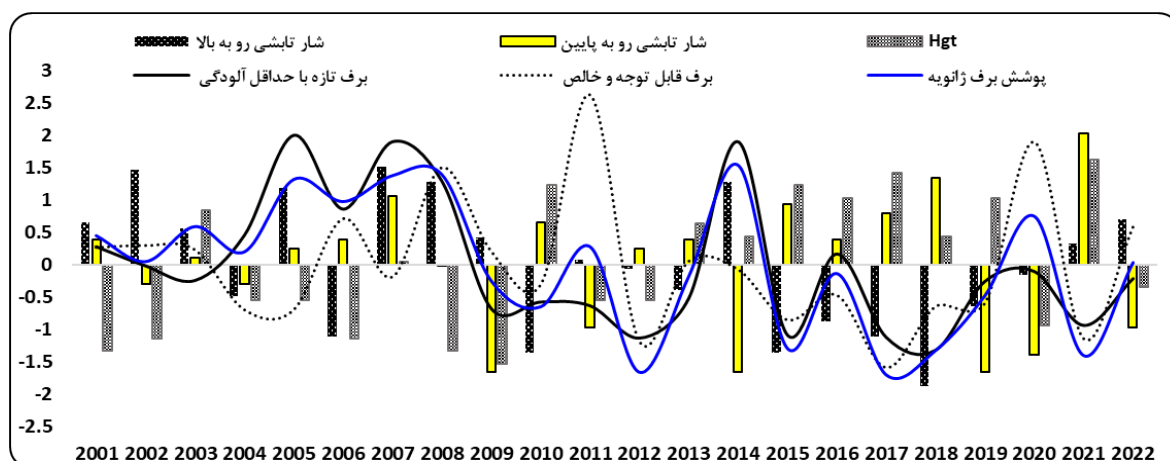
در ماه فوریه نیز ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکلی به‌صورت معکوس با وسعت پوشش برف این حوضه همبستگی منفی بسیار قوی داشته است؛ به‌عبارت دیگر، این دو عامل به‌صورت معکوس باهم تغییر می‌کنند. در رابطه با شار تابشی روبه‌پایین در ماه فوریه نیز همبستگی معنی‌داری با پوشش برف کلاس درخور توجه و خالص در سطح اطمینان ۰/۰۵ و با پوشش کلی برف همبستگی درخور توجهی، اما بدون معنی‌دار خاص ایجاد شده است؛ بنابراین، در این ماه نیز هرچه میزان انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد (شار تابشی روبه‌پایین) افزایش یابد، وسعت پوشش برف کمتر می‌شود. نتایج شار تابشی روبه‌بالا نیز نشان از همبستگی مثبت قوی و معنی‌داری با پوشش کلی برف در تمام دسته‌بندی‌ها دارد (جدول ۳)؛ بنابراین، وسعت پوشش برف حوضه مطالعه‌شده در ماه فوریه به‌شدت متأثر از انرژی تابشی خورشیدی قرار دارد که به سطح زمین می‌رسد؛ اما در ماه مارس در بیشتر موارد همبستگی

معنی‌داری بین متغیرهای مطالعه‌شده و پوشش برفی مشاهده نشده است. مطالعه تأثیر ضریب سپیدایی پوشش برف ایران نیز نشان داد که در ماه‌های سرد سال (Jan, Feb, Mar) که ماه‌های برف‌پوش ایران شناخته می‌شوند، ضریب سپیدایی بیشینه و در ماه‌های گذار (June, July, Aug) ضریب سپیدایی به حداقل می‌رسد (کفایت مطلق و دارند، ۱۴۰۳). همچنین در مطالعه حاضر با مقایسه نوسانات متغیرهایی که همبستگی معنی‌داری با پوشش برف داشته‌اند، هماهنگی این متغیرها با پوشش برفی مشخص است؛ به‌صورتی‌که ارتباط معکوس ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی روبه‌پایین با پوشش برف در دسته‌های مختلف در ماه ژانویه، فوریه و مارس و ارتباط مثبت نوسانات شار تابشی روبه‌بالا با پوشش برفی این حوضه به‌وضوح مشهود است (شکل (۲) و شکل (۷)).

جدول (۳): همبستگی بین ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی با پوشش برف در کلاس‌های مختلف در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس حوضه آبریز کارون و مارون طی سری زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Table 3: Correlation between geopotential height, downward and upward solar radiation fluxes, and snow cover across different classes during January, February, and March in the Karun and Maroon river basins over the 2001–2022 period

پوشش کلی برف NDSI	برف تازه بدون هیچ آلودگی NDSI 0.8_0.1	برف تازه با حداقل آلودگی NDSI 0.6_0.8	برف درخور توجه و خالص NDSI 0.4_0.6	داده‌های همدیدی
-.511*	-.12	-.35	-.573**	ارتفاع ژئوپتانسیل ژانویه
-.725**	-.34	-.784**	-.540**	ارتفاع ژئوپتانسیل فوریه
-.39	-.16	-.19	-.492*	شار تابشی روبه‌پایین ژانویه
.33-	.25-	.20-	.470*-	شار تابشی روبه‌پایین فوریه
-.32	.18	-.39	-.34	شار تابشی روبه‌پایین مارس
.634**	.16	.623**	.29	شار تابشی روبه‌بالا ژانویه
.656**	.607**	.647**	.471*	شار تابشی روبه‌بالا فوریه

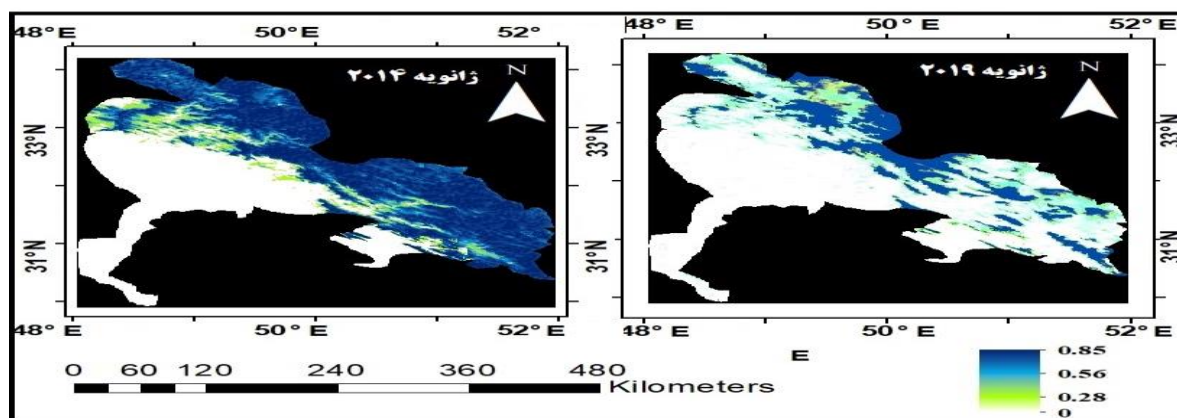


شکل ۲: مقایسه نوسانات پوشش برف در ماه ژانویه با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی روبه‌بالا و روبه‌پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲

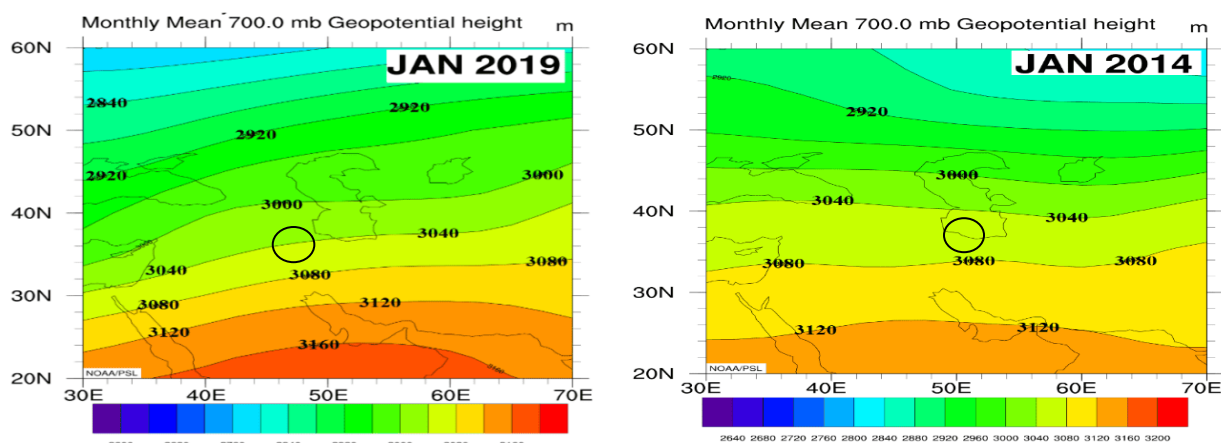
Figure 2: Comparison of snow cover variability in January with fluctuations in geopotential height (HGT), upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period.

مطابق با نتایج شکل (۲) در ژانویه ۲۰۱۴ وسعت پوشش برف حوضه مطالعه شده بالاتر از میانگین نرمال و در ژانویه ۲۰۱۹ این مورد بسیار پایین تر از میانگین نرمال خود است. با مقایسه بصری وسعت پوشش برف نیز در ژانویه ۲۰۱۴ و ۲۰۱۹ می توان مشاهده کرد که وسعت پوشش برفی در ژانویه ۲۰۱۴ بسیار بیشتر از ژانویه ۲۰۱۹ است (شکل ۳). بررسی همدیدی نقشه های جوی طی دو دوره مدنظر نشان از الگوهای متفاوت جوی دارد. به طور میانگین ارتفاع جو در ژانویه ۲۰۱۹ بر روی منطقه مطالعه شده بیشتر از ژانویه ۲۰۱۴ است؛ به صورتی که حوضه مطالعه شده بین خطوط هم ارتفاع ۳۰۸۰ تا ۳۱۰۰ متری قرار گرفته است؛ در حالی که در سال ۲۰۱۴ این حوضه بین خطوط هم ارتفاع ۳۰۸۰ تا ۳۰۹۰ قرار دارد و در ژانویه ۲۰۱۴ در مقایسه با ژانویه ۲۰۱۹ خطوط هم ارتفاع به وضوح تا عرض جغرافیایی پایین تری مشاهده می شود (شکل ۴). مطالعه میانگین ماهانه ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در منطقه اورال و اوراسیای داخلی طی دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ نشان داد که بین ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ هکتوپاسکال در ماه های ژوئن، جولای و ژانویه و گستره پوشش برفی همبستگی وجود دارد (Li et al., 2024).

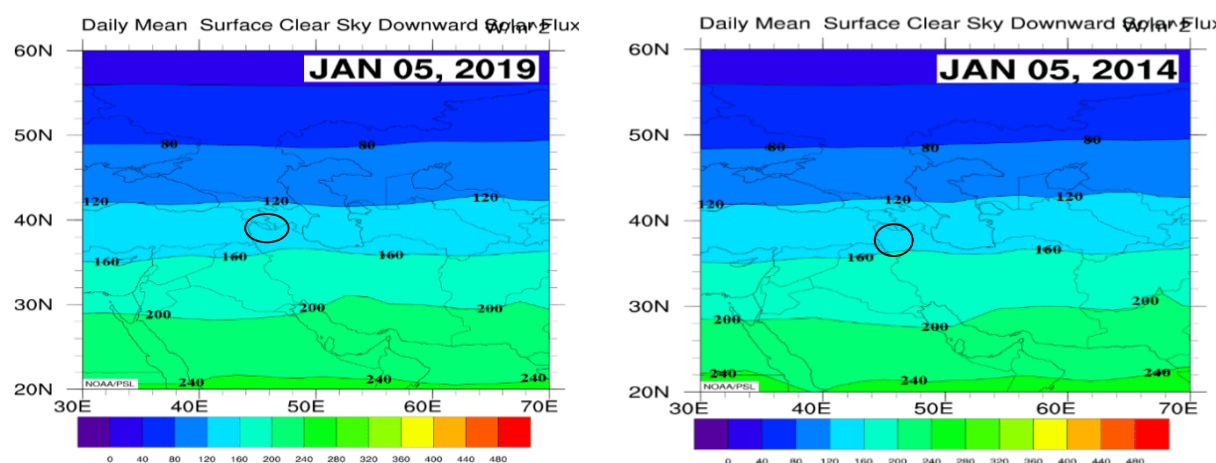
بررسی همدیدی نقشه های شار تابشی روبه پایین در ۵ ژانویه ۲۰۱۹ و ۵ ژانویه ۲۰۱۴ نیز نشان از آن دارد که خطوط هم شار ۲۰۰ وات بر مترمربع (W/m^2) در ۵ ژانویه ۲۰۱۹ بر روی شمال خلیج فارس و عرض های بالاتر نیمه جنوبی ایران قرار دارد و به طور میانگین شار تابشی روبه پایین بر روی منطقه مطالعه شده بالاتر از ۱۷۰ وات بر مترمربع (W/m^2) است؛ اما در ۵ ژانویه ۲۰۱۴ این مقدار به طور میانگین کمتر از ۱۵۰ وات بر مترمربع (W/m^2) رسیده است؛ بنابراین، مقدار متوسط و موقعیت خطوط هم شار در منطقه مطالعه شده تغییر کرده است و افزایش شار تابشی در ژانویه ۲۰۱۹ در مقایسه با ژانویه ۲۰۱۴ شرایط مناسبی برای ذوب و کاهش وسعت پوشش برفی ایجاد کرده است (شکل ۵). پوشش برف، تابش خورشیدی ورودی را منعکس می کند؛ زیرا برف تازه معمولاً دارای ضریب بازتاب (آلبدو) بین ۰/۸ و ۰/۹ است، در حالی که بیشتر سطوح زمین دارای ضریب بازتاب بین ۰/۱ و ۰/۳ است (Barry, 1996)؛ بنابراین، برف بر تعادل انرژی منطقه ای و جهانی تأثیر می گذارد (Scherrer et al., 2012). بررسی همدیدی نقشه های شار تابشی روبه بالا نیز نشان از شدت بیشتر این شاخص بر روی ایران و منطقه مطالعه شده در ژانویه ۲۰۱۴ در مقایسه با ژانویه ۲۰۱۹ دارد. به طوری که در ژانویه ۲۰۱۴ این مقدار بر روی حوضه مطالعه شده در حدود ۱۰۰ وات بر مترمربع (W/m^2) و در ژانویه ۲۰۱۹ این مقدار کمتر از ۵۰ وات بر مترمربع (W/m^2) است؛ بنابراین، ارتباط مستقیم بین میزان پوشش برف حوضه آبریز کارون و مارون در ارتفاعات زاگرس با تابش روبه بالای خورشیدی در ماه ژانویه تأیید می شود؛ بنابراین، در این ماه هرچه پوشش برف بیشتر باشد، میزان شار تابش خورشیدی روبه بالا نیز بیشتر می شود (شکل ۶).



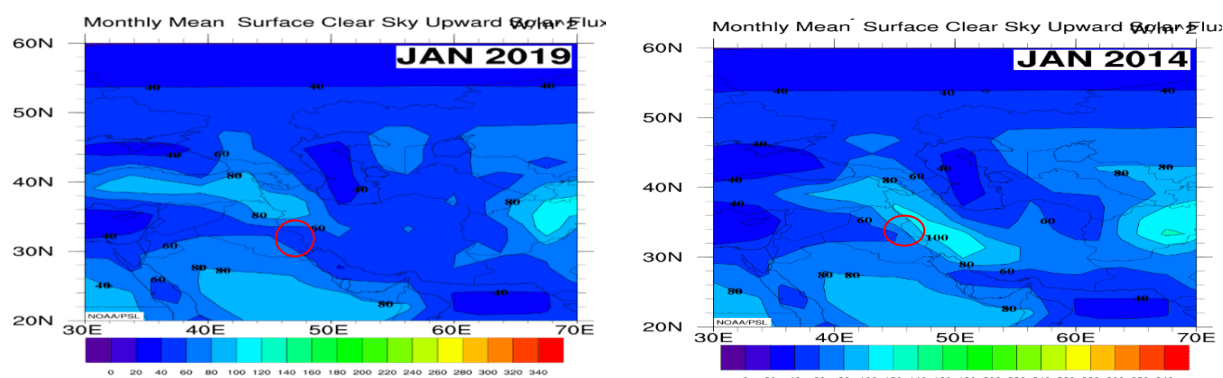
شکل (۳): مقایسه توزیع مکانی پهنه‌های برفی و غیربرفی حوضه آبریز کارون و مارون در ژانویه ۲۰۱۹ و ژانویه ۲۰۱۴
Figure 3: Spatial distribution comparison of snow-covered and snow-free areas in the Karun and Maroon river basins in January 2019 and January 2014



شکل ۴: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی در ماه ژانویه ۲۰۱۴ و ژانویه ۲۰۱۹
Figure 4: Geopotential height maps at the 700 hPa level for January 2014 and January 2019



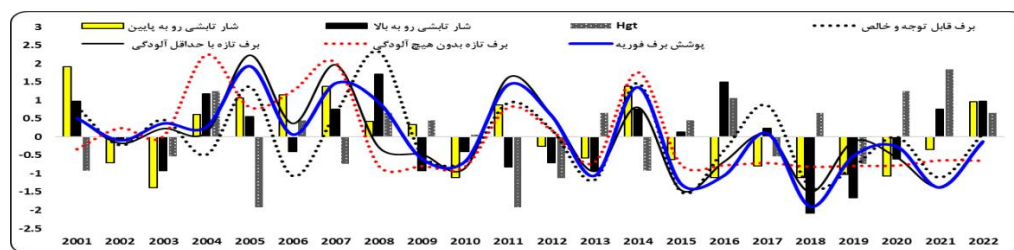
شکل ۵: نقشه شار تابش خورشیدی روبه پایین در ماه ژانویه ۲۰۱۴ و ژانویه ۲۰۱۹
Figure 5: Downward solar radiation flux maps for January 2014 and January 2019



شکل ۶: نقشه شار تابش خورشیدی روبه بالا در ماه ژانویه ۲۰۱۴ و ژانویه ۲۰۱۹

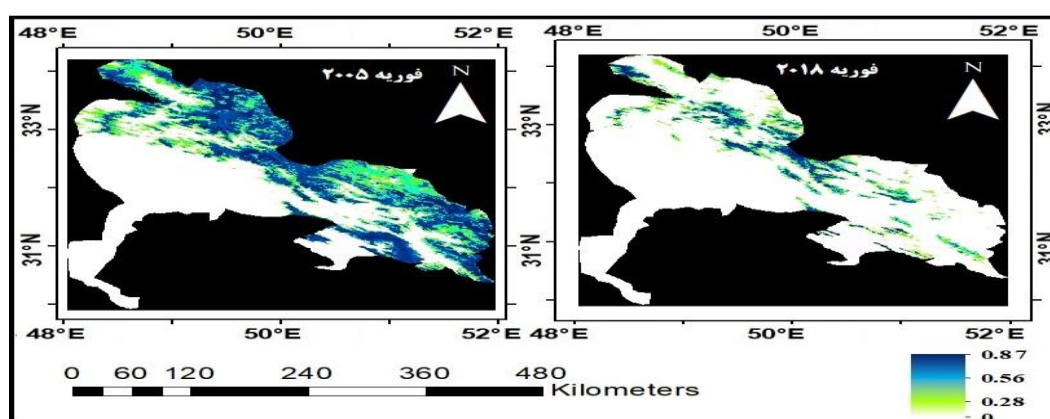
Figure 6: Upward solar radiation flux maps for January 2014 and January 2019

در ماه فوریه بین پوشش برف و ارتفاع ژئوپتانسیل همبستگی بسیار قوی مشاهده شد. با مقایسه نوسانات نمودار پوشش برف و میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل نیز هماهنگی معکوس این متغیرها به وضوح مشهود است. طبق نتایج در فوریه سال ۲۰۰۵ شاخص پوشش برف بالاتر از میانگین نرمال و در فوریه سال ۲۰۱۸ پوشش برفی بسیار کمتر از میانگین نرمال خود بوده است (شکل ۷). با مقایسه نقشه پوشش برفی طی دو دوره ذکر شده نیز به وضوح تفاوت وسعت پوشش برفی مشخص است (شکل ۸). بررسی همدیدی نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی تأییدکننده ارتفاع کمتر جو در فوریه سال ۲۰۰۵ در مقایسه با فوریه ۲۰۱۸ است؛ به صورتی که خطوط ۳۰۸۰ هکتوپاسکالی در فوریه ۲۰۰۵ به عرض‌های پایین‌تر بر روی نیمه شمالی خلیج فارس قرار گرفته است. این شرایط برای فوریه ۲۰۱۸ با قرارگیری خطوط ۳۰۸۰ هکتوپاسکالی بر روی عرض‌های بالاتر و نیمه مرکزی ایران به وضوح نشان‌دهنده ارتفاع و پایداری بیشتر جو طی این ماه است؛ بنابراین، افزایش ارتفاع جو که به طور طبیعی باعث افزایش دما و پایداری می‌شود، باعث کاهش وسعت پوشش برف در فوریه ۲۰۱۸ شده است؛ به عبارت دیگر در فوریه ۲۰۱۸ با پوشش برفی کمتر، حوضه آبریز کارون و مارون بین خطوط ۳۰۸۰ تا ۲۱۲۰ هکتوپاسکالی، اما در فوریه ۲۰۰۵ حوضه مطالعه شده بین خطوط ۳۰۴۰ تا ۳۰۸۰ هکتوپاسکالی با ناپایداری و افزایش وسعت پوشش برف بیشتر قرار داشته است (شکل ۹). نتایج مطالعه همدیدی بارش برف در غرب ایران نیز نشان داد که ایجاد فرود عمیق جوی و شرایط ناپایداری بیشتر در غرب مدیترانه و شمال آفریقا نقش مؤثری در گسترش وسعت پوشش برف (NDSI) در نواحی غرب ایران دارد (کاشکی و همکاران، ۱۴۰۱)؛ بنابراین، دوره با ارتفاع ژئوپتانسیل بیشتر (فوریه ۲۰۱۸) هم‌زمان با شار تابشی روبه پایین با انرژی ورودی بیشتر از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار پوشش برفی است. همچنین نقشه همدیدی شار تابشی روبه بالا، تأییدکننده شار شدیدتر در نیمه غربی ایران و محدوده مطالعه شده در فوریه ۲۰۰۵ (پوشش برفی بسیار وسیع) با میانگین ۱۰۰ وات بر مترمربع (W/m^2) است؛ اما در فوریه سال ۲۰۱۸ این مقدار منطبق بر کاهش وسعت پوشش برفی به کمتر از ۶۰ وات بر مترمربع (W/m^2) رسیده است (شکل ۱۰).



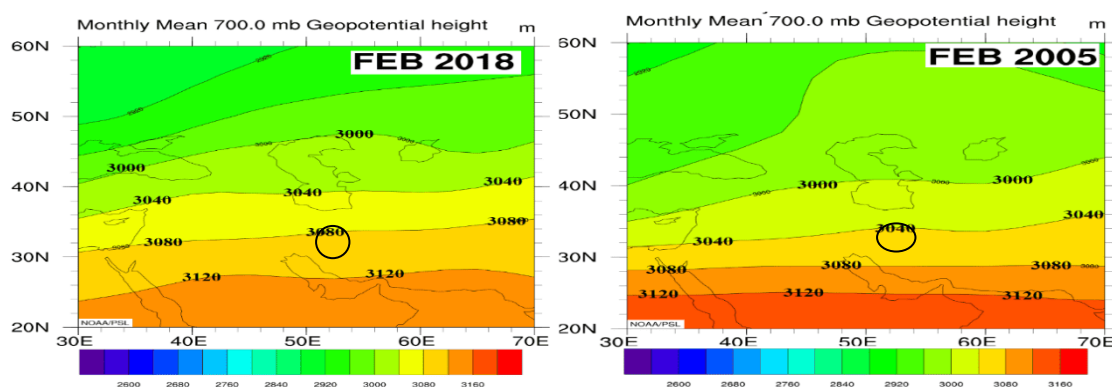
شکل ۷: مقایسه نوسانات پوشش برف در ماه فوریه با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی روبه بالا و روبه پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Figure 7: Comparison of snow cover variability in February with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period



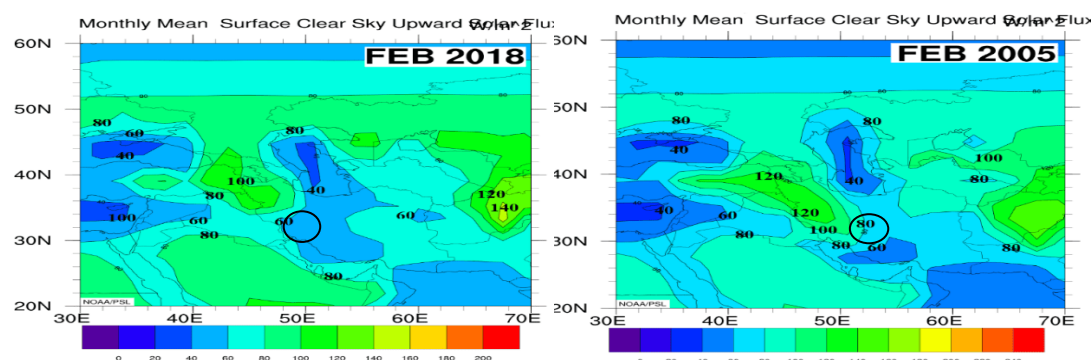
شکل (۸): مقایسه توزیع مکانی پهنه‌های برفی و غیربرفی حوضه آبریز کارون و مارون در فوریه ۲۰۰۵ و فوریه ۲۰۱۸

Figure 8: Spatial distribution comparison of snow-covered and snow-free areas in the Karun and Maroon river basins in February 2005 and February 2018



شکل ۹: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در فوریه ۲۰۰۵ و فوریه ۲۰۱۸

Figure 9: Geopotential height maps at the 700 hPa level for February 2005 and February 2018



شکل ۱۰: نقشه شار تابش خورشیدی روبه پایین در ماه فوریه ۲۰۰۵ و فوریه ۲۰۱۸

Figure 10: Downward solar radiation flux maps for February 2005 and February 2018

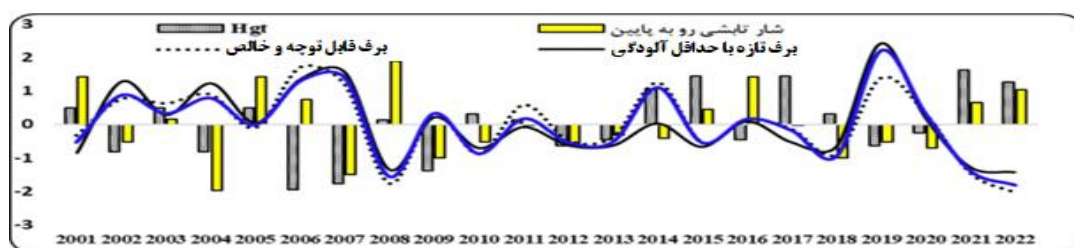
تحلیل همبستگی بین ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و پوشش برف در حوضه مطالعه شده (با تأکید بر ماه آوریل) همبستگی بسیار قوی و معنی دار را با پوشش برف حوضه مطالعه شده نشان می دهد. این ارتباط به صورت معکوس و معنی دار برای متغیر شار تابشی روبه پایین نیز وجود دارد (جدول ۴). مقایسه توزیع مکانی پهنه های برفی حوضه های آبریز کارون و مارون در آوریل ۲۰۰۷ (پوش برفی بیشتر از میانگین نرمال) و ۲۰۱۵ (پوش برفی کمتر از میانگین نرمال) بررسی شد (شکل ۱۲). براساس یافته ها، باتوجه به همبستگی معکوس در ماه آوریل (همچون سایر ماه های دوره سرد سال)، با افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل و کاهش ناپایداری جوی در آوریل ۲۰۱۵ در مقایسه با آوریل ۲۰۰۷ وسعت پوشش برف در حوضه مطالعه شده کاهش می یابد (شکل ۱۳). همچنین، افزایش شدیدتر شار تابش خورشیدی در آوریل ۲۰۱۵ نیز به کاهش وسعت پوشش برف منجر شده است (شکل ۱۴). مقایسه نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی روبه پایین در ماه آوریل نیز هماهنگی معکوس این دو پارامتر را با پوشش برفی این ماه نشان داده است (شکل ۱۱)؛ بنابراین، افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل و افزایش شار تابش خورشیدی روبه پایین در ماه آوریل، نقش مهمی در کاهش پوشش برف حوضه مطالعه شده دارد. همچنین در بازه ماه می تا سپتامبر، به دلیل کاهش شدید پوشش برفی، خارج شدن حوضه از دوره بارشی و ذوب شدید برف متأثر از افزایش دمای هوا هیچ گونه همبستگی معنی داری بین متغیرهای مطالعه شده مشاهده نشد.

جدول (۴): همبستگی بین ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه پایین و روبه بالای خورشیدی با پوشش برف در کلاس های مختلف در

ماه های آوریل، می و ژوئن حوضه آبریز کارون و مارون طی سری زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

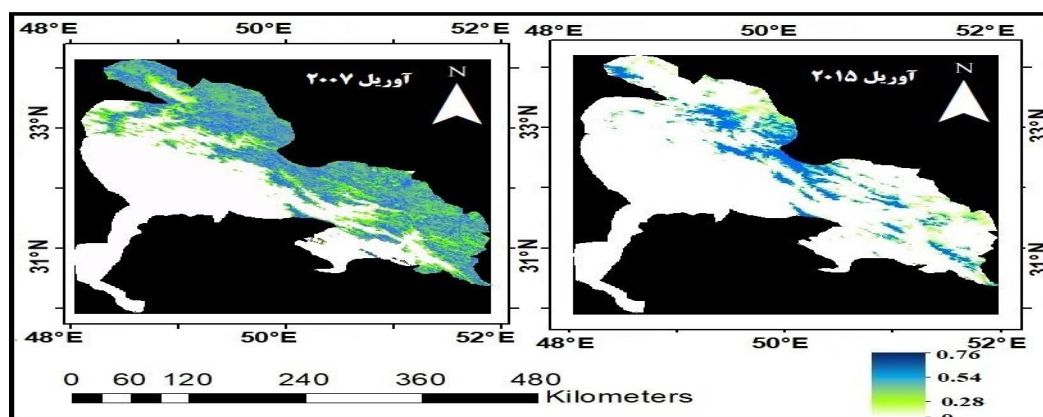
Table 4: Correlation between geopotential height, downward and upward solar radiation fluxes, and snow cover across different classes during April, May, and June in the Karun and Maroon river basins over the 2001–2022 period

پوشش کلی برف NDSI	برف تازه بدون هیچ آلودگی NDSI 0.8_0.1	برف تازه با حداقل آلودگی NDSI 0.6_0.8	برف درخورتوجه و خالص NDSI 0.4_0.6	داده های همدیدی
-.594**	-.31	-.686**	-.591**	ارتفاع ژئوپتانسیل آوریل
-.32	-.10	-.33	-.32	ارتفاع ژئوپتانسیل می
-.449*	-.16	-.477*	-.439*	شار تابشی روبه پایین آوریل



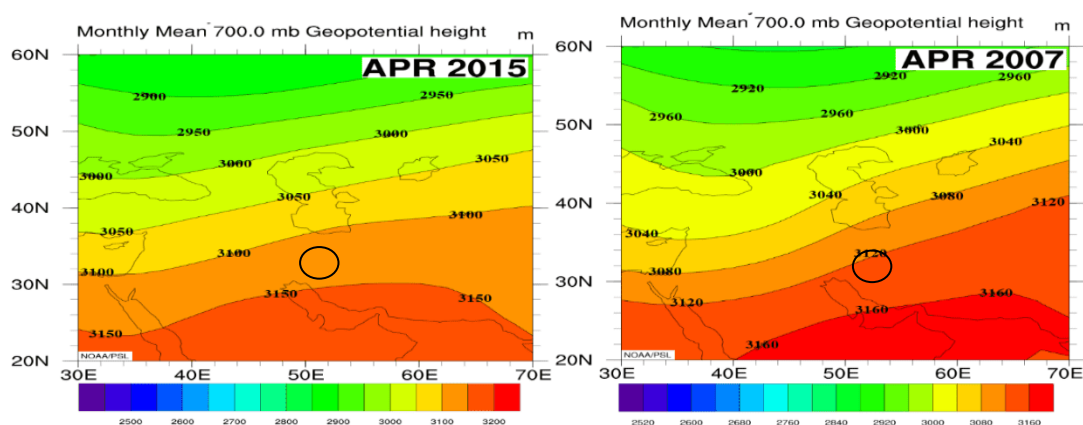
شکل ۱۱: مقایسه نوسانات پوشش برف ماه آوریل با ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی روبه بالا و روبه پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Figure 11: Comparison of snow cover variability in April with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period



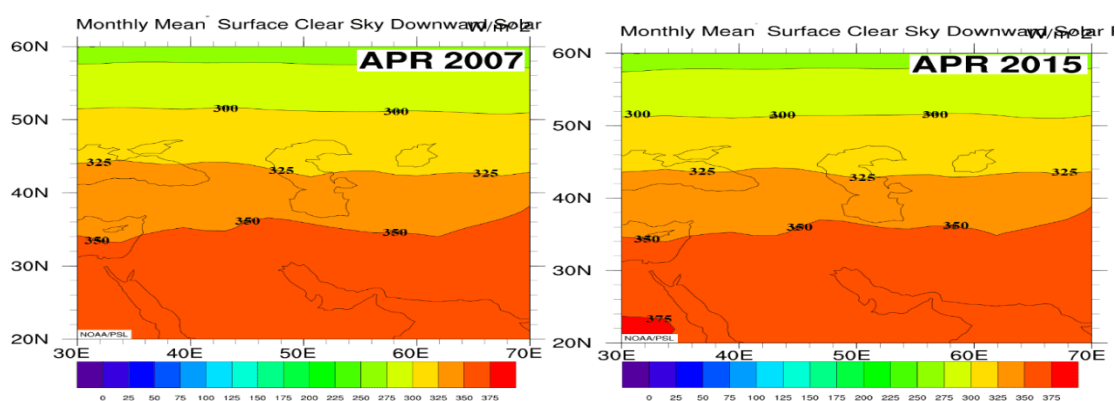
شکل (۱۲): مقایسه توزیع مکانی پهنه‌های برفی و غیربرفی حوضه آبریز کارون و مارون در آوریل ۲۰۰۷ و آوریل ۲۰۱۵

Figure 12: Spatial distribution comparison of snow-covered and snow-free areas in the Karun and Maroon river basins in April 2007 and April 2015



شکل ۱۳: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکلی در ماه آوریل ۲۰۰۷ و آوریل ۲۰۱۵

Figure 13: Geopotential height maps at the 700 hPa level for April 2007 and April 2015



شکل ۱۴: نقشه شار تابش خورشیدی روبه پایین در ماه آوریل ۲۰۰۷ و آوریل ۲۰۱۵

Figure 14: Downward solar radiation flux maps for April 2007 and April 2015

در ماه نوامبر وسعت پوشش برفی در حوضه مطالعه شده به طور طبیعی افزایش یافته است. با مقایسه دو دوره، در نوامبر ۲۰۰۷ و نوامبر ۲۰۱۸ به وضوح اختلاف وسعت پوشش برفی مشخص است (شکل ۱۶). در این ماه باتوجه به افزایش بارش ها در حوضه مطالعه شده، افزایش موارد همبستگی نیز بیشتر شده است؛ به عبارت دیگر در ماه نوامبر بین متغیر ارتفاع ژئوپتانسیل با پوشش برف خالص همبستگی معنی داری مشاهده شده است (جدول ۵)؛ بنابراین، در این ماه نیز با افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل (که معمولاً با افزایش دما همراه است)، پوشش برف خالص کاهش می یابد. این شرایط برای شار تابشی روبه پایین خورشیدی، پوشش برف در حوضه آبریز مطالعه شده کاهش می یابد. این شرایط نوامبر با افزایش شار تابشی روبه پایین خورشیدی، پوشش برف در حوضه آبریز مطالعه شده کاهش می یابد. این شرایط برای شار تابشی روبه بالا به صورت همبستگی مثبت مشاهده شد؛ به صورتی که بین شار تابشی روبه بالای خورشیدی و پوشش کلی برف همبستگی مثبت درخور توجهی با عدم معنی داری مشخص مشاهده شد (جدول ۵ و شکل ۱۵).

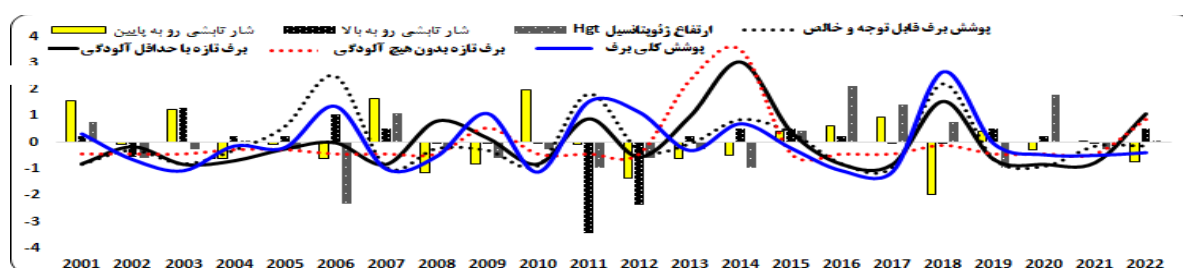
در ماه دسامبر همبستگی بین پوشش برف و ارتفاع ژئوپتانسیل به بیشترین مقدار خود رسیده است. در این ماه الگوهای گردش عمومی جو به گونه ای است که هوای سرد و خشک از عرض های جغرافیایی بالاتر به سمت منطقه مطالعه شده جریان پیدا می کند و با کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل در حوضه مدنظر با پوشش کلی برف همبستگی بسیار قوی ایجاد شده است؛ این بدان معناست که تغییرات در ارتفاع ژئوپتانسیل در این ماه، تأثیر بسیار زیادی بر روی میزان پوشش برف در حوضه مطالعه شده داشته است که با کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل (که معمولاً با کاهش دما همراه است) و ورود سامانه های ناپایدار پوشش برف افزایش می یابد. در رابطه با شار تابشی روبه پایین نیز در این ماه همبستگی بسیار قوی و منفی به وجود آمده است؛ به صورتی که بین این متغیر و پوشش برفی در دسته های مختلف و پوشش کلی برف رابطه معنی دار است؛ این بدان معنی است که با کاهش میزان تابش شار روبه پایین خورشیدی در سطح حوضه مطالعه شده، پوشش برف افزایش می شود (جدول ۵ و شکل ۱۷). این شرایط برای شار تابشی روبه بالا در ماه دسامبر به صورت همبستگی مثبت خودنمایی می کند؛ در صورتی که بین شار تابشی روبه بالا و وسعت پوشش برف در این ماه همبستگی مثبت معنی داری مشاهده می شود؛ بنابراین، می توان نتیجه گرفت که همبستگی مثبت بین شار تابشی روبه بالا و وسعت پوشش برف در ماه دسامبر عمدتاً به دلیل نقش برف به عنوان بازتابنده ای قوی وجود دارد که با افزایش وسعت پوشش برف، مقدار بیشتری از تابش خورشیدی به فضا بازتابیده می شود که به افزایش شار تابشی روبه بالا

منجر می‌شود (جدول ۵). تحلیل کمی تابش خورشیدی منعکس‌شده در مناطق کوهستانی پوشیده از برف فلات تبت نشان داد که پوشش برفی نه تنها با افزایش آلودگی سطح، میزان تابش منعکس‌شده را افزایش می‌دهد، بلکه الگوی توزیع فضایی تابش را در کوه‌های نیمه‌پوشیده از برف تغییر می‌دهد و باعث می‌شود که تابش منعکس‌شده بیشتری توسط سطوح اطراف دریافت شود (Chu et al., 2021).

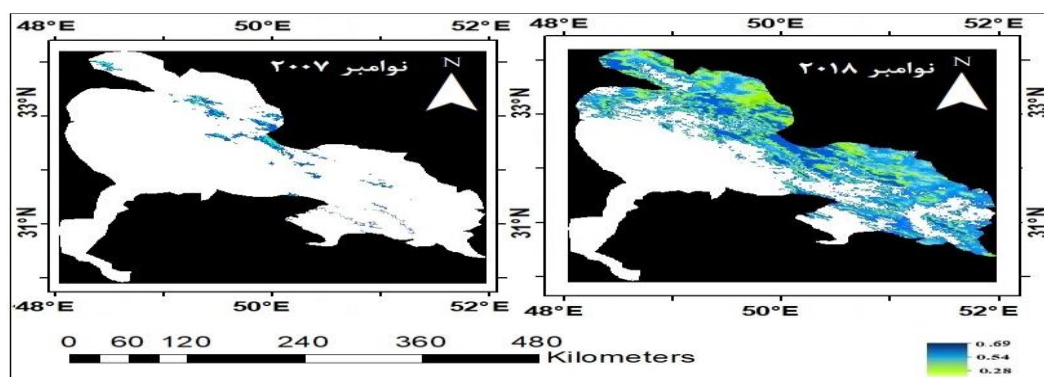
جدول (۵): همبستگی بین ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی با پوشش برف در کلاس‌های مختلف در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر حوضه آبریز کارون و مارون طی سری زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Table 5: Correlation between geopotential height, downward and upward solar radiation fluxes, and snow cover across different classes during October, November, and December in the Karun and Maroon river basins over the 2001–2022 period

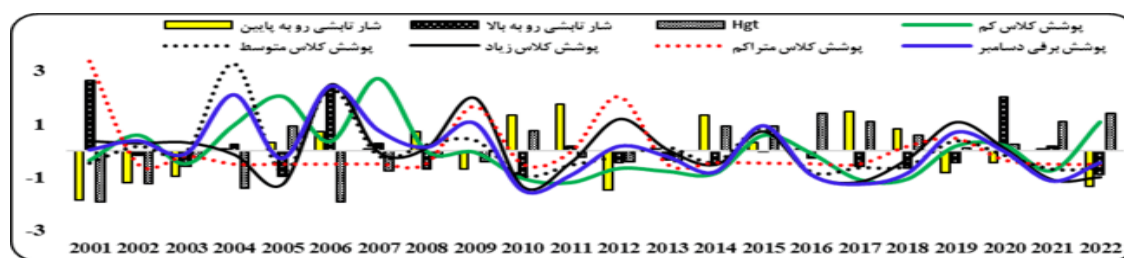
پوشش کلی برف NDSI	برف تازه بدون هیچ آلودگی NDSI 0.8_0.1	برف تازه با حداقل آلودگی NDSI 0.6_0.8	برف درخورتوجه و خالص NDSI 0.4_0.6	داده‌های همدیدی
-0.34	-.21	-.32	-.517*	ارتفاع ژئوپتانسیل نوامبر
-.687**	-.446*	-.642**	-.604**	ارتفاع ژئوپتانسیل دسامبر
-.638**	-.15	-.562**	-.554**	شار تابشی روبه‌پایین نوامبر
-.30	-.506*	-.36	-.04	شار تابشی روبه‌پایین دسامبر
.38	.12	-.082	.213	شار تابشی روبه‌بالا نوامبر
.440*	.521*	.457*	.35	شار تابشی روبه‌بالا دسامبر



شکل ۱۵: مقایسه نوسانات پوشش برف ماه نوامبر با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی روبه‌بالا و روبه‌پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲
Figure 15: Comparison of snow cover variability in November with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period

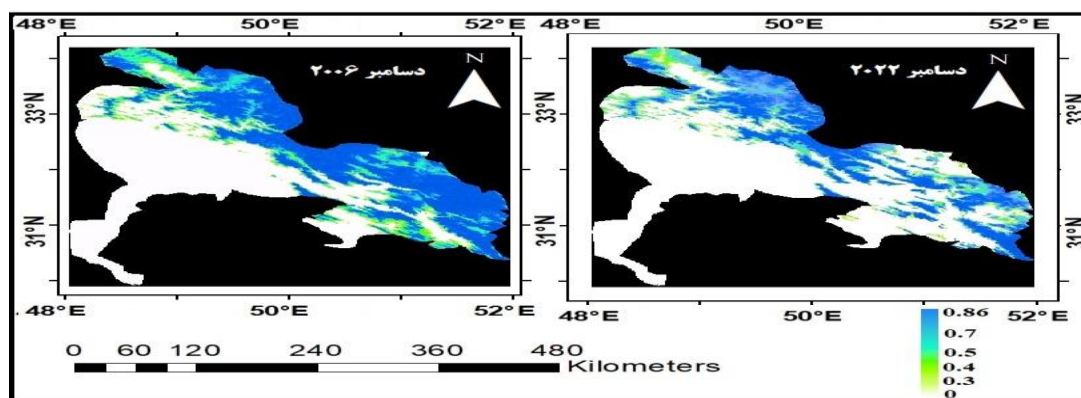


شکل ۱۶: مقایسه توزیع مکانی پهنه‌های برفی و غیربرفی حوضه آبریز کارون و مارون در نوامبر ۲۰۰۷ و نوامبر ۲۰۱۸
Figure 16: Spatial distribution comparison of snow-covered and snow-free areas in the Karun and Maroon river basins in November 2007 and November 2018



شکل ۱۷: مقایسه نوسانات پوشش برف ماه دسامبر با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT) شار تابشی روبه بالا و روبه پایین خورشیدی

Figure 17: Comparison of snow cover variability in December with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period



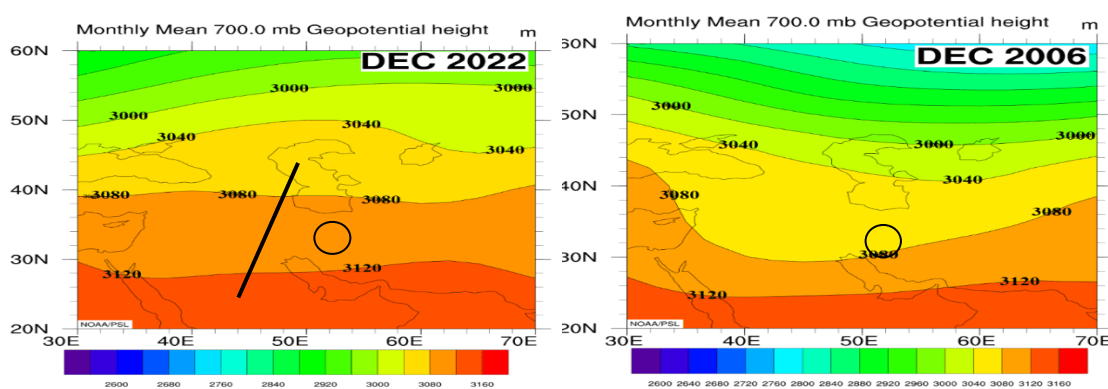
شکل ۱۸: مقایسه توزیع مکانی پهنه‌های برفی و غیربرفی حوضه آبریز کارون و مارون در دسامبر ۲۰۰۶ و دسامبر ۲۰۲۲

Figure 18: Spatial distribution comparison of snow-covered and snow-free areas in the Karun and Maroon river basins in December 2006 and December 2022

بررسی همدیدی نقشه‌های جوی طی ماه دسامبر با پوشش برفی نشان از اختلافات فراوان در الگوهای جوی منطقه مطالعه شده در این ماه طی زمان‌های مختلف دارد. طبق نتایج به دست آمده در دسامبر ۲۰۰۶ میانگین پوشش برفی حوضه مطالعه شده بیشتر از نرمال و در دسامبر ۲۰۲۲ وسعت پوشش برفی حوضه مدنظر کمتر از میانگین نرمال است. باتوجه به ارتباط معنی دار بین پوشش برفی و ارتفاع ژئوپتانسیل مشخص شد که الگوی رفتاری ارتفاع ژئوپتانسیل طی دوره پوشش برفی وسیع در دسامبر ۲۰۰۶ نشان از وجود یک ناوه عمیق بر روی غرب ایران در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی دارد؛ به صورتی که طی این دوره منطقه مطالعه شده بین خطوط ۳۰۸۰ تا ۳۰۶۰ هکتوپاسکالی قرار گرفته است. این شرایط باتوجه به ماهیت ناوه کم ارتفاع منبث شده، شرایط ناپایدار را در طول ماه دسامبر ایجاد کرده است؛ اما در دسامبر ۲۰۲۲ که پوشش برفی کمتر از میانگین نرمال است، حوضه مطالعه شده بین خطوط پراارتفاع تر ۳۱۱۰ تا ۳۰۹۰ هکتوپاسکالی قرار گرفته و به طور میانگین شرایط جو پایدار با ارتفاع بیشتر بر روی ایران و حوضه مطالعه شده ایجاد شده است (شکل ۱۹).

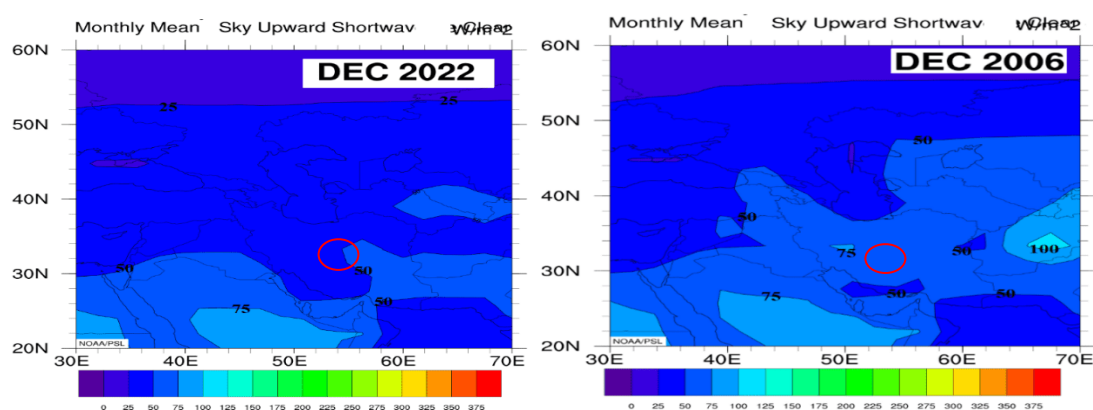
پوشش برف به دلیل ماهیت انعکاسی خود، بخشی از تابش خورشیدی را بازتاب می‌کند؛ در نتیجه، مقدار کمتری از انرژی خورشیدی به سطح زمین می‌رسد؛ بنابراین، با افزایش شار تابشی روبه پایین، وسعت پوشش برف کاهش می‌یابد؛ در حالی که در دوره‌های پوشش برفی وسیع، میزان شار تابشی روبه بالا افزایش می‌یابد. بررسی خطوط هم‌شار

تابشی خورشیدی روبه‌بالا نشان می‌دهد که در دسامبر ۲۰۰۶، مقدار متوسط این شاخص در منطقه مطالعه شده بیش از ۶۵ وات بر مترمربع (W/m^2) بوده است. این در حالی است که در دسامبر کم‌برف ۲۰۲۲، این مقدار به حدود ۴۵ وات بر مترمربع کاهش یافته است؛ بنابراین، در ماه دسامبر، افزایش پوشش برف موجب افزایش بازتاب انرژی از سطح زمین شده و در نتیجه، میزان شار تابشی روبه‌بالا بیشتر می‌شود. این پدیده نقش مهمی در تنظیم دمای سطح زمین و تغییرات آب‌وهوایی منطقه‌ای ایفا می‌کند (شکل ۲۰). تحلیل همدیدی نقشه شار تابشی روبه‌پایین خورشیدی نشان از اختلاف بسیار کم بین شار تابشی روبه‌پایین در دسامبر ۲۰۰۶ و ۲۰۲۲ دارد؛ به‌صورتی که در هر دو دوره مدنظر حوضه مطالعه شده بین خطوط هم‌شار ۱۸۰ تا ۲۰۰ وات بر مترمربع (W/m^2) است؛ اما به‌طور میانگین شار تابشی روبه‌پایین در دوره‌های پوش برفی کم، شدت بیشتری داشته است (شکل ۲۱).



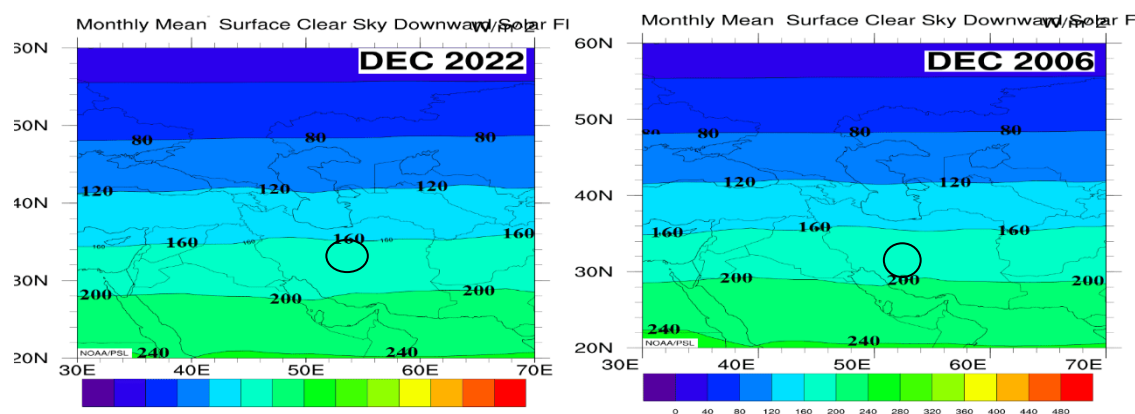
شکل ۱۹: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در ماه دسامبر ۲۰۰۶ و دسامبر ۲۰۲۲

Figure 19: Geopotential height maps at the 700 hPa level for December 2006 and December 2022



شکل ۲۰: نقشه شار تابش خورشیدی روبه‌بالا در ماه دسامبر ۲۰۰۶ و دسامبر ۲۰۲۲

Figure 20: Upward solar radiation flux maps for December 2006 and December 2022



شکل ۲۱: نقشه شار تابش خورشیدی روبه پایین در ماه دسامبر ۲۰۰۶ و دسامبر ۲۰۲۲

Figure 21: Downward solar radiation flux maps for December 2006 and December 2022

بررسی فصلی و سالانه همبستگی بین متغیرهای مدنظر نیز انجام شد. طبق نتایج به دست آمده به طور میانگین در فصل زمستان بین پوشش برف و ارتفاع ژئوپتانسیل در ارتفاع ۷۰۰ هکتوپاسکالی همبستگی منفی درخور توجهی مشاهده می شود؛ به صورتی که بین پوشش برفی خالص و پوشش کلی برف همبستگی معنی داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ مشاهده می شود؛ بنابراین، رابطه معکوس قوی ای بین میزان پوشش برف و ارتفاع ژئوپتانسیل در ارتفاع ۷۰۰ هکتوپاسکال وجود دارد؛ به صورتی که هرچه قدر ارتفاع ژئوپتانسیل کمتر باشد به طور طبیعی وضعیت ناپایداری شدیدتر و به دنبال آن وسعت پوشش برفی بیشتر است (جدول ۶ و شکل ۲۳). این شرایط به صورت همبستگی منفی معنی دار در سطح اطمینان ۰/۰۵ برای فصل بهار و در سطح اطمینان ۰/۰۱ برای فصل پاییز در رابطه با ارتفاع ژئوپتانسیل و پوشش برفی خالص و پوشش کلی برف مشاهده می شود. این نشان می دهد که این رابطه پدیده ای کلی و پایدار در منطقه مطالعه شده است (جدول ۶ و شکل های ۲۴ و ۲۵). این شرایط برای میانگین سالانه نیز تأییدکننده رابطه منفی معنی دار بین ارتفاع ژئوپتانسیل منطقه مطالعه شده با پوشش کلی برف در سطح اطمینان ۰/۰۵ است؛ این بدان معناست که هرچه مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل کمتر باشد، پوشش برف به طور متوسط در طول سال بیشتر خواهد بود (جدول ۶).

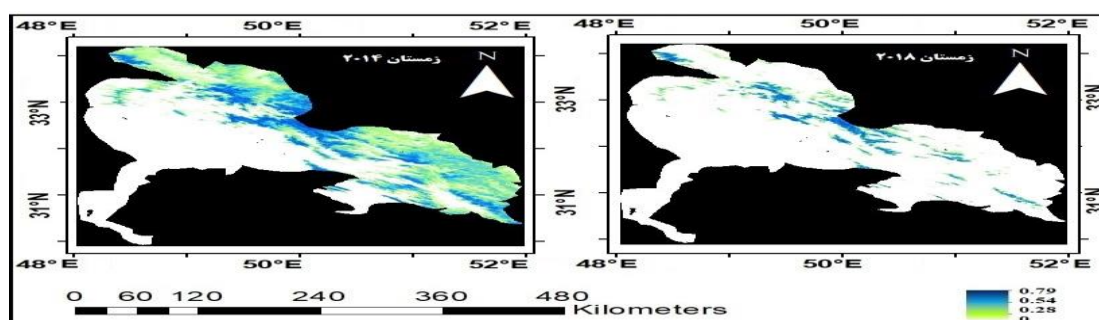
با مقایسه وسعت پوشش برفی طی زمستان ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ به طور واضح تفاوت دوره های پوشش برفی به صورت فصلی مشاهده می شود (شکل ۲۲). در رابطه با میانگین فصلی پوشش برف و شار تابشی روبه پایین فقط در فصل پاییز بین پوشش برف خالص و پوشش کلی برف در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی معنی داری وجود دارد؛ به عبارت دیگر با کاهش مقدار شار تابشی روبه پایین خورشیدی پوشش برف در فصل پاییز در حوضه آبریز رودخانه کارون و مارون نیز افزایش می یابد. این شرایط برای متغیر شار تابشی روبه بالا و پوشش برفی به صورت همبستگی مثبت مشاهده می شود؛ به صورتی که در فصل زمستان بین شار تابشی روبه بالا و پوشش برفی خالص، متوسط، برف تازه و بدون آلودگی زیاد و پوشش کلی برف همبستگی بسیار قوی و معنی داری در سطوح اطمینان ۰/۰۵ و ۰/۰۱ مشاهده می شود. این رابطه نشان می دهد که پوشش برف می تواند بر تعادل انرژی سطح زمین و در نتیجه بر شرایط اقلیمی محلی تأثیرگذار باشد. نتایج مطالعه بازخوردهای برف-آلوده در فلات تبت حوضه های رودخانه یانگ-تسه و رودخانه زرد

برای دوره‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۱ نیز نشان داد که تابش خالص خورشیدی در سال‌هایی با پوشش برف بالاتر از حد نرمال تقریباً ۱۸ وات بر مترمربع کمتر از سال‌هایی با پوشش برف کمتر از حد نرمال است (Xiao & Duan, 2016).

جدول (۶): همبستگی فصلی و سالانه بین ارتفاع ژئوپتانسیل، شار تابشی روبه‌پایین و روبه‌بالای خورشیدی با پوشش برف در کلاس‌های مختلف حوضه آبریز کارون و مارون طی سری زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

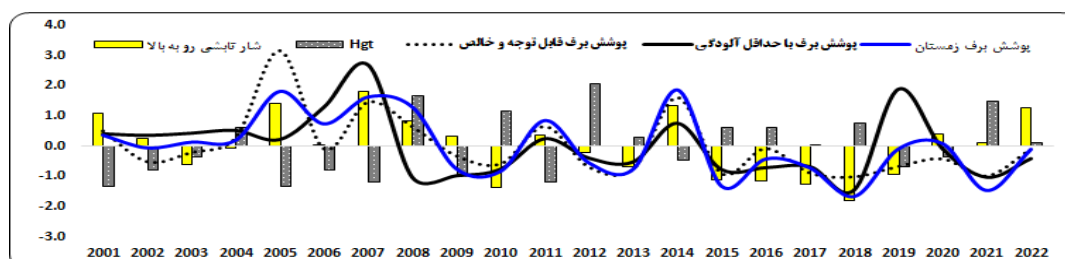
Table 6: Seasonal and annual correlations between geopotential height, downward and upward solar radiation fluxes, and snow cover across different classes in the Karun and Maroon river basins over the 2001–2022 period

پوشش کلی برف NDSI	برف تازه و بدون آلودگی زیاد NDSI0.6_0.8	برف درخور توجه و خالص NDSI0.4_0.6	داده‌های همدیدی
-.493*	-.38	-.512*	ارتفاع ژئوپتانسیل زمستان
-.434*	-.21	-.317	ارتفاع ژئوپتانسیل بهار
-.681**		-.19	ارتفاع ژئوپتانسیل پاییز
-.429*	-.23	-.29	ارتفاع ژئوپتانسیل سال
-.03	-.33	.01	شار تابشی روبه‌پایین زمستان
-.452*		-.20	شار تابشی روبه‌پایین پاییز
.768**	.436*	.738**	شار تابشی روبه‌بالای زمستان
.37		-.02	شار تابشی روبه‌بالای پاییز
-.05	-.21	-.31	شار تابشی روبه‌بالای سال



شکل (۲۲): مقایسه توزیع مکانی پهنه‌های برفی و غیربرفی حوضه آبریز کارون و مارون در زمستان ۲۰۱۸ و زمستان ۲۰۱۴

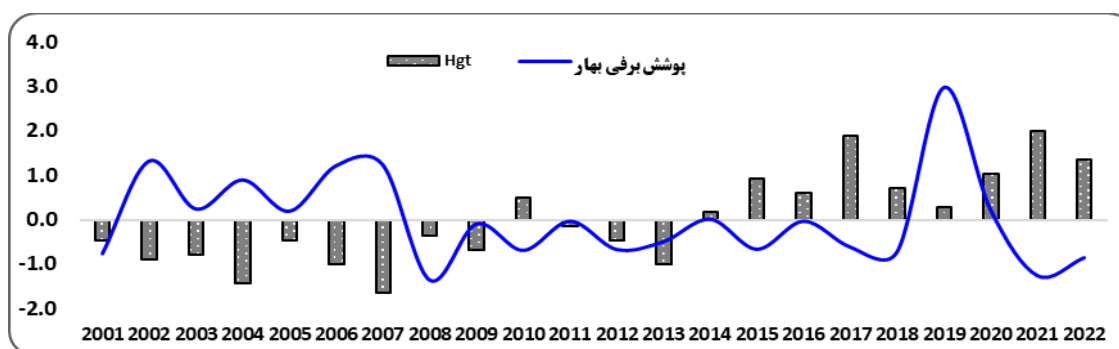
Figure 22: Spatial distribution comparison of snow-covered and snow-free areas in the Karun and Maroon river basins during winter 2014 and winter 2018.



شکل ۲۳: مقایسه نوسانات پوشش برف فصل زمستان (ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس) با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی

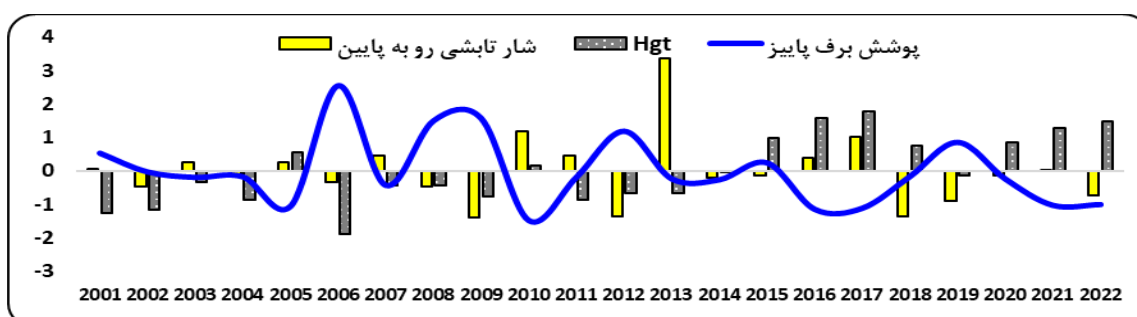
روبه‌بالا و روبه‌پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Figure 23: Comparison of winter snow cover variability (January, February, and March) with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period



نگاره ۲۴: مقایسه نوسانات پوشش برف فصل بهار (ماه‌های آوریل، می و جون) با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی رو به بالا و رو به پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱–۲۰۲۲

Figure 24: Comparison of spring snow cover variability (April, May, and June) with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period.



شکل ۲۵: مقایسه نوسانات پوشش برف فصل پاییز (ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر) با نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، شار تابشی رو به بالا و رو به پایین خورشیدی طی دوره ۲۰۰۱–۲۰۲۲

Figure 25: Comparison of autumn snow cover variability (October, November, and December) with fluctuations in geopotential height (HGT), and upward and downward solar radiation fluxes during the 2001–2022 period

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نتایج داده‌های اعتبارسنجی شده پوشش برف حوضه‌های آبریز کارون و مارون (مأخوذ از سنجنده MODIS) و متغیرهای جوی شامل ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی خورشیدی روبه‌بالا (بازتابی) و روبه‌پایین (فرودی) را در ترازهای مختلف جوی تحلیل کرده است. نتایج نشان داد که در ماه‌های فصل زمستان، به‌ویژه ژانویه و فوریه، همبستگی منفی (معکوس) بسیار قوی و معنی‌داری میان وسعت پوشش برف با ارتفاع ژئوپتانسیل و شار تابشی خورشیدی روبه‌پایین وجود دارد. در مقابل، به دلیل خاصیت بازتابندگی بالای برف (آلبیدو) مشخص شد که افزایش وسعت پوشش برف با افزایش شار تابشی خورشیدی روبه‌بالا (انرژی بازتاب‌شده از سطح) در این حوضه ارتباط مستقیم و معنی‌دار دارد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش (Song et al., 2022) در فلات چینگهای-تبت همخوانی دارد که نشان داد تغییرات شار تابش خورشیدی بر دمای سطحی و در نتیجه بر وسعت پوشش برف مؤثر است. بررسی‌ها برای ماه آوریل نیز تأییدکننده رابطه معکوس میان نوسانات ارتفاع ژئوپتانسیل (به‌طور مشخص در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال که با افزایش پایداری جو همراه است) و شار تابشی روبه‌پایین (که به افزایش دما و تسریع ذوب برف می‌انجامد) با وسعت پوشش برف بود. این امر با یافته‌های (Sahani, 2021) سازگار است که در منطقه کانچن‌جونگا در هند،

همبستگی منفی بین دمای سطح زمین و شاخص پوشش برف (NDSI) را نشان داد. در بازه زمانی ماه می تا اکتبر، به دلیل کاهش چشمگیر پوشش برف، خاتمه فصل بارش و افزایش دما هیچ‌گونه همبستگی معنی‌داری میان متغیرهای مطالعه شده مشاهده نشد؛ با این حال، از ماه نوامبر و با شروع مجدد بارش‌ها و گسترش پوشش برف، همبستگی‌ها مجدداً پدیدار شدند؛ به‌طوری‌که در این ماه، همبستگی معکوسی میان وسعت پوشش برف با ارتفاع ژئوپتانسیل و همچنین شار تابشی روبه‌بالا مشاهده شد که نشان می‌دهد افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل در فصل پاییز نیز با کاهش پوشش برف همراه است. به‌طورکلی، در طول دوره سرد سال (نوامبر تا مارس)، کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل و کاهش شار تابشی خورشیدی فرودی، به افزایش پوشش برف منجر می‌شود و شدت همبستگی‌ها از ماه دسامبر افزایش می‌یابد. شدت این همبستگی‌ها در فصول مختلف متغیر است و در پاییز و زمستان به بیشترین میزان خود می‌رسد؛ بنابراین، ارتفاع ژئوپتانسیل و تابش خورشیدی به‌عنوان دو عامل کلیدی مؤثر بر وسعت پوشش برف در حوضه‌های کارون و مارون شناسایی شدند؛ علاوه‌براین، پوشش برف در ماه‌های سرد سال با بازتاب بخش درخور توجهی از تابش خورشیدی (افزایش شار تابشی روبه‌بالا)، به حفظ دمای پایین و پایداری بیشتر توده برف کمک می‌کند.

نتایج پژوهش حاضر حاکی از وجود همبستگی معنی‌دار بین متغیرهای جوی منتخب، به‌ویژه نوسانات خورشیدی و تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل با میزان پوشش برف در حوضه‌های کارون و مارون است. نظر به قابلیت پیش‌بینی این متغیرها و نقش تعیین‌کننده آن‌ها در تغییرات پوشش برف، توصیه می‌شود تا نهادها و سازمان‌های مسئول از طریق ثبت و مدل‌سازی دقیق این نوسانات، به پیش‌بینی دوره‌های با فراوانی یا کمبود پوشش برفی اقدام کنند تا امکان مدیریت پیشگیرانه و بهینه منابع آبی در این حوضه فراهم شود.

منابع

- احمدپور، عباس، میرهاشمی، سیدحسن، و حقیقت‌جو، پرویز (۱۳۹۸). پیش‌بینی رواناب روزانه درحوضه مارون با استفاده از مدل HEC-HMS. *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۱)، ۴-۱۳.
- <https://doi.org/10.22112/jwwse.2019.154018.1117>
- رحیمی، داریوش، و هاشمی‌نسب، سادات (۱۳۹۷). تحلیل واکنش هیدرولوژی حوضه کارون شمالی به افزایش دمای کمینه. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۰(۱)، ۱-۱۷.
- <https://www.doi.org/10.22059/jphgr.2018.229600.1007021>
- زندفر، سمیرا، فیجانی، الهام، نعیمی، مریم، و ابراهیمی خوسفی، زهره (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات زمانی و مکانی خشک‌سالی آب زیرزمینی، مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون بزرگ. *دانش آب و خاک*، ۳۱(۳)، ۱۰۱-۱۱۸.
- <https://doi.org/10.22034/ws.2021.12243>
- سعیدی‌فر، زهرا، خسروشاهی، محمد، جلیلی، عادل، رضوی‌زاده، سمانه، درگاهیان، فاطمه، زندفر، سمیرا، لطفی‌نصب اصل، سکینه، گوهردوست، آزاده، تیموری، سارا، و فیاض، محمد (۱۴۰۰). تحلیل اثر عوامل اقلیمی و خشکسالی بر روی رواناب ورودی و خروجی به دشت خوزستان در حوضه کارون. *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۸(۳)، ۴۳-۵۴.
- <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i3.2102.1020>

شاکریان، سجاد، ترابی پوده، حسن، شاهی نژاد، بابک، و نقوی، حامد (۱۳۹۸). بررسی روند تغییرات بارندگی و دبی رودخانه‌های حوضه کارون بزرگ با استفاده از روش TFPW-MK. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵ (۳)، ۲۷۲-۲۸۲.

https://www.iwrr.ir/article_92188.html

شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، معاونت پژوهش و مطالعات پایه (۱۳۹۰). گزارش برف‌سنجی سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۱. وزارت نیرو، دفتر مطالعات پایه منابع آب.

<http://bayanbox.ir/view/8169069898040984862/Barf90-91.pdf>

شمس، مینا، مباشری، محمدرضا، و فاطمی، سیدباقر (۱۳۹۳). ارزیابی دقت شاخص NDSI استخراج‌شده از تصاویر MODIS در مناطق دارای شیب متوسط. *نشریه سنجش از دور و GIS ایران*، ۶ (۱).

https://gisj.sbu.ac.ir/article_95340.html?lang=fa

صداقت‌کردار، عبدالله، و فتاحی، ابراهیم (۱۳۸۷). شاخص‌های پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۶ (۱۱)، ۵۹-۷۶. <https://doi.org/10.22111/gdij.2008.1616>

کاشکی، عبدالرضا، حسینی، سیدمحمد، زندی، رحمان، و حاجی محمدی، حسن (۱۴۰۱). بررسی ماهواره‌ای-همدید بارش‌های فراگیر برف در غرب ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶ (۸۲)، ۲۱۰-۱۸۹.

<https://doi.org/10.22034/gp.2021.48741.2914>

کفایت مطلق، امیدرضا، و دارند، محمد (۱۴۰۳). آب و هواشناسی سپیدایی ایران با داده‌های مودیس. *فیزیک زمین و فضا*، ۵۰ (۲)، ۳۷۳-۳۸۶. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.356816.1007512>

عبادی، یوسف، افتخاری، اکرم، محمدخانلو، حکمت‌اله، و فخری، مجید (۱۴۰۰). ارائه شاخص طیفی جدید به منظور استخراج سطوح برفی با استفاده از تصاویر اپتیکی سنجش از دور. *اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۰ (۱۱۷)، ۷۹-۹۴.

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.244452>

عفیفی، محمدابراهیم (۱۴۰۰). بررسی تغییرات سطح پوشش برف و تعیین خط ذوب برف در مناطق کوهستانی با استفاده از تصاویر مودیس و شاخص NDSI (مطالعه موردی یخچال‌های زاگرس). *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۰ (۳۸)، ۲۵-۳۶. <https://sanad.iau.ir/Journal/ges/Article/978896>

محمدی احمدمحمودی، پیمان، و خورانی، اسداله (۱۳۹۸). تغییرات پوشش برف در رشته‌کوه زاگرس با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده MODIS. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۵ (۲)، ۳۵۵-۳۷۱.

<https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.256133.1006997>

میرموسوی، سیدحسین، و صبور، لیلا (۱۳۹۳). پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه شمال غرب ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۱۲ (۳۵)، ۱۸۱-۱۹۹.

<https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1562>

References

- Afifi, A. (2021). Investigation of snow cover extent changes and determination of snowmelt line in mountainous areas using MODIS images and NDSI index (Case study: Zagros glaciers). *Geography and Environmental Studies*, 10(38), 25-36. <https://sanad.iau.ir/Journal/ges/Article/978896> [In Persian]
- Ashraf, A., Ahmad, S. S., Aziz, N., & Shah, M. T. A. (2012). Preliminary estimation of snow covers extents of Astore River Basin in Northern Areas, Pakistan. *Journal of Geography and Geology*, 4(2). <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v4n2p124>

- Ahmadpour, A., Mirhashemi, S. H., & Haghighatjou, P. (2019). Daily runoff prediction in the Marun basin using the HEC-HMS model. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 4(1), 4-13. <https://doi.org/10.22112/jwwse.2019.154018.1117> [In Persian]
- Alonso-González, E., López-Moreno, J. I., Navarro-Serrano, F., Sanmiguel-Valladolid, A., Aznárez-Balta, M., Revuelto, J., & Ceballos, A. (2020). Snowpack sensitivity to temperature, precipitation, and solar radiation variability over an elevational gradient in the Iberian mountains. *Atmospheric Research*, 243, 104973. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104973>
- Barry, R. G. (1996). The parameterization of surface albedo for sea ice and its snow cover. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 20(1), 63–79. <https://doi.org/10.1177/030913339602000104>
- Capozzi, V., De Vivo, C., & Budillon, G. (2022). Synoptic control over winter snowfall variability observed in a remote site of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015. *European Geosciences Union*, 16(5), 1741-1763. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1741-2022>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: *The Physical Science Basis*. In T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (Eds.), Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., & He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121-136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Chu, D., Liu, L., & Wang, Z. (2023). Snow Cover on the Tibetan Plateau and Topographic Controls. *Remote Sensing*, 15(16), 4044. <https://doi.org/10.3390/rs15164044>
- Chu, Q., Yan, G., Qi, J., Mu, X., Li, L., Tong, Y., & Wild, M. (2021). Quantitative analysis of terrain reflected solar radiation in Snow-covered Mountains: A case study in Southeastern Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(11), e2020JD034294. <https://doi.org/10.1029/2020JD034294>
- De Jong, R., Verbesselt, J., Schaepman, M. E., & De Bruin, S. (2012). Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change. *Global Change Biology*, 18(2), 642-655. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02578.x>
- Dharmadasa, V., Kinnard, C., & Baraër, M. (2024). Meteorological control on snow depth evolution and snowpack energy exchanges in an agro-forested environment by a measurement-based approach: A case study in Sainte-Marthe, Eastern Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 347, 109915. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109915>
- Ebadi, Y., Eftekhari, A., Mohammadkhanloo, H., & Fakhri, M. (2021). Providing a new spectral index to extract snow cover using optical remote sensing images. *Scientific-Research Journal of Geographical Information "Sefid-Eghlim"*, 30(117), 79-94. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.244452> [In Persian]
- Fyfe, J.C., & Flato, G.M. (1999). Enhanced climate change and its detection over the Rocky Mountains. *Journal of Climate*, 12, 230–243. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012%3C0230:ECCAID%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012%3C0230:ECCAID%3E2.0.CO;2)
- Hall, D., Riggs, G., Salomonson, V., & Scharfen, G. R. (2000). *Earth Observing System (EOS) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Global Snowcover Maps*. IAHS-AISH publication, 55-60. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20000074255>
- Kashki, A., Hosseini, S. M., Zandi, R., & Hajimohammadi, H. (2023). Satellite-Synoptic analysis of widespread snowfall in west Iran. *Journal of Geography and Planning*, 26(82), 189-210. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.48741.2914> [In Persian]
- Houghton, R. A., & Hackler, J. L. (2001). *Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850– 2005*. University of Tennessee-Battell. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc718106/m2/1/high_res_d/775411.pdf
- Iran Water Resources Management Company, Deputy of Research and Basic Studies. (2011). *Snow Survey Report, Water Year 2011–2012*. Ministry of Energy of Iran, Office of Basic Studies of Water Resources. <http://bayanbox.ir/view/8169069898040984862/Barf90-91.pdf> [In Persian]

- Jiang, H., Lu, N., Qin, J., Tang, W., & Yao, L. (2019). A deep learning algorithm to estimate hourly global solar radiation from geostationary satellite data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109327>
- Kefayat Motlagh, O., & Darand, M. (2024). Iran's albedo climatology using MODIS data. *Geophysics and Space Physics*, 50(2), 373-386. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.356816.1007512> [In Persian]
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)
- Lee, W. Y., Gim, H. J., & Park, S. K. (2024). Parameterizations of snow cover, snow albedo and snow density in land surface models: A comparative review. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 60(2), 185-210. <https://doi.org/10.1007/s13143-023-00344-2>
- Lenhart, T., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2003). Effects of land use changes on the nutrient balance in mesoscale catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(33-36), 1301-1309. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.09.006>
- Li, D., Zhang, R., & Huang, J. (2024). Interannual Ural atmospheric variability under slow-varying soil moisture and snow cover: Three quasi-equilibrium states. *Geophysical Research Letters*, 51(22), e2024GL112109. <https://doi.org/10.1029/2024GL112109>
- Liou, K. N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Vol. 84). Elsevier.
- Liu, L., & Ma, Y. (2024). Improvement of albedo and snow-cover simulation during snow events over the Tibetan Plateau. *Monthly Weather Review*, 152(3), 705-724. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-23-0083.1>
- McEvoy, D. J., & Hatchett, B. J. (2023). Spring heat waves drive record western United States snowmelt in 2021. *Environmental Research Letters*, 18(1), 014007. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aca8bd>
- Meyer, J., Hedrick, A., & Skiles, S. M. (2024). A new approach to net solar radiation in a spatially distributed snow energy balance model to improve snowmelt timing. *Journal of Hydrology*, 638, 131490. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131490>
- Mirmousavi, S. H., & Saboor, L. (2014). Monitoring snow cover changes using MODIS satellite imagery in northwestern Iran. *Geography and Development*, 12(35), 181-199. <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1562> [In Persian]
- Mohammadi Ahmadm Mahmoudi, P., & Khoorani, A. (2019). Snow cover changes of Zagros Range in 2001-2016 using daily data of MODIS. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(2), 355-371. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.256133.1006997> [In Persian].
- Motlagh, O. R., Khosravi, M., & Masoodian, S. A. (2024). The effects of snow on albedo in the mountains of Iran using MODIS data. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(2), 1103-1112. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04680-1>
- Przybylak, R., Svyashchennikov, P. N., Uscka-Kowalkowska, J., & Wyszynski, P. (2021). Solar radiation in the arctic during the early twentieth-century warming (1921-50): Presenting a compilation of newly available data. *Journal of Climate*, 34(1), 21-37. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0257.1>
- Raghubanshi, S., Agrawal, R., & Rathore, B. P. (2023). Enhanced snow cover mapping using object-based classification and normalized difference snow index (NDSI). *Earth Science Informatics*, 16(3), 2813-2824. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01077-6>
- Rahimi, D., & Hasheminasab, S. (2018). Hydrologic response of North Karun Basin to increase in minimum air temperature. *Physical Geography Research*, 50(1), 1-17. <https://www.doi.org/10.22059/jphgr.2018.229600.1007021> [In Persian]
- Renno, N. O., & Miglietta, M. M. (2009). Solar radiation. In *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 723-730). Academic Press.
- Riggs, G. A., Hall, D. K., Salomonson, V. (2006). MODIS snow products user guide to collection 5. *Digital Media*, 80(6), 1-80. https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf

- Saeidifar, Z., Khosrowshahi, m., Jalili, A., Razavizadeh, S., Dargahian, F., & Zandifar, S., Lotfinasabasl, S., Gohardust, A., Teimuri, S., Fayaz, M. (2021). Analysis of the effect of climatic factors and drought on inflow and outflow from the Khuzestan Plain in the Karun Basin. *Water and Sustainable Development*, 8(3), 43-54. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i3.2102.1020> [In Persian]
- Sahani, N. (2021). Assessment of spatio-temporal changes of land surface temperature (LST) in Kanchenjunga Biosphere Reserve (KBR), India using Landsat satellite image and single channel algorithm. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100659>
- Scherrer, S. C., Ceppi, P., Croci-Maspoli, M., & Appenzeller, C. (2012). Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(4), 509–516. <https://www.dx.doi.org/10.1007/s00704-012-0712-0>
- Sedaghatkardar, A., & Fattahi, E. (2008). Drought early warning methods over Iran. *Geography and Development Journal*, 6(11), 59–76. <https://doi.org/10.22111/gdij.2008.1616> [In Persian]
- Serreze, M. C., & Francis, J. A. (2006). The arctic amplification debate. *Climatic Change*, 76(3), 241-264. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>
- Shakarian, S., Taravipodeh, H., Shahinezhad, B., & Naghavi, H. (2019). Investigation of the rainfall and flow river trend in the Great Karun Basin using the TFPW-MK. *Iranian Water Resources Research*, 15(3), 272-282. https://www.iwrr.ir/article_92188.html [In Persian]
- Shams, M., Mobasheri, M., & Fattemei, B. (2014). Evaluation of the accuracy of the NDSI index derived from MODIS images in areas with moderate slope. *Remote Sensing and GISE Journal of Iran*, 6(1). https://gisj.sbu.ac.ir/article_95340.html?lang=fa [In Persian]
- Song, Y., Li, Z., Zhou, Y., Bi, X., Sun, B., Xiao, T., & Wang, C. (2022). The influence of solar activity on snow cover over the inghai–Tibet plateau and its mechanism analysis. *Atmosphere*, 13(9), 1499. <https://doi.org/10.3390/atmos13091499>
- Strum, J., Svensson, J., Moosmüller, H., Meinander, O., Virkkula, A., Hyvärinen, A., & Asmi, E. (2023). Snow cover duration in northern Finland and the influence of key variables through a conceptual framework based on observed variations in snow depth. *Science of the Total Environment*, 903, 166333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166333>
- Verbesselt, J., Zeileis, A., & Herold, M. (2012). Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 123, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>
- Wang, X. Y., Wang, J., Jiang, Z. Y., Li, H. Y., & Hao, X. H. (2015). An effective method for snow-cover mapping of dense coniferous forests in the Upper Heihe River Basin using Landsat Operational Land Imager data. *Remote Sensing*, 7(12), 17246-17257. <http://dx.doi.org/10.3390/rs71215882>
- Xiao, Z., & Duan, A. (2016). Impacts of Tibetan Plateau snow cover on the interannual variability of the East Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 29(23), 8495-8514. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0029.1>
- Zandifar, S., Fijani, E., Naeimi, M., & Ebrahimi Khouf, Z. (2021). Analysis of spatiotemporal variations of groundwater drought, case study: Karun Watershed. *Water and Soil Science*, 31(3), 101-118. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.12243> [In Persian].
- Zhang, Y., Qin, X., Li, X., Zhao, J., & Liu, Y. (2020). Estimation of shortwave solar radiation on clear-sky days for a valley glacier with Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 12(6), 927. <https://doi.org/10.3390/rs12060927>
- Zhou, B., Wang, Z., Sun, B., & Hao, X. (2021). Decadal change of heavy snowfall over northern China in the mid-1990s and associated background circulations. *Journal of Climate*, 34(2), 825-837. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0815.1>