

Analysis of changes in maximum snow cover duration in Northwest Iran

Bromand Salahi^{1*} Amirhossein Halabian² Abbas Kashani³

¹ Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Associate Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran

³ Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Extended Abstract

Introduction

Variations in snow cover, along with its phenological aspects such as the duration, onset, and cessation of snowfall, are critical to understanding mountainous ecosystems. These changes heavily influence water resource accessibility in nearby regions. Snow cover serves as a vital component in energy and temperature regulation and is intricately connected to hydrological, biological, chemical, and geological processes. Furthermore, it plays a significant role in both the hydrological cycle and the overall energy balance of the environment. Recent research indicates that mountain regions are undergoing temperature increases at twice the global average rate, with this trend intensifying at higher altitudes. As a result, mountains have come to be regarded as critical indicators of monitoring climate change over the past few decades. This study focused on examining variations in the maximum snow cover persistence in northwestern Iran, analyzed across monthly, seasonal, and annual time scales.

Materials and Methods

This study utilized MOD10A1 and MOD10A1 version 6 products from the Terra and Aqua satellites to conduct a daily analysis of snow phenology spanning the years 2003 to 2020. These datasets, accessible as digital network data derived from the NDSI index, were retrieved through Earth data's online portal at earthdata.nasa.gov. A threshold value of 0.1 or higher was applied to snow cover estimation to facilitate the conversion of snow cover data into a binary format. All adjustments, data processing, and analytical procedures were carried out using Python. Cloudiness reduction was accomplished using data fusion algorithms, spatial neighborhood filtering, and temporal filtering techniques. By combining the Terra and Aqua databases and applying spatio-temporal filtering with a threshold range of 0.1 to 1, a binary database of daily snow cover was generated. This database served as the basis for evaluating snow cover persistence and maximum snow cover persistence parameters, which were analyzed across monthly, seasonal, and annual intervals.

Results and Discussion

During January, the maximum consecutive snow cover pattern is marked by two prominent peaks in the Sahand and Sabalan Mountains, specifically around Ghoch-Goli Daghi and Sultan-Sabalan, with intervals spanning 20 to 30 days. In February, the MaxSCDur indicates a noticeable rise in snow cover duration, influenced by various surface roughness features and an expansion of areas showing high persistence. By March, this pattern shifts as regions of high persistence shrink and areas with low persistence expand. As the cold season concludes, the snow cover significantly decreases. The spatial pattern observed in April reveals a notable reduction in snow cover, with snow retreating from mid- and low-altitude areas while remaining concentrated at high peaks. This pattern underscores the crucial influence of altitude on the persistence of snow cover during the melting season. Between May and September, spatial patterns for MaxSCDur exhibit a gradual decline in duration, decreasing from 20.87 to 24.24 days in May to just 5.91 to 7.5 days by September. During August and September, the maximum consecutive snow cover is confined exclusively to the summit of the Sabalan Glacier. From October to December, MaxSCDur spatial patterns display an upward trend in frequency, with durations increasing from 20.84 to 23.24 days in October to approximately 30 to 31.25 days by December. The MaxSCDur pattern for October highlights a notable increase in snow cover range and duration as autumn sets in, marked by declining temperatures, especially at higher altitudes. Analysis of the spatial distribution for winter's MaxSCDur reveals the highest snow cover duration at the summits of Sabalan and Sahand, ranging between 25.6 and 29.25 days. The spring pattern shows a reduction in MaxSCDur, decreasing progressively from the southern to northern parts of the studied area when compared to winter. During summer, the maximum consecutive snowfall period is limited to 0–2 days across

most regions, except for notable peaks such as Sabalan (4–20 days), Sahand, Avarin, Barda-Rash, Kale-Shin, and Qandil (2–4 days). The autumn MaxSCDur pattern records durations of 4–20 days in Sabalan and its slopes, 4–8 days in the Sahand and Bozgush mountains, and 4–6 days in Qara-Dagh, Barda-Rash, Dalampar, and Kale-Shin. On an annual scale, areas with extended MaxSCDur have shown strong regression towards central and high troughs during 2010 and 2018. Conversely, years such as 2008, 2012, and 2017 exhibit visible rock formations predominantly at higher altitudes, encompassing foothills and slopes within these geomorphologic units.

Conclusion

The MaxSCDur map for February reveals that areas with high snow cover persistence have expanded and intensified when compared to January. An evaluation of the MaxSCD models for November and December indicates a marked increase in both the thickness and duration of snow cover across all snow types as the cold season advances. December serves as the turning point when full winter conditions are established in the study area. In a seasonal context, winter is characterized by peak precipitation levels and prolonged snow cover, especially across rugged terrains throughout the region analyzed. As spring arrives, rising temperatures lead to the gradual retreat and melting of snow cover. By summer, most regions are entirely devoid of snow, with only fleeting patches visible on the highest summits. Autumn brings a shift as falling temperatures initiate the gradual accumulation of snow at elevated altitudes, resulting in a higher maximum snowfall compared to summer. These patterns reflect a transition from warmer to colder conditions and signal the region's preparation for increased winter precipitation. Historical observations show that minimum MaxSCD values occurred in 2010 and 2018, while peak values were recorded in 2008, 2012, and 2017 within the study area.

Keywords: Periodic changes, Snow, Remote sensing, Terra & Aqua MODIS, NDSI

Article Type: Research Article

Data Availability Statement:

All the information and results are presented in the main text of the article.

Authors' contribution

Bromand Salahi: Conceptualization, research design, data analysis.

Amirhossein Halabian: Conceptualization, guidance, preparation of maps, writing of the main draft, and revision of the article.

Abbas Kashani: Review of References, editing of the article and optimization of maps.

*Corresponding Author, E-mail: Bromand Salahi, salahi@uma.ac.ir

Citation: Salahi, B., Halabian, AH., & Kashani, A. (2026). Analysis of Changes in Maximum Snow Cover Duration in Northwest Iran. *Soil and water management and modeling*, 6(1), 208-225.

doi: 10.22098/mmws.2025.18162.1651

Received: 22 August 2025, Received in revised form: 01 October 2025, Accepted: 01 October 2025, Published online: 21 March 2026

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 208-225

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تحلیل تغییرات بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش در شمال غرب ایران

برومند صلاحی^{۱*}، امیرحسین حلیان^۲، عباس کاشانی^۳

^۱ استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در این پژوهش با هدف شناسایی و واکاوی تغییرات فضایی- زمانی بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش در شمال غربی ایران از فرآورده های روزانه برف مادیس (MOD10A1 و MYD10A1) در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۳ استفاده شد. ابتدا، داده ها بر اساس آستانه حداقل ۰/۸ باینری شد. در گام بعدی اثر ابرناکی با استفاده از ترکیب داده ها، فیلتر مکانی و زمانی کاهش داده شد. سپس، بیشینه ماندگاری برف پوش (MaxSCDur) در هر یاخته در شبکه رستری در بازه ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه و نقشه های پهنه ای ترسیم شد. نتایج نشان می دهد که پهنه های با ماندگاری بالا در فوریه نسبت به ژانویه گسترش و افزایش یافته است. در این ماه بیشینه میزان MaxSCDur با مقادیر ۲۸-۲۰ روز متعلق به قله کوهستانی و کمینه آن با ۳-۰ روز مربوط به نواحی پست شمال شرقی کوه های طارم است. الگوی مارس کاهش گستره پهنه های با ماندگاری بالا و گسترش مناطق با ماندگاری کم را نشان می دهد. الگوی آوریل نشان از کاهش چشم گیر ماندگاری برف و تمرکز برف در قله مرتفع دارد. الگوهای ماه های می تا سپتامبر کاهش مقادیر این نمایه را نشان می دهد. بر اساس الگوهای اکتبر تا دسامبر، بیشینه میزان MaxSCDur در قله ارتفاعات از ۲۳-۲۰/۸۴ روز به ۳۱-۳۰ روز افزایش یافته است. کمینه میزان آن در این دوره مربوط به نواحی پست با ۰-۳ روز است. الگوی زمستانه، بیشینه میزان MaxSCDur را در قله سیلان و سه پند با مقادیر ۶/۲۹-۲۵ روز و کمینه آن را در نواحی پست با مقادیر ۲۰-۰ روز نشان می دهد. الگوی بهار نسبت به زمستانه نشان از افت MaxSCDur از جنوب به طرف شمال در پهنه مطالعاتی دارد. بر اساس الگوی تابستانه، MaxSCDur فقط در قله سیلان با ۲۰-۴ روز، در سه پند و قله ارتفاعات غربی منطقه با ۲۴-۲ روز نمودی آشکار دارد. بیشینه ماندگاری برف پوش پاییزه نسبت به الگوی تابستانه فقط در سرزمین های مرتفع کوهستانی افزایش نشان می دهد و همچنان خط الرأس سیلان با ۲۰-۴ روز از بیش ترین مقدار برخوردار است. بر اساس الگوهای سالانه MaxSCDur سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ در فاز کمینه و سال های ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷ در فاز بیشینه قرار داشته است. یافته های این پژوهش می تواند در مقوله منابع آبی، توان های اکولوژیکی و مدیریت نواحی کوهستانی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: برف، دور کاوی، تغییرات دوره ای، مادیس ترا و آکوا، NDSI.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: برومند صلاحی، salahi@uma.ac.ir

استاد: صلاحی، برومند، حلیان، امیرحسین، و کاشانی، عباس (۱۴۰۵). تحلیل تغییرات بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش در شمال غرب ایران. مدیریت و مدل سازی آب و خاک، ۶(۱)، ۲۰۸-۲۲۵.

doi: 10.22098/mmws.2025.18162.1651

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۲۰۸ تا ۲۲۵

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

برف‌پوش (SC)^۱ به‌سبب ویژگی‌های فیزیکی نقش مؤثری بر تبادل انرژی و بیلان دمایی دارد (Foster et al., 1999). به‌عبارت دیگر، برف‌پوش ضمن ارتباط نزدیک با فرآیندهای آب‌شناختی، زیست‌شناختی، شیمیایی و زمین‌شناختی، ارتباط عمیقی با چرخه هیدرولوژیکی و بیلان انرژی دارد (Yang et al., 2018a). برف‌پوش فصلی عامل مهمی در بیلان دمایی سطوح، چرخه هیدرولوژیکی و سامانه‌های اقلیمی به‌شمار می‌رود (Balk and Elder, 2000, Stocker et al., 2014). از آن‌جایی‌که بر اساس پژوهش‌های اخیر افزایش دما در قلمروهای کوهستانی دو برابر میانگین جهانی است و این شرایط با افزایش ارتفاع، تشدید می‌شود (Kohler et al., 2014; Pepin et al., 2015)؛ در دهه‌های گذشته، پهنه‌های کوهستانی به‌عنوان دیده‌بان تغییرات اقلیمی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. گستره و تغییرپذیری برف‌پوش پارامترهای اساسی در سامانه‌های آب‌شناختی و اقلیمی است (Udnes et al., 2007; Brown and Armstrong, 2010). تغییرات برف‌پوش به‌ویژه ماندگاری برف، آغاز و پایان ریزش برف دارای نقش کلیدی در محیط‌های کوهستانی است و دسترسی به منابع آب در نواحی پایین‌دستی به‌شدت بدان مرتبط می‌باشد (Shahzeidi et al., 2023). به‌عبارت دیگر، انباشت برف و یخ در قسمت‌های مرتفع کوهستان‌ها، الگوی فصلی رواناب را در بخش‌های پایین‌دست کنترل می‌کند؛ به‌ویژه در مناطقی که تابستان‌های گرم و خشک دارند و رواناب حاصل از ذوب برف، منبع مهم تأمین آب مورد نیاز است (Cui et al., 2005; Ye et al., 2005). برف‌پوش پهنه‌های کوهستانی در بیلان آبی بسیاری از مناطق جهانی نقش برجسته‌ای دارند (Ramage and Isacks et al., 2003). درعین‌حال، تغییرات رژیم آبی منتج از گدازش برف و نوسانات آن، تولید در حوزه‌هایی نظیر کشاورزی، گردشگری و الکتریسیته آبی را کنترل می‌کند (Barnett et al., 2005; Li et al., 2017; Huss et al., 2018). برای فهم تغییرات در محیط‌های کوهستانی، مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، داده‌های دورسنجی و مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در نواحی کوهستانی در چند دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (Huss et al., 2017; Beniston et al., 2018; Mote et al., 2018; Hammond et al., 2018). ویژگی‌های فیزیکی برف، سبب شده است که پایش این پدیده از راه سنجش از دور امکان‌پذیر شود. ماهواره بهترین وسیله‌ای است که می‌تواند پوشش برفی مناطق گسترده‌ای را که با روش‌های زمینی تعیین محدوده آن‌ها امکان‌پذیر نیست، در زمان‌های گوناگون نشان دهد (Simpson and Estate, 2001). تصاویر سنجش از دوری می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد الگوی توزیع فضایی برف فراهم آورد، بنابراین یک ابزار بسیار

ارزشمند در نواحی مرتفع به‌حساب می‌آید، جایی که ایستگاه‌های زمینی کمی در دسترس هستند و یا آن‌که اصلاً ایستگاهی وجود ندارد (Shahzeidi et al., 2023). تغییرات دوره‌ای برف‌پوش، پارامترهای شمار روزهای برف‌پوشان، ماندگاری برف‌پوش، گستره برف‌پوش، نخستین روز بارش برف^۲، آخرین روز بارش برف^۳ و ارتفاع برف‌مرز^۴ و ... را در برمی‌گیرد (Notarnicola, 2020). ماندگاری برف‌پوش یا SCDur، شمار روزی است که برف‌پوش بر روی یک یاخته (سطح زمین) ماندگاری دارد. ماندگاری برف‌پوش را به روز و در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه برآورد می‌کنند. بیشینه تواتر روزهای همراه با برف‌پوش در یک دوره زمانی خاص تحت نام بیشینه ماندگاری برف‌پوش^۵ یا MaxSCDur شناخته می‌شود. پژوهش‌های متعددی در خصوص تغییرات دوره‌ای ماندگاری برف‌پوش^۶ با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی انجام شده است. در این زمینه، Brown et al. (2007) ضمن تحلیل مدت‌زمان ماندگاری برف‌پوش و تغییرات آن در فصل بهار و در پهنه شمالی کانادا با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، در مورد استفاده از منابع داده‌های ماهواره‌ای مختلف و مواردی که در استفاده از این داده‌ها در واکاوی تغییرات دوره‌ای برف باید مورد توجه قرار گیرد اشاره کردند. پژوهش Chen et al. (2008) در مورد تأثیر ماندگاری برف‌پوش بر گونه‌های گیاهی و تنوع زیستی در شرق فلات تبت نشان داد که بیش‌ترین تنوع زیستی در عمق متوسط برف وجود دارد. Chen et al. (2015) ضمن واکاوی تغییرات دوره‌ای برف‌پوش در عرض‌های شمالی متوسط و بالا در دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۱ دریافتند که تغییرات دوره‌ای برف‌پوش سبب اختلاف ناهنجاری توان بازتابش برف می‌شود. Klein et al. (2016) با تحلیل تغییرات دوره‌ای ماندگاری برف‌پوش در دوره زمانی ۲۰۱۵-۱۹۷۰ در آلپ‌های سوئیس به این نتیجه رسیدند که مدت‌زمان ماندگاری برف‌پوش به‌سبب آغاز زودتر گدازش برف کاهش یافته است. Yang et al. (2018b) ضمن بررسی مدت‌زمان ماندگاری برف‌پوش و تغییرات آن در سه حوضه رودخانه سونگان در شمال شرق چین به کمک داده‌های سنجنده مادیس در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۳ نشان دادند که ماندگاری برف‌پوش پیوند زیادی با ارتفاع دارد؛ به‌طوری‌که بیشینه میزان ماندگاری برف در پهنه‌های مرتفع کوهستانی حادث شده است. Olefs et al. (2020) با واکاوی تغییرات عمق و ماندگاری پوشش برف در دوره زمانی ۲۰۲۰-۱۹۶۱ در اتریش دریافتند که این پارامترها کاهش محسوس در پیوند با ارتفاع دارد. پژوهش Notarnicola (2020) در مورد تغییرات برف‌پوش در پهنه‌های کوهستانی جهان در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۰ با بهره‌گیری از داده‌های مادیس نشان از کاهش آشکار ماندگاری برف‌پوش در ۷۸ درصد پهنه‌های کوهستانی جهان دارد؛ به‌گونه‌ای که این افت به ۴۳ روز در برخی پهنه‌های مرتفع می‌رسد. این

4- Snow line Altitude

5- Maximum Snow Cover Duration

6 - Snow Cover Duration

1- Snow Cover

2- First Snow Day

3- Last Snow Day

استفاده از هوش مصنوعی و رگرسیون خطی مبتنی بر کاهش ویژگی‌ها، توزیع مکانی عمق برف را در حوزه آبخیز چلگرد شبیه‌سازی کردند. Shahzeidi et al. (2023) با بررسی ارتباط مؤلفه‌های ژئومورفولوژیک با ماکزیم ماندگاری برف‌پوش در ارتفاعات تالش نشان داد که سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ کم‌ترین و سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷ بیش‌ترین ماندگاری بیشینه برف-پوش را به خود اختصاص داده‌اند. بیشینه ماندگاری برف-پوش مربوط به جهات با آزیموت ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه معادل تقریبی اراضی با شیب شمال غربی تا شمالی و کمینه ماندگاری مربوط به جهات با آزیموت ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه معادل تقریبی اراضی با جهت جنوبی می‌شود. یافته‌های Kashani et al. (2024) نشان داد که پهنه شمال غربی شاهد کاهش شمار روزهای برف‌پوشان از ژانویه تا مارس است. کاهش SCDs^۱ در ماه‌های بهار و تابستانه نیز متأثر از دو عامل عرض جغرافیایی و ارتفاع هستند. بیشینه مطلق SCDs در این منطقه با ۱۶۰ روز در سال در بلندی‌های سیلان مشاهده می‌شود. واکاوی ارتباط SCAs^۲ و SCDs در ماه‌های مختلف مشخص کرد که در پهنه‌های دارای SCDs بیش‌تر (ارتفاعات) به‌سبب کاهش سطوح توپوگرافی، از SCAs کاسته شده است. ارتباط تغییرات SCDs با ارتفاع نیز نشان داد که کمینه SCDs در تمامی باندهای ارتفاعی (حتی ارتفاعات بالای ۳۵۰۰ متر با ۴ روز) در اوت و بیشینه آن در دسامبر با ۲۲ روز در ارتفاع ۳۵۰۰ متر روی داده است. SCDs با افزایش ارتفاع در مناطق کوهستانی ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متری، به‌دلیل افزایش شیب زمین و ناپایداری SC بر روی سطوح پرشیب کاهش می‌یابد. درعین‌حال، یافته‌های Kashani et al. (2025) نشان داد که بیشینه شمار روزهای برف‌پوشان در فصل زمستان با ۶۸ روز و پس از آن با ۶۱ روز در پاییز به ارتفاعات سیلان و قله مرتفع آن اختصاص دارد. از آنجایی‌که پهنه شمال غربی ایران زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین برف‌خون‌های کشور، سرچشمه رودهای مهمی در این گستره جغرافیایی به‌شمار می‌رود؛ آگاهی از ذخایر برفی این قلمرو به‌منظور تخمین آب معادل برف، کنترل سیلاب و تأمین آب نواحی پایین‌دست ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. وردش‌های ذخایر برفی در این پهنه به‌ویژه در ارتفاعات با توجه به پدیده گرمایش جهانی می‌تواند عواقب زیست‌محیطی ناخوشایندی را به‌همراه داشته باشد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل تغییرات دوره‌ای برف‌پوش در بدنه سطح توپوگرافی یا ارتفاعات پهنه شمال غربی ایران صورت گرفت و تغییرات بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش (که در این مقاله با اصطلاح MaxSCDur بیان می‌شود) را در این منطقه مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

در حالی است، آهنگ افزایشی این مؤلفه در برخی از قلمروهای کوهستانی به ۳۲ روز بالغ می‌شود. درعین‌حال، پژوهش ایشان حاکی از کاهش گستره برف‌پوش تا ۱۳ درصد می‌باشد. Zhong et al. (2021) ضمن واکاوی فضای-زمانی برف‌پوش و مدت ماندگاری برف بر روی پهنه‌های قاره‌ای اوراسیا با استفاده از داده‌های دورسنجی در دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۹۶۶ نشان دادند که بیشینه ماندگاری برف در امتداد سواحل قطبی جایی که میانگین بلندمدت برف‌پوش سالانه بیش از ۹ ماه است و کمینه مدت ماندگاری این پدیده محیطی کم‌تر از ۱۰ روز در مناطق جنوبی چین مشاهده می‌شود. پژوهش Zhang et al. (2022) در خصوص ماندگاری برف‌پوش و پیوند آن با الگوهای ارتفاعی دمایی در بالا و پایین ارتفاع ۵۰۰۰ متری در فلات تبت نشانگر این است که ماندگاری بالای برف‌پوش در ارتفاعات بالا، توان پس‌خوراند مثبت مسئول گرمایش در ارتفاعات پایین‌تر را کاهش می‌دهد که موجب الگوی ارتفاعی وارونه از گرمایش در فلات تبت در ارتفاعات بالا و پایین‌تر از ۵۰۰۰ متر می‌شود. Li et al. (2022) با کلاس‌بندی ماندگاری برف‌پوش به کمک داده‌های دورسنجی AVHRR در چین، لزوم پایش و کنترل محیطی در سه کلاس تعیین شده و پهنه‌های آن‌ها را مورد تأکید قرار دادند.

در ایران (Ghanbarpour et al. (2005) ضمن تعیین مناطق مؤثر در انباشت و ماندگاری سطح برف‌پوش و سهم ذوب برف در رواناب حوضه کارون در دوره زمانی ۱۳۶۸-۱۳۷۷ دریافتند که در حدود ۵۰ درصد رواناب فصول بهار و تابستان حاصل ذوب برف در این حوضه است. Alhossaini Almodaresi et al. (2016) خصوصیات فیزیکی برف (سطح، عمق و حجم برف) را در ارتفاعات شمال تهران به کمک تصاویر ترا سارایکس (Terra SAR-X) و مادیس در دوره زمانی اکتبر ۲۰۱۲ تا می ۲۰۱۳ با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری برآورد کردند. Bahrami Pichaghchi et al. (2020) با تحلیل تأثیر گرمایش فراگیر بر تغییرات زمانی-مکانی برف‌پوش و ماندگاری آن در دامنه‌های شمالی البرز مرکزی به کمک داده‌های سنجنده مادیس در دوره زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۰ به این نتیجه رسیدند که گستره برف‌پوش در ژانویه حدود ۲۲۰ کیلومتر مربع در سال کاهش یافته است؛ در مقابل، گستره این مؤلفه محیطی در مارس حدود ۶۰ کیلومتر افزایش نشان می‌دهد. نتایج Yaghami et al. (2022) در مورد اثر تغییرات گستره و ماندگاری برف‌پوش بر پوشش گیاهی در استان چهارمحال و بختیاری به کمک فرآورده‌های سنجنده مادیس در دوره زمانی ۱۳۹۵-۱۳۸۲ نشان از کاهش گستره برف‌پوش تا حدود ۳۲ درصد و تأثیر ماندگاری برف بر پوشش گیاهی بیش‌تر از گستره برف دارد. Morshedi and Hoseini (2021) در برآورد پوشش برفی حوضه آبریز کارون شمالی، تغییرات NDSI را با استفاده از داده‌های سنجنده‌های MODIS و ETM+ پایش و مقایسه کردند. (Asefi and Fathzadeh, (2022)

²- Snow Cover Areas

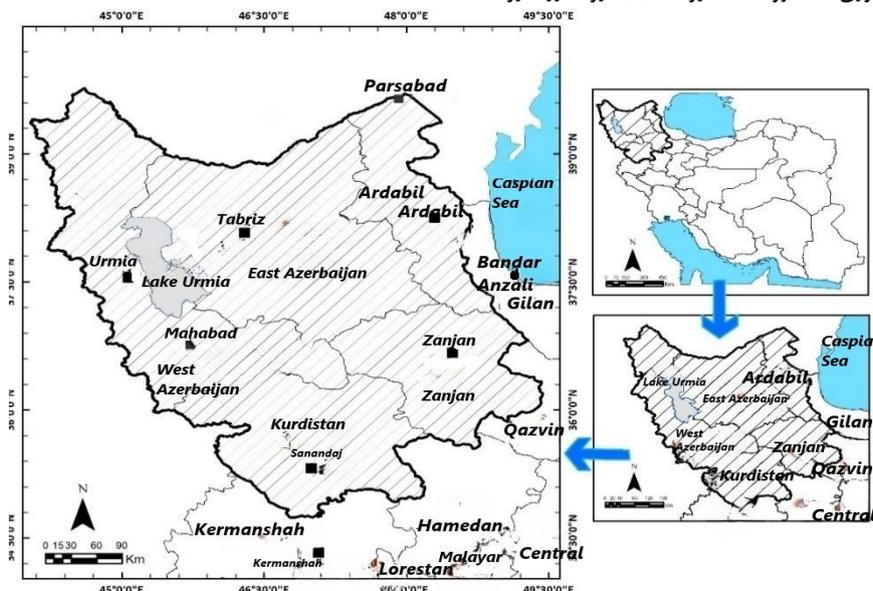
¹- Snow Cover Days

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده پژوهش استان های شمال غربی ایران (اردبیل، آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، زنجان، کردستان) را در بر می گیرد (شکل ۱). ارتفاعات سیلان با ۴۸۱۱ متر و سهپند با ۳۷۰۷ متر و کوه های ارسباران با ارتفاع ۳۳۲۵ متر و کوه های طالش با ارتفاع ۳۳۰۳ متر، یکی از وسیع ترین مناطق برف گیر ایران و سرچشمه رودخانه های بزرگی نظیر ارس، آبی چای (تلخه رود)، قزل اوزن، شاهرود، سفیدرود، سیمینه رود، زربنه رود،

قره سو و اهررود را تشکیل می دهد. این ارتفاعات دارای تنگه های با شیب تند بوده و در فصل بارش حجم زیادی از برف را در خود جای می دهد. توجه به این که قسمت عمده بارندگی در این نواحی در فصل سرد سال رخ می دهد، ذخایر برفی اهمیت زیادی را در تأمین آب های سطحی منطقه داراست. ارتفاعات برف گیر سهپند نیز یکی از بزرگ ترین منشأ های رودخانه های متعددی است که حیات شهری، روستایی و عشایری را تداوم بخشیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شمال غربی ایران

Figure 1. Geographical location of northwestern Iran

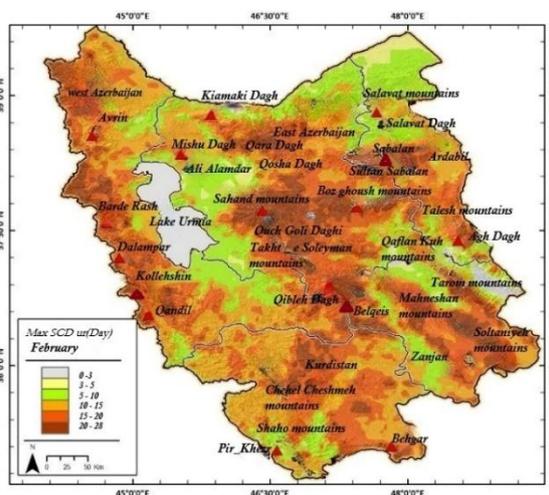
۲-۲- روش شناسی

در این پژوهش برای واکاوی تغییرات دوره ای برف از فرآورده های MOD10A1 و MyD10A1 نسخه ۶ به ترتیب مربوط به ماهواره های ترا و آکوا در دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۳ به صورت روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در فرمت hdf بهره گرفته شد. این فرآورده ها به صورت داده های رقومی شبکه ای بر اساس نمایه NDSI^۱ با سیستم تصویر سینوسی و با ابعاد ۱۲۰۰×۱۲۰۰ کیلومتر در هر کاشی از طریق تارنمای search.earthdata.nasa.gov قابل دستیابی است. راستی آزمایی داده های سنجنده مادیس با داده های برف ایستگاه های زمینی توسط پژوهشگرانی همچون Pu et al. (2007) و Liang et al. (2008) و در ایران توسط Keikhosravi Kiani and Masoodian (2021) با دقت بالا مورد تأیید قرار گرفته است. داده های روزانه مورد استفاده در این پژوهش برای هر ماهواره حدود ۶۵۴۴ روز را متناسب با طول دوره آماری در بر می گیرد. برای تبدیل برف پوش به صورت باینری (بود و نبود برف پوش) از آستانه حداقل ۰/۱ پیشنهادی و مورد تأکید Zhang et al. (2019) برای برآورد برف پوش استفاده شد. با توجه به این موضوع که اساساً ایران کشوری با پوشش برف

کم به شمار می رود و با در نظر گرفتن موقعیت و شرایط قلمرو مطالعاتی از این آستانه برای برآورد برف پوش استفاده شد. بدین منظور، داده های مورد استفاده در این پژوهش به فرمت tif با آستانه ۱-۰/۱ به باینری و ASCII و با سیستم جغرافیایی تبدیل شد. کلیه مراحل تنظیم و داده پردازی و پردازش داده ها توسط زبان برنامه نویسی پایتون انجام گرفت. در این پژوهش با هدف کاهش ابرناکی و برای ادغام و تلفیق داده های دو ماهواره ترا و آکوا که پهنه یکسانی از سطح زمین را با اختلاف زمانی سه ساعت برداشت می کنند، یاخته ای که توسط ماهواره ترا و یا آکوا یاخته برفی تلقی شده باشد؛ یاخته دارای پوشش برف قلمداد شد (Dietz et al., 2014). در این حال، از پالایه مکانی - زمانی برای کاهش اثر پدیده ابرناکی استفاده شد. بدین ترتیب، با بهره گیری از یک پنجره متحرک ۳×۳ یاخته ای بر روی داده های شبکه رستری برف پوش ادغامی، بدین صورت که در پنجره متحرک چنانچه یاخته مرکزی کد ابر و بیش از شش یاخته مجاور آن وجود برف را تأیید می کردند؛ یاخته مرکزی هم به یاخته دارای برف پوش تبدیل شد. در خصوص پالایه زمانی نیز چنانچه یاخته ابری در روز قبل و بعد نشان از وجود برف داشت، یاخته مزبور به یاخته حاوی

^۱-Normalize Difference Snow Index

کوهپایه‌های سهند و سیلان و دامنه‌های مرتفع آورین و برده‌رش و قلل توده‌های کوهستانی قره‌داغ، قوشاداغ، قندیل، چهل چشمه، بزقوش، طارم، سلطانیه، ماه‌نشان و تالش به ۱۵-۱۰ روز می‌رسد. بیشینه SCDur در دشت‌های پایکوهی و پیشکوه‌های کوهستان‌های مرتفع و واحدهای کوهستانی مرتفع نیز در این ماه به‌طور متوسط ۱۰-۵ روز است. اراضی پیرامون دریاچه ارومیه، دشت‌های هموار میان زنجان - تبریز و اطراف ارتفاعات سلطانیه و ماه‌نشان، اراضی پست شمال دریاچه ارومیه و همچنین دشت مغان، کمینه نرخ MaxSCDur را با نرخ ۳-۰ روز به خود اختصاص داده‌اند. الگوی فوریه MaxSCDur افزایش آشکار SCDur در اشکال مختلف ناهمواری و گسترش پهنه‌های با ماندگاری بالا را نشان می‌دهد. بر این اساس، این الگو نشانگر این است که در قلل توده‌های کوهستانی سهند، سیلان و بزقوش، ارتفاعات تالش در شرق، طارم، سلطانیه و ماه‌نشان در جنوب شرق، ارتفاعات تخت سلیمان در مرکز، توده کوهستانی چهل چشمه و شاهو در جنوب، ارتفاعات قوشاداغ و قره‌داغ در شمال و ارتفاعات غرب پهنه مطالعاتی مشتمل بر قله‌های آورین، برده‌رش، دالامپر، کله شین و قندیل، بیشینه SCDur دارای مقادیر ۲۸-۲۰ روز است. این در حالی است که بیشینه ماندگاری متوالی برفپوش در دامنه‌های مرتفع ارتفاعات فوق‌الذکر و کوهپایه‌های این واحدهای کوهستانی به پیروی از عامل فیزیوگرافی ارتفاع از ۲۰-۱۰ روز در نوسان است. اراضی پیرامون دریاچه ارومیه، اراضی پست شمال دریاچه ارومیه، دشت‌های جنوب ارتفاعات طارم- قافلانکوه و جنوب ارتفاعات سلطانیه- ماه‌نشان، شمال کوه‌های شاهو و همچنین دشت مغان، کمینه میزان MaxSCDur به‌میزان ۱۰-۵ روز را به خود اختصاص داده‌اند. کمینه میزان MaxSCDur با نرخ ۳-۰ روز در این ماه مربوط به اراضی پست شمال شرقی کوه‌های طارم است (شکل ۳).



شکل ۳- بیشینه ماندگاری برفپوش در فوریه

Figure 3. Maximum snow cover duration in February

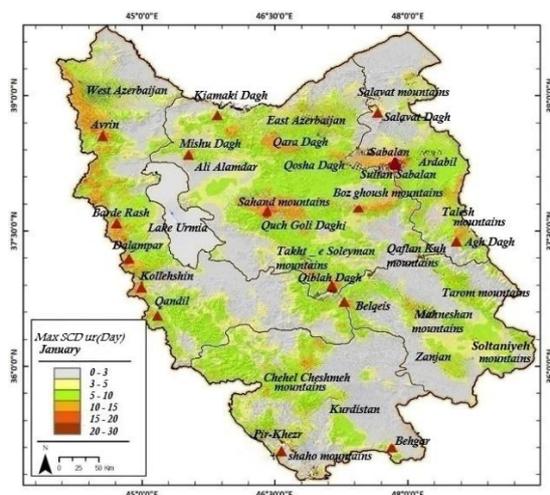
پوشش برف تبدیل شد. پژوهشگران متعددی نظیر Zhang et al. (2022) و Dietz et al. (2014) استفاده از پالایه مکانی- زمانی را توصیه کرده‌اند. در ادامه، پس از ادغام و تلفیق دو پایگاه داده ترا و اکوا و اجرای پالایه مکانی- زمانی و بر اساس آستانه ۰/۱-۱، پایگاه داده باینری برفپوش در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۳ در مقیاس زمانی روزانه حاصل شد. بدین ترتیب، بر اساس پایگاه داده حاصل، پارامتر ماندگاری برفپوش و بیشینه ماندگاری برفپوش برآورد شد که در بازه‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش بیشینه ماندگاری متوالی برفپوش در پهنه شمال غربی ایران زمین بر اساس داده‌های ماهواره‌ای مادیس برآورد و بررسی شد. بیشینه ماندگاری متوالی برفپوش در بازه‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه به‌صورت نقشه‌های پهنه‌ای تهیه و تنظیم شد. در ادامه با تفصیل بیش‌تری به نتایج پرداخته می‌شود.

۳-۱- بیشینه ماندگاری متوالی برفپوش در بازه زمانی ماهانه

بیشینه ماندگاری متوالی برفپوش در ژانویه در پهنه مورد بررسی بین ۰ تا ۳۰ روز نوسان دارد. در این ماه پهنه‌های با بیشینه متوالی برفپوش محدود به نواحی کوهستانی مرتفع بوده و عمدتاً منطبق بر خط‌الرأس‌های اصلی و قلل مرتفع در محدوده مورد بررسی است. بر این اساس بیشینه ماندگاری متوالی برفپوش دارای دو کانون اصلی در قله‌های توده‌های کوهستانی سهند و سیلان (قوچ گلی داغی و سلطان سیلان) با نرخ ۳۰-۲۰ روز است. پس از آن دامنه‌های مرتفع این دو واحد کوهستانی و قلل رشته‌کوه‌های آورین و برده‌رش دارای MaxSCDur حدود ۲۰-۱۵ روز هستند (شکل ۲).

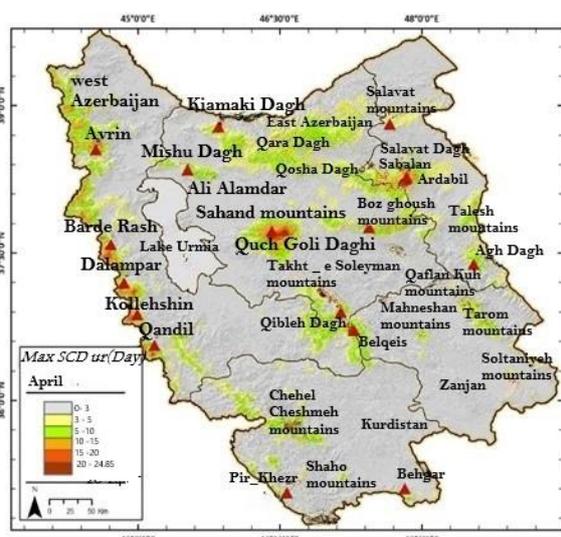


شکل ۲- بیشینه ماندگاری برفپوش در ژانویه

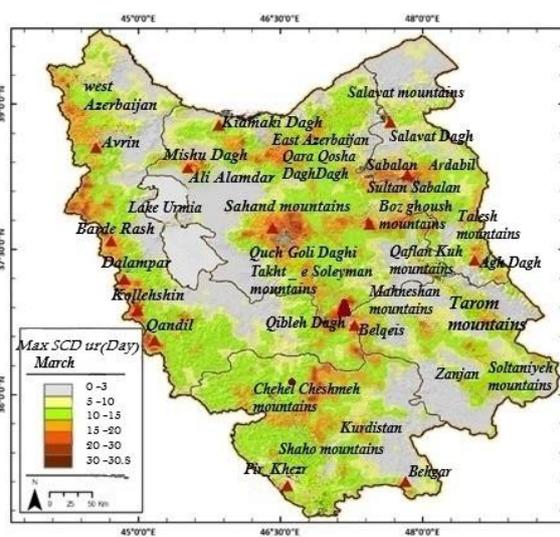
Figure 2. Maximum snow cover duration in January

۵-۱۰ روز است. در عین حال، کمیته نرخ MaxSCDur در نواحی هموار مشتمل بر دشت‌ها و جلگه‌های پیرامون دریاچه ارومیه، سرزمین‌های پست اطراف ارتفاعات سلطانیه و ماه‌نشان، اراضی پست شمال دریاچه ارومیه و همچنین دشت مغان با نرخ ۰-۳۰ روز مشاهده می‌شود (شکل ۴). الگوی فضایی آوریل نشانگر کاهش چشم‌گیر ماندگاری برف، پسروری برف‌پوش از پهنه‌های با ارتفاع متوسط و پایین و تمرکز برف در قله مرتفع دارد. بر اساس این الگو کانون‌های مهم از نظر MaxSCDur در قله سهند و سبلان با رقم ۲۴/۸۵-۲۰ روز و پس از آن در دامنه‌های مرتفع این دو توده کوهستانی و ارتفاعات برده‌رش، دالامپر، کله شین و قندیل با نرخ ۱۵-۲۰ روز رخنمونی آشکار دارد. در مقابل، کمیته نرخ MaxSCDur مربوط به نواحی هموار پهنه مورد بررسی مشتمل بر دشت‌ها و جلگه‌های مابین رشته‌کوه‌ها مشتمل بر سرزمین‌های اطراف دریاچه ارومیه، پهنه‌های پست اطراف ارتفاعات سلطانیه، ماه‌نشان، تخت سلیمان و چهل چشمه، دشت‌های شمال دریاچه ارومیه و همچنین دشت مغان با نرخ ۰-۳ روز است (شکل ۵).

بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش در مارس در پهنه مورد بررسی بین ۰ تا ۳۰/۸ روز متغیر است. الگوی MaxSCDur در مارس نشان از کاهش گستره پهنه‌های با ماندگاری بالا و گسترش مناطق با ماندگاری کم دارد. بر اساس الگوی فضایی این ماه گستره‌های با MaxSCDur نواحی کوهستانی مرتفع را دربرگرفته و عمدتاً بر خط‌الرأس‌های اصلی و قله کوهستانی و مرتفع منطقه متمرکز شده است. در این ماه نیز بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش از آن قله مرتفع سهند و سبلان (قوچ گلی داغی و سلطان سبلان) با نرخ ۳۰-۳۰/۸ روز است. پس از آن دامنه‌های مرتفع این دو توده کوهستانی و قله رشته‌کوه‌های چهل چشمه و تخت سلیمان دارای MaxSCDur حدود ۳۰-۲۰ روز هستند. این در حالی است که بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش بر اساس الگوی فضایی این ماه در دامنه‌های میانی سهند، سبلان، ارتفاعات غرب قلمرو مطالعاتی شامل قله آورین، برده‌رش، دالامپر، کله شین و قندیل، توده کوهستانی چهل چشمه و شاهو در جنوب به حدود ۲۰-۱۵ روز می‌رسد. بیشینه SCDur در دشت‌های پایکوهی و پیشکوه‌های کوهستان‌های مرتفع نیز در این ماه به‌طور متوسط



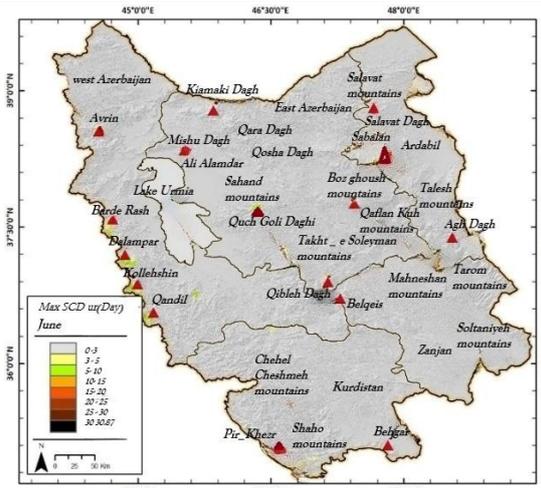
شکل ۳- بیشینه ماندگاری برف‌پوش در فوریه
Figure 5. Maximum snow cover duration in April



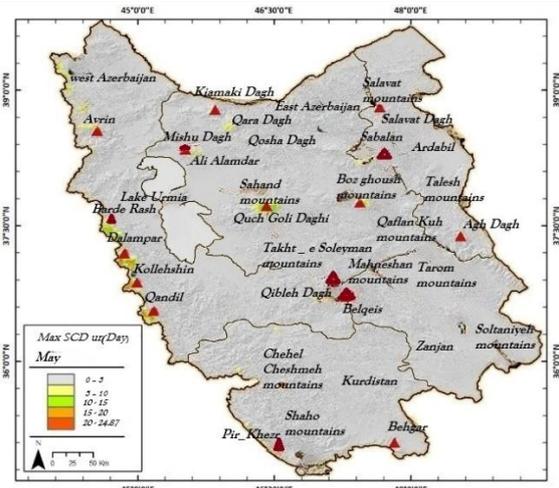
شکل ۴- بیشینه ماندگاری برف‌پوش در مارس
Figure 4. Maximum snow cover duration in March

با بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش به‌شدت به‌سوی ارتفاعات بالا پسروری کرده و به خط‌الرأس‌های اصلی و قله مرتفع محدود می‌شود. بر این اساس بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش در ماه‌های می تا جولای متعلق به قله مرتفع سهند و سبلان و ارتفاعات غربی محدوده مورد بررسی مشتمل بر قله آورین، برده‌رش، دالامپر، کله شین و قندیل، توده کوهستانی چهل چشمه و شاهو در جنوب (شکل‌های ۶ و ۷) و در ماه‌های اوت و سپتامبر تنها مربوط به قله توده کوهستانی سبلان است (شکل‌های ۸ تا ۱۰).

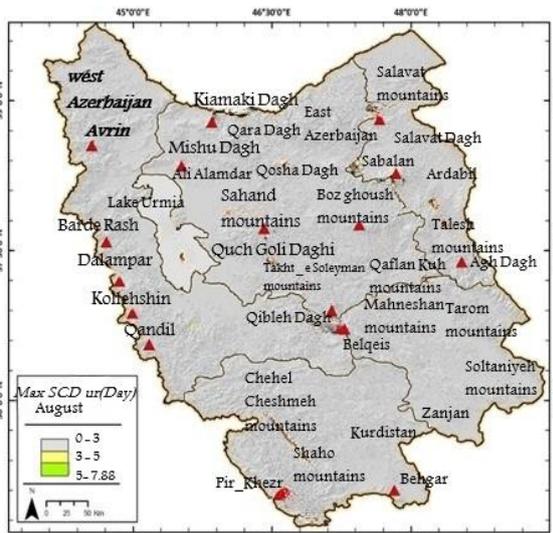
الگوهای فضایی MaxSCDur ماه‌های می تا سپتامبر نشانگر کاهش نرخ این مؤلفه در پهنه مورد بررسی است. با افزایش قابل‌توجه دما در ماه‌های بهاری، پوشش برفی در ارتباط با ساختارهای توپوگرافی منطقه به‌شدت کاهش یافته است. در عین حال، با ورود به ماه‌های تابستانه، آخرین آثار پوشش برفی زمستانه در پهنه شمال غربی به‌شدت کاهش یافته و تنها در مرتفع‌ترین قله به‌صورت محدود باقی مانده است. به‌عبارت‌دیگر، بیشینه SCDur به‌طور متوسط از رقم ۲۴/۸۷-۲۰ روز در می به رقم ۷/۹۱-۵ روز در سپتامبر رسیده است. در این ماه‌ها پهنه‌های



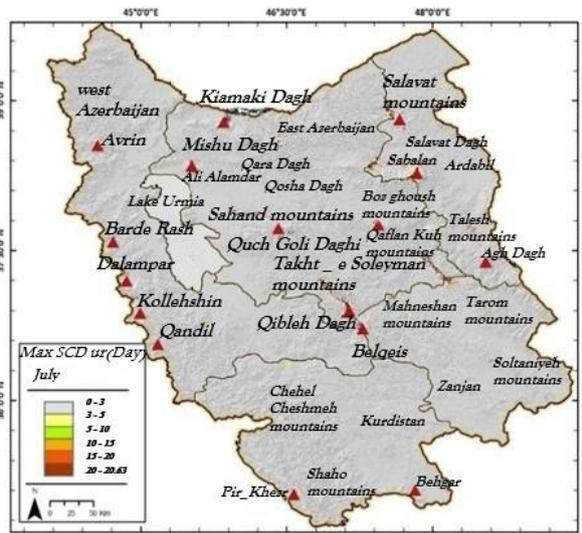
شکل ۷- بیشینه ماندگاری برف پوش در ژوئن
Figure 7. Maximum snow cover duration in June



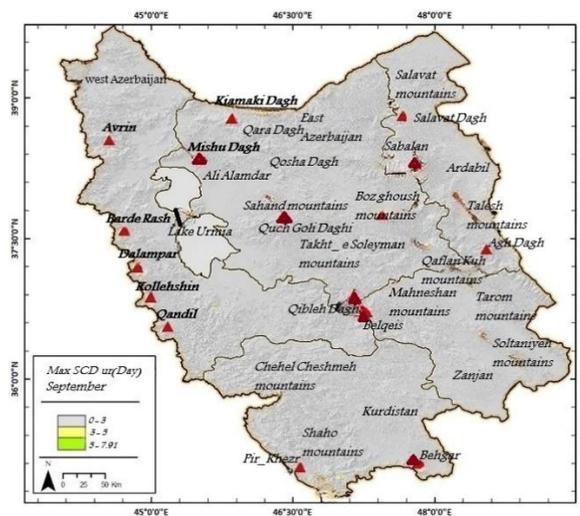
شکل ۶- بیشینه ماندگاری برف پوش در می
Figure 6. Maximum snow cover duration in May



شکل ۹- بیشینه ماندگاری برف پوش در اوت
Figure 9. Maximum snow cover duration in August



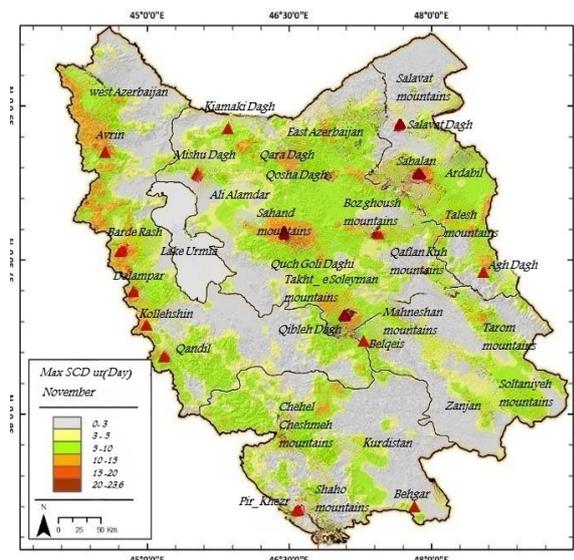
شکل ۸- بیشینه ماندگاری برف پوش در جولای
Figure 8. Maximum snow cover duration in July



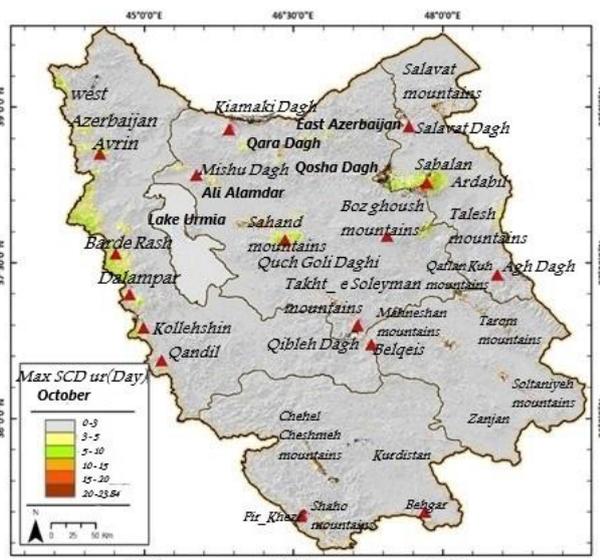
شکل ۱۰- بیشینه ماندگاری برف پوش در سپتامبر
Figure 10. Maximum snow cover duration in September

به‌طور کامل پوشیده از برف شده و حتی در دشت‌ها و فلات‌های کم‌ارتفاع نیز نشانه‌هایی از پوشش برفی موقت دیده می‌شد. به‌یاد دیگر، در ماه نوامبر، ارتفاعات میانی و حتی دشت‌ها و فلات‌های کم ارتفاع نیز از پوشش برفی بهره‌مند شده‌اند. این تغییرات نشان‌دهنده استقراری تدریجی شرایط اقلیمی زمستانی در منطقه است (شکل ۱۲). در ماه دسامبر ناهنجاری منفی دمایی به انضمام بارش مضاعف برف و انباشت آن تقریباً در تمامی پهنه مورد بررسی نمادی آشکار دارد. بر اساس الگوی فضایی این ماه بیشینه SCDur به رقم ۳۰-۳۱ روز در قله مرتفع سهند و سبلان (قوچ گلی داغی و سلطان سبلان) و پس از آن به مقدار ۱۵-۳۰ روز در دامنه‌های مرتفع این دو واحد کوهستانی مرتفع و حجیم و سایر قله مرتفع منطقه به‌ویژه ارتفاعات بلقیس و قبله‌داغ در مرکز، ارتفاعات طارم و سلطانیه در جنوب شرق، ارتفاعات غرب قلمرو مطالعاتی شامل قله اورین، برده‌رش، دالامیر، کله شین و قندیل، توده کوهستانی چهل چشمه در جنوب، ارتفاعات قره‌داغ و قوشاداغ در شمال رسیده است. به‌یاد دیگر، در این ماه علاوه بر قله مرتفع و منفرد که میزان عمیق‌ترین و طولانی‌ترین ماندگاری برف بوده است؛ ارتفاعات میانی و دامنه‌های مختلف با پوشش برفی نسبتاً عمیق و ماندگاری متوسط و دشت‌های تبریز، مغان و فلات‌های میانی نیز به‌طور قابل توجهی از برف پوشیده شده‌اند. در این ماه کمینه نرخ MaxSCDur محدود به نواحی پست و هموار در جانب شرقی کوه‌های طارم در شرق پهنه مطالعاتی با رقم ۳-۰ روز است (شکل ۱۳).

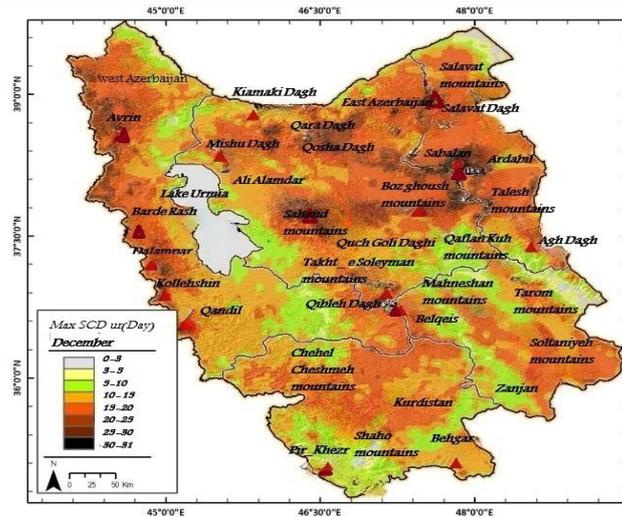
الگوهای فضایی MaxSCDur ماه‌های اکتبر تا دسامبر، افزایش نرخ این مؤلفه برف را هم‌زمان با ورود به دوره سرد و کاهش شدید دمای محیطی، ریزش و انباشت برف و به تبع آن گسترش مضاعف برف‌پوش را نشان می‌دهد. به‌یاد دیگر، بیشینه SCDur از رقم ۲۰/۸۴-۲۳ روز در اکتبر به رقم ۳۱-۳۰ روز در دسامبر رسیده است. الگوی فضایی اکتبر نشان از افزایش پهنه‌های برف‌پوش و افزایش مدت ماندگاری برف دارد. بر اساس این الگو پهنه‌های با بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش محدود به توده‌های کوهستانی پهنه مورد بررسی بوده و به خط‌الرأس‌های اصلی و قله مرتفع محدود می‌شود. از این‌رو، بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش مربوط به قله سبلان رقم ۲۰/۸۴-۲۳ روز و پس از آن متعلق به دامنه‌های مرتفع این توده کوهستانی و قله سهند و واحدهای کوهستانی غربی پهنه مورد بررسی شامل قله اورین، برده‌رش، دالامیر، کله شین و قندیل با نرخ ۵-۱۰ روز است. کمینه نرخ MaxSCDur نیز سایر بخش‌های منطقه مورد بررسی به‌ویژه دشت‌ها و جلگه‌های مابین رشته‌کوه‌ها نظیر نواحی اطراف دریاچه ارومیه، پهنه‌های پست اطراف ارتفاعات سلطانیه، ماه‌نشان، تخت سلیمان و چهل چشمه، دشت‌های شمال دریاچه ارومیه و هم‌چنین دشت مغان را با نرخ ۰-۳ روز در بر می‌گیرد. الگوی فضایی این ماه‌نشان می‌دهد که بارش‌های برف در ارتفاعات افزایش یافته و مناطق وسیع‌تری را پوشانده است. علاوه بر گسترش مناطق برفی، مدت ماندگاری برف نیز افزایش یافته است (شکل ۱۱). در ماه نوامبر شاهد گسترش مناطق برفی و افزایش مدت ماندگاری آن در مقایسه با ماه‌های قبل هستیم. ارتفاعات و رشته‌کوه‌های اصلی



شکل ۱۲- بیشینه ماندگاری برف‌پوش در نوامبر
Figure 12. Maximum snow cover duration in November



شکل ۱۱- بیشینه ماندگاری برف‌پوش در اکتبر
Figure 11. Maximum snow cover duration in October

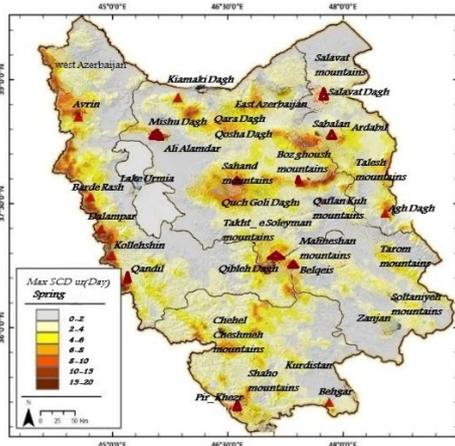


شکل ۱۳- بیشینه ماندگاری برف پوش در دسامبر
Figure 13. Maximum snow cover duration in December

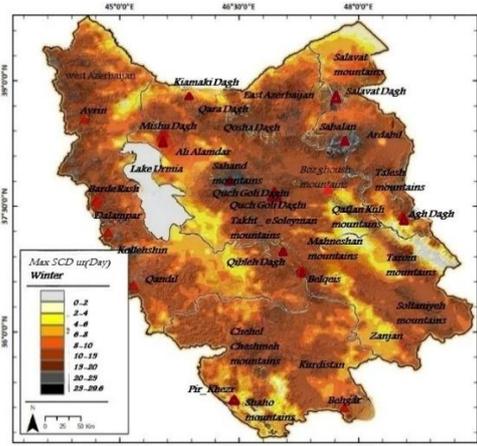
۲۰ روز دارد. ارتفاعات میانی و دامنه‌های کوهستانی نیز با پوشش برفی قابل توجه و ماندگاری متوسط (۲۰-۸ روز) پوشیده شده‌اند. سرزمین‌های هموار مانند دشت‌های پیرامون دریاچه ارومیه، دشت‌های پیرامون شهر زنجان، دشت مغان و اراضی پیرامون شهر سنندج، نیز دارای پوشش برفی با ماندگاری نسبتاً کوتاه (۲-۸ روز) هستند. در عین حال، اراضی پست شمال شرقی کوه‌های طارم پایین‌ترین نرخ SCDur را نشان می‌دهند؛ به طوری که این پهنه در فصل زمستان از کمینه میزان MaxSCDur با نرخ ۰-۲ روز برخوردار است (شکل ۱۴). در فصل بهار تغییرات چشم‌گیری در الگوی ماندگاری SC شامل کاهش قابل توجه گستره پهنه‌های برفی، پسروی SC به ارتفاعات بالا و ذوب برف در دامنه‌های کوهستانی، نواحی کم‌ارتفاع و دشت‌ها و جلگه‌ها رخ داده است.

۳-۲- بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش در بازه زمانی فصلی

الگوی زمستانه MaxSCDur نشان از برف پوش گسترده در قله مرتفع با بیش‌ترین و طولانی‌ترین ماندگاری، پوشش برف در پهنه‌های با ارتفاع میانی با ماندگاری متوسط، پوشش برف در دشت‌ها و فلات‌ها و بالاخره پهنه‌های محدود بدون برف در منطقه مطالعاتی دارد. مطابق با الگوی فضایی MaxSCDur زمستانه قله توده‌های کوهستانی سلان و سه‌پند بیش‌ترین میزان ماندگاری برف پوش را با نرخ ۲۹/۶-۲۵ روز نشان می‌دهند. در دامنه‌های مرتفع این دو واحد کوهستانی مرتفع و حجیم و سایر قله مرتفع منطقه به‌ویژه ارتفاعات قبله‌داغ در مرکز، کوهستان‌های غرب منطقه مورد بررسی شامل قله آورین، برده‌رش، دالامیر، ارتفاعات قوشاداغ در شمال نیز MaxSCDur نرخ‌ی در حدود ۲۵-

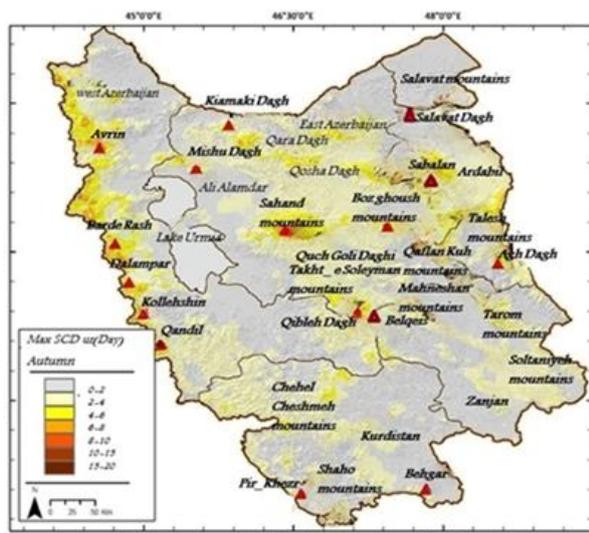


شکل ۱۵- بیشینه ماندگاری برف پوش در بهار
Figure 15. Maximum snow cover duration in spring



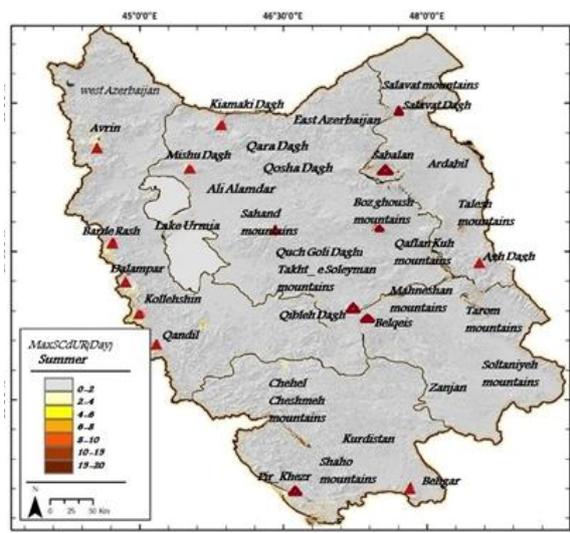
شکل ۱۴- بیشینه ماندگاری برف پوش در زمستان
Figure 14. Maximum snow cover duration in winter

(شکل ۱۶). الگوی پاییزه MaxSCDur نشان از شروع انباشت برف در قله مرتفع منطقه و به پیروی از آن افزایش ماندگاری بیش تر برف پوش در این پهنه ها به سبب کاهش دمای محیطی، پوشش برفی محدود در نواحی و دامنه های کوهستانی متوسط با ماندگاری نسبتاً کم و نبود برف پوش در دشت ها و جلگه ها و یا موقتی بودن آن دارد. به بیان دیگر، SCDur در پهنه مورد بررسی در این فصل در مقایسه با الگوی تابستانه رو به فزونی می گذارد. بر این اساس، MaxSCDur در توده کوهستانی سیلان و دامنه های آن (به ۲۰-۴ روز)، سهند و بزقوش و ارتفاعات غربی نظیر آورین، برده رش، دالامپر و کله شین (به ۸-۴ روز)، قله و دامنه های کوهستانی قره داغ، می شوداغ، قوشاداغ، چهل چشمه، تخت سلیمان، ماه نشان، سلطانیه و طارم (به ۶-۴ روز) می رسد. این در حالی است که بیشینه ماندگاری SC در دشت های هموار پیرامون پیکره آبی ارومیه، دشت مغان و دشت های پست زنجان- تبریز حدود ۲-۰ روز است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- بیشینه ماندگاری برف پوش در پاییز
Figure 17. Maximum snow cover duration in autumn

در این فصل توده های کوهستانی چهل چشمه، تخت سلیمان، ماه نشان، سلطانیه و طارم با نرخ MaxSCDur ۴-۱۰ روز با کاهش SCDur مواجه شده اند. MaxSCDur بهاره در توده های کوهستانی سهند، سیلان، بزقوش و ارتفاعات غرب قله آورین، برده رش، دالامپر، کله شین و قندیل به حدود ۲۰-۱۰ روز در فصل بهار می رسد. MaxSCDur در نواحی کم ارتفاع، دشت های هموار مجاور دریاچه ارومیه، دشت مغان و دشت های پست زنجان- تبریز به حدود ۲-۰ روز تقلیل می یابد. الگوی بهاره در مقایسه با الگوی زمستانه نشان از افت MaxSCDur از جنوب پهنه مورد بررسی به سوی شمال آن دارد (شکل ۱۵). بر اساس الگوی تابستانه MaxSCDur، پهنه مورد بررسی شاهد افت شدید پوشش برفی با ماندگاری بسیار کوتاه و فقدان برف پوش در اغلب نواحی به استثناء برخی از مرتفع ترین قله رشته کوه های اصلی است. بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش تقریباً به جز قله سیلان (با ۲۰-۴ روز)، قله سهند، آورین، برده رش، دالامپر، کله شین و قندیل (با ۴-۲ روز) در بقیه گستره مطالعاتی به صفر (۲-۰ روز) می رسد

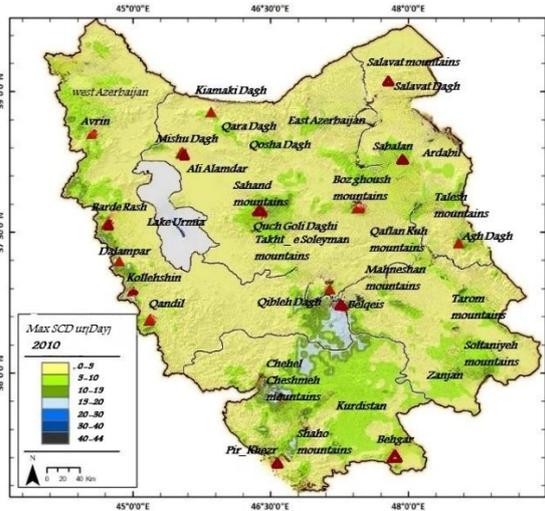


شکل ۱۶- بیشینه ماندگاری برف پوش در تابستان
Figure 16. Maximum snow cover duration in summer

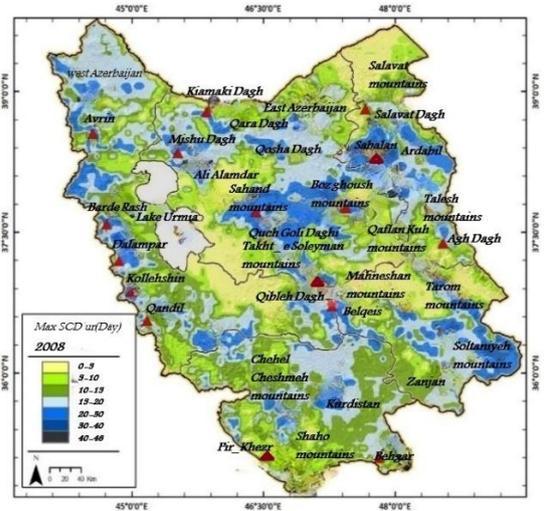
پهنه های با MaxSCDur زیادتر، در ارتفاعات منطقه مطالعاتی رخنمونی آشکار داشته و کوهپایه ها و دامنه های این واحدهای ژئومورفیک را در بر می گیرد. بر این اساس، بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش محدود به نواحی مرتفع و قله کوهستانی سیلان، سهند، بزقوش، تخت سلیمان، چهل چشمه و ارتفاعات مرزی غربی از قله آورین تا کله شین است (شکل های ۱۸، ۲۱ و ۲۱).

۳-۳- بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش در بازه زمانی سالانه

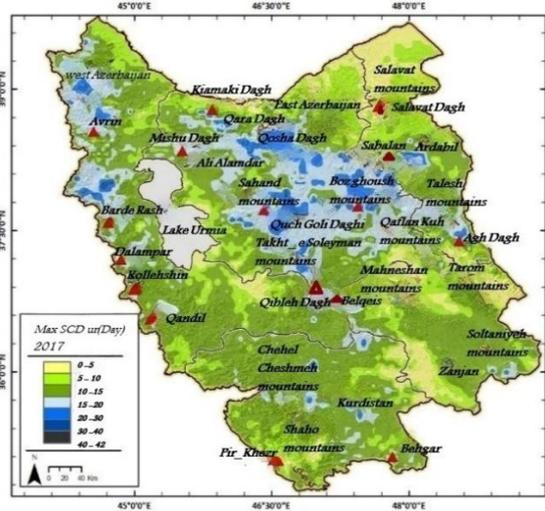
بیشینه ماندگاری متوالی برف پوش به ازای هر سال در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ به صورت پهنه ای تهیه و ترسیم شده است. بر این اساس، پهنه های با MaxSCDur زیادتر، در سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ به شدت و آشکارا به سوی قله اصلی و قله مرتفع توده های کوهستانی پهنه مورد بررسی پسروی کرده است (شکل های ۱۹ و ۲۲). این در حالی است که در سال های ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷



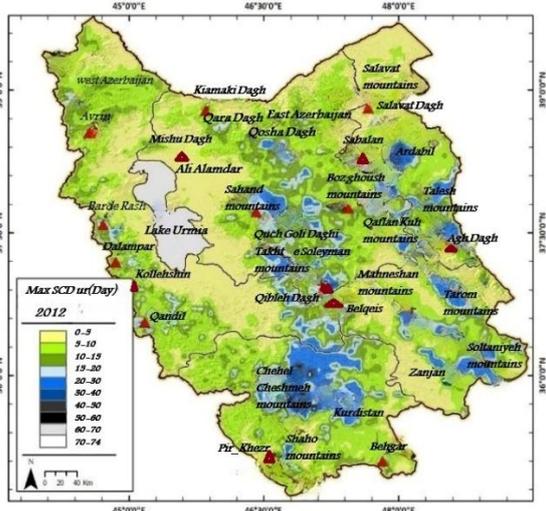
شکل ۱۹- بیشینه ماندگاری برف پوش در سال ۲۰۱۰
Figure 19. Maximum snow cover duration in 2010



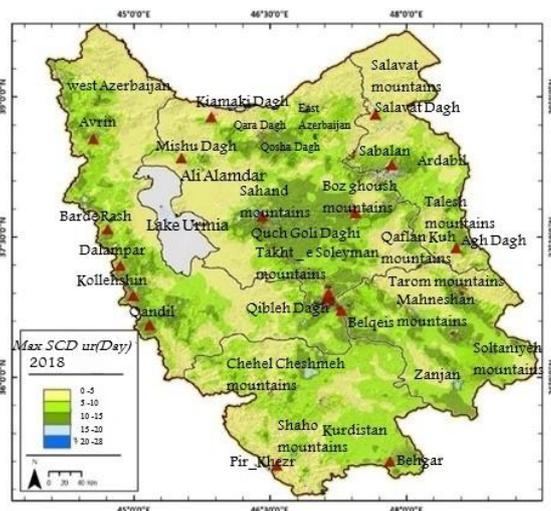
شکل ۱۸- بیشینه ماندگاری برف پوش در سال ۲۰۰۸
Figure 18. Maximum snow cover duration in 2008



شکل ۲۱- بیشینه ماندگاری برف پوش در سال ۲۰۱۷
Figure 21. Maximum snow cover duration in 2017



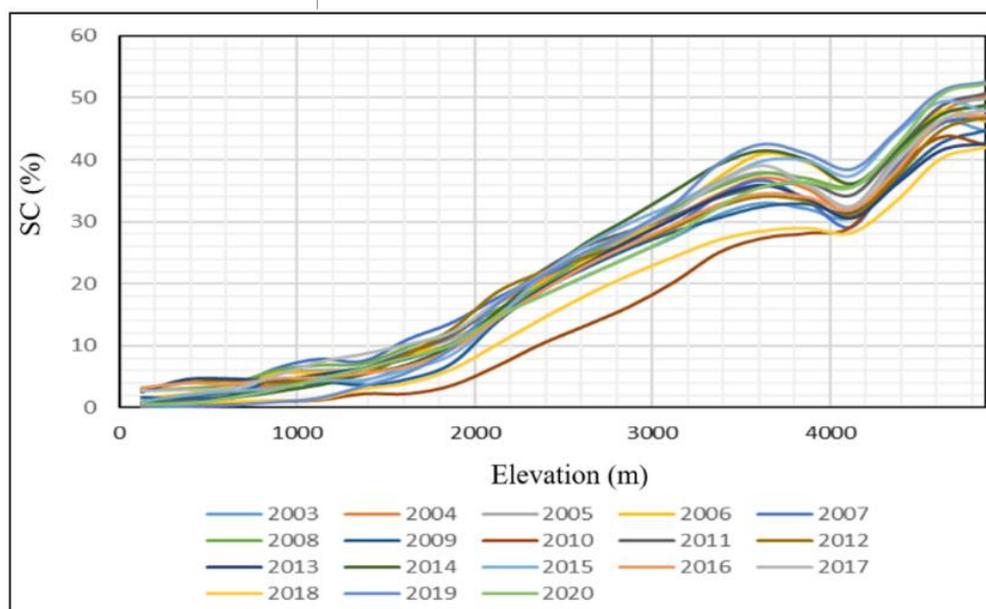
شکل ۲۰- بیشینه ماندگاری برف پوش در سال ۲۰۱۲
Figure 20. Maximum snow cover duration in 2012



شکل ۲۲- بیشینه ماندگاری برف پوش در سال ۲۰۱۸
Figure 22. Maximum snow cover duration in 2018

۲۰۰۰ متر، درصد مساحت برف‌پوش با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. از ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متری، روند کلی افزایشی برقرار بوده ولی شیب افزایش در ارتفاع، به شدت افزایش می‌یابد. در حوالی ارتفاع ۳۳۰۰ تا ۴۱۰۰ متری، یک الگوی ناهنجار با روندی متضاد ایجاد می‌شود و سپس از ارتفاع ۴۱۰۰ به بعد مجدداً الگوی ناهنجار در ادامه روند کلی برقرار می‌شود.

شکل ۱۹ درصد مساحت برف‌پوش در طبقات مختلف ارتفاعی را از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۹، سال ۲۰۱۰ تقریباً در تمامی سطوح ارتفاعی به نسبت مساحت متناظر خود، پایین‌ترین درصد پوشش برف را نشان می‌دهد. در مقابل، سال ۲۰۱۹ از درصد پوشش برف بیش‌تری در عمده کلاس‌های ارتفاعی برخوردار است. الگوی کلی تقریباً در همه سال‌های مورد مطالعه به این شکل است که با افزایش ارتفاع تا کلاس ارتفاعی



شکل ۱۹- درصد مساحت برف‌پوش در هر یک از طبقات ارتفاعی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰

Figure 19. Percentage of snow-covered area in each elevation class from 2003 to 2020

به تسریع فرآیند ذوب برف در سراسر پهنه شده است. بر این اساس، MaxSCDur در خط‌الرأس‌های اصلی ارتفاعات و دامنه‌های مرتفع و میانی کوهستان‌ها تقریباً ۳۰-۱۵ روز، در دشت‌های پایکوهی و پیشکوه‌های کوهستان‌های مرتفع حدود ۵-۱۰ روز و در نواحی هموار ۳-۰ روز است. بر اساس الگوی فضایی آوریل با افزایش دمای هوا و آغاز دوره گدازش برف، SC در پهنه‌های با ارتفاع متوسط، پایین و دشت‌های هموار پس‌روی کرده و برف‌پوش عمدتاً به مرتفع‌ترین قله کوهستانی به‌ویژه سیلان و سهند (با ۲۴/۸۵-۲۰ روز) و رشته‌کوه‌های مرزی در غرب (۲۰-۱۵ روز) محدود شده است. این تغییرات، نقش ارتفاع را در تعیین الگوی ماندگاری برف‌پوش در طول دوره ذوب به‌خوبی نشان می‌دهد. الگوهای فضایی MaxSCDur ماه‌های می تا سپتامبر کاهش مقادیر SCDur را در پهنه مورد بررسی نشان می‌دهد. با افزایش دمای محیطی در ماه‌های می تا جولای، SC در ارتباط با مؤلفه‌های توپوگرافیک منطقه به‌سرعت ذوب شده، عقب‌نشینی کرده و تنها مرتفع‌ترین قله (به‌ویژه سیلان، سهند و قله ارتفاعات غربی محدوده مورد بررسی) برف را در خود حفظ

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نقشه پیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش در فوریه، پهنه‌های با ماندگاری بالا در این ماه نسبت به ژانویه گسترش و افزایش یافته است. الگوهای فضایی کلی تحت تأثیر توپوگرافی در هر دو ماه مشابه هستند، اما گستره و شدت ماندگاری برف در فوریه به‌ویژه در ارتفاعات بالاتر، بیش‌تر است. این افزایش می‌تواند ناشی از تداوم بارش برف و شرایط دمایی مساعدتر برای حفظ پوشش برفی در طول ماه فوریه باشد. در این ماه پیشینه SCDur با نرخ برابر با ۲۸-۲۰ روز متعلق به قله کوهستانی منطقه و کمینه این سنججه با نرخ ۳-۰ روز مربوط به نواحی پست شمال شرقی کوه‌های طارم است. الگوی MaxSCDur در مارس نشان می‌دهد که با گذر از دوره سرد، ماندگاری برف‌پوش کاهش یافته است. درحالی‌که الگوهای فضایی کلی تحت تأثیر توپوگرافی همچنان پابرجاست، گستره پهنه‌های با ماندگاری بالا در مارس کوچک‌تر شده و مناطق با ماندگاری کم گسترش یافته‌اند. این تغییرات منعکس‌کننده افزایش دما در ماه مارس است که منجر

نواحی کم‌ارتفاع و دشت‌های هموار غالباً فاقد پوشش برفی پایدار هستند. این تغییرات نشان‌دهنده گذار از دوره گرم به سرد و آمادگی منطقه برای بارش‌های بیش‌تر در زمستان است. MaxSCDur در پهنه مطالعاتی در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ در فاز کمینه و سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷ در فاز بیشینه قرار داشته است. این موضوع با پژوهش Shahzeidi et al. (2023) سازگاری و مطابقت نشان می‌دهد. یافته‌های اصلی این پژوهش به‌روشنی نشان از هماهنگی تغییرات بیشینه ماندگاری متوالی برف‌پوش با وردش‌های ارتفاعی دارد؛ به‌گونه‌ای که بیشینه ماندگاری برف‌پوش در پهنه‌های کوهستانی مرتفع منطقه مشاهده می‌شود. این موضوع با یافته‌های Yang et al. (2018) که نشان داد ماندگاری برف‌پوش پیوند نیرومندی با ارتفاع دارد و بالاترین ماندگاری برف‌پوش در نواحی کوهستانی مشاهده می‌شود هماهنگ است. به‌عبارت‌دیگر، افزون بر شرایط اقلیمی لازم برای ماندگاری برف نباید از نقش ساختار توپوگرافی نیز غافل ماند. یافته‌های این پژوهش آگاهی از شرایط برف‌پوش و بیشینه ماندگاری آن در پهنه شمال غربی را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین برف‌خوان‌های سرزمین ایران افزایش داد. یافته‌های حاصل از این نوشتار به‌سبب نقش سنجه تغییرات دوره‌ای بیشینه ماندگاری برف‌پوش در رفتار و پاسخ‌های محیطی می‌تواند در بخش‌های هواشناسی، وزارت نیرو و کشاورزی به‌صورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه بررسی تغییرات، کمی‌سازی و مدل‌سازی‌های این بخش در حیطه منابع آبی، توان‌های محیطی و اکولوژیکی و مدیریت نواحی کوهستانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش‌های پسین تحلیل روند این سنجه و واکاوی وردش‌های بارش و دما به‌عنوان مهم‌ترین سنجه‌های اقلیمی در این برف‌خوان و پیوند آن‌ها با تغییرات ذخایر برفی در این پهنه با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های دانشگاه محقق اردبیلی سپاس‌گزاری به‌عمل می‌آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمام داده‌های تولید شده در متن مقاله حاضر ارائه شده است.

کرده‌اند. در ماه‌های اوت و سپتامبر (اوج دوره تابستانه)، پوشش برفی در پهنه شمال غربی ایران به حداقل رسیده؛ تقریباً به‌طور کامل از بین رفته و MaxSCDur تنها مربوط به قله سبلان با نرخ ۵-۷/۹۱ روز است. الگوی MaxSCDur در اکتبر به‌وضوح نشان می‌دهد که با ورود به دوره گذار پاییزی و کاهش دما، پهنه مورد بررسی شاهد افزایش چشم‌گیر در گسترش و مدت SCDur به‌ویژه در ارتفاعات و رشته‌کوه‌های اصلی است. بالاترین MaxSCDur مربوط به قله سبلان با مقدار ۲۳/۸۴-۲۰ روز است. دشت‌ها و جلگه‌ها کم‌ترین میزان پوشش برفی و کوتاه‌ترین ماندگاری را با نرخ ۰-۳ روز تجربه می‌کنند. واکاوی الگوهای MaxSCDur در ماه‌های نوامبر و دسامبر نشان می‌دهد که با پیشروی دوره سرد، پهنه مطالعاتی شاهد افزایش چشم‌گیر در گستره و مدت ماندگاری برف‌پوش در تمامی اشکال ناهمواری‌ها بوده است. این موضوع با پژوهش Kashani et al. (2024) همخوانی دارد. ارتفاعات و رشته‌کوه‌های اصلی همچنان بیش‌ترین میزان برف و طولانی‌ترین ماندگاری را دارند. در ماه نوامبر بیش‌ترین رقم MaxSCDur مربوط به قله سبلان، سهند و برخی از قله مرتفع ارتفاعات غربی محدوده مورد بررسی با مقدار ۲۳-۲۰/۶ روز است. در ماه دسامبر، نه‌تنها ارتفاعات و رشته‌کوه‌های اصلی شاهد برف سنگین و ماندگار هستند، بلکه نواحی میانی و حتی دشت‌ها و جلگه‌ها نیز به‌طور قابل‌توجهی پوشیده از برف شده‌اند. این وضعیت نشان‌دهنده استقرار کامل شرایط زمستانی در منطقه است. در این ماه بیشینه نرخ MaxSCDur با رقم ۳۱-۳۰ روز مربوط قله مرتفع سهند و سبلان و کمینه این سنجه از آن اراضی پست و هموار در جانب شرقی کوه‌های طارم با رقم ۰-۳ روز است. از نظر فصلی، زمستان به‌عنوان دوره اوج بارش و ماندگاری برف‌پوش در تقریباً تمامی اشکال ناهمواری‌های پهنه مورد بررسی (با بیشینه ماندگاری ۲۹-۶/۶ روز در ارتفاعات) است. با فرارسیدن فصل بهار و افزایش دما، SC به‌تدریج ذوب شده و عقب‌نشینی می‌کند و با افت SCDur غالباً محدود به ارتفاعات بسیار بلند و قله مرتفع با نرخ بیشینه ماندگاری ۲۰-۸ روز است. با فرارسیدن تابستان، بیش‌تر مناطق به‌طور کامل فاقد پوشش برفی می‌شوند و تنها در مرتفع‌ترین قله ممکن است لکه‌های برف با ماندگاری کوتاه دیده شود. در این بین MaxSCDur در قله سبلان (۲۰-۴ روز)، قله سهند، آورین، برده‌رش، دالامیر، کله شین و قندیل (۴-۲ روز) در بقیه گستره مطالعاتی صفر (۰-۲ روز) است. این روند ذوب برف تأثیر مستقیمی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه در طول دوره گرم سال دارد. در پاییز، با تغییر فصل و کاهش دما محیطی به‌سبب آغاز و انباشت تدریجی برف در اغلب ارتفاعات و قله مرتفع، بیشینه ماندگاری نسبت به تابستان افزایش یافته است.

مشارکت نویسندگان

doi: ۱۹۸-۱۶۶، (۷۳)۲۱

10.22111/gdij.2023.44795.3497

قنبرپور، محمدرضا، محسنی ساروی، محسن، ثقفیان، بهرام، احمدی، حسن، و عباس‌پور، کریم (۱۳۸۴). تعیین مناطق مؤثر در انباشت و ماندگاری سطح پوشش برف و سهم ذوب برف در رواناب. *منابع طبیعی ایران*، ۳(۳)، ۵۰۳-۵۱۵. https://ijnr.ut.ac.ir/article_25249.html?lang=en. کاشانی، عباس، صلاحی، برومند، حلییان، امیرحسین، و زینالی، بتول (۱۴۰۳). وردش‌های فضایی- زمانی روزهای برف‌پوشان در پهنه شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های دورسنجی. *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱، ۹۴-۱۱۷.

doi:10.30495/girs.2022.697117.

کاشانی، عباس، صلاحی، برومند، حلییان، امیرحسین و زینالی، بتول (۱۴۰۴). واکاوی روزهای برف‌پوشان در ارتباط با سنجه توپوگرافیکی ارتفاع در شمال غرب ایران. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۸(۱): ۳۱-۴۵. doi: 10.22034/gahr.2024.435665.2035

مرشدی، علی، و حسینی بروجنی، بهروز (۱۴۰۰). پایش و مقایسه تغییرات NDSI با استفاده از داده‌های سنجنده‌های MODIS و ETM+ به‌منظور برآورد پوشش برفی در حوضه آبریز کارون شمالی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۴)، ۶۸-۸۲. doi: 10.22098/mmws.2021.9453.1045

یغمایی، لیلا، جعفری، رضا، سلطانی، سعید، و جهانبازی، حسن (۱۴۰۰). اثر تغییرات سطح و ماندگاری پوشش برف بر پوشش گیاهی در استان چهارمحال و بختیاری. *مرتع و آبخیزداری*، ۲۴(۴)، ۹۱۷-۹۳۸. doi:10.22059/jrwm.2022.317220.1559

برومند صلاحی: مفهوم‌سازی، طراحی پژوهش، تجزیه و تحلیل اطلاعات. امیرحسین حلییان: مفهوم‌سازی، راهنمایی، تهیه نقشه‌ها، نگارش پیش‌نویس اصلی و بازبینی مقاله. عباس کاشانی: بررسی منابع، ویرایش مقاله و بهینه‌سازی نقشه‌ها.

منابع:

آصفی، مصطفی، و فتح‌زاده، علی (۱۴۰۱). شبیه‌سازی توزیع مکانی عمق برف با استفاده از هوش مصنوعی و رگرسیون خطی مبتنی بر کاهش ویژگی‌ها (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چلگرد). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۲۹-۴۳. doi: 10.22098/mmws.2022.11560.1141

الحسینی المدرسی، سیدعلی، حاتمی، جواد، و سرکارگر، علی (۱۳۹۵). محاسبه خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری و تصاویر سنجنده ترا سارایکس باند (TerraSAR-X) و مادیس (MODIS). *سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۲، ۵۹-۷۶. <https://sanad.iau.ir/fa/Journal/girs/Article/901956/FullText>.

بهرامی پیچاقچی، حدیقه، رائینی سرجاز، محمود، و نوروز ولاشدی، رضا (۱۳۹۹). بررسی اثرگذاری گرمایش فراگیر بر تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف و ماندگاری آن در گستره‌ی دامنه شمالی البرز مرکزی. *هواشناسی کشاورزی*، ۱۵(۱۵)، ۲۵-۱۵. doi: 10.22125/agmj.2020.200876.1071

شاهزیدی، سمیه سادات (۱۴۰۲). بررسی ارتباط مؤلفه‌های ژئومورفولوژیک (ارتفاع، شیب و جهت شیب) با ماکزیم ماندگاری برف‌پوش در ارتفاعات تالش. *جغرافیا و توسعه*،

of Agricultural Meteorology, 8(1), 15-25. doi:

10.22125/agmj.2020.200876.1071. [In Persian]

Balk, B., & Elder, K. (2000). Combining binary decision tree and geostatistical methods to estimate snow distribution in a mountain watershed. *Water Resources Research*, 36(1), 13-26. doi:10.1029/1999WR900251.

Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impact of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303-309. doi:10.1038/nature04141.

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L.M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacomoni, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J.-I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzago, S., & Vincent, C. (2018). The European Mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future

References

- Alhossaini Almodaresi, S. A., Hatami, J., & Sarkargar, A. (2016). Calculating the physical properties of snow, using differential radar interferometry and TerraSAR-X and MODIS images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 2, 59-76. [In Persian]
- Asefi, M., & Fathzadeh, A. (2022). Simulating spatial distribution of snow depth using artificial intelligence and linear regression based on feature reduction (Case study: Chalgerd watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4), 29-43. doi: 10.22098/mmws.2022.11560.1141. [In Persian]
- Bahrami Pichaghchi, H., Raeni-Sarjaz, M., & Norooz Valashedi, R. (2020). Investigation of the effect of global warming on temporal and spatial changes of snow cover and its durability in the northern slope of Central Alborz. *Journal*

- challenges. *Cryosphere* 12, 759–794. doi: 10.5194/tc-12-759-2018.
- Bormann, K. J., Brown, R. D., Derksen, C., & Painter, T. H. (2018). Estimating snow-cover trends from space. *Nature Clim Change*, 8, 924–928. doi: 10.1038/s41558-018-0318-3
- Brown R., & Armstrong R. L. (2010). Snow-cover data measurement, products and sources in snow and climate. In Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling, *Armstrong RL, Brun E (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK.*
- Brown, R., Derksen, C., & Wang, L. (2007). Assessment of spring snow cover duration variability over northern Canada from satellite datasets, *Remote Sensing of Environment*, 111(3), 367-381. doi: 10.1016/j.rse.2006.09.035.
- Chen, W., Wu, Y., Wu, N., & Luo, P. (2008). Effect of snow-cover duration on plant species diversity of alpine meadows on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 5, 327-339. doi: 10.1007/s11629-008-0182-0.
- Chen, X., Liang, S., Cao, Y., He, T., & Wang, D. (2015). Observed contrast changes in snow cover phenology in northern middle and high latitudes from 2001-2014. *Scientific reports*, 5(1), 1-9. doi.org/10.1038/srep16820.
- Cui, C., Yang, Q., & Wang, S. (2005). Comparison analysis of long-term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang region from 1960 to 2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(4), 486–490. doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2005.0072
- Dietz, A. J., Conrad, C., Kuenzer, C., Gesell, G., & Dech, S. (2014). Identifying changing snow cover characteristics in Central Asia between 1986 and 2014 from remote sensing data. *Remote Sensing*, 6(12), 12752-12775.
- Foster, J. L., Hall, D. K., & Chang, A. T. C. (1999). Effects of snow crystal shape on the scattering of passive microwave radiation. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on Selected Topics*, 37(2): 1165–1168. doi:10.1109/36.752235.
- Ghanbarpour, M. R., Mohseni Saravi, M., Saghafian, B., Ahmadi, H., & Abbaspour, K. (2005). An Evaluation of Regions Effective in Accumulation and Persistence of Snow Cover and Snowmelt Contribution in Runoff. *Iranian Journal of Natural Resources (Not Publish)*, 58(3), 503-515. [In Persian]
- Hammond, J. C., Saavedra, F.A., & Kampf, S. K. (2018). Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016. *Int. J. Climatol.* 38, 4369–4383. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5674>
- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D. R., Greenwood, G., Mark, B. G., Milner, A. M., Weingartner, R., & Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5, 418–435. ISSN 0034-4257, doi: 10.1016/j.rse.2006.09.035.
- Kashani, A., Salahi, B., Halabian, A., & Zeinali, B. (2024). Spatio-temporal variations of snow-covered days in the Northwest of Iran using remote sensing data. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 1: 94-117. doi:10.30495/girs.2022.697117. [In Persian]
- Kashani, A., Salahi, B., Halabian, A., & Zeinali, B. (2024). Analysis of the relationship between snow-covered days and topographic elevation in Northwestern Iran. *Geography and Human Relationships*, 29: 31-45. doi: 10.22034/gahr.2024.435665.2035 [In Persian]
- Ke, C., & Liu, X. (2014). MODIS-observed spatial and temporal variation in snow cover in Xinjiang, China. *Climate Research*, 59, 15-26. doi: 10.3354/cr01206
- Keikhosravi Kiani, M. S., Masoodian, S. A. (2021). Climatology of snow cover accumulation and melting in Iran using MODIS data, *Physical Geography Research*, 53(1), 109-121. doi: 10.22059/jphgr.2021.290500.1007446
- Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139, 637-649. doi: 10.1007/s10584-016-1806-y.
- Kohler, T., Wehrli, A., & Jurek, M. (2014). Mountains and climate change: A global concern. In: Centre for Development and Environment (CDE) (Ed.), Sustainable Mountain Development Series. *Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and Geographica Bernensia*, Bern, Switzerland (136 pp).
- Li, D., Wrzesien, M.L., Durand, M., Adam, J., & Lettenmaier, D.P. (2017). How much runoff originates as snow in the western United States, and how will that change in the future? *Geophys. Res. Lett.* 44, 6163–6172. doi: pdfdirect/10.1002/2017GL073551
- Li, H., Zhong, X., Zheng, L., Hao, X., Wang, J., & Zhang, J. (2022). Classification of snow cover persistence across China. *Water*, 14, 6: 933. doi: 10.3390/w14060933.
- Morshedi, A., & Hoseini Boroujeni, B. (2021). Monitoring and comparing NDSI changes using MODIS and ETM+ sensor data to estimate snow cover in North Karun Basin. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 68-82. doi: 10.22098/mmws.2021.9453.1045. [In Persian]
- Mote, P. W., Li, S., Lettenmaier, D. P., Xiao, M., & Engel, R. (2018). Dramatic declines in snowpack in the western US. *Npj Climate and*

- Atmospheric Science*, 1(1), 2. doi: 10.1038/s41612-018-0012-1
- Notarnicola, C. (2020). Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018, *Remote Sensing of Environment*, 243, 111781, doi: 10.1016/j.rse.2020.111781.
- Olefs, M., Koch, R., Schöner, W., & Marke, T. (2020). Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961–2020—A Model Based Approach. *Atmosphere*, 11(12), 1330. doi: 10.3390/atmos11121330
- Liang, T., Zhang, X., Xie, H., Wu, C., Feng, Q., Huang, X., & Chen, Q. (2008). Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3750-3761. doi: 10.1016/j.rse.2008.05.010
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., Williamson, S. N., & Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat. Clim. Chang*, 5, 424:430.
- Pu, Z., Xu, L., & Salomonson, V. V. (2007). MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 34(6). doi: 10.1029/2007GL029262
- Ramage, J. M., & Isacks, B. L. (2003). Interannual variations of snowmelt and refreeze timing in southeast Alaskan icefields, USA. *Journal of Glaciology*, 49(164), 102–116. doi:10.3189/172756503781830908
- Shahzeidi, S. (2023). Investigating the Relationship between Geomorphological Components (Elevation, Slope and Aspect) and the Maximum Snow-Cover Duration in Talesh Mountains. *Geography and Development*, 21(73), 166-198. doi: 10.22111/gdij.2023.44795.3497. [In Persian]
- She, J., Zhang, Y., Li, X., & Chen, Y. (2014). Changes in snow and glacier cover in an arid watershed of the western Kunlun Mountains using multisource remote-sensing data, *International journal of remote sensing*, 35(1), 234- 252. doi:10.1080/01431161.2013.866296
- Simpson, J.J., Stitt, J.R., & Sienko, M. (2001). Improved Estimates of the Areal Extent of Snow Cover from AVHRR Data, *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 1-23. doi: 10.1016/S0022-1694(97)00087-5.
- Stocker T., Qin D. H., & Plattner, G. K. (2014). Climate change, 2013: The Physical Science Basis. *Cambridge and New York: Cambridge University Press*.
- Udnaes, H., Alfnes, C. E., & Andreassen, L. M. (2007). Improving runoff modeling using satellite-derived snow cover area. *Nord. Hydrol.* 38, 21–32. doi:10.2166/nh.2007.032
- Yaghamei, L., Jafari, R., Soltani, S., & Jahanbazi, H. (2022). The effect of snow cover area and duration changes on vegetation cover in Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 74(4), 917-938. doi:10.22059/jrwm.2022.317220.1559. [In Persian]
- Yang, K., Guyennon, N., Ouyang, L., Tian, L., Tartari, G., & Salerno, F. (2018). Impact of summer monsoon on the elevation-dependence of meteorological variables in the south of central Himalaya. *Int. J. Climatol.* 38, 1748–1759. doi: 10.1002/joc.5293
- Yang, Q., Song, K., Hao, X., Chen, S., & Zhu, B. (2018). An assessment of snow cover duration variability among three basins of Songhua River in Northeast China using binary decision tree. *Chinese Geographical Science*, 28, 946-956. doi: 10.1007/s11769-018-1004-0
- Ye, B., Yang, D.K., Jiao, T., Han, Z., Jin, H., Yang, H., & Li, Z. (2005). The Urumqi River source glacier No. 1, Tianshan, China: changes over the past 45 years. *Geophysical Research Letters*, 32: 1-4. doi: 10.1029/2005GL024178
- Zhang, H., Immerzeel, W. W., Zhang, F., De Kok, R. J., Chen, D., & Yan, W. (2022). Snow cover persistence reverses the altitudinal patterns of warming above and below 5000 m on the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 803, 149889. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149889.
- Zhang, H., Zhang, F., Zhang, G., Che, T., Yan, W., Ye, M., & Ma, N. (2019). Ground-based evaluation of MODIS snow cover product V6 across China: Implications for the selection of NDSI threshold, *Science of the Total Environment*, 651: 2712–2726. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.128.
- Zhong, X., Zhang, T., Kang, S., & Wang, J. (2021). Spatiotemporal variability of snow cover timing and duration over the Eurasian continent during 1966-2012. *Science of the Total Environment*, 750, 141670. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141670