



Analysis of the effects of climate change in the past decades on the snow cover of the Sabalan Mountains: Trends and environmental consequences

Behrouz Sobhani¹, , Mahnaz Saber 

1. Corresponding author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: sobhani@uma.ac.ir
2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: mahnaz.saber05@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 27 July 2025;
Received in revised form:
22 October 2025;
Accepted: 06 January
2026
Available online: 03
August 2026

Keywords:

mountain ecosystems,
snow cover, climate
change, Sabalan, water
resources, MODIS.

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to investigate the temporal-spatial trends and changes in snow cover of Sabalan Mountain over the past 25 years (2000–2024).

Method: This study utilized MODIS satellite data and statistical methods (Mann-Kendall and Sen's slope) to analyze snow cover trends from 2000 to 2024 across seven classification categories.

Results: Results showed that significant trends in specific categories: November had a significant decreasing trend ($Z = -1.75$, $Q = -0.391$) in the 50-70% coverage class, while December exhibited a significant increasing trend ($Z = 1.87$, $Q = 0.275$) in the same class. January displayed significant growth ($Z = 2.17$, $Q = 0.390$) in the 70-90% category, whereas the 90-100% category showed no statistically significant changes. Maximum snow cover occurred in January and February (>90%), with minimum coverage in June (<30%). Spatiotemporal maps indicated relative snow cover reduction in December, January, and February, contrasted by notable increases in March – likely reflecting shifting precipitation patterns. Spatial distribution patterns confirmed heavy snow concentration in central highlands, gradually diminishing toward slopes. While most monthly trends weren't statistically significant, seasonal patterns emerged, including autumn decreases and winter increases, potentially linked to climatic changes. Declining snow cover carries serious implications for water resources, agriculture, and snow-dependent ecosystems.

Conclusions: These findings prove valuable for water resource management, flood prediction, and understanding climate change impacts on snow reserves. The study underscores the necessity for continuous monitoring, investigation of climate parameter correlations, and implementation of adaptive strategies in mountainous regions to address these environmental changes. The research highlights the critical importance of integrating snow cover data into regional climate adaptation and water management policies.

1. Introduction

Climate change, as one of the main challenges of the 21st century, has widespread impacts on natural and human systems around the world. One of the most important impacts of climate change is the change in precipitation and temperature patterns,

which directly affects the snow cover and reserves of mountainous areas and water flows. Mountain snow cover is not only known as a sensitive indicator of climate change, but also plays a vital role in providing freshwater, regulating river flows, and maintaining mountain ecosystems. In addition

Cite this article: Sobhani, B., Saber, M. (2026). Analysis of the effects of climate change in the past decades on the snow cover of the Sabalan Mountains: Trends and environmental consequences. *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 7 (26), 169-194. <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2067083.1110>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.

Publisher: Lorestan University.



DOI: <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2067083.1110>

to providing freshwater, the Sabalan Mountain plays an important role in maintaining biodiversity and mountain ecosystems. Therefore, the aim of this study is to investigate the trend and temporal-spatial changes in the snow cover of the Sabalan Mountain in the past 25 years.

2. Methodology

In this study, the snow covers of the Sabalan and its changes in the 25-year period (2000-2024) from March 2000 to December 2024 were investigated using the sixth version of MOD10ACM obtained from MODIS sensor images of the Terra satellite. To achieve the research goals, first, the frequency of the percentage of snow cover on an annual scale from March 2000 to December 2024 was extracted, then the frequency of this cover for each of the months of January to June and November and December in the years under study was categorized into 7 classes (no snow cover, 1-10%, 10-30%, 30-50%, 50-70%, 70-90% and 90-100%). Then, the trend of changes in each of the classes of snow cover percentage in months (monthly snow cover time series) was evaluated using the Mann-Kendall test and Sen's Slope statistical methods. Also, monthly average snow cover maps were drawn during the study period and monthly difference maps were drawn.

3. Results

An examination of the percentage of snow cover classes of the total area of the Sabalan Mountain in 8 months over 25 years (2000-2024) shows a significant decrease in complete snow cover (class 90-100%) in the cold months of the year (January and December) and accelerated snow melting in the warm months (April to June). In January, the average complete snow cover decreased by 8.5%, while the intermediate classes (30-70%) expanded. In December, 16.8% decrease in complete snow cover and an increase in areas with little snow were observed. Spring months such as April and May show a sharp decrease in complete snow cover and an increase in areas without snow, so that in June, complete snow cover has reached almost the minimum possible. November also showed a significant decrease in complete snow cover and a delay in the start of the snow cover season. These changes are probably due to increasing temperatures, changing precipitation patterns, and early snowmelt, which have hydrological consequences such as changes in the timing and amount of spring runoff and reduced water storage. Trending of snow cover changes in the Sabalan using the Mann-Kendall test and the Sen's Slope showed that snow cover changes in the Sabalan Mountains follow a complex seasonal pattern, and

the snow cover trend in the region is decreasing in autumn and increasing in winter, which can be attributed to the shortening of the snowfall period in this region. The results of the Mann-Kendall test and the Sen's Slope indicate that in the 50-70% snow cover class, November shows a significant decreasing trend, while in December it increases, and in the 70-90% class, a significant increase in snow cover was observed in January. Although the amount of this increase is small, the presence of a positive slope and its statistical confirmation ($Z=2.17$) indicate that the trend of snow changes in this region requires an investigation of precipitation and temperature patterns in the region. Differential snow cover maps of the Sabalan region during the period 2000-2024 showed that the greatest decrease in snow cover occurred in the months of December, January, and February, which can be interpreted as an indicator of winter warming and reduced snowfall. In contrast, the increase in snow cover in March and to some extent June is significant, indicating a change in the timing of snow melt or a shift in the precipitation phase towards later periods of the year.

4. Discussion

The existence of a decreasing trend in snow cover levels in the Sabalan Mountains is consistent with studies by other researchers, including [Barnett et al. \(2005\)](#); [Immerzeel et al. \(2010\)](#); [Sorg et al. \(2012\)](#); [Marty et al. \(2013\)](#); [Chen et al. \(2016\)](#); [Huss et al. \(2017\)](#); [Faraji et al. \(2023\)](#), who have studied changes in snow cover in mountainous areas and have pointed out the reduction in the area of snow cover in the mountains they studied. The reduction in snow cover in the Sabalan has serious consequences for the water resources of the region, because the melting of snow in this mountain is the main source of water for the rivers and aquifers of the region. These changes also negatively affect mountain ecosystems, agriculture and local communities. Similar studies in other mountainous areas of the world have also shown that climate change is increasingly affecting snow cover ([IPCC, 2021](#)). This study shows that climate change is greatly affecting mountainous areas, and this finding is consistent with the results of the research of [Barnett et al. \(2005\)](#); [Immerzeel et al. \(2010\)](#); [Sorg et al. \(2012\)](#); [Marty et al. \(2013\)](#); [Pepin et al. \(2015\)](#); [Chen et al. \(2016\)](#); [Huss et al. \(2017\)](#); [López-Moreno et al. \(2021\)](#); [Liu et al. \(2021\)](#); [Zhang et al. \(2021\)](#) and [Faraji et al. \(2023\)](#).

5. Conclusion

To address these challenges, there is a need to develop sustainable management strategies and

policies to adapt to climate change and reduce its impacts. In this regard, several suggestions are presented: investigating the relationship between snow cover changes and climate parameters and conducting a long-term trend analysis of regional climate variables using time series data, more detailed studies on the impact of these changes on regional water resources, studying the relationship of this variable with climate indicators such as NAO, ENSO and AO to explain the mechanisms of changes observed in the region.

Author Contributions

In the preparation and writing of this article, all authors (first and second) have contributed equally and jointly. All stages of the research, from study design and data collection to analysis of results and final writing of the article, are the result of collaboration and collective agreement of all authors.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

We are very grateful to everyone who assisted us in conducting this research.

Ethical Considerations

All authors affirm that this research was conducted in accordance with ethical standards, with no data fabrication, falsification, or plagiarism.

Funding

This research is derived from a research project Has Been Financially Supported by the Office of Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Mohaghegh Ardabili.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



تحلیل اثرات تغییر اقلیم در دهه‌های گذشته بر پوشش برفی کوهستان سبلان: روندها و پیامدهای محیطی

بهروز سبحانی^۱؛ مهناز صابر^۲

^۱ نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: sobhani@uma.ac.ir

^۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mahnaz.saber05@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این پژوهش، بررسی روند و تغییرات زمانی-مکانی پوشش برفی کوهستان سبلان در ۲۵ سال گذشته (۲۰۲۴-۲۰۰۰) است.
تاریخچه مقاله: دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵	روش: این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و روش‌های آماری من-کندال و شیب سن، روند تغییرات پوشش برفی سبلان را طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۰ در ۷ طبقه بررسی کرده است.
تاریخ تجدیدنظر: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰	نتایج: نتایج نشان داد تنها در طبقه ۷۰-۵۰٪، نوامبر روند کاهشی معنادار ($Z = -1.75$ و $Q = -0.391$) و دسامبر روند افزایشی معنادار ($Z = 1.87$ و $Q = 0.275$) داشته است. در طبقه ۹۰-۷۰٪، ژانویه افزایش معنی‌داری ($Z = 2.17$ و $Q = -0.390$) نشان داد، در حالی که طبقه ۱۰۰-۹۰٪ تغییرات معناداری نداشت. بیشترین پوشش برف در ژانویه و فوریه (بیش از ۹۰٪) و کمترین آن در ژوئن (کمتر از ۳۰٪) مشاهده شد. نقشه‌های زمانی-مکانی کاهش نسبی پوشش برف را در دسامبر، ژانویه و فوریه و افزایش محسوس آن را در مارس (احتمالاً ناشی از تغییر الگوی بارش‌ها) نشان دادند. توزیع فضایی برف، تمرکز شدید در ارتفاعات مرکزی و کاهش تدریجی به سمت دامنه‌ها را تأیید کرد. اگرچه تغییرات در اکثر ماه‌ها و طبقات از نظر آماری معنادار نبود، روندهای فصلی خاصی مانند کاهش پوشش برف در پاییز و افزایش در زمستان مشهود است که ممکن است تحت تأثیر تغییرات اقلیمی باشد.
پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶	نتیجه‌گیری: کاهش پوشش برفی پیامدهای جدی برای منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های وابسته دارد. این یافته‌ها برای مدیریت منابع آب، پیش‌بینی سیلاب و درک اثرات تغییر اقلیم بر ذخایر برفی حیاتی هستند و لزوم پایش مستمر، بررسی ارتباط با پارامترهای اقلیمی و اتخاذ راهکارهای سازگاری در مناطق کوهستانی را برجسته می‌سازند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲	
واژگان کلیدی: اکوسیستم‌های کوهستانی، پوشش برفی، تغییر اقلیم، سبلان، منابع آب، MODIS	

۱. مقدمه

بارش و دما است که به طور مستقیم بر پوشش و ذخایر برفی مناطق کوهستانی و جریان‌های آبی تأثیر می‌گذارد (IPCC, 2021). پوشش برفی کوهستان‌ها نه تنها به عنوان یک شاخص حساس به

تغییر اقلیم به عنوان یکی از چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم، تأثیرات گسترده‌ای بر سیستم‌های طبیعی و انسانی در سراسر جهان داشته است. یکی از مهم‌ترین تأثیرات تغییر اقلیم، تغییر در الگوهای

استناد: سبحانی، بهروز؛ صابر، مهناز (۱۴۰۵). تحلیل اثرات تغییر اقلیم در دهه‌های گذشته بر پوشش برفی کوهستان سبلان: روندها و پیامدهای محیطی.

مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، ۷ (۲۶)، ۱۶۹-۱۹۴. <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2067083.1110>



DOI: <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2067083.1110>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه لرستان.

روی مناطق کوهستانی (۲۰۱۰-۱۹۵۰) با استفاده از داده‌های دما و بارش، به این نتیجه رسیدند که مناطق کوهستانی به‌طور نامتناسبی تحت تأثیر افزایش دما قرار گرفته‌اند و افزایش دما منجر به کاهش پوشش برفی و تغییر در جریان رودخانه‌ها شده است. [Chen et al. \(2016\)](#) با مطالعه بر روی رشته‌کوه‌های چین (۲۰۱۰-۱۹۶۰) با استفاده از داده‌های MODIS، نشان دادند که کاهش پوشش برفی منجر به کاهش جریان رودخانه‌ها و تأثیرات منفی بر کشاورزی و صنعت شده است. نتیجه پژوهش [Huss et al. \(2017\)](#) بر روی یخچال‌های طبیعی جهان (۲۰۱۵-۱۹۸۰) حاکی از آن است که کاهش پوشش برفی و ذوب یخچال‌ها منجر به کاهش منابع آب و تأثیرات منفی بر اکوسیستم‌های کوهستانی شده است. نتیجه پژوهش [Marty et al. \(2017\)](#) در خصوص ارزیابی تغییرات پوشش رشته‌کوه آلپ (۲۰۱۶-۱۹۷۰)، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و مدل‌های اقلیمی مبین آن است که کاهش پوشش برفی به دلیل افزایش دمای هوا و تغییرات الگوهای بارش رخ داده است و این روند کاهش برف پیامدهای جدی برای صنعت توریسم و منابع آب منطقه دارد. [Saavedra et al. \(2018\)](#) به پایش پوشش برف و ماندگاری آن در رشته‌کوه آند با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد ماندگاری برف همبستگی بالایی با پارامترهای جوی از جمله بارش و دما داشته که میزان این همبستگی شدت تحت تأثیر عرض جغرافیایی و ارتفاع قرار دارد. [Orsolini et al. \(2019\)](#) به برآورد عمق و پوشش برف در فلات تبت پرداختند. با مقایسه نتایج حاصل از مراکز تجزیه و تحلیل جهانی با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه زمینی، داده‌های عمق برف حاصل از ماهواره‌های ریز موج و داده‌های سیستم نقشه‌برداری برف و یخ چند حسگر تعاملی (IMS) به این نتیجه رسیدند که IMS بیشترین ضریب همبستگی را با داده‌های زمینی دارد. تحلیل علی [Beniston et al. \(2018\)](#) در خصوص پوشش برفی رشته‌کوه‌های قاره اروپا (۲۰۱۵-۱۹۶۰) بر مبنای داده‌های مدل‌های اقلیمی و تصاویر ماهواره‌ای MODIS، نشان داد که کاهش پوشش برفی به دلیل افزایش دمای هوا و تغییرات الگوهای بارش رخ داده است و بر لزوم اتخاذ راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارد. [Zhang et al. \(2020\)](#) تغییرات پوشش برف فلات تبت را با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس و VIIRS بررسی نموده‌اند، و چنین نتیجه‌گیری کردند

تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود، بلکه نقش حیاتی در تأمین آب شیرین، تنظیم جریان رودخانه‌ها و حفظ اکوسیستم‌های کوهستانی ایفا می‌کند ([Barnett et al, 2005](#)). کاهش پوشش برفی و تغییر در زمان ذوب برف‌ها می‌تواند پیامدهای جدی برای منابع آب، کشاورزی، تولید انرژی و جوامع محلی داشته باشد ([Marty et al, 2017](#)). مطالعه تأثیرات تغییر اقلیم بر پوشش برفی مناطق کوهستانی در دهه‌های اخیر به یکی از موضوعات مهم در تحقیقات اقلیمی و محیط زیستی تبدیل شده است.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تغییر اقلیم در دهه‌های گذشته منجر به کاهش پوشش برفی و تغییر در الگوهای ذوب برف در بسیاری از مناطق کوهستانی جهان شده است ([Pepin et al, 2015](#); [IPCC, 2021](#)). به عنوان مثال، [Barnett et al \(2005\)](#) در بررسی مناطق برفگیر جهان (۲۰۰۰-۱۹۵۰) با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، نشان دادند که افزایش دما منجر به کاهش ذخایر برفی و تغییر در زمان ذوب برف‌ها شده است. [Hall & Riggs \(2007\)](#) با ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای MODIS طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۶ به این نتیجه رسیدند که این داده‌ها ابزار مناسبی برای پایش تغییرات پوشش برفی در مناطق کوهستانی هستند. این مطالعه همچنین بر دقت و قابلیت اطمینان داده‌های MODIS تأکید دارد. [Immerzeel et al \(2010\)](#) در مطالعه‌ای بر روی رشته‌کوه‌های هیمالیا (۲۰۰۵-۱۹۵۰) با استفاده از مدل‌های اقلیمی و داده‌های ماهواره MODIS، نشان دادند که کاهش پوشش برفی منجر به کاهش جریان رودخانه‌ها و تأثیرات منفی بر امنیت آب و غذا شده است. [Sorg et al. \(2012\)](#) در تحقیقی بر روی رشته‌کوه‌های آسیای مرکزی (۲۰۱۰-۱۹۶۰) و داده‌های سنجنده MODIS، به این نتیجه رسیدند که کاهش پوشش برفی منجر به کاهش منابع آب و تأثیرات منفی بر کشاورزی شده است. نتایج پژوهش [Rangwala & Miller \(2012\)](#) در خصوص بررسی مناطق کوهستانی آمریکای شمالی (۲۰۱۰-۱۹۵۰)، با استفاده از داده‌های دما و بارش، نشان داد که افزایش دما منجر به کاهش پوشش برفی و تغییر در زمان ذوب برف‌ها شده است و بر لزوم مدیریت پایدار منابع آب تأکید می‌کنند. [Marty et al. \(2013\)](#) با بررسی پوشش برف در رشته‌کوه‌های آلپ با استفاده از تصاویر MODIS، به این نتیجه رسیدند که کاهش پوشش برفی در این سال‌ها منجر به کاهش منابع آب و تأثیرات منفی بر اکوسیستم‌های کوهستانی این منطقه شده است. [Pepin et al \(2015\)](#) در مطالعه‌ای جهانی بر

از دور ماهواره‌ای، روندهای ۲۰ ساله پوشش برف در مناطق شرق و غرب قطب جنوب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه‌ی آنان نشان‌دهنده تغییرات فضایی و زمانی در ویژگی‌های پوشش برف این مناطق است، که می‌تواند به درک بهتر اثرات تغییرات اقلیمی در نواحی قطبی کمک کند.

در ایران نیز، [Roustaei et al \(2016\)](#) به بررسی برف مرز کوهستان سبلان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند در این مطالعه از طریق شاخص NDSI و SEBAL اقدام به مطالعه برف مرز کوهستان سبلان شده و بر اساس نتایج به دست آمده، به علت دمای بالای هوا در تابستان در این منطقه پوشش برفی پایدار وجود ندارد. [Seifi & Gorbani \(2019\)](#) امکان استفاده از سنجنده‌های LOI و TIRS را برای تخمین سطح پوشش برف در کوهستان سهند مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آنان مبین دقت بسیار مناسب الگوریتم‌های ذکر شده بود. [Faraji et al \(2024\)](#) به پیش و روند سطوح پوشش برف در بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۰۱) در غرب ایران برای فصل زمستان با کاربرد تصاویر سنجنده MODIS و شاخص پوشش برف (NDSI) پرداختند. نتایج پژوهش آنان حاکی از روند کاهشی در مساحت پوشش برف در فصل زمستان بوده است. مطالعات [Salahi et al \(2024\)](#) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره‌های ترا و آکوا (۲۰۲۰-۲۰۰۳) به بررسی ارتباط تغییرات برف‌پوش با شاخص‌های توپوگرافی در شمال غرب ایران پرداختند. نتایج نشان داد که ارتفاع مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده توزیع برف است، به‌طوری‌که تعداد روزهای برف‌پوش (SCDs) تا ارتفاع ۳۷۰۰ متر روند افزایشی داشته، اما در شیب‌های تند کاهش می‌یابد. همچنین دامنه‌های شمالی و شمال‌شرقی بیشترین پوشش برف را داشته‌اند. با این حال، تحقیقات محدودی در مورد تأثیرات تغییر اقلیم بر پوشش برفی کوهستان سبلان انجام شده است. مشاهدات میدانی بیانگر آن است که کاهش پوشش برفی این کوهستان ناشی از افزایش دما و کاهش برف بوده است. کوهستان سبلان، واقع در شمال غرب ایران، به دلیل ارتفاع بالا و موقعیت جغرافیایی خاص، یکی از مناطق حساس به تغییرات اقلیمی است. این منطقه نه تنها منبع اصلی آب شیرین برای کشاورزی و جوامع محلی است، بلکه نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی و اکوسیستم‌های کوهستانی ایفا می‌کند. از این رو هدف این پژوهش، بررسی روند و تغییرات زمانی-مکانی پوشش برفی کوهستان سبلان در ۲۵ سال گذشته (۲۰۲۴-۲۰۰۰) است.

که مودیس با دقت بیشتری پوشش برف این منطقه را محاسبه می‌کند. [Alonso-González et al \(2020\)](#) حساسیت پوشش برفی به دما، بارندگی و تنوع تابش خورشید بر روی یک شیب ارتفاعی در کوه‌های ایبری را بررسی و مشخص کردند که گرم شدن آب و هوا بر میزان و مدت زمان ذوب برف در تمامی نوارهای ارتفاعی اثر منفی داشته و نشانگر وجود فصول ذوب با شدت کمتر اما طولانی‌تر در این مناطق است.

[López-Moreno et al \(2021\)](#) در پایش تغییرات پوشش برفی رشته‌کوه پیرنه (۲۰۱۵-۱۹۶۰) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS به این نتیجه رسیدند که کاهش پوشش برفی مناطق مورد مطالعه منجر به کاهش منابع آب و تأثیرات منفی بر اکوسیستم‌های کوهستانی شده است. همچنین [IPCC \(2021\)](#) در جدیدترین گزارش خود با بررسی جهانی تغییرات اقلیمی به این مساله اشاره کرده که مناطق کوهستانی به دلیل افزایش دما و تغییرات بارش، شاهد کاهش پوشش برفی و ذوب یخچال‌ها هستند. این هشدار است بر این که مناطق کوهستانی به دلیل حساسیت به تغییرات دما و بارش، بیشترین تأثیر را از تغییر اقلیم می‌پذیرند. [Liu et al \(2021\)](#) با استفاده از داده‌های MODIS، تغییرات پوشش برف کوهستان‌های کاراکورام را در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ با استفاده از پردازش داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های آماری مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنان حاکی از کاهش پوشش برف در کوهستان‌های کاراکورام در طول دوره مورد مطالعه بوده که این کاهش بیشتر در بخش‌های جنوبی و شرقی منطقه رخ داده است. [Zhang et al \(2021\)](#) تغییرات پوشش برف کوهستان تیان‌شان را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ با استفاده از داده‌های MODIS بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش آنان نشان‌دهنده کاهش پوشش برف در کوهستان‌های تیان‌شان به خصوص در بخش‌های جنوبی و شمالی آن در دوره مورد مطالعه بوده است. [Li et al \(2022\)](#) به ارزیابی و مقایسه چهار مجموعه داده مختلف از عمق و پوشش برف در کوه‌های تیان‌شان پرداختند. این داده‌ها شامل داده‌های ERA5-Land، ERA5، سنجنش از دور مایکروویو و شبیه‌سازی مدل WRF بوده است. نتایج پژوهش آنان نشان داد که مدل WRF در تخمین عمق برف و روزهای پوشش برف عملکرد بهتری نسبت به سایر داده‌ها دارد، که این امر اهمیت استفاده از مدل‌های دینامیکی در مطالعات برف را نشان می‌دهد. [Malinka et al \(2024\)](#) با استفاده از داده‌های سنجنش

۲. روش تحقیق

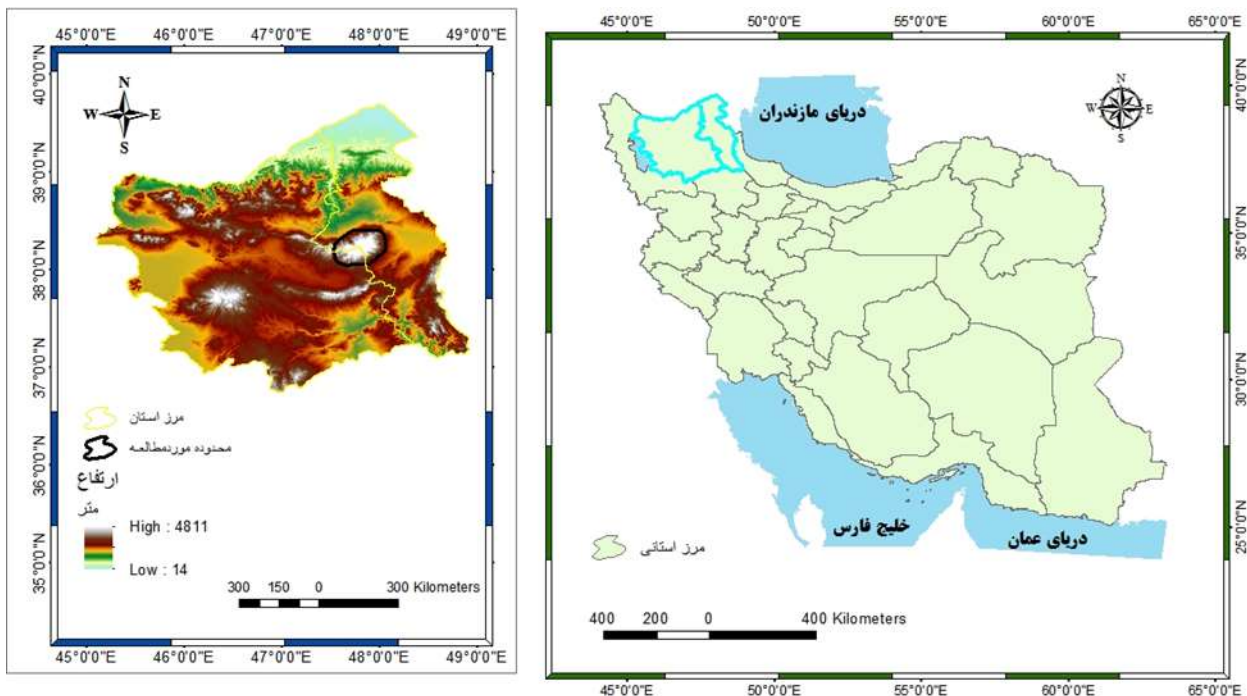
در این پژوهش پوشش برف سبلان و تغییرات آن در بازه زمانی ۲۵ ساله (۲۰۲۴-۲۰۰۰) از مارس ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۴ با استفاده از محصول نسخه ششم MOD10ACM به دست آمده از تصاویر ماهواره ای MODIS ماهواره Terra مورد بررسی قرار گرفت. توان تفکیک افقی این محصول ۵۰۰ متر است که ۶۴ نقطه شبکه^۱ مساحت منطقه مورد مطالعه را پوشش داد. برای نیل به اهداف پژوهش، ابتدا فراوانی درصد پوشش برف در مقیاس سالانه از مارس ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۴ استخراج شد سپس درصد فراوانی این پوشش برای هر کدام از ماه های ژانویه تا ژوئن و نوامبر و دسامبر در سال های مورد بررسی در ۷ طبقه (بدون پوشش برف، ۱-۱۰٪، ۱۰-۳۰٪، ۳۰-۵۰٪، ۵۰-۷۰٪، ۷۰-۹۰٪، ۹۰-۱۰۰٪) دسته بندی گردید و نتایج محاسبات در قالب نمودارهای نمایش داده شده و تحلیل شد. در گام بعدی روند تغییرات هر یک از طبقات درصد پوشش برفی ماه ها (سری های زمانی ماهانه پوشش برف) با روش های آماری آزمون من-کندال و شیب سن مورد ارزیابی قرار گرفت. از آزمون ناپارامتریک من-کندال (Mann-Kendall) جهت تشخیص وجود روند و از روش شیب سن (Sen's Slope) برای تعیین شدت روند استفاده شد. همچنین

برای آگاهی از الگوی توزیع پوشش برف در محدوده سبلان، نقشه های میانگین ماهانه دوره مورد مطالعه ترسیم شد. در ادامه به منظور آشکار سازی بهتر تغییرات کاهشی یا افزایشی پوشش برف در سطح منطقه در انتهای دوره در مقایسه با اوایل دوره مورد مطالعه، نقشه های تفاضل ماهانه برای پوشش برف تهیه و نمایش داده شد. برای این کار، با توجه به فقدان داده دو ماه ژانویه و فوریه سال ۲۰۰۰، نقشه های تغییرات ماه ها از تفاضل نقشه های هر یک از ماه های سال ۲۰۲۴ از نقشه های ماه های متناظر خود در سال ۲۰۰۱ به دست آمده و تهیه و ترسیم شد سپس مورد تحلیل قرار گرفتند.

۲.۱. معرفی محدوده مورد مطالعه

این مطالعه به بررسی روند تغییرات پوشش برفی سبلان در ۲۵ سال گذشته (۲۰۲۴-۲۰۰۰) می پردازد و ارتباط آن با تغییرات اقلیمی را تحلیل می کند. کوهستان سبلان، با ارتفاع ۴۸۱۱ متر، از سطح دریا در ۳۰ کیلومتری غرب شهر اردبیل و ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مشکین شهر سومین قله ی بلند ایران می باشد. این کوه از لحاظ موقعیت جغرافیایی در ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. در شکل (۱) محدوده ی مورد مطالعه ارائه شده است (Zeynali et al, 2021).

^۱Grid Code



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

۳. یافته‌های پژوهش

۳.۱. بررسی درصد پوشش برف سبلان در ماه‌های

دوره مورد مطالعه

ژانویه: تحلیل داده‌های پوشش برف ماه ژانویه در کوهستان سبلان طی دوره ۲۴ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۴) نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در الگوی توزیع برف است (شکل ۲). نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که پوشش برف کامل (طبقه ۹۰-۱۰۰ درصد) در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ به بیش از ۹۸ درصد رسیده است. در مقابل، سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ کمترین میزان پوشش برف کامل را به ترتیب به میزان ۷۰/۳ درصد و ۵۹/۴ درصد داشته‌اند. در طول دوره، متوسط پوشش برف کامل ۸۳/۹ درصد از مساحت منطقه، پوشش برف متراکم ۹/۱ درصد و سایر طبقات در مجموع ۷ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته‌اند. تحلیل روند بلندمدت نشان می‌دهد که میانگین پوشش برف کامل از ۸۶/۷ درصد در دهه ۲۰۰۱-۲۰۱۰ به ۸۳/۶ درصد در دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ و سپس به ۸۰/۹ درصد در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۴ کاهش یافته است. این کاهش ۵/۸ درصدی در دو دهه اخیر با افزایش گستره پوشش برف متراکم (طبقه ۹۰-۷۰ درصد) همراه بوده

است. بررسی سال‌های اخیر نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۴ پوشش برف کامل به ۶۲/۵ درصد کاهش یافته و در مقابل، پوشش برف متراکم به ۳۵/۹ درصد افزایش پیدا کرده است. این تغییرات ساختاری می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله تغییر الگوی بارش‌های زمستانی، افزایش دمای ژانویه و تغییر در توزیع مکانی بارش‌های برفی باشد. از دیدگاه هیدرولوژیکی، این تغییرات می‌تواند بر ضخامت لایه برف، زمان ذوب و در نهایت میزان آب قابل دسترس در فصل بهار تأثیر مستقیم بگذارد. کاهش تدریجی پوشش برف کامل و افزایش پوشش برف در طبقات میانی نشان‌دهنده تغییر در شرایط اقلیمی منطقه است که نیاز به مطالعات تکمیلی برای شناسایی دقیق عوامل مؤثر و پیش‌بینی روندهای آتی دارد.

فوریه: نتایج بررسی داده‌های پوشش برف ماه فوریه در کوهستان سبلان از ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ (شکل ۳) نشان می‌دهد که الگوی توزیع برف در این ماه همانند ژانویه چوله به راست بوده و نیز نوسان قابل توجهی دارد. در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ بیشترین پوشش برف کامل (طبقه ۹۰-۱۰۰٪) با مقادیر بالای ۹۶٪ مشاهده شده است. در مقابل، ۲۰۰۲ و سال

پوشش برف کامل کم‌برف‌ترین سال‌های دو دهه اخیر هستند.

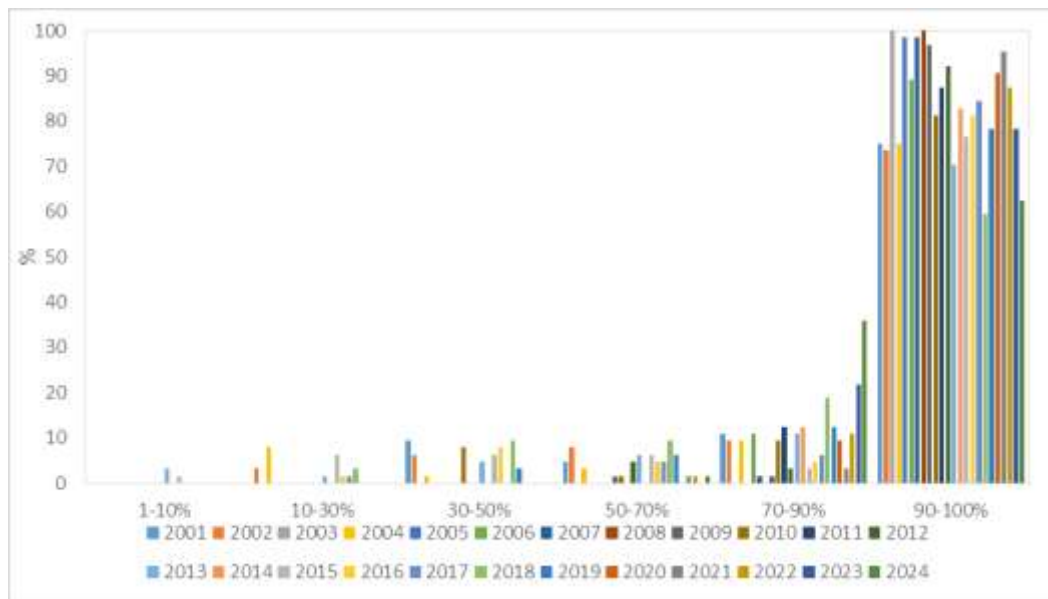
تحلیل ساختار توزیع برف نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، سهم طبقات میانی برف (۷۰-۳۰٪) افزایش یافته است. به ویژه سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳ با ۲۱/۰٪ و ۹/۴٪ در طبقه ۳۰-۵۰٪ بیشترین سهم را در این طبقه داشته‌اند. این تغییرات ساختاری می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر افزایش دمای اوایل بهار بر روند ذوب برف باشد. از دیدگاه هیدرولوژیکی، تغییرات مشاهده‌شده در پوشش برف مارس می‌تواند پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب داشته باشد. کاهش پوشش برف کامل و افزایش سهم طبقات میانی ممکن است منجر به تغییر در زمان و میزان ذوب برف شود که بر الگوی رواناب بهاره تأثیر مستقیم می‌گذارد.

آوریل: بررسی داده‌های پوشش برف ماه آوریل (شکل ۵) نشان می‌دهد که الگوی توزیع برف در این ماه نسبت به ماه‌های سرد سال تغییرات محسوسی دارد. در طول دوره ۲۵ ساله مورد مطالعه، پوشش برف کامل (طبقه ۱۰۰-۹۰٪) به طور متوسط تنها ۲۱/۷٪ از مساحت منطقه را شامل شده است که نشان‌دهنده روند ذوب پیشرفته برف در این ماه از سال می‌باشد. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که سال ۲۰۱۹ با ۳۹٪ و سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۷ با ۳۵/۹٪ پوشش برف کامل، بیشترین میزان برف‌پوشی را در ماه آوریل تجربه کرده‌اند.

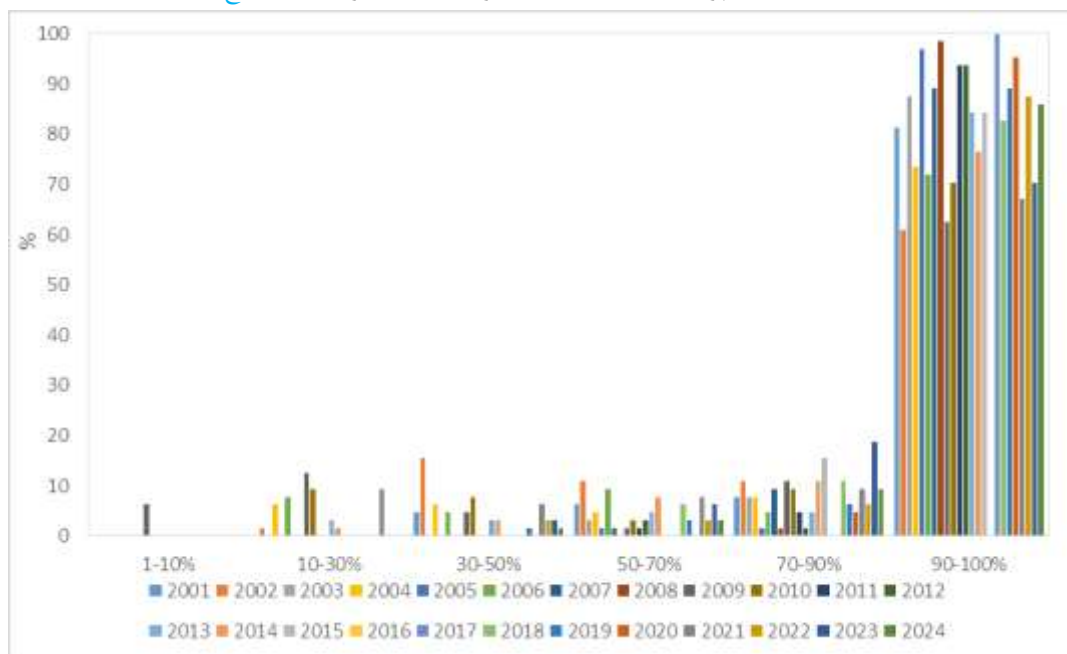
۲۰۰۹ با ۶۲/۵ درصد در طبقه ۱۰۰-۹۰ درصد کمترین میزان پوشش برف را تجربه کرده‌اند. سال ۲۰۱۶ فاقد داده پوشش برف برای فوریه بود. تحلیل روند تغییرات در طول دوره ۲۵ ساله نشان می‌دهد که میانگین پوشش برف کامل از ۷۸/۱٪ در دهه اول (۲۰۱۰-۲۰۰۱) به ۸۱/۶٪ در دهه دوم (۲۰۲۰-۲۰۱۱) افزایش یافته است. این افزایش ۳/۵ درصدی در دهه دوم عمدتاً ناشی از سال‌های پربرف مانند ۲۰۱۷ (۱۰۰٪) و ۲۰۲۰ (۹۵/۳٪) بوده است. با این حال، در سال‌های اخیر (۲۰۲۱-۲۰۲۴) میانگین پوشش برف کامل به ۷۷/۷٪ کاهش یافته که نشان‌دهنده تغییر در الگوی توزیع برف است.

بررسی تغییرات ساختاری نشان می‌دهد که سهم طبقات میانی برف (۷۰-۳۰٪) در سال‌های اخیر افزایش یافته است. به طور خاص، سال ۲۰۲۳ با ۱۸/۷٪ در طبقه ۹۰-۷۰٪ و سال ۲۰۲۱ با ۹/۳٪ در طبقه ۳۰-۱۰٪ بیشترین سهم را در این طبقات داشته‌اند. این تغییرات می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر عوامل اقلیمی مانند افزایش دما یا تغییر الگوی بارش‌ها باشد. از دیدگاه هیدرولوژیکی، تغییرات مشاهده‌شده در پوشش برف فوریه می‌تواند بر زمان و میزان ذوب برف در بهار تأثیر مستقیم بگذارد. کاهش پوشش برف کامل و افزایش سهم طبقات میانی ممکن است منجر به تغییر در الگوی رواناب و ذخیره آب شود.

مارس: تحلیل داده‌های پوشش برف مارس در کوهستان سبلان (۲۰۲۴-۲۰۰۰) نشان‌دهنده نوسان شدید در توزیع پوشش برف است (شکل ۴). نمودار درصد پوشش برفی طبقات از کل مساحت سبلان حاکی از آن است که سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۷ با بیش از ۸۹٪ پوشش برف کامل (طبقه ۱۰۰-۹۰٪)، پربرف‌ترین سال‌ها محسوب می‌شوند. سال ۲۰۰۲ فاقد داده پوشش برف در این محصول بود. نتایج بررسی روند تغییرات نشان می‌دهد که میانگین پوشش برف کامل در دهه اول (۲۰۰۹-۲۰۰۰) حدود ۴۹٪ بوده که در دهه دوم (۲۰۱۹-۲۰۱۰) به ۵۳/۱٪ افزایش یافته است. با این حال، در سال‌های اخیر (۲۰۲۴-۲۰۲۰) این میانگین به ۵۱٪ کاهش یافته که نشان‌دهنده تغییر در الگوی توزیع برف است. سال‌های ۲۰۰۸ با ۲۶/۵٪ و ۲۰۰۱، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۳ با ۳۲/۸٪



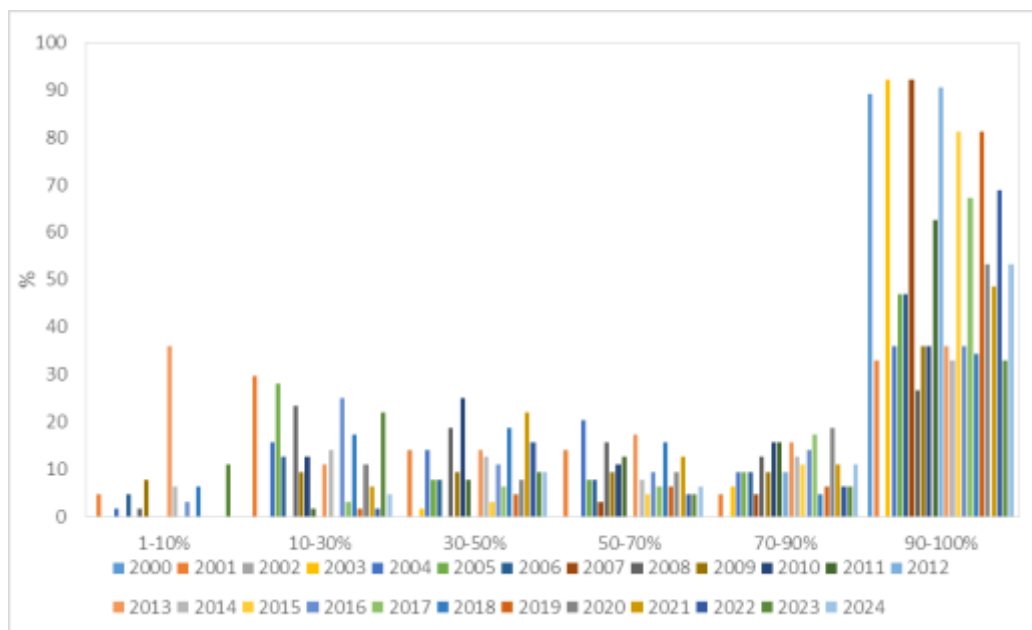
شکل ۲. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سبلان در ژانویه در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴



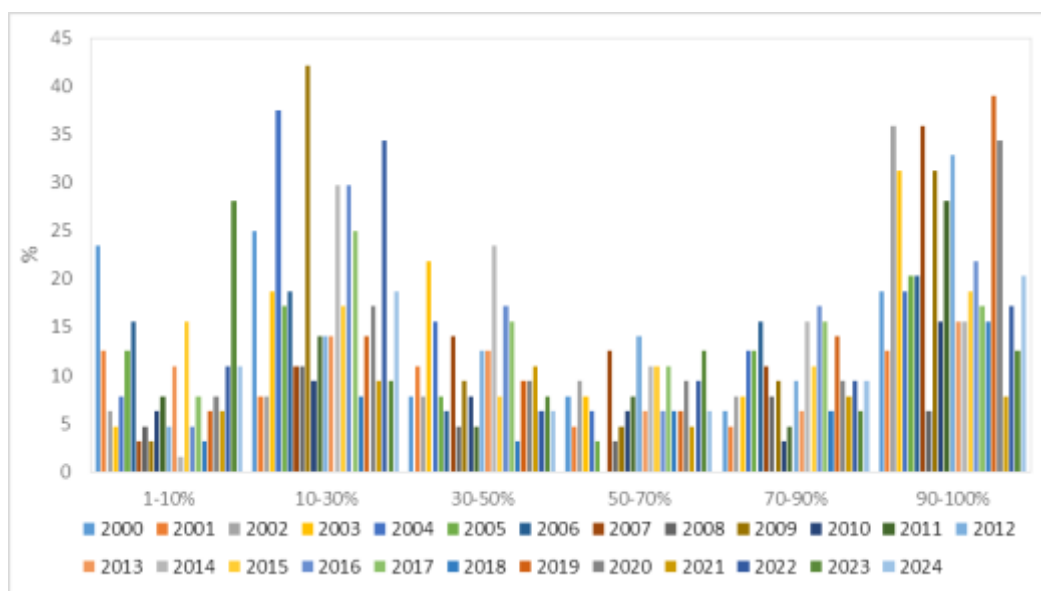
شکل ۳. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سبلان در فوریه در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

کامل در دهه اول دوره حدود ۲۱/۱٪ بوده که در دهه دوم به ۲۲/۷٪ افزایش یافته است. با این حال، در سال‌های اخیر (۲۰۲۰-۲۰۲۴) این میانگین به ۱۸/۳٪ کاهش یافته که نشان‌دهنده تسریع در روند ذوب برف در اوایل بهار است.

در مقابل، سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ با تنها ۶/۳٪ و ۷/۸٪ پوشش برف کامل، کم‌برف‌ترین سال‌ها در این ماه محسوب می‌شوند. تحلیل روند تغییرات نشان می‌دهد که میانگین پوشش برف



شکل ۴. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سبلان در مارس در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴



شکل ۵. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سبلان در آوریل در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

افزایش سهم طبقات کم برف نشان دهنده تغییر در زمان بندی ذوب برف است که می تواند بر الگوی رواناب بهاره و تأمین آب در ماه های گرم سال تأثیر بگذارد. در مجموع، داده ها نشان می دهند که پوشش برف در ماه آوریل عمدتاً در طبقات کم و متوسط (۷۰-۱٪) متمرکز است و سهم پوشش برف کامل به طور محسوسی کاهش یافته است. این تغییرات می تواند ناشی از افزایش دمای بهاره و تغییر در الگوی بارش ها باشد که نیاز

بررسی ساختار توزیع برف نشان می دهد که در ماه آوریل، سهم طبقات کم برف (دارای پوشش برفی ۳۰-۱۰٪) به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به ویژه در سال های ۲۰۰۴، ۲۰۰۹ و ۲۰۲۲، بیش از ۳۴٪ از مساحت منطقه در این طبقات قرار داشته اند. این الگو نشان دهنده پیشرفت فرآیند ذوب برف در این ماه است. از دیدگاه هیدرولوژیکی، تغییرات مشاهده شده در پوشش برف آوریل پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب دارد. کاهش تدریجی پوشش برف کامل و

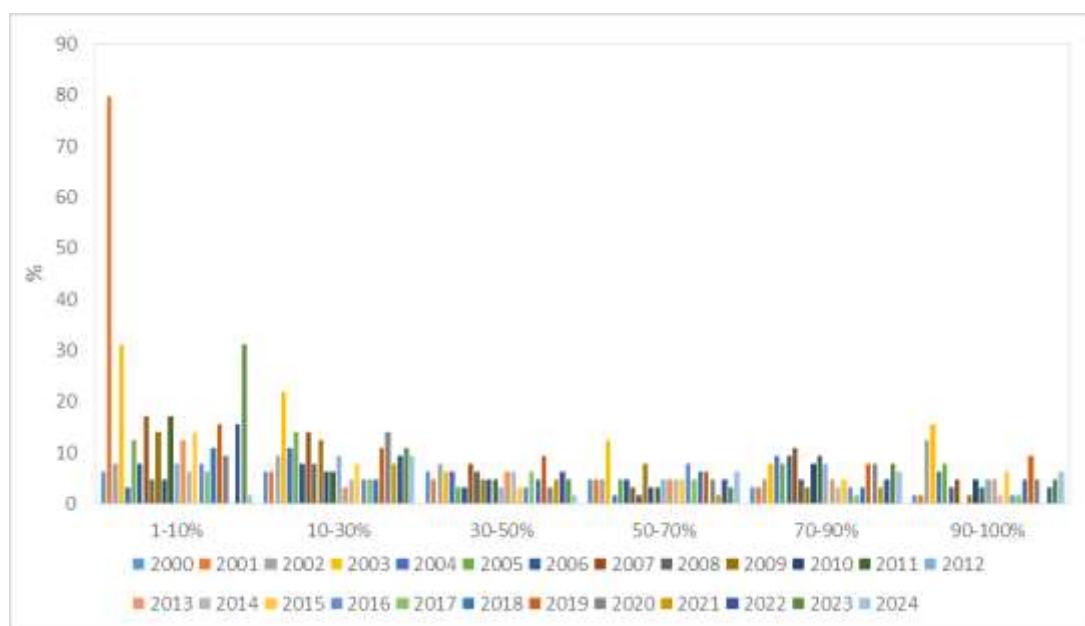
به مطالعات تکمیلی در زمینه ارتباط این تغییرات با پارامترهای اقلیمی دارد.

۴۵: بررسی داده‌های پوشش برف ماه مه در کوهستان سبلان (شکل ۶) نشان می‌دهد که در این ماه از سال، روند ذوب برف به شدت پیشرفت کرده است. نتایج تحلیل ۲۵ ساله داده‌ها حاکی از آن است که به‌طور میانگین ۵۶/۸٪ از منطقه در این ماه فاقد هرگونه پوشش برف بوده است و باقیمانده برف‌ها عمدتاً در طبقات کم‌برف متمرکز هستند. ویژگی‌های اصلی پوشش برف در ماه مه عبارت است از: سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۴، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱ با بیش از ۷۰٪ مساحت فاقد پوشش برف، بیشترین میزان ذوب را تجربه کرده‌اند. سال ۲۰۰۳ با تنها ۴/۶٪ مساحت بدون پوشش برف، استثنایی قابل توجه در این دوره محسوب می‌شود. پوشش برف کامل (۹۰-۱۰۰٪) در اکثر سال‌ها کمتر از ۵٪ بوده و تنها در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ به ترتیب به ۱۲/۵٪ و ۱۵/۶٪ رسیده است. تحلیل روند تغییرات نشان می‌دهد میانگین مساحت بدون پوشش برف از ۵۵/۶٪ در دهه اول به ۶۳/۳٪ در دهه دوم افزایش یافته است. در سال‌های اخیر (۲۰۲۴-۲۰۲۰)، این میانگین به ۶۰/۲٪ رسیده که نشان‌دهنده ثبات نسبی در روند ذوب برف است. سهم طبقات با پوشش برف کم (۱-۳۰٪) در بیشتر سال‌ها بین ۱۰-۲۰٪ نوسان داشته است.

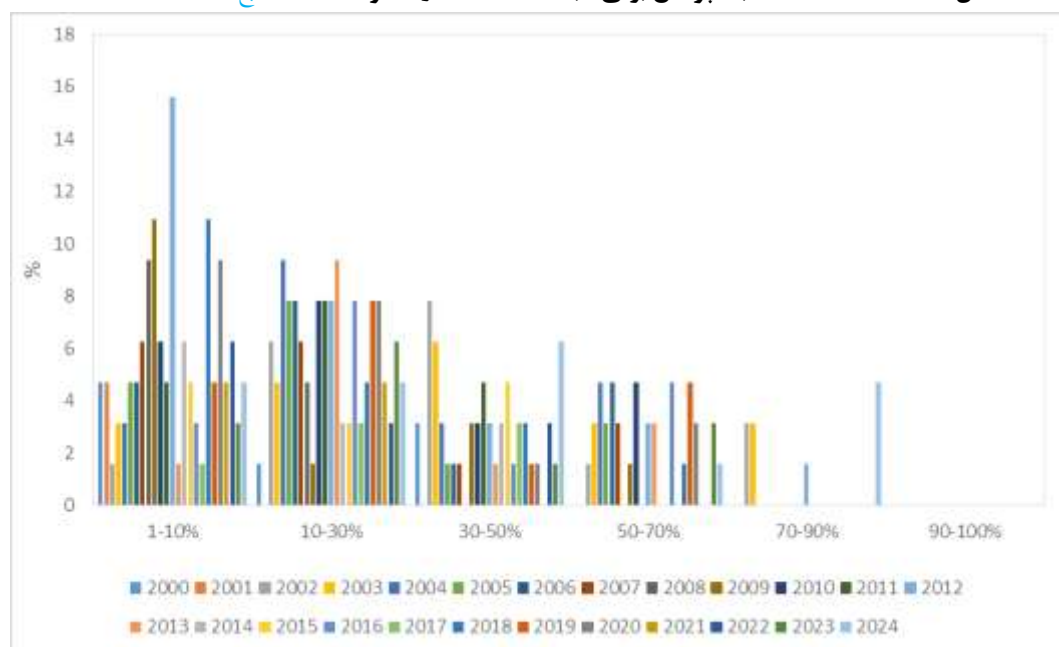
همچنین کاهش قابل توجه پوشش برف کامل نسبت به ماه‌های سرد سال، افزایش مساحت مناطق بدون پوشش برف و تمرکز باقیمانده پوشش برف در طبقات کم‌برف (۱-۳۰٪) به عنوان تغییرات ساختاری در پوشش برف ماه مه محسوب می‌شوند. ذوب گسترده برف در ماه مه از جمله پیامد هیدرولوژیکی و اقلیمی این کاهش تمرکز برف بوده و نشان‌دهنده گرمایش قابل توجه در این ماه است. کاهش شدید پوشش برف کامل

نشان می‌دهد که ذخیره برف زمستانی تا این ماه عمدتاً مصرف (ذوب) شده است. این الگو می‌تواند بر زمان‌بندی و میزان رواناب بهاره تأثیر مستقیم بگذارد، تأثیر مستقیم افزایش دمای بهاری بر روند ذوب برف را نشان می‌دهد و اهمیت مدیریت منابع آب در ماه‌های گرم سال را برجسته می‌سازد. تغییرات مشاهده‌شده نیاز به مطالعات بیشتر درباره ارتباط آن با تغییرات اقلیمی منطقه‌ای دارد.

ژوئن: مطالعه داده‌های ۲۵ ساله پوشش برف ماه ژوئن در کوهستان سبلان الگوی کاملاً مشخصی از ذوب کامل برف را نشان می‌دهد (شکل ۷). نتایج بررسی‌ها به وضوح حاکی از آن است که در این ماه از سال، فرآیند ذوب برف به مرحله نهایی خود رسیده است. در تمامی سال‌های مورد بررسی، پوشش برف کامل (طبقه ۹۰-۱۰۰٪) در ماه ژوئن به صفر درصد رسیده است که نشان‌دهنده عدم وجود مناطق با پوشش برف دائمی در این ماه می‌باشد (البته قله سبلان در حقیقت همچنان در این ماه از سال نیز دارای برف است که به دلیل مساحت کمتر آن در مقایسه با اندازه پیکسل محصول MOD10 و نیز وجود پوشش ابری بر فراز آن، در حین میانگین‌گیری لحاظ نشده است). به‌طور متوسط، ۸۳٪ از مساحت منطقه در این ماه کاملاً فاقد پوشش برف بوده است و باقیمانده برف‌ها نیز عمدتاً در طبقات پایین متمرکز شده‌اند. این الگو در طول ۲۵ سال گذشته ثبات نسبی داشته است، اگرچه سال‌های خاصی مانند ۲۰۱۲ و ۲۰۲۴ انحرافات از این روند کلی نشان داده‌اند. همچنین بیشترین مساحت مناطق بدون برف در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۷ (بیش از ۹۲٪) ثبت شده است و کمترین میزان مناطق بدون برف مربوط به سال‌های ۲۰۱۲ (۶۸٪) و ۲۰۲۰ (۷۸٪) می‌باشد.



شکل ۶. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سیلان در مه در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴



شکل ۷. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سیلان در ژوئن در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

محسوب می‌شود؛ سال ۲۰۲۴ با ۴/۷٪ در طبقه ۹۰-۷۰٪، بیشترین پوشش برف باقیمانده در این ماه را طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد و در اکثر سال‌ها، پوشش برف باقیمانده عمدتاً در طبقات بسیار کم (۱۰-۱٪) و کم (۳۰-۱۰٪) متمرکز بوده است. پیامدهای هیدرولوژیکی که از الگوی ژوئن می‌توان شناسایی نمود این است که ذوب کامل برف در ماه ژوئن نشان‌دهنده پایان چرخه سالانه ذخیره برفی است؛ این الگو تأثیر مستقیم بر میزان و زمان‌بندی رواناب‌های بهاره دارد و عدم

تحلیل روند تغییرات نشان می‌دهد میانگین مناطق فاقد پوشش برف در دهه اول حدود ۸۳/۲٪ بوده که در دهه دوم به ۸۳/۶٪ افزایش یافته است. در سال‌های اخیر (۲۰۲۰-۲۰۲۴)، این میانگین به ۸۲/۴٪ رسیده که نشان‌دهنده ثبات نسبی در روند ذوب برف است. سهم مناطق با پوشش برف بسیار کم (۱۰-۱٪) در بیشتر سال‌ها بین ۴-۱۰٪ در نوسان بوده است. ویژگی‌های خاصی که این نمودار مبین آن است که سال ۲۰۱۲ با ۱۵/۶٪ در طبقه ۱۰-۱٪ استثنای قابل توجه در این دوره

وجود پوشش برف کامل در این ماه، نشان‌دهنده عدم تشکیل یخچال‌های دائمی در منطقه است.

نوامبر: بررسی داده‌های پوشش برف ماه نوامبر در کوهستان سبلان (شکل ۸) نشان می‌دهد که این ماه به عنوان آغاز فصل برف‌پوشی از الگوی خاص و البته متنوعی تبعیت می‌کند. نتایج تحلیل ۲۵ ساله داده‌ها حاکی از موجود نوسان‌های قابل توجه در توزیع پوشش برف در این ماه است. این ماه در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ با ۴۰/۶٪ و ۲۸/۱٪ پوشش برف در طبقه ۱۰۰-۹۰٪، پربرف بوده است. در مقابل، سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ با کمتر از ۳٪ پوشش برف کامل، نوامبر کم‌برف‌تر بوده است. همچنین لازم به ذکر است سال ۲۰۱۴ فاقد داده پوشش برف برای نوامبر بود. سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۲۳ با بیش از ۶۰٪ و ۳۴/۴٪ در طبقه ۱۰-۳۰٪، بیشترین سهم پوشش برف کم را داشته‌اند. سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ با بیش از ۳۰٪ در طبقه ۵۰-۳۰٪، الگوی متفاوتی از توزیع برف را نشان می‌دهند و در سال‌های اخیر (۲۰۲۳-۲۰۲۰)، پوشش برف کامل به شدت کاهش یافته و در سال ۲۰۲۳ به ۰٪ رسیده است. از جمله ویژگی‌های پوشش برفی این ماه می‌توان اشاره کرد عبارت است از اینکه این ماه در سال ۲۰۱۱ با ۹۶/۹٪ پوشش برف کامل (طبقه ۱۰۰-۹۰٪) پربرف بوده است، در بیشتر سال‌ها، پوشش برف کامل بین ۱۰-۴۰٪ در نوسان بوده است و طبقات میانی برف (۷۰-۳۰٪) در بسیاری از سال‌ها سهم قابل توجهی داشته‌اند.

تحلیل روند تغییرات نشان می‌دهد میانگین پوشش برف کامل از ۲۱/۷٪ در دهه اول به ۱۹/۴٪ در دهه دوم کاهش یافته است، در سال‌های اخیر (۲۰۲۴-۲۰۲۰)، این میانگین به ۶/۳٪ رسیده که نشان‌دهنده کاهش محسوس است و سهم طبقات با پوشش برف کم (۱-۳۰٪) در سال‌های اخیر افزایش یافته و به طور متوسط به ۴۵/۳٪ رسیده است. بررسی تغییرات ساختاری نشان‌دهنده کاهش تدریجی پوشش برف کامل در دو دهه اخیر، افزایش سهم مناطق با پوشش برف کم و متوسط و نوسانات شدید بین سالی در الگوی توزیع برف است. داده‌های ماه نوامبر نشان می‌دهد که الگوی شروع فصل برف‌پوشی در کوهستان سبلان در حال تغییر است. کاهش پوشش برف کامل

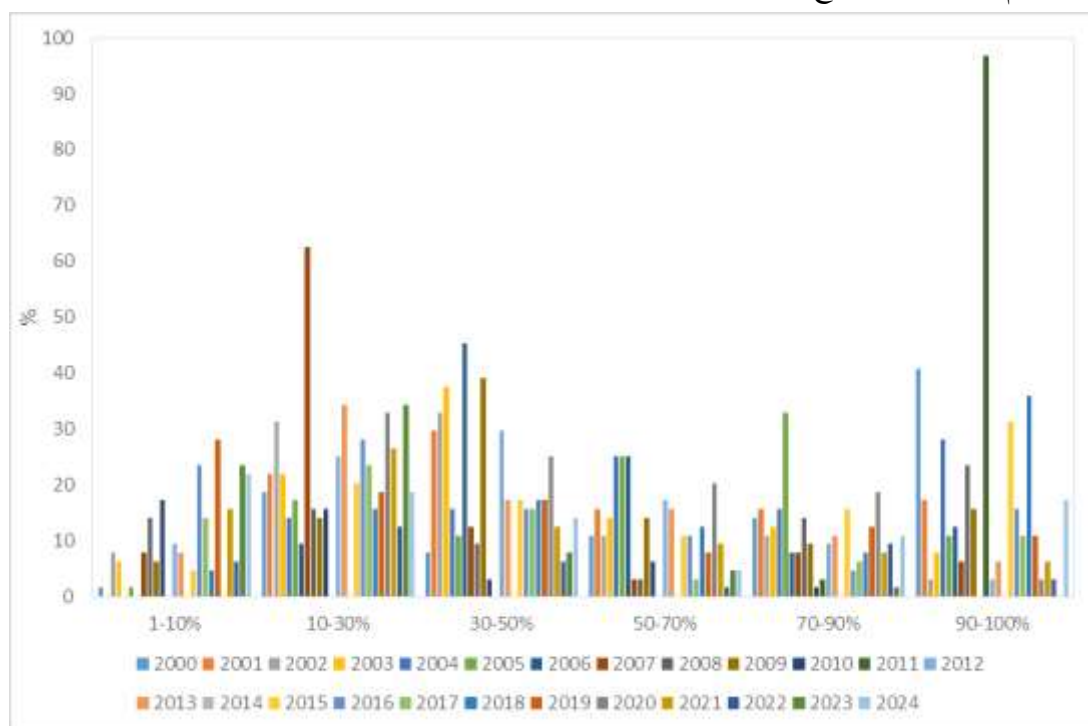
و افزایش مناطق با پوشش برف کم در سال‌های اخیر، نشان‌دهنده تأخیر در شروع بارش‌های برفی یا تغییر در نوع بارش‌هاست. این روند نیاز به مطالعات بیشتر درباره ارتباط آن با تغییرات اقلیمی و پیامدهای هیدرولوژیکی دارد. پیامدهای اقلیمی و هیدرولوژیکی این تغییرات شامل کاهش پوشش برف کامل است که خود مبین تأخیر در شروع فصل برف‌پوشی می‌باشد؛ همچنین مناطق با پوشش برف کم افزایش یافته که می‌تواند نشانه تغییر در الگوی بارش‌های پاییزی باشد و در نهایت، اینکه این تغییرات بر ذخیره برف زمستانی و در نتیجه منابع آب در ماه‌های گرم سال تأثیر مستقیم خواهد گذاشت.

دسامبر: تحلیل داده‌های درصد مساحت طبقات پوشش برف در ماه دسامبر در کوهستان سبلان طی دوره ۲۵ ساله (۲۰۲۴-۲۰۰۰) نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی در توزیع پوشش برف است (شکل ۹). نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که این ماه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۲۰ با ۱۰۰ درصد پوشش برف در طبقه ۹۰-۱۰۰ درصد، بیشترین میزان پوشش برف را داشته است. این ماه در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ فاقد داده پوشش برفی بود. بررسی سال‌های خاص نشان می‌دهد که سال ۲۰۱۰ با ۱۵ درصد مساحت در طبقه ۱-۱۰ درصد و تنها صفر درصد در طبقه ۹۰-۱۰۰ درصد، الگوی غیرعادی‌ای از توزیع پوشش برف را نشان داده است. سال ۲۰۱۰ نیز به عنوان سالی بسیار کم‌برف شناسایی شده که در آن پوششی در طبقات بالای ۷۰ درصد مشاهده نشده است. سال ۲۰۲۳ با ۲۶/۶ درصد پوشش در طبقه ۱۰-۳۰ درصد و کاهش شدید گستره طبقه ۹۰-۱۰۰ درصد به ۱۸/۸ درصد از مساحت منطقه، تغییرات چشمگیری را نسبت به سال‌های قبل نشان می‌دهد.

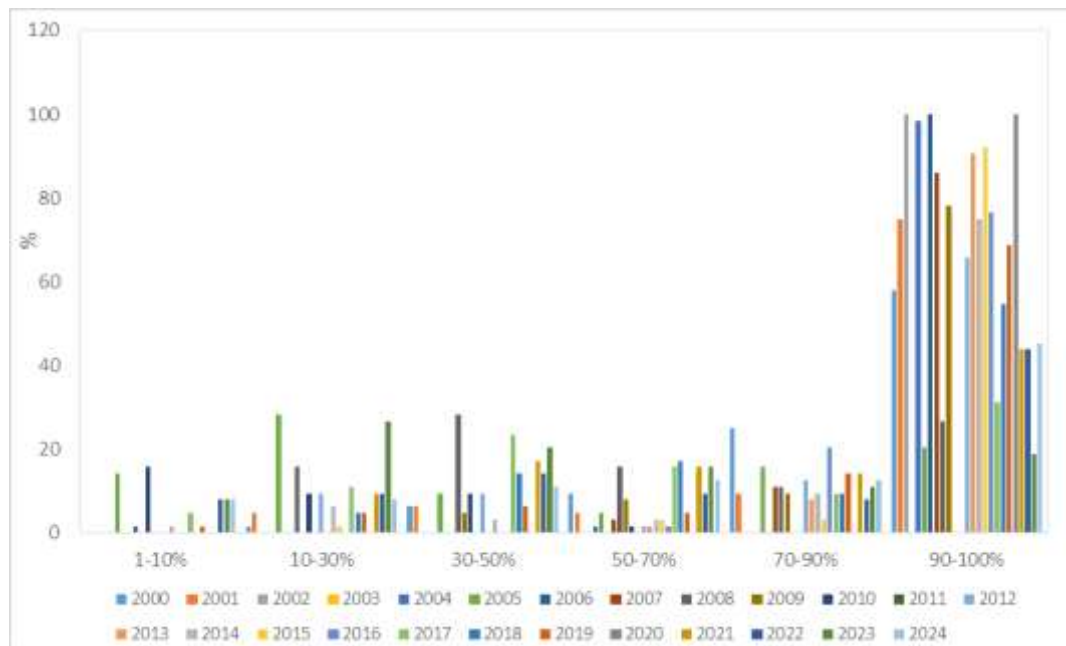
تحلیل روند تغییرات در دو دهه اخیر بیانگر کاهش تدریجی پوشش برف کامل است. میانگین پوشش برف ۹۰-۱۰۰ درصد از ۶۸/۴ درصد در دهه اول به ۵۶/۶ درصد در دهه دوم و سپس به ۵۱/۶ درصد در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۴ کاهش یافته است. این در حالی است که سهم طبقات میانی (۳۰-۷۰ درصد) از ۶/۸ درصد در دهه اول به ۱۲/۹ درصد در سال‌های اخیر افزایش پیدا کرده است. محاسبات آماری نشان می‌دهد که

محسوس در الگوی پوشش برف دسامبر در دو دهه اخیر است که کاهش ۱۶/۸ درصدی میانگین پوشش برف کامل، افزایش ۶/۱ درصدی پوشش برف متوسط و ظهور پوشش کم برف در سال‌های اخیر از مهم‌ترین نشانه‌های این تغییرات به شمار می‌روند. این یافته‌ها می‌تواند نشانه‌ای از تغییر اقلیم منطقه‌ای باشد که انجام مطالعات عمیق‌تر در این زمینه را ضروری می‌سازد.

ضریب تغییرات برای طبقه ۹۰-۱۰۰ درصد به ۵۸/۷ درصد می‌رسد که مبین وجود نوسان‌های بسیار بالاست. این تغییرات ساختاری می‌تواند پیامدهای مهمی برای سیستم هیدرولوژیکی منطقه داشته باشد. کاهش تدریجی مناطق با پوشش برف کامل و افزایش مناطق با پوشش برف متوسط، احتمالاً نشان‌دهنده تغییر در الگوی بارش‌های برفی و دمای منطقه است. ظهور مناطق کم‌برف در سال‌های اخیر که قبلاً پدیده‌ای نادر محسوب می‌شد، می‌تواند بر زمان ذوب برف و ذخیره آب در بهار تأثیر مستقیم بگذارد. در مجموع، داده‌ها حاکی از تغییر



شکل ۸. درصد مساحت ۶ طبقه پوشش برفی سبلان در نوامبر در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴



شکل ۹. درصد ۶ طبقه پوشش برفی سبلان در دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

۳.۲. تحلیل روند پوشش برف با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن (۲۰۰۰-۲۰۲۴)

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی روند تغییرات پوشش برف در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، از آزمون ناپارامتریک من-کندال برای تشخیص وجود روند و از روش شیب سن برای تعیین شدت روند استفاده شد. تحلیل در سه طبقه پوشش برف (۷۰٪-۵۰٪، ۹۰٪-۷۰٪ و ۱۰۰٪-۹۰٪) و به تفکیک ماه‌های سال انجام پذیرفت. طبق نتایج ارائه شده در جدول (۱)، در طبقه ۷۰٪-۵۰٪، اغلب ماه‌ها فاقد روند معنادار بودند. تنها در ماه نوامبر ($Z = -1.75$) یک روند کاهشی معنادار با سطح خطای ۰/۱ ($\text{Sig} = +$) مشاهده شد که با مقدار شیب سن (Q) برابر با ۰/۳۹۱- نشان‌دهنده کاهش نسبی در پوشش برف طی این ماه می‌باشد.

در طبقه ۹۰٪-۷۰٪، ماه ژانویه با مقدار آماره Z برابر با ۲/۱۷ و سطح خطای ۰/۰۵ ($\text{Sig} = *$) تنها ماه دارای روند افزایشی معنادار است. شیب سن معادل ۰/۳۹۰ برای این ماه نشان‌دهنده

افزایش تدریجی پوشش برف طی این بازه زمانی است. سایر ماه‌های این طبقه فاقد روند معنادار آماری هستند. در طبقه ۹۰٪-۷۰٪، هیچ‌یک از ماه‌ها روند معناداری نداشتند. به‌رغم مشاهده مقادیر منفی در برخی از شیب‌ها (مانند نوامبر و دسامبر)، مقادیر آماره Z پایین‌تر از آستانه معناداری بوده و نتایج نشان‌دهنده ثبات نسبی یا نوسان غیرمعنادار در این طبقه می‌باشد. در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که روندهای معنادار در پوشش برف در اغلب ماه‌ها و طبقات فرکانسی قابل مشاهده نیستند، به‌جز افزایش معنی‌دار در ژانویه در طبقه ۹۰٪-۷۰٪ و کاهش با اطمینان متوسط در نوامبر در طبقه ۷۰٪-۵۰٪. این امر می‌تواند نشان‌دهنده پایداری نسبی یا عدم وجود روند سیستماتیک در پوشش برف در اکثر ماه‌ها طی بازه زمانی مورد مطالعه باشد.

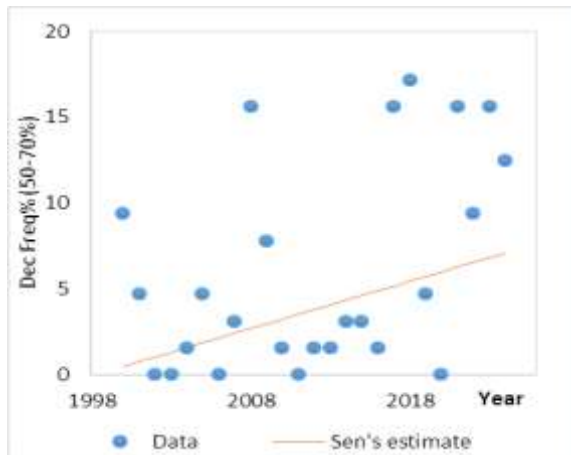
جدول ۱. خلاصه بررسی روند پوشش برف با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن (۲۰۰۰-۲۰۲۴)

درصد پوشش برف	دوره	ماه	Test Z	Significant	Q
۷۰-۵۰ %	۲۰۲۴-۲۰۰۰	ژانویه	۰/۴۶	-	۰
		فوریه	-۰/۵۸	-	۰
		مارس	-۰/۳۰	-	۰
		آوریل	۱/۰۵	-	۸/۹۴E-۰۲
		می	۰/۴۵	-	۰
		ژوئن	-۰/۲۰	-	۰
		نوامبر	-۱/۷۵	+	-۰/۳۹۱
		دسامبر	۱/۸۷	+	۰/۲۷۵
		ژانویه	۲/۱۷	*	۰/۳۹۰
فوریه		۰/۴۳	-	۰	
مارس		۱/۵۸	-	۱/۸۴E-۰۱	
آوریل		۰/۶۴	-	۳/۵۵E-۰۲	
می		-۰/۶۳	-	۰	
نوامبر		-۱/۴۳	-	-۲/۱۸E-۰۱	
دسامبر		۰/۹۵	-	۹/۴۸E-۰۲	
ژانویه		-۱/۲۲	-	-۵/۲۱E-۰۱	
فوریه		۰/۲۵	-	۱/۲۸E-۰۱	
مارس		۰/۲۸	-	۰	
۹۰-۷۰ %	آوریل	-۰/۶۸	-	-۱/۶۵E-۰۱	
	می	-۰/۲۴	-	۰	
	نوامبر	-۱/۲۷	-	-۳/۹۱E-۰۱	
	دسامبر	-۰/۷۷	-	-۸/۵۲E-۰۱	
	۱۰۰-۹۰ %				

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

تحلیل روند تغییرات پوشش برف در ماه نوامبر (طبقه ۷۰-۵۰٪): بررسی نمودار مربوط به درصد پوشش برف در ماه نوامبر برای کلاس ۷۰-۵۰٪ (شکل ۱۰) حاکی از روند نزولی پوشش برف در این ماه است. طبق نمودار مذکور، خط تخمینی شیب سن (Sen's estimate) دارای شیب منفی بوده و کاهش تدریجی درصد پوشش برف را طی بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد. این یافته با نتیجه آزمون من-کندال در جدول قبلی نیز همخوانی دارد ($Z = -1.75$ و $Q = -0.391$). با وجود نوسان داده‌ها طی دوره آماری مورد مطالعه به‌ویژه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ که پوشش برف در برخی

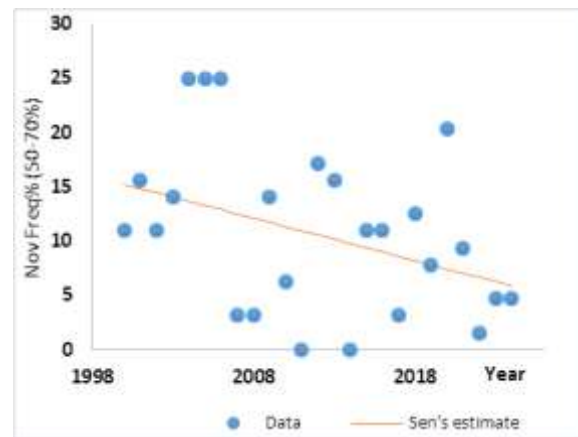
سال‌ها بالاتر بوده، در مجموع یک شیب منفی و کاهش آشکار در انتهای دوره دیده می‌شود. با توجه به نتایج آزمون من-کندال در جدول قبلی، روند کاهشی در ماه نوامبر از نظر آماری در سطح اطمینان حدودی ($\text{Sig.} = +$) معنی‌دار است. این بدان معناست که احتمال وجود روند کاهشی تصادفی کم است. طبق توضیحات ارائه شده، روند درصد پوشش برف در ماه نوامبر برای کلاس ۷۰-۵۰٪ طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ دارای روند کاهشی ملایم و نسبتاً معنادار است (شکل ۱۰). مقدار شیب منفی در خط تخمین سن و کاهش مقادیر فراوانی



شکل ۱۱. روند تغییرات پوشش برف (۵۰-۷۰ درصد) دسامبر در کوهستان سبلان طی سال‌های مورد مطالعه با روش Sen، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

تحلیل تغییر روند پوشش برف سبلان در ژانویه (طبقه ۹۰-۷۰٪): بررسی نمودار شیب سن مربوط به ماه ژانویه (طبقه ۹۰-۷۰٪) حاکی از یک روند افزایشی ضعیف و تدریجی فراوانی پوشش برف در این ماه در طبقه فرکانسی ۹۰-۷۰٪ طی بازه مورد بررسی می‌باشد (شکل ۱۲) و این افزایش با نتایج آماری در جدول قبلی نیز هماهنگ است. در این ماه آماره Z برابر ۲/۱۷ بوده که از آستانه ۱/۹۶ فراتر است و سطح معناداری ($\text{Sig.} = *$) بوده و حاکی از روند افزایشی معنادار آماری است. بنابراین روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار است. همچنین شیب خط روند (Sen's slope) مثبت و ۰/۳۹۰ است، که نشان‌دهنده افزایش کم اما پایدار درصد پوشش برف در ماه ژانویه طی دوره مورد بررسی می‌باشد، در این ماه نوسان بین سالی به وضوح مشهود است. طبق نمودار مذکور، از حدود سال ۲۰۱۵ به بعد، افزایش قابل توجهی در مقادیر فراوانی دیده می‌شود؛ به طوری که در سال‌های اخیر (به ویژه ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) پوشش برف در این طبقه به بیشترین مقدار خود رسیده است (بالای ۳۰٪). در سال‌های ابتدایی (۲۰۰۰ تا حدود ۲۰۱۰)، نوسان زیادی با مقادیر کم و نزدیک به صفر مشاهده می‌شود. اما در ادامه، داده‌ها به سمت مقادیر بالاتر میل کرده و روند پایداری در پوشش برف ظاهر می‌شود. طبق نتایج حاصل، در ماه ژانویه، در طبقه ۹۰-۷۰٪، روند افزایشی معناداری در پوشش برف طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ وجود دارد. این افزایش می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی منطقه‌ای، افزایش رطوبت هوا

در سال‌های اخیر نشان‌دهنده تأثیرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر کاهش پوشش برف در این ماه است. این روند می‌تواند پیامدهایی برای منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های وابسته به برف در این دوره زمانی به همراه داشته باشد.



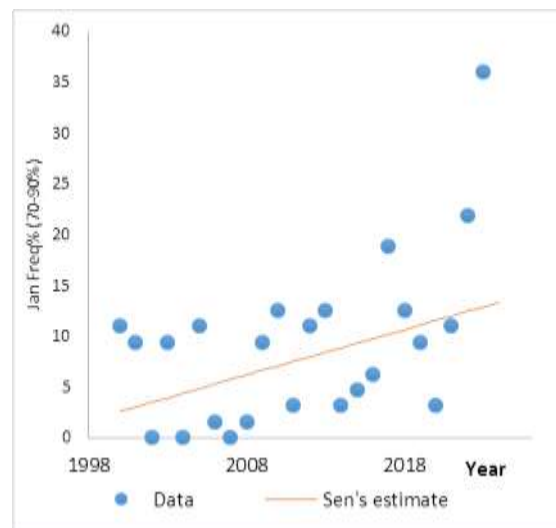
شکل ۱۰. روند تغییرات پوشش برف (۵۰-۷۰ درصد) نوامبر در کوهستان سبلان طی سال‌های مورد مطالعه با روش Sen، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

تحلیل تغییر روند پوشش برف سبلان در دسامبر (طبقه ۷۰-۵۰٪): همچنانکه در جدول (۱) و شکل (۱۱) مشهود است، در این ماه آماره Z برابر ۱/۸۷ و سطح خطای ۰/۱ ($\text{Sig.} = +$) و Q برابر ۰/۲۷۵ درصد حاکی از وجود روند افزایشی معنادار در این ماه می‌باشد. بدین معنی که به طور متوسط، پوشش برف سبلان در دسامبر، سالانه بیش از ۰/۲۷ درصد افزایش یافته است. لذا پوشش برف در دسامبر طی این بازه زمانی، روند افزایشی معناداری داشته است که این افزایش ممکن است ناشی از جابجایی زمان بارش برف به اواخر پاییز (شروع زود هنگام زمستان) باشد. این الگو می‌تواند با گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی هم‌راستا باشد که سبب تغییر در الگوهای فصلی بارش برف شده‌اند.

تا ۷۰٪) نشان‌دهنده شروع فرآیند ذوب تدریجی برف و افزایش دما است. نواحی با پوشش برف ۷۰ تا ۹۰ درصد در حال کاهش هستند. اما علی‌رغم کاهش پوشش برف، هنوز در نواحی مرتفع برف به طور قابل توجهی باقی مانده است. این دوره گذار بین فصل زمستان و بهار است، که هم‌زمان با افزایش دما و تابش خورشید است. مه و ژوئن پوشش برف به شکل قابل توجهی کاهش یافته و فقط در بلندترین ارتفاعات مرکزی سبلان باقی مانده است. بیشتر نواحی به رنگ‌های روشن تا خیلی روشن (۱۰ تا ۵۰ درصد) درآمده‌اند. در ماه ژوئن، تنها هسته مرکزی برفی با درصد پوشش حدود ۱۰٪ تا ۳۰٪ قابل مشاهده است. این دوره پایان ذوب برف است و معمولاً همراه با بیشترین رواناب ناشی از ذوب برف‌ها و نشان‌دهنده پایان فصل برفی و شروع فصل گرم است. در دو ماه نوامبر و دسامبر دوباره روند افزایش پوشش برف آغاز شده است. دسامبر پوشش برفی قابل توجهی دارد و نشانگر شروع دوره جدید بارش برف در این ماه‌هاست که در ژانویه به اوج می‌رسد.

در مجموع بررسی نقشه‌های ماهانه پوشش برف نشان داد که طی دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۲۴-۲۰۰۰)، بالاترین میزان پوشش برف در ژانویه و فوریه مشاهده می‌شود و پایین‌ترین آن در ژوئن و تابستان. این داده‌ها برای مدیریت منابع آب حوزه‌های پایین‌دست، پیش‌بینی سیلاب‌های بهاره، و ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع برفی بسیار با ارزش‌اند. پایش ماهواره‌ای مستمر می‌تواند ابزار قدرتمندی برای ارزیابی سالانه روند کاهش یا افزایش برف باشد. بر اساس تحلیل نقشه‌های ماهانه پوشش برف کوه سبلان، بیشترین پوشش برفی در ماه‌های ژانویه و فوریه مشاهده می‌شود که در این بازه زمانی بیش از ۹۰٪ سطح منطقه تحت پوشش برف قرار دارد. با افزایش دما در ماه‌های مارس تا ژوئن، روند ذوب تدریجی آغاز شده و تا اواخر بهار پوشش برف به حداقل می‌رسد. در نیمه دوم سال، با آغاز بارش‌ها و ورود جبهه‌های سرد، مجدداً افزایش پوشش برفی قابل مشاهده است، به‌ویژه در ماه دسامبر. این الگو، نقش حیاتی پوشش برف در تأمین منابع آب سطحی پوشش برف کوه سبلان در طول یک سال نشان‌دهنده وجود یک الگوی فصلی منظم و مشخص است. نتایج حاصل نشانگر

یا افزایش بارش در ماه‌های زمستانی باشد. استمرار این روند، در صورت تداوم، می‌تواند پیامدهای مثبتی برای منابع آبی و ذخیره برف در فصول سرد به همراه داشته باشد.



شکل ۱۲: روند تغییرات پوشش برف (۷۰-۹۰ درصد) ژانویه در کوهستان سبلان طی سال‌های مورد مطالعه با روش Sen، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

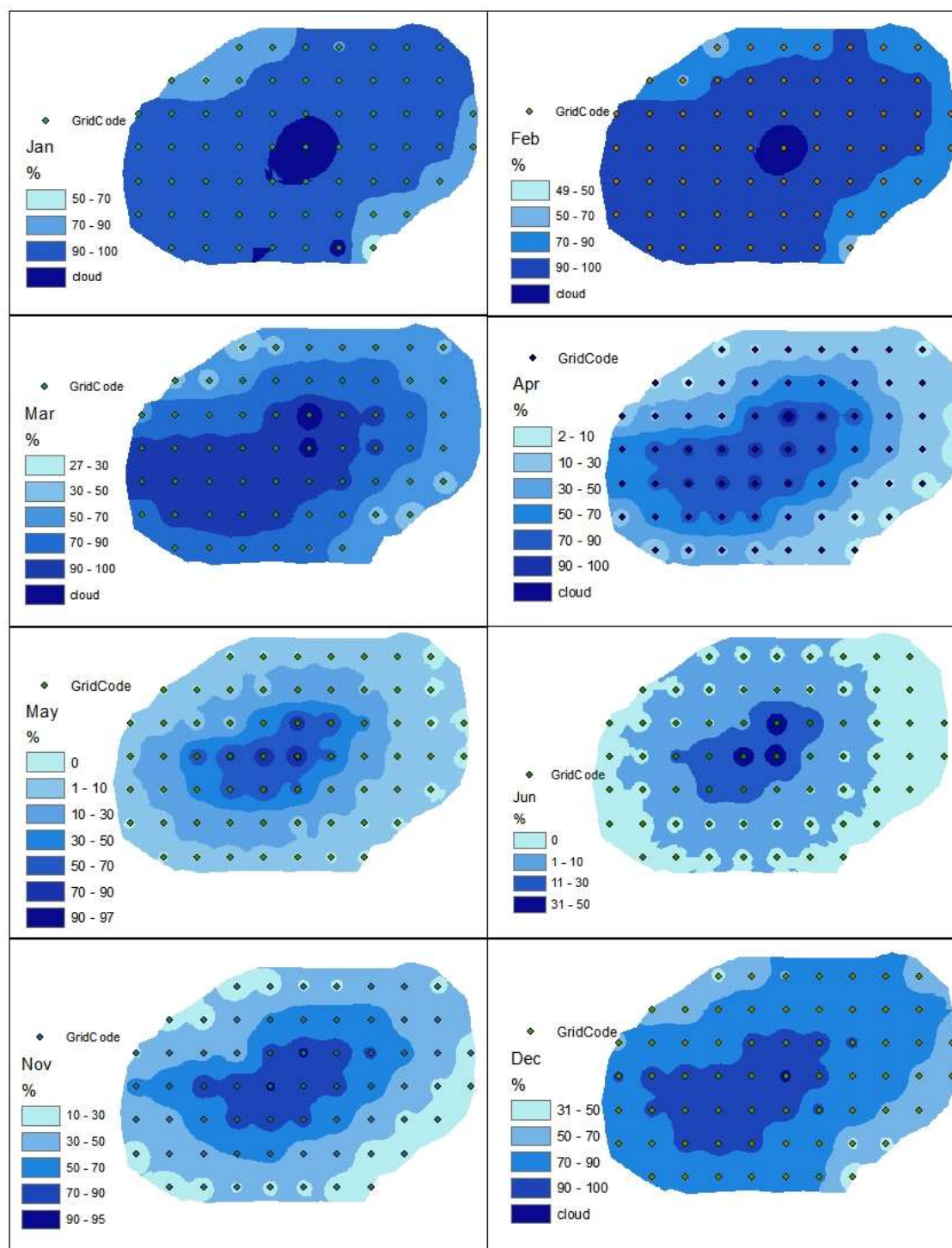
۳.۳. توزیع فضایی-زمانی پوشش برف در کوهستان سبلان

طبق نقشه‌های میانگین ماهانه پوشش برف در دوره مورد مطالعه که در شکل (۱۳) نمایش داده شده‌اند، در ماه‌های ژانویه و فوریه بیشترین درصد پوشش برف در سال مشاهده می‌شود. نواحی مرکزی تقریباً با رنگ تیره پوشیده شده‌اند، به این معنی که در این ماه‌ها پوشش برف قله سبلان و مناطق اطراف آن نزدیک به ۱۰۰٪ برف‌پوش است. رنگ تیره در مرکز نقشه‌ها نشان‌دهنده تجمع برف در ارتفاعات بالا است که با ویژگی‌های اوروگرافیک و سرمای زمستانی مطابقت زیادی دارد و حاکی از اوج انباشت برف زمستانه هستند، و از نظر هیدرولوژیکی بسیار حائز اهمیت‌اند. پایداری دمای پایین و بارش برف بالا عامل اصلی این میزان پوشش است. در ماه‌های مارس و آوریل کاهش تدریجی در پوشش برف قابل مشاهده است. حاشیه نواحی برفی با رنگ روشن‌تر (۳۰٪ و زیرزمینی منطقه را نشان می‌دهد و بر اهمیت پایش سالانه در مواجهه با تغییرات اقلیمی تأکید دارد. بررسی نقشه‌های ماهانه

هستند، که بیانگر بیشینه انباشت برف به علت دماهای پایین زمستانی است.

مرکزی سبلان باقی می ماند (کمتر از ۳۰٪). این بازه زمانی مصادف با بیشترین خروج رواناب ناشی از ذوب برف ها است. در نیمه دوم سال، از ماه نوامبر روند افزایش مجدد پوشش برف آغاز می شود و در دسامبر سطح پوشش به طور محسوسی افزایش می یابد. هرچند که این افزایش هنوز به سطح حداکثری ماه های زمستان نرسیده است.

آنست که در ماه های ژانویه و فوریه، بیشترین سطح پوشش برف در منطقه ثبت شده است. در این ماه ها، بخش عمده ای از دامنه های مرتفع سبلان با پوشش برفی بالاتر از ۹۰٪ مواجه با ورود به فصل بهار، به ویژه در ماه های مارس و آوریل، کاهش تدریجی در وسعت و درصد پوشش برفی مشاهده می شود. بخش هایی از دامنه های میانی به رنگ های روشن تر (۳۰ تا ۷۰ درصد) درآمده اند که نشان از ذوب تدریجی برف ها و افزایش تابش خورشیدی دارد. در ماه های مه و ژوئن، پوشش برف تقریباً به حداقل خود می رسد و تنها در قله و مناطق مرتفع پایش سالانه پوشش برف کوه سبلان با استفاده از داده های ماهواره ای، یک تصویر دقیق از الگوی زمانی مکانی انباشت و ذوب برف در این منطقه کوهستانی فراهم کرده است. نتایج حاکی از آن است که کوه سبلان دارای چرخه فصلی مشخصی از پوشش برف است که در راستای الگوهای اقلیمی سردسیر ارتفاعات بالاست. بیشترین انباشت برف در نیمه اول سال و بیشترین کاهش آن در فصل بهار و تابستان رخ می دهد. این الگو اهمیت حیاتی برف را به عنوان منبع ذخیره طبیعی آب برای مناطق پایین دست تأیید می کند. همچنین، داده ها بیانگر آن است که تغییرات اقلیمی بالقوه می تواند باعث کاهش مدت زمان یا شدت پوشش برفی شوند که این موضوع نیازمند پایش های طولانی مدت و دقیق تر است.



شکل ۱۳. توزیع فضایی- زمانی پوشش برف در کوهستان سبلان طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۰، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

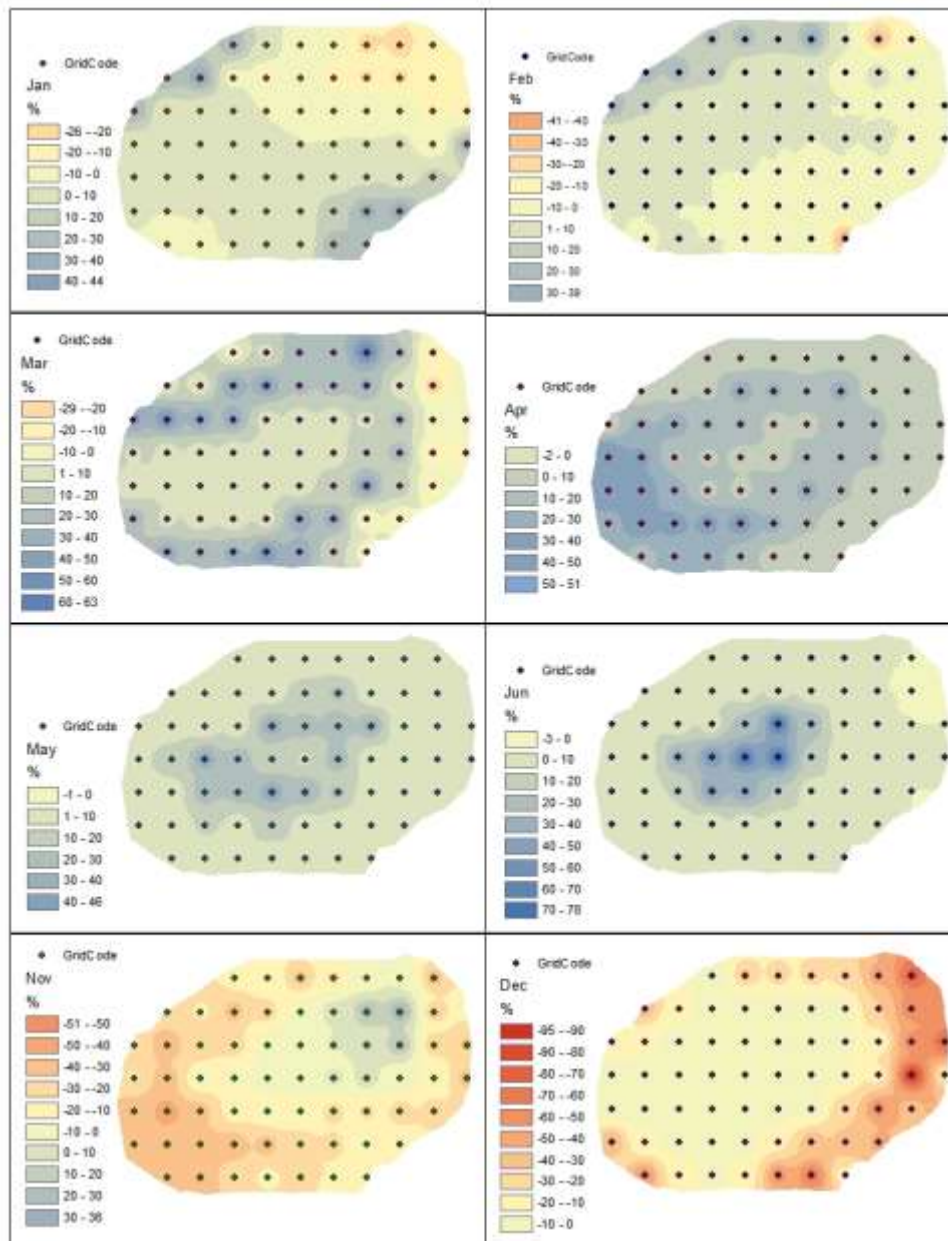
۴.۳. بررسی تغییرات ماهانه پوشش برف سبلان در طول دوره مورد مطالعه

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه پوشش برف سال ۲۰۲۴ نسبت به سال ۲۰۰۱، تغییرات چشم گیری در توزیع ماهانه پوشش برف مشاهده گردید (شکل ۱۴) که در ادامه به

تفکیک ماه تحلیل می شود. در ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه، بخش وسیعی از منطقه تحت تأثیر کاهش پوشش برف قرار گرفته است؛ به ویژه در نواحی شرقی و شمال شرقی که بیشترین شدت کاهش با رنگ های قرمز و نارنجی نشان داده شده اند. این کاهش می تواند ناشی از افزایش دمای زمستانه،

ذوب دیر هنگام برف یا تغییر در الگوی زمانی بارش‌ها باشد. در ماه آوریل نیز، افزایش پوشش برف در برخی نواحی مشاهده شده، هرچند شدت آن نسبت به مارس کمتر است. ماه مه تغییرات اندکی را نشان می‌دهد و الگوی غالب، تثبیت وضعیت پوشش برفی و پایان فصل برفی است.

کاهش بارش برف یا تأخیر در شروع دوره برفی باشد. کاهش پوشش برف در این بازه زمانی، بیانگر تغییر رژیم برفی و کوتاه‌تر شدن فصل زمستانی در منطقه سیلان است. در ماه مارس، الگوی تغییرات نشان‌دهنده افزایش قابل توجه پوشش برف در بخش عمده‌ای از منطقه است. این وضعیت با رنگ‌های آبی تیره نمایش داده شده و ممکن است بیانگر



شکل ۱۴. نقشه تغییرات ماهانه پوشش برف کوهستان سیلان طی دوره مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

است حاصل سرمای دیر هنگام بهار یا تأخیر در ذوب کامل برف‌ها باشد. در ماه نوامبر، کاهش نسبی پوشش برف در مقایسه با سال پایه مشاهده می‌شود که می‌تواند نشانه‌ای از

نتایج ماه ژوئن نیز حاکی از افزایش پوشش برف در برخی نقاط مرتفع منطقه است، که می‌تواند ناشی از ماندگاری بیشتر توده‌های برفی در ارتفاعات بالاتر باشد. این پدیده ممکن

در دسامبر افزایشی ($Z=1.87$) و ($Q=0.275$) و نیز در طبقه ۹۰-۷۰٪، ماه ژانویه افزایش معنی‌داری در پوشش برف مشاهده شده است ($Z=2.17$ و $Q=0.390$). هرچند میزان این افزایش اندک است، اما وجود یک شیب مثبت و تأیید آماری آن نشان می‌دهد که روند تغییرات برف در این منطقه نیازمند بررسی‌های بیشتر در زمینه تغییر اقلیم، الگوهای بارش و دمای در منطقه است. وجود روند کاهشی در سطوح پوشش برفی کوهستان سبلان با مطالعات سایر محققان از جمله یارنت و همکاران (2005)؛ Immerzeel et al (2010)؛ Sorg et al (2012)؛ Marty et al (2013)؛ Chen et al (2016)؛ Huss et al (2017)؛ Faraji et al (2024) که به بررسی تغییرات پوشش برف در مناطق کوهستانی پرداخته‌اند و به کاهش مساحت پوشش برفی کوهستان‌های مورد مطالعه خود اشاره کرده‌اند، همخوانی دارد.

پایش ماه به ماه پوشش برف کوه سبلان در ۲۵ سال مورد مطالعه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، یک تصویر دقیق از الگوی زمانی-مکانی انباشت و ذوب برف در این منطقه کوهستانی فراهم کرده است. نتایج حاکی از آن است که کوه سبلان دارای چرخه فصلی مشخصی از پوشش برف است که در راستای الگوهای اقلیمی سردسیر ارتفاعات بالاست. بیشترین انباشت برف در نیمه اول سال و بیشترین کاهش آن در فصل بهار و تابستان رخ می‌دهد. این الگو اهمیت حیاتی برف را به عنوان منبع ذخیره طبیعی آب برای مناطق پایین دست تأیید می‌کند. همچنین، داده‌ها بیانگر آن است که تغییرات اقلیمی بالقوه می‌توانند باعث کاهش مدت زمان یا شدت پوشش برفی شوند که این موضوع نیازمند پایش‌های طولانی مدت و دقیق تر است. در نهایت، استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌تواند ابزار مؤثری در مدیریت منابع آب، پیش‌بینی سیلاب‌های بهاری، و برنامه‌ریزی بلندمدت اقلیمی و کشاورزی در حوضه‌های آبریز وابسته به کوه سبلان باشد.

تحلیل نقشه‌های تفاضلی پوشش برف منطقه سبلان طی بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیشترین کاهش پوشش برف در

تأخیر در آغاز بارش‌های برفی باشد. این پدیده معمولاً تحت تأثیر افزایش دمای پاییزی و تغییر در زمان شروع بارش‌های زمستانه است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی درصد طبقات پوشش برفی از کل مساحت کوهستان سبلان در ۸ ماه طی ۲۵ سال (۲۰۰۰-۲۰۲۴) نشان‌دهنده روند کاهشی معنادار در پوشش برف کامل (طبقه ۹۰-۱۰۰٪) در ماه‌های سرد سال (ژانویه و دسامبر) و تسریع ذوب برف در ماه‌های گرم (آوریل تا ژوئن) است. در ژانویه، میانگین پوشش برف کامل با کاهش ۸/۵ درصدی همراه بوده، در حالی که طبقات میانی (۳۰-۷۰٪) گسترش یافته‌اند. در دسامبر نیز کاهش ۱۶/۸ درصدی پوشش برف کامل و افزایش مناطق کم‌برف مشاهده شد. ماه‌های بهاری مانند آوریل و می کاهش شدید پوشش برف کامل و افزایش مناطق فاقد برف را نشان می‌دهند، به‌طوری که در ژوئن پوشش برف کامل تقریباً به حداقل ممکن رسیده است. نوامبر نیز کاهش محسوس پوشش برف کامل و تأخیر در شروع فصل برف‌پوشی را نشان داد. این تغییرات احتمالاً ناشی از افزایش دما، تغییر الگوی بارش‌ها و ذوب زودرس برف است که پیامدهای هیدرولوژیکی مانند تغییر در زمان و میزان رواناب بهار و کاهش ذخیره آب را در پی دارد. یافته‌ها حاکی از تغییرات اقلیمی در منطقه است که نیازمند مطالعات عمیق‌تر برای مدیریت منابع آب و سازگاری با این تحولات می‌باشد.

روندپایایی تغییرات پوشش برف در سبلان طی دوره ۲۵ ساله اخیر (۲۰۰۰-۲۰۲۴) با دو آزمون من-کندال و شیب سن نشان داد که تغییرات پوشش برف در کوهستان سبلان از الگوی فصلی پیچیده‌ای پیروی می‌کند و روند پوشش برفی منطقه در پاییز کاهشی و در زمستان افزایشی است که می‌تواند به کوتاه شدن دوره بارش برف در این منطقه است. نتایج حاصل از آزمون من-کندال و شیب سن حاکی از آن است که در طبقه ۷۰-۵۰٪ پوشش برف، ماه نوامبر روند کاهشی معناداری را نشان می‌دهد ($Z=-1.75$) و ($Q=-0.391$) در حالی که

جمله بررسی ارتباط تغییرات پوشش برف با پارامترهای اقلیمی و انجام تحلیل روند بلندمدت متغیرهای اقلیمی منطقه با استفاده از داده‌های سری زمانی (۲۰۲۴-۲۰۰۰)، مطالعات دقیق‌تر درباره تأثیر این تغییرات بر منابع آب منطقه، مطالعه ارتباط این متغیر با شاخص‌های اقلیمی نظیر ENSO، NAO و AO برای تبیین مکانیسم‌های تغییرات مشاهده‌شده در منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی تأثیر تغییرات پوشش برف بر منابع آب و رواناب‌های منطقه توسعه سیستم‌های پایش مستمر برای پیش‌بینی بهتر روندهای آتی. و در مجموع، با توجه به یافته‌های این پژوهش و تطبیق آن با مطالعات دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات پوشش برف در کوهستان سبلان تحت تأثیر عوامل اقلیمی و توپوگرافیک قرار دارد. این تغییرات می‌تواند پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های محیطی داشته باشد. ادامه پایش این تغییرات با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای درک بهتر روندهای بلندمدت ضروری است.

۵. محدودیت‌های پژوهش

در روند شکل‌گیری این تحقیق، مشکل و محدودیت خاصی وجود نداشت.

ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه رخ داده است که می‌تواند به عنوان شاخصی از گرمایش زمستانه و کاهش بارش برفی تعبیر شود. در مقابل، افزایش پوشش برف در ماه مارس و تا حدودی ژوئن قابل توجه است که حاکی از تغییر در زمان‌بندی ذوب برف یا تغییر فاز بارش‌ها به سمت دوره‌های دیرتر سال می‌باشد. این الگوها به صورت کلی بیانگر تغییر در زمان‌بندی و شدت دوره‌های برفی در منطقه بوده و با شواهد جهانی از تغییر اقلیم هم‌راستا هستند.

پوشش برفی کوهستان‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تغییر اقلیم شناخته می‌شود. این مطالعه نشان داد که تغییر اقلیم در دهه‌های گذشته تأثیرات قابل توجهی بر پوشش برفی کوهستان سبلان داشته است. کاهش پوشش برفی و تغییرات در الگوهای بارش و دما، چالش‌های جدی برای مدیریت منابع آب و اکوسیستم‌های منطقه ایجاد خواهد نمود. کاهش پوشش برفی سبلان پیامدهای جدی برای منابع آب منطقه دارد، زیرا ذوب برف‌های این کوهستان منبع اصلی آب رودخانه‌ها و آبخوان‌های منطقه است. این تغییرات همچنین بر اکوسیستم‌های کوهستانی، کشاورزی و جوامع محلی تأثیر منفی می‌گذارد. مطالعات مشابه در دیگر مناطق کوهستانی جهان نیز نشان داده‌اند که تغییر اقلیم به‌طور فزاینده‌ای بر پوشش برفی تأثیر می‌گذارد (IPCC, 2021). این مطالعه نشان می‌دهد که تغییر اقلیم به‌میزان زیادی بر مناطق کوهستانی تأثیر می‌گذارد و این یافته همسو با نتایج پژوهش Barnett et al (2005)؛ Immerzeel et al (2010)؛ Sorg et al (2012)؛ Marty et al (2013)؛ Huss et al (2015)؛ Chen et al (2016)؛ López-Moreno et al (2021)؛ Liu et al (2021)؛ Zhang et al (2021) و Faraji et al (2024) است. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به توسعه راهکارهای مدیریتی پایدار و اقدامات فوری و سیاست‌گذاری برای سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات آن وجود دارد. این یافته‌ها اهمیت پایش مستمر پوشش برف و بررسی ارتباط آن با پارامترهای اقلیمی را برای مدیریت بهینه منابع آب برجسته می‌سازد. در همین راستا چند پیشنهاد ارائه می‌شود از

References

- Alonso-González, E., López-Moreno, J. I., Navarro-Serrano, F., Sanmiguel-Valladolid, A., Aznárez-Balta, M. & Revuelto, J. (2020). Snowpack sensitivity to Temperature, precipitation, and solar radiation variability over an elevational gradient in the Iberian mountains, *Atmospheric Research*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104973>
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309. <http://dx.doi.org/10.1038/nature04141>
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., et al. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759-794. <http://dx.doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Chen, Y., Li, W., Deng, H., Fang, G. & Li, Z. (2016). Changes in Central Asia's water tower: past, present, and future. *Scientific Reports*, 6(1), 35458. <http://dx.doi.org/10.1038/srep35458>
- Faraji, A., Kamangar, M. & Ashrafi, S. (2024). Spatial Analysis of Snow Cover in Western Iran Using Satellite Imagery. *Water and Soil*, Vol. 38(1), Pp. 161-173. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83893.1323> (In Persian)
- Hall, D. K. & Riggs, G. A. (2007). Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21(12), 1534-1547.
- Hall, D. K., Salomonson, V. V. & Riggs, G. A. (2016). MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid. Version 6. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- 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(5), 418-435. <http://dx.doi.org/10.1002/2016EF000514>
- Immerzeel, W. W., van Beek, L. P. H. & Bierkens, M. F. P. (2010). Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 328(5984), 1382-1385. <https://doi.org/10.1126/science.1183188>
- IPCC, (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Lakshmanan, V., Josberger, E. G., Kim, E. J., McNamara, J. P. & Barros, A. P. (2013). CREST-SAFE field campaign to support passive microwave retrieval of snow physical properties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 783-800. <https://doi.org/10.5194/hess-17-783-2013>
- Landsat Imagery, US Geological Survey. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Li, H., Wang, L., Jiang, L., Wang, W. & Wu, J. (2022). Evaluation and intercomparison of snow cover datasets in the Tianshan Mountains: ERA5, ERA5-Land, microwave remote sensing, and WRF model simulations. *International Journal of Climatology*, 42(9), 4856-4875. <https://doi.org/10.1002/joc.7459>
- Liu, Y., Lei, Y., Zhang, J., Li, X., Huang, X. & Wang, X. (2021). Spatiotemporal variations of snow cover in the Karakoram Mountains based on MODIS data from 2000 to 2019. *International Journal of Digital Earth*, 14(3), 313-328. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1869246>
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Tejeda, E. M. & Revuelto, J. (2021). Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming. *Environmental Research Letters*, 12(4), 044006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dde>
- Malinka, A., Kuklinski, A., Grzegorzczak, M., et al. (2024). Long-Term Trends in Antarctic Snow Cover and Distribution Using Remote Sensing Data. *Proceedings*, 29(1), 43. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024029043>
- Marty, C. (2013). Climate change and snow cover in the European Alps. In book: *The Impacts of Skiing and Related Winter Recreational Activities on Mountain Environments* Chapter: Climate change and snow cover in the European Alps Publisher: Bentham Editors: Ronaldo A., Rixen C. 30-44. <https://doi.org/10.2174/9781608054886113010005>
- Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M. & Lehning, M. (2017). How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, 11(1), 517-529.

- MODIS Snow Cover Data, NASA Earth Observing System. Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- Orsolini, Y., Wegmann, M., Dutra, E., Liu, B., Balsamo, G., Yang, K. & Senan, R., (2019). Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations, *The Cryosphere*, 13, 2221-2239. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2221-2019>
- Pepin, N., Bradley, R S., F Diaz, H. & Baraer, M. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424-430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Rangwala, I. & Miller, J. R. (2012). Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. *Climatic Change*, 114(3-4), 527-547. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>
- Roustaei, S., Pirnazar, M., Mousavi Kojabad, N. & Rezaei Farajabad, A. (2016). Study of the snow boundary of Sabalan Mountain using Landsat satellite images. 23rd National Geomatics Conference. (In Persian)
- Saavedra, F., Kampf, S. & Sibold, J. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *The Cryosphere*, 12, 1027-1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>
- Salahi, B., Halabian, A., Zeinali, B. & Kashani, A. 2024. Analyzing the relationship between snow cover and physiographic factors in the northwestern mountainous area of Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 195-218. 10.22034/gmpj.2024.456313.1501 (In Persian)
- Seifi, H. & Gorbani, I. (2019). Estimating snow cover trends using Object-Oriented Methods and images received from OLI and TIRS sensors (Case Study: Sahand Mountain). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(109), 77-91. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.35639> (In Persian)
- Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M. & Solomina, O. N. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10), 725-730. <https://doi.org/10.1038/nclimate1592>
- Wang, X., Zhang, Y., Li, W., Zhang, J., Huang, G. & Li, L. (2021). Spatiotemporal analysis of snow covers in the Pamir Mountains using MODIS data from 2000 to 2019. *Ecological Indicators*, 121, 107103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107103>
- Zeynali, B., Ghale, E. & Safari, S. (2021). Extraction of snow-covered area of Sabalan Mountain using Landsat satellite images by object-oriented classification method. *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(26), 97-79. <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.43548.1566> (In Persian)
- Zhang, H., Zhang, F., Che, T. & Wang, S. (2020). Comparative evaluation of VIIRS daily snow cover product with MODIS for snow detection in China based on ground observations, *Science of The Total Environment*, Pp.138-156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138156>
- Zhang, Y., Li, W., Wang, X., Yang, X. & Huang, G. (2021). Spatiotemporal variability of snow covers in the Central Tianshan Mountains based on MODIS snow products from 2000 to 2018. *Journal of Arid Land*, 13(2), 156-168. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0062-8>