

Investigating the Relationship Between Debris Flow Risk and Spatial-Temporal Changes in Glaciers Using Remote Sensing (Case Study: Sioleh and Yakhar Glaciers of Damavand Peak)

Ali Mehrabi^{1*} 

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Email: Mehrabi@uk.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-7037>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 03 August 2025 Revised: 07 October 2025 Accepted: 29 October 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Glaciers, Debris Flow, Climate Change, Mass Balance, Damavand Peak.	The retreat of glaciers due to global warming reduces the volume of ice, which leads to many catastrophic glacier-related hazards, such as debris flows and floods. Infrastructure and local communities in the Damavand region are particularly exposed to glacier-related hazards. Climate change, glacial dynamics, and geomorphology regulate the nature and frequency of debris flows. To understand this concept, two glacial basins related to the Damavand peak, where debris flows and floods have occurred frequently, were selected. In this study, the relationship between climate change, glacial dynamics, and basin geomorphological characteristics with debris flows was investigated. In this regard, SL, HI, NDSI, and Mass Balance indices were used. According to the calculated geomorphological indices, the Yakhar glacier basin can be considered to be in the mature stage, and the Sioleh glacier basin to be in the transition to the late juvenile stage in terms of geomorphological evolution. Landsat satellite imagery processing over 30 years has shown that the glaciers have retreated at an average rate of 0.484 km²/year. Both glaciers have also experienced a negative mass balance of 0.03 (m w.e a⁻¹) on average. Climatic data indicate that a period of extreme temperature increase preceding the debris flows, followed by heavy rainfall, triggered several debris flows in Mordad 1401. Glacier stability, particularly at their termini, is highly sensitive to melting rates, precipitation, temperature fluctuations, and changes in mass balance.
How to Cite: Mehrabi, A. (2026). Investigating the Relationship Between Debris Flow Risk and Spatial-Temporal Changes in Glaciers Using Remote Sensing (Case Study: Sioleh and Yakhar Glaciers of Damavand Peak). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 203-226.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.52829.2128 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Mountain environments are vulnerable to climate change, especially glaciers and permafrost in these areas is susceptible to degradation. Deglaciation and thinning of glaciers are closely related to climate change, which is closely related to several natural hazards, including landslides, floods, debris flows, moraine collapses, and slope failures. Recognizing the challenges posed by debris flows in mountainous environments; this study examines a series of debris flow events occurring in the Haraz catchment area of the Alborz Mountains. The main objective is to investigate how factors such as glacier retreat, ice volume reduction, geomorphology, and abrupt meteorological changes affect debris flow processes. By integrating meteorological data with observations of glacier dynamics and geomorphological environments, this study aims to identify the relationship between climatic factors and the frequency or intensity of debris flows. This research is particularly important for predicting future risks and informing mitigation strategies in mountain environments affected by climate change. The main objectives are: (1) to quantify glacier dynamics by analyzing changes in glacier area from satellite imagery, along with changes in surface elevation and glacier mass balance; (2) to analyze climate change trends using ERA5 data, focusing on daily precipitation and temperature changes and their effects on glacial debris flows from 1994 to 2014; and (3) to characterize geomorphic features and areas of origin and initiation of debris flows.

DATA AND METHODOLOGY

The Damavand glaciers are located in the central Alborz mountain range and are shown on a 1:50,000 scale topographic map. Damavand Peak, with an elevation of 5610 m, is located at the geographical coordinates of 52°E and 36°N in the Haraz basin (Figure 1). In recent decades, the study area has experienced numerous floods and debris flows, especially in the years 1368, 1369, 1386, 1397, 1401, 1402, and 1403. In the meantime, two important events occurred on 6 and 17 Mordad 1401, when the debris flows caused serious damage to residential areas in the Gaznak region and many villages downstream of the Sioleh and Yakhar glacial basins. To characterize the changes in the glacial area, Landsat satellite images (TM, ETM+, and OLI/TIRS) with a spatial resolution of 30 m and corresponding to the years 1373 to 1403 with minimal cloud cover ($\leq 5\%$) were used. The images were taken during the late summer melt seasons (July and August) and from the USGS Earth Explorer website (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). To calculate the height of the glaciers and the volume changes that occurred, the 30 m DEM obtained from the website (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) was used. Also, high-resolution Planet satellite images available at (<https://www.planet.com/products/satellite>) were used for temporal analysis of events before and after the debris flow.

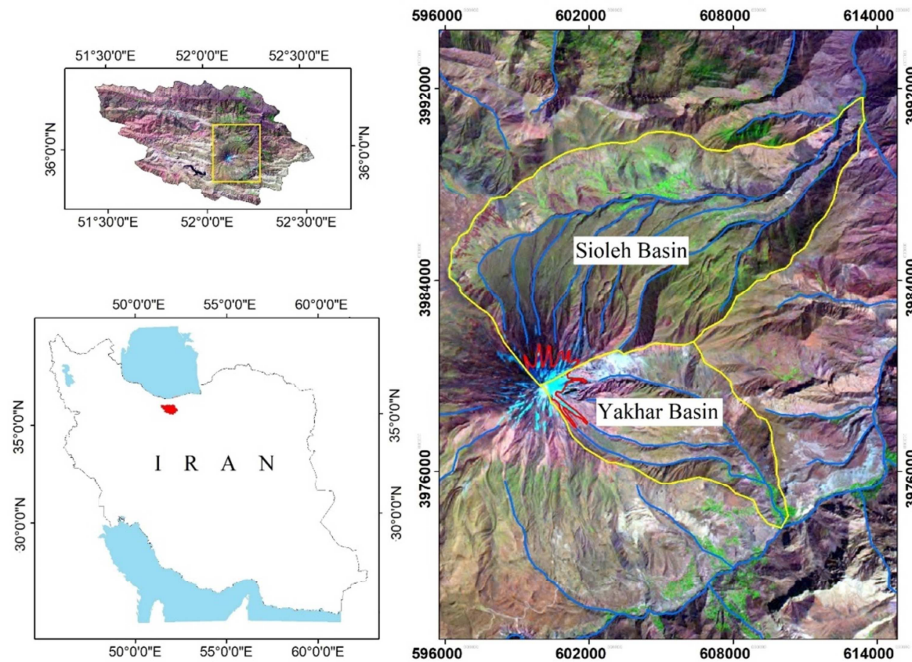


Figure 1: Map of driving factors on water use efficiency in the study area

RESULTS AND DISCUSSION

By examining Planet satellite images from before and after the debris flow event of August 1401, the source and area of the onset of glacier melting in the Yakhar and Sioleh basins were determined. In Figure 1, the general location of these areas is shown with an asterisk. As can be seen in this figure, these areas are located on the ends of the arms of these two glaciers. The slope of the land surface in the source areas is 43 degrees, and its altitude is 4350 meters. As can be seen in the images, as a result of glacier melting, cracks and fractures formed by glacial activity are exposed and provide debris-flow material for floods. These changes in surface properties, associated with glacier dynamic changes and high rates of glacier mass loss at the terminus, significantly affect glacier instability, leading to debris flows and floods. The parameters used to determine the source and initiation areas are summarized in Table 1.

Table 1: Details of parameters used to determine potential source areas and initiation areas of glacial debris flows in mountainous areas (Allen et al. 2008).

Debris flow in the Yakhar and Sioleh basins in August 1401	Glacier debris flows	Glacier lake overflow	Parameter
Water-filled crevices, cracks, and abundant, discontinuous glacial deposits	Debris accumulation in glaciers, non-consolidated materials	Lakes dammed by steep glaciers	Glacier surface features
A slope of 25 to 45 degrees is very favorable for the initiation of a debris flow.	Starting slope (25 to 38 degrees)	Excessive sediment absorption and concentration, 10-degree slope	Critical slope
The access angle is less than 10 degrees, and the exit distance is more than 10 km.	Up to 100 km	The flood can advance more than 200 kilometers and reach an angle of less than 3 degrees.	Maximum possible deviation

Based on the processing of satellite images over the Damavand glacier area, over a period of 30 years and over three 10-year periods, the area of the Sioleh and Yakhar glaciers has decreased from 3.4 km² in 1994 to 2.3 km² in 2004. The largest glacier retreat occurred between 1393 and 1403 with 67.7 percent, followed by 1373 and 1383 with 19.4 percent. The lowest retreat was observed between 1383 and 1393 with 37.3 percent. The total retreat rate for the entire study period was 14.51 percent. The average rate of retreat over these three periods was 0.484 km²/year. The glaciers in the study area experienced a constant negative mass balance from 1373 to 1403 with an average of -0.03 meters of water equivalent per year (m w.e a⁻¹). Significant changes in mass balance were observed at almost all elevations. Specifically, lower elevations experienced a larger negative mass balance (0.3 m water equivalent per year) than higher elevations (0.01 m water equivalent per year). That is, glaciers at lower elevations lost more mass, which can be attributed to higher temperatures, rapid melting, and reduced snow accumulation. However, glaciers in both basins experienced different negative mass balances that were influenced by elevation changes, bedrock characteristics, debris cover, and slope angle.

CONCLUSION

The present study demonstrates the interplay between glacier dynamic changes, geomorphology, precipitation, and temperature in guiding debris flows and floods in mountainous environments. The findings of the study showed that multiple debris flow events, accompanied by catastrophic floods in the Yakhar and Sioleh Damavand catchments, were caused by long-term changes in glacier dynamics accompanied by increased temperature and heavy precipitation. Based on this study, the following conclusion can be drawn. Over the past three decades, the aforementioned glaciers have continuously experienced negative mass balance, such that the glacial areas, especially in smaller glaciers that are more vulnerable and sensitive to climate change, have retreated significantly. Analysis of satellite images revealed significant temporal changes in glacier dynamics and their relationship with the debris flow events of Mordad 1401. Between 1393 and 1403, intensified glacial dynamics led to the exposure of the bedrock at the glacier's end, probably due to the loss of ice mass and its high melting rate. The glaciers had unstable surface features such as crevasses and cracks that may have weakened the glacier's end before it failed. The stability of glaciers, especially at the end, is very sensitive to melting rates, precipitation, temperature fluctuations, and mass balance changes. Continued retreat and loss of ice expose steep slopes and unconsolidated sediments, increasing the risk of slope failure leading to debris flows and flooding during sudden climate changes.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

REFERENCES

References [in Persian]

- Khodaeian, S., Ziaei, P., and Fakhari, S. (2010). The Geomorphology of Yakhar Glacier Using Remote Sensing Technology (Mount Damavand). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 19(74), 81-85. doi: [20.1001.1.25883860.1389.19.74.13.7](https://doi.org/10.1001.1.25883860.1389.19.74.13.7) [In Persian]
- Fakhari, S., Naderi, F., Zeyaeyan, P. (2011). Investigation of the range morphodynamic changes in the Damavand Yakhar glacier using RS and GIS. *Journal of Environmental Geology*, 17(5), 355-44. [In Persian]
- Ghorbani, A., Khosravi, A., Nourmohamadi, A. (2018). Investigating Quaternary Glacial Geomorphological Evidence at the Northeast Heights of Iran (Case Study: Binalud Mountain Ranges). *Quantitative Geomorphological Research*, 5(1), 1-13. doi: 20.1001.1.22519424.1395.5.1.1.1 [In Persian]
- Valadan Zouj, M. J., Rezaei, Y., Vaziri, F., Mobasheri, M. (2009). Investigation on Alam Chal Glacier Using Satellite Images. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 18(70), 2-13. doi: 10.22071/gsj.2009.57363 [In Persian]

References [in English]

- Ali, M., Liu, Q., Hassan, W. (2024). Two-decadal glacier changes in the Astak, a tributary catchment of the upper Indus River in northern Pakistan. *Remote Sensing*, 16(9), 1558. doi: 10.3390/rs16091558.
- Allen, S., Owens, I., Sirguey, P. (2008). Satellite remote sensing procedures for glacial terrain analyses and hazard assessment in the Aoraki Mount Cook region, New Zealand. *New Zealand J Geol Geophysics*, 51(1), 73–87. doi: 10.1080/00288300809509851.
- Bahuguna, I., Rathore, B.P., Jasrotia, A.S., (2021). Randhawa SS, Yadav SKS, Ali S, Gautam N, Poddar J, Srighyan M, Dhanade A, et al. 2021. Recent glacier area changes in the Himalaya–Karakoram and the impact of latitudinal variation. *Current Sci.*, 121(7), 929–940. doi: 10.18520/cs/v121/i7/929-940.
- Basnett, S., Kulkarni, A.V., Bolch, T. (2013). The influence of debris cover and glacial lakes on the recession of glaciers in Sikkim Himalaya, India. *J Glaciol*, 59(218), 1035–1046. doi: 10.3189/2013JoG12J184.
- Bazai, N.A., Cui, P., Carling, P.A., Wang, H., Hassan, J., Liu, D., Zhang, G., Jin, W. (2021). Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth Sci Rev.*, 212, 103432. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103432.
- Bisset, R. R., Nienow, P. W., Goldberg, D. N., Wigmore, O., Loayza-Muro, R. A., Wadham, J. L., Macdonald, M. L., Bingham, G. (2023). Using thermal UAV imagery to model distributed debris thicknesses and sub-debris melt rates on debris-covered glaciers. *J Glaciol*, 69(276), 981–996.
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kaab, A., Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosciences*, 10(9), 668–673. doi: 10.1038/NGEO2999.
- Chen, X., Chen, J., Cui, P., You, Y., Hu, K., Yang, Z., Zhang, W., Li, X., Wu, Y. (2018). Assessment of prospective hazards resulting from the 2017 earthquake at the world heritage site Jiuzhaigou Valley, Sichuan, China. *J Mt Scienses*, 15(4), 779–792. doi: 10.1007/s11629-017-4785-1.
- Deng, M., Chen, N., Liu, M. (2017). Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau. *Nat Hazards Earth Syst Scienses*, 17(3), 345–356. doi: 10.5194/nhess-17-345-2017.
- Hassan, J., Chen, X., Muhammad, S., Bazai, N.A. (2021). Rock glacier inventory, permafrost probability distribution modeling, and associated hazards in the Hunza River Basin, Western Karakoram, Pakistan. *Sci Total Environment*, 782, 146833. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146833.
- Hassan, W., Su, F., Liu, W., Hassan, J., Hassan, M., Bazai, N.A., Wang, H., Yang, Z., Ali, M., Castellanos, D.G., (2023). Impact of glacier changes and permafrost distribution on debris flows in Badswat and Shishkat catchments, Northern Pakistan. *J Mt Scienses*, 20(12), 3687–3702. doi: 10.1007/s11629-023-7894-5.
- Huebl, J., Kaitna, R. (2021). Monitoring debris-flow surges and triggering rainfall at the Lattenbach Creek, Austria. *Environ Eng Geosciences*, 27(2), 213–220. doi: 10.2113/EEG-D-20-00010.
- Huggel, C., Clague, J.J., Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf Processes Landform*, 37(1), 77–91. doi: 10.1002/esp.2223.
- Huss, M., Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Clim Change*, 8(2), 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x.
- Jiang, Y., Hu, X., Liang, H., Ning, P., Fan, X. (2023). A physically based model for the sequential evolution analysis of rainfall-induced shallow landslides in a catchment. *Water Resour Res.*, 59(5), e2022WR032716. Doi: 10.1029/2022WR032716.
- Kaab, A., Jacquemart, M., Gilbert, A., Leinss, S., Girod, L., Huggel, C., Falaschi, D., Ugalde, F., Petrakov, D., Chernomorets, S. (2021). Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? *The Cryosphere*, 15(4), 1751–1785. doi: 10.5194/tc-15-1751-2021.
- Leinss, S., Bernardini, E., Jacquemart, M., Dokukin, M. (2021). Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat Hazards Earth Syst Scienses*, 21(5), 1409–1429. doi: 10.5194/nhess-21-1409-2021.
- Pande, C., Moharir, K., Pande, R. (2021). Assessment of morphometric and hypsometric study for watershed development using spatial technology—a case study of Wardha river basin in Maharashtra, India. *Int J River Basin Management*, 19(1), 43–53. doi: 10.1080/15715124.2018.1505737.
- Pandey, V.K., Kumar, R., Singh, R., Kumar, R., Rai, S.C., Singh, R.P., Tripathi, A.K., Soni, V.K., Ali, S.N., Tamang, D. (2022). Catastrophic ice-debris flow in the Rishiganga river, Chamoli, Uttarakhand (India). *Geomat Nat Hazards Risk*, 13(1), 289–309. doi: 10.1080/19475705.2021.2023661.
- Patton, A.I., Rathburn, S.L., Capps, D.M. (2019). Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 340, 116–128. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.04.029.
- Qiu, C., Su, L., Zou, Q., Geng, X. (2022). A hybrid machine-learning model to map glacier-related debris flow susceptibility along the Gyirong Zangbo watershed under the changing climate. *Sci Total Environment*, 818, 151752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151752.

- Zhang, J., Liu, J., Li, Y., Wang, J., Chen, L., Gao, B. (2022). Effects of glacier and geomorphology on the mechanism difference of glacier-related debris flow on the South and North Banks of Parlung Zangbo River, Southeastern Tibetan Plateau. *Adv Civ Eng.*, 2022(1), 3510944. doi: 10.1155/2022/3510944.
- Zhou, Y., Li, Z., Li, J.I.A. (2017). Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH-9 images and SRTM DEM. *J Glaciol.*, 63(238), 331–342. doi: 10.1017/jog.2016.142.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

بررسی ارتباط خطر جریان‌های واریزه‌ای با تغییرات مکانی - زمانی یخچال‌ها، با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: یخچال‌های سیوله و یخار قله دماوند)

علی مهرابی^۱ 

۱. دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران (نویسنده مسئول)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-7037>

ایمیل: Mehrabi@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: یخچال‌های طبیعی، جریان واریزه‌ای، تغییرات آب‌وهوایی، تعادل جرم، قله دماوند.	عقب‌نشینی یخچال‌های طبیعی ناشی از گرم شدن کره زمین، حجم یخ را کاهش می‌دهد که منجر به بسیاری از خطرات فاجعه‌بار مرتبط با یخچال‌ها، مانند جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شود. زیرساخت‌ها و جوامع در منطقه دماوند در معرض خطرات یخچال‌های طبیعی قرار دارند. تغییرات آب‌وهوا، دینامیک یخبندان و ژئومورفولوژی، ماهیت و فرکانس جریان واریزه‌ای را تنظیم می‌کنند. برای درک این مفهوم، دو حوضه یخچالی مربوط به قله دماوند که جریان واریزه‌ای و سیل مکرر در آن رخ داده است، انتخاب شد. در این مطالعه رابطه بین تغییرات آب‌وهوا، دینامیک یخبندان و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه، با جریان‌های واریزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از شاخص‌های HI، SL، NDSI و Mass Balance استفاده شد. با توجه به شاخص‌های ژئومورفولوژیکی محاسبه‌شده، می‌توان به لحاظ تکامل ژئومورفولوژیکی، حوضه یخچال یخار را در مرحله بلوغ و حوضه یخچال سیوله را در حال گذار به مرحله اواخر جوانی، در نظر گرفت. پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست، طی یک دوره ۳۰ ساله، نشان از پسروری یخچال‌های یادشده با نرخ متوسط ۰/۴۸۴ کیلومتر مربع در سال داشته است. همچنین، هر دو یخچال تعادل جرمی منفی با میانگین ۰/۰۳ متر معادل آب در سال را تجربه کرده‌اند. داده‌های آب‌وهوایی، افزایش دمای شدید هوا قبل از جریان‌های واریزه‌ای و به‌دنبال آن بارندگی‌های شدیدی را نشان دادند که باعث وقوع چندین جریان واریزه‌ای در مرداد ماه ۱۴۰۱ شد. پایداری یخچال‌های طبیعی، به‌ویژه در بخش‌های انتهایی آن، به سرعت ذوب، بارندگی، نوسانات دما و تغییرات تعادل جرم بسیار حساس است.
استناد: مهرابی، علی. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط خطر جریان‌های واریزه‌ای با تغییرات مکانی-زمانی یخچال‌ها، با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: یخچال‌های سیوله و یخار قله دماوند). <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>. ۱۵ (۴۹)، ۲۰۳-۲۲۶	
© نویسنده / نویسندگان DOI: 10.22111/jneh.2025.52829.2128	

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان



مقدمه

محیط‌های کوهستانی در برابر تغییرات آب‌وهوایی آسیب‌پذیر هستند، به‌ویژه یخچال‌های طبیعی و یخ‌های دائمی در این مناطق به تخریب حساس هستند. یخ‌زدایی و نازک شدن یخچال‌های طبیعی با تغییرات اقلیمی مرتبط است و این امر باعث ایجاد مخاطرات طبیعی از جمله رانش زمین، سیلاب، جریان‌های واریزه‌ای، شکست سدهای یخرفتی و شکست شیب‌ها می‌شود. در این میان، جریان‌های واریزه‌ای ناشی از یخچال‌های طبیعی، پدیده‌ای مکرر و ویرانگر در مناطق کوهستانی هستند که باعث خسارت‌های اقتصادی شدید و تلفات انسانی شده و به‌طور قابل‌توجهی مانع توسعه اجتماعی و اقتصادی می‌شوند. در مناطق کوهستانی، جریان واریزه‌ای اغلب به مناطق مسکونی آسیب می‌رساند، شبکه‌های حمل و نقل را مختل می‌کند و رودخانه‌ها را مسدود می‌کند. جریان واریزه‌ای ناشی از یخچال به دلیل شکست شیب یخچال، ذوب شدن سریع یخ و برف و بارش شدید تحت تغییرات آب‌وهوا به تدریج در مناطق پیش‌بین‌دار رخ می‌دهد (Deng et al. 2017; Bazai et al. 2021).

مطالعات متعددی بر روی یخچال‌های طبیعی انجام گرفته است، از جمله ولدان زوج و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای یخچال طبیعی علم چال را مورد بررسی قرار دادند. ایشان پارامترهای هندسی یخچال نظیر وضعیت توپوگرافی کاسه یخ‌گیر، ارتفاع و تغییرات آن را طی یک دوره مطالعاتی مشخص کردند. قربانی شورستانی و همکاران (۱۳۹۷)، شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری در رشته‌کوه بینالود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش یادشده، وجود ۳۹ سیرک یخچالی را در نتیجه فعالیت یخچال‌های کواترنری نشان می‌دهد. علی و همکاران (۲۰۲۴)، تغییرات یخچال‌های طبیعی یکی از شاخه‌های رودخانه سند علیا در شمال پاکستان را طی دو دهه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تعادل جرم یخچال‌های یادشده را منفی برآورد کرده است. باهوگونا و همکاران (۲۰۲۱)، تغییرات مساحت یخچال‌های طبیعی هیمالیا را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد پایش قرار داده و کاهش ۱/۴ درصدی را طی ۱۷ سال برآورد کردند. بیست و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر حرارتی پهپاد ضخامت آواری ناشی از ذوب شدن یخچال‌های طبیعی را مدل‌سازی کردند. حسن و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر تغییرات یخچال‌های طبیعی و توزیع لایه‌های منجمد دائمی بر جریان‌های واریزه‌ای در حوضه‌های آبریز بدسوات و شیشکات، شمال پاکستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که منطقه منبع جریان واریزه در حوضه آبریز شیشکات در مجاورت یخچال سنگی با حرکت آهسته قرار دارد، درحالی‌که در حوضه آبریز بدسوات، جریان واریزه از یخرفت یخچالی سابق آغاز می‌شود. هر دو حوضه آبریز به شرایط آب‌وهوایی حساس هستند. بر روی یخچال‌های طبیعی قله دماوند مطالعات محدودی انجام گرفته است از جمله، خداییان و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی ژئومورفولوژی یخچال یخار دماوند، اشکال مورفولوژیکی مختلفی از جمله، سیرک یخچالی، زبانه یخچالی و شیارهای یخچالی را مورد شناسایی قرار دادند. فخاری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای بر روی یخچال طبیعی یخار، میزان تغییرات این یخچال را طی یک دوره ۱۲ ساله محاسبه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مساحت یخچال طی این دوره مطالعاتی کاهش یافته است.

یخچال‌های طبیعی جریان مورفولوژیکی مشخصی دارند. بنابراین، در پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی یخچال‌ها قلمرو خاصی را به خود اختصاص می‌دهند که در آنها فرایندهای رسوبی سبب تجمع و تغییر شکل یخ می‌شوند. یخچال را می‌توان نوعی سیستم رسوبی در نظر گرفت که در پاسخ به کاهش یا افزایش نیرو اجرا می‌شود و در آن ماده تجمع می‌یابد، حمل می‌شود و رسوب می‌کند. این ماده ممکن است به شکل برف، یخ یا مواد تخریبی باشد (خداییان و

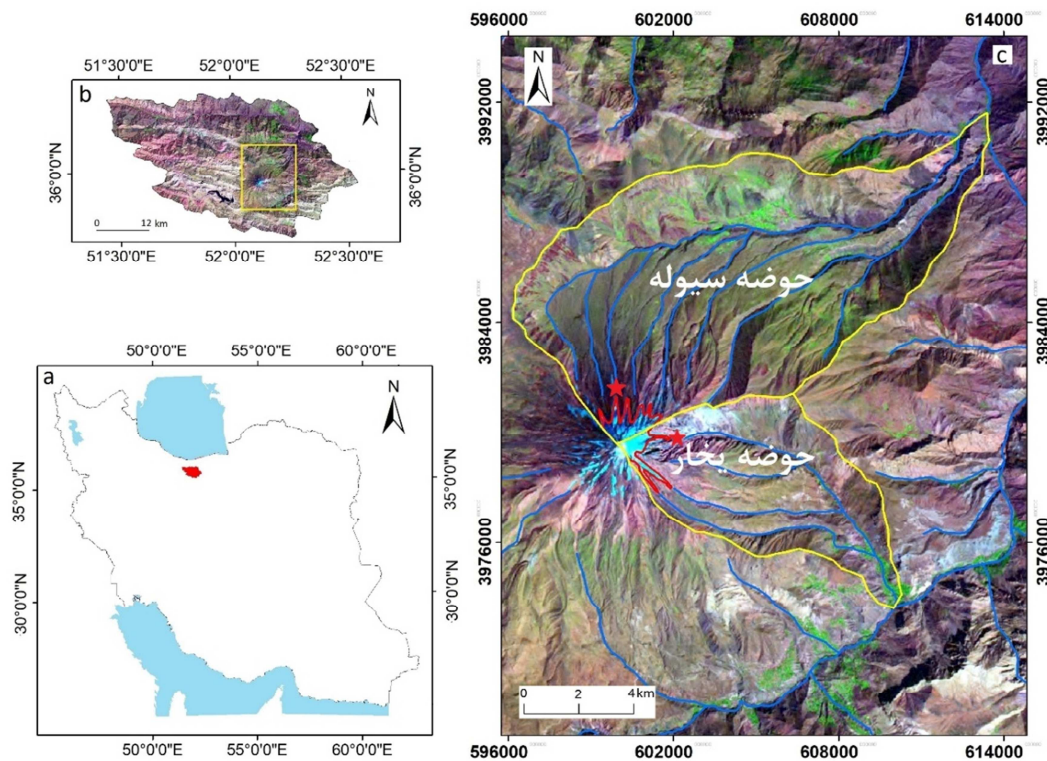
همکاران، ۱۳۸۹). جریان‌های واریزه‌ای اطراف یخچال‌های طبیعی می‌تواند با بارندگی، ذوب یخچال و طغیان دریاچه-های یخچالی ایجاد شود (Huebl and Kaitna 2021). باین‌حال، محرک‌های متعدد این رویداد، به ندرت مورد بحث قرار گرفته است؛ زیرا جریان‌های واریزه‌ای معمولاً توسط بارندگی ایجاد می‌شوند. درحالی‌که جریان واریزه‌ای مرتبط با یخچال‌های طبیعی به در دسترس بودن رسوبات، وجود یخ‌های دائمی و تغییرات در شرایط یخبندان بستگی دارد. مستندات دقیق و کمی از جریان واریزه‌ای مرتبط با یخچال‌های طبیعی کمیاب است. علاوه بر این، هنگام مطالعه عوامل محرک جریان‌های واریزه‌ای مرتبط با یخچال، دما و بارندگی معمولاً بدون فاکتور تغییرات یخچال در نظر گرفته می‌شوند (Kääb et al. 2021; Qiu et al. 2022). مکانیسم شروع جریان‌های واریزه‌ای یخچال‌های طبیعی با در نظر گرفتن عوامل اضافی مانند آب ذوب‌شده، دینامیک یخچال‌های طبیعی و سایر اثرات ناشی از افزایش دمای هوا، در مقایسه با جریان‌های واریزه‌ای که تنها توسط بارندگی ایجاد می‌شوند، پیچیدگی بیشتری پیدا می‌کند. شبیه‌سازی مکانیسم شروع جریان‌های واریزه‌ای مرتبط با یخچال‌های طبیعی، به دلیل محدودیت‌های مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های ریاضی چالش‌برانگیز است. بنابراین، تمرکز بر مطالعات موردی جریان‌های واریزه‌ای طبیعی در مناطق کوهستانی برای بهبود درک و آگاهی‌بخشی در تلاش‌های کاهش و پیشگیری ضروری است. این مطالعه با اذعان به چالش‌های ناشی از جریان‌های واریزه‌ای در محیط‌های کوهستانی، مجموعه‌ای از رویدادهای جریان واریزه‌ای که در حوضه آبریز هراز در رشته کوه البرز رخ می‌دهد را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف اصلی بررسی چگونگی تأثیر عواملی مانند عقب‌نشینی یخچال‌های طبیعی، کاهش حجم یخ، ژئومورفولوژی و تغییرات ناگهانی هواشناسی بر فرآیندهای جریان واریزه‌ای است. با وجود مطالعات متعدد، بررسی سیستماتیک نقش تغییرات اقلیمی در افزایش جریان‌های واریزه‌ای ناشی از یخچال‌ها در منطقه رشته کوه البرز همچنان محدود است. این پژوهش با ادغام داده‌های هواشناسی با مشاهدات دینامیک یخچال‌های طبیعی و محیط‌های ژئومورفولوژیکی، قصد دارد رابطه بین عوامل اقلیمی و فراوانی یا شدت جریان‌های واریزه‌ای را شناسایی کند. این پژوهش به‌ویژه برای پیش‌بینی خطرات آینده و اطلاع‌رسانی در مورد استراتژی‌های کاهش اثرات در محیط‌های کوهستانی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، اهمیت دارد. اهداف اصلی عبارتند از: (۱) تعیین کمیت دینامیک یخچال‌های طبیعی با تجزیه و تحلیل تغییرات مساحت یخچال از طریق تصاویر ماهواره‌ای همراه با تغییرات ارتفاع سطح و تعادل جرم یخچال‌های طبیعی، (۲) تجزیه و تحلیل روند تغییرات اقلیمی با استفاده از داده‌های ERA5 با تمرکز بر تغییرات روزانه بارش و دما و تأثیرات آنها بر جریان‌های واریزه‌ای یخچالی از ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳، (۳) ویژگی‌های ژئومورفیک و مناطق منشأ و شروع جریان‌های واریزه‌ای مورد توصیف قرار گیرد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

یخچال‌های کوه دماوند در بخش مرکزی رشته کوه البرز و در محدوده نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ واقع شده‌اند. قله دماوند با ارتفاع ۵۶۱۰ متر (دماوند/https://fa.wikipedia.org/wiki) در مختصات جغرافیایی ۵۲° طول شرقی و ۳۶° عرض شمالی، در حوضه آبریز هراز قرار دارد (شکل ۱). این قله که جوان‌ترین آتشفشان نیمه‌فعال ایران محسوب می‌شود، بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و... ساخته شده است. شواهد فعالیت‌های آتشفشانی کوتاه‌تری شامل گدازه‌ها، چشمه‌های آب گرم در اطراف قله قابل مشاهده هستند. رشته کوه البرز بخشی از کمربند

کوهزایی آلپ - هیمالیا است که با روند چین خوردگی شرقی - غربی و تحت فشارهای زمین‌ساختی ناشی از همگرایی صفحه عربی و صفحه اوراسیا شکل گرفته است. منطقه مورد مطالعه در ناحیه‌ای فعال از نظر زمین‌ساختی قرار دارد که ویژگی‌هایی چون دره‌های عمیق، شکستگی‌های فراوان و نرخ بالای فرسایش را نشان می‌دهد. این شرایط زمین‌ساختی، همراه با اقلیم سرد کوهستانی، منجر به توسعه فرایندهای ژئومورفولوژیک پیچیده شامل لندفرم‌های یخچالی (سیرک‌ها، زبانه‌های یخچالی، مورن‌ها) و لندفرم‌های رودخانه‌ای (آبرفت‌ها، تراس‌ها) شده است (خدایان و همکاران، ۱۳۸۹). در بخش‌های مرتفع، یخچال‌های سیوله (در شمال شرقی) و یخار (در جنوب شرقی) از مهم‌ترین یخچال‌های فعال دماوند هستند که منشأ اصلی جریان‌های واریزه‌ای و سیلاب‌های یخچالی در منطقه به‌شمار می‌روند. به‌دلیل نرخ بالای ذوب برف و یخ در تابستان و وجود نهشته‌های آواری ناپایدار، این نواحی مستعد رخداد جریان‌های واریزه‌ای، لغزش‌های دامنه‌ای و شکست سدهای مورینی هستند. از نظر زمین‌شناسی مهندسی، رخدادهای اخیر شامل سیلاب‌ها و جریان‌های واریزه‌ای طی سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۶۹، ۱۳۸۶، ۱۳۹۷، ۱۴۰۱، ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ به‌ویژه در حوضه‌های یخچالی سیوله و یخار (<https://www.tabnak.ir/fa/news/1136195>)، نشان‌دهنده ناپایداری بالای ژئومورفولوژیکی منطقه است. دو رخداد مهم در ۶ و ۱۷ مرداد ۱۴۰۱، منجر به تخریب قابل‌توجه در سکونتگاه‌های گزنک و روستاهای پایین‌دست شد (شکل ۲).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: عکس‌های میدانی از جریان‌های واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۱ از منطقه گزنک دماوند

داده‌ها

برای مشخص کردن تغییرات منطقه یخچالی، از تصاویر ماهواره‌ای لندست (TM، ETM+، و OLI/TIRS) با وضوح مکانی ۳۰ متر و مربوط به سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ استفاده شد. از آنجایی که وجود ابر و سایه باعث کاهش کیفیت شاخص‌های طیفی، پوشاندن یخچال، کاهش بازتاب و ابهام در مرز یخچال می‌شود، تصاویر با حداقل پوشش ابر ($\geq 5\%$) به کار گرفته شد. تصاویر در اواخر فصول ذوب تابستان (تیر و مرداد) و از وب سایت (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) گرفته شده است و تصحیحات اتمسفری و هندسی لازم بر روی این تصاویر انجام گرفت. برای محاسبه ارتفاع یخچال‌ها و تغییرات حجم رخ داده از ASTER DEM با تفکیک مکانی ۳۰ متر به دست آمده از وب سایت (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) استفاده شد. همچنین، از تصاویر ماهواره-ای Planet با وضوح بالا موجود در (<https://www.planet.com/products/satellite>) برای تجزیه و تحلیل زمانی رویدادهای قبل و بعد از جریان واریزه‌ای استفاده شد. به دلیل وضوح متفاوت تصاویر Planet با تصاویر لندست عملیات هم‌رزولوشن‌سازی انجام پذیرفت. پیش‌پردازش تصاویر Planet شامل تصحیحات، هندسی، رادیومتریک، اتمسفری و عملیات ماسک‌سازی است. به لحاظ هندسی، تصاویر Planet به صورت Ortho Tile ارائه می‌شوند؛ ولی اگر به صورت سین‌های خام باشند، باید عملیات Ortho-rectification بر روی آن‌ها انجام پذیرد. به لحاظ رادیومتریک، مقادیر DN به TOA Reflectance (بازتاب در بالای جو) تبدیل شد و از نظر تصحیحات اتمسفری، عملیات حذف اثر جو (رطوبت، غبار، ذرات) با استفاده از الگوریتم SMAC انجام پذیرفت. در نهایت، با استفاده از الگوریتم CloudMask اثر ابر و سایه از روی تصاویر حذف شد.

برای بررسی داده‌های آب‌وهوایی منطقه مورد مطالعه از داده‌های پلت‌فرم آب‌وهوایی ERA5 استفاده شد. داده‌های ERA5 در واقع یک آرشیو جهانی از شرایط جوی و اقلیمی گذشته تا امروز هستند که برای پژوهش در زمینه‌های هواشناسی، اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و حتی زمین‌شناسی (مثلاً یخچال‌ها و تعادل جرم) کاربرد زیادی دارند. این داده‌ها یک مجموعه داده‌ی بازتحلیل (Reanalysis) هستند که توسط مرکز ECMWF^۱ تولید می‌شوند. از سال ۱۹۴۰ تا امروز را پوشش می‌دهد. از نظر وضوح مکانی از سلول‌های با دقت حدودی ۱ کیلومتر شکل گرفته است. شامل مجموعه‌ای از داده‌ها نظیر دما، فشار، رطوبت، بارش، پوشش برف، تبخیر و تعرق، باد در سطوح مختلف جو (۱۰ متری، ۱۰۰ متری، لایه‌های فشار مختلف)، تابش خورشیدی و شارهای انرژی سطح زمین و پارامترهای اقیانوسی (دما سطح دریا و ...) می‌شود. داده‌های ERA5 اغلب به‌صورت ساعتی یا ۳ ساعتی در دسترس هستند؛ اما خیلی وقت‌ها ما می‌خواهیم نمای خلاصه‌تر مثل میانگین روزانه، ماهانه یا سالانه داشته باشیم. نحوه میانگین‌گیری این داده‌ها بر اساس سه میانگین زمانی، مکانی و وزنی انجام می‌پذیرد. همچنین به منظور صحت-سنجی، داده‌های یادشده به‌صورت دوره‌ای با مشاهدات ایستگاهی و داده‌های MERRA-2 مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در این پژوهش داده‌های دما و بارش روزانه و سالانه، از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ در اختیار قرار گرفت.

تعیین ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی

وقوع جریان‌های واریزه‌ای، ارتباط نزدیکی با مرحله تکاملی ژئومورفولوژیک حوضه دارد (می و لیزل استناد ۲۰۱۲). برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با فعالیت جریان واریزه‌ای، از شاخص‌های $(HI)^2$ و $(SL)^3$ استفاده شد. شاخص HI به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی مراحل توسعه یک ساختار ژئومورفولوژیکی استفاده می‌شود؛ درحالی‌که شاخص SL برای شناسایی تغییرات شیب و نقاط بالقوه که نشان‌دهنده ناپایداری ژئومورفیک هستند، مفید است. شاخص SL با استفاده از معادله شماره ۱ محاسبه شد. (Zhang et al. 2022).

$$SL = \frac{W}{L} \quad (1)$$

که در آن W نشان‌دهنده اختلاف ارتفاع و L نشان‌دهنده طول هر حوضه است. این شاخص رابطه بین شیب رودخانه و طول جریان رودخانه را در یک بازه مشخص اندازه‌گیری می‌کند و تغییرات شیب در طول مسیر رودخانه را نشان می‌دهد. از این شاخص، در راستای بررسی توان جریان رودخانه و میزان فرسایش استفاده می‌شود. مقادیر بالا در شاخص SL نشان‌دهنده افزایش شیب و توان بالای جریان و یا احتمال وجود موانع در مسیر رودخانه است که معمولاً با گسل‌ها، شکستگی‌ها، یا تغییرات سنگ‌شناسی مرتبط است. این شرایط می‌تواند باعث افزایش پتانسیل حمل رسوبات درشت دانه و در نتیجه ایجاد یا تقویت جریان‌های رودخانه‌ای شود. مقادیر پایین نشان‌دهنده مناطق هموارتر و بدون تغییرات ناگهانی شیب و نواحی فرسایشی آرام است.

شاخص HI نشان‌دهنده تکامل متوالی شکل‌های ژئومورفولوژی است و برای طبقه‌بندی مراحل توسعه حوزه آبخیز استفاده می‌شود. این شاخص، بینش‌هایی را در مورد وضعیت فرسایش حوضه، اثربخشی فعالیت‌های حفاظتی هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد (Pande et al. 2021). این شاخص نشان‌دهنده چگونگی توزیع ارتفاعات در یک حوزه یا

1 - European Centre for Medium Range Weather Forecasts

2 - Hypsometric Integral

3 - Stream Length-Gradient Index

سطح زمین است. به بیان ساده، این شاخص می‌گوید که چقدر از حجم منطقه بالاتر از یک ارتفاع معین قرار دارد. مقدار این شاخص هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، منطقه از شیب تندتر و حوضه مربوطه جوان‌تر محسوب می‌شود و هر چه به عدد صفر نزدیک شود، توپوگرافی هموارتر و حوضه فرسایش یافته‌تر و پیرتر است. مقدار این شاخص اگر بین ۰/۶ تا ۱ باشد حوضه جوان، بین ۰/۴ تا ۰/۶ حوضه بالغ و بین ۰ تا ۰/۴ حوضه پیر محسوب می‌شود (Pande et al. 2021).

شاخص HI با استفاده از معادله شماره ۲ محاسبه شد. (Zhang et al. 2022).

$$E = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} = HI \quad (2)$$

در اینجا، H_{mean} ، H_{max} و H_{min} به ترتیب متوسط میانگین، بالاترین و کمترین ارتفاع را در یک حوضه نشان می‌دهند. این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و SRTM DEM با وضوح ۳۰ متر محاسبه شدند. ویژگی‌های هندسی هر دو حوضه در جدول شماره ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های هندسی حوضه‌های آبخیز در منطقه مورد مطالعه

شماره	نام حوضه	مساحت حوضه (km ²)	مساحت یخچال (km ²)		طول کانال (km)	رکورد جریان آواری	ارتفاع (m)	
			۱۳۷۳	۱۴۰۳			دامنه	قله
۱	سیوله	۱۱۲/۳	۱/۹۲	۱/۶۴	۱۳/۲	۴	۱۲۰۰	۵۶۱۰
۲	یخار	۴۲/۳	۱/۱۸	۱/۰۱	۸/۴	۳	۱۶۰۰	۵۶۱۰

تخمین تغییر مساحت یخچال‌های طبیعی

برای جدایش پوشش برف و یخچال، از الگوریتم شاخص NDSI که در زیر آمده است، استفاده شد.

$$NDSI = \frac{(TM2 - TM5)}{(TM2 + TM5)} \quad (3)$$

در اینجا، TM2 نشان‌دهنده بازتاب در باند ۲ و TM5 نشان‌دهنده بازتاب در باند ۵ برای لندست ۴، ۵ و ۷ است. برای لندست ۸، از باند ۳ و ۶ به دلیل شباهت‌های آنها در خواص طیفی استفاده شد. با توجه به مطالعات گذشته و آزمایش‌های مکرر، مقدار آستانه (≤ 0.43) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای اطمینان از نتایج، مرزهای یخچالی هر حوضه از فهرست یخچال راندولف (RGI) V7.0 نیز استخراج و مقایسه شد. در نتیجه این مقایسه، دقت ۸۷ درصد و خطا ۱۲ درصد به‌دست آمد.

برآورد ارتفاع سطح یخچال و تغییرات تعادل جرم

برای تخمین تغییرات ارتفاعی سطح یخچال‌ها، از روش ژئودتیک که به‌طور گسترده در تعیین تعادل جرم یخچال‌ها به‌کار می‌رود، استفاده شد (Zhou et al. 2017). برای این منظور، مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متری استر با دقت ارتفاعی ± 16 متر به‌کار گرفته شد.

تبادل جرم یخچال طبیعی به تفاوت بین جرم افزوده (مثلاً از طریق بارش برف) و جرم ازدست‌رفته (به‌عنوان مثال از طریق ذوب) یک یخچال طبیعی در یک دوره زمانی خاص اشاره دارد. اگر جرم افزوده بیشتر از جرم ازدست‌رفته باشد، تبادل جرم مثبت است و یخچال طبیعی بزرگ می‌شود. برعکس، اگر جرم ازدست‌رفته بیشتر از جرم افزوده باشد، تبادل جرم منفی است و یخچال طبیعی کوچک می‌شود. به عبارت ساده، تبادل جرم یخچال طبیعی تعیین می‌کند که یخچال طبیعی در حال رشد است، ثابت است یا در حال عقب‌نشینی است. برای محاسبه تبادل جرمی یخچال‌ها از فرمول زیر استفاده شد (Huss and Hock 2018):

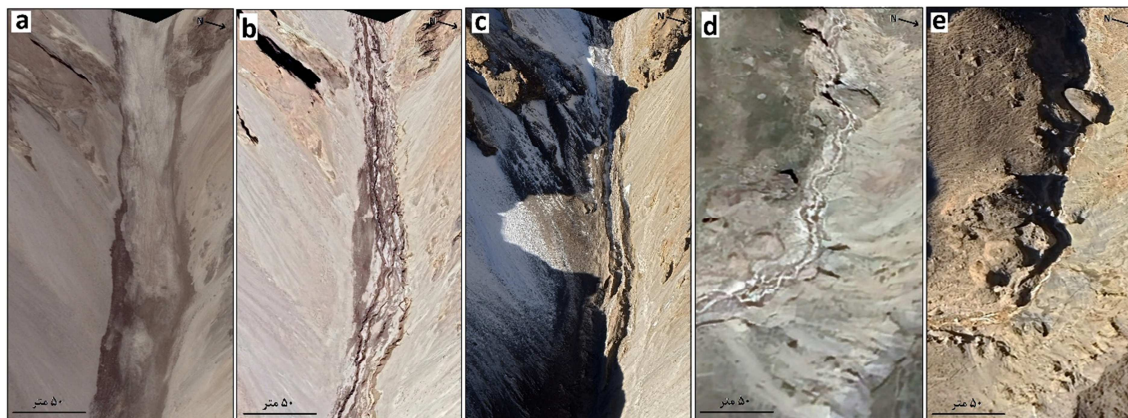
$$\text{Mass Balance (MB)} = \rho \times \Delta h / \Delta t \times A \quad (4)$$

که در آن MB بر حسب متر معادل آب در سال (m w.e a-1)، ρ چگالی یخ بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، Δh تغییر ارتفاع سطح یخچال بر حسب متر، Δt فاصله زمانی بر حسب سال و A مساحت یخچال بر حسب متر مربع است. مراحل استخراج تبادل جرم از روی DEM، به این صورت است که ابتدا DEM‌های مربوط به دوره مورد مطالعه به لحاظ هم‌اندازه، هم‌رزولوشن و هم‌مرجع فضایی بودن آماده‌سازی شده، سپس با انجام عملیات DEM differencing لایه تغییرات ارتفاع (Δh) محاسبه می‌شود. بعد از آن، با قرار دادن آن در فرمول Mass Balance، لایه تبادل جرم دوره مورد مطالعه تهیه می‌شود. همه اندازه‌گیری‌ها به‌صورت پیکسلی انجام گرفته است.

نتایج

خصوصیت‌های منبع و منطقه شروع ذوب یخچالی

از طریق بررسی تصاویر ماهواره‌ای، Planet مربوط به زمان‌های قبل و بعد از رویداد جریان‌های واریزه‌ای مردادماه ۱۴۰۱، منبع و منطقه شروع ذوب یخچال‌ها در حوضه‌های یخار و سیوله مشخص شد. در شکل شماره ۱، موقعیت کلی این مناطق با علامت ستاره نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، این مناطق بر روی انتهای بازوهای این دو یخچال قرار دارند. شکل شماره ۳ نمای بهتری از این مناطق را به تصویر کشیده است. در شکل شماره ۳، تصاویر a، b و c مربوط به یخچال یخار و تصاویر d و e مربوط به یخچال سیوله است. تصاویر a، b و d مربوط به قبل از رخداد جریان‌های واریزه‌ای و تصاویر c، e مربوط به بعد از آن است. شیب سطح زمین در مناطق منبع، ۴۳ درجه و ارتفاع آن ۴۳۵۰ متری است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در نتیجه ذوب‌شدن یخچال، شکاف‌ها و شکستگی‌های شکل‌گرفته در اثر فعالیت یخچالی، رخنمون پیدا کرده و تامین‌کننده مواد واریزه‌ای سیلاب‌ها می‌شود. این تغییرات ویژگی‌های سطحی، مرتبط با تغییرات دینامیکی یخچال‌ها و نرخ بالای از دست دادن توده یخچال‌ها در پایانه، به‌طور قابل‌توجهی بر بی‌ثباتی یخچال‌ها تأثیر می‌گذارد که منجر به جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شود. پارامترهای کلی مورد استفاده برای تعیین مناطق منبع و شروع در جدول ۲ خلاصه شده است. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش، در ستون سوم (جریان واریزه‌ای در حوضه‌های یخار و سیوله در مرداد ۱۴۰۱) لیست شده است. مناطق فعال در تغذیه مواد واریزه‌ای در هر کدام از یخچال‌ها، مساحتی در حدود ۱۰ هکتار را شامل می‌شود.



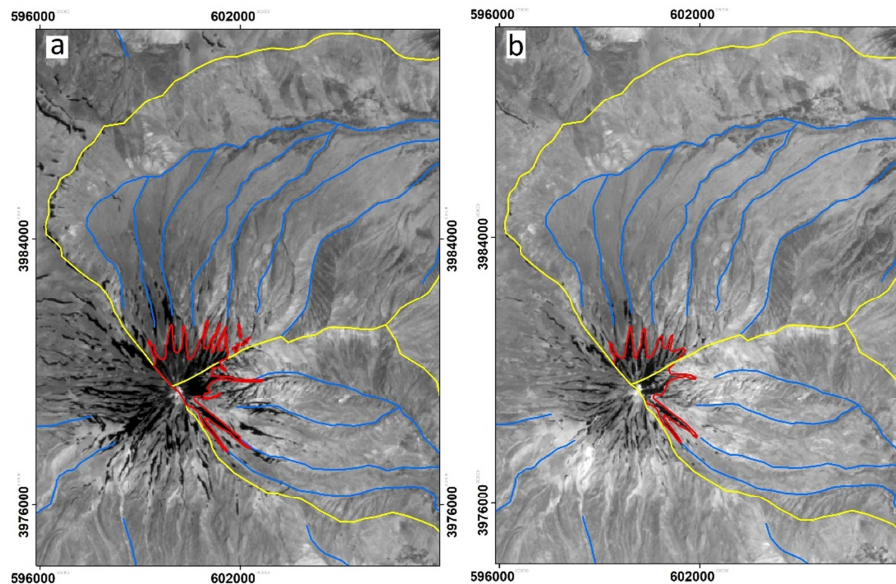
شکل ۳: سری زمانی تصاویر Planet که منبع و منطقه شروع را در حوضه یخار و سیوله قبل و بعد از رویدادهای جریان واریزه‌ای را نشان می‌دهد، (a و d) نشانگر بازوهای یخچالی، (b) نشان‌دهنده گسترش شکاف‌های پر از آب در سطح یخچال است. (c و e) از بین رفتن یخچال طبیعی و ویژگی‌های سطح بی‌ثبات را نشان می‌دهد.

جدول ۲: جزئیات پارامترهای مورد استفاده برای تعیین مناطق منبع بالقوه و مناطق شروع جریان‌های واریزه‌ای یخچالی در مناطق کوهستانی (Allen et al. 2008).

پارامتر	طغیان دریاچه یخچال‌های طبیعی	جریان‌های واریزه‌ای یخچال‌های طبیعی	جریان واریزه‌ای در حوضه‌های یخار و سیوله در مرداد ۱۴۰۱
ویژگی‌های سطح یخچال‌های طبیعی	دریاچه‌های سد شده توسط یخرفت‌های شیب‌دار	تجمع آوار در یخچال طبیعی، مواد غیر یکپارچه	شکاف‌های پر از آب، ترک‌ها و رسوبات یخچالی فراوان و غیر یکپارچه
شیب بحرانی	جذب و غلظت بیش از حد رسوب، شیب ۱۰ درجه	شیب شروع (۲۵ تا ۳۸ درجه)	شیب ۲۵ تا ۴۵ درجه برای شروع جریان واریزه بسیار مطلوب است
حداکثر انحراف احتمالی	سیلاب می‌تواند تا بیش از ۲۰۰ کیلومتر پیشروی کند و به زاویه کمتر از ۳ درجه برسد،	تا ۱۰۰ کیلومتر	زاویه دسترسی کمتر از ۱۰ درجه و مسافت خروج بیش از ۱۰ کیلومتر است

تغییر مساحت یخچال‌ها

بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست (Landsat TM/ETM+/OLI) بر روی محدوده یخچالی دماوند، در طول ۳۰ سال و طی سه دوره ۱۰ ساله، مساحت یخچال‌های سیوله و یخار از ۴/۳ کیلومتر مربع در سال ۱۳۷۳ به ۳/۲ کیلومتر مربع در سال ۱۴۰۳ تقلیل یافته است. شکل شماره ۴ عقب‌نشینی یخچال‌های یادشده را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ با نرخ‌های متغیر نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول شماره ۳ آمده است، در دوره‌های ۱۳۷۳-۱۳۸۳، ۱۳۸۳-۱۳۹۳ و ۱۳۹۳-۱۴۰۳، میزان عقب‌نشینی یخچال‌ها در کل منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۱۰، ۰/۱۳ و ۰/۲۲ کیلومتر مربع در هر دهه بود. بزرگ‌ترین میزان عقب‌نشینی یخچال‌ها، بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ با ۷/۶۷ درصد و پس از آن بین سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۳ با ۴/۱۹ درصد رخ داده است. کمترین میزان عقب‌نشینی بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ با ۳/۳۷ درصد مشاهده شد. مجموع میزان عقب‌نشینی برای کل دوره مورد مطالعه ۱۴/۵۱ درصد بود. متوسط نرخ کاهش طی این سه دوره ۰/۴۸۴ کیلومتر مربع در سال بوده است.



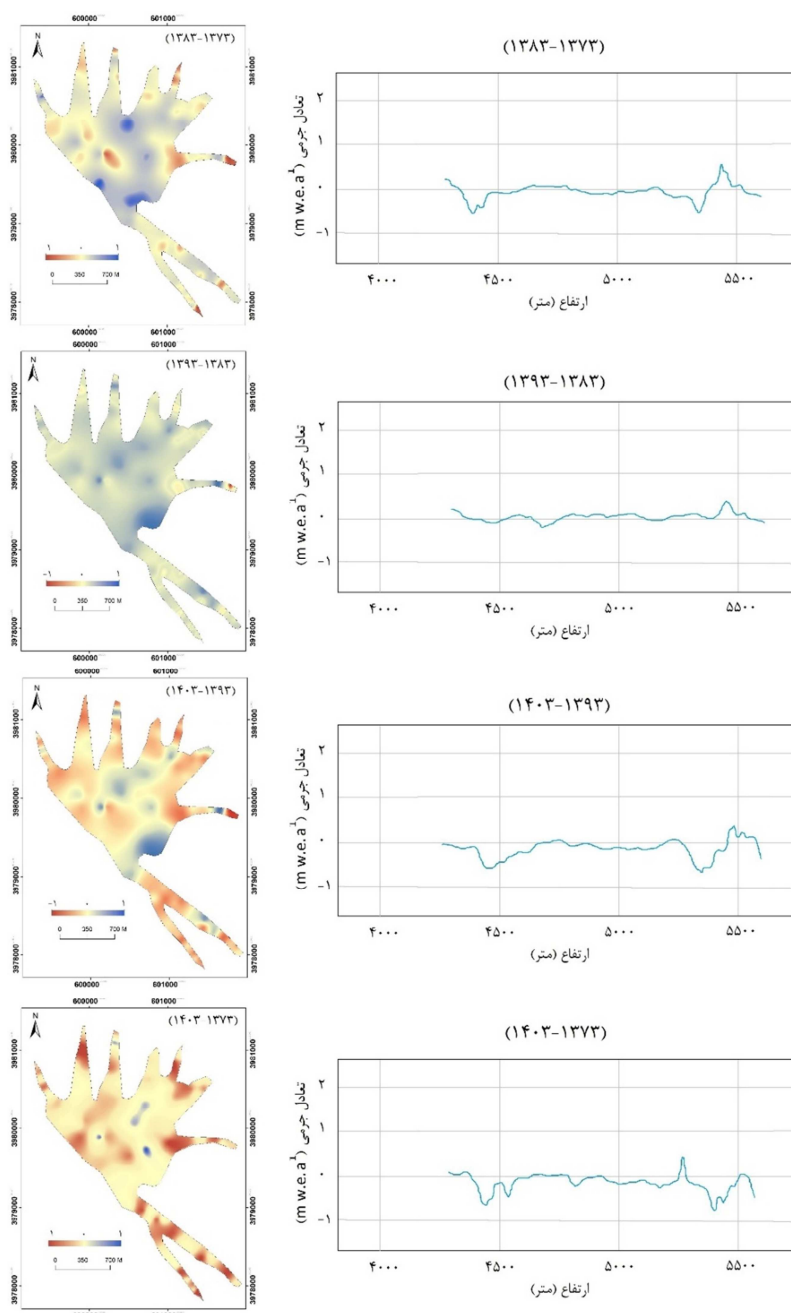
شکل ۴: تغییر وسعت یخچال‌ها طی ۳۰ سال، (a) محدوده یخچال در سال ۱۳۷۳ و (b) محدوده یخچال در سال ۱۴۰۳

جدول ۳: میزان تغییرات یخچال‌های سیوله و یخار

سال	دوره	مساحت یخچال‌ها (km ²)	میزان تغییر (km ²)	درصد تغییر (%)	متوسط نرخ تغییر (Km ² a ⁻¹)
۱۳۷۳		۳/۱۰	*	*	*
۱۳۸۳	۱۳۸۳-۱۳۷۳	۲/۹۷	-۰/۱۳	۴/۱۹	-۰/۴۱۹
۱۳۹۳	۱۳۹۳-۱۳۸۳	۲/۸۷	-۰/۱۰	۳/۳۷	-۰/۳۳۷
۱۴۰۳	۱۴۰۳-۱۳۹۳	۲/۶۵	-۰/۲۲	۷/۶۷	-۰/۷۶۷
مجموع	۱۴۰۳-۱۳۷۳	(۳/۱۰ - ۲/۶۵)	-۰/۴۵	۱۴/۵۱	-۰/۴۸۴

تخمین تعادل جرم یخچال‌ها

یخچال‌ها در منطقه مورد مطالعه، تعادل جرم منفی ثابتی را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ با میانگین $-۰/۰۳$ متر معادل آب در سال ($m \ w.e \ a^{-1}$) تجربه کرده‌اند. مقدار عدم قطعیت در تمام اندازه‌گیری‌های $\pm ۰/۰۲$ به‌دست آمد. تعادل جرم یخچال و تغییرات ارتفاع در سراسر منطقه مورد مطالعه در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. تقریباً در همه ارتفاعات، تغییرات قابل‌توجه در تعادل جرم مشاهده شد. به‌طور خاص، ارتفاعات پایین‌تر تعادل جرم منفی بیشتری ($۰/۳$ متر معادل آب در سال) نسبت به ارتفاعات بالاتر ($۰/۱$ متر معادل آب در سال) تجربه کردند. یعنی یخچال در ارتفاع پایین‌تر جرم بیشتری را از دست می‌دهد که می‌تواند به دمای بالاتر، ذوب سریع و کاهش تجمع برف نسبت داده شود. باین‌حال، یخچال‌های هر دو حوضه، توازن جرم منفی متفاوتی را تجربه کردند که تحت تاثیر تغییرات ارتفاعی، ویژگی‌های سنگ بستر، پوشش واریزه‌ای و زاویه شیب قرار دارد. یخچال‌ها در ارتفاع ۵۴۰۰ متری، تعادل جرم مثبت کمی را تجربه کرده‌اند که این ممکن است به افزایش تجمع برف در زمستان و زاویه شیب ملایم نسبت داده شود.



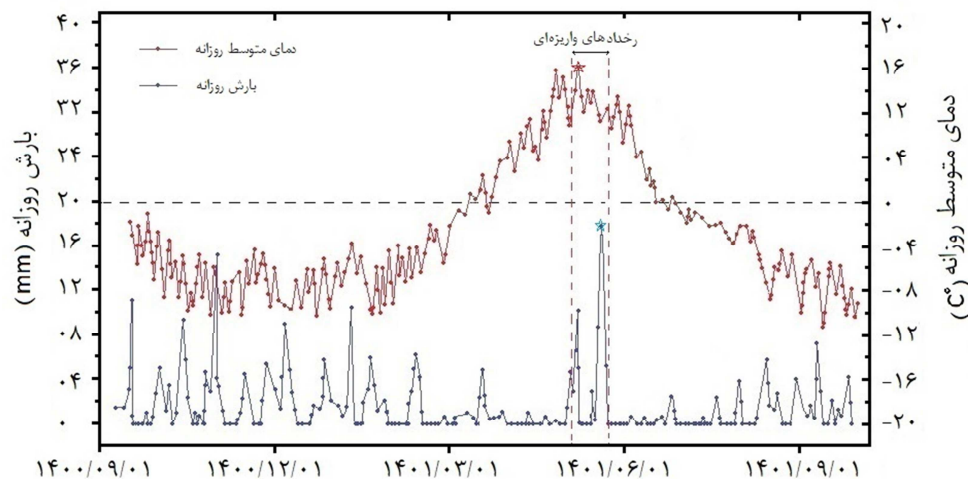
شکل ۵: کمی سازی تعادل جرم یخچال‌ها در محدوده مورد مطالعه، ستون سمت چپ توزیع فضایی وسعت یخچال و تغییرات تعادل توده یخچال را نشان می‌دهد. ستون سمت راست شامل نمودارهایی است تغییرات تعادل توده یخچال‌ها را با ارتفاع در بازه زمانی مشخص شده بین سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۴۰۳ نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل شماره ۵ مشخص است، از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳، یخچال‌ها تغییرات جزئی توازن جرم با نرخ -0.1 متر معادل آب در سال را تجربه کردند. طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ تعادل جرمی منفی‌تری با نرخ -0.1 متر معادل آب در سال رخ داده است که احتمالاً به تجمع کم بارش برف و افزایش دمای سالانه هوا نسبت داده شود. هر دو یخچال تغییرات ارتفاعی و تعادل جرمی قابل‌توجهی را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ تجربه کردند. احتمالاً می‌توان این موضوع را به اندازه

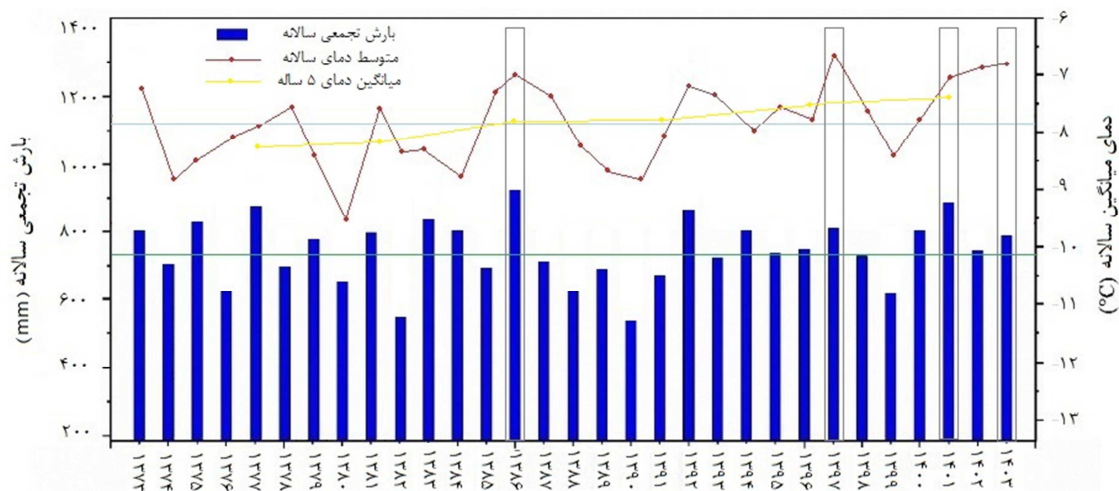
نسبتاً کوچک‌تر این یخچال‌ها نسبت داد؛ زیرا مطالعات دیگر نشان داده‌اند که یخچال‌های کوچک‌تر در حال کوچک شدن هستند و در مقایسه با یخچال‌های بزرگ‌تر کاهش جرم بیشتری را تجربه می‌کند (Basnett et al. 2013; Brun et al. 2017; Hassan et al. 2021). در نتیجه، می‌توان استدلال کرد که نرخ بالاتر از دست دادن توده یخچال‌ها در منطقه انتهایی، احتمالاً با رخنمون یافتن شیب‌های تند و رسوبات سست و افزایش ناپایداری یخچال‌ها و تغییر در رژیم حرارتی زیرسطحی یخچال، به جریان‌های واریزه‌ای در مرداد ۱۴۰۱ کمک کرده است.

تحلیل روند تغییرات آب‌وهوا

میانگین دمای تخمینی سالانه در نزدیکی منطقه یخچال از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ به میزان ۷/۸- درجه سانتیگراد بود. بالاترین میانگین دمای سالانه ثبت‌شده در سال ۱۳۹۷ به میزان ۶/۷- درجه سانتیگراد و کمترین آن ۹/۷- درجه سانتیگراد در سال ۱۳۸۰ بود (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، روند دمایی نشان‌دهنده افزایش تدریجی دمای تابستانی از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ است. در طول ماه‌های تابستان (تیر تا شهریور)، دما بالاتر از ۰ درجه سانتیگراد ثبت شد؛ درحالی‌که در بقیه سال دما زیر صفر باقی ماند. بیشترین میزان بارش سالانه در سال ۱۳۸۶ (۹۲۰ میلی‌متر) و کمترین آن در سال ۱۳۹۰ (۵۴۵ میلی‌متر) مشاهده شد. تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی ERA 5 در نزدیکی پایانه یخچال‌ها نشان داد که دمای هوا به مدت ۷۵ روز در سال ۱۴۰۱ از صفر درجه سانتیگراد فراتر رفت. همان‌طور که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است، این روزها بین اوایل تیر تا اوسط شهریور، مصادف با گرم‌ترین ماه‌های منطقه مورد مطالعه متمرکز بود. برعکس، دماها به مدت ۲۹۰ روز به زیر آستانه انجماد (صفر درجه سانتیگراد) رسید.



شکل ۶: نوسانات میانگین دما و بارندگی روزانه، قبل و بعد از رخداد‌های واریزه‌ای ۱۴۰۱



شکل ۷: نمودار بارش تجمعی سالانه و میانگین دمای سالانه در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳. رویدادهای عمده جریان واریزه‌ای، مانند رویدادهای ۱۳۸۶، ۱۳۹۷، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳ با کادر سیاه رنگ مشخص شده‌اند.

افزایش سریع دما از اواسط تیر ماه تا اوایل مرداد ماه ۱۴۰۱ مشاهده شد، به‌طوری‌که ۱۳ مرداد به‌عنوان گرم‌ترین روز (۱۶ درجه سانتیگراد) در نزدیکی یخچال ثبت شد (شکل ۶). شکل شماره ۶، افزایش شدید میانگین دمای روزانه قبل از وقایع جریان‌های واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد که احتمالاً تغییر رژیم زیرسطحی یخچال، در بی‌ثبات کردن یخچال‌های مورد مطالعه نقش داشته است. علاوه بر این، منطقه مورد مطالعه در ۱۶ مرداد ۱۴۰۱ (درست قبل از رخداد واریزه‌ای فاجعه‌بار) شاهد بارندگی شدید روزانه به میزان ۱۸ میلی‌متر بوده است. شکل شماره ۶ رابطه واضحی بین دما و الگوهای بارندگی را برجسته می‌کند. از ۱ تا ۱۶ مرداد ماه، دو بارندگی روزانه بالای ۱۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است که احتمالاً در رخداد جریان‌های واریزه‌ای مؤثر بوده است. از این‌رو، روزهای گرم و خشک طولانی احتمالاً ذوب یخچال‌های طبیعی را تسریع کرده و ویژگی‌های زیرسطحی را تغییر داده و یخچال‌های طبیعی را در دامنه‌های شیب‌دار بی‌ثبات کرده است. موج گرمای طولانی مدت، همراه با بارندگی شدید، باعث تغییر بیشتر رژیم حرارتی دامنه‌های شیب‌دار شده و این امر عاملی بر ایجاد ناپایداری‌های غیرمنتظره و تحریک جریان‌های واریزه‌ای شده است. در مورد رابطه بین داده‌های هواشناسی با تغییرات تعادل جرم یخچالی، نتایج پژوهش نشان داد که افزایش روزهای بالاتر از صفر درجه سانتیگراد می‌تواند منجر به کاهش تعادل جرمی یخچال‌ها شود. کاهش بارش سالانه ممکن است موجب کاهش ضخامت برف و بازخورد منفی بر توده یخ شود.

تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی جریان واریزه‌ای

به منظور تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌های یخچالی و ارتباط آن با جریان‌های واریزه‌ای، از دو شاخص SL و HI استفاده شد. شاخص Ke برای حوضه‌های یخار و سیوله، به ترتیب ۰/۴۳۲۷ و ۰/۳۶۱۵ به‌دست آمد. هر چه شاخص یادشده بزرگ‌تر شود، تغییرات شیب و ناپایداری‌های ژئومورفیک حوضه بیشتر است. همچنین، شاخص HI برای حوضه‌های یخار و سیوله، به ترتیب ۰/۵۰۴۲ و ۰/۵۹۷۲ محاسبه شد. هر چه شاخص یادشده بزرگ‌تر شود،

نشان از پیشرفت و توسعه ساختار ژئومورفولوژیکی حوضه است. هر چه تکامل ژئومورفیکی حوضه بالاتر باشد، توان آن برای ایجاد جریان‌های واریزه‌ای در طول بارش‌های سنگین و ذوب شدید یخچال‌های طبیعی در فصل تابستان بیشتر می‌شود. همان‌طور که در جدول شماره ۴ نشان داده شده است، به لحاظ تکامل ژئومورفولوژیکی، حوضه یخار را در مرحله بلوغ و حوضه سیوله را در حال گذار به مرحله اواخر جوانی در نظر گرفت. در حوضه سیوله، فرآیند فرسایش در طول یک دوره طولانی، چشم‌انداز را به‌صورت دامنه‌های شیب‌دار، سنگ بستر تکه‌تکه‌شده و رسوبات سست در انتهای یخچال تغییر داده است که همه این‌ها بالقوه به جریان واریزه‌ای کمک می‌کنند. وجود رسوبات سست فراوان احتمالاً حجم منبع و نرخ تغذیه کانال را تشدید کرده و به‌طور قابل‌توجهی در رویدادهای جریان واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۱ نقش داشته است.

جدول ۴: مقادیر اندیس‌های SL و HI برای حوضه‌های یخچالی مورد مطالعه

شماره	نام حوضه	اندیس (HI)	اندیس (SL)	مرحله زمین‌شناسی
۱	یخار	۰/۵۰۴۲	۰/۴۳۲۷	بلوغ
۲	سیوله	۰/۵۹۷۲	۰/۳۶۱۵	اواخر جوانی

بحث

در این مطالعه، ما با استفاده از فن‌های سنجش‌ازدور، تغییرات دینامیکی یخچال‌ها مانند تغییرات ارتفاع، تغییر مساحت، تعادل جرم و ویژگی‌های مورفولوژیکی بی‌ثبات‌کننده و تأثیرات آنها بر جریان‌های واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، داده‌های اقلیمی ERA 5، برای تجزیه و تحلیل تأثیرات نوسانات دما و بارش بر رویدادهای جریان واریزه‌ای مورد استفاده قرار گرفت که رابطه قوی با این رویدادها را نشان داد. علاوه بر این، در هر دو حوضه آبریز، نشانه‌هایی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با جریان واریزه‌ای دیده شد. مطالعات انجام‌گرفته نشان داد که در طول ۳۰ سال گذشته، به‌ویژه در مناطق مرتفع، شاهد کاهش مداوم جرم یخچال‌ها بودیم که احتمالاً به دلیل سرعت بالای ذوب در انتهای یخچال و افزایش دمای هوا است که با نمایان شدن دامنه‌های شیب‌دار، منجر به سیل و جریان‌های واریزه‌ای شده و به‌طور قابل‌توجهی بر بی‌ثباتی یخچال‌های طبیعی تأثیر گذاشته است (Kaab et al. 2021; Hassan et al. 2021; Jiang et al. 2023). تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا Planet، ویژگی‌های سطحی بی‌ثبات یخچال‌های طبیعی مانند ترک‌ها، شکاف‌ها و پرتگاه‌ها را نشان داد. وجود آب بارندگی یا آب حاصل از ذوب یخچال در این شکاف‌ها، تنش برشی را در شیب‌های تند افزایش می‌دهد؛ این امر ممکن است یخچال را بی‌ثبات کرده و منجر به شکست انتهایی آن شود. این تغییرات دینامیکی یخچال‌ها احتمالاً با بی‌ثبات کردن انتهای یخچال، همان‌طور که توسط نویسندگان دیگر مطالعه شده است (Huggel et al. 2012; Pandey et al. 2022)، در رویدادهای جریان واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ نقش داشته‌اند.

این ویژگی‌های مورفولوژیکی یخچال‌ها با خطرات مختلفی از جمله، جدا شدن انتهای یخچال و حرکت شتاب‌دار ناگهانی آن مرتبط هستند که به‌طور قابل‌توجهی بر بی‌ثباتی یخچال‌ها تأثیر می‌گذارند و منجر به جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شوند. منطقه یخچالی با نرخ متوسط ۰/۴۸۴ کیلومتر مربع در سال، پسروری قابل‌توجهی را تجربه کرد و رسوبات سست و غیریکپارچه را در معرض دید قرار داد و شرایط مطلوبی را برای جریان‌های واریزه‌ای فراهم کرد. با این حال، نرخ عقب‌نشینی بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ به‌طور استثنایی بالاتر و برابر با ۰/۷۶۷ کیلومتر مربع در سال بود. ویژگی‌های توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی، شرایط مساعدی را برای جریان واریزه و سیلاب در حوضه‌های یخار و

سیوله نشان دادند. مقادیر شاخص SL و HI برای حوضه یخار مرحله بلوغ ژئومورفولوژیکی را نشان داد. در چنین مرحله‌ای، حوضه آبخیز برای جریان‌های واریزه‌ای در طول بارش‌های سنگین و ذوب شدید برف و یخچال‌های طبیعی در فصل تابستان، مساعدتر می‌شود (Chen et al. 2018). درحالی حوضه سیوله مرحله اواخر جوانی خود را تجربه می‌کند که نشان‌دهنده کمترین مطلوبیت برای جریان‌های واریزه‌ای است.

بر اساس مجموعه داده‌های بلندمدت ERA 5، سال ۱۳۹۷ با میانگین دمای سالانه ۶/۷- درجه سانتیگراد، به‌عنوان گرم‌ترین سال شناخته شد و پس از آن سال‌های ۱۴۰۳ با دمای ۶/۸- درجه سانتیگراد و ۱۳۸۶ با دمای ۷/۲- درجه سانتیگراد قرار گرفتند. درحالی‌که ناهنجاری بارش در ۳۰ سال گذشته ثابت نبوده است. بااین‌حال، ما شاهد کاهش میزان بارش از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ و افزایش بارندگی از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ بودیم که احتمالاً به‌دلیل تغییرات خرداقلیمی منطقه‌ای است. نتایج حاصل از این پژوهش، ارتباط مستقیمی بین روزهای طولانی گرم و خشک تابستان و به‌دنبال آن بارندگی شدید و جریان‌های واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ که از یخچال‌های سیوله و یخار سرچشمه گرفته‌اند، نشان داد. همان‌طور که در شکل شماره ۷ نشان داده شده است، دمای روزانه هوا از اوایل مرداد شروع به افزایش کرد و پس از رویداد واریزه‌ای فاجعه‌بار کاهش یافت. بااین‌حال، بارندگی تا اواسط مرداد ادامه یافت. اعتقاد بر این است که روزهای بسیار گرم و خشک و به‌دنبال آن بارندگی شدید، نقش مهمی در وقوع حوادث متعدد جریان واریزه‌ای در حوضه آبریز سیوله و یخار داشته‌اند. افزایش قابل‌توجه دمای هوا و بارندگی، ذوب یخچال‌های طبیعی، تخریب لایه منجمد دائمی و تغییر چرخه انجماد - ذوب را تسریع می‌کند و منجر به ناپایداری یخچال‌های طبیعی در دامنه‌های شیب‌دار می‌شود و خطرات متعددی را ایجاد می‌کند (Patton et al. 2019; Leinss et al. 2021). بااین‌حال، عوامل دیگری مانند توپوگرافی، شیب تند و تغییرات طولانی مدت در دینامیک یخچال‌های طبیعی نیز نقش مهمی ایفا کردند؛ زیرا تمام رویدادهای جریان واریزه‌ای از انتهای یخچال‌ها سرچشمه گرفته و احتمالاً یا با جدا شدن توده یخچالی یا با اضافه شدن اوج تخلیه آب ذوب یخچال که با افزایش دما تسریع می‌شود، آغاز شده‌اند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش، تأثیر متقابل بین تغییرات دینامیکی یخچال‌ها، ژئومورفولوژی، بارش و دما را در هدایت جریان‌های واریزه‌ای و سیل در محیط‌های کوهستانی نشان می‌دهد. یافته‌های پژوهش نشان داد که رویدادهای متعدد جریان واریزه‌ای، همراه با سیل فاجعه‌بار در حوضه‌های آبریز یخار و سیوله دماوند، ناشی از تغییرات طولانی مدت در دینامیک یخچال‌ها همراه با افزایش دما و بارش شدید بوده است. بر اساس این مطالعه، می‌توان نتیجه‌گیری زیر را استنباط کرد. در طول سه دهه گذشته، یخچال‌های یادشده به‌طور مداوم تعادل جرم منفی را تجربه کرده‌اند؛ به‌طوری‌که مناطق یخچالی به‌ویژه در یخچال‌های کوچک‌تر که آسیب‌پذیرتر و حساس‌تر به تغییرات اقلیمی هستند، عقب‌نشینی قابل‌توجهی داشته‌اند. تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات زمانی قابل‌توجهی را در دینامیک یخچال‌ها و ارتباط آنها با رویدادهای جریان واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ نشان داد. بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳، دینامیک تشدیدشده یخچالی منجر به نمایان شدن بستر سنگی انتهای یخچال شده که احتمالاً به‌دلیل هدر رفتن توده یخ و سرعت بالای ذوب شدن آن بوده است. یخچال‌ها دارای ویژگی‌های سطحی بی‌ثباتی مانند شکاف‌ها و ترک‌ها بودند که ممکن است انتهای یخچال را قبل از شکست آن تضعیف کرده باشند. پایداری یخچال‌ها، به‌ویژه انتهای آن به سرعت ذوب، بارندگی، نوسانات دما و تغییرات تعادل جرم بسیار حساس است. عقب‌نشینی مداوم و از

دست دادن یخ، دامنه‌های شیب‌دار و رسوبات غیر متراکم را در معرض خطر قرار می‌دهد. این مسئله خطر شکست شیب را افزایش داده و منجر به ایجاد جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شود. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، مانند رسوبات غیر یکپارچه و ویژگی‌های سنگ بستر، نیز نقش حیاتی ایفا می‌کنند، به‌طوری‌که شیب‌های تند بیش از ۲۵ درجه، آستانه شروع جریان واریزه در منطقه مورد مطالعه هستند. دماهای شدید و بارندگی‌ها باعث تغییر رژیم حرارتی و ویژگی‌های زیرسطحی یخچال مدفون (منظور تغییرات دما و فشار آب در لایه‌های برف و یخ زیرسطحی) شده و در نتیجه رویدادهای متعدد جریان واریزه در مرداد ۱۴۰۱ را ایجاد کردند. این موضوع، رابطه حیاتی بین دینامیک یخچال و تغییر شرایط آب‌وهوایی را برجسته می‌کند. به‌طور خلاصه، این مطالعه نشان می‌دهد که پتانسیل وقوع حوادث مکرر و مشابه ناشی از یخچال‌های طبیعی در محیط‌های کوهستانی به‌دلیل گرمایش جهانی وجود دارد. افزایش دما ممکن است پسروری یخچال‌ها و از دست دادن جرم را حتی با سرعت بیشتری تسریع کند و منجر به بی‌ثباتی بیشتر یخچال‌ها و افزایش فراوانی جریان‌های واریزه یخچال‌ها و سیل‌های فاجعه‌بار شود. بنابراین، باید تلاش‌های بیشتری بر مطالعه یخچال‌های طبیعی شود؛ زیرا باعث ایجاد خطر برای جوامع پایین‌دست می‌شوند و این امر با هدف کاهش اثرات جریان‌های واریزه‌ای و سیل در مناطق کوهستانی انجام پذیرد. برای دستیابی به این هدف، ایجاد شبکه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی خودکار و سایر ابزارهای لازم، انجام پژوهش‌های میدانی برای نظارت بر سیستم برف - یخچال طبیعی و مشارکت جوامع محلی و مقامات مربوطه ضروری است. علاوه بر این، نصب سیستم‌های هشدار اولیه برای تشخیص بلایای احتمالی و جلوگیری از خسارت‌های انسانی و اقتصادی بسیار مهم است.

منابع

- خدائیان، سعید؛ ضیائیان، پرویز؛ فخاری، سعیده. (۱۳۸۹). بررسی ژئومورفولوژی یخچال یخار با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور (قله دماوند). فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۱۹(۷۴)، صص: ۸۱-۸۵.
- فخاری، سعیده؛ نادری، فتح الله؛ ضیائیان، پرویز. (۱۳۹۰). بررسی میزان تغییرات یخچال طبیعی یخار دماوند با استفاده از RS و GIS. زمین‌شناسی محیط‌زیست، ۱۷(۱)، صص: ۲۹-۳۸.
- قربانی شورشانی، علی؛ خسروی، عذرا؛ نورمحمدی، علی. (۱۳۹۷). بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کوترنری در ارتفاعات شمال شرق ایران (مطالعه موردی: رشته‌کوه بینالود). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱(۵)، صص: ۱-۱۳.
- ولدان زوج، محمدجواد؛ رضائی، یوسف؛ وزیری، فریبرز؛ مباشری، محمدرضا. (۱۳۸۷). بررسی یخچال طبیعی علم چال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. فصلنامه علمی علوم زمین، ۱۸(۷۰)، صص: ۲-۱۳.
- Ali, M., Liu, Q., Hassan, W. (2024). Two-decadal glacier changes in the Astak, a tributary catchment of the upper Indus River in northern Pakistan. *Remote Sensing*, 16(9), 1558. doi: [10.3390/rs16091558](https://doi.org/10.3390/rs16091558).
- Allen, S., Owens, I., Sirguy, P. (2008). Satellite remote sensing procedures for glacial terrain analyses and hazard assessment in the Aoraki Mount Cook region, New Zealand. *New Zealand J Geol Geophysics*, 51(1), 73-87. doi: [10.1080/00288300809509851](https://doi.org/10.1080/00288300809509851).
- Bahuguna, I., Rathore, B.P., Jasrotia, A.S. (2021). Randhawa SS, Yadav SKS, Ali S, Gautam N, Poddar J, Srighyan M, Dhanade A, et al. 2021. Recent glacier area changes in the Himalaya-Karakoram and the impact of latitudinal variation. *Current Sci.*, 121(7), 929-940. doi: [10.18520/cs/v121/i7/929-940](https://doi.org/10.18520/cs/v121/i7/929-940).
- Basnett, S., Kulkarni, A.V., Bolch, T. (2013). The influence of debris cover and glacial lakes on the recession of glaciers in Sikkim Himalaya, India. *J Glaciol*, 59(218), 1035-1046. doi: [10.3189/2013JoG12J184](https://doi.org/10.3189/2013JoG12J184).
- Bazai, N.A., Cui, P., Carling, P.A., Wang, H., Hassan, J., Liu, D., Zhang, G., Jin, W. (2021). Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth Sci Rev.*, 212, 103432. doi: [10.1016/j.earscirev.2020.103432](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103432).

- Bisset, R. R., Nienow, P. W., Goldberg, D. N., Wigmore, O., Loayza-Muro, R. A., Wadham, J. L., Macdonald, M. L., Bingham, G. (2023). Using thermal UAV imagery to model distributed debris thicknesses and sub-debris melt rates on debris-covered glaciers. *J Glaciol*, 69(276), 981–996.
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kaab, A., Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosciences*, 10(9), 668–673. doi: [10.1038/NGEO2999](https://doi.org/10.1038/NGEO2999).
- Chen, X., Chen, J., Cui, P., You, Y., Hu, K., Yang, Z., Zhang, W., Li, X., Wu, Y. (2018). Assessment of prospective hazards resulting from the 2017 earthquake at the world heritage site Jiuzhaigou Valley, Sichuan, China. *J Mt Sciencs*, 15(4), 779–792. doi: [10.1007/s11629-017-4785-1](https://doi.org/10.1007/s11629-017-4785-1).
- Deng, M., Chen, N., Liu, M. (2017). Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau. *Nat Hazards Earth Syst Sciencs*, 17(3), 345–356. doi: [10.5194/nhess-17-345-2017](https://doi.org/10.5194/nhess-17-345-2017).
- Hassan, J., Chen, X., Muhammad, S., Bazai, N.A. (2021). Rock glacier inventory, permafrost probability distribution modeling, and associated hazards in the Hunza River Basin, Western Karakoram, Pakistan. *Sci Total Environment*, 782, 146833. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.146833](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146833).
- Hassan, W., Su, F., Liu, W., Hassan, J., Hassan, M., Bazai, N.A., Wang, H., Yang, Z., Ali, M., Castellanos, D.G., (2023). Impact of glacier changes and permafrost distribution on debris flows in Badswat and Shishkat catchments, Northern Pakistan. *J Mt Sciencs*, 20(12), 3687–3702. doi: [10.1007/s11629-023-7894-5](https://doi.org/10.1007/s11629-023-7894-5).
- Huebl, J., Kaitna, R. (2021). Monitoring debris-flow surges and triggering rainfall at the Lattenbach Creek, Austria. *Environ Eng Geosciences*, 27(2), 213–220. doi: [10.2113/EEG-D-20-00010](https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00010).
- Huggel, C., Clague, J.J., Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf Processes Landform*, 37(1), 77–91. doi: [10.1002/esp.2223](https://doi.org/10.1002/esp.2223).
- Huss, M., Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Clim Change*, 8(2), 135–140. doi: [10.1038/s41558-017-0049-x](https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x).
- Jiang, Y., Hu, X., Liang, H., Ning, P., Fan, X. (2023). A physically based model for the sequential evolution analysis of rainfall-induced shallow landslides in a catchment. *Water Resour Res.*, 59(5), e2022WR032716. Doi: [10.1029/2022WR032716](https://doi.org/10.1029/2022WR032716).
- Kaab, A., Jacquemart, M., Gilbert, A., Leinss, S., Girod, L., Huggel, C., Falaschi, D., Ugalde, F., Petrakov, D., Chernomorets, S. (2021). Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? *The Cryosphere*, 15(4), 1751–1785. doi: [10.5194/tc-15-1751-2021](https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021).
- Leinss, S., Bernardini, E., Jacquemart, M., Dokukin, M. (2021). Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat Hazards Earth Syst Sciencs*, 21(5), 1409–1429. doi: [10.5194/nhess-21-1409-2021](https://doi.org/10.5194/nhess-21-1409-2021).
- Pande, C., Moharir, K., Pande, R. (2021). Assessment of morphometric and hypsometric study for watershed development using spatial technology—a case study of Wardha river basin in Maharashtra, India. *Int J River Basin Management*, 19(1), 43–53. doi: [10.1080/15715124.2018.1505737](https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1505737).
- Pandey, V.K., Kumar, R., Singh, R., Kumar, R., Rai, S.C., Singh, R.P., Tripathi, A.K., Soni, V.K., Ali, S.N., Tamang, D. (2022). Catastrophic ice-debris flow in the Rishiganga river, Chamoli, Uttarakhand (India). *Geomat Nat Hazards Risk*, 13(1), 289–309. doi: [10.1080/19475705.2021.2023661](https://doi.org/10.1080/19475705.2021.2023661).
- Patton, A.I., Rathburn, S.L., Capps, D.M. (2019). Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 340, 116–128. doi: [10.1016/j.geomorph.2019.04.029](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029).
- Qiu, C., Su, L., Zou, Q., Geng, X. (2022). A hybrid machine-learning model to map glacier-related debris flow susceptibility along the Gyirong Zangbo watershed under the changing climate. *Sci Total Environment*, 818, 151752. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.151752](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151752).
- Zhang, J., Liu, J., Li, Y., Wang, J., Chen, L., Gao, B. (2022). Effects of glacier and geomorphology on the mechanism difference of glacier-related debris flow on the South and North Banks of Parlun Zangbo River, Southeastern Tibetan Plateau. *Adv Civ Eng.*, 2022(1), 3510944. doi: [10.1155/2022/3510944](https://doi.org/10.1155/2022/3510944).
- Zhou, Y., Li, Z., Li, J.I.A. (2017). Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH-9 images and SRTM DEM. *J Glaciol.*, 63(238), 331–342. doi: [10.1017/jog.2016.142](https://doi.org/10.1017/jog.2016.142).