

# Spatial-Geomorphological Analysis of Kuhrang Glacial Cirques and Their Impacts on Hydrological Sustainability and Water Management

Hamid Taheri<sup>1</sup>| Heeva Elmizadeh<sup>2</sup>

1. Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: [Elmizadeh@kmsu.ac.ir](mailto:Elmizadeh@kmsu.ac.ir)

## Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

**Received:** 16 Jun 2025

**Received in revised form:**  
18 Aug 2025

**Accepted:** 25 Aug 2025

**Available online:** 22 Dec 2025

**Keywords:**

Glacial cirques,  
Hydrology,  
Sustainable water  
management,  
Zagros Mountains,  
Equilibrium-Line Altitude  
(ELA),  
Kuhrang basin.

## ABSTRACT

Glacial cirques in the Kuhrang Basin, located in the Central Zagros Mountains, serve as vital natural water reservoirs, contributing to hydrological sustainability and offering valuable records for paleoclimate reconstruction. This study investigates the spatial distribution and geomorphological characteristics of 55 cirques to evaluate their hydrological potential and paleoclimatic significance. Data were derived from 1:50,000 topographic maps, Sentinel-2 imagery (2023), and field surveys conducted between 2022 and 2024. Analytical methods included descriptive statistics, kernel density estimation (KDE), KMeans spatial clustering, and advanced data visualizations (heatmaps, violin plots) implemented in Python. Snow cover was assessed using the Normalized Difference Snow Index (NDSI), while the Wright and Porter methods estimated the Quaternary snowline at 2,650–2,673 m. Results indicate that north-facing cirques (N, NE, NW), with a mean elevation of ~3,000 m, function as key hydrological sources, sustaining the Kuhrang River—an essential water supply for agriculture and local communities. In contrast, south-facing cirques (S, SE) at lower elevations (2,149–2,600 m) are more susceptible to climate-induced reductions in seasonal water availability. The equilibrium-line altitude (ELA), calculated using the Accumulation Area Ratio (AAR) method, was 3,609 m for east-facing and 3,680 m for west-facing cirques, reflecting regional climatic gradients. The 1,451 m difference between the Quaternary (2,650 m) and current snowline (4,101 m) suggests a paleotemperature approximately 8.71°C cooler than present. The study highlights the need to prioritize conservation of high-elevation, north-facing cirques and to implement adaptive water management strategies for more vulnerable southern slopes. These findings provide critical insights for climate change adaptation and sustainable water resource planning in the Zagros region.

**Cite this article:** Taheri, H., & Elmizadeh, H. (2025). Spatial-Geomorphological Analysis of Kuhrang Glacial Cirques and Their Impacts on Hydrological Sustainability and Water Management. *Geography and Environmental Sustainability*, 15(4), 81-98. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12284.2883>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12284.2883>

Publisher: Razi University



## تحلیل فضایی - ژئومورفولوژیکی سیرک‌های یخچالی کوهرنگ و تأثیرات آن در پایداری هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب

حمید طاهری<sup>۱</sup> | هیوا علمیزاده<sup>۲</sup>

۱. گروه زمین‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.  
 ۲. نویسنده مسئول، گروه زمین‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: [Elmizadeh@kmsu.ac.ir](mailto:Elmizadeh@kmsu.ac.ir)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخچه مقاله:</b></p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۳/۲۶</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۴/۰۵/۲۷</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۰۶/۰۳</p> <p><b>دسترسی آنلاین:</b> ۱۴۰۴/۱۰/۰۱</p> <p><b>کلیدواژه‌ها:</b></p> <p>سیرک‌های یخچالی، هیدرولوژی، مدیریت پایداری، زاگرس، خط برف‌مرز، حوضه کوهرنگ.</p> | <p>سیرک‌های یخچالی به‌عنوان شاخص‌های ژئومورفیک و آرسیوهای طبیعی تغییرات اقلیمی، نقش حیاتی در ذخیره‌سازی آب، تنظیم جریان‌های سطحی و بازسازی شرایط اقلیمی گذشته ایفا می‌کنند. سیرک‌های یخچالی کوهرنگ در زاگرس مرکزی، به‌عنوان مخازن طبیعی آب، نقش کلیدی در پایداری هیدرولوژیکی و بازسازی اقلیم دیرینه دارند. این مطالعه توزیع فضایی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی ۵۵ سیرک یخچالی در حوضه کوهرنگ را برای ارزیابی پتانسیل هیدرولوژیکی و اقلیمی بررسی نموده است. داده‌ها از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰، تصاویر سنتینل ۲ (۲۰۲۳) و مشاهدات میدانی جمع‌آوری شدند. تحلیل‌ها با روش‌های آماری (KDE، آمار توصیفی)، خوشه‌بندی فضایی (KMeans) و تجسم‌های پیشرفته (نقشه و نمودارهای حرارتی، نمودار ویولن) در Python انجام شد. شاخص NDSI برای پایش پوشش برف و روش‌های رایت و پورتر برای تخمین خط برف‌مرز کواترنری (۲۶۵۰-۲۶۷۳ متر) به کار رفت. نتایج نشان داد سیرک‌های روبه‌شمال با میانگین ارتفاع ۳۰۰ متر، مخازن اصلی آب هستند و جریان پایداری به رودخانه کوهرنگ تأمین می‌کنند که برای کشاورزی و جوامع محلی حیاتی است. در مقابل، سیرک‌های رو به جنوب با ارتفاعات پایین‌تر، به دلیل دریافت تابش خورشیدی بیشتر، در برابر گرمایش جهانی آسیب‌پذیرترند و عرضه آب فصلی را کاهش می‌دهند. خط تعادل یخچالی (ELA) با روش AAR (۳۶۰۹ و ۳۶۸۰ متر برای جهت‌های شرقی و غربی) گرادیان اقلیمی منطقه‌ای را تأیید کرد. خط برف‌مرز کنونی (۴۱۰۱ متر) و کواترنری حاکی از اقلیم سردتر گذشته (کاهش ۸/۷۱ درجای دما) است. این مطالعه مناطق اولویت‌دار برای حفاظت و مدیریت پایداری آب را شناسایی کرد و برای سیاست‌گذاری در برابر تغییرات اقلیمی و بازسازی اقلیم دیرینه زاگرس ارزشمند است.</p> |

استناد: طاهری، حمید؛ علمیزاده، هیوا (۱۴۰۴). تحلیل فضایی - ژئومورفولوژیکی سیرک‌های یخچالی کوهرنگ و تأثیرات آن در پایداری هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۵ (۴)، ۸۱-۹۸. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12284.2883>

ناشر: دانشگاه رازی

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12284.2883>

© نویسندگان.



## مقدمه

سیرک‌های یخچالی، به‌عنوان عوارض ژئومورفولوژیکی ناشی از فرسایش یخچالی در دوره‌های سرد پلیستوسن، نقش مهمی در شکل‌گیری مناظر کوهستانی و دینامیک‌های هیدرولوژیکی مناطق مرتفع ایفا می‌کنند (Valle et al., 2022; Kleber et al., 2023). این عارضه‌ها که به‌صورت کاسه‌های گود در دامنه‌های کوهستانی تشکیل می‌شوند، نه‌تنها شواهد ارزشمندی از شرایط اقلیمی گذشته ارائه می‌دهند، بلکه به‌عنوان مخازن طبیعی برف‌ویخ، منابع آب پایداری برای رودخانه‌ها و جوامع محلی فراهم می‌کنند (Sain et al., 2022; Tembotov et al., 2025; Song et al., 2025).

در ایران، زاگرس به‌عنوان یکی از مناطق کلیدی یخچالی‌زده، میزبان سیرک‌های متعددی است که پتانسیل هیدرولوژیکی و اکولوژیکی بالایی دارند (جعفری و ناصری، ۱۴۰۰؛ صیدی شاهینودی و همکاران، ۱۴۰۴). منطقه کوه‌رنگ، واقع در زاگرس مرکزی، به دلیل وجود ۵۵ سیرک یخچالی با ویژگی‌های متنوع، جهت‌های مختلف شیب، و توزیع فضایی گسترده، یک مورد مطالعاتی برجسته برای بررسی تعاملات ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و اقلیمی است.

رودخانه کوه‌رنگ که بخش عمده آب آن از ذوب برف سیرک‌ها تأمین می‌شود، نقش حیاتی در کشاورزی، دامداری و تأمین آب شرب جوامع محلی ایفا می‌کند. بااین‌حال، تغییرات اقلیمی اخیر، از جمله افزایش دما و کاهش بارش برفی، پایداری این مخازن طبیعی را تهدید می‌کند. کاهش عرضه آب فصلی، به‌ویژه در سیرک‌های کم‌ارتفاع، می‌تواند پیامدهای اجتماعی - اقتصادی جدی برای منطقه به همراه داشته باشد. از سوی دیگر، توزیع فضایی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی سیرک‌ها (مانند جهت شیب و نزدیکی به خط تعادل یخچالی، ELA) می‌تواند اطلاعاتی درباره شرایط اقلیمی پلیستوسن و پتانسیل هیدرولوژیکی کنونی ارائه دهد.

علی‌رغم اهمیت سیرک‌های یخچالی در تأمین آب و بازسازی اقلیمی، مطالعات محدودی در ایران به تحلیل جامع این عوارض پرداخته‌اند. در منطقه کوه‌رنگ، اطلاعات موجود درباره توزیع فضایی (مختصات و ارتفاع)، ویژگی‌های مورفومتریک (طول، عرض، جهت شیب)، و پتانسیل هیدرولوژیکی سیرک‌ها پراکنده و ناکافی است. نبود تحلیل‌های چندبعدی که روابط بین متغیرهای ژئومورفولوژیکی (مانند ارتفاع و جهت) و هیدرولوژیکی (مانند جریان آب) را بررسی کند، برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب را دشوار کرده است. به‌عنوان مثال، مشخص نیست کدام سیرک‌ها (بر اساس جهت یا موقعیت) پتانسیل بالاتری برای ذخیره آب دارند یا کدام‌ها در برابر گرمایش جهانی آسیب‌پذیرترند.

مطالعه ژئومورفولوژی یخچالی و اقلیم گذشته در حوضه کوه‌رنگ از چند جهت اهمیت دارد. نخست، این حوضه به دلیل تأمین آب رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود، نقش کلیدی در کشاورزی، صنعت، و تأمین آب شرب مناطق وسیعی از ایران دارد. تونل‌های کوه‌رنگ ۱ و ۲ که آب این حوضه را به زاینده‌رود منتقل می‌کنند، نشان‌دهنده اهمیت هیدرولوژیکی منطقه هستند. میانگین بارش سالانه ۱۳۷ میلی‌متر و وجود ۳۱ رودخانه (۲۰ دائمی، ۴ فصلی، و ۷ سیلابی) بر اهمیت این حوضه در تأمین آب تأکید دارد. دوم، بازسازی اقلیم کواترنری که دمایی ۸ درجه سانتی‌گراد سردتر و بارشی ۲۰۴۳ تا ۲۴۱۸ میلی‌متر بیشتر از شرایط کنونی داشته (طاهری، ۱۴۰۱: ۴۷)، می‌تواند به درک بهتر تغییرات بلندمدت اقلیمی و تأثیر آن بر منابع آب کمک کند. سوم، باتوجه‌به گرمایش جهانی و کاهش بارش در زاگرس، مطالعه این حوضه بینش‌هایی برای پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. در نهایت، شناسایی دقیق لندفرم‌های یخچالی می‌تواند به حفاظت از این ویژگی‌های طبیعی و استفاده از آن‌ها در گردشگری پایدار کمک کند.

سیرک‌های یخچالی به‌عنوان مخازن کلیدی آب شیرین و شاخص‌های تغییرات اقلیمی، نقش مهمی در تحلیل ژئومورفولوژیکی و پایداری هیدرولوژیکی مناطق کوهستانی دارند. مطالعات جهانی متعددی تأثیر تغییرات اقلیمی بر یخچال‌ها و سیرک‌های یخچالی را بررسی کرده‌اند. برای مثال، آلتینای و همکاران، با استفاده از تاریخ‌گذاری کوزموژنیک، دوره‌های یخچالی هولوسن در ترکیه را بازسازی کردند و نقش آن‌ها را در مدیریت منابع آب برجسته نمودند (Altınay et al., 2020). به طور مشابه، بورا و همکاران، در حوضه ماگوچو کاهش تعداد یخچال‌ها (از ۹۲ به ۸۶) و افزایش دریاچه‌های یخچالی (از ۱۳۴ به ۱۹۵) را گزارش کردند که نشان‌دهنده تأثیر گرمایش جهانی بر پایداری اکوسیستم‌های کوهستانی است (Borah et al., 2020).

(al., 2022). خادکا و همکاران، در نپال کاهش مساحت یخچال‌ها (۱ تا ۵ کیلومتر مربع در سال) و تعادل جرمی منفی را همراه با ۴۵ سیل یخچالی گزارش کردند که جوامع پایین‌دست را تهدید می‌کند (Khadka et al., 2023). همچنین، هو و همکاران، در تیان‌شان کاهش ۳۳۲ کیلومتر مربع مساحت و ۱۸ کیلومتر مکعب حجم یخچال‌ها را همراه با افزایش ۵۶ دریاچه یخچالی گزارش کردند که پایداری هیدرولوژیکی را به خطر انداخته است (Hu et al., 2024). این مطالعات نشان می‌دهند که عقب‌نشینی یخچال‌ها و تشکیل دریاچه‌های یخچالی به مخاطرات ژئومورفولوژیکی و کاهش منابع آب منجر شده است، موضوعی که برای حوضه کوه‌رنگ نیز اهمیت دارد، زیرا سیرک‌های یخچالی این منطقه نقش مشابهی در تأمین آب رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود ایفا می‌کنند.

تحلیل‌های مبتنی بر فناوری‌های نوین، مانند یادگیری ماشین و سنجش‌ازدور، به درک دقیق‌تر تغییرات یخچالی کمک کرده‌اند. موهانتی و مایتی، وموری و همکاران و ایساک و همکاران با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، کاهش مساحت و تعداد یخچال‌های هیمالیا را تحلیل کردند و به افزایش مخاطرات سیل یخچالی و کاهش پایداری منابع آب و زیرساخت‌ها اشاره داشتند (Mohanty & Maiti, 2022; Vemuri et al., 2024; Issac et al., 2025). به‌طور مشابه، کومار و همکاران، افزایش ۱۶۴٪ مساحت و ۱۹۰٪ حجم دریاچه‌های پروگلاسیال دورونگ-درونک را گزارش کردند که پایداری هیدرولوژیکی را تهدید می‌کند (Kunmar et al., 2025). یونگ‌پینگ و جین‌هوا نیز عقب‌نشینی یخچال‌های تبت و افزایش دریاچه‌های یخچالی را با مخاطرات زمین‌شناختی مرتبط دانستند (Yongping & Jianhua, 2025). ژاکمارت و همکاران، با ارائه پایگاه داده Glenglat، رژیم‌های حرارتی یخچال‌ها را تحلیل کردند که برای مدیریت پایدار منابع آب مفید است (Jacquemart et al., 2025). این پیشرفت‌های روش‌شناختی برای مطالعه حاضر در کوه‌رنگ اهمیت دارند، زیرا استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع و داده‌های اقلیمی با رزولوشن بالا می‌تواند دقت شناسایی سیرک‌های یخچالی و بازسازی اقلیم کواترنری را افزایش دهد.

در ایران، مطالعات متعددی شواهد یخچالی را در زاگرس و البرز بررسی کرده‌اند. یمانی (۱۳۸۶) پسروری زبانه‌های یخچالی زردکوه را گزارش کرد که ذوب آن‌ها پایداری هیدرولوژیکی منطقه را تهدید می‌کند. رامشت و همکاران (۱۳۹۰) در تیگرانی ماهان خط برف دائمی ۲۹۰۰ متری و کاهش ۸۵ درجه‌ای دما را گزارش کردند که پایداری اکوسیستم‌های کوهستانی را تحت تأثیر قرار داده است. نوحی و همکاران (۱۳۹۸) و صالحی‌پور میلانی و همکاران (۱۳۹۸) لندفرم‌های یخچالی مشکین‌شهر و ارومیه را به اقلیم کواترنری مرتبط کردند. صالحی و سیف (۱۳۹۹) با مدل‌سازی کرنل، لندفرم‌های یخچالی البرز را شناسایی کردند که برای مدیریت آب مفید است. جعفری و حضرتی (۱۳۹۷الف، ۱۳۹۷ب، ۱۳۹۸، ۱۳۹۹) با شناسایی بیش از ۶۰۰۰ سیرک یخچالی در شمال و شمال‌غرب ایران، برف‌مرز کواترنری را بین ۱۹۹۷-۳۰۹۸ متر برآورد کردند که تنوع اقلیمی و نقش سیرک‌ها در تأمین آب را نشان می‌دهد. گورابی و همکاران (۱۴۰۱) سیلاب یخچالی اشترانکوه را تحلیل کردند و شش‌انگشت و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از LiDAR و پهپاد، نرخ پسروری ۰٫۸ متری سالانه یخچال علم‌کوه را گزارش کردند. سیف و بیرانوند (۱۳۹۹، ۱۴۰۰، ۱۴۰۳) با شناسایی ۹۶۹ سیرک در کرمان و جبال بارز و برف‌مرز ۲۵۳۱-۲۷۹۵ متری در گرین زاگرس، پایداری ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی را بررسی کردند. غضنفرپور و همکاران (۱۳۹۹) و ناعمی‌تبار و زنگنه اسدی (۱۴۰۱)، امیر احمدی و همکاران (۱۴۰۲) نیز در مناطق بینالود، شهداد و سیرجان، افزایش بارش کواترنری و کاهش ۶ تا ۱۳ درجه‌ای دما را گزارش کردند که منابع آب را تقویت کرده بود.

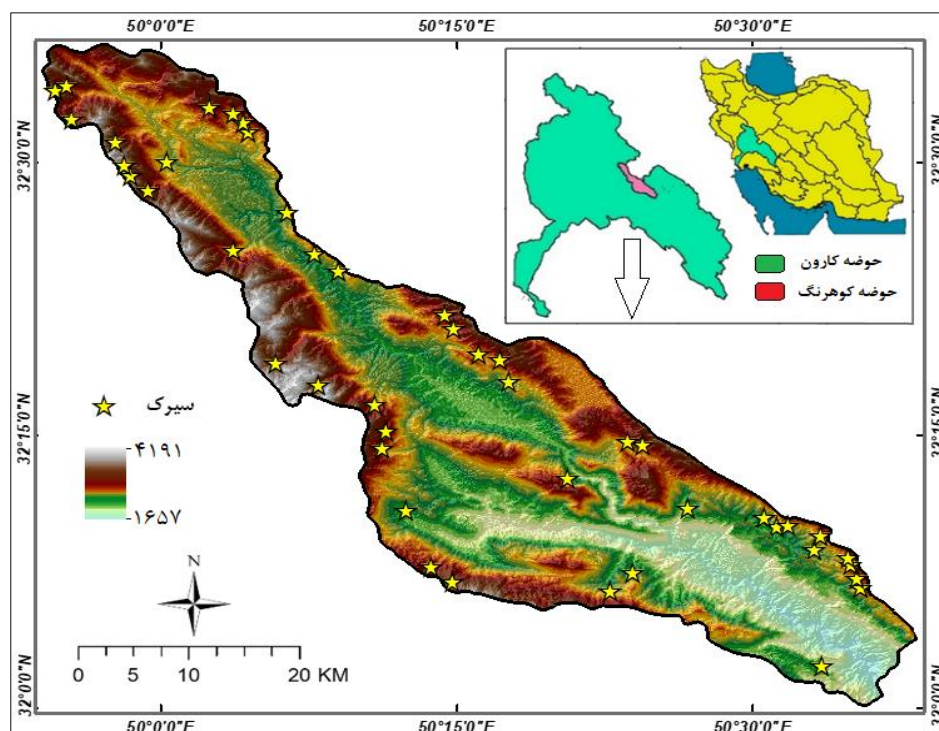
این مطالعه با هدف پاسخگویی به سه سؤال کلیدی طراحی شده است: (۱) توزیع فضایی سیرک‌ها از نظر مختصات جغرافیایی و ارتفاعی چه ویژگی‌هایی دارد و چه الگوهای ژئومورفولوژیکی را نشان می‌دهد؟ (۲) کدام جهت‌های شیب و محدوده‌های ارتفاعی از پتانسیل هیدرولوژیکی بالاتری برخوردارند؟ (۳) چگونه می‌توان از داده‌های سیرک‌ها برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته و مدیریت پایدار منابع آب بهره برد. برای دستیابی به این اهداف، پژوهش حاضر از ترکیبی از داده‌های میدانی دقیق، تحلیل‌های آماری پیشرفته و تکنیک‌های نوین تجسم داده‌ها (شامل نمودارهای جفتی، نمودارهای ویولن و نقشه‌های حرارتی) بهره گرفته است. یافته‌های این تحقیق می‌توانند نقش مؤثری در شناسایی سیرک‌های کلیدی برای حفاظت، پیش‌بینی میزان آبدهی و تدوین سیاست‌های سازگار با تغییرات اقلیمی در منطقه کوه‌رنگ ایفا کنند. این نتایج به‌ویژه برای مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه‌های آبریز کارون و زاینده‌رود از اهمیت راهبردی برخوردارند.

## مواد و روش‌ها

## معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کوهرنگ، با مساحت ۱۲۷۷ کیلومترمربع، در زاگرس مرکزی، استان چهارمحال و بختیاری، به دلیل وجود سیرک‌های یخچالی، دره‌های U شکل و نقش کلیدی در تأمین آب رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه دارای توپوگرافی کوهستانی با دامنه ارتفاعی ۱۶۵۷ تا ۴۱۹۱ متر (میانگین ۲۵۱۷ متر) و شیب‌های تند است که بر اقلیم، نوع بارش (مایع به جامد) و فرایندهای ژئومورفولوژیکی تأثیر می‌گذارد. زمین‌شناسی حوضه شامل رسوبات آهکی و مارنی از پرمین تا کرتاسه، سازندهای کارستی (به‌ویژه آسماری) و رسوبات آبرفتی کواترنری است. تحت تأثیر چین‌خوردگی‌های زاگرس، رسوبات دریایی افقی (پالئوزوئیک)، آهک، مارن، شیل، و رسوبات تبخیری (مزوزوئیک)، آهک‌های الیگوسن و میوسن (سنوزوئیک) و رسوبات رودخانه‌ای جوان (کواترنری) شکل گرفته‌اند. سازندهای آهکی و کارستی نقش مهمی در تغذیه آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند. از منظر ژئومورفولوژیکی، شیب‌های تند و تغییرات ارتفاعی، فرایندهای فرسایشی مانند جریان‌های سیلابی، لغزش زمین، و ریزش سنگ را تشدید کرده‌اند.

فرایندهای کارستی در سازندهای آهکی به تشکیل غارها، دولین‌ها، و چشمه‌های کارستی منجر شده و مخروط‌افکنه‌ها در پای کوه‌ها شکل گرفته‌اند. دامنه‌های رو به آفتاب به دلیل ذوب سریع‌تر برف، رواناب و فرسایش بیشتری را تجربه می‌کنند. اقلیم حوضه سرد و مرطوب کوهستانی است و با میانگین بارش سالیانه ۱۱۳۷ میلی‌متر (بیشترین در دی‌ماه و کمترین در تابستان)، دمای متوسط ۹/۷۱ درجه (حداکثر ۲۹/۹ و حداقل ۳/۱ درجه)، و ۱۱۵ روز یخبندان سالیانه (عمدتاً آبان تا اسفند) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانون‌های آبگیر دائمی ایران شناخته می‌شود. حوضه کوهرنگ، زیرمجموعه کارون شمالی، شامل ۳۱ رودخانه (۲۰ دائمی، ۴ فصلی، ۷ سیلابی) با رژیم هیدرولوژیکی مدیترانه‌ای است که جریان آن از پاییز تا بهار افزایش می‌یابد. رودخانه اصلی از زردکوه سرچشمه گرفته و بخشی از جریان آن از طریق تونل‌های کوهرنگ ۱ و ۲ به زاینده‌رود منتقل می‌شود (طاهری، ۱۴۰۱: ۴۶). ترکیب توپوگرافی کوهستانی، زمین‌شناسی کارستی، اقلیم سرد و مرطوب، و فرایندهای ژئومورفولوژیکی فعال، این حوضه را به یک منبع کلیدی تأمین آب ایران تبدیل کرده است. مطالعه دقیق سیرک‌های یخچالی این منطقه برای مدیریت پایدار منابع آبی در برابر چالش‌های گرمایش جهانی ضروری است.



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه

### داده‌ها و روش پژوهش

این مطالعه با رویکرد ترکیبی و روش استقرایی و استفاده از روش‌های کلاسیک و مدرن برای شناسایی لندفرم‌های یخچالی و بازسازی اقلیم گذشته طراحی شد تا شواهد یخچالی، توزیع فضایی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی ۵۵ سیرک یخچالی در منطقه کوهرنگ (زاگرس میانی) را بررسی و پیامدهای آن بر پایداری محیطی (منابع آب و ژئومورفولوژی) ارزیابی نماید. اهداف شامل: (۱) شناسایی لندفرم‌های یخچالی، (۲) بازسازی خط تعادل یخچالی (ELA) کواترنری و (۳) تحلیل شواهد اقلیمی مرتبط با یخچال‌ها بود. روش کار شامل جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل‌های آماری و فضایی و تجسم داده‌ها با استفاده از ابزارهای پیشرفته است. مراحل اصلی به شرح زیر است:

داده‌های میدانی: مشاهدات و بازدیدهای صحرایی شامل مشاهدات ژئومورفولوژیکی در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۴ برای تأیید موقعیت ۵۵ سیرک یخچالی و شناسایی یخرفت‌ها و دره‌های U شکل انجام و مختصات سیرک‌ها با GPS ثبت شدند. اندازه‌گیری‌های توپوگرافی: نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری برای اعتبارسنجی داده‌های DEM و شناسایی اولیه لندفرم‌ها استفاده شدند. شاخص‌های توپوگرافی (نیمرخ‌های طولی و عرضی دره‌های یخچالی، ارتفاع، شیب، و جهت شیب) برای شناسایی سیرک‌ها و محاسبه خط برف‌مرز و ELA از نقشه‌های توپوگرافی و DEM منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد.

تصاویر ماهواره‌ای: تصاویر سنتینل ۲ (۲۰۲۳) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای شناسایی سیرک‌های یخچالی و تحلیل پوشش برف استفاده شدند. این تصاویر به دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب، برای تحلیل لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی انتخاب شدند و با استفاده از ماسک ابری QA60 و ابزار Sen2Cor برای حذف پیکسل‌های ابری کالیبره شدند که دقت NDSI را افزایش داد. شاخص تفاضل نرمال شده برف (NDSI) با رابطه ۱ محاسبه گردید (Poussin et al., 2025; Tavus et al., 2024):

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{NDSI} = \frac{B03(\text{Green}) - B11(\text{SWIR})}{B03(\text{Green}) + B11(\text{SWIR})}$$

مقادیر  $\text{NDSI} \geq 0.4$  برای شناسایی برف‌ویخ به کار رفت.

تحلیل ژئومورفولوژیکی: برای شناسایی نیمرخ توپوگرافی و دره‌های یخچالی، نسبت ارتفاع ( $Fr$ ) با رابطه ۲ محاسبه شد (Chen et al., 2023; Ahmad et al., 2023):

$$\text{رابطه ۲} \quad Fr = \frac{D}{W1}$$

که ( $D$ ) عمق دره (متر) و  $W1$  عرض دره در رأس (متر) است. مقادیر  $Fr$  بین ۰/۲۴۲ تا ۰/۵۴۴ نشان‌دهنده دره یخچالی است. همچنین شناسایی و جهت‌گیری لندفرم‌ها (شمالی - جنوبی)، سیرک‌ها و مورن‌ها با تحلیل DEM و الگوریتم‌های طبقه‌بندی شیء‌گرا در ENVI 5.3 شناسایی شدند.

داده‌های اقلیمی: داده‌های دما و بارش از ۱۰ ایستگاه هواشناسی منطقه‌ای (مانند ایستگاه‌های کوهرنگ، چلگرد، و بازفت) در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۳ جمع‌آوری شدند. این داده‌ها شامل میانگین دمای سالانه ۹/۷۱ درجه سانتی‌گراد و بارش ۱۱۳۷ میلی‌متر است. تحلیل‌های آماری شامل KDE، آمار توصیفی، محاسبه میانگین، انحراف معیار، و بازه اطمینان برای دما و بارش در بازه‌های ارتفاعی و دمایی بود.

تحلیل‌های آماری: تحلیل‌های آماری برای بررسی توزیع و روابط متغیرها جهت ترسیم نمودارهای بصری انجام شدند: آمار توصیفی: میانگین  $\bar{x}$ ، انحراف معیار ( $S$ )، میانه، و دامنه برای ارتفاع، مختصات، و ویژگی‌های مورفومتریک محاسبه شدند (رابطه ۳) (Li et al., 2024):

$$\text{رابطه ۳} \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

که  $x_i$  داده‌ها و ( $n$ ) تعداد مشاهدات است.

چگالی هسته‌ای (KDE): توزیع ارتفاع برای هر جهت شیب با کتابخانه Seaborn تخمین زده شد (رابطه ۴):

$$\{f\}(x) = \{1\}\{nh\} \sum_{i=1}^n K(\{x - x_i\}\{h\}) \quad \text{رابطه ۴}$$

که (K) تابع هسته گاوسی، (h) پهنای باند (با روش Scott انتخاب شد)، و (n) تعداد داده‌ها است. خوشه‌بندی KMeans: سیرک‌ها بر اساس مختصات و ارتفاع با کتابخانه *Scikit - learn* خوشه‌بندی و فاصله اقلیدسی محاسبه شد (رابطه ۵):

$$d = \sqrt{\{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\}} \quad \text{رابطه ۵}$$

تعداد خوشه‌ها (k=3) با روش آرنج (*Elbow Method*) تعیین شد. همچنین برای بررسی روابط بین ارتفاع، جهت شیب و پتانسیل هیدرولوژیکی، تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) در Python (کتابخانه SciPy) انجام شد. تحلیل شواهد اقلیمی و بازسازی خط تعادل یخچالی (ELA): بازسازی اقلیم گذشته و دمای متوسط دوره یخچالی با استفاده از گرادیان حرارتی (۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد به ازای ۱۰۰ متر ارتفاع) و ELA محاسبه شد (رابطه ۶):

$$T_{\{past\}} = T_{\{present\}} - \left( \{ \Delta H_{\{ELA\}} \times 0.65 \} / \{ 100 \} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

که  $T_{\{past\}}$  دمای دوره یخچالی،  $T_{\{present\}}$  دمای فعلی، و  $\Delta H_{\{ELA\}}$  اختلاف ارتفاع ELA با ارتفاع فعلی است. خط تعادل یخچالی برای هر سیرک با روش نسبت تجمع (AAR) محاسبه شد (رابطه ۷) (Chen et al., 2023; Spreafico et al., 2021):

$$ELA = h_{\{min\}} + AAR \times (h_{\{max\}} - h_{\{min\}}) \quad \text{رابطه ۷}$$

که  $h_{\{min\}}$  حداقل ارتفاع کف سیرک،  $h_{\{max\}}$ : حداکثر ارتفاع دیواره سیرک، و  $AAR = 0.67$  (نسبت استاندارد برای یخچال‌های کوهستانی) است (Chen et al., 2023; Rounce et al., 2023). برای جهت‌های شرقی و غربی، میانگین ELA به ترتیب ۳۶۰۹ و ۳۶۸۰ متر محاسبه شد، که تفاوت آن‌ها به گرادیان اقلیمی منطقه‌ای (رطوبت بیشتر در شرق) نسبت داده شد.

روش رایت<sup>۱</sup>: خط برف‌مرز دائمی دوره کوتاه‌تری با استفاده از روش رایت محاسبه شد. این روش فرض می‌کند که ۶۰ درصد سیرک‌ها بالاتر از خط برف‌مرز قرار دارند. میانگین ارتفاع کف سیرک‌ها (۲۶۵۰ متر) به عنوان خط برف‌مرز تخمین زده شد. ارتفاع برف‌مرز دائمی (ELA) با شناسایی سیرک‌ها و تعیین ارتفاعی که ۶۰ درصد سیرک‌ها بالای آن قرار دارند، محاسبه شد. ارتفاع سیرک‌ها از DEM استخراج و با رابطه ۸ تحلیل شد:

$$ELA_{Wright} = H_{60} \quad \text{رابطه ۸}$$

که  $H_{60}$  ارتفاع میانه ۶۰ درصد سیرک‌های مرتفع است. روش پورتر<sup>۲</sup>: خط تعادل آب و یخ (ELA) با روش پورتر محاسبه شد که میانگین وزن دار ارتفاع کف و دیواره‌های سیرک‌ها را در نظر می‌گیرد. ELA در ۲۶۷۳ متر تخمین زده شد. روش ارتفاع کف سیرک (CF) برای برآورد ELA استفاده شد، زیرا یخچال‌های منطقه عمدتاً سیرک‌ها را پر کرده‌اند رابطه ۹ اعمال شد:

$$ELA_{Porter} \sim \text{Mean}(H_{CF}) \quad \text{رابطه ۹}$$

که  $(H_{CF})$  میانگین ارتفاع کف سیرک‌ها (متر) است. داده‌های DEM برای استخراج  $(H_{CF})$  استفاده شد. خط برف‌مرز کنونی: با استفاده از آهنگ افت دمایی ۰/۶ درجه سلسیوس به ازای ۱۰۰ متر و دمای میانگین ۹/۷۱ درجه سانتی‌گراد در ارتفاع ۴۱۰۱ متر، خط برف‌مرز کنونی محاسبه شد (رابطه ۱۰):

$$T = T_0 - 0.6h$$

رابطه ۱۰

تحلیل‌های فضایی و پردازش داده‌ها: داده‌ها در قالب یک *DataFrame* در *Pandas* ذخیره و نسخه‌های سازگار کتابخانه‌ها (*NumPy* 1.23.5, *Pandas* 1.5.3, *Folium* 0.12.1) نصب شدند تا از ناسازگاری‌های باینری (مانند خطای *numpy.dtype size changed*) جلوگیری شود. محیط *Python* 3.9 برای اجرای کدها استفاده شد و داده‌ها با کتابخانه *Pandas* و *Matplotlib* پردازش شدند. در ادامه داده‌های ژئومورفولوژیکی و اقلیمی با *Python* پردازش گردید و کتابخانه‌های *NumPy* (محاسبات عددی) و *Scikit - learn* (خوشه‌بندی سیرک‌ها) تحلیل شدند. نمودارهای تعاملی با *Plotly* و *Seaborn* ترسیم و تحلیل‌های فضایی برای بررسی توزیع سیرک‌ها انجام شدند. همچنین تجسم داده‌ها با کتابخانه‌های *Plotly*, *Seaborn*, *Matplotlib*, *Holoviews* و *Altair* انجام و ترسیم شدند و نقشه‌ها و نمودار حرارتی<sup>۱</sup> و ویلن بر اساس تخمین چگالی کرنل برای بصری‌سازی چگالی فضایی سیرک‌های یخچالی کواترنری، تراکم سیرک‌ها با کتابخانه *Folium* و پلاگین *HeatMap* ترسیم و شدت تراکم با تابع گاوسی محاسبه شد (رابطه ۱۱):

$$I = \sum e^{-\{d^2\} / \{2\sigma^2\}}$$

رابطه ۱۱

که  $d$ : فاصله از مرکز و  $\sigma$ : شعاع تأثیر ( $0.1$  درجه) است.

تراکم سیرک‌ها در مختصات و ارتفاع با تابع *plt.hist2d* در *Matplotlib* و تراکم فضایی با کتابخانه *Holoviews* و تابع *HexTiles* محاسبه و ترسیم شد و در نهایت نتایج تجزیه و تحلیل گردید.

## نتایج

با استفاده از تلفیق داده‌های تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع و مشاهدات میدانی، تعداد ۵۵ سیرک یخچالی در حوضه آبریز کوه‌رنگ شناسایی شد. این سیرک‌ها عمدتاً در ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر و در جهت‌های شمالی و شمال‌شرقی توزیع شده‌اند. میانگین ارتفاع کف سیرک‌ها ۲۶۵۰ متر است که با خط برف‌مرز دوره کواترنری همخوانی دارد. توزیع جهت شیب نشان‌دهنده تأثیر تابش خورشیدی است؛ سیرک‌های شمال‌شرقی و شمال‌غربی به دلیل دریافت کمتر انرژی خورشیدی، شرایط مناسب‌تری برای تشکیل یخچال‌ها داشته‌اند. سیرک‌های با جهت جنوبی نیز عمدتاً در ارتفاعات بالای ۳۵۰۰ متر در مناطقی با سایه‌اندازی قله‌های مرتفع و به دلیل شیب‌های محافظت‌شده از باد غالب تشکیل شده‌اند. مساحت سیرک‌ها بین ۰/۳۸ تا ۰/۶۲ کیلومترمربع متغیر است که نشان‌دهنده تنوع در مقیاس یخچال‌های گذشته است.

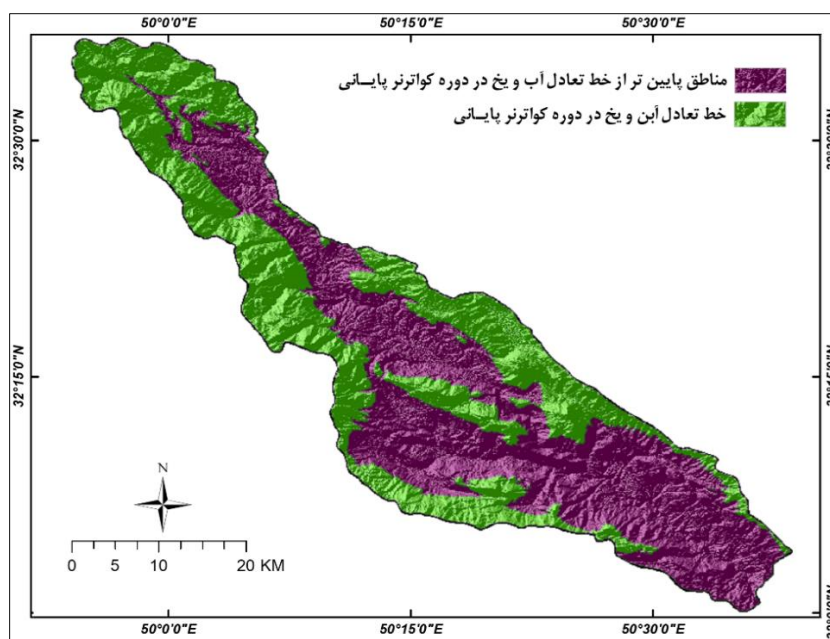
**خط برف‌مرز دوره کواترنری:** با استفاده از روش رایت، خط برف‌مرز دائمی دوره کواترنری در ارتفاع ۲۶۵۰ متر تخمین زده شد. این روش فرض می‌کند که ۶۰ درصد سیرک‌ها بالاتر از خط برف‌مرز قرار دارند. از ۵۵ سیرک، ۳۳ سیرک (۶۰ درصد) در ارتفاعات بالای ۲۶۵۰ متر قرار داشتند که این مقدار را تأیید می‌کند.

**خط تعادل آب و یخ (ELA):** با روش پورتر که میانگین وزن‌دار ارتفاع کف و دیواره‌های سیرک‌ها را در نظر می‌گیرد، ELA در ۲۶۷۳ متر محاسبه شد (شکل ۲). این مقدار اندکی بالاتر از خط برف‌مرز است، که به دلیل تفاوت در روش محاسبه (وزن‌دهی به دیواره‌های مرتفع‌تر) قابل‌انتظار است.

**خط برف‌مرز کنونی:** خط برف‌مرز کنونی با استفاده از آهنگ افت دمایی ۰/۶ درجه سانتی‌گراد به ازای ۱۰۰ متر و دمای میانگین ۹/۷۱ درجه سانتی‌گراد در ارتفاع ۴۱۰۱ متر تخمین زده شد که نزدیک به حداکثر ارتفاع منطقه (۴۱۹۱ متر) است.

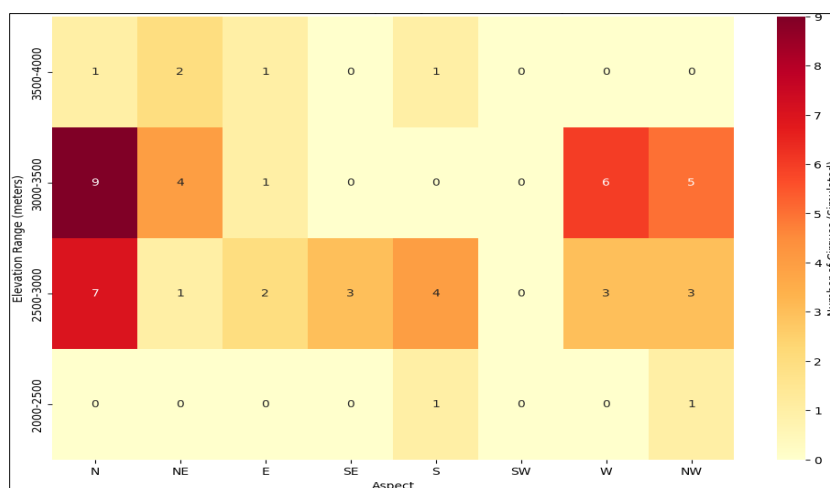
**نقشه حرارتی رستری:** نقشه حرارتی رستری تراکم و الگوی توزیع فضایی سیرک‌های یخچالی در حوضه آبریز رودخانه کوه‌رنگ را بصری‌سازی می‌کند (شکل ۳). قابلیت تعاملی نقشه امکان بزرگ‌نمایی و بررسی دقیق مناطق با تراکم بالا را فراهم می‌کند که برای تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی ارزشمند است. نواحی با بالاترین تراکم سیرک در بخش‌های

مرتفع و یال‌های اصلی در شمال/ شرق حوضه مشاهده می‌شوند.



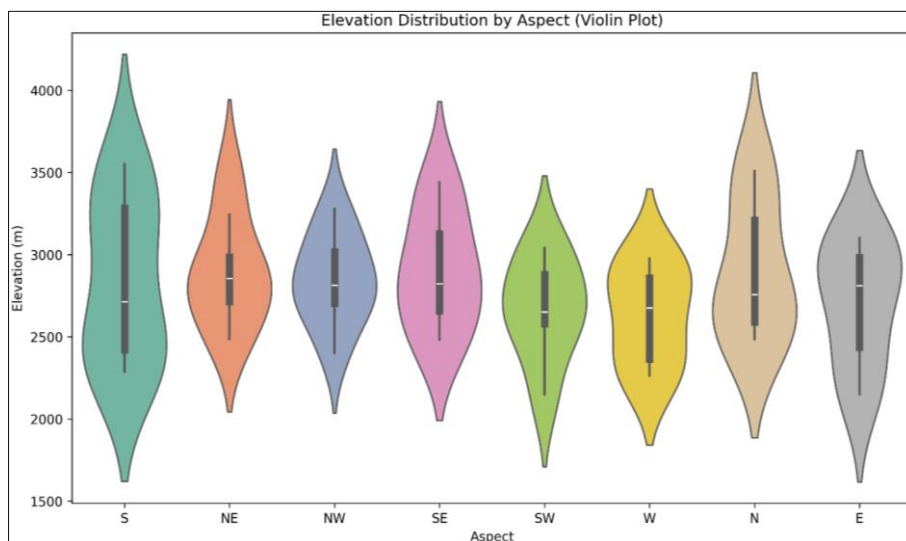
شکل ۲. خط تعادل آب و یخ (ELA) در محدوده کوهرنگ بر اساس روش پورتر

نقشه حرارتی تهیه‌شده نشان‌دهنده تمرکز قابل توجه سیرک‌های یخچالی در بازه‌های ارتفاعی ۲۵۰۰-۳۰۰۰ و ۳۰۰۰-۳۵۰۰ متر، با تراکم بالاتر در جهت‌های شمال‌شرقی، شمال‌غربی و شمالی است. رنگ‌های گرم‌تر که نشان‌دهنده فراوانی بیشتر سیرک‌ها هستند، این الگوی توزیع را به‌وضوح نمایش می‌دهند (شکل ۳). این نقشه به وضوح نشان می‌دهد که توزیع سیرک‌ها در حوضه کوهرنگ یکنواخت نیست. لکه‌ها یا کانون‌های<sup>۱</sup> با تراکم بالای سیرک در بخش شمالی - شرقی حوضه، متمرکز در امتداد یال‌های اصلی مشاهده می‌شوند. مناطق با چگالی بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه، در امتداد خطوط اصلی یال‌ها متمرکز هستند. این مناطق احتمالاً نشان‌دهنده محل‌هایی با شرایط توپوگرافیکی و خرداقلیمی مساعد برای آغاز و توسعه یخچالی در طول یخچالی‌های کوتاه‌تری هستند. در مقابل، نواحی وسیعی از حوضه تراکم سیرک پایین یا نزدیک به صفر را نشان می‌دهند. این نواحی معمولاً مربوط به دامنه‌های کم‌شیب و دره‌های اصلی رودخانه در ارتفاعات پایین‌تر می‌باشد.



شکل ۳. نمودار حرارتی رستری توزیع سیرک‌های یخچالی بر اساس ارتفاع و جهت شیب در حوضه کوهرنگ

نمودار ویولن توزیع ارتفاع سیرک‌های یخچالی بر اساس جهت شیب (شکل ۴)، یکی از ابزارهای بصری پیشرفته برای تحلیل ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی ۵۵ سیرک در منطقه کوه‌رنگ است. این نمودار توزیع ارتفاع (۲۱۴۹ تا ۳۵۵۰ متر) را برای هشت جهت جغرافیایی (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) نشان می‌دهد و شکل ویولن‌ها چگالی داده‌ها را در هر بازه ارتفاعی برای هر جهت نمایش می‌دهد. برخلاف نمودارهای جعبه‌ای که تنها آماره‌های اصلی (میان، چارک‌ها) را نشان می‌دهد، نمودار ویولن توزیع کامل داده‌ها را به صورت بصری ارائه می‌کند که برای درک الگوهای پیچیده ژئومورفولوژیکی ایده‌آل است. نتایج نشان می‌دهند که جهت‌های شمالی (N, NE, NW) در مقایسه با جهت‌های جنوبی میانگین ارتفاع بالاتری دارند (مثلاً N: حدود ۳۰۰۰ متر، در مقابل SE: حدود ۲۷۰۰ متر). جهت جنوبی دامنه ارتفاعی وسیع‌تری (۲۲۸۹ تا ۳۵۵۰ متر) را نشان می‌دهد که تنوع ژئومورفولوژیکی و توپوگرافیکی این جهت را منعکس می‌کند. توزیع چگالی در جهت‌های شمالی معمولاً باریک‌تر است که نشان‌دهنده تمرکز ارتفاعات در محدوده‌های بالاتر است، در حالی که جهت‌های جنوبی توزیع گسترده‌تری دارند.



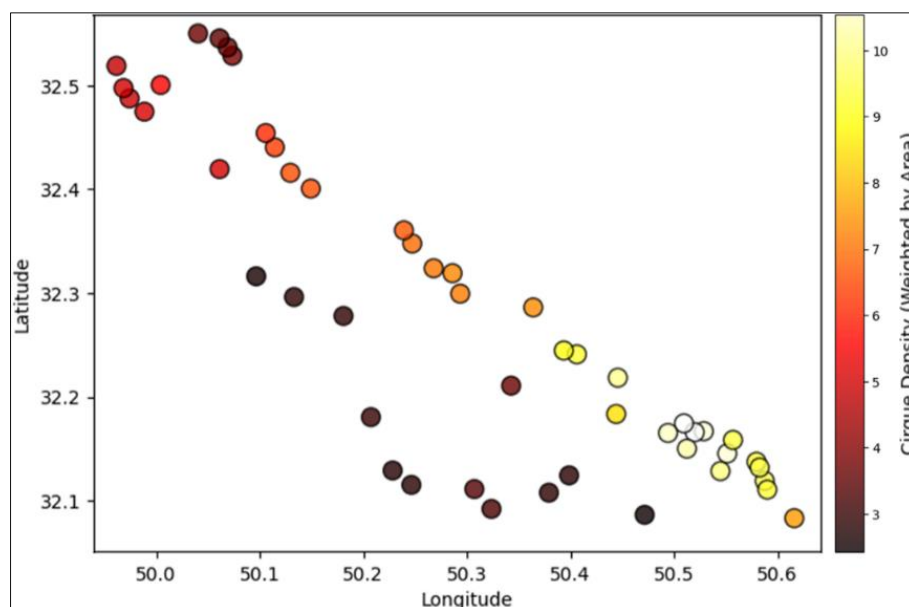
شکل ۴. نمودار ویولن جهت شیب و ارتفاع در حوضه کوه‌رنگ

## بحث

توزیع سیرک‌های یخچالی در منطقه کوه‌رنگ، به‌ویژه تمرکز آن‌ها در ارتفاعات ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر و جهت‌های شمالی (N, NE, NW)، نتیجه تعامل پیچیده عوامل توپوگرافی، اقلیمی و زمین‌شناسی در دوره پلیستوسن است. اختلاف ۱۴۵۱ متری بین خط برف‌مرز کنونی (۴۱۰۱ متر) و کواترنری (۲۶۵۰ متر) نشان‌دهنده کاهش دمایی حدود ۸/۷۱ درجه سانتی‌گراد (با آهنگ افت ۰/۶ درجه به ازای ۱۰۰ متر) در دوره‌های یخچالی است. این تخمین با محاسبات خط تعادل یخچالی (ELA) با میانگین ۲۶۷۳ متر (شکل ۲) هم‌خوانی دارد و با مطالعات زاگرس (جعفری و حضرتی، ۱۳۹۹) و مناطق کوهستانی دیگر مانند هیمالیا (Ritse et al., 2025; Vemuri et al., 2024; Kunmar et al., 2025) سازگار است که کاهش دمایی ۸ تا ۱۰ درجه‌ای را گزارش کرده‌اند. تمرکز سیرک‌ها در دامنه‌های شمالی به دلیل دریافت کمتر تابش خورشیدی، شرایط مساعدی برای تجمع برف و فرسایش یخچالی فراهم کرده است، در حالی که دامنه‌های جنوبی (S, SE) به دلیل ذوب سریع‌تر برف، سیرک‌های کمتری دارند (شکل ۳ و ۴). این الگو با داده‌های اقلیمی کواترنری (دمای میانگین ۲/۴۶- درجه سانتی‌گراد و بارش ۲۰۴۳-۲۴۱۸ میلی‌متر) هم‌راستا است و بر نقش کلیدی توپوگرافی و اقلیم در شکل‌گیری سیرک‌ها تأکید می‌کند.

از منظر ژئومورفولوژیکی، تراکم بالای سیرک‌ها در ارتفاعات میانی (۳۰۰۰-۳۵۵۰ متر) و جهت‌های شمالی (شکل ۵) نتیجه هم‌افزایی ارتفاع، جهت شیب و سنگ‌شناسی مقاوم (عمدتاً آهک‌های آسماری) است. این مناطق با سایه‌داری بیشتر، بارش برف فراوان و سنگ‌شناسی مقاوم (عمدتاً آهک‌های آسماری) شرایط مساعدی برای فرسایش حفره‌ای یخچالی

داشته‌اند. محدودیت تعداد سیرک‌ها در ارتفاعات بالای ۴۰۰۰ متر به محدودیت‌های توپوگرافیکی (حداکثر ارتفاع ۴۱۹۱ متر) نسبت داده می‌شود، که با یافته‌های مشابه (Jacquemart et al., 2025; Issac et al., 2025; Hu et al., 2024) هم‌خوانی دارد. این توزیع فضایی نه تنها الگوهای ژئومورفولوژیکی را روشن می‌کند، بلکه برای بازسازی اقلیم دیرینه ارزشمند است، زیرا نشان‌دهنده شرایط سرد و مرطوب در بخش‌های شمالی‌تر حوضه طی دوره‌های یخچالی است. تحلیل‌های آماری مانند نمودار ویولن (شکل ۴) و نقشه حرارتی (شکل ۵) این الگوها را با دقت بالا نمایش می‌دهند و ابزارهای تعاملی برای تحلیل فضایی ارائه می‌کنند.



شکل ۵. نقشه حرارتی توزیع فضایی و الگوی تراکم سیرک‌های یخچالی کواترنری در حوضه کوهرنگ

از منظر هیدرولوژیکی، سیرک‌های مرتفع در جهت‌های شمالی به‌عنوان مخازن کلیدی آب عمل می‌کنند و جریان پایداری برای رودخانه کوهرنگ تأمین می‌کنند که برای کشاورزی، دامداری و تأمین آب شرب جوامع محلی حیاتی است. این سیرک‌ها، به‌ویژه در بازه ۲۹۰۰ تا ۳۵۰۰ متر، به دلیل دمای پایین‌تر و حفظ طولانی‌تر برف‌ویخ، پتانسیل هیدرولوژیکی بالایی دارند. در مقابل، سیرک‌های کم‌ارتفاع‌تر در جهت‌های جنوبی (S, SE, SW) به دلیل دریافت بیشتر تابش خورشیدی، زودتر ذوب می‌شوند و عرضه آب فصلی را کاهش می‌دهند، که با افزایش دما در اثر گرمایش جهانی تشدید می‌شود (Das et al., 2025; Chang et al., 2023). این تفاوت‌ها پیامدهای اجتماعی-اقتصادی مهمی برای جوامع وابسته به رودخانه کوهرنگ دارند و نیاز به مدیریت هدفمند منابع آب را برجسته می‌کنند.

از منظر مدیریت منابع آب، نتایج این مطالعه ابزارهایی برای سیاست‌گذاری پایدار ارائه می‌دهد. سیرک‌های شمالی مرتفع باید به‌عنوان مناطق اولویت‌دار برای حفاظت از فعالیت‌های مخرب مانند معدن‌کاری یا توسعه زیرساختی محافظت شوند تا عملکرد هیدرولوژیکی آن‌ها حفظ شود. ادغام داده‌های این مطالعه با مدل‌های هیدرولوژیکی مانند SWAT یا HEC-HMS می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیقی از بازده جریان آب تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی ارائه دهد. با توجه به روند افزایش دما در منطقه کوهرنگ ( $Z=4.275$ ) که ذوب برف را تسریع کرده و منابع آبی رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود را کاهش داده است، راهبردهای سازگاری مانند ذخیره‌سازی آب در مخازن یا احیای پوشش گیاهی در دامنه‌ها ضروری است. این اقدامات می‌توانند پایداری هیدرولوژیکی را بهبود بخشیده و با اهداف توسعه پایدار (SDG 6: آب پاک و بهداشت) هم‌راستا شوند.

این مطالعه با محدودیت‌هایی از جمله کمبود داده‌های اقلیمی محلی بلندمدت (بیش از ۴۰ سال) و قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری مدل رقومی ارتفاع (DEM) مواجه بود که شناسایی سیرک‌های کوچک‌تر را محدود کرد. همچنین، اثرات فعالیت‌های انسانی مانند انتقال آب از طریق تونل‌های کوهرنگ بر هیدرولوژی سیرک‌ها به‌طور کامل بررسی نشد. این

محدودیت‌ها دقت تحلیل‌های فضایی و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی را تحت‌تأثیر قرار دادند. برای رفع این محدودیت‌ها، تحقیقات آینده می‌توانند از فناوری‌های سنجش‌ازدور پیشرفته مانند LiDAR (قدرت تفکیک مکانی ۱ متر) و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا (مانند PlanetScope با رزولوشن ۳ متر) برای نقشه‌برداری دقیق‌تر سیرک‌ها استفاده کنند. بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی ERA5 با بازه زمانی طولانی‌تر و مدل‌های عددی پیچیده‌تر نیز می‌تواند دینامیک یخچالی و تغییرات هیدرولوژیکی را تحت سناریوهای اقلیمی بهتر شبیه‌سازی کند.

علاوه بر این، مطالعات تطبیقی با مناطق یخچالی زاگرس یا کوهستان‌های مشابه جهانی (مانند هیمالیا یا آلپ) می‌توانند درک عمیق‌تری از الگوهای منطقه‌ای ارائه دهند. این مطالعه با تلفیق روش‌های میدانی، سنجش‌ازدور، و تحلیل‌های آماری، چارچوبی جامع برای ارزیابی سیرک‌های یخچالی و نقش آن‌ها در بازسازی اقلیم دیرینه و مدیریت پایدار منابع آب فراهم کرد. یافته‌ها مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری زیست‌محیطی در برابر چالش‌های گرمایش جهانی ارائه می‌دهند و می‌توانند در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب در مناطق کوهستانی کاربرد داشته باشند.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه یک تحلیل جامع از شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری، به‌ویژه سیرک‌ها، در حوضه آبریز رودخانه کوه‌رنگ، زاگرس مرکزی، ارائه داد. فهرست‌برداری و مشخصه‌یابی مورفومتریکی سیرک‌ها، اطلاعات ارزشمندی را در مورد تاریخچه یخچالی منطقه فراهم آورد و نقش حیاتی سیرک‌های یخچالی کوه‌رنگ را در پایداری هیدرولوژیکی و بازسازی اقلیم دیرینه نشان داد. تحلیل‌های چندبعدی با نمودارهای پیشرفته (نمودار ویولن، نقشه و نمودار حرارتی) بر اساس تخمین چگالی کرنل برای بصری‌سازی چگالی فضایی سیرک‌های یخچالی کواترنری در حوضه آبریز رودخانه کوه‌رنگ الگوهای فضایی و ژئومورفولوژیکی را روشن کردند.

این مطالعه یک تحلیل جامع از شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری، به‌ویژه سیرک‌ها، در حوضه آبریز رودخانه کوه‌رنگ، زاگرس مرکزی، ارائه داد. فهرست‌برداری و مشخصه‌یابی مورفومتریکی سیرک‌ها، اطلاعات ارزشمندی را در مورد تاریخچه یخچالی منطقه فراهم آورد و نقش حیاتی سیرک‌های یخچالی کوه‌رنگ را در پایداری هیدرولوژیکی و بازسازی را نشان داد. تحلیل‌های چندبعدی با نمودارهای پیشرفته (نمودار ویولن، نقشه و نمودار حرارتی) بر اساس تخمین چگالی کرنل برای بصری‌سازی چگالی فضایی سیرک‌های یخچالی کواترنری در حوضه آبریز رودخانه کوه‌رنگ الگوهای فضایی و ژئومورفولوژیکی را روشن کردند.

فراتر از اهمیت علمی برای بازسازی اقلیم دیرینه، میراث ژئومورفولوژیکی یخچالی در حوضه کوه‌رنگ پیامدهای مهمی برای پایداری محیطی دارد. حوضه‌های سیرکی در هیدرولوژی منطقه نقش داشته و مناطق مرتبط با مورفولوژی یخچالی پتانسیل خطرات طبیعی را دارند. سیرک‌های مرتفع شمالی به‌عنوان مخازن کلیدی آب، اولویت حفاظت دارند، درحالی‌که سیرک‌های جنوبی نیازمند استراتژی‌های سازگاری‌اند.

شناسایی نواحی با تراکم بالای سیرک و میراث ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری در حوضه کوه‌رنگ پیامدهای مستقیمی برای پایداری محیطی کنونی و آینده در حوضه کوه‌رنگ دارد:

حفاظت: سیرک‌های مرتفع شمالی باید از فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری یا توسعه زیرساختی محافظت شوند تا عملکرد هیدرولوژیکی آن‌ها حفظ شود.

سازگاری: افزایش دما ممکن است ذوب سیرک‌های کم‌ارتفاع را تسریع کند که نیازمند استراتژی‌های ذخیره‌سازی آب (مثل مخازن) هستند تا کاهش جریان فصلی جبران شود.

حساسیت به تغییرات اقلیمی: مناطق با تراکم بالای سیرک، به دلیل ارتفاع و وابستگی به فرایندهای سرد، نسبت به تغییرات اقلیمی آینده بسیار حساس هستند. پایش تغییرات در پوشش برف، یخچال‌های کوچک و رژیم هیدرولوژیکی در این نواحی از اهمیت بالایی برخوردار است.

مخاطرات طبیعی: دیواره‌های پستی پرشیب سیرک‌ها و دامنه‌های پرشیب محیط‌های یخچالی دیرینه، نواحی مستعدی

برای انواع خطرات، مثلاً سقوط سنگ، زمین‌لغزش‌های کوچک، یا فرسایش شدید خاک هستند. شناسایی این مناطق بر اساس مورفولوژی یخچالی می‌تواند در ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی کاربری اراضی برای کاهش آسیب‌پذیری جوامع و زیرساخت‌ها در پایین‌دست مفید باشد.

مدل‌سازی پیشرفته: پایش با LiDAR (قدرت تفکیک مکانی ۱ متر) برای سیرک‌های کلیدی و استفاده از مدل‌های اقلیمی (مثل CMIP6) برای پیش‌بینی تأثیرات گرمایش جهانی بر سیرک‌ها.

این یافته‌ها بر ضرورت درک فرایندهای شکل‌دهنده چشم‌انداز کوهستانی برای مدیریت پایدار منابع و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات محیطی تأکید می‌کنند و برای مدیریت منابع آب در برابر تغییرات اقلیمی حیاتی‌اند و به سیاست‌گذاری پایدار کمک می‌کنند. این پژوهش نشان می‌دهد که ژئومورفولوژی یخچالی یک جزء اساسی در رویکردهای جامع برای برنامه‌ریزی پایدار چشم‌انداز کوهستانی است و اطلاعات مبتنی بر مکان را برای تصمیم‌گیری‌های مؤثر در این زمینه فراهم می‌کند. این مطالعه با ارائه تحلیل‌های علمی و عملی، گامی مهم در راستای پایداری محیطی منطقه کوه‌رنگ برمی‌دارد و تحقیقات آینده با داده‌های تکمیلی و مدل‌سازی پیشرفته می‌تواند این نتایج را تقویت کند.

## منابع

- امیراحمدی، ابوالقاسم؛ گلی‌مختاری، لیلا؛ ناعمی‌تبار، مهناز (۱۴۰۲). بررسی آثار و شواهد یخچال‌های کواترنر پایانی در ارتفاعات بینالود. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۳ (۷۰)، ۲۴۹-۲۶۷. <https://doi.org/10.61186/jgs.23.70.249>
- بیرانوند، حجت‌اله؛ سیف، عبدالله (۱۳۹۹). تحلیل پارامترهای مورفومتری سیرک‌های یخچالی جبال بارز. *جغرافیا و توسعه*، ۱۸ (۶۰)، ۲۱۹-۲۳۸. <https://doi.org/10.22111/j10.22111.2020.5986>
- بیرانوند، حجت‌اله؛ سیف، عبدالله (۱۴۰۰). پارامترهای مورفومتری سیرک‌های یخچالی در ارتفاعات مرکزی استان کرمان. *جغرافیا*، ۱۹ (۷۱)، ۱۲۹-۱۴۹. [https://mag.iga.ir/article\\_248855.html](https://mag.iga.ir/article_248855.html)
- جعفری، غلامحسین؛ حضرتی، نسرين (۱۳۹۷). توزیع فضایی ارتفاع برف مرز کواترنری واحدهای ژئومورفیک ایران. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۸ (۲)، ۸۱-۱۰۴. <https://doi.org/10.22108/sppl.2018.109335.1163>
- جعفری، غلامحسین؛ حضرتی، نسرين (۱۳۹۷). قلمرو فرسایش یخچال‌های کواترنری در واحد ژئومورفیک شمالی ایران. *کواترنری ایران*، ۴ (۱)، ۶۷-۸۱. <https://doi.org/10.22034/irqua.2018.701988>
- جعفری، غلامحسین؛ حضرتی، نسرين (۱۳۹۸). مرز سیستم شکل‌زای یخچال کواترنری در حوضه‌های آبریز شمال‌غرب ایران. *هیدروژئومورفولوژی*، ۵ (۱۸)، ۷۹-۹۶. [https://hyd.tabrizu.ac.ir/article\\_8973.html](https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_8973.html)
- جعفری، غلامحسین؛ حضرتی، نسرين (۱۳۹۹). تجزیه و تحلیل روش‌های برآورد ارتفاع برف مرز دائمی یخچال‌های کواترنری در ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹ (۳۳)، ۲۳۹-۲۶۲. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.78427>
- جعفری، غلامحسین؛ ناصری، فروزان (۱۴۰۰). بررسی خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌های زاگرس در ارتباط با شرایط کارستی‌شدن. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۲ (۱)، ۲۵-۴۴. <https://doi.org/10.22108/gep.2020.124848.1350>
- رامشت، محمدحسین؛ لاجوردی، محمود؛ لشکری، حسن؛ محمودی محمدآبادی، طیبه (۱۳۹۰). ردیابی آثار یخچال‌های طبیعی (مطالعه موردی: یخچال طبیعی حوضه تیگرانی ماهان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۲ (۲)، ۵۹-۷۸. [https://gep.ui.ac.ir/article\\_18494.html?lang=fa](https://gep.ui.ac.ir/article_18494.html?lang=fa)
- سیف، عبدالله؛ بیرانوند، حجت‌اله (۱۴۰۳). بازسازی برف‌مرزهای دائمی کواترنر پایانی در ارتفاعات گرین در زاگرس ایران. *جغرافیا*، ۲۲ (۸۰)، ۱۵۱-۱۷۱. <https://doi.org/10.22034/iga.2024.712873>
- شش‌انگشت، سارا؛ آقا محمدی، حسین؛ کریمی، نعمت‌اله؛ عزیزی، زهرا؛ وحیدنیا، محمدحسن (۱۴۰۳). آشکارسازی مکانی-زمانی تغییرات ارتفاعی یخچال‌های طبیعی علم‌کوه با استفاده از داده‌های لیزراسکنینگ هوایی (LiDAR) و عکسبرداری با پهپاد (UAV). *اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۳۳ (۱۳۰)، ۷۹-۹۸. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2008881.3009>
- صالحی‌پور میلانی، علیرضا؛ لک، راضیه؛ یمانی، مجتبی (۱۳۹۸). شواهد ژئومورفولوژیکی رویدادهای هنریچ در شمال غرب ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۱۷ (۵۵)، ۱۰۹-۱۳۲. <https://doi.org/10.22111/gdij.2019.4582>
- صیدی‌شاهیوندی، مسلم؛ امیدوار، کمال؛ مظفری، غلامعلی؛ مزیدی، احمد (۱۴۰۴). واکاوی پیامد تغییرات اقلیمی بر ویژگی برف‌پوشان

- زاگرس میانی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۵ (۷۷)، ۲۲-۴۳.  
<https://doi.org/10.61186/jgs.25.77.9>
- طاهری، حمید (۱۴۰۱). بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کوه‌رنگ). پایان‌نامه کارشناسی/رشد هیدروژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.
- غضنفرپور، حسین؛ پورخسروانی، محسن؛ شیخ شریعتی کرمانی، بهناز (۱۳۹۹). بازسازی شرایط اقلیمی فاز اقل کواترنر در حوضه رودخانه شهداد. تحقیقات جغرافیایی، ۳۵ (۴)، ۳۴۳-۳۵۴.  
<http://georesearch.ir/article-1-944-fa.html>
- گورابی، ابوالقاسم؛ حسینی، سیدموسی؛ کامرانی، پویا (۱۴۰۱). پایش سیلاب‌های واریزه‌ای - یخچالی با استفاده از اینترفرومتری راداری مطالعه موردی: سیلاب مرداد ۱۴۰۱ اشترانکوه. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۴ (۴)، ۴۹۷-۵۱۱.  
<https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.355408.1007750>
- ناعمی‌تبار، مهناز؛ زنگنه‌اسدی، محمدعلی (۱۴۰۱). بررسی آنومالی حرارتی و رطوبتی بین زمان حال و پلیستوسن. آمایش جغرافیایی فضا، ۱۲ (۲)، ۹۹-۱۱۵.  
<https://doi.org/10.30488/gps.2022.273894.3369>
- نوحی، محمد؛ مددی، عقیل؛ عابدینی، موسی (۱۳۹۸). بررسی نقش عوامل تکتونیکی و اقلیمی دوره کواترنری در تحول ژئومورفولوژیکی سامانه‌های مخروط‌افکنه‌ای. تحقیقات جغرافیایی، ۳۴ (۲)، ۲۸۱-۲۹۲.  
<http://georesearch.ir/article-1-694-fa.html>
- یمانی، مجتبی (۱۳۸۶). ژئومورفولوژی یخچال‌های زردکوه (بررسی اشکال ژئومورفولوژیک و حدود گسترش آنها). پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۸ (۵۹)، ۱۲۵-۱۴۲.  
[https://jrg.t.ac.ir/article\\_18525.html](https://jrg.t.ac.ir/article_18525.html)

## References

- Ahmed, I., Sharma, V., Kumar, R., Lal, D., Bhandari, R., & Chand, P. (2023). Assessment of Existing Himalayan Glacier Inventories for Glacier Studies: A Case Study from the Ravi Basin of North-Western Himalaya (India). *Climate Change Adaptation*, 11, 109-134. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24659-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24659-3_6)
- Altınay, O., Sarıkaya, M. A., & Çiner, A. (2020). Late-glacial to Holocene glaciers in the Turkish mountains. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 2, 119-133. <https://doi.org/10.1007/s42990-020-00024-7>
- Amirahmadi, A., Goli Mokhtari, L., & Naemi Tabar, M. (2023). Investigation of the effects and evidence of late Quaternary glaciers on the Binaloud Heights. *Geographical Science*, 23(70), 249-267. <https://doi.org/10.61186/jgs.23.70.249>. (In Persian)
- Beranvand, H., & Seif, A. (2022). Morphometric parameters of glacial cirques in the heights of central Kerman Province. *Geography*, 19(71), 129-149. [https://mag.iga.ir/article\\_248855.html](https://mag.iga.ir/article_248855.html). (In Persian)
- Bieranvand, H., & Seif, A. (2020). The analysis of morphometric parameters of the remains of glacial cirques in JabalBarez altitudes in Würm. *Geography and Development*, 18(60), 219-238. <https://doi.org/10.22111/j10.22111.2020.5986>. (In Persian)
- Borah, S. B., Das, A. K., & Hazarika, N. (2022). Monitoring and assessment of glaciers and glacial lakes: Climate change impact on the Mago Chu Basin. *Regional Environmental Change*, 22, 124. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01984-2>
- Chang, L., Hoogakker, B.A., & Heslop, D. (2023). Indian Ocean glacial deoxygenation and respired carbon accumulation during mid-late Quaternary ice ages. *Nature Communications*, 14, 4841. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40452-1>
- Chen, Xj., Wang, J., & Zou, Ly. (2023). Ice flux of alpine glaciers controls erosion and landscape in the Nianbaoyeze Shan, northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 20, 1884-1899. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7769-8>
- Das, C., Sarmah, D. J., & Das, M. (2025). Assessing future glacial lake formation and GLOFs susceptibility in the Mago Watershed, Arunachal Pradesh, India. *Journal of Earth System Science*, 134, 111. <https://doi.org/10.1007/s12040-025-02561-x>
- Ghazanfarpour, H., Pourkhosravani, M., & Sheykhshariati Kermani, B. (2020). Reconstruction of the least phase Quaternary climate condition in Shahdad River Basin. *Geographical Research*, 35(4), 343-354. <http://georesearch.ir/article-1-944-fa.html>. (In Persian)
- Goorabi, A., Hosseini, S. M., & Kamrani, P. (2023). Monitoring of debris-glacial floods by radar

- interferometry (Case study: Debris-glacial flood of 2022 in Oshtorankuh East Lorestan). *Physical Geography Research*, 54(4), 497-511. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.355408.1007750>. (In Persian)
- Hu, J., Yao, X., & Zhang, C. (2024). Spatial and temporal changes of glaciers and glacial lakes in the Northern Tianshan Mountains over the past 30 years. *Journal of Geographical Sciences*, 34, 1857-1880. <https://doi.org/10.1007/s11442-024-2274-3>
- Issac, I., Goel, N. K., & Schwanghart, W. (2025). Comprehensive analysis of hydrological and glacial dynamics in the Himalayas: Addressing glacial lake outburst flood risks in hydropower development. *Natural Hazards*, 121, 5571-5588. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07042-w>
- Jacquemart, M., Welty, E., Gastaldello, M., & Carcanade, G. (2025). glenglat: A database of global englacial temperatures. *Earth System Science Data*, 17, 1627-1666. <https://doi.org/10.5194/essd-17-1627-2025>
- Jafari, G. H., & Hazrati, N. (2018). Investigation of the domain of Quaternary glacial erosion in the northern geomorphic unit of Iran. *Quaternary Journal of Iran*, 4(1), 67-81. <https://doi.org/10.22034/irqua.2018.701988>. (In Persian)
- Jafari, G. H., & Hazrati, N. (2018). Spatial distribution of Quaternary ELA in Iran geomorphic units. *Spatial Planning*, 8(2), 81-104. <https://doi.org/10.22108/sppl.2018.109335.1163>. (In Persian)
- Jafari, G. H., & Hazrati, N. (2019). The boundary of the Quaternary glacial morphogenes system in the water basins of the northwest of Iran. *Journal of Hydrogeomorphology*, 6(18), 79-96. [https://hyd.tabrizu.ac.ir/article\\_8973.html](https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_8973.html). (In Persian)
- Jafari, G. H., & Hazrati, N. (2020). Best method in estimating the equilibrium-line altitude of late Quaternary glaciers in Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 239-262. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.78427>. (In Persian)
- Jafari, G., & Nasery, F. (2021). Analysis of physiographic characteristics of Zagros sub-basins in relation to karstization conditions. *Geography and Environmental Planning*, 32(1), 25-44. <https://doi.org/10.22108/gep.2020.124848.1350>. (In Persian)
- Khadka, N., Chen, X., & Sharma, S. (2023). Climate change and its impacts on glaciers and glacial lakes in Nepal Himalayas. *Regional Environmental Change*, 23, 143. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02142-y>
- Kleber, G. E., Hodson, A. J., & Magerl, L. (2023). Groundwater springs formed during glacial retreat are a large source of methane in the high Arctic. *Nature Geoscience*, 16, 597-604. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01210-6>
- Kunmar, P., Rana, A. S., & Kumar, V. (2025). Glacial landforms and geometric transformations: Tracing the history of Pensilungpa and Durung-Drung glaciers in Suru and Doda River valleys, Western Himalaya, Ladakh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 272. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13727-x>
- Li, H., Liu, S., & Hu, K. (2024). Differential depression of the glacier equilibrium-line altitude in the Yarlung Zangbo Downstream Basin in the Last Glacial Maximum compared to the pre-industrial era. *Journal of Geographical Sciences*, 34, 1157-1173. <https://doi.org/10.1007/s11442-024-2243-x>
- Mohanty, L. K., & Maiti, S. (2022). Glacial lake formation probability mapping in the Himalayan glacier: A probabilistic approach. *Journal of Earth System Science*, 131, 54. <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01772-2>
- Naemi Tabar, M., & Zanganeh Asadi, M. (2022). Investigation of thermal and humidity anomalies between the present and Pleistocene and reconstruction of climatic conditions using geomorphic evidence (Case study: Northeastern heights of Binalood). *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 12(2), 99-115. <https://doi.org/10.30488/gps.2022.273894.3369>. (In Persian)
- Nouhi, M., Madadi, A., & Aedini, M. (2019). Role of Quaternary tectonic and climatic factors on the geomorphological changes of Meshkin Shahr depression alluvial fans. *Geographical Research*, 34(2), 281-292. <http://georesearch.ir/article-1-694-fa.html>. (In Persian)
- Poussin, C., Peduzzi, P., & Chatenoux, B. (2025). a37 years [1984-2021] Landsat/Sentinel-2

- derived snow cover time-series for Switzerland. *Scientific Data*, 12, 632. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04961-6>
- Ramesht, M. H., Lajevardi, M., Lashkari, H., & Mahmoudi Mohammad Abadi, T. (2011). Study of natural glacial evidences in Mahan (Case study: Glacier of Tigrany Mahan Basin). *Geography and Environmental Planning*, 22(2), 59-78. [https://gep.ui.ac.ir/article\\_18494.html?lang=en](https://gep.ui.ac.ir/article_18494.html?lang=en). (In Persian)
- Ritse, V., Hazarika, N., & Kulnu, A. S. (2025). Shrinking Himalayan glaciers: Glacier inventory, glacial cover mapping and changes in Eastern Himalayas, India. *Journal of Earth System Science*, 134, 27. <https://doi.10.1007/s12040-024-02490-1>
- Rounce, D. R., Hock, R., & Maussion, F. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, 379, 78–83. <https://doi.10.1126/science.abo1324>
- Sain, K. (2022). Need for development of AI-based integrated warning system (IWS) for mitigation of glaciers/glacial-lakes related hazards with special reference to Uttarakhand Himalaya. *Journal of the Geological Society of India*, 98, 1012–1014. <https://doi.10.1007/s12594-022-2109-8>
- Salehipour, A. R., Lak, R., & Yamani, M. (2019). Heinrich climatic events in north west of Iran in late Pleistocene. *Geography and Development*, 17(55), 109-132. <https://doi.org/10.22111/gdij.2019.4582>. (In Persian)
- Schaffer, N., & MacDonell, S. (2022). A framework to classify glaciers for water resource evaluation and management in the Southern Andes. *The Cryosphere*, 16, 1779–1791. <https://doi.10.5194/tc-16-1779-2022>
- Seif, A., & Beranvand, H. (2024). ELA reconstruction of late Quaternary in the Green Mountain in Zagros, Iran. *Geography*, 22(80), 151-171. <https://doi.org/10.22034/iga.2024.712873>. (In Persian)
- Seydi, M., Omidvar, K., Mozafari, G., & Mazidi, A. (2025). Analysis of the consequences of climate change on the characteristics of middle Zagros snow cover using remote sensing data. *Applied Researches in Geographical Sciences*, 25(77), 22-43. <https://doi.org/10.61186/jgs.25.77.9>. (In Persian)
- Sheshangosht, S., Agamohammadi, H., Karimi, N., Azizi, Z., & Vahidnia, M. H. (2024). Use of UAVs and LiDAR to identify the spatiotemporal elevation changes of AlamKooch Glacier. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(130), 79-98. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2008881.3009>. (In Persian)
- Song, C., Fan, C., & Ma, J. (2025). A spatially constrained remote sensing-based inventory of glacial lakes worldwide. *Scientific Data*, 12, 464. <https://doi.10.1038/s41597-025-04809-z>
- Spreafico, M.C., Sternai, P. & Agliardi, F. (2021). Paraglacial rock-slope deformations: sudden or delayed response? Insights from an integrated numerical modelling approach. *Landslides*, 18, 1311–1326. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01560-x>
- Taheri, H. (2022). Investigation of Quaternary glacial geomorphological evidence (Case study: Koohrang River Basin) [Master's thesis, Khorramshahr University of Marine Science and Technology]. (In Persian)
- Tavus, B., Kocaman, S., & Nefeslioglu, H.A. (2024). Analysing slope dynamics of Kaleköy (Türkiye) dam reservoir with Sentinel-1 SAR time series and Sentinel-2 spectral indices. *Environmental Earth Sciences*, 83, 510. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11807-8>
- Tembotov, R., Gangapshv, A., & Gezhaev, A. (2025). Assessment of radioactivity of cryoconites from glaciers of Elbrus Mountain and glacial soils of Elbrus region, Russia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 8057–8068. <https://doi.10.1007/s13762-024-06179-2>
- Valle, B., Gobbi, M., & Tognetti, M. (2022). Glacial biodiversity of the southernmost glaciers of the European Alps (Clapier and Peirabroc, Italy). *Journal of Mountain Science*, 19, 2139–2159. <https://doi.10.1007/s11629-022-7331-8>
- Vemuri, S., Gautam, D., & Gandhi, S. (2024). Glacial retreat delineation using machine and deep learning: A case of a lower Himalayan region. *Journal of Earth System Science*, 133, 82. <https://doi.10.1007/s12040-024-02285-4>

- Yamani, M. (2007). Geomorphology of Zardkuh glaciers (Study of geomorphological forms and their extent). *Geographical Research Journal*, 38(59), 125-142. [https://jrg.ut.ac.ir/article\\_18525.html](https://jrg.ut.ac.ir/article_18525.html). (In Persian)
- Yongping, Q., & Jianhua, H. (2025). Spatial-temporal evolution of glacial lakes and multi-phase geological hazards susceptibility evaluation of Midui Gully, Xizang. *Environmental Earth Sciences*, 84, 301. <https://doi.10.1007/s12665-025-12315-z>