

تعیین ارتفاع خط تعادل (ELA) در دره هراز در آخرین دوره یخچالی

مجتبی یمانی؛ استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
حمزه زمانی*؛ استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه پیام نور، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰

چکیده

گسترش و بسط نظریه یخبندان کواترنری با تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافتن ارتباط میان جهت و ارتفاع ناهمواری و چگونگی پدید آمدن اشکال مورفولوژی یخچالی هدفی است که این تحقیق بنیادی در تلاش برای نیل به آن است. بر این اساس، اهداف فرعی زیر مطرح می‌شود: الف) شناخت اشکال مورفولوژی یخچالی در دره هراز، و ب) تعیین مرزهای یخچالی کواترنری در البرز مرکزی. دره هراز، از دامنه آزادکوه تا دره اصلی هراز در زردبند، با روند شرقی-غربی محل تشکیل اشکال ژئومورفولوژی یخچالی است. این مقاله درصدد است تا با رویکردی آماری، ضمن مطالعه حدود گسترش یخبندان‌های دوره کواترنری و بازسازی ارتفاع خط تعادل (ELA)، به بررسی توزیع سیرک‌های یخچالی منطقه و ارتفاع برف‌مرز در دوره یخچالی وورم بپردازد. برای بررسی و بیان چگونگی توزیع سیرک‌های یخچالی از روش‌های آمار توصیفی و آزمون خی دو استفاده شده است. روش‌های گوناگونی برای بازسازی ELA وجود دارد که در اینجا، با روش بررسی کف سیرک، ارتفاع برف‌مرز دوره وورم تعیین می‌شود. نتایج تحقیق ثابت می‌کند که در مورد سیرک‌های یخچالی بین فراوانی‌های مشاهده شده و فراوانی‌های مورد انتظار، تفاوت معناداری وجود دارد و توزیع این سیرک‌ها ناشی از جهت ناهمواری است. در مورد ارتفاع برف‌مرز دوره گذشته نیز ادغام روش بررسی کف سیرک و روش‌های آماری پیشنهاد می‌دهد که در این حوضه، میانگین ارتفاع سیرک‌های یخچالی ۲۷۹۹ متر و مقدار نما ۲۷۰۶ متر است. مقدار نما در سیرک‌های رو به قطب دارای ارتفاع ۲۸۷۴ متر و در سیرک‌های رو به استوا دارای ارتفاع ۲۹۴۱ متر است.

کلیدواژه‌ها: آخرین دوره یخچالی، ارتفاع خط تعادل، دره هراز، سیرک یخچالی، یخچال.

مقدمه

یخچال‌ها شاخص‌های تغییر اقلیم است و یخچال‌های سیرکی شاید بهترین مورد برای این منظور باشد، چرا که اندازه و حجم اندک آن و نیز سرعت زیاد در واکنش آن به تغییرات مثبت یا منفی، که معمولاً طی دو سال آشکار می‌شود، باعث شده تا از آن به‌مثابه شواهدی برای تغییر اقلیم استفاده کنند (سینگ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۴۴). در دوره کواترنری، شرایط یخچالی و بین‌یخچالی، به‌تناسب، به‌وقوع پیوسته و شواهد ژئومورفولوژیکی انکارناپذیری برجای گذاشته است که می‌توان از آن در تعیین برف‌مرز و حدود گسترش یخچالی و نیز مطالعه تغییرات اقلیمی آن دوره استفاده کرد. این امر، بدین دلیل امکان‌پذیر است که فرایندهای بیرونی تغییردهنده شکل زمین نتوانسته است به‌طور کامل آثار باقی‌مانده از فرسایش یخچالی کواترنری را از بین ببرد.

ژاک دو مورگان (۱۸۹۵) در اثر چهار جلدی خود به نام *مأموریت علمی در ایران*، به وجود سیرک یخچالی در لرستان اشاره کرده است. از آن پس، می‌توان به مطالعات باسک (۱۹۸۳)، بوبک (۱۹۳۴، ۱۹۳۷، ۱۹۵۷ و ۱۹۶۳)، دزیو

(۱۹۳۴)، هایبروک (۱۹۴۰)، هاردینگ (۱۹۵۷)، پگی (۱۹۵۹)، بوت و همکاران (۱۹۶۱)، رایت (۱۹۶۲)، مک‌کویلان (۱۹۶۹)، شوایتزر (۱۹۷۲)، هوروات (۱۹۷۵)، گرونرت و همکاران (۱۹۷۸)، و فریگنو (۱۹۸۸) اشاره کرد. برخی زمین‌شناسان و ژئومورفولوژیست‌های داخلی نیز مطالعات ارزش‌مندی در این زمینه داشته‌اند؛ برای مثال، محمودی (۱۳۶۷)، پدرامی (۱۳۶۲)، یمانی (۱۳۸۱)، یمانی و همکاران (۱۳۹۲)، رامشت و نعمت‌الهی (۱۳۸۴)، و رامشت (۱۳۸۱). اخیراً، مطالعات ارزش‌مندی در نقاط مختلف ایران صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: سیف (۲۰۱۵) در مورد پایین‌رفتن ELA در اشترانکوه، و سیف و ابراهیمی (۲۰۱۴ و ۲۰۱۶) در تحلیل مورفومتری سیرک‌های زردکوه بختیاری در محیط GIS.

شوایتزر (۱۹۷۲: ۲۲۹) ارتفاع کنونی برف‌مرز دائم البرز را ۴۱۵۰ متر ذکر کرده است. دربارهٔ مرزهای گسترش یخچالی و ارتفاع برف دائم در البرز مرکزی نیز نظریه‌های مختلفی طرح شده است. به‌نظر بوبک و شوایتزر پایین‌آمدن ارتفاع خط برف در دوره‌های سرد پلیستوسن حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر نسبت به حد امروزی بوده است (جداری عبوسی، ۱۳۷۴: ۷۴-۵)؛ یعنی، در البرز مرکزی بین ۳۲۰۰ تا ۳۷۰۰ متر، یا بین ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر. اهلرز (۱۳۷۲: ۱۰۷) با استناد به کارهای هوورمن^۱ (۱۹۶۰) برف‌مرز دائم را در پلیستوسن ۲۰۰ متر پایین‌تر از آنچه دانسته است که بوبک و شوایتزر نقل می‌کنند؛ یعنی، بین ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر یا بین ۲۸۰۰ تا ۳۳۰۰ متر. پژوهش‌های اخیر نشان داد که حد گسترش یخچال‌های دورهٔ وورم در دامنه‌های شمالی علم‌کوه و تخت‌سلیمان ۲۸۰۰ متر و در دامنه‌های جنوبی آن ۳۱۰۰ متر است (یمانی، ۱۳۸۱: ۱۵).

این تحقیق در پی یافتن پاسخ برای این پرسش‌هاست: الف) مرز یخبندان کواترنری در درهٔ هراز در آخرین دورهٔ یخچالی در چه ارتفاعاتی قرار دارد؟ ب) بین فراوانی، حجم و توزیع سیرک‌های یخچالی و از طرفی توپوگرافی و راستای ناهمواری‌ها چه ارتباطی وجود دارد؟

موقعیت و حدود منطقه

منطقهٔ مورد مطالعه حوضهٔ آبریز هراز است که به شکل مستطیل کشیده‌ای بین نصف‌النهارهای $۱۰^{\circ} ۲۶' ۵۱''$ و $۱۷^{\circ} ۴۵' ۱۷''$ شرقی و مدارهای $۳۶^{\circ} ۱۶' ۳۹''$ و $۳۶^{\circ} ۱۷' ۱۷''$ شمالی قرار دارد. این منطقه با ۱۲۹۲ کیلومتر مربع مساحت در قسمت میانی البرز مرکزی واقع شده است. آبراههٔ اصلی آن حدود ۹۰ کیلومتر طول دارد و جهت آن غربی-شرقی است. مرتفع‌ترین نقطهٔ آن آزادکوه با ارتفاع ۴۳۹۰ متر است و پایین‌ترین نقطهٔ حوضه حدود ۷۵۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد (شکل ۱).

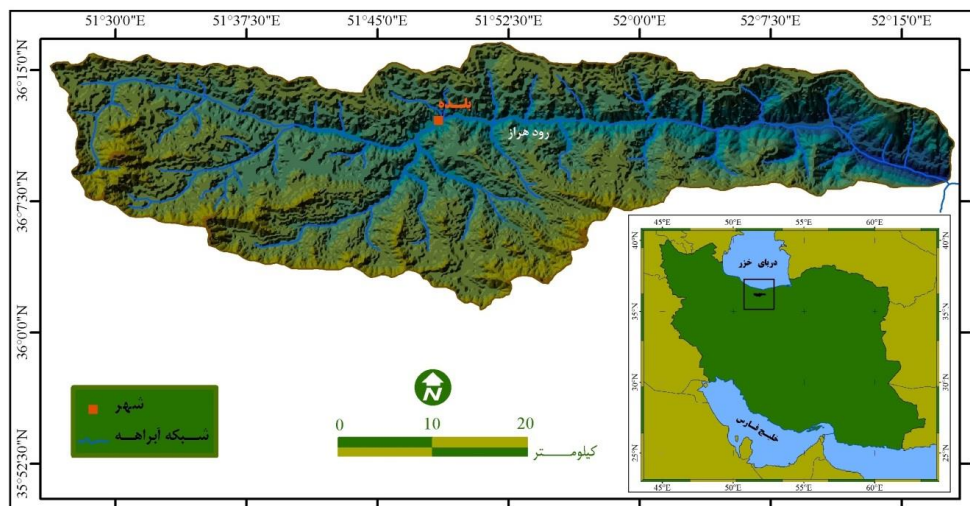
مواد و روش‌ها

این تحقیق عمدتاً تحقیقی بنیادی است و هدف کلی گسترش و بسط نظریهٔ یخبندان کواترنری با تجزیه و تحلیل داده‌هاست. بر این اساس، اهداف زیر را می‌توان ذکر کرد: الف) شناخت اشکال مورفولوژی یخچالی در درهٔ هراز، ب) تعیین مرزهای یخچالی کواترنری در البرز مرکزی، ج) مطالعهٔ اختلاف‌های موجود در مرزهای تشکیل و گسترش یخچالی در دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی و شناخت علل این اختلاف‌ها، و د) دستیابی به تغییرهایی که احتمالاً در اختلاف ارتفاع مرزهای یخچالی این دو پهنه مؤثر است.

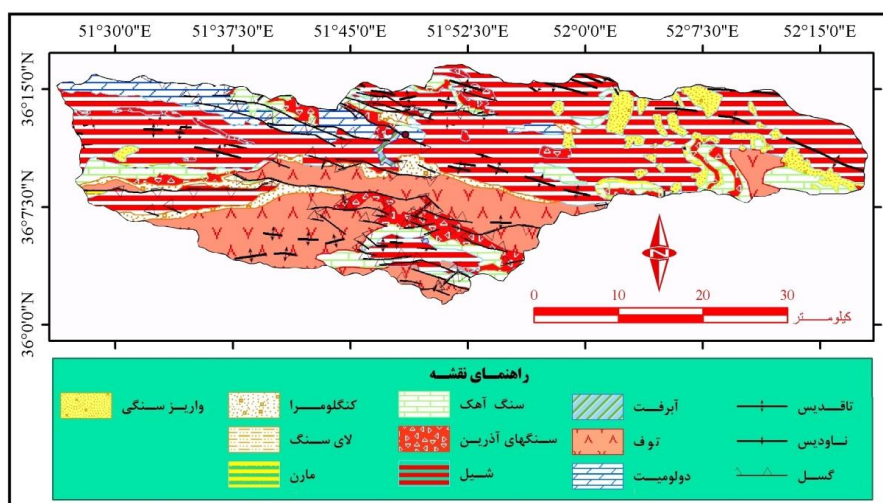
تحقیق حاضر، بر پایهٔ روشی تجربی استوار است. برای مقایسهٔ اختلاف متغیرهای عامل در دو دامنهٔ شمالی و جنوبی حوضه از روش تحلیلی استفاده شده است. تکنیک کار بر پایهٔ مقایسهٔ ارتفاع سیرک‌ها و تعیین حدود گسترش زبانه‌های یخچالی در دو دامنهٔ شمالی و جنوبی استوار است. در مرحلهٔ بعد، داده‌ها با مشاهدهٔ مستقیم و کارهای میدانی تفصیلی با استفاده از GPS و نیز مشاهدات غیرمستقیم با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰ منطقه و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجندهٔ ETM+) گردآوری شده است. تمامی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و SPSS تحلیل شد و از طریق نقشه‌های موضوعی متعدد نمایش داده شده است. برای

تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش‌های آمار توصیفی استفاده شد و توزیع آن بر اساس آزمون خبی دو (Chi-Square Test) تحلیل شده است.

شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد. امتداد چین خوردگی‌ها شمال غربی - جنوب شرقی و روراندگی اصلی البرز نیز با روند تقریبی شرقی - غربی از جنوب منطقه عبور می‌کند.



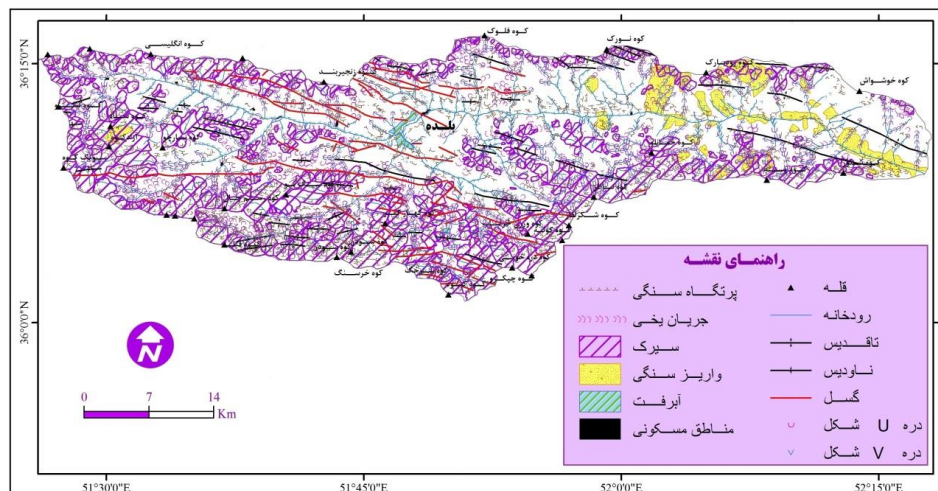
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (ترسیم: نگارندگان)



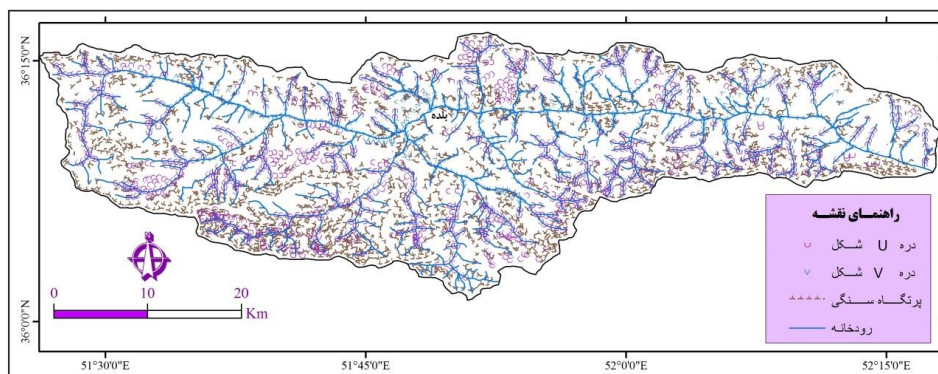
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ آمل)

یافته‌های پژوهش

شکل‌های اصلی ژئومورفولوژی یخچالی منطقه (شکل ۳) عبارت است از دره‌های U شکل و V شکل، پرتگاه سنگی، مسیرهای جریان یخ، پهنه‌های آبرفتی، سیرک‌های یخچالی و واریزه سنگی. فرم دره‌ها (شکل ۴) در بیشتر دره‌های فرعی، به‌ویژه دره‌های در دامنه‌های رو به شمال از نوع U شکل و در دره اصلی V شکل است.



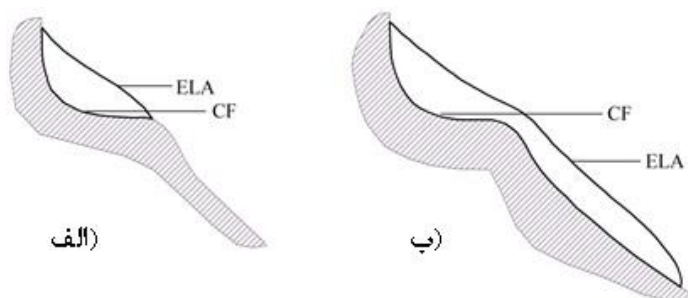
شکل ۳. نقشه ژئومورفولوژی دره هراز (ترسیم: نگارندگان)



شکل ۴. شکل دره‌ها در دره هراز (ترسیم: نگارندگان)

پورتر (۲۰۰۱: ۱۰۶۸) در مطالعه کوهستان‌های یخچالی عرض‌های پایین، از پنج روش برای بازسازی ارتفاع خط تعادل^۱ (ELA) استفاده کرد. وی معتقد است از آنجا که این روش‌ها از نظر شیوه با یکدیگر تفاوت دارد، نتایج حاصل از این روش‌ها با یکدیگر مقایسه‌پذیر نیست. این پنج روش عبارت است از ۱. روش مطالعه کف سیرک، ۲. روش بررسی یخرفت‌های جانبی قسمت بالای دره، ۳. روش آستانه‌های یخبندان، ۴. روش نسبت ارتفاع، و ۵. روش نسبت انباشتگی-مساحت. از میان روش‌های ذکرشده، روش مطالعه کف سیرک برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است؛ به دلیل اینکه بر اساس نظر پورتر، هنگامی که یخچالی فقط سیرک را پرمی‌کند، ELA دائمی آن معمولاً خیلی بالاتر از میانگین ارتفاع کف سیرک^۲ (CF) نیست. شکل ۵ دو نوع از چنین سیرک‌هایی را نشان می‌دهد؛ در قسمت الف یخچالی نمایش داده شده که محدود به سیرک است و قسمت ب سیرکی را نشان می‌دهد که در بالادست یخچالی دره‌ای قرار دارد. بنابراین، در چنین مواقعی، محاسبه ارتفاع کف سیرک روش مناسبی در تعیین ارتفاع خط تعادل‌های گذشته است. در این حالت، با پایان یافتن دوره سرد پلیستوسن، برف‌مرز از سطح سیرک بالاتر می‌رود و در نتیجه، یخچال‌های سیرکی نیز از بین می‌رود.

1. equilibrium line altitude
2. cirque floor



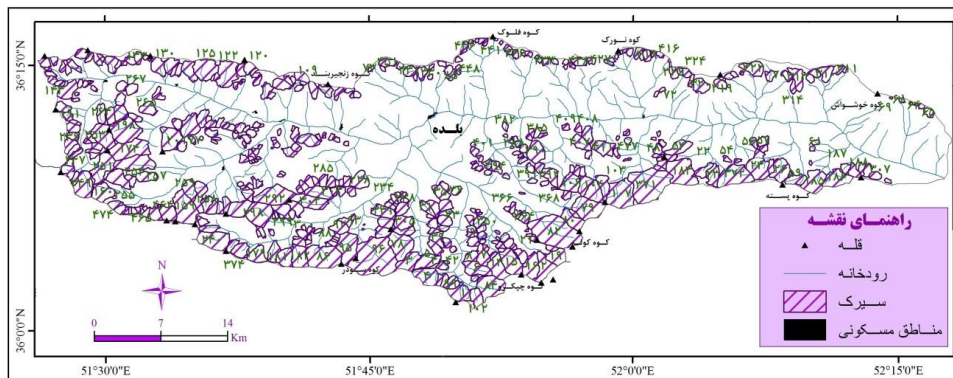
شکل ۵. انواع سیرک‌های یخچالی در روش مطالعه کف سیرک (اقتباس از: پورتر، ۲۰۰۱: ۱۰۶۹)

دره هراز به دلیل روند رشته کوه‌های مشرف بر آن و جهت شرقی-غربی دره اصلی، از نظر توسعه و تکوین سیرک‌های یخچالی شرایط مساعدی در منطقه البرز مرکزی دارد، به طوری که تعداد ۴۷۷ سیرک یخچالی در این حوضه شناسایی شده است (جدول ۱). شکل ۶ نقشه پراکندگی سیرک‌های یخچالی را در دره هراز نشان می‌دهد. بررسی آماری و محاسبات انجام گرفته با نرم افزار ArcGIS در مورد سیرک‌های یخچالی حوضه حاکی از آن است که در دوره‌های یخچالی کوتاه‌تری، دست کم ۴۲۵ کیلومترمربع از مساحت حوضه تحت سیطره یخچال‌ها بوده است که این مساحت، حدود ۳۳ درصد کل حوضه را شامل می‌شود. کف مرتفع‌ترین سیرک در ارتفاع ۳۵۵۲ متر و پایین‌ترین سیرک در ارتفاع ۱۵۶۸ متر قرار داشته است. میانگین حسابی ارتفاع سیرک‌ها، رقم ۲۷۹۰ متر را بیان می‌کند. تعداد ۸۵ سیرک در جهت شمال قرار دارد که ۱۸ درصد سیرک‌های منطقه را شامل می‌شود. پس از آن سیرک‌های شمال شرقی و شمال غربی به ترتیب با حدود ۱۴ و ۱۲ درصد بیشترین فراوانی را دارد. سیرک‌های رو به جنوب غرب با ۴۴ سیرک کمترین فراوانی را در این حوضه دارد. از نظر ارتفاع، سیرک‌های غربی با میانگین ارتفاع ۲۸۹۸ متر در سطح بالاتری نسبت به بقیه قرار دارد، و سیرک‌های شمالی با میانگین ۲۷۰۵ متر ارتفاع، از همه پایین‌تر و در عین حال، با میانگین مساحت ۱/۴ کیلومترمربع از همه تکامل یافته‌تر است. کوچک‌ترین سیرک ۰/۱۵ کیلومترمربع و بزرگ‌ترین سیرک حوضه حدود ۱۲ کیلومترمربع وسعت دارد.

جدول ۱. توزیع فراوانی سیرک‌های یخچالی در دره هراز

دره هراز	فراوانی	درصد	جهت‌های جغرافیایی و شاخص‌های پراکندگی
	۸۵	۱۷/۹	شمال
	۶۸	۱۴/۳	شمال شرق
	۵۵	۱۱/۶	شرق
	۵۳	۱۱/۲	جنوب شرق
	۵۹	۱۲/۴	جنوب
	۴۴	۹/۲	جنوب غرب
	۵۳	۱۱/۲	غرب
	۵۸	۱۲/۲	شمال غرب
	۴۷۵	۱۰۰	جمع مقادیر (ΣX)
	۸		تعداد داده‌ها (n)
	۵۹/۴		میانگین حسابی (\bar{x})
	۲۹۲۷۳		جمع مربعات مقادیر (ΣX^2)
	۱۲/۴		انحراف معیار نمونه (σ_n)
	۱۱/۶		انحراف معیار جامعه (σ)
	۲۶۶	۵۶	دامنه‌های رو به قطب
	۲۰۹	۴۴	دامنه‌های رو به استوا

(منبع: یافته‌های پژوهش)



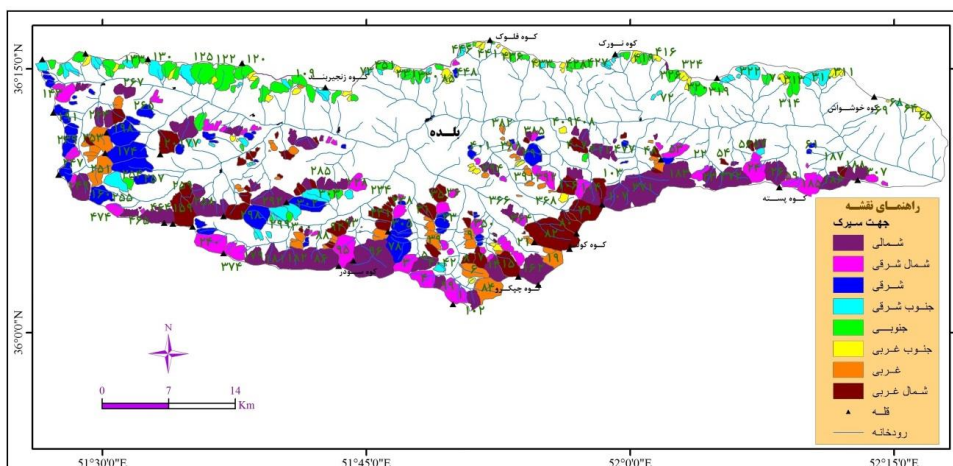
شکل ۶. نقشه پراکندگی سیرک‌های یخچالی در دره هراز (ترسیم: نگارندگان)

کوچک‌ترین سیرک‌های حوضه نیز در جهت جنوب‌غربی قرار دارد و میانگین مساحت سیرک‌های حوضه ۹۰ کیلومتر مربع است. جدول ۲ خلاصه مشخصات سیرک‌های یخچالی و شکل ۷ نقشه جهت سیرک‌های یخچالی دره هراز را نشان می‌دهد.

جدول ۲. خلاصه مشخصات سیرک‌های یخچالی دره هراز

جهت	فراوانی	درصد	میانگین ارتفاع (متر)	میانگین مساحت (متر مربع)
شمال	۸۵	۱۷/۹	۲۷۰۵	۱۴۷۳۰۳۶
شمال شرق	۶۸	۱۴/۳	۲۷۴۱	۹۰۲۳۷۵
شرق	۵۵	۱۱/۶	۲۸۴۶	۱۰۴۰۲۳۳
جنوب شرق	۵۳	۱۱/۲	۲۸۲۰	۵۵۵۴۹۶
جنوب	۵۹	۱۲/۴	۲۸۷۲	۶۹۰۹۴۳
جنوب غرب	۴۴	۹/۲	۲۸۶۴	۳۱۲۵۴۸
غرب	۵۳	۱۱/۲	۲۸۹۸	۶۳۵۰۰۵
شمال غرب	۵۸	۱۲/۲	۲۷۲۵	۱۱۶۴۴۶۷
جمع	۴۷۵	۱۰۰	۲۷۹۹	۹۰۳۰۲۳

(منبع: یافته‌های پژوهش)



شکل ۷. نقشه جهت سیرک‌های یخچالی در دره هراز (ترسیم: نگارندگان)

بحث و نتیجه گیری

همواره فرض بر این بوده است که بین فراوانی، حجم و توزیع سیرک‌های یخچالی، با توپوگرافی و راستای ناهمواری‌ها ارتباطی وجود دارد. در اینجا، برای اثبات معنادار بودن چنین رابطه‌ای از روش‌های آماری استفاده شده است. چون مقیاس اندازه‌گیری ما جهت‌های جغرافیایی است که ارزش اسمی دارد، بنابراین، برای آزمون معنادار بودن توزیع متغیر در جامعه، به استفاده از آزمون‌های غیرپارامتریکی ملزمیم. داده‌های مربوط به جهت سیرک‌ها پس از دسته‌بندی در جهت‌های هشت‌گانه جغرافیایی و محاسبه شاخص‌های پراکندگی، و طبقه‌بندی پراکندگی سیرک‌های یخچالی بر اساس جهت آن‌ها به طرف قطب یا استوا در جدول ۱ آمده است. ملاحظه می‌شود که ۵۶ درصد سیرک‌ها رو به قطب و ۴۴ درصد رو به استواست. پس از آن، توزیع آن‌ها بر اساس آزمون خی دو تحلیل می‌شود (رابطه ۱).

$$X^2 = \frac{\sum (O - E)^2}{E} \quad (1)$$

که در آن O فراوانی مشاهده شده، E فراوانی مورد انتظار و X^2 آزمون مجذور خی است (باتاچاریا و جانسون، ۱۳۶۶: ۴۹۷). جدول ۳ فراوانی سیرک‌های مشاهده شده و مورد انتظار را در دره هراز نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، فرض صفر رد شده است. این بدان معناست که در این حوضه، سیرک‌های یخچالی در جهت رو به قطب گسترش بیشتری داشته است. بررسی آماری فراوانی جهت سیرک‌های یخچالی نیز مؤید همین امر است، به طوری که از مجموع ۴۷۵ سیرک یخچالی واقع در حوضه، تعداد ۲۶۶ سیرک رو به قطب و ۲۰۹ سیرک رو به استوا بوده است. بنابراین، شکل‌گیری سیرک‌های یخچالی در این منطقه تابعی از جهت ناهمواری است. به دیگر سخن، دامنه‌های رو به قطب که میزان انرژی کمتری از خورشید دریافت می‌کند، بستر مناسبی برای تشکیل سیرک‌ها و دیگر اشکال مورفولوژی یخچالی است.

تحلیل شکل‌گیری سیرک‌های یخچالی در ارتفاعات مختلف با بررسی سیرک‌هایی که در سطوح ارتفاعی واقع بین منحنی‌های متوالی با فاصله ۱۰۰ متر قرارداد نیز، با روش‌های آماری تحلیل شد تا ارتفاع برف‌مرز دائم در آخرین دوره یخبندان کواترنری در هر یک از جهت‌های هشت‌گانه حوضه هراز به دست آید.

جدول ۳. آزمون مجذور خی (X^2) در دره هراز

سیرک‌ها	شمال شرق	شمال	شمال غرب	غرب	جنوب غرب	جنوب	جنوب شرق	شرق	کل
فراوانی مشاهده شده (O)	۸۵	۶۸	۵۵	۵۳	۵۹	۴۴	۵۳	۵۸	۴۷۵
احتمال تحت فرض H_0	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۱
فراوانی مورد انتظار (E)	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۵۹/۳۷۵	۴۷۵
$\frac{(O - E)^2}{E}$	۱۱/۰۵۹	۱/۲۵	۰/۳۲	۰/۶۸	۰/۰۰۲	۳/۹۸	۰/۶۸	۰/۰۳	۱۸
									$X^2 =$ d.f = ۷

تحلیل: چون ۵ درصد بالایی خی دو با $d.f = ۷$ برابر $۱۴/۰۶۷۱$ و مقدار خی دو به دست آمده، از آن بیشتر است، فرض صفر در $\alpha = ۰/۰۵$ یا ۵ درصد رد می‌شود و می‌توانیم نتیجه بگیریم که به نظر می‌رسد در حوضه هراز اختلاف معناداری بین مشاهدات و فرض تحقیق وجود دارد. (منبع: یافته‌های پژوهش)

به منظور مقایسه ارتفاع متوسط سیرک‌های یخچالی و ارتفاعی که سیرک‌ها بیشترین فراوانی را در آن ارتفاع داشته است، میانگین حسابی و مد یا نمای هر یک از جوامع آماری محاسبه شده است. همان‌طور که می‌دانیم نما، مقداری از متغیر است که چگالی آن از مقادیر مجاورش بیشتر و احتمال تحقق آن از همه بیشتر است (علیچانی و کاویانی، ۱۳۷۱: ۴۷۲). از فرمول کلی (۲) برای محاسبه مد استفاده شده است.

$$M_o = L + \frac{d_1}{d_1 + d_2} \times h \quad (2)$$

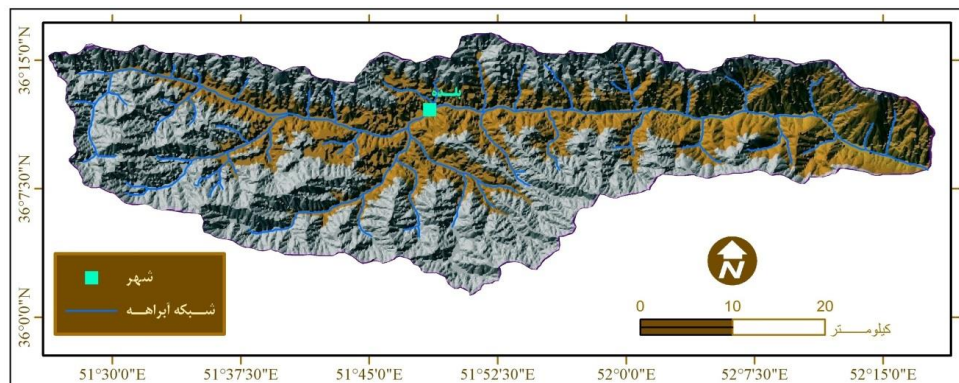
که در آن L حد پایین طبقه نمادار، d_1 تفاضل طبقه قبل از طبقه نمادار از فراوانی طبقه نمادار، d_2 تفاضل طبقه بعد از طبقه نمادار از فراوانی طبقه نمادار، و h فاصله طبقات است (مهدوی، ۱۳۷۲: ۷۳).

جدول ۴ توزیع فراوانی ارتفاع سیرک‌های یخچالی را در دره هراز نشان می‌دهد. در این حوضه، میانگین ارتفاع سیرک‌های یخچالی ۲۷۹۹ متر و مقدار نما ۲۷۰۶ متر است. شکل ۸ میانگین برف‌مرز دره هراز را در آخرین دوره یخچالی نشان می‌دهد که بر اساس بیشترین فراوانی وقوع (نما) سیرک‌های یخچالی تهیه شده است.

جدول ۴. توزیع فراوانی ارتفاع کف سیرک‌های یخچالی در دره هراز

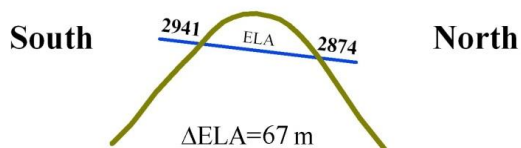
درصد	شمال غرب	غرب	جهت				شمال شرق	شمال	فراوانی سیرک‌ها	مختلص میزان
			جنوب غرب	جنوب	شرق	شمال شرق				
۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱۵۰۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶۰۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷۰۰	
۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۱۸۰۰	
۰/۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱۹۰۰	
۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۲۰۰۰	
۱/۳	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۳	۶	۲۱۰۰	
۱/۹	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۴	۹	۲۲۰۰	
۵/۳	۹	۱	۰	۱	۰	۱	۴	۲۵	۲۳۰۰	
۵/۷	۴	۲	۱	۲	۵	۴	۵	۲۷	۲۴۰۰	
۷/۸	۴	۲	۴	۲	۵	۶	۷	۳۷	۲۵۰۰	
۱۲/۲	۷	۸	۷	۶	۶	۵	۱۰	۵۸	۲۶۰۰	
۱۲/۴	۹	۸	۴	۹	۷	۳	۱۵	۵۹	۲۷۰۰	
۹/۵	۵	۴	۷	۳	۹	۵	۷	۴۵	۲۸۰۰	
۱۳/۳	۷	۶	۲	۱۱	۱۰	۱۰	۸	۶۳	۲۹۰۰	
۱۴/۳	۷	۷	۹	۹	۹	۱۳	۴	۶۸	۳۰۰۰	
۹/۱	۳	۶	۷	۹	۳	۲	۸	۴۳	۳۱۰۰	
۲/۷	۱	۱	۰	۳	۱	۱	۴	۱۳	۳۲۰۰	
۱/۹	۱	۴	۲	۰	۰	۰	۲	۹	۳۳۰۰	
۱/۱	۰	۳	۰	۰	۱	۱	۰	۵	۳۴۰۰	
۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۳۵۰۰	
۱۰۰	۵۸	۵۳	۴۴	۵۹	۵۳	۵۵	۸۵	۴۷۵	جمع	
۲۷۹۹	۲۷۲۵	۲۸۹۸	۲۸۶۴	۲۸۷۲	۲۸۲۰	۲۸۴۶	۲۷۰۵	-	میانگین ارتفاع (متر)	
۲۷۰۶	۲۷۳۳	۲۷۵۷	۳۰۷۷	۲۹۸۰	۲۹۵۰	۳۰۰۸	۲۷۳۸	-	نما (Mo) (متر)	

(منبع: یافته‌های پژوهش)



شکل ۸. نقشه برف‌مرز دره هراز در آخرین دوره یخچالی (ترسیم: نگارندگان)

همچنین، ارتفاع نما در سیرک‌های رو به قطب ۲۸۷۴ متر و در سیرک‌های رو به استوا ۲۹۴۱ متر است. به دیگر سخن، ΔELA در دامنه‌های رو به قطب و رو به استوا ۶۷ متر است که این مسئله با فرض تحقیق کاملاً همخوانی دارد (شکل ۹).



شکل ۹. ΔELA در دامنه‌های رو به قطب و رو به استوا در دره هراز (منبع: یافته‌های پژوهش)

نتایج تحقیق ثابت می‌کند که در مورد سیرک‌های یخچالی بین فراوانی‌های مشاهده‌شده و فراوانی‌های مورد انتظار تفاوت معناداری وجود دارد و توزیع این سیرک‌ها ناشی از جهت ناهمواری است؛ یعنی، دامنه‌هایی که میزان انرژی کمتری از خورشید دریافت می‌کند مکان مناسب‌تری برای تشکیل سیرک و دیگر اشکال مورفولوژی یخچالی است. در مورد ارتفاع خط تعادل آخرین دوره یخچالی نیز روش بررسی کف سیرک انتخاب شد و ادغام آن با روش‌های آماری میانگین ارتفاع ۲۷۹۹ متر برای سیرک‌های یخچالی پیشنهاد می‌شود. بر همین اساس، مقدار نما ۲۷۰۶ متر است. ارتفاع نما در سیرک‌های رو به قطب ۲۸۷۴ متر و در سیرک‌های رو به استوا ۲۹۴۱ متر است. ΔELA در دامنه‌های رو به قطب و رو به استوا ۶۷ متر است که این مسئله با فرض تحقیق کاملاً همخوانی دارد.

منابع

- اهلرز، ا. (۱۳۷۲). ایران: مبانی کشورشناسی جغرافیایی. جلد اول، جغرافیای طبیعی، ترجمه محمدتقی رهنمایی، چاپ دوم، تهران، مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی سحاب، ۲۰۹ ص.
- باتاچاریا، گ.ک. و جانسون، ر.ا. (۱۳۶۶). مفاهیم و روش‌های آماری. ج۲، جلد دوم، ترجمه مرتضی ابن شهرآشوب و فتاح میکائیلی، تهران، مرکز نشر دانشگاهی، ۷۳۲ ص.
- پدرامی، م. (۱۳۶۲). چینه‌شناسی کواترنر ایران و روش‌های مطالعه آن. تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش داخلی.
- جداری عیوضی، ج. (۱۳۷۴). ژئومورفولوژی ایران. تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۰۶ ص.
- رامشت، م.ج. (۱۳۸۱). آثار یخچالی در زفره اصفهان، طرح پژوهشی شماره ۸۰۰۳۰۵، شورای پژوهشی دانشگاه اصفهان، اصفهان.
- رامشت، م.ج. و نعمت‌الهی، ف. (۱۳۸۴). آثار یخساری در ایران. مدرس، ۴۳: ۱-۱۸.
- علیجانی، ب. و کاویانی، م.ر. (۱۳۷۱). مبانی آب‌وهواشناسی، تهران، انتشارات سمت، ۵۷۶ ص.
- محمودی، ف. (۱۳۶۷). تحلیل ناهمواری‌های ایران در کواترنر. پژوهش‌های جغرافیایی، مؤسسه جغرافیای دانشگاه تهران، ۲۰(۲۳): ۴۳-۵.

- مهدوی، م. (۱۳۷۲). آمار و احتمالات در جغرافیا. چاپ دوم، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۸۴ ص.
- یمانی، م. (۱۳۸۱). ژئومورفولوژی یخچال‌های علم‌کوه، پژوهش‌های جغرافیایی، مؤسسه جغرافیای دانشگاه تهران، ۳۴(۴۲): ۱-۱۸.
- یمانی، م.، مقیمی، ا.، عزیزی، ق. و باخویشی، ک. (۱۳۹۲). تعیین قلمروهای مورفوکلیماتیک در بلندی‌های غرب استان کردستان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۱۴-۱: (۴)۴۵.
- Aljani, B. and Kaviani, M.R. (1992). Fundamentals of climatology. SAMT Publication, Tehran, 576 pp. [in Persian]
- Böbek, H. (1963). Nature and implications of Quaternary climatic changes in Iran, in changes of climate, Proceedings of symposium on changes of climate with special reference to And Zones: Rome. 1961, UNESCO: 403413.
- Böbek, H. (1957). Anniversary publication for the centennial of the geographical society of Vienna, 1856-1956. Vienna: 236-264.
- Böbek, H. (1937). The role of the ice age in Northwestern Iran. Berlin, 25: 130-183.
- Bhattacharyya, R. and Johnson, R.A. (1987). Statistical concepts and methods, Translated by Ibn Shahrashoub, M., and Mikaeili, F., IUP Publication, Tehran, 732 pp. [in Persian]
- Böbek, H. (1934). Travel in Northwest Persia. Berlin, 9/10: 359-369.
- Bout, P., Derruau, M., Dresch, J. and Péguy, Ch.P. (1961). Observations on the physical geography of Northern Iran. Expedition of 1958 under the auspices of C.N.R.S., Paris: 9-112.
- Busk, D.L. (1933). Climbing and skiing in the Elburz Range, North Persia, 1931-2. Alpine Journal, 45(247): 334-341.
- De Morgan, J. (1895). Mission scientifique en perse, 4 Vol. Paris, <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k110549r/f3.image.r=jacques+de+morgan.langFR>.
- Desio, A. (1934). Geographic and geologic conformation concerning the Zardkuh Mountains in Persia. Italy, 4: 141-167.
- Ehlers, E. (1993). Iran: Grundzüge einer geographischen Landeskunde. Translated by Rahnamaei M., T., Sahab, Tehran, 209 pp. [in Persian]
- Ferrigno, J.G. (1988). Glaciers of the Middle East and Africa- Glaciers of Iran. www.pubs.usgs.gov/prof/p1386g/Iran.pdf.
- Grunert, J., Carls, H. G. and Preu, C. (1978). The present-day glaciers of the Central Iranian High Mountains, Eiszeitalter und Gegenwart. 28: 148-166.
- Harding, J.G.R. (1957). Cambridge expedition, 1956, to the Elburz Mountains, Iran. Himalayan Journal, 20: 112-121.
- Heybrock, W. (1940). Naturwissenschaftliche Beobachtungen in Iran: Petermanns geographische Mitteilungen [Scientific Observations in Iran: Petermanns geographic Releases], 86(4): 124-131.
- Horvath, E. (1975). Glaciers of Turkey, Armenian S.S.R. and Iran, in Field, W.O., ed., Mountain glaciers of the Northern Hemisphere, pt. 111, Glaciers of Southern Asia: Hanover, N.H., U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory: 343-359.
- Jedari Eivazi, J. (1995). Geomorphology of Iran, Payame Noor University Publication, Tehran, 106 pp. [in Persian]
- Mahdavi, M. (1993). Statistics and probability in geography. Payame Noor University Publication, Tehran, 184 pp. [in Persian]
- Mahdavi, M. and Taherkhami, M. (2012). Applied statistical analysis in geographican researches. Ghoomes Publishing Company, Tehran, 420 pp. [in Persian]
- Mahmudi, F. (1988). The tranformation of the Iran terrains in quaternary. Researches in Geography Quarterly, 20(23): 5-43. [in Persian]
- McQuillan, H. (1969). Small glacier on Zardeh Kuh, Zagros Mountains, Iran. Geographical Journal, 135(4): 639.
- Pedrami, M. (1987). Quaternary stratigraphy of Iran and methods of study. Geology Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Internal Report. [in Persian]
- Péguy, Ch.P. (1959). Les glaciers de l'Elbourz [The glaciers of the Elburz Mountains]. Bulletin de l'Association de Géographes Français, Paris, 284-285: 44-49.
- Porter, S.C. (2001). Snowline depression in the tropics during the Last Glaciation. Quaternary Science Reviews, 20.
- Ramesht, M.H. (2002). Glacial evidence of the Zefreh. Geography Department of Isfahan University, Isfahan, Iran. [in Persian]
- Ramesht, M.H. and Nematollahi, F. (2005). Ice caps evidences in Iran. Modarres Human Sciences, 9(4): 1-18. [in Persian]
- Seif, A. (2015). Equilibrium-line altitudes of Late Quaternary glaciers in the Oshtorankuh Mountain, Iran. Quaternary International, 374: 126-143.
- Seif, A. and Ebrahimi, B. (2016). Morphological analysis of glaciated valleys in the Zardkuh Mountain, Iran. Natural Environment Change, 2(2): 127-142.
- Seif, A. and Ebrahimi, B. (2014). Combined use of GIS and experimental functions for the morphometric study of glacial cirques, Zardkuh Mountain, Iran. Quaternary International, 353: 236-249.
- Singh, P.V., Singh, P., and Haritashya, U.K. (2011). Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer Publication, the Netherlands, 1300 pp.
- Schweizer, G. (1972). Climatically based geomorphological and glaciological characteristics of the high-altitude regions of near Eastern Mountains (Iran and Eastern Anatolia). 4: 221-236.
- Wright, H.E., Jr. (1962). Pleistocene glaciation in Kurdistan, 12: 131-164.
- Yamani, M. (2002). The geomorphology of Alamkooh Glaciers. Researches in Geography Quarterly, 42: 1-18. [in Persian]
- Yamani, M., Moghimi, E., Azizi, G. and Bakhishi, K. (2013). Determination of Holocene morphoclimatic regions in highlands of the West and Northwest of Kurdistan Province. Researches in Physical Geography Quarterly, 45(4): 1-14. [in Persian]