

جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۲۸، پاییز ۱۳۹۷
صص. ۴۹-۳۳

بازسازی برف‌مرز کواترنری واحد ژئومورفیک زاگرس ایران

غلامحسن جعفری* - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
نسرین حضرتی - کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

وصول: ۱۳۹۷/۰۲/۳۱ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

چکیده

اگرچه دوره کواترنری در میان دوره‌های زمین‌شناسی از نظر زمانی، بسیار کوتاه است، ولی نزد ژئومورفولوژیست‌ها بسیار مهم است. اهداف اصلی این مقاله، ارائه بهترین روش برآورد ارتفاع برف‌مرز دائمی، تجزیه و تحلیل اثر تغییر عرض جغرافیایی و جهت ناهمواری بر ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری و در نهایت، ترسیم نقشه فرایند یخچالی برای واحد ژئومورفیک زاگرس در طی کواترنری است. به این منظور، ابتدا با توجه به فرم خطوط منحنی میزان در نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰، بیش از ۲۰۰۰ نقطه سیرکی در واحد زاگرس شناسایی شد. به دلیل وسعت منطقه مورد مطالعه، ابتدا ارتفاع برف‌مرز دائمی در حوضه‌های آبریز به تفکیک برآورد شد. ارتفاع برف‌مرز به روش‌های رایج، ارتفاع کف سیرک، نسبت پنجه به دیواره و نسبت‌های ارتفاعی برآورد شد. امتداد ناهمواری‌های زاگرس سبب شکل‌گیری سیرک‌های یخچالی در جهات شمال شرقی - جنوب غربی شده است. پراکندگی سیرک‌های شناسایی شده دال بر این است که دامنه‌های شمال شرقی این واحد، شرایط مساعدتری برای شکل‌گیری سیرک داشته است. تجزیه و تحلیل ارتفاعات برآوردی برای برف‌مرز بر اساس روش‌های مختلف، دال بر این است که ارتفاع برف‌مرز دائمی در روش نسبت‌های ارتفاعی از نظر عدد ارتفاعی و انعکاس اثرگذاری جهت سطوح ارضی بر اختلاف برف‌مرز دائمی، ارتفاع مناسب‌تری است. گستردگی زاگرس در عرض جغرافیایی، سبب تفاوت ارتفاع برف‌مرز قسمت‌های مختلف آن شده است، به طوری که ارتفاع برف‌مرز دائمی جنوبی‌ترین حوضه (بختگان - مهارلو) ۶۶۱ متر مرتفع‌تر از شمالی‌ترین حوضه (مرزی غرب) برآورد شده است. متوسط ارتفاع برف‌مرز واحد زاگرس ۲۷۱۹ متر است. در مجموع، ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نثار این واحد ۲۵۶۱ متر و دامنه‌های نگار (دامنه‌های جنوب غربی) ۲۸۲۲ متر برآورد شد (۲۶۱ متر اختلاف ارتفاع). تجزیه و تحلیل اثر مقدار شیب و ارتفاع قله بر ارتفاع برف‌مرز بیانگر آن است که اثرگذاری این عوامل بر ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نگار بیشتر از دامنه‌های نثار است.

واژگان کلیدی: نسبت‌های ارتفاعی، سیرک، برف‌مرز، شیب، زاگرس.

مقدمه

اگرچه دوره کواترنری در بین دوره‌های زمین‌شناسی از نظر زمانی، بسیار کوتاه است، ولی نزد ژئومورفولوژیست‌ها که اشکال سطحی زمین را در ارتباط با فرایندهای درونی و بیرونی بررسی می‌کنند، بسیار مهم است. در این دوره زمانی، اقلیم زمین چندین بار دست‌خوش تغییراتی شده است. چنین تغییراتی منجر به ایجاد اشکالی در سطح زمین شده است که با فرایندهای کنونی انطباق زیادی ندارد (جعفری، ۱۳۹۵). شناخت سیر تحول شرایط آب‌وهوایی و به تبع آن، سامانه‌ها و فرایندهای فرسایشی و تغییر و تحول طبقه‌های فرسایشی، درک درستی از تحول چشم‌اندازهای ژئومورفولوژیکی در مناطق کوهستانی فراهم می‌آورد (خوش‌رفتار و همکاران، ۱۳۹۵). در تحولات و تکامل ناهمواری‌ها، یخچال‌ها و حاکمیت دوره یخچالی و بین یخچالی نقش مهمی در پردازش و تکامل ناهمواری‌ها داشته‌اند، به گونه‌ای که در طی دوره‌های یخچالی، انباشت مقادیر فراوان برف و یخ روی دامنه‌ها و در دوره‌های بین یخچالی، ذوب این توده‌های یخی، نقش قابل توجهی در پرداخت دامنه‌ها داشته است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲). مهم‌ترین الگویی که در نتیجه فرسایش یخچالی ایجاد می‌شود، سیرک یخچالی است. در اثر فرسایش یخچال کوهستانی، فرورفتگی‌هایی عمیق با دیواره‌های پرشیب، کف مسطح با شیب کم به شکل نیمه‌کاسه (هلالی‌شکل)، در ارتفاعات بالا و حاشیه کوهستان‌ها ایجاد می‌شود (جعفری و آوجی، ۱۳۹۶) که می‌توان از آن‌ها برای برآورد ارتفاع برف‌مرز و حدود گسترش یخچال‌ها و مطالعه تغییرات اقلیمی کواترنری استفاده کرد (جعفری‌بیلگو و همکاران، ۱۳۹۳).

ارائه «تئوری یخچالی» به اوایل قرن نوزدهم در اروپا بازمی‌گردد (رامشت و نعمت‌الهی، ۱۳۸۳). آگاسیز^۱ (۱۸۴۰) اصول فرم‌شناسی یخچال‌شناسی دیرینه را بنیان نهاد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰). در آغاز قرن بیستم، آپنگ و بروخنر^۲ (۱۹۰۸-۱۹۰۱) تناوبی از مراحل یخچالی را که به وسیله مراحل بین یخچالی از یکدیگر جدا شده‌اند را گزارش دادند و اربل^۳ (۱۹۳۰) آثار دو دوره یخچالی دیگر را شناسایی کرد (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۰).

مطالعه حاکمیت سیستم یخچالی کواترنری، توجه پژوهشگران زیادی را به خود معطوف کرده است؛ برای مثال، ناپیرالسکی^۴ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۵، لندفرم‌های یخچالی و روند گسترش و عقب‌نشینی یخچال را بررسی کردند. مطالعات ساریکایا^۶ و همکاران (۲۰۱۱) منجر به برآورد وسعت و زمان‌بندی یخچال‌های کواترنری پایانی ترکیه شد. تشابه سیرک‌های کشور رومانی با سیرک‌های منطقه ولز انگلستان، نتیجه فعالیت میندراکو و اوانز^۷ (۲۰۱۴) است. در ارتباط با اقلیم گذشته و آثار یخچالی دره تاشکورگان در شمال غرب فلات تبت، ژو^۸ (۲۰۱۴)، درجه حرارت آن دره را در دوره یخچالی، ۵ تا ۸ درجه سردتر از امروز برآورد کرده است. در همین راستا بار و اسپاگنولو^۹ (۲۰۱۵) سیرک‌ها را به عنوان شاخصی برای بررسی شرایط اقلیمی گذشته معرفی کردند و توزیع سیرک، ارتفاع آن‌ها و مورفومتری سیرک‌ها را ناشی از تعامل بین یخچال و زمین‌شناسی و

- 1- Agasies
- 2- Penk & Bruchner
- 3- Erbel
- 4- Napieralski
- 5- Geographic information system (GIS)
- 6- Sarikaya
- 7- Mindrescu & Evans
- 8- Xu
- 9- Barr & Spagnolo

آب‌وهوا دانستند. دلماس^۱ و همکاران (۲۰۱۵) نیز با بررسی رشد آلومتریک سیرک‌های آلپ براساس روش‌های آماری، شکل سیرک را ناشی از متغیرهایی مانند نوع سنگ و تغییرات آب‌وهوای منطقه می‌داند. آگوستینوس^۲ و همکاران (۲۰۱۷) منشأ رسوبات دشت بوکو در غرب تاسمانی را ناشی از اثرگذاری مشترک محیط‌های یخچالی، رودخانه‌ای، باتلاقی و ساحلی در طی کواترنری می‌دانند. دهمس^۳ و همکاران (۲۰۱۸) با توجه به همین موضوع، تعداد دوره‌های یخچالی کواترنری کوه تیبیل، دریاچه بول و مورن‌های حاشیه اسکاگوا در کانیون سینک وایومینگ ایالات متحده آمریکا در پلیستوسن پنج دوره و در هولوسن چهار دوره کوچک‌مقیاس برآورد کرده‌اند.

مطالعاتی از این قبیل نشان می‌دهد که در طی کواترنری در بخش‌های مختلف سیاره زمین تغییرات اقلیمی اتفاق افتاده که منجر به پیشروی یا عقب‌نشینی یخچال شده است و معیارهایی را به دست می‌دهد که در شناسایی لندفرم‌های یخچالی به پژوهشگر کمک فراوانی می‌کند.

در ارتباط با یخچال‌های کواترنری ایران، دومورگان (۱۸۹۰) اولین پژوهشگری است که به سیرک‌های یخچالی قدیمی در اشترانکوه اشاره کرده است؛ سپس پدرامی^۴ (۱۹۸۲) وجود آثار یخچالی ارتفاعات مریوان و دامنه‌های آن را مورد مطالعه قرار داده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰). وجود آثار یخچال‌های کواترنری ارتفاعات تالش (طاحونی، ۱۳۸۳)، زردکوه بختیاری (یمانی، ۱۳۸۶)، اقلید فارس (رامشت و کاظمی، ۱۳۸۶)، زردکوه (موسوی^۵ و همکاران، ۲۰۰۹)، حوضه آبریز رودخانه زاب (قهرودی تالی و همکاران، ۱۳۹۲)، البرز غربی (کوه خشچال) (سرور و فرید مجتهدی، ۱۳۹۰) و کوهستان بیدخوان کرمان (جعفریگلو و همکاران، ۱۳۹۳) مورد تأیید قرار گرفته است. قهرودی تالی و همکاران (۱۳۹۴) ارتفاع برف‌مرز آخرین دوره یخچالی حوضه دالاخانی کرمانشاه، را ۲۸۲۰ متری برآورد کرده‌اند. رسوبات یافت‌شده تا این ارتفاع، منشأ یخچالی دارند. در ارتفاعات زاگرس چین‌خورده نیز شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) حاکمیت قلمروهای یخچالی و مجاور یخچالی را تأیید کرده‌اند. برف‌مرز پلیستوسن سایت ریگ در جنوب استان چهارمحال بختیاری را سیف و همکاران (۱۳۹۴) بازسازی کرده‌اند.

حاکمیت فرایند یخچالی کواترنری به کمک لندفرم‌های یخچالی قابل ردیابی است؛ جعفری (۱۳۹۵) در کوه الوند همدان با توجه به مورن‌های سرگردان در کوهپایه‌های شمال و جنوبی و سیرک‌های یخچالی، تسلط فرایند یخچال کواترنری را در این منطقه مورد تأیید قرار داده است. کیانی و همکاران (۱۳۹۵) نیز تغییرات اقلیم کواترنری حوضه آبریز گاوخونی را به کمک شواهد ژئومورفولوژیکی ردیابی کردند؛ با وجود غلبه آب‌وهوای گرم و خشک دشت ابراهیم‌آباد یزد در شرایط کنونی، شریفی و همکاران (۱۳۹۵) نیز وجود لندفرم‌ها ناشی از آب‌وهوای سردتر و مرطوب را دلیلی بر تغییر اقلیم کواترنری و تسلط فرایندهای یخچالی در منطقه دانسته‌اند.

یمانی و زمانی (۱۳۹۵) به کمک همین شواهد، ارتفاع خط برف‌مرز دائمی دره هراز را در آخرین دوره یخچالی ۲۷۹۹ متر برآورد کرده‌اند؛ البته این ارتفاع، با توجه به جهت شیب دامنه‌های کوهستانی تفاوت‌هایی داشته است. کاهش دمای دوره‌های سرد کواترنری بر اساس ارتفاع برف‌مرزها قابل برآورد است؛ این کاهش دمایی را جعفری و آوجی (۱۳۹۵) در توده کوهستانی قروه، حدود ۸ درجه سانتی‌گراد برآورد کرده‌اند.

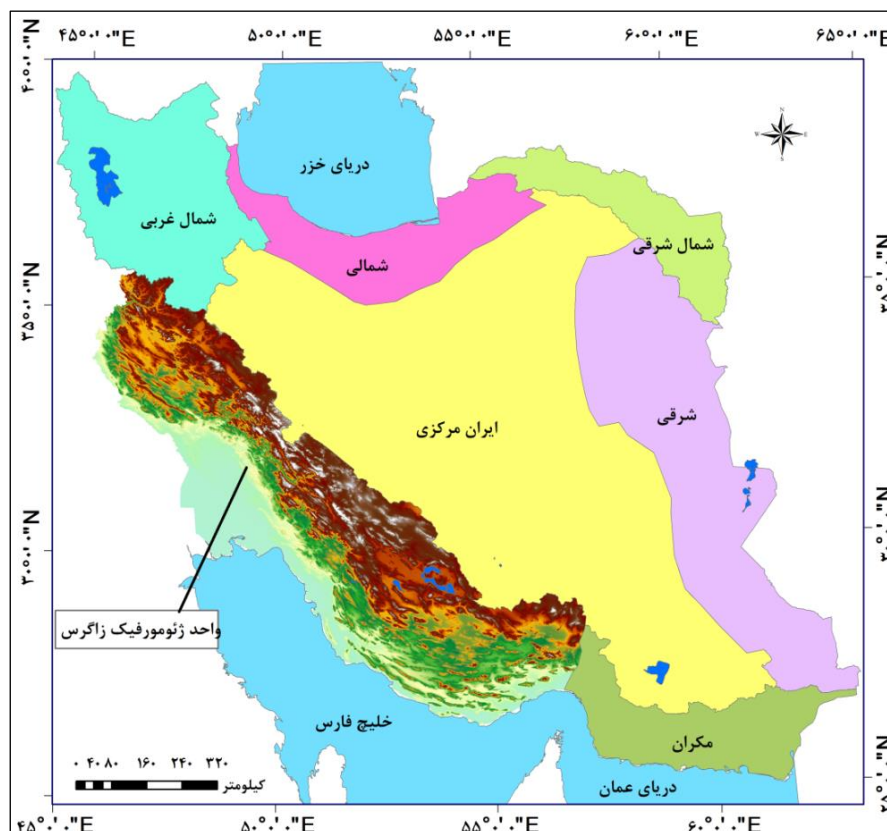
به کمک شواهد یخچالی و مجاور یخچالی، همچنین می‌توان مرزهای مورفودینامیکی کواترنری را تعیین کرد

- 1- Delmas
- 2- Augustinus
- 3- Dahms
- 4- Pedrami
- 5- Moussavi

به‌گونه‌ای که ملکی و همکاران (۱۳۹۷) مرز مورفودینامیک یخچالی کوه‌های کردستان را ۲۴۸۳ متر برآورد کرده‌اند؛ این برف‌مرز پایین از ارتفاع برف‌مرز البرز و زاگرس برآورد شده است. مطالعات بالا نشان‌دهنده وجود سیستم شکل زای یخچالی در بخش‌های مختلف ایران و ارتفاعات زاگرس است؛ بر این اساس، در پژوهش حاضر برای اولین بار، ارتفاع برف‌مرز کواترنری واحد ژئومورفیک زاگرس، به‌صورت یکپارچه برآورد شده است. اهداف اصلی این مقاله، ارائه بهترین روش برآورد ارتفاع برف‌مرز دائمی، تجزیه و تحلیل اثر تغییر عرض جغرافیایی و جهت ناهمواری بر ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری و درنهایت، ترسیم نقشه فرایند یخچالی برای واحد ژئومورفیک زاگرس در طی کواترنری است.

معرفی منطقه مورد بررسی

واحد ژئومورفیک زاگرس از 45° تا 57° طول شرقی و 26° تا 36° عرض شمالی امتداد دارد (شکل ۱). کوه‌های زاگرس به‌صورت نواری چین‌خورده قسمتی از رشته‌کوه آلپ - هیمالیا است که با وسعتی حدود ۲۰۰۰ کیلومتر در جهت شمال غربی - جنوب شرقی از شرق گسل آناطولی تا خطواره عمان در بخش جنوبی ایران گسترش دارد. این بخش، محصول پیچیده‌ای از جدایی ایران از سرزمین گندوانا است (آرین و هاشمی، ۱۳۸۷). این حصار کوهستانی عظیم، به قسمت زاگرس مرتفع، زاگرس چین‌خورده و زاگرس چین‌خورده تقسیم می‌شود. زاگرس، منطقه وسیعی از کشور ایران را شامل می‌شود که از شمال غرب تا جنوب غرب ایران را در سیطره خود گرفته است. به‌دلیل عرض جغرافیایی متغیر در این توده کوهستانی، ناحیه‌های متفاوت دمایی و بارشی در آن به چشم می‌خورد. اقلیم این ناحیه به‌شدت تحت تأثیر عامل ارتفاع است و افزایش ارتفاع، کاهش دما و تغییر در وضعیت بارش را به‌دنبال دارد (قاسمی فر و ناصرپور، ۱۳۹۳).



شکل ۱. موقعیت مکانی واحد ژئومورفیک زاگرس در واحدهای ژئومورفیک ایران

مواد و روش‌ها

از جمله موارد اساسی در مطالعات یخچال‌شناسی، ارتفاع برفمرز دائمی و ارتفاع خط تعادل آب‌ویخ است. برای برآورد ارتفاع برفمرز، چندین روش متفاوت ارائه شده است. قدم اول برای برآورد ارتفاع برفمرز، شناسایی شواهد یخچالی مانند سیرک است. برای ردیابی سیرک‌های منطقه از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، لایه خطوط منحنی میزان، لایه آبراهه‌ها، مدل ارتفاعی رقومی ۳۰*۳۰ و نرم‌افزارهای گلوبال‌مپر^۱ و آرک.جی.آی.اس^۲ استفاده شد. گسترش ناهمواری‌های زاگرس در عرض جغرافیایی به‌گونه‌ای است که بررسی ارتفاع برفمرز دائمی آن در یک واحد خالی از اشکال نیست؛ به همین دلیل، ابتدا ارتفاع برفمرز در حوضه‌های آبریز این واحد (حوضه‌های آبریز مرزی غرب، کرخه، کارون، بختگان - مهارلو، ابرقو - سیرجان) برآورد شد. جهت کلی سیرک‌های شناسایی شده با توجه به امتداد ناهمواری‌ها مشخص شد؛ امتداد خط‌الرأس اصلی هر حوضه، تعیین‌کننده جهت تشکیل سیرک‌ها است. با توجه به امتداد ناهمواری‌های واحد زاگرس (شمال غرب - جنوب شرق) و اثر دامنه‌ها در شکل‌گیری سیرک، ارتفاع برفمرز در دامنه‌های شمال شرق - جنوب غرب این واحد برآورد شد. با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران، شرایط لیتولوژیکی مکان سیرک‌های این واحد بررسی شد و از اطلاعات سیرک‌های واقع در نهشته‌های کواترنری یا رسوبات حساس به فرسایش، مثل مارن و رس، در برآورد ارتفاع برفمرز استفاده نشد. برای بررسی تأثیر ارتفاع و شیب قله بر ارتفاع برفمرز، هفت قله مرتفع بالای ۳۰۰۰ متر در واحد زاگرس در نظر گرفته شد و ارتفاع برفمرز به روش‌های مختلف در این قله‌ها برآورد شد؛ همچنین شیب این قله‌ها محاسبه شد و رابطه خطی بین مقدار شیب و ارتفاع برفمرز، ارتفاع قله و ارتفاع برفمرز محاسبه شد؛ البته برای برآورد رابطه خطی، نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف-اسمیرنف^۳ مورد تأیید قرار گرفت. در نهایت، با توجه به روش مناسب برآورد ارتفاع برفمرز، نقشه منطقه تحت حاکمیت فرایند یخچالی در واحد زاگرس ترسیم شد. روش‌های به‌کاررفته در ادامه به تفکیک بیان شده‌اند:

الف: روش رایت^۴

پس از شناسایی آثار سیرکی به کمک نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای استر^۵ با تفکیک رقومی ۳۰ متری، مستخرج از سایت یو.اس.جی.آی.اس^۶، برآورد برفمرز با روش رایت (رابطه ۱) در ۲ مرحله انجام شد. در مرحله اول، تعداد کل سیرک‌های هر کدام از حوضه‌های آبریز در ۶۰٪ ضرب شد و ارتفاع برفمرز برآورد شد؛ اما در مرحله دوم، همانند مرحله اول عمل شد، ولی در این مرحله، داده‌های آن دسته از سیرک‌هایی که در رسوبات دیاژنزشده مثل کنگلومرا و سست قرار داشتند، از مجموع داده‌های مورد تجزیه و تحلیل، خارج شدند. آثار سیرکی در این سنگ‌ها، شبه‌سیرک‌هایی هستند که پس از عقب‌نشینی یخچال‌ها و در شرایط کنونی، بر اثر عوامل فرسایشی شکل گرفته‌اند و نمی‌توان تشکیل آن‌ها را به یخچال‌های کواترنری نسبت داد. برای بررسی ارتفاع برفمرز در روش پورتر، به کمک مدل رقومی ارتفاع ۳۰^۷ متری در نرم‌افزار آرک جی.آی.اس، نیم‌رخ طولی در امتداد سیرک ترسیم شد که با توجه به مقدار تقریب آن، سیرک از شبه‌سیرک مشخص شد (در روش مربوطه شرح داده شده است). در این مرحله از ارتفاع

1- Global Mapper

2- Arc GIS

3- Kolmogorov-Smirnov test

4- Wright

5- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

6- USGS

7- Digital Elevation Model (DEM)

کف سیرک‌هایی که پروفیل ترسیمی آن‌ها بیانگر این بود که شبه‌سیرک هستند، در برآورد ارتفاع برف‌مرز استفاده نشد (جدول ۲). در روش رایت، با تعیین مکان سیرک‌ها و گذراندن خط ۶۰٪ از آن‌ها، برف‌مرز دائمی برآورد می‌شود (جعفری‌گلو و همکاران، ۱۳۹۳).

$$R = n \times 0.60$$

رابطه ۱

در رابطه ۱، R: شماره رده‌ای است که ارتفاع سیرک آن رده، به‌عنوان ارتفاع برف‌مرز در نظر گرفته می‌شود (سیرک‌هایی که در ابتدا، براساس ارتفاع، به‌صورت نزولی منظم شده‌اند) و n: تعداد سیرک‌های شناسایی شده است. برای تجزیه و تحلیل ارتفاع برف‌مرزهای برآوردی، افزون بر رابطه ۱، از رابطه ۲ نیز برای برآورد ارتفاع برف‌مرز به روش رایت در دو مرحله استفاده شد. در مرحله اول به این صورت که حداکثر ارتفاع از حداقل ارتفاع کسر و سپس بر عدد ۱۰۰ تقسیم و در عدد ۶۰ ضرب شد. از جمع عدد به‌دست‌آمده از این مرحله با کمترین ارتفاع سیرک شناسایی شده، ارتفاع برف‌مرز محاسبه شد (جدول ۳). در مرحله دوم نیز، همانند مرحله اول عمل شد با این تفاوت که در این مرحله، جهت جغرافیایی شکل‌گیری سیرک‌ها نیز در نظر گرفته شد (جدول ۴).

$$R = 60 * 100 / (X + \text{پایین‌ترین ارتفاع سیرک})$$

رابطه ۲ X: تفاوت ارتفاع برف‌مرز دائمی از ارتفاع پایین‌ترین سیرک و R: ارتفاع برف‌مرز است (قهرودی تالی و حسنی قارنایی، ۱۳۹۴).

ب: روش پورتر^۱

از نظر پورتر (۲۰۰۰) یخچال زمانی سیرک را پر می‌کند که خط برف‌مرز خیلی بالاتر از میانگین ارتفاع کف سیرک نباشد (یخچال‌های سیرکی)، این روش برای به‌دست‌آوردن ارتفاع خط تعادل‌های گذشته است. از این رابطه برای به‌دست‌آوردن نما و مد استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا سیرک‌ها از نظر ارتفاعی با فاصله ۱۰۰ متر طبقه‌بندی و فراوانی نسبی سیرک در هر کدام از طبقات مشخص شد (جدول ۵). ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری در طبقه‌ای قرار دارد که سیرک‌ها بیشترین فراوانی را داشته باشند (رابطه ۳).

$$M_0 = L + \frac{d_1}{d_1 + d_2} \times h$$

رابطه ۳

که M_0 : ارتفاع کف سیرک، L: حد پایین طبقه نمادار، d_1 : تفاضل فراوانی طبقه ماقبل طبقه نمادار از فراوانی طبقه نمادار، d_2 : تفاضل فراوانی طبقه مابعد طبقه نمادار از فراوانی طبقه نمادار و h: اختلاف ارتفاع طبقه نمادار است (سیف و همکاران، ۱۳۹۴).

ج: روش نسبت پنجه به دیواره^۲

استفاده از روش نسبت پنجه به دیواره در برآورد ارتفاع خط تعادل^۳ یخچال‌های کوچک و متقارن با توزیع نرمال پهنه‌ها و ارتفاعات، بهترین نتیجه را دربر دارد. نسبت پنجه به دیواره، بین ۰ تا ۱ است. برای شناسایی سیرک‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود و اگر نسبت پنجه به دیواره کمتر از ۰/۴۶ یا بیشتر از ۰/۸۶ باشد، شکل شناسایی شده، سیرک محسوب نمی‌شود (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲). در این مرحله از اطلاعات پروفیل‌های تهیه‌شده در مرحله پیش، افزون بر ارتفاع کف سیرک، ارتفاع پایین‌ترین و بالاترین قسمت پروفیل نیز استخراج شد؛ پس از برداشت

1- Porter

2- Terminus-to-Head Altitude Ratio (THAR)

3- Equilibrium Line Altitude (ELA)

اطلاعات لازم، نسبت پنجه به دیواره برای هر کدام از سیرک‌ها محاسبه شد. به این صورت که ارتفاع پایین‌ترین قسمت پروفیل از ارتفاع کف سیرک کسر شد و عدد به‌دست‌آمده بر تفاوت بین حداقل ارتفاع و حداکثر ارتفاع پروفیل تقسیم شد (رابطه ۴)، (جدول ۶). سپس ارتفاع برف‌مرز سیرک‌های باقی‌مانده طبق روش رایج در رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{THAR} = (\text{ELA} - \text{AT}) / (\text{AH} - \text{AT}) \quad \text{رابطه ۴}$$

که ELA: ارتفاع خط تعادل، AH: ارتفاع سر یخچال و AT: ارتفاع پایه یخچال است (پورتر، ۲۰۰۰). در واقع، با ترسیم پروفیل طولی در امتداد کف سیرک، بالاترین (AH) و پایین‌ترین (AT) ارتفاع سیرک شناسایی می‌شود؛ محل تغییر شیب در منحنی مقعر به‌عنوان ارتفاع کف سیرک در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). در این مرحله، براساس رابطه ۴ عمل شد. تفاوت این مرحله با مرحله قبل در این است که در این مرحله، همانند روش ارتفاع کف سیرک پورتر ارتفاع برف‌مرز برآورد شد (جدول ۷).

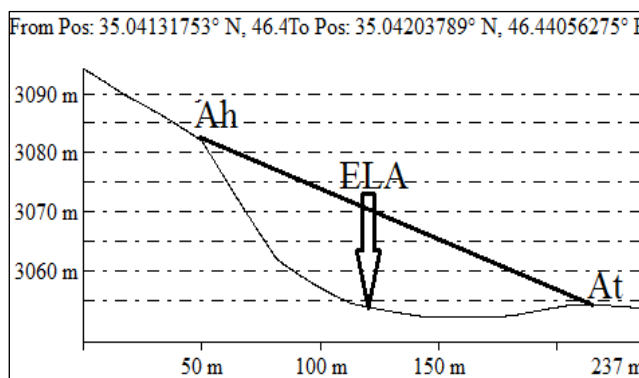
د: روش نسبت‌های ارتفاعی

ارتفاع برف‌مرز این روش میانگین ارتفاع پایانه زبانه یخچالی و بلندترین ستیغ حوضه یا منطقه مورد نظر است (رابطه ۵). در این روش، پایین‌ترین ارتفاع با بالاترین ارتفاع پروفیل ترسیمی جمع و بر ۲ تقسیم شد (جدول ۸). برای به‌دست‌آوردن برف‌مرز از میانگین و مد استفاده شد.

$$\text{AR} = (\text{Ah} + \text{At})/2 \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه ۵، AR: ارتفاع برف‌مرز، Ah: بالاترین و At: پایین‌ترین ارتفاع قلمرو یخچالی است (شریفی و همکاران، ۱۳۹۵).

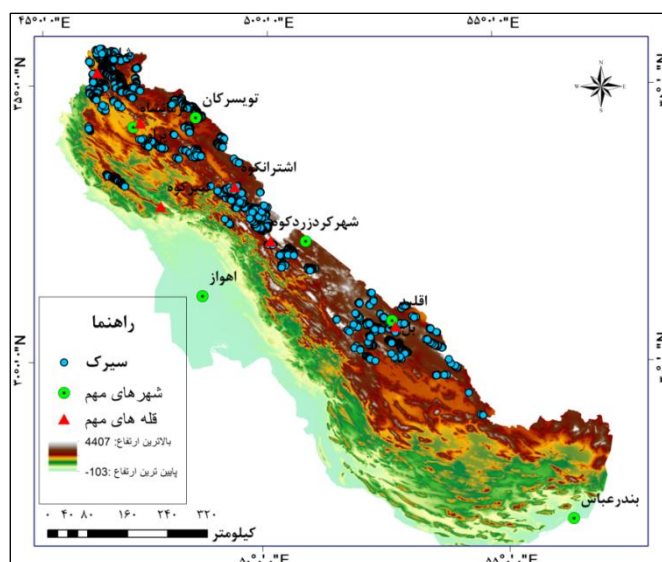
در پایان برای به‌دست‌آوردن اثرگذاری شیب و ارتفاع قلّه‌های مرتفع بر ارتفاع برف‌مرز به کمک نرم‌افزار اکسل^۱ از روابط خطی استفاده شد. یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین روابط، رابطه خطی است. این رابطه به صورت $y = bx + a$ است. a: عرض از مبدأ، نقطه آغاز ارتباط بین دو متغیر را نشان می‌دهد. b: شیب خط حاصل از معادله. به‌طور ساده این مقدار گویای میزان تغییر در متغیر y به ازای یک واحد تغییر در x است. شیب مثبت، نشان‌دهنده رابطه مستقیم دو متغیر است. شیب منفی، رابطه معکوس را نشان می‌دهد. به این معنی که با افزایش یک متغیر، دیگری کاهش می‌یابد و بالعکس با کاهش یک متغیر، دیگری افزایش پیدا می‌کند (عساکره، ۱۳۹۰: ۲۱۹). با توجه به شیب برآوردشده قلّه‌ها در دامنه‌های نثار و نگار و ارتفاع آن‌ها، رابطه خطی برآورد شد (جدول ۹ و ۱۰).



شکل ۲. تعیین ارتفاع کف سیرک (ELA) (استخراج از نرم‌افزار گلوبال‌مپ)

نتایج

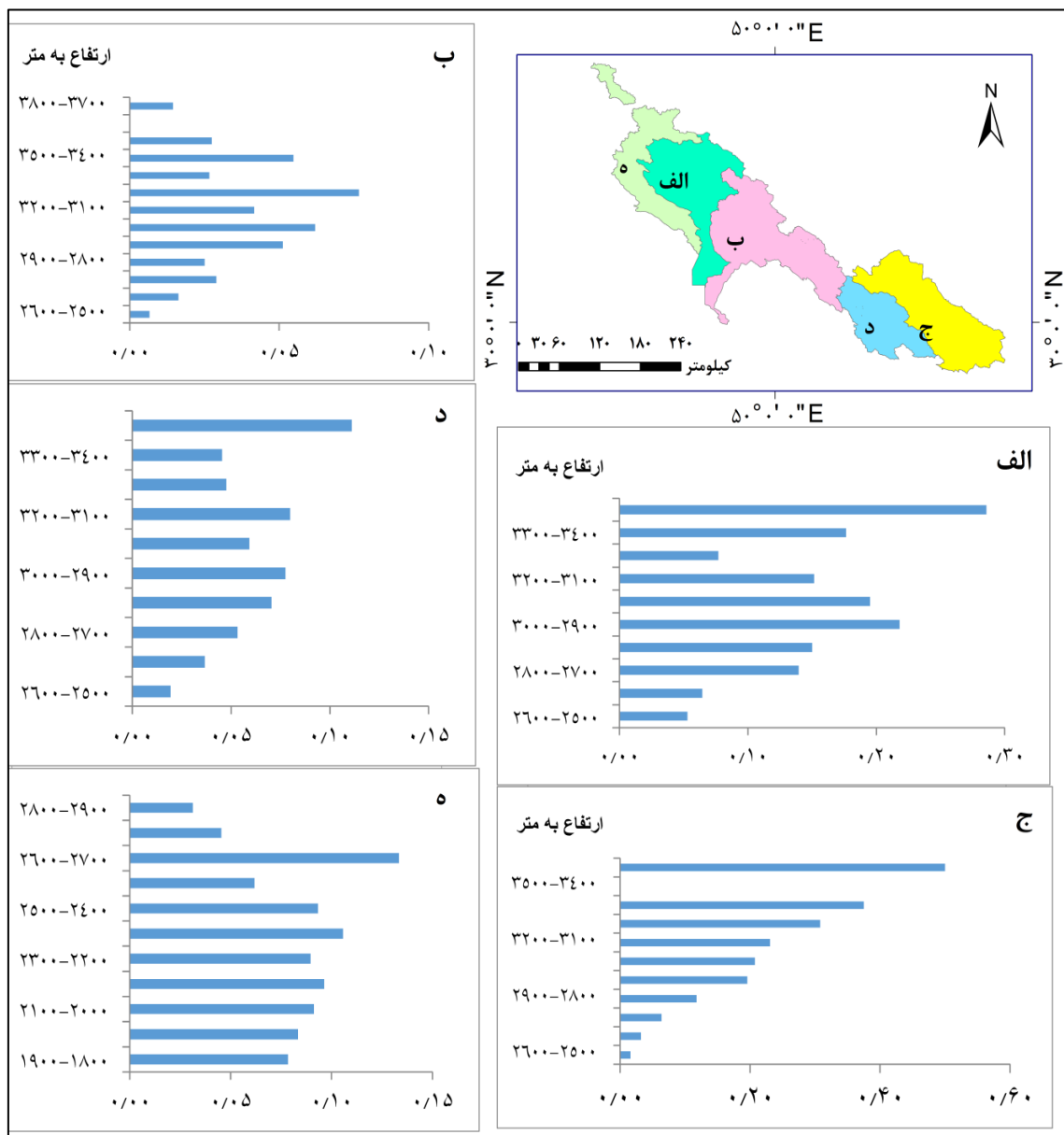
واحد ژئومورفیک زاگرس کاملاً کوهستانی و مرتفع است و قسمت‌های شمال شرقی، مرتفع‌تر از زاگرس جنوب شرق است. با توجه به امتداد اصلی زاگرس، از شمال غرب به جنوب شرق، اشکال سیرکی در دامنه‌های شمال شرقی و جنوب غربی شکل گرفته‌اند. به دلیل گستردگی زاگرس، برآورد ارتفاع برف‌مرز در یک مرحله برای کل واحد ژئومورفیک کار درستی نیست؛ به همین دلیل، ارتفاع برف‌مرز ابتدا در حوضه‌های آبریز برآورد شد. حوضه‌های آبریز مرزی غرب، کرخه، کارون و بختگان - مهارلو به‌طور کامل در این واحد قرار گرفته‌اند؛ اما قسمت غربی حوضه آبریز ابرقو - سیرجان در واحد زاگرس و قسمت شرقی آن در واحد ایران مرکزی واقع شده است، به همین علت، از سیرک‌های موجود در شرق حوضه آبرقو - سیرجان برای برآورد ارتفاع برف‌مرز، استفاده نشد. با در نظر گرفتن چنین شرایطی، تعداد ۲۳۶۶ سیرک در این واحد شناسایی شد (شکل ۳ و جدول ۱).



شکل ۳. سیرک‌های شناسایی شده در واحد ژئومورفیک زاگرس

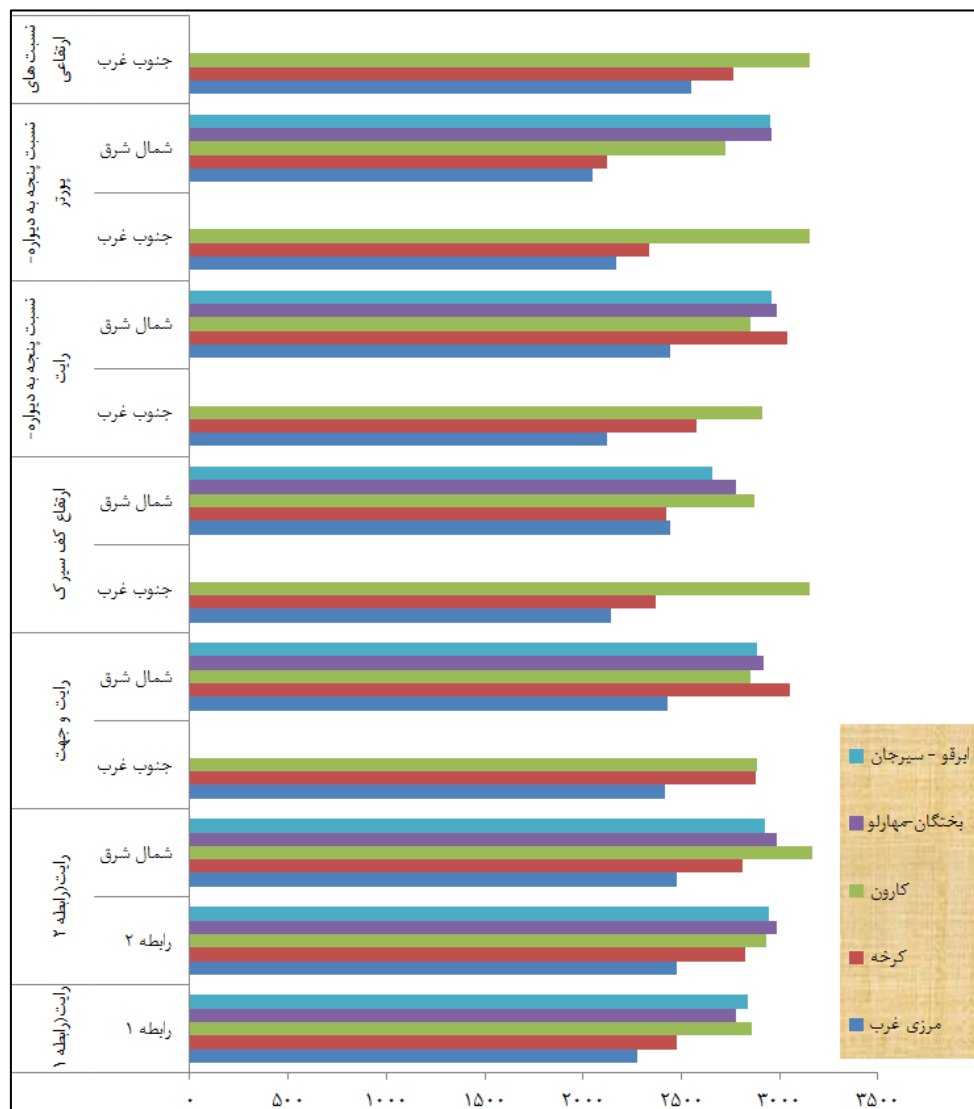
جدول ۱. فراوانی سیرک‌های شناسایی شده در واحد ژئومورفیک زاگرس

حوضه آبریز	جهت	فراوانی کل سیرک	فراوانی سیرک پس از حذف شبه‌سیرک	درصد فراوانی	فراوانی	تعداد سیرک در هر کیلومتر مربع
مرزی غرب	شمال شرق	۶۸۱	۳۵۱	۲۱/۷۶	۵۸۱	۰/۰۷۲
	جنوب غرب	۵۲۰	۲۳۰	۱۴/۲۵		
کرخه	شمال شرق	۱۸۵	۱۸۲	۱۱/۲۸	۳۴۸	۰/۰۹۲
	جنوب غرب	۱۵۹	۱۵۶	۹/۶۷		
کارون	شمال شرق	۲۲۲	۲۲۰	۱۳/۶۳	۴۱۸	۰/۰۲۵
	جنوب غرب	۲۲۰	۱۹۸	۱۲/۲۷		
بختگان - مهارلو	شمال شرق	۲۰۶	۱۶۹	۱۰/۴۷	۱۶۹	۰/۰۴۱
ابرقو - سیرجان	شمال شرق	۱۷۳	۱۰۷	۶/۶۳	۱۰۷	۰/۰۷



شکل ۴. تراکم سبیرک‌های یخچالی به تفکیک سطوح ارتفاعی در هر کیلومتر مربع، در حوضه‌های آبریز کرخه (الف)، کارون (ب)، ابرقو - سیرجان (ج)، بختگان - مهارلو (د) و مرزی غرب (ه)

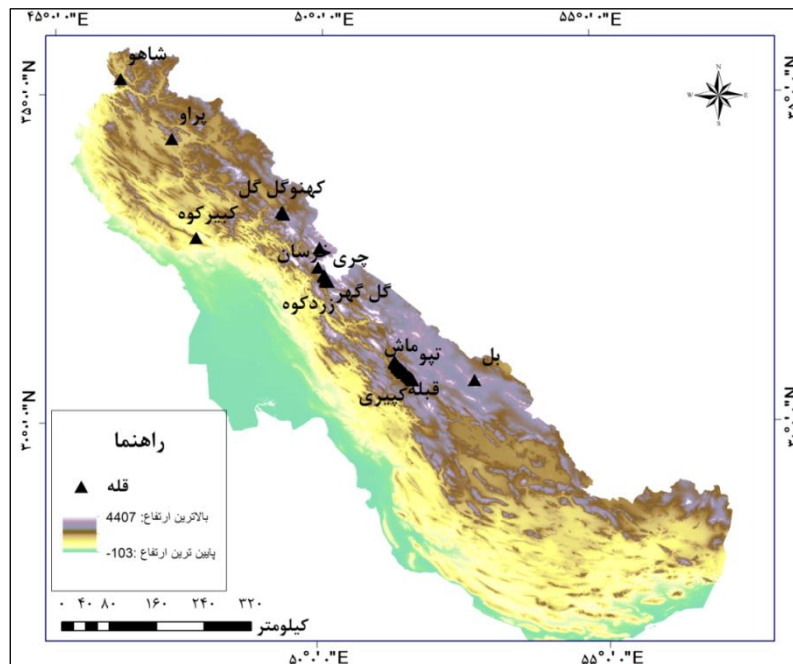
انطباق سبیرک‌های شناسایی شده با لایه لیتولوژی و تحلیل آن‌ها با توجه به نیمرخ طولی ترسیم شده در روش پورتر، تعداد ۷۵۳ سبیرک، به عنوان شبه سبیرک در نظر گرفته شد. با توجه به داده‌های ۱۶۱۳ سبیرک باقی مانده، ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری در روش‌های راییت با رابطه ۱ و ۲، راییت در جهات مختلف با رابطه ۲، ارتفاع کف سبیرک پورتر، نسبت پنجه به دیواره با اعمال روش راییت، نسبت پنجه به دیواره با اعمال روش پورتر، نسبت‌های ارتفاعی (شکل ۵)، در زیرحوضه‌های مختلف و در قله‌های مرتفع به روش‌های مختلف (جدول ۲) برآورد شد. برای بررسی اثرگذاری مقدار شیب و ارتفاع قله کوهستان بر ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری در جهات نثار و نگار، روابط خطی برآورد شد (جدول ۳ و ۴). آزمون کولموگروف و اسمیرنوف داده‌ها بیانگر توزیع نرمال داده‌های مقدار شیب، ارتفاع برف‌مرز و ارتفاع قله مورد مطالعه است. توزیع قله‌های مورد مطالعه در واحد زاگرس در شکل ۶ نمایش داده شده است. بردارهای مختلف سبیرک در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵. ارتفاع برف مرز زیر حوضه های واحد مورفوتکتونیک زاگرس در روش ها و جهات مختلف

جدول ۲. ارتفاع برف مرز قله مرتفع زاگرس به روش های مختلف

نام	جهت	شیب (درصد)	۱	۲	۳	۱-۴	۲-۴	۵	میانگین
شاهو	شمال شرق	۳۵	۱۸۷۸	۱۹۴۰	۱۹۸۰	۱۹۸۰	۱۹۸۰	۲۱۰۸	۱۹۷۷
زردکوه	شمال شرق	۳۷	۲۷۲۴	۲۶۲۲	۲۶۶۶	۲۶۹۶	۲۶۴۲	۳۲۱۷	۲۶۸۲
	جنوب غرب	۴۳	۲۹۵۳	۲۶۶۸	۲۹۳۳	۲۸۴۲	۳۲۵۸	۳۱۳۲	۲۹۹۶
قاش مستان	شمال شرق	۳۷	۲۸۰۰	۲۵۰۰	۲۷۴۰	۲۶۸۰	۲۷۰۰	۲۹۲۰	۲۶۸۴
	جنوب غرب	۴۴	۲۹۶۳	۲۷۴۱	۲۹۵۶	۲۸۱۹	۲۹۱۲	۲۸۰۵	۲۸۷۸
منار	شمال شرق	۳۵	۲۹۲۱	۲۸۴۰	۲۷۹۹	۲۹۴۱	۳۱۲۰	۳۲۱۰	۲۸۷۵
	جنوب غرب	۴۰	۳۱۰۰	۲۹۸۳	۲۸۵۴	۳۱۲۰	۳۰۰۰	۲۸۴۲	۳۰۱۴
اشترانکوه	شمال شرق	۳۶	۲۹۸۰	۲۷۶۱	۲۸۹۱	۲۹۳۴	۲۹۴۱	۳۱۰۰	۲۹۰۱
	جنوب غرب	۴۱	۳۱۰۲	۲۹۱۸	۳۲۰۰	۳۲۰۰	۳۱۹۰	۲۸۱۲	۳۱۲۲
پراو	شمال شرق	۳۶	۲۴۲۰	۲۵۲۰	۲۹۵۵	۲۵۹۹	۲۶۳۴	۲۶۰۰	۲۵۵۴
	جنوب غرب	۴۲	۲۴۰۰	۲۶۷۷	۲۸۳۳	۲۷۵۶	۲۸۴۵	۲۷۶۶	۲۶۸۸
کبیرکوه	شمال شرق	۳۶	۲۵۰۰	۲۵۳۱	۲۸۱۲	۲۶۰۱	۲۷۵۱	۲۶۴۳	۲۶۳۹
	جنوب غرب	۴۲	۲۷۳۴	۲۶۱۸	۳۱۲۵	۲۸۹۰	۲۹۲۰	۲۶۲۱	۲۸۵۷



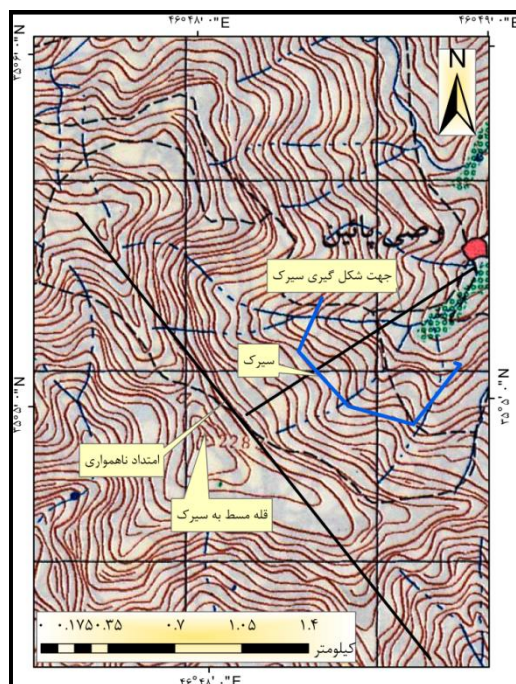
شکل ۶. موقعیت مکانی قله‌های مرتفع زاگرس

جدول ۳. رابطه خطی مقدار شیب کوهستان (Y) و ارتفاع برف‌مرز (X)

دامنه	روش مورد قبول	رابطه خطی	ضریب همبستگی	P-value
نصار	ارتفاع کف سیرک	$Y=150.36X-2724.7$	۰/۱۶	۰/۰۰۴
نگار	روش رایت (رابطه ۲)	$Y=-73.4X+5856.6$	۰/۴۸	۰/۰۰۵

جدول ۴. رابطه خطی ارتفاع قله (Y) و ارتفاع برف‌مرز (X)

دامنه	روش مورد قبول	رابطه خطی	ضریب همبستگی	P-value
نصار	روش رایت (رابطه ۱)	$Y=0.4058X+1055.7$	۰/۴۵	۰/۰۰۰
نگار	روش رایت (رابطه ۱)	$Y=0.2977X+1718.9$	۰/۵	۰/۰۰۰



شکل ۷. بردارهای مختلف سیرک یخچالی (مأخذ: نقشه ۱:۵۰۰۰۰، برگ II 5360، گلین)

بحث

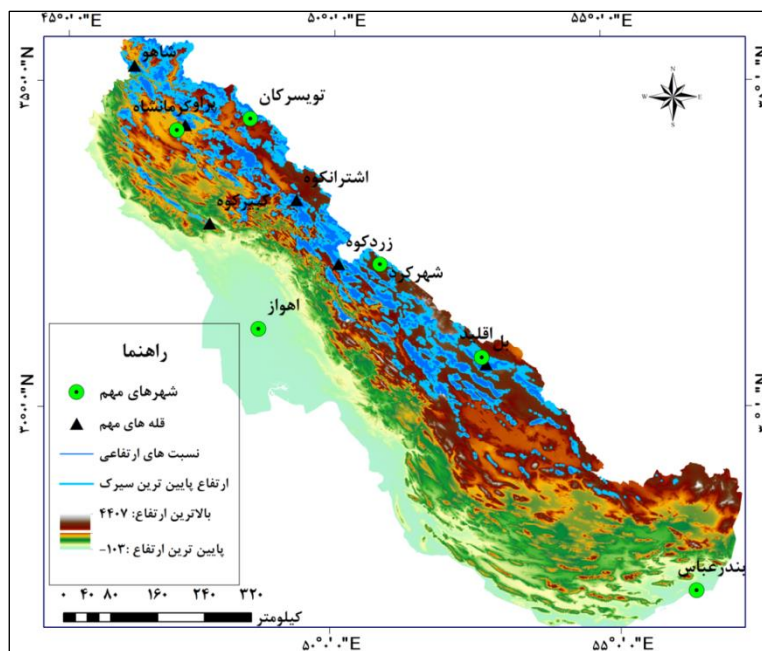
از تجزیه و تحلیل سیرک‌های شناسایی شده در جهات مختلف، چنین استنباط می‌شود که در واحد ژئومورفیک زاگرس، ۶۴٪ از سیرک‌ها در جهت شمال شرقی و ۳۶٪ در جهت جنوب غربی قرار دارند. روش‌های ارائه شده برای ارتفاع برف‌مرز کواترنری در واحد زاگرس نتایج یکسانی ندارند و این تفاوت به دلیل تفاوت در پارامترهای موجود در روش‌ها است. یکی از نتایج این مقاله، ارائه روش مناسب ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری برای واحد زاگرس است. از بین روش‌های اعمال شده برای برآورد ارتفاع برف‌مرز، روشی به عنوان روش مناسب معرفی شده که افزون بر اینکه ارتفاع قابل قبولی دارد، در دامنه‌های مختلف نیز اختلاف ارتفاع برف‌مرز را به خوبی انعکاس می‌دهد. در حالت عادی معمولاً ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نگار (جنوب، جنوب غرب، غرب) بیشتر از دامنه‌های نسا (شمال، شمال شرق، شرق) است؛ اما ارقام برآوردی برای ارتفاع برف‌مرز دائمی کواترنری برخی روش‌های اعمال شده در این واحد (روش‌های رایج، ارتفاع کف سیرک و نسبت پنجه به دیواره) نتیجه عکسی را نشان داده‌اند و به همین دلیل، براساس نتایج آن‌ها نمی‌توان در برآورد ارتفاع برف‌مرز اظهار نظر کرد. ارتفاع برآوردی به روش نسبت‌های ارتفاعی هم از نظر مقدار و هم از نظر اختلاف برف‌مرز در جهات مختلف در بین روش‌ها واقعی‌تر و معقول‌تر به نظر می‌رسد؛ البته در دو حوضه بختگان - مهارلو و ابرقو - سیرجان، به دلیل اینکه در بیشتر روش‌ها، ارتفاع برف‌مرز بین ۲۹۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بود، میانگین گرفته شد. با این وصف، در نهایت ارتفاع برف‌مرز در حوضه آبریز مرزی غرب ۲۳۰۰ متر، کرخه ۲۴۴۳/۵ متر، کارون ۲۹۳۷/۵ متر، بختگان - مهارلو ۲۹۶۱، ابرقو - سیرجان ۲۹۵۲ متر برآورد شد (جدول ۵). نگاهی به ارقام ارائه شده برای ارتفاع برف‌مرز دائمی کاملاً گویای این مطلب است که ارتفاع برف‌مرز از غرب به شرق و از شمال به جنوب افزایش یافته است.

با توجه به ارتفاع برف‌مرز دائمی، می‌توان وسعت مناطق بالاتر از ارتفاع برف‌مرز دائمی را برآورد کرد. برای نمایش مناطقی از زاگرس که در طی کواترنری تحت تأثیر فرایند یخچالی بودند، با در نظر گرفتن دو ارتفاع متفاوت نقشه منطقه تحت حاکمیت فرایند یخچالی تهیه شد؛ یکی ارتفاع برف‌مرز دائمی نهایی برآورد شده برای هر حوضه آبریز و دیگری ارتفاع پایین‌ترین سیرک شناسایی شده در هر حوضه آبریز در واحد ژئومورفیک زاگرس (شکل ۸). با توجه به وسعت واحد زاگرس و بررسی‌های انجام شده، حدود ۶۱٪ از مساحت زاگرس در حوضه‌های آبریزی واقع است که در طی کواترنری قابلیت اثرپذیری از فرایندهای یخچالی داشته‌اند؛ در صورتی که حدود ۲/۵٪ از مساحت زاگرس بالاتر از ارتفاع برف‌مرز قرار می‌گرفته است؛ از این مقدار، بیشترین مساحت مربوط به حوضه کارون (۳/۸۱٪) بوده است.

بر اساس ارتفاع پایین‌ترین سیرک شناسایی شده بیش از ۱۰٪ از مساحت زاگرس قابلیت اثرپذیری از فرایند یخچالی را داشته است. در این قسمت نیز حوضه کارون بیشترین مساحت (۱۳/۶۷٪) را به خود اختصاص داده است (جدول ۶). بیشتر این مساحت مربوط به زاگرس مرتفع است؛ این قسمت از واحد زاگرس، ارتفاع بیشتری نسبت به زاگرس جنوب شرق دارد و همچنین مرتفع‌ترین قله زاگرس در این بخش واقع شده‌اند و مساحت زیادی از مناطق یخچالی را به خود اختصاص داده‌اند. قرارگیری حوضه کارون و قله زردکوه در این قسمت از زاگرس، تأییدکننده این نکته است. مقایسه وسعت سطوح مرتفع‌تر از پایین‌ترین سیرک شناسایی شده با وسعت سطوح مرتفع‌تر از برف‌مرز دائمی در حوضه‌های واحد زاگرس، نشان‌دهنده این است که حوضه‌های کارون، کرخه و مهارلو - بختگان وضعیت مناسب‌تری نسبت به حوضه‌های مرزی غرب و ابرقو - سیرجان دارند (شکل ۹).

جدول ۵. ارتفاع برف‌مرز نهایی و ارتفاع پایین‌ترین سیرک شناسایی شده

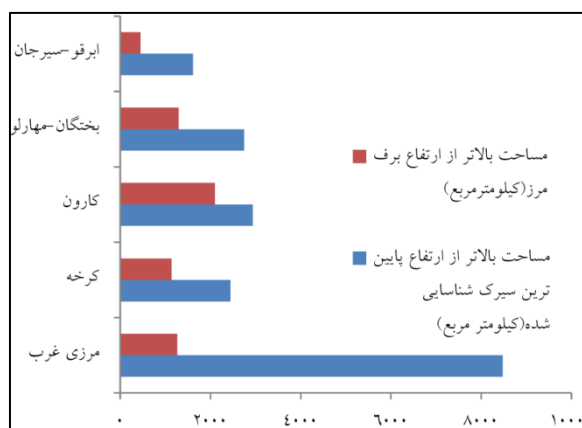
حوضه آبریز	ارتفاع برف‌مرز	مساحت بالاتر از برف‌مرز (کیلومتر مربع)	ارتفاع پایین‌ترین سیرک شناسایی شده
مرزی غرب	۲۳۰۰	۱۲۶۵	۱۹۵۲
کرخه	۲۴۴۳/۵	۱۱۳۹	۲۰۹۱
کارون	۲۹۳۷/۵	۲۰۹۸	۲۵۵۸
بختگان - مهارلو	۲۹۶۱	۱۲۹۷	۲۵۰۴
ابرکو - سیرجان	۲۹۵۲	۴۵۵	۲۵۱۳



شکل ۸. منطقه تحت حاکمیت فرایند یخچالی واحد ژئومورفیک زاگرس

جدول ۶. وسعت مناطق تحت تأثیر فرایند یخچالی

حوضه آبریز	منطقه یخچالی با توجه به ارتفاع برف‌مرز	منطقه یخچالی با توجه به ارتفاع پایین‌ترین سیرک شناسایی شده
مرزی غرب	۲/۸۳	۱۲/۸۳
کرخه	۲/۱۷	۹
کارون	۳/۸۱	۱۳/۶۷
بختگان - مهارلو	۱/۱۸	۱۲/۹۸
ابرکو - سیرجان	۲/۵	۵
میانگین	۲/۵	۱۰/۶۹



شکل ۹. مقایسه سطوح مرتفع‌تر از پایین‌ترین سیرک شناسایی شده با سطوح مرتفع‌تر از ارتفاع برف‌مرز دائمی حوضه‌های واحد زاگرس

یکی دیگر از نتایج این مقاله، محاسبه اثر عرض جغرافیایی و جهت کلی شیب سطوح ارضی بر ارتفاع برف‌مرز دائمی واحد زاگرس است. به‌طور کلی در این واحد ژئومورفیک با افزایش عرض جغرافیایی، ارتفاع برف‌مرز کمتر شده است، به‌طوری که بین جنوبی‌ترین حوضه آبریز این واحد (حوضه آبریز بختگان - مهارلو) تا شمالی‌ترین حوضه آبریز (حوضه آبریز مرزی غرب) ۶۶۱ متر اختلاف ارتفاع برف‌مرز دائمی برآورد شده است. ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نثار این واحد ۲۵۶۱ متر و دامنه‌های نگار آن ۲۸۲۲ متر برآورد شد. ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نگار (سطوح ارضی به‌طرف جنوب غربی) ۲۶۱ متر بالاتر از ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های شمال شرقی (دامنه‌های نثار) برآورد شد و با توجه به ارتفاع برف‌مرز برآورد شده در حوضه‌های آبریز، متوسط ارتفاع برف‌مرز واحد زاگرس ۲۷۱۹ متر در نظر گرفته می‌شود. از نظر ارتفاع پایین‌ترین سیرک شناسایی شده در حوضه آبریز مرزی غرب امکان تشکیل یخچال‌های سیرکی تا ارتفاع ۱۹۵۲ متر بوده است؛ این ارتفاع، در حوضه آبریز کارون ۲۵۵۸ متر بوده است. شرایط تشکیل یخچال‌های سیرکی به موقعیت مکانی حوضه‌ها و شرایط اقلیمی آن نیز بستگی داشته است.

ارتفاع برف‌مرز واحد زاگرس ۲۷۱۹ متر برآورد شد. با توجه به بالاتر بودن ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های جنوب غربی نسبت به دامنه‌های شمال شرقی و همخوانی ارتفاع برف‌مرز برآورد شده به روش نسبت ارتفاعی با این پیش‌فرض و نزدیکی ارتفاع برآوردی به کمک آن با میانگین ارتفاع در همه روش‌ها، روش نسبت ارتفاعی، بهترین روش برآورد ارتفاع برف‌مرز در واحد زاگرس معرفی می‌شود؛ از طرفی با توجه به نزدیک بودن ارتفاع برف‌مرز برآورد شده در پژوهش‌های قبل با ارتفاع ارائه‌شده با این روش، نتایج روش نسبت ارتفاعی را مورد تأیید قرار می‌دهد؛ برای مثال، سیف و همکاران (۱۳۹۴) ارتفاع برف‌مرز زیرحوضه ریگ، یکی از زیرحوضه‌های کوچک از حوضه آبریز کارون را ۲۸۳۶ متر برآورد کرده‌اند که با ارتفاع برف‌مرز برآوردشده حوضه آبریز کارون (۲۹۳۷ متر) در این مقاله حدود ۱۰۰ متر کمتر بوده است. قهرودی تالی و همکاران (۱۳۹۲) ارتفاع برف‌مرز حوضه آبریز زاب از زیرحوضه‌های مرزی غرب را ۲۶۵۰ متر و شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) ارتفاع برف‌مرز طاق‌دیس قلاجه در زاگرس شمال غربی را ۲۰۱۵ متر برآورد کردند. تفاوت‌های موجود هم می‌تواند ناشی از دیدگاه‌های پژوهشگران در زمان مشخص کردن سیرک‌های گذشته و روش برآورد ارتفاع برف‌مرز باشد و هم می‌تواند ناشی از اثرگذاری عوامل محیطی مانند تفاوت مقدار و جهت شیب سطوح ارضی و بلندترین قلّه مسلط به منطقه باشد. بین مقدار شیب و ارتفاع برف‌مرز در دامنه‌های نثار رابطه مستقیمی وجود دارد و افزایش مقدار شیب باعث افزایش ارتفاع برف‌مرز شده است. در صورتی که ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نگار زاگرس با مقدار شیب رابطه منفی دارد و افزایش مقدار شیب، ارتفاع برف‌مرز را کاهش داده است. تأثیرگذاری ارتفاع قلّه مسلط به سیرک نیز همانند شیب در دامنه‌های نگار بیشتر از دامنه‌های نثار است. هرچه قلّه مسلط به حوضه یا منطقه مورد مطالعه کم‌ارتفاع‌تر باشد، ارتفاع برف‌مرز آن پایین‌تر برآورد می‌شود.

نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل ارتفاع برف‌مرز کواترنری برآوردشده به روش‌های مختلف در حوضه‌های آبریز واحد زاگرس نشان‌دهنده این مطلب است که ارتفاع برف‌مرز برآوردشده به روش نسبت ارتفاعی، انطباق بیشتری با شرایط محیطی دارد و بهترین روش برآورد ارتفاع برف‌مرز برای این واحد ژئومورفیک معرفی می‌شود. براساس این روش، متوسط ارتفاع برف‌مرز کل واحد ۲۷۱۹ متر است و تفاوت ارتفاع برف‌مرز دائمی بین دامنه‌های نثار و نگار، ۲۶۱ متر است. یافته‌های پژوهش، مناسب‌تر بودن دامنه‌های نثار را برای شکل‌گیری بیشتر یخچال مورد تأیید قرار می‌دهد، بیشتر سیرک‌های ردیابی شده در زاگرس در دامنه‌های شمال شرقی شکل گرفته‌اند. با برآورد ارتفاع برف‌مرز

در مرتفع‌ترین قله‌های زاگرس، تأثیر ارتفاع قله بر ارتفاع برف‌مرز بررسی شد. ارتفاع برف‌مرز در زردکوه با ارتفاعی بیش از ۴۰۰۰ متر، مرتفع‌ترین قله واحد زاگرس، در جهت شمال شرق ۲۶۸۲ متر و در جهت جنوب غرب ۲۹۹۶ متر برآورد شد. قله شاهو، شمالی‌ترین قله در واحد زاگرس است و تفاوت ارتفاع برف‌مرز آن با جنوبی‌ترین قله این واحد (زردکوه) ۹۹۹ متر است. هرچند تأثیر شیب بر ارتفاع برف‌مرز را نمی‌توان ۱۰۰٪ تأیید کرد، ولی نمی‌توان از تأثیر آن نیز چشم‌پوشی نمود. مناطق کوهستانی شیبی بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ دارند. با رابطه رگرسیون خطی برآوردشده بین مقدار شیب به‌عنوان متغیر مستقل و ارتفاع برف‌مرز به‌عنوان متغیر وابسته به تفکیک در دامنه‌های نثار و نگار اثرگذاری مقدار شیب بر ارتفاع برف‌مرز تجزیه و تحلیل شد. روابط به‌دست‌آمده بیانگر آن است که مقدار شیب می‌تواند بر ارتفاع برف‌مرز اثرگذار باشد؛ ولی نمی‌توان تمام تفاوت ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های هم‌جهت را با اثرگذاری شیب توجیه کرد و اثرگذاری سایر عوامل را نادیده گرفت. نتایج نشان‌دهنده این است که مقدار شیب دامنه‌های نثار واحد زاگرس، تأثیر کمتری بر ارتفاع برف‌مرز داشته است و فقط در روش ارتفاع کف سیرک ضریب تبیین روابط برآوردشده به ۰/۱۶ رسیده است.

با توجه به نتایج رابطه خطی، در دامنه‌های نثار رابطه مستقیمی بین مقدار شیب و ارتفاع برف‌مرز وجود دارد و افزایش مقدار شیب باعث افزایش ارتفاع برف‌مرز شده است. تغییرات مقدار شیب دامنه‌های نثار این واحد برابر با ۲٪ و اختلاف ارتفاع برف‌مرز آن ۹۷۵ متر و نسبت تغییرات آن ۴۸۷ متر است. این ضریب در دامنه‌های نگار در روش رایت ۰/۴۸ برآورد شد. ارتفاع برف‌مرز دامنه‌های نگار زاگرس با مقدار شیب، رابطه منفی دارد و افزایش مقدار شیب، ارتفاع برف‌مرز را کاهش داده است. در دامنه‌های نگار این واحد ۴٪ اختلاف مقدار شیب و ۲۶۵ متر اختلاف برف‌مرز برآورد شد و نسبت تغییرات آن ۶۶ متر است. بین ارتفاع قله و ارتفاع برف در دامنه‌های مختلف، رابطه خطی به صورت مستقیم و همبستگی پایین است و فقط در روش رایت ضریب تبیین به ۰/۴۵ و ۰/۵ رسیده است. در این بخش، رابطه مستقیمی بین ارتفاع قله مسلط به سیرک و ارتفاع برف‌مرز وجود دارد، به این معنی که هرچه قله‌ای کم‌ارتفاع‌تر باشد، ارتفاع برف‌مرز آن پایین‌تر برآورد می‌شود. اختلاف ارتفاع بین مرتفع‌ترین و کم‌ارتفاع‌ترین قله مورد بررسی این واحد، ۱۶۱۹ متر است. تفاوت ارتفاع برف‌مرز در دامنه‌های نثار ۱۱۰۲ متر و در دامنه‌های نگار ۵۸۶ متر است.

منابع

- آرین، مهران؛ هاشمی، سید احمد (۱۳۸۷) پهنه‌بندی لرزه زمین‌ساختی زاگرس، *مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی*، ۱۸ (۶۹)، صص. ۶۳-۷۶.
- امیراحمدی، ابوالقاسم؛ مقصودی، اکبر؛ احمدی، طیبه (۱۳۹۰) بررسی آثار یخچالی کواترنر و تأثیر آن بر عدم شکل‌گیری مدنیت و سکونتگاه‌های مهم شهری در دشت آسپاس، *مطالعات و پژوهش شهری و منطقه‌ای*، ۳ (۱۰)، صص. ۶۱-۷۵.
- جعفری‌بگلو، منصور؛ یمانی، مجتبی؛ عباس‌نژاد، احمد؛ زمان‌زاده، سید محمد؛ ذهاب ناظوری، سمیه (۱۳۹۳) بازسازی برف‌مرزهای یخچالی کواترنر در کوهستان بیدخوان (استان کرمان)، *فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران*، ۱۲ (۴۰)، صص. ۱۰۷-۹۳.
- جعفری، غلامحسن (۱۳۹۵) بررسی لندفرم‌های یخچالی کواترنری توده کوهستانی الوند همدان با تأکید بر قسمت‌های مختلف سیرک، *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۵ (۱۹)، صص. ۱۳۹-۱۲۹.
- جعفری، غلامحسن؛ آوجی، مینا (۱۳۹۵) بررسی آثار برف‌مرز دائمی یخچال‌های کواترنری توده کوهستانی قروره، *فصلنامه*

کواترنری ایران، ۲ (۴)، صص. ۳۷۹-۳۹۱.

- جعفری، غلامحسین؛ آوجی، مینا (۱۳۹۶) بازسازی سیرک‌های یخچالی در کراترهای آتش‌فشانی کواترنری (مطالعه موردی قروه کردستان)، **پژوهش‌های فرسایش محیطی**، ۲ (۲۶)، صص. ۱-۱۵.
- خوش‌رفتار، رضا؛ فرید مجتهدی، نیما؛ اسعدی اسکوتی، ابراهیم؛ نوروزپور شهر بیجاری، کامبیز (۱۳۹۵) شواهد ژئومورفولوژیکی یخچال‌های کوهستانی پلئستوسن پایانی در کوه شاه البرز- البرز غربی، **فصلنامه کواترنری ایران**، ۲ (۲)، صص. ۱۶۵-۱۵۵.
- رامشت، محمدحسین؛ کاظمی، محمدمهدی (۱۳۸۶) آثار یخچالی در حوضه اقلید فارس، **رشد آموزش جغرافیا**، ۲۱ (۴)، صص. ۱۱-۳.
- رامشت، محمدحسین؛ نعمت‌الهی، فاطمه (۱۳۸۳) آثار یخساری در ایران، **نشریه دانشکده علوم انسانی تبریز**، ۳ (۱۷)، صص. ۱۴۹-۱۳۰.
- سرور، جلیل‌الدین؛ فرید مجتهدی، نیما (۱۳۹۰) شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی پلئستوسن در دامنه شمالی کوه خشچال (البرز غربی)، **فصلنامه جغرافیایی سرزمین**، ۸ (۳۱)، صص. ۶۷-۵۱.
- سیف، عبدالله؛ ثروتی، محمدرضا؛ راهدان مفرد، محمد (۱۳۹۴) بازسازی برف‌مرزهای کواترنری پایانی در محدوده سایت ریگ، **تحقیقات جغرافیایی**، ۳۰ (۱)، صص. ۲۰۸-۱۹۳.
- شریفی، محمد؛ طاهری‌نژاد، کاظم؛ فرح‌بخش، زهرا (۱۳۹۵) ارزیابی تغییرات اقلیمی بین زمان حال و پلئستوسن و بازسازی شرایط اقلیمی گذشته با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک (مطالعه موردی: حوضه دشت ابراهیم‌آباد - یزد)، **پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی**، ۵ (۱)، صص. ۶۲۸-۶۱۰.
- شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ باقری سیدلشکری، سجاد؛ جعفری اقدم، مریم؛ سلیمی‌منش، جبار (۱۳۹۴) بازسازی برف‌مرزهای آخرین دوره یخچالی با شواهد دوره‌های یخچالی در زاگرس شمال غربی (مطالعه موردی: طاق‌دیس قلاجه)، **جغرافیا و توسعه**، ۱۳ (۳۹)، صص. ۷۴-۶۱.
- طاحونی، پوران (۱۳۸۳) شواهد ژئومورفولوژیک فرسایش یخچالی پلئستوسن در ارتفاعات طالش، **پژوهش‌های جغرافیایی**، ۳۶ (۴۷۰)، صص. ۵۵-۳۱.
- عساکره، حسین (۱۳۹۰) **مبانی اقلیم‌شناسی آماری**، انتشارات دانشگاه زنجان، زنجان.
- قاسمی‌فر، الهام؛ ناصرپور، سمیه (۱۳۹۳) پهنه‌بندی اقلیمی ناحیه زاگرس، **اطلاعات جغرافیایی**، ۲۳ (۸۹)، صص. ۶۰-۵۴.
- قهرودی تالی، منیژه؛ ثروتی، محمدرضا؛ حسنی قارنایی، رسول (۱۳۹۲) تحلیل ناپایداری‌های حاصل از نهشته‌های یخچالی در حوضه رود زاب کوچک، **فضای جغرافیایی**، ۱۳ (۴۳)، صص. ۱۷-۱.
- قهرودی تالی، منیژه؛ حسنی قارنایی، رسول (۱۳۹۴) شواهد یخچالی در مناطق کوهستانی مرز ایران، ترکیه، عراق (کوهستان بزیسنا و دالامیر)، **فصلنامه کواترنری ایران**، ۱ (۴)، صص. ۳۳۷-۳۲۳.
- قهرودی تالی، منیژه؛ نصرتی، کاظم؛ عبدلی، اسماعیل (۱۳۹۴). تخمین برف‌مرز در آخرین دوره یخچالی در حوضه دالاخانی، **جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی**، ۲۶ (۲)، صص. ۲۴۶-۲۳۱.
- کیانی، طیبه؛ رامشت، محمدحسین؛ ملکی، امجد؛ صفاکیش، فریده (۱۳۹۵) بررسی تغییرات حوضه گاوخونی در فاز پایانی کواترنر، **پژوهش‌های جغرافیای طبیعی**، ۴۸ (۲)، صص. ۲۲۹-۲۱۳.
- ملکی، امجد؛ جباری، ایرج؛ حسینی، هاشم (۱۳۹۷) بازسازی قلمروهای مورفودینامیکی براساس شواهد ژئومورفولوژی یخچالی و مجاور یخچالی (مطالعه موردی: کوه‌های چهل‌چشمه و سارال در استان کردستان)، **فصلنامه کواترنری ایران**، ۲ (۳)، صص. ۱۳۰-۱۱۷.
- یمانی، مجتبی (۱۳۸۶) ژئومورفولوژی یخچال زردکوه (بررسی اشکال ژئومورفیک و حدود گسترش آن‌ها)، **پژوهش‌های**

جغرافیایی، ۳۹ (۷)، صص. ۱۳۹-۱۲۵.

یمانی، مجتبی؛ زمانی، حمزه (۱۳۹۵) تعیین ارتفاع خط تعادل (ELA) در دره هراز در آخرین دوره یخچالی، فصلنامه کواترنری ایران، ۲ (۴)، صص. ۳۱۴-۳۰۵.

یمانی، مجتبی؛ شمسی پور، علی اکبر؛ جعفری اقدم، مریم (۱۳۹۰) بازسازی برفمرزهای پلیوستوسن در حوضه جاجرود، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۳ (۷۶)، صص. ۵۰-۳۵.

یمانی، مجتبی؛ مقیمی، ابراهیم؛ عزیزی، قاسم؛ باخویشی، کاوه (۱۳۹۲) تعیین قلمروهای مورفوکلیماتیک هولوسن در بلندی‌های غرب استان کردستان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۵ (۴)، صص. ۱۴-۱.

Augustinus, P., Fink, D., Fletcher, M. S., Thomas, I. (2017) Re-assessment of the mid to late Quaternary glacial and environmental history of the Boco Plain, western Tasmania, **Quaternary Science Reviews**, 15 (160), pp. 31-44.

Barr, I. D., Spagnolo, M. (2015) Glacial cirques as palaeoenvironmental indicators: Their potential and limitations, **Earth-Science Reviews**, 151 (1) pp. 48-78.

Dahms, D., Egli, M., Fabel, D., Harbor, J., Brandová, D., de Castro Portes, R., Christl, M. (2018) Revised Quaternary glacial succession and post-LGM recession, southern Wind River Range, Wyoming, USA, **Quaternary Science Reviews**, 15 (192), pp. 167-184.

Delmas, M., Gunnell, Y., Calvet, M. (2015) A Critical Appraisal of Allometric Growth Among Alpine Cirques Based on Multivariate Statistics and Spatial Analysis, **Geomorphology**, 228, pp. 637-652.

Mîndrescu, M., Evans, I. S. (2014) Cirque form and development in Romania: allometry and the buzzsaw hypothesis, **Geomorphology**, 208 (1) pp. 117-136.

Moussavi, M. S., Valadan Zoj, M. J., Vaziri, F., Sahebi, M. R., Rezaei, Y. (2009) A New Glacier Inventory of Iran, **Annals of Glaciology**, 50 (53), pp. 93-103.

Napieralski, J., Harbor, J., Li, Y. (2007) Glacial Geomorphology and Geographic Information Systems, **Earth-Science Reviews**, 85 (1), pp. 1-22.

Pedrami, M. (1982) **Pleistocene Glaciation's and Paleoclimate in Iran**, Geol. Surv. Iran, Tehran.

Porter, S. C. (2000) Snowline Depression in the Tropics during the Last Glaciation, **Quaternary science reviews**, 20 (10), pp. 1067-1091.

Sarikaya, M. A., Ciner, A., Zreda, M. (2011) Quaternary glaciations of Turkey, **Developments in quaternary science**, 15 (1), pp. 393-403.

Xu, X. (2014) Climates during Late Quaternary glacier advances, glacier-climate modeling in the Yingpu Valley, the eastern Tibetan Plateau, **Quaternary Science Reviews**, 101 (1), pp. 18-27.

