

بازسازی برف مرزهای پلیوستوسن در حوضه‌ی جاجرود

مجتبی یمانی* - دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
علی اکبر شمسی پور - استادیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
مریم جعفری اقدم - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۵/۱۷

چکیده

پژوهش حاضر با ماهیت بنیادی، تلاش دارد تا رابطه‌ی میان جهت ناهمواری‌ها و گسترش سیرک‌های یخچالی را بررسی و سرانجام برف‌مرزهای آخرین دوره‌ی یخچالی کواترنری را در حوضه‌ی ابریز جاجرود تعیین کند. سیرک‌ها، جریان‌های یخرفتی و سنگ‌های سرگردان مهم‌ترین لندفرم‌های یخچالی و شواهد تغییرات اقلیمی موجود در حوضه‌ی مورد مطالعه به‌شمار می‌روند. نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و داده‌های اقلیمی دما و بارش ماهانه، ابزارها و داده‌های مورد استفاده در این پژوهش هستند. همچنین از نرم‌افزار Arc GIS 9.3 و سایر نرم‌افزارها برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. در این راستا، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی، موقعیت سیرک‌های منطقه شناسایی شده و برای بازسازی خط تعادل برف و یخ گذشته (ELA)، از میان روش‌های پنج‌گانه پورتر، روش مطالعه‌ی ارتفاع کف سیرک و از روش رایت نیز برای برآورد حد برف‌مرز آخرین دوره‌ی یخچالی استفاده شده است. برای بررسی وجود رابطه میان گسترش و پراکندگی سیرک‌های منطقه با جهت ناهمواری‌ها، از آزمون توان دوم کی پیرسون (مجذور X) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۳۸/۸ درصد از سیرک‌های منطقه رو به قطب و ۲۴/۷ درصد سیرک‌ها در دامنه‌های رو به استوا شکل گرفته‌اند؛ همچنین خط برف‌مرز وورم با استفاده از روش پورتر، ارتفاع ۳۰۷۲ متر و با استفاده از روش رایت، ارتفاع ۳۰۹۵ متری را نشان می‌دهد. برف‌مرز کنونی با استفاده از داده‌های دما و بارش، ارتفاع ۳۷۲۰ متری را نشان می‌دهد، درحالی‌که بیشتر پژوهشگران قبلی این مرز را بالای ۴۰۰۰ متر تعیین کردند.

کلیدواژه‌ها: یخچال کوهستانی، برف‌مرز، حوضه‌ی جاجرود، کواترنری، تغییرات اقلیمی.

مقدمه

از آن‌جاکه تعیین محدوده‌های اقلیمی در نواحی کوهستانی به صورت سطوح ارتفاعی مورد توجه است، بنابراین، توجه پژوهشگران معطوف به دستیابی ارقام ارتفاعی است که گویای مرز مشخص و تسلط عوامل متفاوت فرسایشی است. به عبارت دیگر، تلاش در زمینه تعیین حدی است که فراتر از آن، آثار عوامل فرسایش به صورتی متفاوت در محیط ظاهر شده باشند. به همین دلیل، برای مطالعه‌ی تحوّل پیکرشناسی نواحی کوهستانی، پژوهشگران سعی می‌کنند مرزبرف‌ها را در دوره‌های یخچالی و بین‌یخچالی تعیین کنند. به دلیل پیشروی یخچال‌ها در اروپای شمالی، ویژگی‌های ارتفاعات یخچالی به مراتب زودتر از ویژگی‌های ارتفاعات مناطق خشک شناسایی شد. جیمز آبر (Aber, 2003) درباره‌ی پیدایش نظریه‌ی یخچالی می‌گوید: "نظریه‌ی یخچالی در اوایل دهه‌ی ۱۸۳۰ در مطالعه‌ی کوهستان‌های اروپای غربی گسترش یافت. اسمارک و چارپنتر (Esmark & Charpentier, 1824) برای اولین بار در زمینه‌ی اکتشافات اولیه و این‌که یخچال‌ها در گذشته سطح وسیعی از خشکی‌ها را پوشانده بودند، کار کردند.

لوئیس و آگاسیز (Louis, Agassiz, 1840) یخچال‌شناسی را با تشریح و توصیف یخچال‌های فعلی و آثار فرسایشی آن بر روی صخره‌های بستری و قطعه‌های دیگری که همراه با آنها حمل می‌شد، آغاز کرد و با یادداشت‌برداری از ویژگی‌های شکلی رسوب‌های فرسایش‌یافته‌ی یخچالی، اصول فرم‌شناسی یخچال‌شناسی دیرینه را بنیان نهاد.

پنگ و بروخنر (Peng & Brohner, 1901-1908) با شروع قرن بیستم، تناوب دوره‌های یخچالی و بین‌یخچالی را براساس اصول اخترشناسی بیان کردند و حداکثر میل محور زمین و حداکثر خروج زمین از مدار خود را به علت بروز یخچال‌ها ارائه دادند که تحت عنوان سیکل بروخنر منتشر شد. این موضوع در دهه‌های بعد توسط میلانکوویچ بررسی شد. (Ford, 1950). آنها براساس آثار یخچالی و فرم‌های ارضی رودخانه‌ای در اروپا، چهار دوره‌ی یخچالی را تشخیص دادند که به ترتیب قدمت عبارت‌اند از: گونز^۱، میندل^۲، ریس^۳، وورم^۴. فاصله‌ی زمانی بین این دوره‌های یخچالی را دوره‌ی بین‌یخچالی و زمان پس از آخرین دوره‌ی یخچالی را دوره‌ی بعد از یخچالی نامیدند. ابریل (Ebrell, 1930) به دو دوره‌ی سرد قدیمی‌تر اشاره کرد و نام آنها را دونائو و بیبر گذاشت.

بررسی آثار مورفولوژیکی یخبندان‌های کواترنر ایران موضوع علاقه‌ی بسیاری از پژوهشگران بوده است که می‌توان شروع آن را به ژاک دومرگان (De Morgan, 1890) دانست. وی در توصیف لرستان، از سیرک یخچالی قدیمی اشترانکوه در ارتفاع ۳۸۰۰ متر و سیرک قلیان‌کوه در ارتفاع ۲۴۴۰ متر نام برده است.

مطالعه‌ی جدی در مورد آثار مستقیم یخبندان کواترنر در کوه‌های ایران با کارهای بوبک (Bobek, 1933) در البرز، قسمت‌های مرتفع کردستان و کارهای دزیو (Desio, 1934) در زردکوه شروع شد (جداری عیوضی، ۱۳۸۳، ۷۳). بوبک با بررسی یخرفت‌های رشته‌کوه البرز و زاگرس، آن را شاهده‌ی یخبندان قبل از وورم در این ارتفاعات معرفی کرد و افت

1. Gunz
2. Mindel
3. Riss
4. Wurm

آهنگ درجه حرارت را ۳-۴ درجه کمتر از زمان حاضر بیان نموده است. مطالعات وی سبب شد در سال ۱۹۵۵ میلادی اولین اظهار نظر کلی درباره‌ی اقلیم ایران در کواترنر را منتشر کند. او معتقد بود در طول دوران یخچالی، اقلیمی سرد و خشک‌تر از امروز بر ایران حاکم بوده است.

رایت (Wright, 1983) روی ارتفاعات زاگرس در امتداد مرز ایران و عراق کار کرد و خط دائمی برف در دوره وورم را در ارتفاع ۱۸۰۰ متری ردیابی نمود، براساس این نظریه، در ایران در زمان حاکمیت یخچال‌ها، خط برف خیلی پایین‌تر از میزانی است که بوبک و موافقان نظر وی ابراز کردند؛ همچنین رایت در جنوب غربی ازنا در اشترانکوه، سیرک یخچالی جبهه‌ی شمالی را در ۳۰۰۰ متر و یخرفت‌ها را در دره‌های کوچک تا ارتفاع ۲۶۰۰ متری مشاهده کرد. وی برای این نقطه، گردان دمای ۰/۶۸ درجه‌ی سانتی‌گراد را به‌ازای هر ۱۰۰ متر ارتفاع پیشنهاد داد. بر این اساس اگر کاهش ارتفاع مرز برف دائمی به‌علت کاهش دما بوده، می‌توان نتیجه گرفت که متوسط دمای سالانه این منطقه در وورم نسبت به زمان حال ۱۲ درجه‌ی سانتی‌گراد کمتر بوده است. با توجه به مرز برف‌های دائمی و پایین آمدن آنها در دوره‌های سرد پلیوستوسن که به نظر بوبک و شوایتزر (۱۹۸۵) حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر پایین‌تر از حد کنونی بوده است، پدیده‌های یخچالی را می‌توان تا سطوح ارتفاعی مذکور جست‌وجو و مشاهده کرد (زمردیان، ۱۳۸۱، ۴۱)؛ همچنین شوایتزر ارتفاع برف دائم را در حال حاضر در البرز در حدود ۴۲۰۰ متر تعیین می‌کند (عیوضی، ۱۳۸۳، ۷۵).

هاگه‌دورن (Hagedorn, 1974) و کوهله (Kuhle, 1976) مطالعاتی در مورد ایران مرکزی داشته‌اند (جداری عیوضی ۱۳۸۳، ۷۷). همچنین فیشر (Fisher, 1968) مطالعاتی را در کوه‌های البرز و قله علم‌کوه انجام داد. وی سیرک‌های یخچالی، طول و عرض و ارتفاع این سیرک‌ها و همچنین مسیر حرکت زبانه‌های یخی آنها را مورد مطالعه قرار داد. در ناحیه‌ی تهران آثار و شواهد زیادی از یخبندان وورم وجود دارد. به نوشته‌ی پدرامی یخچال دره‌های بزرگ کرج ۹۰ کیلومتر طول داشته و تا محل فعلی شهر کرج گسترش یافته بود. در وورم قدیم، یخچال دره‌های جاجرود نیز تا ارتفاع ۱۴۰۰ متر پایین آمده است (جداری عیوضی، ۱۳۸۳، ۷۷). پدرامی که به دنبال ردیابی و شناسایی آثار یخچالی بود، نسبت به تعیین خط برف دائمی برای نقاط مختلف ایران اقدام کرده است. وی سه اشکوب یخچالی چین‌نخورده توچال، شمال تهران و آبعلی را معرفی کرده است. حاصل مطالعات او نقشه‌ی خط برف دائم وورم است که در کتاب ژئومورفولوژی ایران به‌همّت جداری عیوضی در سال ۱۳۶۷ هـ.ش به چاپ رسیده است. بیشتر محققان برای مدلل ساختن تغییرات اقلیمی کواترنری در ایران از شواهد یخچالی و خط برف‌مرز، شواهد بیولوژیکی و آثار دریاچه‌ها و کویرها استفاده کردند. با توجه به تصاویر ماهواره‌ای که ویلیامز و فریگو (Williams & Ferrigo, 1998) از وضعیت یخچال‌های طبیعی مناطق گوناگون دنیا تهیه کردند، ایران ۲۰ کیلومترمربع یخچال طبیعی دارد که همه از نوع یخچال‌های کوهستانی هستند.

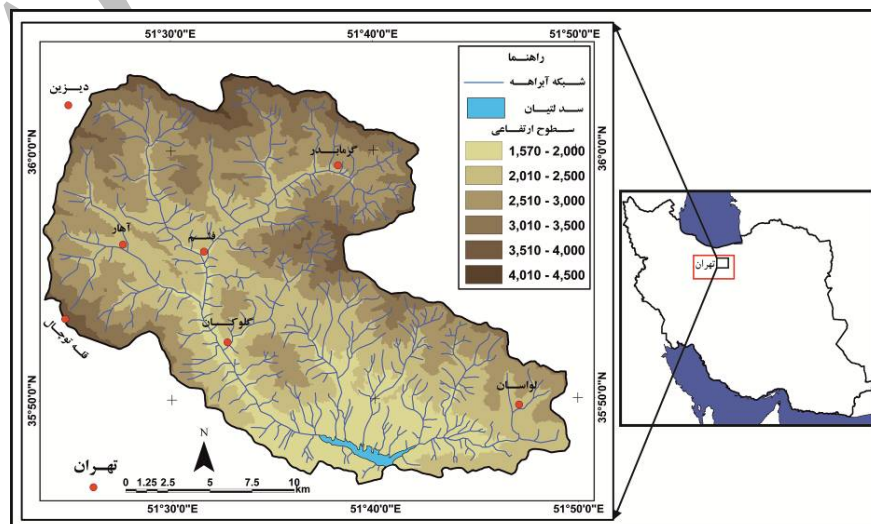
یمانی (۱۳۸۱) در پژوهشی ضمن تفسیر و تحلیل اشکال مورفولوژی یخچالی در ارتفاعات علم‌کوه، حدود گسترش زبانه‌های یخچالی را در حال حاضر و در آخرین دوره‌ی یخچالی تعیین کرد. وی در مطالعه‌ای دیگر با عنوان "ژئومورفولوژی یخچال‌های زردکوه" (۱۳۸۶)، به بررسی اشکال ژئومورفیک یخچال‌ها و حدود گسترش آنها در زردکوه پرداخته است. وی بیان کرد در دامنه‌های شمال غربی این رشته‌کوه و پیرامون قله‌های اصلی آن که بالای ۴۰۰۰ متر ارتفاع دارند، بیش از ۱۵ سیرک و زبانه‌ی یخچالی وجود دارد. به اعتقاد وی، حداکثر گسترش زبانه‌های یخچالی تا ارتفاع

۲۵۰۰ متر و محدود به بستر رودخانه کوه‌رنگ است و مرز تشکیل سیرک‌ها حداقل تا ۳۴۰۰ متر است. رامشت و نعمت‌الهی (۱۳۸۴) در مقاله‌ای تحت عنوان آثار یخساری در ایران، نسبت به ردیابی آثار یخساری محتمل در زاگرس اقدام کردند. رامشت و کاظمی (۱۳۸۶) با اتکا به شواهد و آثار ژئومورفیک باقی‌مانده از یخچال‌های کواترنری در منطقه‌ی اقلید فارس به بازسازی شرایط محیطی منطقه در سردترین فاز یخچالی کواترنر پرداختند. المدرسی و رامشت (۱۳۸۶) وجود آثار یخچالی در دره‌های برآفتاب حوضه‌ی سخوید رشته‌کوه‌های شیرکوه همراه با یک معبر بزرگ یخچالی را اثبات کردند. زمانی (۱۳۸۸) با مطالعه‌ی حوضه‌های جاجرود و کرج در دامنه‌ی جنوبی و حوضه‌های نور و هراز در دامنه‌ی شمالی البرز مرکزی، ارتفاع برف‌مرز گذشته با استفاده از روش راییت را ۲۷۲۰ متر و با روش ارتفاع کف سیرک، ارتفاع ۲۷۴۹ متر را پیشنهاد می‌دهد و البته برای حوضه‌ی آبریز جاجرود نیز ارتفاع برف‌مرز را ۲۷۸۰ متر و میانگین ارتفاع سیرک‌های یخچالی را نیز ۲۹۱۶ متر می‌داند.

این پژوهش، پژوهشی بنیادی است که هدف از آن شناسایی سیرک‌های یخچالی و بررسی رابطه میان جهات ناهمواری‌ها و گسترش سیرک‌ها و تعیین حد برف‌مرز در آخرین دوره‌ی یخچالی وورم و حال حاضر در حوضه‌ی جاجرود است.

موقعیت حوضه‌ی مورد مطالعه

البرز از نظر چینه‌شناسی و تکتونیک اختصاصات یکنواخت نداشته و به واحدهای مختلف کپه‌داغ و البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی و آذربایجان تقسیم می‌شود. حوضه‌ی آبریز جاجرود در یال جنوبی البرز مرکزی قرار گرفته است. مساحت آن ۱۸۹۰ کیلومترمربع است که از این مساحت حدود ۷۱۰ کیلومترمربع آن در بالادست سد لتیان و ۱۱۸۰ کیلومتر آن در پایین دست سد لتیان قرار گرفته است. طول شاخه‌ی اصلی جاجرود حدود ۴۲ کیلومتر است (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی توف سبز بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و به لحاظ زمین‌ساخت تحت تأثیر راندگی مشا - فشم قرار گرفته است که دارای راستای شرق - جنوب‌شرق، غرب - شمال‌غرب است.



شکل ۱. موقعیت حوضه‌ی جاجرود در دامنه‌های جنوبی البرز

داده‌ها و روش‌ها

هدف از این پژوهش، بررسی شناخت رابطه میان جهات ناهمواری‌ها و گسترش سیرک‌ها و از طرفی، تعیین ارتفاع برف‌مرز در آخرین دوره‌ی یخچالی وورم و حال حاضر حوضه‌ی مورد مطالعه است. به این منظور، از روش‌های توصیفی مطالعه‌ی کتابخانه‌ای برای بررسی مبانی نظری و پیشینه‌ی پژوهش، بازدیدهای میدانی برای تهیه تصاویر و کنترل اطلاعات نقشه‌های پایه و درنهایت روش تحلیلی استفاده شده است. نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰ سال ۱۳۳۵، نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده ETM+) منطقه به‌عنوان ابزار اصلی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی به‌عنوان داده‌های پایه به نرم‌افزار Arc GIS 9.3 انتقال داده شده و سپس رقومی شدند. با توجه به هدف پژوهش و برای دستیابی به نتایج مورد نظر، نقشه‌ی اشکال سیرک منطقه، داده‌های دما و بارش به‌عنوان متغیرهای اصلی منطقه، در تعیین برف‌مرزها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. در این راستا، از آمار ۵۲ ایستگاه استفاده شده است که ۱۹ ایستگاه تبخیرسنجی و ۳۳ ایستگاه باران‌سنجی است. با توجه به رابطه‌ی همبستگی میان عناصر، دما، بارش و ارتفاع نقشه‌ی دما و بارش گذشته و حال حاضر منطقه کشیده شد. به‌وسیله‌ی نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای، بازدیدهای میدانی، استفاده از GPS برای تعیین موقعیت سیرک‌ها و حدود گسترش یخرفت‌ها، اشکال یخچالی منطقه (با تأکید بر سیرک‌های یخچالی) شناسایی شد. در مرحله‌ی بعد، تعداد ۸۵ سیرک در حوضه شناسایی شد. به‌منظور بررسی معنادار بودن رابطه میان گسترش سیرک‌ها و جهات ناهمواری، تحلیل را بر مبنای روش‌های آماری قرار داده و از روش آزمون توان دوم کی^۱ یا آزمون مجذور X استفاده شده است. برای تعیین برف‌مرز کوتاه‌تری در حوضه‌ی جاجرود، از میان پنج روش پورتر برای بازسازی ارتفاع خط تعادل (ELA)^۲ روش ارتفاع کف سیرک استفاده شده است؛ زیرا براساس نظر پورتر، هنگامی که یخچالی فقط سیرک را پُر می‌کند، ELA دائمی آن معمولاً خیلی بالاتر از میانگین ارتفاع کف سیرک (CF)^۳ نیست. بنابراین استفاده از این روش (مطالعه‌ی کف سیرک) برای تعیین ارتفاع خط تعادل‌های گذشته مناسب است (Porter, 2001, 1068). روش دیگر برای برآورد برف‌مرز گذشته در حوضه، استفاده از روش راییت است. در این روش با تعیین مکان سیرک‌های کوچک و گذراندن خط ۶۰ درصد از آنها برف‌مرز دائمی تعیین می‌شود. همچنین با استفاده از نرم‌افزار GIS و داده‌های به‌دست‌آمده، ارتفاع برف‌مرز زمان حال در حوضه‌ی جاجرود نیز محاسبه شد. از نرم‌افزار ENVI4.3 برای تفسیر بصری و آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای موردنیاز و از برنامه Corel Draw برای کشیدن شکل‌های گرافیکی استفاده شد.

1. Chi – Square Test
2. Equilibrium-line Altitudes
3. Cirque Floor

یافته‌های تحقیق

شواهد یخچالی حوضه‌ی جاجرود

بررسی‌های میدانی وجود نمونه‌های مختلفی از لندفرم‌های یخچالی از جمله، دره‌های U شکل (شکل ۲)، سیرک‌های کوچک و بزرگ (شکل ۳) و توده‌های بزرگی از تیل‌های یخرفتی را ثابت می‌کند. تیل‌های یخرفتی ترکیبی از سنگ‌های سرگردان با تکه‌های بزرگ تا کوچک هستند (شکل ۴).



شکل ۲. دره U شکل در زیر حوضه‌ی گرمابدر که بعد از دوره‌ی یخچالی بر اثر فرسایش آبی تغییر شکل یافته است



شکل ۳. نمونه‌ای از سیرک‌های موجود در شرق، زیر حوضه‌ی گرمابدر (تصویر Google Earth)

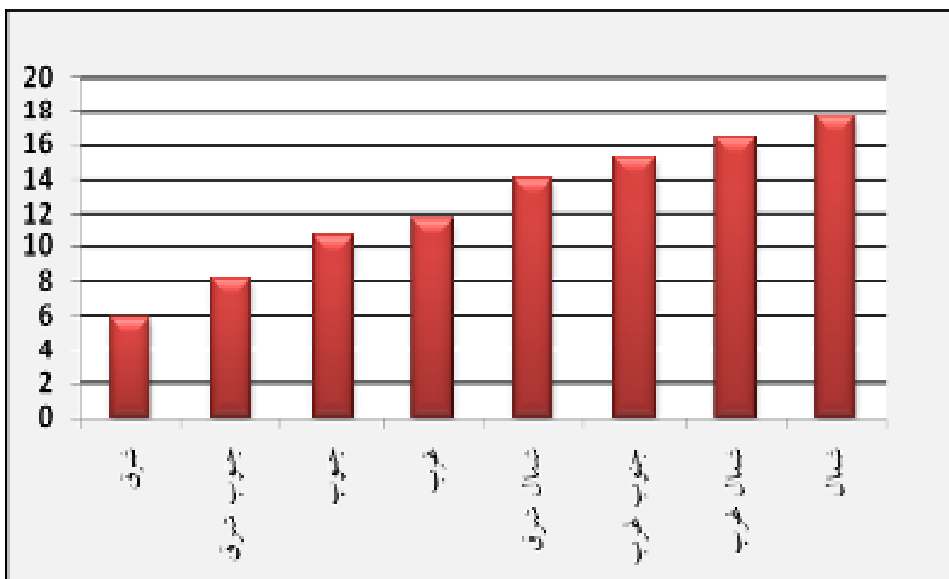


شکل ۴. تیل یخرفتی موجود در کف دره اصلی زیر حوضه‌ی گرمابدر

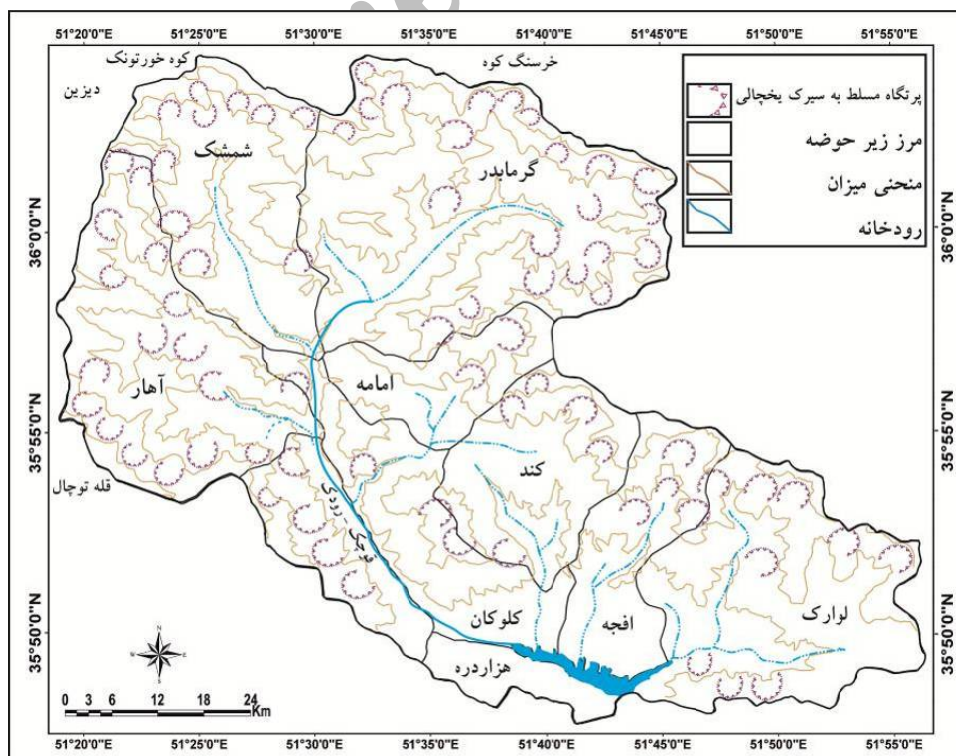
همچنین ۸۵ سیرک در حوضه شناسایی شد که ۱۵ سیرک (معادل ۱۷/۶ درصد) در دامنه شمالی تشکیل شده‌اند. در این میان ۴ سیرک (یعنی ۵/۹ درصد) با جهت شرقی، کمترین تعداد را دارند. پایین‌ترین سیرک حوضه در ارتفاع ۲۱۲۰ متری و در جهت شمال و بالاترین سیرک‌ها در ارتفاع ۳۹۰۰ متری و در جهت شرق، جنوب‌شرق و جنوب گسترش دارند. اشکال ۵ و ۶ چگونگی توزیع سیرک‌ها را در جهات جغرافیایی مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود بین فراوانی، تعداد و حجم سیرک‌ها با جهت ناهمواری‌ها ارتباط وجود دارد. برای ثابت کردن و معنادار بودن این رابطه، داده‌ها بر مبنای روش‌های آماری تحلیل شدند. از آن‌جا که مقیاس اندازه‌گیری جهات جغرافیایی هستند و ارزش اسمی دارند، برای آزمون معنادار بودن توزیع متغیر در جامعه از آزمون‌های غیرپارامتریک استفاده شده است (منصورفر، ۱۳۸۲، ۲۲۳). بیشترین فراوانی سیرک‌ها در دامنه‌های رو به قطب تشکیل شده است؛ یعنی در دامنه‌های رو به قطب (به دلیل دریافت انرژی کمتر خورشیدی) ماندگاری برف و یخ بیشتر است. به عبارتی، در شکل‌گیری سیرک‌ها جهت ناهمواری‌ها نقش مهمی داشتند. جهت اصلی ناهمواری‌ها در حوضه‌ی جاجرود، شمال‌غرب - جنوب‌شرق است و باعث شده است که حدود ۳۸/۸ درصد سیرک‌ها رو به قطب و ۲۴/۷ درصد سیرک‌ها در دامنه‌های رو به استوا شکل گیرند.

جدول ۱. توزیع فراوانی سیرک‌های یخچالی در حوضه‌ی جاجرود

جهت سیرک	فراوانی	درصد	جهت سیرک	فراوانی	درصد
شمال	۱۵	۱۷/۶	شمال‌غرب	۱۵	۱۶/۴
شمال‌شرق	۱۲	۱۴/۱	جمع $\sum X$	۸۵	-
شرق	۴	۵/۹			
جنوب‌شرق	۷	۸/۲	تعداد (n)	۸	-
جنوب	۹	۱۰/۶	میانگین حسابی (\bar{X})	۱۰.۶	-
جنوب‌غرب	۱۳	۱۵/۳	دامنه رو به قطب	۳۳	۳۸/۸
غرب	۱۰	۱۱/۷	دامنه رو به استوا	۲۱	۲۴/۷



شکل ۵. توزیع سیرک‌ها در حوضه‌ی آبریز جاجرود



شکل ۶. موقعیت سیرک‌های یخچالی در حوضه‌ی آبریز جاجرود

برای بررسی دقیق معنادار بودن این رابطه (شکل‌گیری و گسترش سیرک‌های یخچالی با جهات جغرافیایی و ناهمواری‌ها) از آزمون توان دوم کی یا آزمون مجذور X استفاده شده است. این روش مهم‌ترین آزمونی است که بر پایه‌ی بررسی فراوانی‌های مشاهده‌شده و فراوانی‌های نظری مورد انتظار است. به این منظور، ابتدا داده‌های سیرک‌ها را با توجه به جهات هشت‌گانه دسته‌بندی کرده و از رابطه یک برای محاسبه استفاده شده است. جدول ۲، مراحل کار و نتیجه را نشان می‌دهد.

$$X^2 = \frac{\sum(O-E)^2}{E} \quad \text{رابطه ۱}$$

O = فراوانی مشاهده‌شده؛

E = فراوانی مورد انتظار؛

X^2 = آزمون توان دوم کی.

جدول ۲. آزمون مجذور کی در حوضه‌ی مورد مطالعه

سیرک‌ها	شمال غرب	غرب	جنوب غرب	جنوب	جنوب شرق	شرق	شمال شرق	شمال	کل
O فراوانی مشاهده‌شده	۱۵	۱۰	۱۳	۹	۷	۴	۱۲	۱۵	$\sum X$ ۸۵
H_0 احتمال تحت فرض	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۱
E فراوانی مورد انتظار	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۸۵
$\frac{(O-E)^2}{E}$	۱/۸۲	۰/۰۳	۰/۵۴	۰/۲۴	۱/۲۲	۴/۱۰	۰/۱۸	۱/۸۲	۹/۹۵ $d \times f = 7$

در این‌جا، میزان درجه‌ی آزادی برابر با $v = d \times f = k - 1$ یعنی تعداد گروه‌های جدول منهای یک است؛ زیرا طبق نظریه‌ی ریاضی در محاسبه‌ی فراوانی نظری از مجموع فراوانی مشاهده‌شده استفاده می‌شود؛ در نتیجه، درجه‌ی آزادی $k - 1$ است. چون X^2 محاسبه‌شده (۹/۹۵) از X^2 جدول درجه‌های آزادی X^2 (۹/۸۰) در سطح ۰/۰۵ بزرگ‌تر است، بنابراین، فرضیه‌ی صفر رد شده و می‌توان نتیجه گرفت که بین فراوانی‌های مشاهده‌شده و فراوانی‌های مورد انتظار تناقض و تفاوتی وجود دارد و اختلاف و تفاوت موجود تصادفی نیست. از آن‌جا که فرضیه‌ی صفر رد می‌شود، نتیجه می‌گیریم در این حوضه، سیرک‌های یخچالی در جهت قطب گسترش بیشتری داشته است.

تخمین ارتفاع برف‌مرزها

۱- روش ارتفاع کف سیرک

پورتر در مطالعه‌ی کوهستان‌های یخچالی عرض‌های پایین، از پنج روش برای بازسازی ارتفاع خط تعادل (ELA)

استفاده می‌کند. از آن‌جاکه این روش‌ها از نظر شیوه با یکدیگر تفاوت دارند، بنابراین، نتایج حاصل از آنها با یکدیگر قابل مقایسه نیستند. این پنج روش عبارت‌اند از:

- ۱- روش ارتفاع کف سیرک^۱؛
- ۲- روش بررسی یخرفت‌های جانبی قسمت بالای دره^۲؛
- ۳- روش آستانه‌های یخبندان^۳؛
- ۴- روش نسبت ارتفاع^۴؛
- ۵- روش نسبت انباشتگی - مساحت^۵.

از میان روش‌های ذکر شده، با توجه به بارز بودن شواهد سیرک‌های یخچالی، روش مطالعه‌ی کف سیرک برای منطقه‌ی مورد مطالعه مناسب‌تر است، زیرا براساس نظر پورتر، هنگامی که یخچالی فقط سیرک را پُر می‌کند، ELA دائمی آن معمولاً خیلی بالاتر از میانگین ارتفاع کف سیرک (CF) نیست. بنابراین استفاده از این روش (مطالعه‌ی کف سیرک) مناسب برای تعیین ارتفاع (خط‌های تعادل) گذشته است (Porter, 2001, 1068) (شکل ۷). برای استفاده از روش ارتفاع کف سیرک به منظور پی‌بردن به برف‌مرز گذشته و خط تعادل آب و یخ در حوضه‌ی مورد مطالعه، بعد از آماده‌سازی جدول ۳، از رابطه دو برای محاسبه‌ی نما یا مد استفاده شده است.

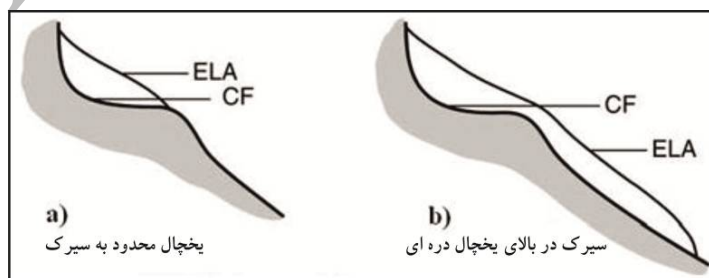
در این‌جا برای مقایسه‌ی ارتفاع متوسط سیرک‌های یخچالی و ارتفاعی که سیرک‌ها بیشترین فراوانی را در آن داشته‌اند، میانگین حسابی و مد (نما) هر یک در زیر آن یادداشت شده است. در آمارهای دسته‌بندی‌شده، به دسته‌ای که بالاترین فراوانی وقوع را دارد، نما می‌گویند (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۴، ۳۳۹).

$$M_o = L + \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} \right) \times h \quad \text{رابطه (۱)}$$

L: حد پایین طبقه‌ی نمادار؛

F₁: تفاضل طبقه‌ی ماقبل طبقه نمادار از فراوانی طبقه‌ی نمادار؛

F₂: تفاضل طبقه‌ی مابعد طبقه‌ی نمادار از فراوانی طبقه‌ی نمادار (منصف، ۱۳۷۲، ۸۰).



شکل ۷. روش ارتفاع کف سیرک (Porter, 2001, 1068)

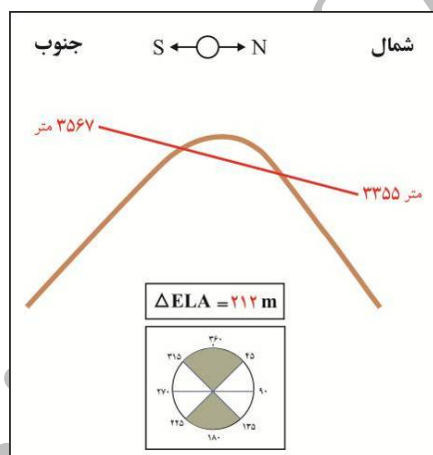
1. Cirque – Floor Method
2. Lateral- Moraine Method
3. Glaciation- Threshold Method
4. Altitude- Ratio Method
5. Accumulation- Area Ratio Method

جدول ۳. توزیع فراوانی ارتفاع کف سیرک‌های یخچالی در حوضه‌ی مورد مطالعه

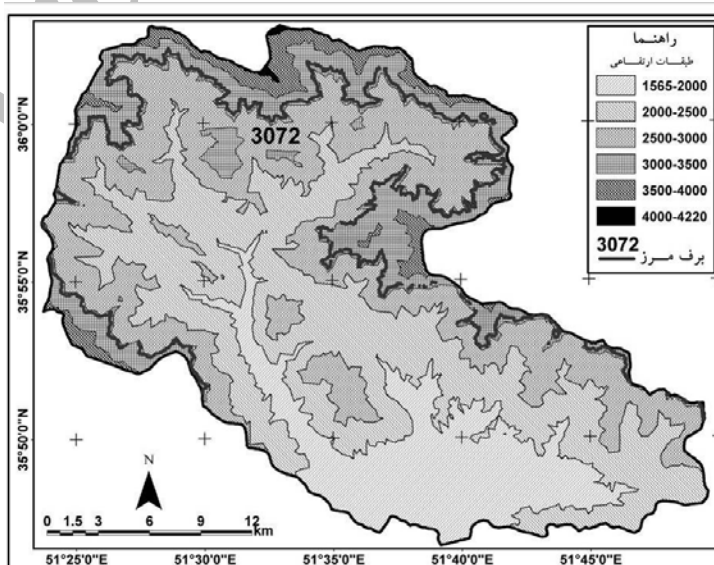
طبقه‌های ارتفاع	فراوانی سیرک	جهات جغرافیایی								درصد
		شمال	شمال شرق	شرق	جنوب شرق	جنوب	جنوب غرب	غرب	شمال غرب	
۲۱۰۰-۲۲۰۰	۱	۱	-	-	-	-	-	-	-	۱/۱
۲۲۰۰-۲۳۰۰	۱	۱	-	-	-	-	-	-	-	۱/۱
۲۳۰۰-۲۴۰۰	۲	۱	۱	-	-	-	-	-	-	۲/۲
۲۴۰۰-۲۵۰۰	۲	-	-	-	-	-	-	-	۱	۲/۲
۲۵۰۰-۲۶۰۰	۵	۱	۳	-	-	-	-	۱	-	۵/۵
۲۶۰۰-۲۷۰۰	۳	۱	-	-	-	-	۱	-	۱	۳/۳
۲۷۰۰-۲۸۰۰	۱۰	-	۱	۱	-	-	۱	۵	۲	۱۱/۱
۲۸۰۰-۲۹۰۰	۹	۳	-	۲	۱	-	۲	-	۱	۱۰
۲۹۰۰-۳۰۰۰	۲	-	۱	-	-	۱	-	-	-	۲/۲
۳۰۰۰-۳۱۰۰	۱۱	۲	-	-	۱	-	۳	۲	۳	۱۲/۲
۳۱۰۰-۳۲۰۰	۷	-	۲	-	۱	-	-	۱	۳	۷/۷
۳۲۰۰-۳۳۰۰	۵	۱	۱	-	-	۲	-	-	۱	۵/۵
۳۳۰۰-۳۴۰۰	۷	۲	۲	-	-	-	۱	۱	۱	۷/۷
۳۴۰۰-۳۵۰۰	۶	۲	-	-	۱	۲	-	-	۱	۶/۶
۳۵۰۰-۳۶۰۰	۵	-	-	-	-	۲	۳	-	-	۵/۵
۳۶۰۰-۳۷۰۰	۴	-	-	-	۱	۱	۲	-	-	۴/۴
۳۷۰۰-۳۸۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۳۸۰۰-۳۹۰۰	۲	-	-	۱	-	-	-	-	-	۲/۲
۳۹۰۰-۴۰۰۰	۳	-	-	۱	۲	۱	-	-	-	۳/۳
جمع	۸۵	۱۵	۱۲	۴	۷	۹	۱۳	۱۰	۱۵	۱۰۰
میانگین ارتفاع (متر)	-	۲۷۴۰	۲۸۰۰	۳۳۰۰	۳۳۰۰	۳۴۱۶	۳۰۷۱	۲۹۲۰	۲۹۴۴	۳۰۶۱
نما (متر)	-	۲۸۵۰	۲۵۴۰	۲۸۳۳	۳۹۵۰	۳۵۰۰	۳۰۵۰	۲۷۵۰	۳۱۰۰	۳۰۷۱/۶
سیرک‌های رو به قطب		مقدار نما								۳۳۵۵
سیرک‌های رو به استوا		مقدار نما								۳۵۶۷
ΔELA		اختلاف در دو دامنه								۲۱۲

همان‌طور که دیده می‌شود ارتفاع کف سیرک‌های یخچالی در حوضه‌ی جاجرود، ۳۰۶۱ متر و مقدار مد یا نما ۳۰۷۱/۶ متر و میانگین نما برای سیرک‌های رو به قطب برابر با ۳۳۵۵ متر و برای سیرک‌های رو به استوا برابر با ۳۵۶۷ متر است. پایین‌ترین سیرک منطقه با ارتفاع ۲۱۲۰ متر در جهت شمال و بالاترین سیرک‌ها در ارتفاع ۳۹۰۰ متری و در جهات شرق، جنوب‌شرق و جنوب گسترش دارند.

با توجه به مدل مذکور ارتفاع برف‌مرز گذشته (آخرین دوره‌ی یخچالی) برابر با مقدار نما در ارتفاع کف سیرک‌های یخچالی است که البته این ارتفاع در دامنه‌های شمالی و جنوبی با هم اختلاف دارد، میزان این اختلاف برابر با $\Delta ELA = 212 \text{ m}$ (شکل ۸) است. بنا بر مقدار به‌دست‌آمده از این روش، ارتفاع برف‌مرز در حوضه‌ی مورد مطالعه ۳۰۷۲ متر (شکل ۹) و میزان اختلاف ارتفاع خط تعادل در دو دامنه نیز برابر با ۲۱۲ متر است.



شکل ۸. ارتفاع برف‌مرز گذشته در حوضه‌ی جاجرود بر اساس مقدار نما



شکل ۹. ارتفاع برف‌مرز در آخرین دوره‌ی یخچالی بر اساس روش پورتر

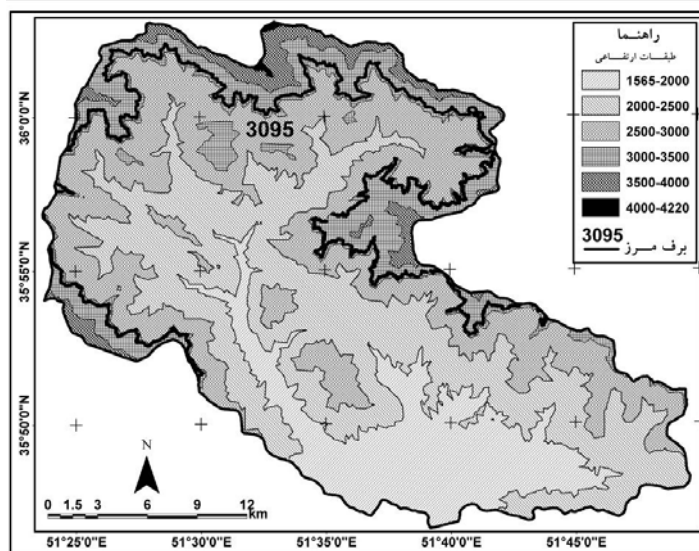
۲- روش رایت

یکی دیگر از روش‌هایی که می‌توان به‌وسیله‌ی آن برف‌مرز دائمی را در دوره‌های سرد کواترنر تعیین کرد، روش رایت است. در این روش با تعیین مکان سیرک‌های کوچک و گذراندن خط ۶۰ درصد از آنها، برف‌مرز دائمی تعیین می‌شود (رامشت و نعمت‌الهی، ۱۳۸۴، ۱۳). همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، ارتفاع خط برف که به این روش به‌ست می‌آید، ۳۰۹۵ متر است (شکل ۱۰). به‌عبارتی در سردترین دوره‌ی حاکم بر منطقه، در این ارتفاع برف همیشه وجود داشته و یا به مفهومی دیگر میانگین دما بر روی این خط برابر صفر درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. با مقایسه‌ی روش رایت و پورتر نتیجه می‌گیریم این دو روش تنها ۲۳ متر با هم اختلاف دارند.

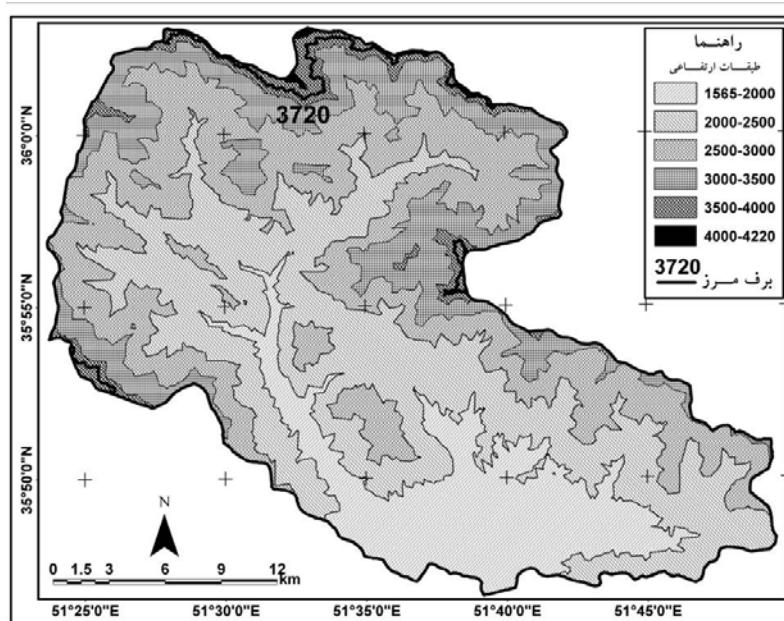
جدول ۴. تعیین خط ۶۰٪ در روش رایت

تعداد سیرک	درصد تجمعی	درصد	طبقه‌های ارتفاع	تعداد سیرک	درصد تجمعی	درصد	طبقه‌های ارتفاع
۲	۳۵	۴۱/۱۷	۲۹۰۰	۰	۰	۰	۱۵۰۰
۱۱	۴۶	۵۱/۱۱	۳۰۰۰	۰	۰	۰	۱۶۰۰
۷	۵۳	۶۲/۳۵	۳۱۰۰	۰	۰	۰	۱۷۰۰
۵	۵۸	۶۸/۳۳	۳۲۰۰	۰	۰	۰	۱۸۰۰
۷	۶۵	۷۶/۴۷	۳۳۰۰	۰	۰	۰	۱۹۰۰
۶	۷۱	۸۳/۵	۳۴۰۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰
۵	۷۶	۸۹/۴۱	۳۵۰۰	۱	۱	۱/۱۷	۲۱۰۰
۴	۸۰	۹۴/۱	۳۶۰۰	۱	۲	۲/۳۵	۲۲۰۰
۰	۰	۰	۳۷۰۰	۲	۴	۴/۷۰	۲۳۰۰
۲	۸۲	۹۶/۴۷	۳۸۰۰	۲	۶	۷	۲۴۰۰
۳	۸۵	۱۰۰	۳۹۰۰	۵	۱۱	۱۲/۹۴	۲۵۰۰
۰	۰	۰	۴۰۰۰	۳	۱۴	۱۶/۴۷	۲۶۰۰
۰	۰	۰	۴۱۰۰	۱۰	۲۴	۲۸/۲۳	۲۷۰۰
				۹	۳۳	۳۸/۸۲	۲۸۰۰

شکل ۱۰. ارتفاع برف‌مرز در آخرین دوره‌ی یخچالی بر اساس روش رایت



با استفاده از داده‌های دما و بارش و محاسبه‌ی آن در نرم‌افزار GIS، ارتفاع برف‌مرز زمان حال در حوضه‌ی جاجرود نیز محاسبه شد (شکل ۱۱). همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود خط برف‌مرز در ارتفاع ۳۷۲۰ متری قرار دارد.



شکل ۱۱. ارتفاع برف‌مرز زمان حال در حوضه‌ی جاجرود

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهد که میانگین ارتفاع کف سیرک‌های یخچالی در حوضه‌ی جاجرود، ۳۰۶۱ متر و مقدار مد یا نما ۳۰۷۲ متر است. میانگین نما برای سیرک‌های رو به قطب برابر با ۳۳۵۵ متر و برای سیرک‌های رو به استوا برابر با ۳۵۶۷ متر است. با توجه به مدل پورتر، ارتفاع برف‌مرز در آخرین دوره‌ی یخچالی، برابر با مقدار نما در ارتفاع کف سیرک‌های یخچالی است؛ البته این ارتفاع در دامنه‌های شمالی و جنوبی با هم اختلاف داشته و میزان آن برابر با ۲۱۲ متر است ($\Delta ELA = 212 m$)؛ بنابراین، نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از این روش براساس داده‌ها و نرم‌افزارهای جدیدتر و معتبرتر نشان می‌دهد که ارتفاع برف‌مرز در حوضه‌ی جاجرود ۳۰۷۲ متر است. این رقم خط میانگین دمای صفر درجه‌ی سانتی‌گراد را بر روی بلندی‌های منطقه نشان می‌دهد. اختلاف ارتفاع خط تعادل برف و یخ در دو دامنه نیز برابر با ۲۱۲ متر است. همچنین، برف‌مرز به‌دست‌آمده با روش راییت نیز ارتفاع ۳۰۹۵ متر را دنبال می‌کند. مقایسه‌ی روش‌های راییت و پورتر تنها ۲۳ متر اختلاف را نشان می‌دهند. با استفاده از داده‌های دما و بارش و محاسبه‌ی آن در نرم‌افزار GIS، ارتفاع برف‌مرز زمان حال در حوضه‌ی جاجرود نیز ارتفاع ۳۷۲۰ متر را نشان می‌دهد، درحالی‌که مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهشگران قبلی نشان می‌دهد که شواهد برف‌مرز برف دائمی را در حال حاضر در دامنه‌های جنوبی البرز در حدود ۴۴۰۰ متری و در دامنه‌های شمالی البرز در حدود ۴۲۰۰ متر محاسبه نمود، یافته‌های بوبک و درش نیز برف‌مرز دائمی کنونی در البرز را از ۴۲۰۰ تا ۴۰۰۰ متر و در دوره‌های سرد از ۳۶۰۰ تا ۳۴۰۰ متر می‌دانند. زمانی نیز این مرز را در البرز

در آخرین دوره‌ی یخچالی با استفاده از مدل پورتر در ارتفاع ۲۷۴۸ متری و با استفاده از روش راییت در ارتفاع ۲۷۲۰ متری می‌داند. عیوضی نیز مرزبرف دائمی را دامنه‌های جنوبی البرز، در ارتفاع ۴۴۰۰ متری که با خط هم‌دمای ۵- و هم‌بارش ۱۰۳۷ میلی‌متر مطابقت دارد، محاسبه نمود. از تعداد ۸۵ سیرک موجود در حوضه، ۱۵ سیرک (۱۷/۶ درصد) در دامنه‌های شمالی و ۴ سیرک (۵/۹ درصد) در دامنه‌های شرقی قرار گرفته‌اند. این ارقام گویای آن هستند که شکل‌گیری سیرک‌ها بیشتر از جهت ناهمواری‌ها پیروی نموده است. جهت اصلی ناهمواری‌ها در حوضه‌ی جاجرود، شمال غرب - جنوب شرق است. تحت تأثیر همین عامل، حدود ۳۸/۸ درصد سیرک‌ها رو به قطب و ۲۴/۷ درصد سیرک‌ها در دامنه‌های رو به استوا شکل گرفته‌اند.

منابع

- Aber, J. S., 2003, **Glacial Theory History**, Emporia State University, GO 568.
- Almodaresi, SA., Ramesht, MH., 2007, **The Effect of Nivation and Glaciers in Shirkooh Mountain of Yazd (Sakhvid Region)**, Geographic Space Magazine, Vol. 7, No. 19, pp. 1-32.
- Armed Forces Geographical Organization, **Photo Shoot with Approximate Scale 1:55000**, 1335.
- Armed Forces Geographical Organization, **Satellite Imagery Sensor ETM+**.
- Armed Forces Geographical Organization, **Topography Map 1:50000 Gajereh**, Tajrish, Lavasan, Lashkarak, East of Tehran and Jajroud.
- Bobek, H., 1934, **Reise in Nordwest Persien 1934**, [Travel in Northwest Persia 1934, Zeitschrift der Gesellschaft Fur Erdkunde zu Berlin, Vol. 9/10, pp. 359-369.
- Bobek, H., 1937, **Die Rolle der Eiszeit in Nordwest Iran** [The Role of the Ice Age in Northwestern Iran]: Zeitschrift fur Gletscherkunde, Vol. 25, pp. 130-183.
- Bobek, 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, pp. 403-413.
- Ferrigno, J.G., Williams, R., 1998, **Areal Extent of Pep Sent**, Day Glaciers, U.S Geological Survey Professional Paper 1386-a.
- Fisher, W.B., 1968, **The Land of Iran**, the Cambridge History of Iran, Cambridge.
- Geological Survey, **Geological Map Scale 1:100000 East of Tehran**, Marzanabad, Baladeh.
- Jedari Eyvazi, J., 2004, **Iran Geomorphology**, Payam Noor University Publication.
- Jedari Eyvazi, J., 2006, **Performance of Peltier Model in Classification of Glacier Areas**, Research Projects, Tehran University Research.
- Mansourfar, K., 2003, **Statistical Methods**, Tehran University Publication, Sixth Edition, pp.220-225.
- Monsef, M., 1993, **Basic and Methods of Statistics**, Tehran University Publications, Eighth Edition, Vol. 1.

- Nematollahi, F., Ramsht, M.H., 2005, **Effects of Glaciations in Iran**, Modares Human Sciences, Vol. 9, No. 4, pp. 143-162.
- Pedrami, M., **Pleistocene and Paleo Climate in Iran**. Geo, I, Surv, Tehran 1982.
- Pedrami, M., Carla, W., 1987, **Montgomery the Physical Geology of Pleistocene and Paleo Climate in Iran**, 1982, Geol, Surv, Tehran.
- Peltier, L.C., 1950, **The Geographic Cycle in Preglacial Regions as it is Related to Climatic Geomorphology**, Annals of the Association of American Geographers 40, pp. 214-236.
- Porter, S.C., 2001, **Snowline Depression in the Tropics during the Last Glaciations**, Quaternary Science Reviews, No. 20.
- Ramesht, M.H., Kazemi, M.M., 2007, **The Glacier Effects in Eghlid Fars Basin**, The Growth of Geography Education, Vol. 21, No. 4, pp. 11-3.
- Schweizer, G., 1972, **Klimatisch Bedigte Geomorphologi Sche und Glaziologische Zuge der Hoch Region Vorferasiatischer Gebirge (Iran Und Ostanatolien)**, Wiesbaden, 4, pp. 221-236.
- Water Resources Organization Country (Tamab), **Pluviometer and Evaporimeter**, 1994-2006.
- Wright, H.E., 1983, **Late-Pleistocene Glaciation and Climate around the Junin Plain**, Central Peruvian Highlands, Geografiska Annaler 65A, pp. 35-43.
- Yamani, M., 2001, **Geomorphology of Alamkoh Glaciers**, Geography Research Quarterly, No. 42, pp. 1-18.
- Yamani, M., 2007, **Zardkoh Glaciers Geomorphology**, Geography Research Quarterly, No.59, pp. 139-125.
- Zamani, H., 2009, **The Evidences and the Terminuses of the Quaternary Glaciers in the Central Alborz**, Supervisor: Yamani, M., Jedari Eyvazi, J., Ph.D. Dissertation, Department of Geography, Tehran University.
- Zomorodyan, M. J., 2002, **Iran Geomorphology**, Ferdowsi University of Mashhad Publication, Vol. 2, First Edition, pp. 40-42.