پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال یازهم، شماره ۴، بهار ۱۴۰۲
صص. ۵۳-۳۹

بازسازی برف‌مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی و اقلیمی (مطالعه موردی: دامنه‌های شمالی سبلان)

عقیل مددی* – استاد ژئومورفولوژی دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
سلمناز سید جباری – دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
صیاد اصغری – دانشیار ژئومورفولوژی دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸ تائید نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱

چکیده

یخبندان‌ها و یخچال‌های کوهستانی کواترنر موجب فرسایش و یخساری نواحی واقع در عرض‌های جغرافیایی بالاو ارتفاعات شده و ژئوفرم‌های متعددی را در سطوح ارتفاعی مختلف ایجاد کرده‌اند. ارزیابی مداوم وضعیت یخچال‌های طبیعی از لحاظ گرمایش جهانی و نیز تامین آب مناطق پایین دست، دارای اهمیت زیادی هستند. تحول و تنوع اشکال ژئومورفیک سطح زمین متاثر از فرایندهای مورفوژنز مختلفی است که در گذر زمان فعال بوده و چشم اندازهای منحصری به فردی را ایجاد کرده‌اند. در این مطالعه جهت بازسازی برف مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر در دامنه شمالی توده سبلان از روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) استفاده شده و بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی و از طریق داده‌های اقلیمی (دما و بارش) کنونی، شرایط مورفوکلیماتیک گذشته تخمین زده شد. جهت تشخیص و شناسایی بهتر اشکال یخچالی، از تلفیق نقشه توپوگرافی، مشاهدات میدانی و تصاویر دریافتی از گوگل ارث استفاده گردید. با شناسایی تعداد ۲۵ سیرک در ارتفاعات مختلف و بر اساس روش‌های ذکر شده، خط برف‌مرز دائمی منطقه مورد مطالعه در آخرین دوره یخچالی کواترنر تعیین شد. بر اساس روش رایت ارتفاع خط برف دائمی در آخرین دوره یخچالی، ۳۸۶۹ متر و بر اساس روش‌های پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) به‌ترتیب ۳۷۴۹/۵ و ۴۰۱۷/۵ متر تخمین زده شد. بازسازی شرایط دمایی منطقه مورد مطالعه، در آخرین دوره یخچالی کواترنر، میانگین دما را نسبت به زمان حال حدود ۳/۶۸ درجه سردتر برآورد می‌نماید. هم‌چنین تجزیه و تحلیل شرایط اقلیمی و بازسازی شرایط پالئوکلیماتیک منطقه میزان بارش در دوره گذشته نسبت به زمان حال را نزدیک به ۲۶ میلی‌متر بیش‌تر نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: برف‌مرز، سبلان، سیرک، کواترنر، یخچال.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: aghil48madadi@yahoo.com

مقدمه

شروع دوره کواترنر به اتفاق همه زمین‌شناسان و ژئومورفولوژیست‌ها و دیگر متخصصین علوم زمین، همراه با تغییرات اقلیمی و به‌عبارتی بهتر گسترش یخچال‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالا و نواحی مرتفع زمین بوده است (قنبرزاده و بهیانفر، ۶۶:۱۳۸۶). یخبندان‌ها و یخچال‌های کوهستانی کواترنر موجب فرسایش و یخساری این نواحی شده و ژئوفرم‌های متعددی را در سطوح ارتفاعی مختلف ایجاد کرده‌اند. در نیمه اول قرن نوزدهم لوئی آگاسیز (۱۸۷۱) زمین‌شناس و دیرینه‌شناس سوئیسی نقش یخچال‌های طبیعی را در تحول چشم‌اندازهای زمین مورد پژوهش قرار داد. پس از آن یخچال‌ها به‌عنوان یکی از فرایندها در ایجاد ژئوفرم‌ها مورد توجه ژئومورفولوژی قرار گرفت. با شروع قرن بیستم والترپنگ پژوهش‌هایی روی پادگانه‌های دریاچه کنستانس آلمان و پادگانه‌های یخچالی–رودخانه‌ای دانوب انجام دادند. نتایج حاصل از این تحقیقات، تقیسم‌بندی مراحل و دوره‌های یخبندان و بین یخبندان کواترنر بود که بر اساس شاخه‌های رودخانه دانوب به‌ترتیب گونز، مینڈل، ریس و وورم و بین‌یخچالی به نام‌های گونز–مینڈل، مینڈل–ریس و ریس–ورم نامگذاری گردید (معتمد، ۸۲:۱۳۸۲). در سال‌های اخیر نیز مطالعه زیادی در رابطه با فرآیندهای یخچالی و نقش آن‌ها در تحول ناهمواری‌ها صورت گرفته که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود: ملکی و همکاران (۱۳۸۰) در پژوهشی تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های پرآو را مورد بررسی قرار داده است، نتایج پژوهش نشان داد که تکامل اشکال کارستی منطقه (پالئوکارست) مربوط به دوره‌های یخچالی کواترنر بوده و از ارتفاع ۲۵۰۰ متری به بالا اشکال کارستی به حداکثر تکامل رسیده‌اند. در حالی که شرایط فعلی در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر فعالیت بسیار ضعیف توسعه کارست ادامه دارد. قربانی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی در ناهمواری‌های شاهو را مورد بررسی قرار دادند. این محقق و همکارانش در این پژوهش با بررسی آثار و شواهد ژئومورفیک یخچالی نظیر سیرک‌ها، دره‌ها و مورن‌های یخچالی و هم‌چنین پدیده‌های مجاور یخچال (سولی‌فولوکسیون) در نقاط مختلف منطقه، نتیجه گرفتند که در دوره‌های سرد پلیئستوسن از ارتفاع ۱۸۰۰ متر (مرز برف دائمی) به بالا، شرایطی فراهم بوده که دولین‌های کارستی دارای نقش دوگانه سیرک – دولین باشند و در ابعاد وسیع شکل گرفته‌اند. اصغری سراسکانرود و جعفری (۱۳۹۳) در پژوهشی به بررسی آثار یخچالی کواترنر در حوضه زنجان‌رود پرداخته‌اند. این مطالعه، ردیابی آثار یخساری بر اساس شاخص‌های ژئومورفیک و شواهد اقلیمی را مورد تحقیق و تفحص قرار داده و برف‌مرز دائمی در کل منطقه را ارتفاع ۲۲۷۰ متر دانسته‌اند. بازسازی خط تعادل آب و یخ کواترنری منطقه حاکی از آن است که هر چند در مطالعات قبلی ارتفاع آن را با خط همدمای ۵ درجه منطبق بوده، ولی ارتفاع آن در این حوضه ۱۵۵۰ متر، با خط همدمای ۲/۱۶ درجه سانتی‌گراد گذشته انطباق داشته و بر اساس مورن‌های سرگردان منطقه ۱۶۷۵ متر و منطبق با خط همدمای ۱/۸ درجه سانتی‌گراد تعیین گردیده است. شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی بازسازی برف‌مرزهای آخرین دوره یخچالی با شواهد دوره‌های یخچالی ارتفاعات قلاجه در زاگرس چین خورده را مورد تحقیق قرار داده‌اند. بر اساس این پژوهش ارتفاع برف‌مرز به روش پورتر را ۲۰۱۹ متر و به روش رایت ۲۰۱۵ متر تعیین و خط تعادل آب و یخ در دامنه‌های شمالی و جنوبی کوه‌های قلاجه را به ترتیب ۲۰۳۳ و ۲۰۷۵ متر محاسبه شده است. در این تحقیق سیرک‌های یخچالی به عنوان مهم‌ترین شواهد ژئومورفولوژیکی دوره‌های یخچالی منطقه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قهرودی‌تالی (۱۳۹۴) در پژوهشی تخمین برف‌مرز در آخرین دوره یخچالی حوضه دالاخانی را مورد بررسی قرار دادند و ارتفاع برف‌مرز کوه‌های دالاخانی را ۲۸۲۰ متر تعیین کرده‌اند. میانگین دمای حوضه مورد مطالعه در کواترنر نسبت به زمان حاضر ۵/۳۸ درجه سانتی‌گراد کاهش داشته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد رسوباتی که امروزه بخش‌های پست‌تر حوضه دالاخانی را پوشانده‌اند، منشاء یخچالی دارند و توسط سیلاب‌های قلمرو مجاور یخچالی به ارتفاعات پایین‌تر منتقل شده‌اند. جعفری و آوجی (۱۳۹۵) در پژوهشی به بررسی آثار برف‌مرز دائمی یخچال‌های کواترنری توده کوهستانی قروه پرداخته و با بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی منطقه، ارتفاع برف‌مرز دائمی یخبندان‌های کواترنر را در دامنه‌های شمالی و جنوبی آن توده

کوهستانی ۲۲۰۰ متر برآورد نمودند. همچنین کاهش دمای کواترنر نسبت به عصر حاضر را ۸/۸ درجه سانتی‌گراد و بارش کنونی منطقه مورد مطالعه را حدود دو برابر میزان کنونی تخمین زده‌اند. اسفندیاری و همکاران(۱۳۹۶) در پژوهشی با استفاده از روش شی‌گرا لندفرم های یخچالی(سیرک‌ها) دامنه‌های شمالی سبلان را مورد شناسایی قرار دادند. ایشان و همکارانشان جهت انجام این پژوهش از لایه مدل رقومی ارتفاعی زمین با قابلیت تفکیک زمینی ۱۰ متر و نقشه توپوگرافی۱:۲۵۰۰۰ استفاده نمودند. نتایج این مطالعه سیرک‌های یخچالی را به همراه خطالراس‌ها را شناسایی و استخراج نمود.

بررسی آثار مرفولوژیکی یخبندان‌های کواترنر ایران موضوع مورد علاقه بسیاری از محققان بوده که می توان شروع آن را به دومرگان[1] (۱۸۹۰) نسبت داد. در این میان ردیابی پاره‌ای از پدیده‌ها سهل‌تر و پاره‌ای دیگر به واسطه غیر محتمل‌تر بودن آن کمتر مورد ارزیابی محققان قرار گرفته و از آن جمله می توان از وجود آثار یخسارها یا کلاهک‌های یخی نام برد جعفری و همکاران (۱۳۹۴). نکته در خور تعمق در این زمینه توجه زمین ریخت شناسان به تغییرات اقلیمی و دنبال کردن آثار ژئومرفیک ناشی از آن در سطوح اراضی است. این بررسی‌ها توانسته، آنها را با روش‌های خاصی آشنا سازد(قربانی و همکاران،۱۳۹۵). به‌طوری که با تمسک به پدیده‌های ژئومورفولوژی ناشی از عملکرد یخ در آن دوران، قادر به محاسبه و برآورد رقومی ویژگی‌های اقلیمی عصر یخبندان شده‌اند. در مطالعات اخیر کشف و بسط نظریه‌های جدید در مورد مکان‌هایی است که محققان پیشکسوت کمتر تصور وجود آثار عملکرد یخ در آنها را می‌داده‌اند محور نوآوری و بداعت در این گونه پژوهش‌هاست. آن‌چنان که بررسی‌های انجام شده بر روی چاله‌های برودتی ایران نشان می‌دهد، چهار کانون برودتی در ایران وجود دارد، که پهنه وسیعی از ایران را در برمی‌گیرد و به غیر از آثار معمول یخچالی، پدیده های دیگر یخچالی چون یخسارها نیز در این نواحی قابل ردیابی است(شریفی و همکاران،۱۳۹۶).

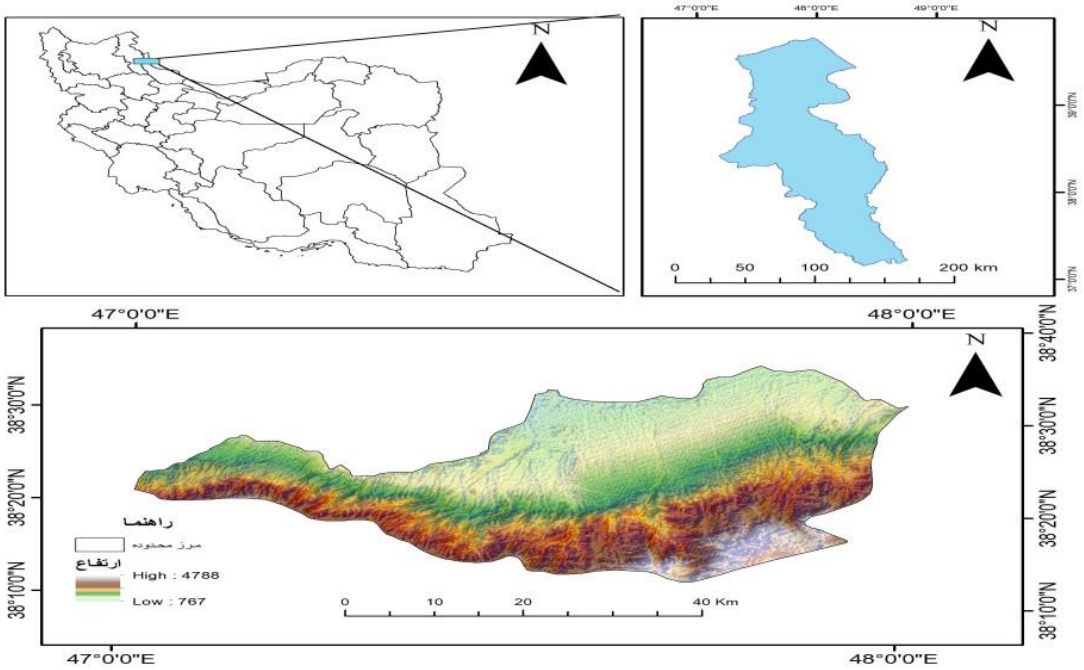
مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در مورد تخمین برف مرز دائمی دوره‌های یخبندان کواترنر با تاکید بر سیرک‌های یخچالی، در غرب کشور مربوط به تحقیقات بوبک (۱۹۳۳)، رایت (۱۹۶۱)، پدرامی (۱۹۸۲) و محمودی (۱۳۶۷) است. پدرامی ارتفاع خط برف‌مرز دائمی دوره یخچالی ورم در غرب کشور را در نمای کلی از ۱۷۰۰ تا ۲۷۰۰ متر ترسیم نموده است. با توجه به قرار گرفتن توده کوهستانی سبلان در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه شمالی و ارتفاع بیش از ۴۸۰۰ متر و هم‌چنین انجام نگرفتن هیچ پژوهش مرتبط با آثار ژئوموفیک فرسایش یخچالی در دامنه‌های شمالی سبلان، این تحقیق به‌منظور ارزیابی و بازسازی برف مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر در رشته کوه سبلان به روش‌های رایت و پورتر انجام گرفت.

منطقه مورد مطالعه

توده سبلان در جنوب مشگین شهر واقع در استان اردبیل، در محدوده جغرافیایی ″۱،′۳۶،°۴۷ تا″۳،′۵۸،°۴۷ طول شرقی و ″۲،′۷،°۳۸ تا″۱،′۳۶،°۳۸ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این رشته کوه، از شرق به غرب به‌ترتیب از کوه‌های مهمی تشکیل شده که می‌توان به سه قله معروف سبلان بزرگ با ۴۸۱۱ متر، حرم ۴۶۱۲ متر و اغام داغ یا کسری ۴۵۷۳ متر اشاره نمود. بلندترین آن‌ها قله سبلان با ارتفاع ۴۸۱۱ متر، در ۴۱ کیلومتری غرب اردبیل واقع شده است. رشته کوه آتشفشانی خاموش سبلان از دره قره سو در شمال غرب اردبیل آغاز و در جهت شرقی–غربی به طول ۶۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۴۸ کیلومتر تا کوه قوشاداغ در جنوب اهر قرار دارد (شکل ۱). تشکیلات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، عمدتاً از ترکیب آندزیتی، ریولیتی و دا سیتی تشکیل شده است(شریفی،۱۳۹۶ ؛ قهرودی تالی، ۱۳۹۰). این سنگ‌ها با لیتولوژی تقریبا یکنواخت دارای درزها و ترک های فراوان هستند. سبلان پس از دماوند معروف‌ترین کوه

[1] - Dumorgan

آتشفشانی خاموش ایران است که بر اثر فعالیت‌های آتشفشانی، مخروط قله آن شکل گرفته است. در دهانه مخروطی آتشفشان، دریاچه‌ای بسیار زیبا به وجود آمده، و در طول سال پوشیده از برف و یخ است. از دیدگاه ژئومورفولوژی، دامنه شمالی سبلان در منطقه مرفودینامیک یخچالی و مجاور یخچالی قرار دارد. پوشش گیاهی محیط مجاور یخچالی گونه ایرانی-تورانی(۳۲۰۰- ۲۳۰۰ متر)، چمنزار و گونه ارو سیبری (۴۰۰۰-۳۲۰۰ متر) می‌باشد (اصغری سراسکانرود، ۱۳۹۳؛ مبین، ۱۳۶۰؛ جوانشیر، ۱۳۶۷). هم‌چنین در دامنه‌های سبلان هیچ گونه پوشش جنگلی وجود ندارد.



شکل۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان اردبیل

داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش از نقشه‌های زمین شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی، نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ رقومی سازمان جغرافیایی نیروی‌های مسلح، تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ تاریخ ۲۸ مارس ۲۰۲۱، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری منطقه مورد مطالعه و داده‌های اقلیمی (دما و بارش) سازمان هواشناسی استان اردبیل استفاده شده است. از نرم افزار اکسل جهت تجزیه و تحلیل داده‌های اقلیمی و محاسبه معادلات رگرسیون دما و بارش نسبت به ارتفاع، از نرم‌افزار ArcGIS جهت ایجاد پایگاه داده، تحلیل های مکانی- فضایی و در نهایت پیاده کردن مدل و از نرم افزار ENVI جهت پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. به‌منظور ارزیابی و باز سازی برف مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر در رشته توده سبلان از روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی استفاده گردید و دما و بارش دوره یخچالی وورم با استفاده از شواهد و شرایط اقلیمی تخمین زده شد. به‌منظور انجام این تحقیق ابتدا به بازسازی برف مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی با استفاده از روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) پرداخته شد.

محاسبه برف مرز به روش رایت: یکی از ساده‌ترین روش‌های تعیین خط برف در مناطق کوهستانی و یخچالی روش رایت است. اساس این روش تعیین ارتفاعی است که ۶۰ درصد سیرک‌ها بالاتر از آن قرار گیرند. برای انجام این کار ابتدا موقعیت ارتفاعی سیرک‌های یخچالی را با استفاده از خطوط منحنی میزان نقشه‌ی توپوگرافی منطقه مورد مطالعه مشخص شد. سپس با استفاده از رابطه (۱) خط برف‌مرز دائم محاسبه گردید(قهرودی،۱۳۹۴).

رابطه(۱) (۰/۶۰× (ارتفاع پایین ترین سیرک – ارتفاع بالاترین سیرک)) – ارتفاع بالاترین سیرک = ارتفاع خط برف‌مرز دائم

محاسبه برف مرز به روش‌های پورتر: در مطالعه یخچال‌های نواحی کوهستانی در عرض‌های پایین جغرافیایی، پورتر از پنج روش (ارتفاع کف سیرک، بررسی یخرفت‌های جانبی قسمت بالای دره، آستانه‌های یخبندان، نسبت ارتفاع و نسبت انباشتگی- مساحت) استفاده کرده است (یمانی، ۱۳۹۰). در این مطالعه از دو روش ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی استفاده شده است.

در روش ارتفاع کف سیرک برای تعیین خط ارتفاع برف مرز دوره یخبندان وورم در نواحی کوهستانی، پس از مشخص کردن موقعیت سیرک‌ها و تهیه جدول سطوح ارتفاعی، مد (نما) را با استفاده از رابطه (۲) محاسبه خواهد شد.

$$M_O = L + (\frac{f_1}{f_{1+f_2}}) \times h$$ رابطه (۲)

که L: حد پایین طبقه نمادار، f_1 : تفا ضل طبقه ماقبل طبقه نمادار از فراوانی طبقه نمادار، f_2 : تفا ضل طبقه ما بعد طبقه نمادار از طبقه نمادار و h: ارتفاع دو طبقه ارتفاعی است (یمانی، ۱۳۹۰).

در روش ن سبت‌های ارتفاعی برای تعیین خط برف مرز دائمی آخرین دوره یخچالی کواترنر در کوه ستان‌های عرض‌های پایین جغرافیایی از رابطه (۳) استفاده خواهد شد.

$$PS=\frac{A_h + A_t}{2}$$ رابطه (۳)

که PS: خط برف مرز دائمی و A_h : بالاترین نقطه قلمرو یخچالی و A_t : محدوده پایانی قلمرو یخچالی است (یمانی، ۱۳۹۰).

در ادامه جهت بررسی شرایط دمایی، دما و بارش دوره یخچالی وورم با استفاده از شواهد و شرایط اقلیمی تخمین زده شد. دما نقش تعیین کننده در پیدایش ژئومورفولوژی یخچالی دارد و یکی از شرایط اصلی تشکیل یخچال‌های کوهستانی ا ست. متنا سب با افزایش ارتفاع دما کاهش می‌یابد. آهنگ افت آدیاباتیکی هوای ا شباع، کمتر از هوای خ شک ا ست و مقدار آن حدود ۶ درجه سانتی‌گراد در هر ۱۰۰۰ متر صعود بالغ می‌شود (علیجانی و کاویانی، ۱۳۷۸). به منظور تخمین شرایط دمایی و تهیه نقشه هم‌دمای منطقه مورد مطالعه، در زمان حال و دوره‌های سرد کواترنر، ابتدا داده‌های اقلیمی مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی‌های منطقه مورد مطالعه، جدول (۱) در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۰) تهیه شد. سپس جهت تهیه نق شه هم‌دما، با توجه به داده‌های تهیه شده، معادله رگر سیون بین دما و ارتفاع در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. با استفاده از این رابطه و تابع محاسبه‌گر رستر[1] موجود در نرم افزار ARC GIS و قرار دادن مدل ارتفاعی رقومی[2] منطقه به‌جای ارتفاع، نقشه هم‌دما تهیه خواهد شد.

پارامتر موثر دیگر در سیستم مورفوژنز محیطی و پیدایش ا شکال ژئومورفیک یخچالی کوهستانی، عامل بارش و رطوبت است. به منظور بررسی شرایط بارشی و رطوبتی منطقه مورد مطالعه، در زمان حال و دوره های سرد کواترنر، پس از تهیه داده‌های اقلیمی مربوط به منطقه مورد مطالعه، معادله رگرسیون بین بارش و ارتفاع در نرم‌افزار اکسل محاسبه و سپس با ا ستفاده از تابع محا سبه‌گر ر ستر موجود در نرم افزار ARC GIS و قرار دادن مدل ارتفاعی رقومی منطقه به‌جای ارتفاع، نقشه هم‌بارش تهیه شد.

بحث و یافته‌های تحقیق

[1] - raster calculator

[2]. Digital Elevational Model

در این مطالعه جهت بازسازی برف مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر در دامنه های شمالی رشته کوه سبلان از روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی و جهت تخمین دما و بارش از شواهد و شرایط اقلیمی استفاده شد. بدین منظور برای تشخیص و شناسایی بهتر شرایط یخچالی کوهستان سبلان، نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و از تلفیق مشاهدات میدانی و نقشه‌های توپوگرافی تعداد ۶۰ سیرک در ارتفاعات مختلف شناسایی و به روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) خط برف‌مرز دائمی کواترنر در کوهستان سبلان تعیین شد. هم‌چنین داده‌های اقلیمی مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی‌های منطقه مورد مطالعه (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۰)، تهیه و مورد استفاده قرار گرفت (جدول۱).

جدول۱: مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک مورد استفاده در این تحقیق

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	میانگین بارش (میلی متر)	دما (سانتی‌گراد)
مشگین شهر	۴۷/۶۳	۳۸/۴۰	۱۵۶۸/۵	۳۳۴/۷	۱۰/۷
اردبیل	۴۸/۲۹	۳۸/۲۲	۱۳۳۲	۳۱۸/۴	۸/۸
سرعین	۴۸/۰۷	۳۸/۱۵	۱۶۹۲	۳۳۹/۸	۸/۴
دوست بیگلو	۴۷/۳۲	۳۸/۳۲	۸۱۶	۲۹۹/۴	۱۳/۶

الف: محاسبه برف‌مرز به روش رایت

برای محاسبه برف‌مرز دامنه‌های شمالی سبلان با استفاده از روش رایت ابتدا سیرک‌های یخچالی این کوهستان با مشاهدات میدانی و نرم افزار Google Earth مشخص گردید. سپس موقعیت جغرافیایی و ارتفاع سیرک‌ها از طریق GPS و خطوط منحنی میزان نقشه‌ی توپوگرافی ۱: ۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه تعیین شد (جدول۲). در ادامه با تشکیل جدول فراوانی سیرک‌های شناسایی شده، فراوانی، درصد فراوانی، فراوانی تجمعی و درصد فراوانی تجمعی سیرک‌ها در سطوح ارتفاعی مختلف محاسبه شد (جدول۳).

جدول۲: موقعیت جغرافیایی سیرک‌های توده سبلان

ردیف	ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	۳۲۶۹	۳۹-۰۹-۳۸	۰۱-۴۶-۴۷
۲	۳۳۷۲	۲۴-۱۰-۳۸	۳۲-۴۶-۴۷
۳	۳۴۴۷	۱۹-۱۰-۳۸	۵۵-۴۶-۴۷
۴	۳۵۸۷	۵۲-۱۰-۳۸	۵۹-۴۶-۴۷
۵	۳۶۱۲	۳۴-۱۱-۳۸	۴۰-۴۶-۴۷
۶	۳۷۰۷	۲۱-۱۲-۳۸	۵۱-۴۶-۴۷
۷	۳۷۱۱	۰۹-۱۲-۳۸	۲۳-۴۷-۴۷
۸	۳۷۱۶	۲۵-۱۳-۳۸	۲۷-۴۸-۴۷
۹	۳۸۶۰	۵۲-۱۳-۳۸	۱۲-۴۸-۴۷
۱۰	۳۹۲۸	۵۶-۱۳-۳۸	۰۵-۴۸-۴۷
۱۱	۴۰۰۸	۰۳-۱۴-۳۸	۰۰-۴۸-۴۷
۱۲	۴۰۱۳	۰۴-۱۴-۳۸	۳۳-۴۸-۴۷
۱۳	۴۱۱۷	۰۶-۱۴-۳۸	۳۴-۴۸-۴۷
۱۴	۴۱۵۶	۵۴-۱۳-۳۸	۳۹-۴۷-۴۷
۱۵	۴۲۷۴	۲۱-۱۴-۳۸	۰۳-۴۸-۴۷

۱۶	۴۲۹۳	۴۰-۱۴-۳۸	۱۴-۴۸-۴۷
۱۷	۴۳۰۹	۴۹-۱۴-۳۸	۲۷-۴۸-۴۷
۱۸	۴۴۶۱	۰۴-۱۵-۳۸	۱۳-۴۸-۴۷
۱۹	۴۴۹۸	۱۷-۱۵-۳۸	۰۸-۴۸-۴۷
۲۰	۴۵۰۵	۵۴-۱۵-۳۸	۴۹-۴۹-۴۷
۲۱	۴۶۸۸	۰۸-۱۶-۳۸	۲۵-۵۰-۴۷
۲۲	۴۶۹۷	۰۷-۱۶-۳۸	۲۴-۵۰-۴۷
۲۳	۴۶۹۹	۱۱-۱۶-۳۸	۱۲-۵۰-۴۷
۲۴	۴۷۳۸	۵۶-۱۵-۳۸	۲۵-۵۰-۴۷
۲۵	۴۷۶۶	۰۱-۱۶-۳۸	۱۹-۵۰-۴۷

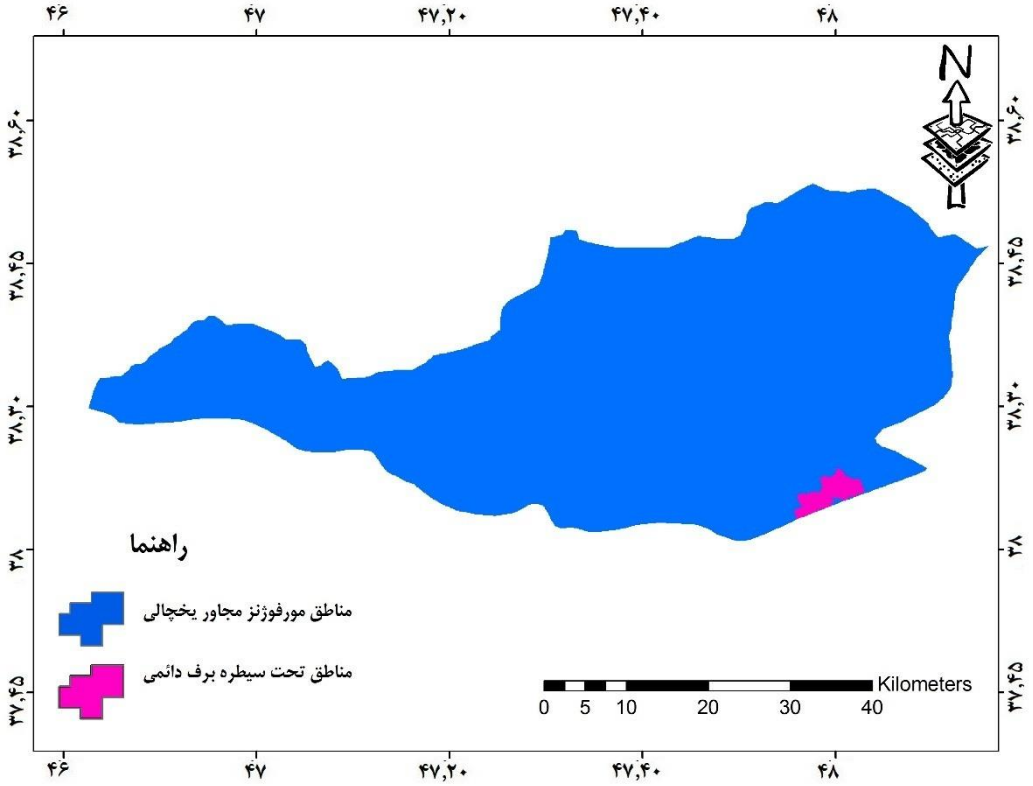
جدول۳: سطوح ارتفاعی و جدول فراوانی سیرک‌های توده سبلان

سطوح ارتفاعی	۳۲۰۰ – ۳۳۰۰	۳۳۰۰ – ۳۴۰۰	۳۴۰۰ – ۳۵۰۰	۳۵۰۰ –۳۶۰۰		۳۶۰۰ – ۳۷۰۰	۳۷۰۰ – ۳۸۰۰	۳۸۰۰ – ۳۹۰۰	۳۹۰۰ – ۴۰۰۰	۴۰۰۰ – ۴۱۰۰	۴۱۰۰ – ۴۲۰۰	۴۲۰۰ – ۴۳۰۰	۴۳۰۰ – ۴۴۰۰	۴۴۰۰ – ۴۵۰۰	۴۵۰۰ – ۴۶۰۰	۴۶۰۰ – ۴۷۰۰	۴۷۰۰ – ۴۸۱۲
فراوانی	۱	۳	۱	۱		۱	۱	۱	۱	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۲	۲
درصد	۴	۱۲	۴	۴		۴	۴	۴	۴	۸	۱۲	۸	۴	۸	۴	۸	۸

خط برف‌مرز دائمی آخرین دوره یخچالی کواترنر (وورم) در کوهســـتان ســـبلان به روش رایت و با توجه به جدول (۳) و رابطه (۱) ۳۸۶۹ متر تعیین گردید.

ارتفاع خط برف‌مرز دائم = ۴۷۶۶-((۴۷۶۶-۳۲۶۹)×۰/۶۰) =۳۸۶۹

پس از محاسبه ارتفاع خط برف‌مرز دائمی کواترنر در کوهستان سبلان به روش رایت (۳۸۶۹ متر) با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی، منطقه مورد مطالعه به دو بخش مناطق تحت سیطره برف دائمی و مناطق مورفوژنز مجاور یخچالی یا پریگلاسیر تقسیم‌بندی شد (شکل۲).



شکل۲: نقشه برف‌مرز منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش رایت

ب: محاسبه برف مرز به روش‌های پورتر

روش نسبت‌های ارتفاعی: برای محاسبه برف‌مرز کوهستان سبلان با روش نسبت‌های ارتفاعی، با استفاده از رابطه (۳) ارتفاع ۴۰۱۷/۵ متر به عنوان خط برف مرز دوره یخبندان وورم تعیین شد.

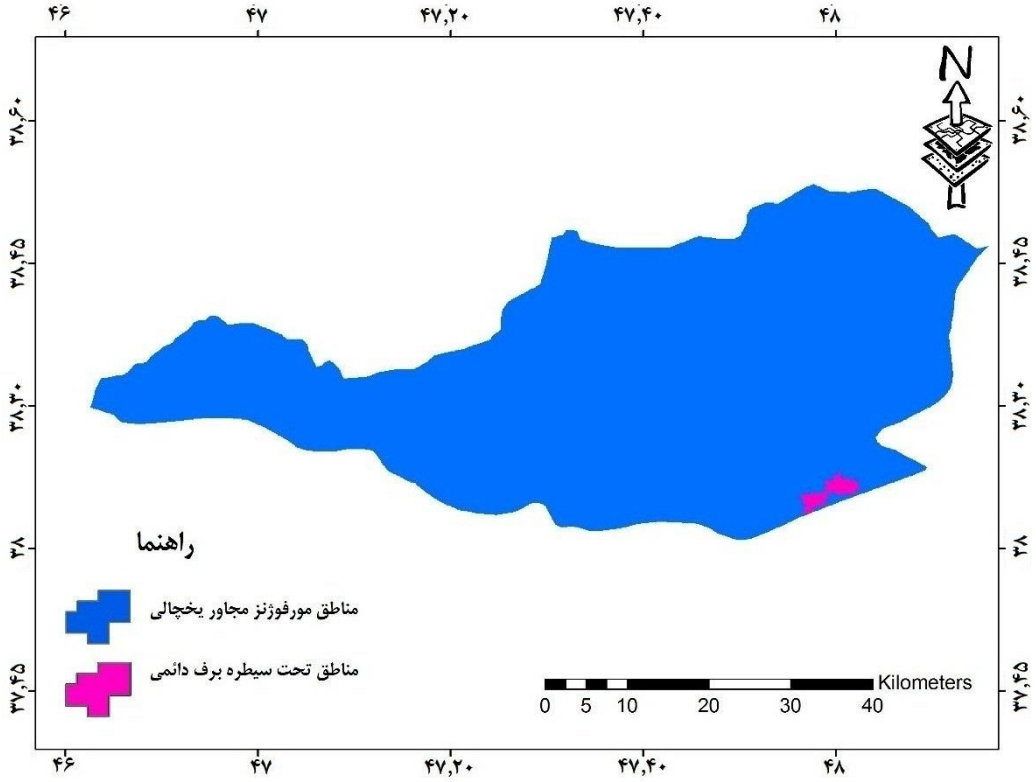
ارتفاع خط برف‌مرز دائم = (۴۷۶۶+۳۲۶۹)/۲ =۴۰۱۷/۵

روش ارتفاع کف سیرک: برای محاسبه خط برف‌مرز یخبندان کواترنر در کوهستان سبلان، از روش ارتفاع کف سیرک، ابتدا مد(نما) را برای طبقات نمادار با استفاده از رابطه(۲) به دست آورده و سپس میانگین حسابی اعداد فوق محاسبه می شود. با استفاده از نتایج حاصل از این محاسبات، ارتفاع ۳۷۴۹/۳۲ متر به عنوان خط برف مرز دوره یخبندان وورم در منطقه مورد مطالعه تخمین زده شد.

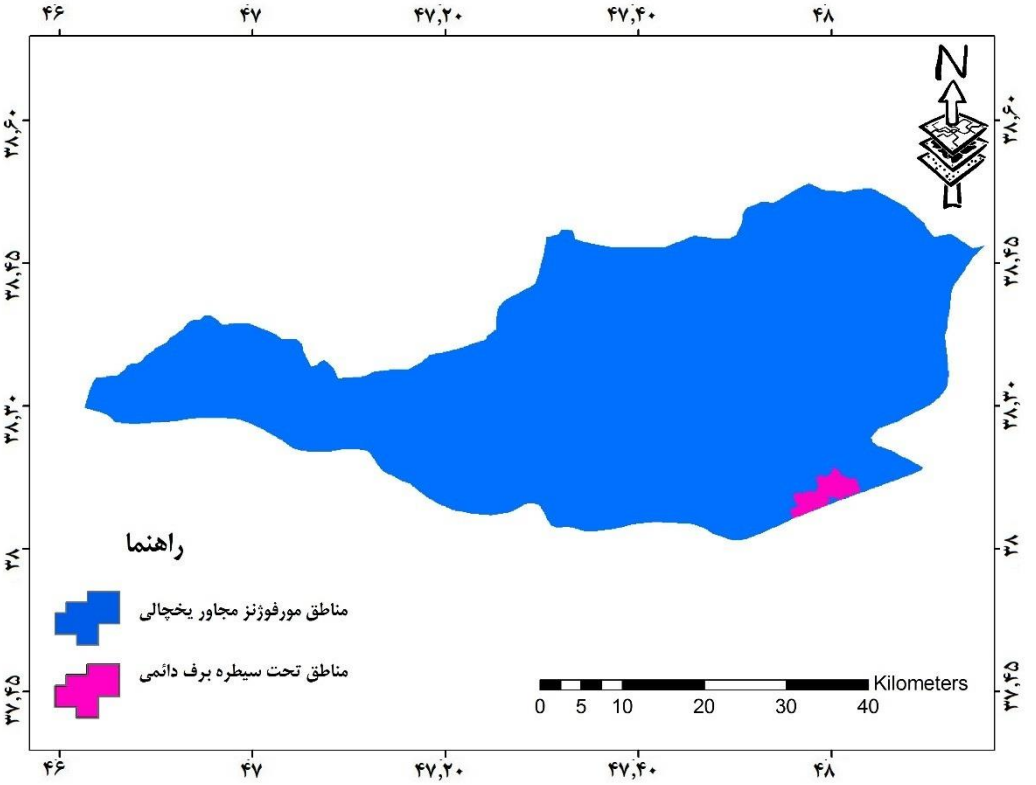
نما (مد) طبقه۳۴۰۰-۳۳۰۰ = ۳۳۰۰+((۱-۳۳۰۰)/((۱-۳۳۰۰)+(۱-۳۴۰۰))×۱۰۰ = ۳۳۴۹/۲۵

نما (مد) طبقه۴۲۰۰-۴۱۰۰ = ۴۱۰۰+((۲-۴۱۰۰)/((۲-۴۱۰۰)+(۲-۴۲۰۰))×۱۰۰ = ۴۱۴۹/۳۹

پس از محاسبه ارتفاع خط برف‌مرز دائمی کواترنر در کوهستان سبلان به روش‌های پورتر (ارتفاع کف سیرک ۳۷۴۹/۳۲ متر، نسبت‌های ارتفاعی ۴۰۱۷/۵ متر) با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی، منطقه مورد مطالعه به دو بخش مناطق تحت سیطره برف دائمی و مناطق خارج از سیطره برف دائمی تقسیم‌بندی شدند (شکل‌های ۳ و ۴).



شکل۳: نقشه برف‌مرز به روش پورتر (ارتفاع کف سیرک)



شکل۴: نقشه برف‌مرز به روش پورتر(نسبت‌های ارتفاعی)

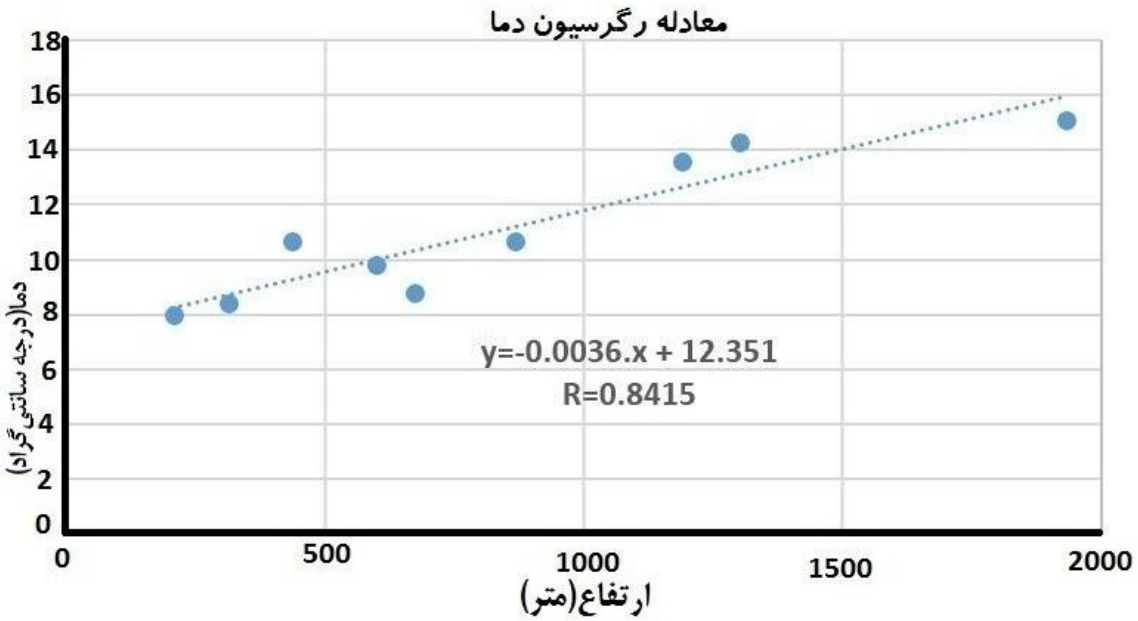
الف) بررسی شرایط دمایی کوهستان سبلان در کواترنر

جهت تهیه نق شه هم‌دما، با توجه به داده‌های تهیه شده (جدول۱)، معادله رگر سیون بین دما و ارتفاع در نرم‌افزار اک سل محاسبه شد (رابطه۴).

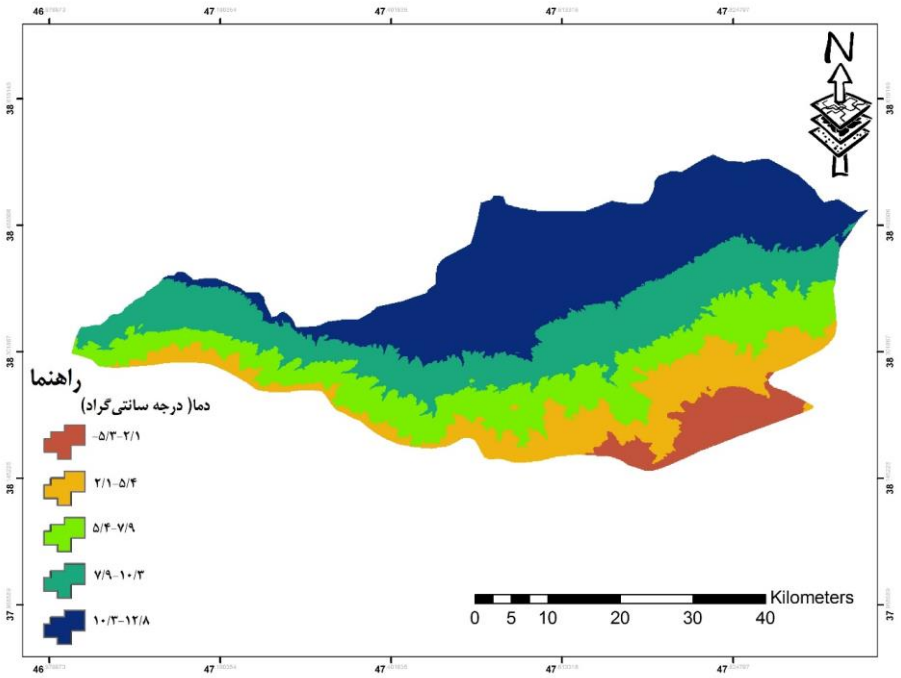
$$T = -0.0036 * h + 12.351$$ رابطه (۴)

R^2=۰/۸۴۱۵

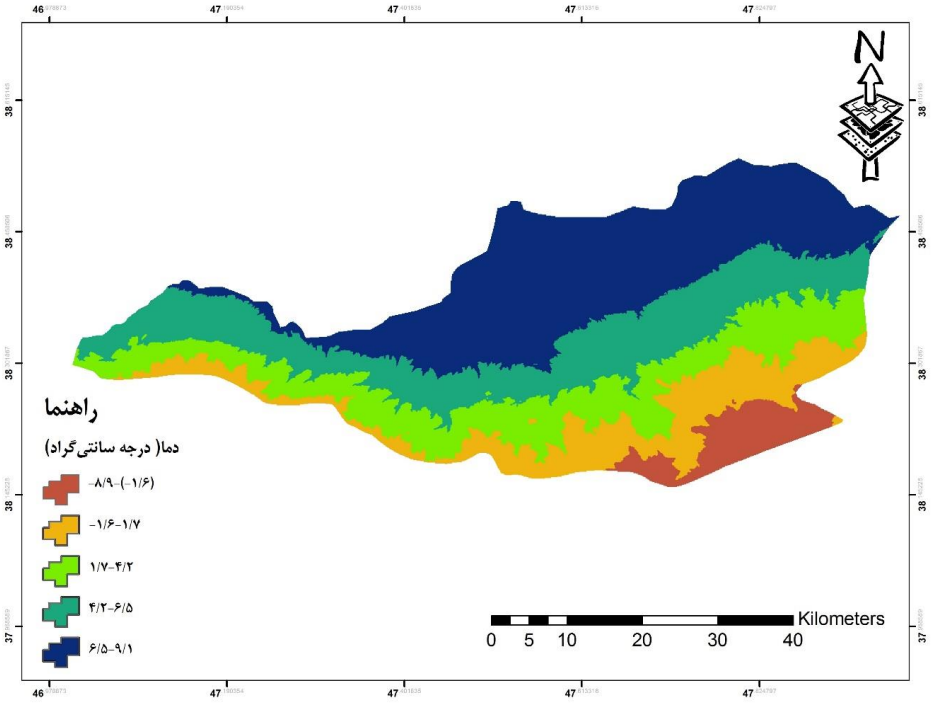
که در این رابطه، T: دما، h: ارتفاع از سطح دریا و R^2: ضریب تعیین می‌باشد شکل (۵). با کمک این رابطه و با استفاده از تابع محاسبه‌گر رستر و قرار دادن مدل ارتفاعی رقومی منطقه بجای ارتفاع، نقشه هم‌دما تهیه شد (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۵: معادله رگرسیون دما در منطقه مورد مطالعه



شکل۶: نقشه هم‌دمای کنونی در منطقه مورد مطالعه



شکل۷: نقشه هم‌دمای گذشته در منطقه مورد مطالعه

با عنایت به رابطه (۴) و فرض دمای صفر درجه در ارتفاع برف مرز کنونی، ارتفاع ۴۰۶۶ متر به عنوان خط برف مرز دائمی کنونی کوهستان سبلان تخمین زده شد. مقایسه نتایج به دست آمده برای ارتفاع خط برف‌مرز کنونی نشان می‌دهد که خط برف‌مرز کنونی منطقه نسبت به آخرین دوره یخچالی کواترنر، محاسبه شده با روش‌های رایت، نسبت‌های ارتفاعی و کف سیرک به ترتیب ۱۹۷، ۴۸/۵ و ۳۱۷ متر بالاتر رفته است. هم‌چنین دمای گذشته نسبت به زمان حال ۳/۶۸ درجه سردتر تخمین زده شد.

بررسی شرایط رطوبتی و بارشی توده سبلان

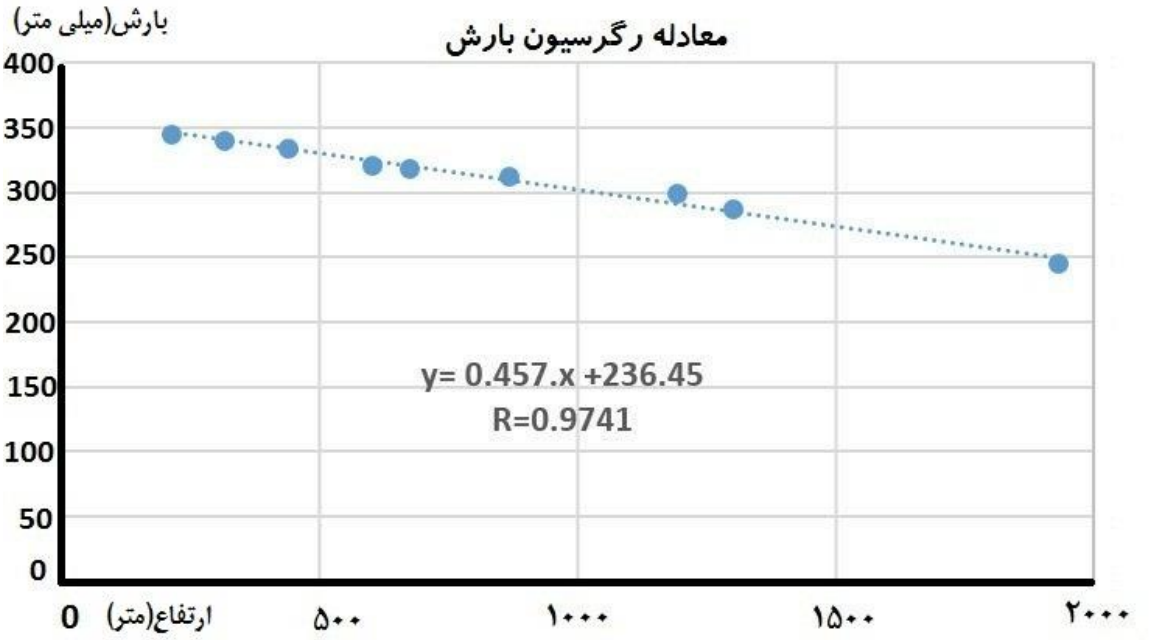
بررسی داده‌های آماری بلند مدت در ایستگاه‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که بیش‌ترین بارش منطقه مورد پژوهش به میزان ۳۳۴/۷ میلی‌متر مربوط به ایستگاه مشگین شهر و در ارتفاع ۱۵۶۸ متری قرار دارد و کم‌ترین بارش نیز به میزان ۲۹۹/۴ میلی‌متر مربوط به ایستگاه دوست بیگلو و در ارتفاع ۷۱۶ متری می‌باشد. تحلیل شرایط بارشی تصدیق می‌کند که بر حسب افزایش ارتفاع، دریافت نزولات جوی نیز افزایش یافته است. بنابراین جهت بررسی شرایط بارشی و رطوبتی منطقه مورد مطالعه، با توجه به داده‌های اقلیمی (جدول۱) معادله رگرسیون بین بارش و ارتفاع در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد (رابطه۵).

$$p = 0.457 * h + 236.45$$ رابطه (۵)

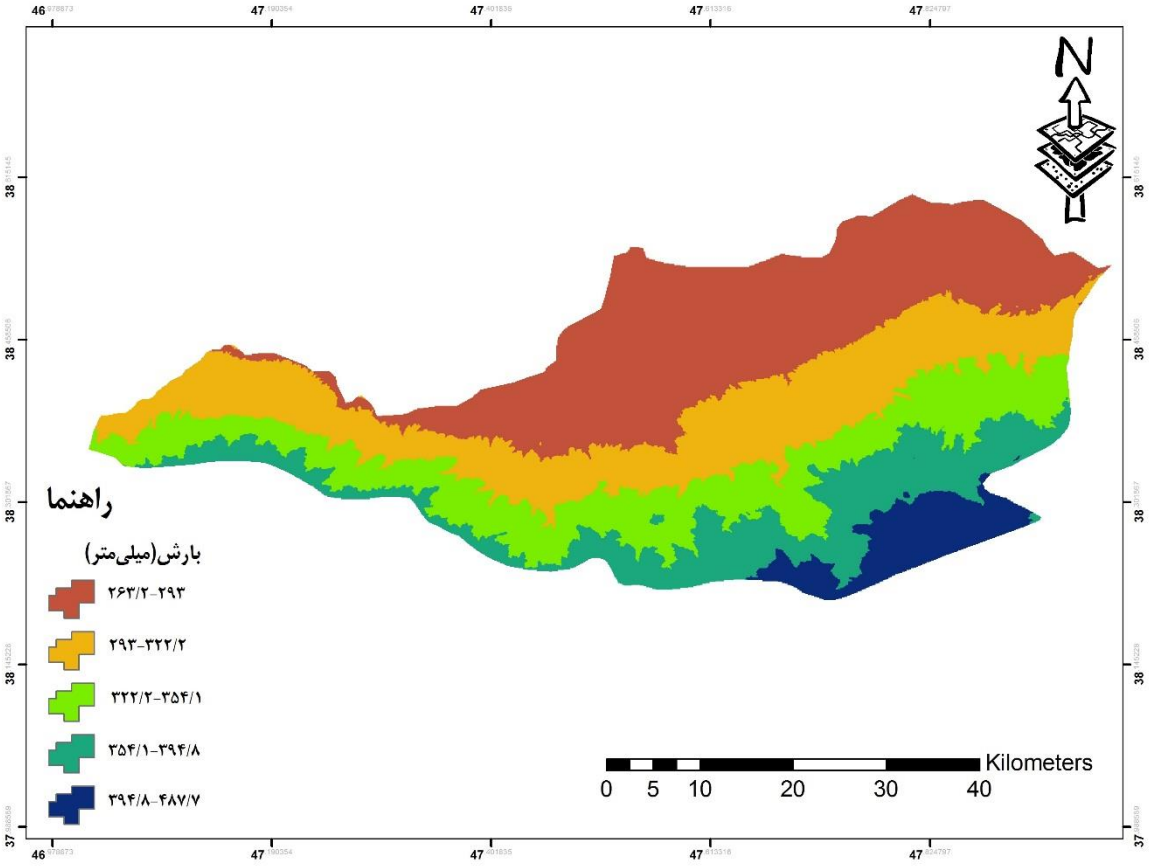
R^2=۰/۹۷۴۱

که در این رابطه p: مقدار بارندگی، h: ارتفاع از سطح دریا و R^2: ضریب تعیین می‌باشد شکل (۸). سپس با استفاده از معادله رگرسیون و تابع محاسبه‌گر رستر نقشه هم‌بارش تهیه شد (شکل‌های ۹ و۱۰).

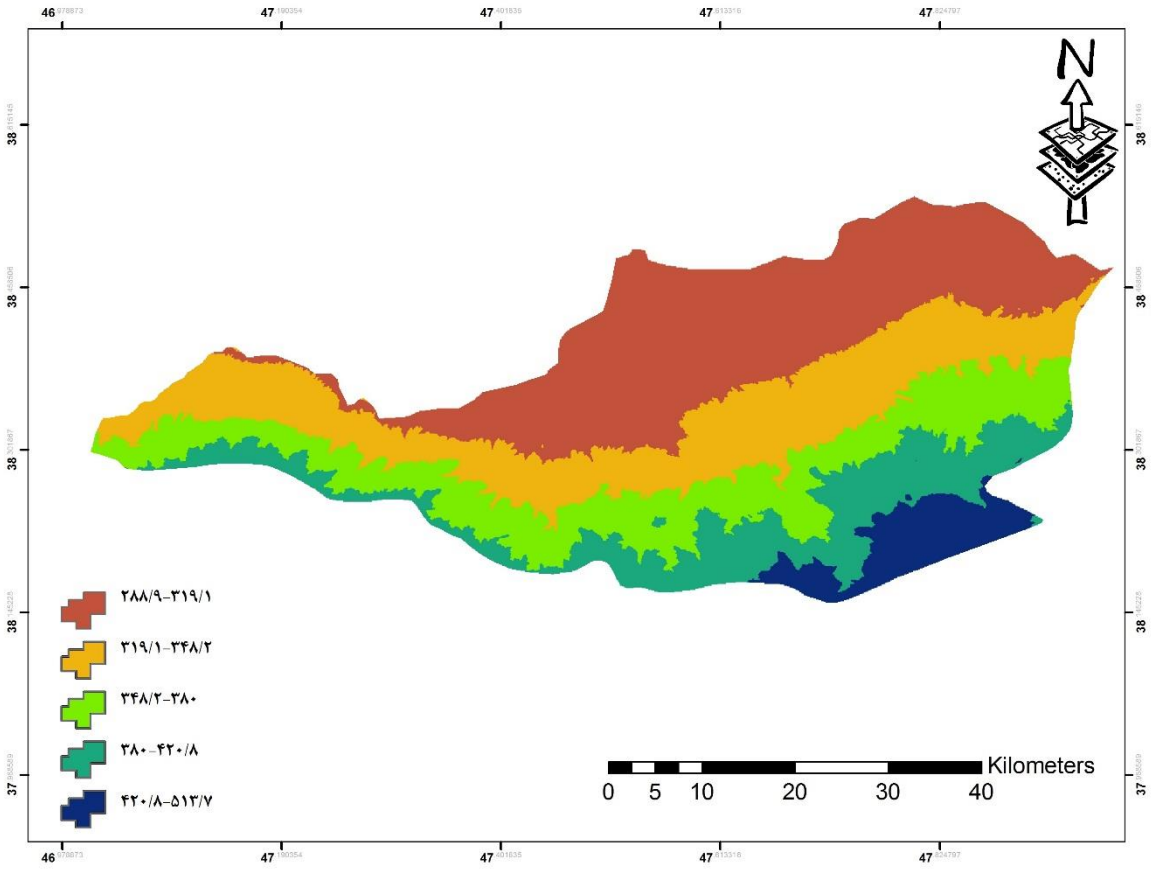
با توجه به رابطه (۵) و تخمین ارتفاع برف‌مرز کنونی منطقه مورد مطالعه (۴۰۶۶ متر) بارش به میزان ۲۶ میلی‌متر نسبت به وورم کاهش را نشان می‌دهد. بنابراین افزایش بارش منطقه مورد مطالعه (۲۶ میلی‌متر) در گذشته همراه با کاهش دمای آن (۳/۶۸ درجه) نسبت به حال، می‌تواند وجود یخچال‌های کوهستانی سبلان در عصر کواترنر را ثابت کند.



شکل ۸: معادله رگرسیون بارش در منطقه مورد مطالعه



شکل۹: نقشه هم‌بارش کنونی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۰: نقشه هم‌بارش گذشته در منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

یخچال‌های کوهستانی بخشی از میراث طبیعی زمین هستند که با پیشروی و پسروی خود تغییرات اقلیمی و محیطی از خود بر جای می‌گذارند. بنابراین ارزیابی مداوم وضـــعیت یخچال‌های طبیعی از لحاظ گرمایش جهانی و نیز تامین آب مناطق پایین دست خود از اهمیت بسزایی برخوردار هستند. این مطالعه به‌منظور ارزیابی و بازسازی برف مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر در دامنه‌های شـمالی سـبلان از روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سـیرک و نسـبت‌های ارتفاعی) بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی و دما و بارش دوره یخچالی ورم با استفاده از شواهد و شرایط اقلیمی انجام گرفت. بدین منظور ابتدا تعداد ۲۵ سـیرک یخچالی در سـبلان با اسـتفاده از نرم‌افزار گوگل ارث، نقشـه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و مدل ارتفاعی رقومی ۱۰ متری منطقه مورد مطالعه، تعیین و موقعیت‌یابی شدند.

روش‌های رایت و پورتر (ارتفاع کف سیرک و نسبت‌های ارتفاعی) ارتفاع برف‌مرز کوهستان سبلان در کواترنر را به ترتیب ۳۸۶۹، ۳۷۴۹ و ۴۰۱۷/۵ متر تخمین زده‌اند. با توجه به بازسـازی شـرایط دمایی منطقه، در آخرین دوره یخچالی کواترنر، میانگین دما نسبت به زمان حال حدود ۳/۶۸ درجه سردتر بوده است و ارتفاع برف‌مرز کنونی نیز نسبت به گذشته ۳۱۷ متر بالاتر رفته است. هم‌چنین تجزیه و تحلیل شرایط اقلیمی و بازسازی شرایط پالئوکلیماتیک منطقه میزان بارش در دوره گذشته نسبت به زمان حال را حدود ۲۶ میلی‌متر بیش‌تر نشان می‌دهد. هم‌چنین تشکیلات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، عمدتاً از ترکیب آندزیتی، ریولیتی و داسیتی می‌باشد.

شرط لازم برای تشکیل یخچال‌های طبیعی کوهستانی دمای صفر درجه و افزایش میزان بارش نسبت به امروز بوده اســـت. نتایج حاصـــل از این پژوهش با نتایج پژوهش‌هایی که به منظور برآورد برف‌مرز در ارتفاعات تقریباً هم‌عرض با منطقه مورد مطالعه صـــورت گرفته اســـت، قرابت فراوان دارد. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مطالعات قهرودی‌تالی

(۱۳۹۴) در کوه‌های دالاخانی، رامشـــت و همکاران (۱۳۸۴) در کوهســـتان پرآو و پژوهش‌های ملکی (۱۳۸۰) که تکامل پالئوکار ست کوه‌های پرآو را از ارتفاع ۲۵۰۰ متری به بالا مربوط به دوره‌های یخچالی کواترنر دان سته ا ست، ا شاره نمود. در مجموع می‌توان گفت در منطقه مورد مطالعه ارتفاع برف مرز حدود ۳۱۷ متر بالاتر رفته و دما حدود ۴ درجه گرم‌تر شده است.

از آن‌جایی که برر سی و ضعیت یخچال‌های طبیعی از لحاظ تغییرات دمایی و هم‌چنین تامین آب مناطق پایین د ست از اهمیت فراوانی برخوردار ا ست، پی شنهاد می شود، نظیر این مطالعه در سایر منطق کوه ستانی که دارای یخچال‌های طبیعی هستند انجام گیرد.

منابع

- اصـغری سـراسـکانرود، ص .، جعفری، غ.، ۱۳۹۳. بررسـی آثار یخچالی کواترنر زنجان رود، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، صص ۳۰-۱۶.
- بهشتی جاوید، ا.، اسفندیاری درآباد، ف.، روستایی، ش.، استخراج و شناسایی لندفرم‌های یخچالی با استفاده از روش شی‌گرا، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال ششم، شماره۴، بهار ۱۳۹۷، صص۱۰۲-۸۸.
- جعفری، غ.، ۱۳۹۵. بررســـی لندفرم‌های یخچال‌های کواترنری توده کوهســـتانی الوند همدان با تاکید بر قسمت‌های مختلف سیرک، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، شماره ۱۹، صص ۱۳۹-۱۲۹.
- جعفری، غ.، آوجی، م.، ۱۳۹۵. بررسی آثار برف‌مرز دائمی یخچال های کواترنری توده کوهستانی قروه، فصلنامه کواترنری ایران، شماره ۴، صص ۳۹۱-۳۷۹.
- جعفری، غ.، فیض‌اله‌پور، م.، براتی، ز.، ۱۳۹۴. بازســـازی ارتفاع برف مرز دائمی کواترنری الوند همدان (با ســـه روش رایت، شیب- جهت و ضریب خمیدگی) فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره پیاپی ۱۱۹، صص ۱۴۹-۱۳۱.
- رامشت، م.، نعمت‌الهی، ف.، ۱۳۸۴. آثار یخساری در ایران، فصلنامه مدرس علوم انسانی، شماره ۴، صص ۱۸-۱.
- شریفی، پ.، زارع، م.، طاهری‌نژاد، ف.، ۱۳۹۶. برر سی آثار لندفرمی فعالیت‌های یخچالی عصر پلیستو سن در ایران مرکزی، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، صص۴۴-۲۹ .
- شریفی، پ.، زارع، م.، فرح‌بخش، ز.، ۱۳۹۵. ارزیابی تغییرات اقلیمی بین زمان حال و پلئیستو سن و باز سازی شرایط اقلیمی گذشته با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۱۲۸-۱۱۰.
- شـمسـی‌پور، ع.، باقری سـید شـکری، س.، جعفری اقدم، م.، سـلیمی‌منش، ج.، ۱۳۹۴. بازسـازی برف‌مرزهای آخرین دوره یخچالی با شـــواهد دوره‌های یخچالی در زاگرس مرتفع، مجله جغرافیا و توســـعه، شـــماره ۳۹، صص۷۴-۶۱ .
- قربانی شورستانی، ع.، خسروی، ع.، نورمحمدی، ع.، ۱۳۹۵. بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری در ارتفاعات شمال شرق ایران، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۱۳-۱.
- قربانی، م.، محمودی، ف.، یمانی، م.، مقیمی، ا.، ۱۳۸۹. نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴ ، صص۱۷-۱ .
- قهرودی تالی، م.، ۱۳۹۰. تخمین و مقایســـه قلمرو برف‌های دائمی در عصـــر یخچالی و بین یخچالی، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۲۵، صص ۱۱۰-۹۷.

- قهرودی تالی، م.، ۱۳۹۴. تخمین برف‌مرز در آخرین دوره یخچالی در حوضـــه دالا خانی، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲، صص۲۴۶-۲۳۱ .
- محمودی، ف.، ۱۳۶۷. تحول ناهمواری‌های ایران در کواترنر، مجله پژوهش‌های جغرافیایی دانشـــگاه تهران، شماره ۲۳، صص۴۷-۲۳ .
- یمانی، م.، شمسی‌پور، ع.، جعفری اقدم، م.، ۱۳۹۰. بازسازی برف مرزهای پلیوستوسن در حوضه جاجرود، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۷۶، صص۴۶-۲۹ .

- *Agassiz, L. 1871. On the former existence of local glaciers in the White Mountains. American association for the advancement of science, Proceedings, 19: 161-167.*
- *Allen, T. R. 1998. Topographic context of glaciers and perennial snowfields, Glacier National Park, Montana .Geomorphology, 21: 207-216.*
- *Bobek, H. 1959. Features and formation of the great Kawir and Masileh, Tehran. University of Tehran.*
- *Ghohrodi tali, M., Nosrati, K. and Abdoli, A. 2015. Challenges of the development of the city of Sonqor due to the accumulation of glacial deposits and the instability of the domain. Quarterly Journal of Urban Ecology Research.*
- *Jafari, G. H. 2009. The effect of the roughness's on the quaternary ELA. Ramesht, M.H., Esfahan University, Geography Department.*
- *Kassouk, C., Smith, M., Hillier, J.,(2014), Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital , Geomorphology, GEOMOR-04677; No of Pages 13.*
- *Pedrami, M. 1981. Pasadeniyan orogenesis and geology of the Iran during in 700 thousands past, Geological survey of Iran. p 127.*
- *Porter, S.C. 2001. Snowline Depression in the Tropics during the Last Glaciations, Quaternary Science Reviews, 20, p:1068*
- *Pedersen , G.B.M. (2016), Semi-automatic classiifcation of glaciovolcanic landforms: An object-based mapping approach based on geomorphometry, Journal of Volcanology and Geothermal Research ,Volume 311, 1 February 2016, Pages 29–40.*
- *Wright, H.E. 1983. Late-Pleistocene Glaciation and Climate around the Junin Plain, Central Peruvian Highlands, Geografiska Annaler 65: 35-43.*
- *Ramesht, M.H. and Shoshtari, N. 2004. Evidence of ice caps and glaciers in Salafchegan. Geographical Research, 19(73): 119-132.*
- *Yamani, M. 2001. Geomorphology of Alamkoh Glaciers. Geography Research Quarterly, 42: 1-18.*
- *Vaz, D.A., Sarmento, P.T.K, Barata, M.T., Fenton, L.K., Michaels, T.I. (2015), Object-based Dune Analysis: Automated dune mapping and pattern characterization for Ganges Chasma and Gale crater, Mars, Geomorphology Volume 250, 1 December 2015, Pages 128–139.*
- *Žebre, M. and Stepišnik, U. 2014. Reconstruction of Late Pleistocene glaciers on Mount Lovćen, Montenegro. Quaternary International, 353: 225-235.*