پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۴۷، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴
ص. ۶۰۵-۵۸۳

بررسی آنومالی‌های حرارتی و رطوبتی بین زمان حال و پلیئستوسن و بازسازی شرایط اقلیمی با استفاده از شواهد ژئومورفیک (مورد مطالعه: حوضهٔ خضرآباد– یزد)

محمد شریفی* ـ استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد
زهرا فرح‌بخش‌ـ کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه یزد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۳۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۶/۱۲

چکیده

حوضهٔ خضرآباد در فاصلهٔ ۳۰ کیلومتری جنوب غربی شهر یزد واقع شده است. در این حوضه، ژئوفرم‌هایی وجود دارد که به‌احتمال در دورهٔ اقلیمی متفاوتی نسبت به زمان حال به‌وجود آمده است که با تحلیل آنها، برای بازسازی اقلیم گذشته تلاش شده است. برای بررسی وضعیت اقلیمی گذشته، در این پژوهش از نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، پژوهش‌های میدانی، سامانهٔ GPS و داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شد. برحسب همبستگی بین ارتفاع و متوسط دمای سالانه و ارتفاع و مقدار بارش سالانه، گرادیان حرارتی و رطوبتی محاسبه شد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد خط برف‌مرز دایمی با روش‌های رایت و پورتر، در ارتفاع ۲۱۰۰ تا ۲۲۰۰ متر واقع می‌شده است. باتوجه‌به این خط و افت آهنگ دما به مقدار ۰/۶۵ و ۰/۸ درجه به‌ازای هر ۱۰۰ متر ارتفاع، مقدار تفاوت دمای کنونی با گذشته، به‌ترتیب معادل ۱۲/۹۲ و ۱۳/۴ درجهٔ سانتی‌گراد محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار بارش سالانه در زمان گذشته ۱۷۶/۵۲ میلی‌متر نسبت به میانگین امروزی بیشتر بوده است. به‌علاوه، خط تعادل آب و یخ معادل ۴/۸ درجه، در ارتفاع ۱۵۶۰متری واقع شده است.

کلیدواژه‌ها: برف‌مرز، پلیئستوسن، تغییرات اقلیمی، حوضهٔ خضرآباد، داده‌های ژئومورفیک.

مقدمه

تغییرات شرایط آب‌وهوایی در طول دوران حیات زمین بر کسی پوشیده نیست. آثار این تغییرات به‌صورت پدیده‌های ژئومورفولوژیکی، همچون مدارکی متقن و محکم است که با آن می‌توان نوع تغییرات را بررسی کرد و درزمینهٔ چگونگی شرایط آب‌وهوایی گذشته به بحث پرداخت. بررسی آثار مورفولوژیکی یخبندان‌های کواترنر ایران موضوعی است که علاقهٔ بسیاری از محققان علوم زمین را برانگیخته و آنان را به وادی تحقیق و تدبیر در این زمینه کشانده است؛ به‌طوری‌که این تغییرات فرم‌هایی را در مدتی کوتاه یا در زمان طولانی بر چهرهٔ زمین تحمیل کرده که بررسی آنها در بازسازی و درک محیط‌های اقلیمی گذشته، محققان را یاری می‌دهد.

همان‌طور که می‌دانید تحولات اقلیمی دوران چهارم، نخستین‌بار از روی آثار مورفولوژیکی یخچال‌ها در اروپا

نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۲۵۹۷۴۸۷۵
* E- mail: mscharifi@gmail.com

شناخته و بعدها شواهد این پدیده و نتایج دیگر آن در نقاط دیگر کرهٔ زمین بررسی شد (المدرسی، ۱۳۸۴: ۳۰). پژوهش‌هایی که دربارهٔ شواهد یخچالی ایران مرکزی صورت گرفته نیز اغلب تغییرات اقلیمی کواترنری را پی گرفته است. باوجوداین، دیدگاه‌های متفاوتی نسبت به اختلاف دما و بارش زمان حال و کواترنر مطرح شده است. برخی به تفاوت دمایی ۶–۰ درجه و برخی دیگر به افت دمایی ۱۲–۸ درجه متعقدند (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۲: ۳۱). تاکنون دربارهٔ تغییرات محیطی و اقلیمی ناحیهٔ یزد مانند سخوید، طزرجان، تفت و فخرآباد پژوهش‌های محدودی انجام گرفته است؛ درحالی‌که استان یزد –که در مرکز فلات مرکزی ایران قرار دارد– دربردارندهٔ بخش مهمی از شواهد اقلیمی– محیطی به‌خصوص در نواحی کوهستانی و دشت‌های مجاور آنهاست (هاگه‌دورن و همکاران، ۱۹۷۸؛ مهرشاهی، ۱۹۹۹).

به‌طورکلی، درزمینهٔ آنومالی‌های حرارتی و رطوبتی پژوهش‌های به‌نسبت‌خوبی به‌ویژه در یک دههٔ اخیر در سراسر ایران صورت گرفته است. رایت (۱۹۶۱: ۱۵۰) در کوه‌های کردستان، گرادیان دمایی ۰/۶۸ سانتی‌گراد را به‌ازای هر ۱۰۰ متر برای این منطقه محاسبه کرده است. براین‌اساس، اگر کاهش ارتفاع برف‌مرز دایمی (۱۸۰۰ متر) به‌علت کاهش دما بوده، می‌توان بیان داشت متوسط دمای سالانهٔ منطقهٔ یادشده در وورم نسبت به حال، ۱۲ درجهٔ سانتی‌گراد کمتر بوده است. المدرسی و رامشت (۱۳۸۴: ۳۱) در بررسی‌های خود در حوضهٔ سخوید– یزد به این نتیجه رسیده‌اند که از نظر اقلیمی این منطقه تفاوت حرارتی ۸ درجه‌ای بین دوران گذشته و حال دارد. از نظر آنها، مقدار بارش گذشته حدود ۱/۴ برابر حال بوده، خط تعادل آب و یخ منطقه در ارتفاع ۲۳۵۰ متری و محدودهٔ یخچالی از ارتفاع ۳۲۲۰ متری آغاز می‌شده است. رامشت و کاظمی (۱۳۸۶: ۳) با بررسی تغییرات اقلیمی در منطقهٔ اقلید فارس، با فرض افت دمایی ۰/۸۵ برای هر ۱۰۰ متر ارتفاع، مقدار آنومالی حرارتی را ۱۰ درجه و آنومالی رطوبتی را ۱/۵ برابر حال به‌دست آورده‌اند.

بقایی‌نیا و مهرشاهی (۱۳۸۷: ۱۹۱) در بررسی‌های خود در حوضهٔ فخرآباد نشان دادند با افت آدیاباتیک دما به مقدار ۰/۵۳۹ برای هر ۱۰۰ متر ارتفاع، میانگین دما در دوران سرد نزدیک به ۱۱درجه سردتر از میانگین دمای امروز و بارش متوسط در مقاطع ارتفاعی متفاوت بین ۱/۸ تا ۳ برابر بیشتر از میانگین امروزی بوده است. معیری و همکاران (۱۳۸۷: ۱۱۰) در پژوهش‌های خود در محدودهٔ حوضهٔ صفاشهر (استان فارس) اذعان داشته‌اند که این منطقه نه‌تنها دوبرابر حال بارش در کواترنر دریافت می‌کرده، بلکه دمای آن نیز ۸ درجهٔ سانتی‌گراد کمتر از متوسط فعلی بوده است. رفیعی (۱۳۸۸: ۹۸) با بررسی سیرک‌های یخچالی در ارتفاعات کهک و حوضهٔ آبریز رود بیدهندمی، ارتفاع خط برف‌مرز را به روش رایت ۲۶۷۲ متر تعیین کرده است. با درنظر گرفتن خط تعادل آب و یخ (۱۵۲۰ متر) در عصر حاکمیت یخچال‌ها، مقدار دمای متوسط سالیانه، ۹ درجهٔ سانتی‌گراد سردتر از امروز بوده و مقدار بارش ۱/۵ برابر زمان حال بوده است.

باید به این نکته اشاره کرد که بررسی‌های محققان داخلی دربارهٔ پژوهش‌های یخچالی از سال ۱۳۹۰ به بعد گسترده‌تر شده است که ازجملهٔ آنها می‌توان به این موارد اشاره کرد: رامشت و همکاران (۱۳۹۰: ۷۱) در حوضهٔ تیگرانی ماهان کرمان با بررسی شواهد یخچالی در آن منطقه، برحسب افت آهنگ دما به مقدار ۰/۶۷، مقدار تفاوت دمای کنونی با گذشته را معادل ۸/۵ درجه و اختلاف بارش کنونی و گذشته را در حدود ۳۰۰ میلی‌متر (۲/۵ برابر) تخمین زده‌اند. بیرامعلی گیوی (۱۳۹۰: ۱۲۰) در بررسی نحوهٔ تغییرات حرارتی و رطوبتی در حوضهٔ کرج و تأثیر این تغییرات بر کانون‌های یخ‌ساز حوضه، به ارتباط کانون‌های یخ‌ساز حوضه و هردینگ سامانه‌ها پی برده و دریافته که بین کانون‌های

مدنی و گسترش فعالیت‌های یخچالی ارتباط وجود داشته و همچنین مقدار بارش ۲/۵ برابر در زمان حال کاهش یافته کرده است. باقری صدر (۱۳۹۰: ۱۱۶) ابتدا به ردیابی آثار یخچالی در دو محوطهٔ گرین و اشترانکوه پرداخته و پس از بازسازی دما و بارش دریافته که بارش و دما در این مناطق در گذشته نسبت به حال بیشتر بوده و در هر دو محوطه، دماهای زیر صفر درجه رخ داده و شرایط لازم برای ایجاد یخچال‌ها در دورهٔ حاکمیت یخچال وجود داشته است و این محوطه‌ها مقدار بارش بیشتری را دریافت کرده‌اند و باتوجه‌به این تغییرات اقلیمی، تغییر در سامانه‌های شکل‌زایی منطقه را درپی داشته است.

ابطحی (۱۳۹۱: ۱) معتقد است پلایاهای حوضهٔ دریاچهٔ نمک، به‌مثابهٔ میراث کواترنر، صورت‌های مختلف حوادث اقلیمی را به‌تصویر کشانده است و وجود شکل‌های مورفیک دیرینه، نشان از حاکمیت مرحله‌های سرد و گرم اقلیمی کواترنر دارد. حدود هشتصد سیرک، شواهد یخچالی بوده که در ارتفاع بیش از ۲۵۰۰ متر مکان‌یابی شده است. ارتفاع برف‌مرز در آخرین دورهٔ یخچالی ۲۸۰۰ متر برآورد شده و بررسی‌ها حاکی از آنومالی حرارتی، افزایش ۵/۶ درجه‌ای دما و کاهش ۱/۵ برابری بارش کنونی نسبت به آخرین دورهٔ یخچالی است؛ تغییراتی که افزایش تراز منفی آب را نسبت به گذشته درپی دارد. راهدان‌فرد (۱۳۹۱: ۱۱۹) در پژوهش خود، ابتدا منطقهٔ مورد نظر در زاگرس را به دو منطقهٔ غربی و شرقی تقسیم کرد و در بررسی ردیابی آثار یخچالی دریافت ارتفاع برف‌مرز در منطقهٔ غربی ۲۸۴۲ متر و در منطقهٔ شرقی ۲۷۴۸ متر است و خط تعادل و آب و یخ در منطقهٔ غربی ۲۱۲۷ و در منطقهٔ شرقی ۱۹۱۳ متر است که این نتایج ارتباطی را بین قلمروهای یخچالی و مجاور یخچالی با پراکندگی زمین‌لغزش‌های ثبت‌شدهٔ منطقه نشان نمی‌دهد. یمانی و همکاران (۱۳۸۶؛ ۱۳۹۰؛ ۱۳۹۳) به بررسی شواهد یخچالی کواترنر و بازسازی برف‌مرزها در مناطق مختلفی از ایران شامل کرکس، جاجرود و زاگرس میانی پرداختند. آنها در پژوهش‌های خود بر مبنای شواهد ژئومورفولوژیکی آثار یخچالی، مرزهای مورفوکلیماتیک این مناطق را برای دورهٔ کواترنری بازسازی کردند.

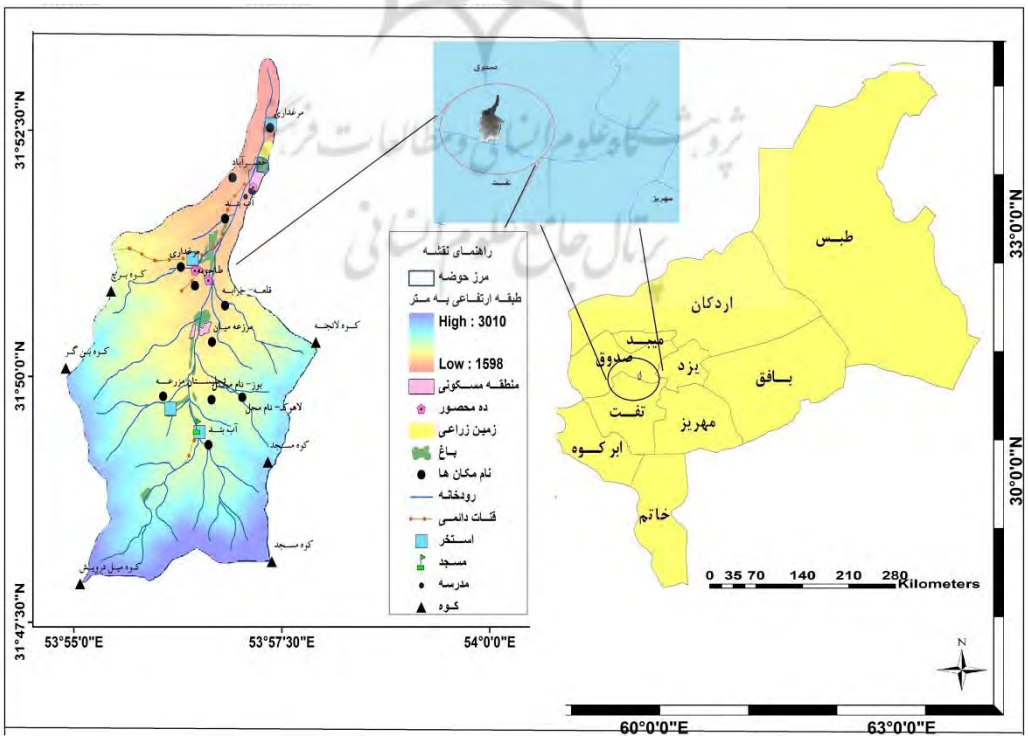
قزلجه (۱۳۹۲: ۸۰) با هدف مشخص کردن نقاط سیرک‌ها و تعیین مقایسهٔ خط برف‌مرز در آخرین دورهٔ یخچالی وورم و حال حاضر حوضهٔ گاگانرود و با اتکا به روش رایت، ۲۱ سیرک یخچالی را که بیشترشان در منطقه غیرتیپیک‌اند، بررسی کرده و دریافته که خط برف‌مرز در زمان کواترنر معادل ۱۹۶۰ متر بوده و اکنون ۴۶۳۰/۷۵ متر است. سیف و همکاران در بررسی محدودهٔ محوطهٔ ریگ به این نتیجه رسیدند که برف‌مرز دایمی کواترنر در ارتفاع ۲۸۲۴ متری قرار داشته است. امیراحمدی (۱۳۹۲: ۴۳) در بررسی آثار یخچالی ده‌بالای شیرکوه یزد، تنها به فرایندهای یخچالی (تورهای یخچالی، مورن‌ها، سیرک‌های یخچالی و دره‌های یخچالی) اشاره کرده است. ازجمله پژوهش‌های دیگری که درزمینهٔ اختلاف حرارتی در ایران انجام گرفته است می‌توان به این موارد اشاره کرد: پدارمی (۱۳۷۰: ۹۲) ۱۰ درجه برای جنوب ازنا؛ رامشت (۱۳۸۱) ۹ درجه برای زفرهٔ اصفهان؛ رامشت (۱۳۸۳: ۱۲۵) ۱۴/۲۵ درجه برای سلفچگان؛ پوردهقان (۱۳۸۵: ۱۳۹) ۱۰/۵ درجه برای دهبکری بم؛ یمانی (۱۳۸۶: ۱۹۴) ۱۰ تا ۱۲ درجه برای ارتفاعات کرکس؛ ابطحی (۱۳۹۲: ۱۸۶) ۴/۴ درجه برای حوضهٔ جاجرود. به‌این‌ترتیب، ملاحظه می‌شود که محققان اعداد بین ۴ تا ۱۴ درجه کاهش دمای کواترنری نسبت به امروز را برآورد کرده‌اند.

این پژوهش نیز مبتنی بر دو پژوهش پیشین محققان در این منطقه است. در وهلهٔ نخست، مواریث ژئوفرم‌های

یخچالی کواترنر با پژوهش‌های میدانی بررسی و مشخص شد که این مواریث شامل سیرک‌های یخچالی، درهٔ Uشکل، تراس‌های سنگی سواحل رودخانه، یخرفت‌ها، تیلیت‌ها و سنگ‌های سرگردان است (شریفی و فرح‌بخش، ۱۳۹۴الف)؛ سپس در آزمایشگاه، شش نمونه رسوب از نظر گرانولومتری بررسی شد که نتیجهٔ آن حاکی از فرایندهای یخی در بخش‌های میانی و بالادست حوضه بود. درادامه، بر مبنای یافته‌های پیشین به بررسی تحولات اقلیمی دورهٔ کواترنر براساس شاخص‌های دما و بارش در حوضهٔ آبی خضرآباد و تخمین آنومالی برودتی- رطوبتی پرداخته و این اهداف پیگیری شد: الف) تعیین خط برف دایمی و خط تعادل آب و یخ در منطقه؛ ب) بازسازی تغییرات اقلیمی دورهٔ کواترنر و حال؛ ج) بررسی تفاوت آنومالی حرارتی و رطوبتی در ناحیهٔ یزد.

موقعیت منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ پژوهش یعنی حوضهٔ آبریز خضرآباد در فاصلهٔ ۳۰ کیلومتری جنوب غربی شهر یزد واقع شده است. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی در محدودهٔ طل ۴۸ ذ۳۱ تا ذ۳۲ عرض شمالی و طل۴۹ ذ ۵۳ تا ذ۵۴ طول شرقی قرار دارد. مساحت این حوضه ۲۳/۰۳۳ کیلومتر مربع و بیشترین ارتفاع، ۳۰۱۰ متر است که در جنوب شرقی این منطقه قرار دارد. کمترین ارتفاع نیز ۱۵۹۸ متر مربوط به شمال روستا- شهر خضرآباد است. از نظر زمین‌شناسی، این منطقه از سازند قدیمی کهر تا رسوبات جوان (کواترنر) را دربر گرفته است. در نقشهٔ زمین‌شناسی خضرآباد، بخشی از ارتفاعات شیرکوه با قله‌ای به ارتفاع ۴۰۷۵ متر در انتهای جنوب شرقی محدوده قرار دارد. مجموعه واحدهای سنگی موجود در ناحیه دارای راستای شمال غربی- جنوب شرقی است (شکل ۱).



شکل ۱. نقشهٔ موقعیت منطقهٔ پژوهش

مواد و روش‌ها

این پژوهش بیشتر متکی بر بازدیدهای میدانی بوده و در آن سعی شده است با استفاد از شواهد و مواریث ژئومورفولوژیک و با اتکا به روش رایت و پورتر به اثبات موضوع پرداخته شود. برای این منظور، ابتدا از روی نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی، محدوده پژوهش و سپس از روی فرم منحنی‌های میزان در نقشهٔ توپوگرافی و مشاهدات میدانی و استفاده از دستگاه GPS، سیرک‌های یخچالی مشخص شد. به‌طوردقیق مراحل اجرای کار به‌صورت زیر است:

الف) برای ترسیم نقشه‌های هم‌دمای کنونی، ابتدا آمار اقلیمی موجود ایستگاه‌های حوضه و ایستگاه‌هایی استفاده شد که در نزدیکی منطقهٔ پژوهش قرار داشتند. به‌این‌ترتیب، آمارهای ۹ سال (۱۳۹۱-۱۳۸۳) دو ایستگاه سینوپتیک و پنج ایستگاه کلیماتولوژی (جدول‌های ۲ و ۳) دارای آمار مشترک تجزیه و تحلیل شد. سپس با ایجاد رابطهٔ خطی ساده‌ای بین آنها، یعنی **y=a+bx** رابطهٔ ۱ برای محاسبهٔ دمای کنونی حوضه مشخص شد:

$$T = -۰/۰۰۶۵H + ۲۷/۲۰۲ \qquad (۱)$$

که در آن، T دما و H ارتفاع است که با محاسبهٔ آن، ضریب همبستگی۰/۹۶۳ =R به‌دست آمد. به‌این‌ترتیب، با اعمال این رابطه در محیط ArcGIS، نقشهٔ هم‌دمای کنونی منطقه ترسیم شد (شکل ۹).

جدول ۱. ایستگاه باران‌سنجی

باران‌سنجی	طول	عرض	ارتفاع	بارندگی
قوام‌آباد	۵۴/۰۶۶۶۶۷	۳۱/۸۱۶۶۶۷	۱۷۶۰	۱۱۳/۷
هامانهٔ کذاب	۵۳/۸۸۳۳۳۳	۳۱/۸۵	۱۹۴۰	۱۶۴/۳
کذاب یزد	۵۳/۸۸۳۳۳۳	۳۱/۸۶۶۶۶۷	۲۰۶۵	۱۷۶/۶
خودسفلی	۵۳/۷۵	۳۱/۸۱۶۶۶۷	۲۵۳۰	۲۲۷/۸
درب‌رز	۵۳/۹۸	۳۱/۸۳	۱۸۵۰	۱۷۵/۲۲

جدول ۲. ایستگاه کلیماتولوژی

ایستگاه کلیماتولوژی	طول	عرض	ارتفاع	بارش	دما
اشکذر	۵۴/۲۵	۳۲	۱۱۴۰	۵۰/۳	۱۸/۹
نیر	۵۴/۰۱	۳۱/۷۸	۲۴۷۰	۱۸۱/۲	۱۱/۶
خضرآباد	۵۳/۹۵	۳۱/۸۷	۱۶۳۷	۸۴/۹	۱۸
ندوشن	۵۳/۵۵	۳۲/۰۳۳۳۳۳	۱۹۵۰	۶۸/۲	۱۴/۱
علی‌آباد پیشکوه یزد	۵۳/۸۳۳۳	۳۱/۶۵	۲۲۴۰	۲۰۱/۵۹	۱۱/۸۳

جدول ۳. ایستگاه سینوپتیک

ایستگاه سینوپتیک	طول	عرض	ارتفاع	بارندگی	دما
یزد	۵۴/۲۸۸۸۸	۳۱/۹	۱۲۳۷/۲	۴۳/۴	۲۰/۴
میبد	۵۳/۹۶۶۶۷	۳۲/۲۱۶۶۷	۱۱۰۸	۵۱/۴	۱۹/۳

ب) برای تهیهٔ نقشهٔ هم‌بارش زمان حال نیز ابتدا رابطهٔ خطی از همبستگی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانهٔ ایستگاه‌ها به‌دست آمد. به‌همین‌منظور، پس از ارزیابی اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های موجود در حوضه، برای استخراج نقشهٔ حامل خطوط هم‌بارش در زمان حال، ابتدا رابطه‌سنجی بین ارتفاع و میانگین بارش ماهیانه برای دوازده ایستگاه انجام گرفت و رابطهٔ خطی رگرسیونی با ضریب همبستگی R= ۰/۸۸۸ به‌دست آمد:

$$P = ۰/۱۲۲۸H - ۹۵/۹۳۸ \quad (۲)$$

این رابطه نشان می‌دهد که بارش حوضه متأثر از تغییرات ارتفاعی است و با افزایش ۱۰۰ متر ارتفاع در این محدود، بارش نیز ۰/۱۲۲۸ میلی‌متر افزایش می‌یابد؛ پس رابطهٔ بین ارتفاع و بارش در منطقه، مستقیم و معنادار است. در این رابطه، P بارش کنونی، H ارتفاع، عدد ۰/۱۲۲۸ شیب خط بارش و عدد ۹۵/۹۳۸ عرض از مبدأ خط بارش است.

ج) پس از بررسی شرایط کنونی دمایی منطقه، به بازسازی شرایط دمایی گذشته با استفاده از روش رایت و پورتر مبادرت شد. در این مرحله، برحسب خط برف‌مرز در دورهٔ سرد که در ارتفاع ۲۲۰۰ متری قرار می‌گرفته است و با بهره‌گیری از رابطهٔ ۳، نقشهٔ میانگین دما در دورهٔ سرد ترسیم شد:

$$T_W = (H_S - H) * .۶۵/۱۰۰ \quad (۳)$$

که در آن، T_W دمای وورم، H_S ارتفاع خط برف مرز و H ارتفاع منطقه به متر با ضریب همبستگی ۰/۹۹ است. از همبستگی بین ارتفاع و دما رابطه‌ای به‌دست آمد که در آن، یک‌بار به‌جای H، ارتفاع ۱۰۰۰ متر و یک‌بار ارتفاع ۲۰۰۰ متر قرار داده شد؛ سپس با کم کردن این دو عدد، افت آدیاباتیک دما محاسبه شد. درادامه، با استفاده از ارتفاع خط برف‌مرز دایمی و مقدار افت آدیاباتیک دما، نقشهٔ هم‌دمای زمان گذشته ترسیم شد.

د) با درنظر گرفتن رابطهٔ دما و بارش کنونی و ارتباط آن با دمای گذشته (باتوجه‌به رابطهٔ خطی بین دما و بارش) (رامشت و همکاران، ۱۳۹۰؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ سیف و همکاران، ۱۳۹۴)، به‌جای x دمای گذشته جاگذاری شد تا مقدار بارش گذشته محاسبه شود:

$$P = -۱۵/۸۰۳T + ۳۵۵/۱۶ \quad (۴)$$

براساس این رابطه، بین دو عامل دما و بارش، ضریب همبستگی ۰/۹۲ به‌دست آمد. درنهایت، به تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده و تلفیق اطلاعات اقدام شد. درادامه، محاسبهٔ خط برف‌مرز به روش رایت و پورتر تشریح می‌شود.

تعیین خط برف‌مرز به دو روش مختلف

الف) روش رایت

در روش رایت، اختلاف ارتفاع سیرک‌ها محاسبه و با ضرب آن در ۶۰ درصد سیرک‌ها و کم کردن حاصل از بیشترین ارتفاع، برف‌مرز تعیین می‌شود:

$$\text{خط برف مرز} = \text{ارتفاع بالاترین سیرک} - \left(\frac{\mathbf{60}*(\text{ارتفاع پایین ترین سیرک}-\text{ارتفاع بالاترین سیرک})}{\mathbf{100}}\right) \quad (۵)$$

ب) روش پورتر

برای تعیین خط برف‌مرز در منطقهٔ خضرآباد، از سه روش پورتر استفاده شد که عبارت‌اند از: الف) روش ارتفاع کف سیرک؛ ب) روش نسبت ارتفاعی؛ ج) روش نسبت مساحت تجمعی.

۱. روش ارتفاع کف سیرک[1]

در این روش، برای مشخص کردن برف‌مرز گذشته، پس از آماده‌سازی جدول طبقات ارتفاعی و مشخص کردن سیرک‌ها در محدودهٔ ترازهای ارتفاعی، از رابطهٔ ۲ برای محاسبهٔ نما یا مد استفاده می‌شود:

$$M_o = ۱ + \left(\frac{f_۱}{f_۱ + f_۲}\right) * h \quad (۶)$$

که در آن، L حد پایین طبقهٔ نمادار؛ $F_۱$ تفاضل طبقهٔ ماقبل طبقهٔ نمادار از فراوانی طبقهٔ نمادار؛ $F_۲$ تفاضل طبقهٔ مابعد طبقهٔ نمادار از فراوانی طبقهٔ نمادار و h ارتفاع دو طبقهٔ ارتفاعی است.

۲. روش نسبت‌های ارتفاعی[1]

در این روش، ابتدا از راه میانگین محدودهٔ ارتفاعی پایانهٔ زبانهٔ یخچالی و بلندترین ستیغ حوضه یا منطقهٔ مورد نظر، خط برف‌مرز مشخص می‌شود.

$$\frac{Ah + At}{۲} \quad (۷)$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۳. روش نسبت مساحت تجمعی[2]

ابتدا برف‌مرز اولیه با استفاده از روش نسبت ارتفاعی[3] انتخاب می‌شود. سپس خطوط میزان (۱۰۰ متری) سطح یخچالی مشخص و مساحت بین دو منحنی متوالی (به فاصلهٔ ۱۰۰ متر) اندازه‌گیری و برای ایجاد منحنی تجمعی استفاده می‌شود که به شکل گرافیکی، مساحت یخچال را به‌نسبت توزیع ارتفاعی نمایش می‌دهد. با فرض ثابت بودن نسبت مساحت تجمعی ۰/۶۵ از ارتفاعات بالادست، برف‌مرز ممکن است از سطح گرافیکی تعیین شود. سپس در جدول ۷، مساحت‌های تجمعی ترازهای ارتفاعی به‌شکل درصد نوشته و نمودار آن ترسیم می‌شود. نقطه‌ای که حوالی ۰/۶۵ مساحت قلمرو یخچال‌های گذشته را بپوشاند، برف‌مرز درنظر گرفته می‌شود.

1. Altitude ratios
2. Accumulation-area ratio (AAR)
3. altitude ratio method

یافته‌های پژوهش

۱. توزیع سیرک‌های منطقه و تحلیل آن

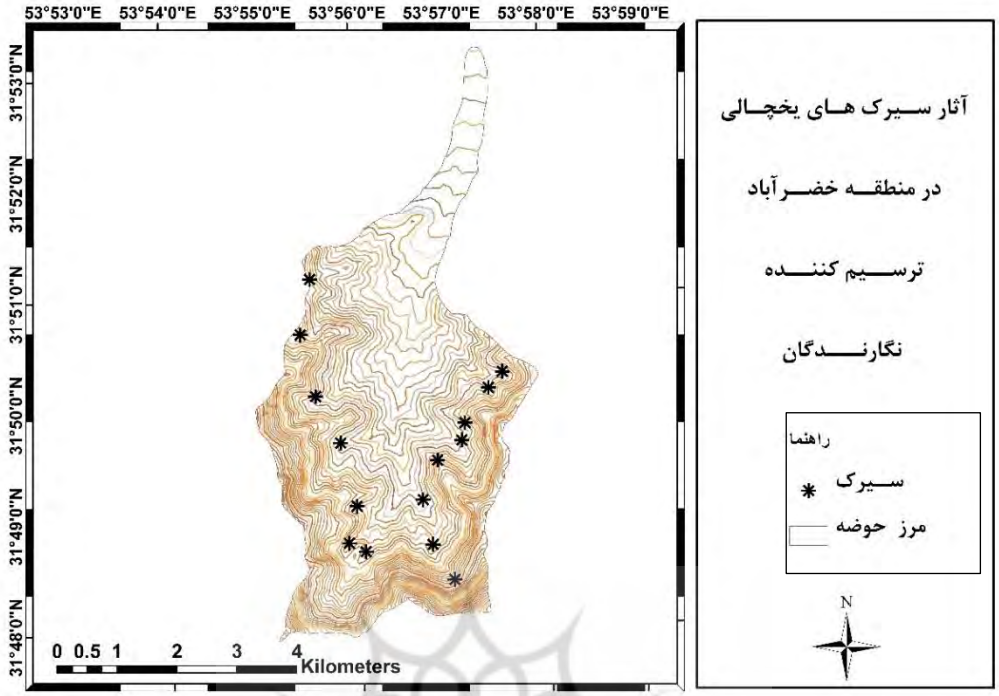
باتوجه‌به نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای، مشاهدات میدانی و نتایج دستگاه GPS، پانزده سیرک بزرگ و کوچک در منطقهٔ پژوهشی شناسایی شد که بین ارتفاع ۲۰۶۰ تا ۲۴۵۰ متر توزیع شده‌اند (شکل ۲ و جدول‌های ۴ و ۵). براساس این جدول‌ها، اغلب سیرک‌ها در ارتفاع ۲۱۰۰ تا ۲۳۰۰ متر قرار گرفته‌اند.

جدول ۴. موقعیت دقیق سیرک‌ها برحسب طول و عرض جغرافیایی

نقاط	جهت	ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	شمال غرب	۲۰۶۰	53ذ55ظ31ق	31ذ51ظ6ق
۲	غرب	۲۱۵۰	53ذ55ظ24.6ق	31ذ50ظ39.9ق
۳	غرب	۲۰۹۰	53ذ55ظ48.59ق	31ذ49ظ40ق
۴	جنوب غرب	۲۲۱۰	53ذ55ظ57.8ق	31ذ49ظ6.58ق
۵	جنوب غرب	۲۲۲۰	53ذ55ظ52ق	31ذ48ظ46.6ق
۶	جنوب غرب	۲۲۳۰	53ذ56ظ14ق	31ذ48ظ41.76ق
۷	جنوب شرق	۲۴۵۰	53ذ55ظ58ق	31ذ48ظ25ق
۸	جنوب شرق	۲۲۱۰	53ذ56ظ45ق	31ذ48ظ44.8ق
۹	جنوب شرق	۲۱۰۵	53ذ56ظ39.8ق	31ذ49ظ1ق
۱۰	شرق	۲۲۰۵	53ذ56ظ49.7ق	31ذ49ظ30ق
۱۱	شرق	۲۲۰۰	53°56´50	31ذ49ظ30ق
۱۲	شرق	۲۱۵۰	53ذ57ظ5ق	31ذ49ظ40ق
۱۳	شرق	۲۱۵۰	53ذ57ظ7ق	31ذ49ظ50ق
۱۴	شرق	۲۱۰۰	53ذ57ظ23ق	31ذ50ظ8.9ق
۱۵	شرق	۲۱۰۰	53ذ57ظ32ق	31ذ50ظ7ق

جدول ۵. چگونگی توزیع سیرک‌های یخچالی در حوضهٔ خضرآباد

درصد فراوانی	تعداد سیرک‌ها	ارتفاع به متر
٪۱۲/۳۳	۲	۲۰۰۰_۲۱۰۰
٪۴۰	۶	۲۱۰۰_۲۲۰۰
٪۴۰	۶	۲۲۰۰_۲۳۰۰
٪۰	۰	۲۳۰۰_۲۴۰۰
٪۶/۶۷	۱	۲۴۰۰_۲۵۰۰



شکل ۲. موقعیت سیرک‌های یخچالی در منطقهٔ خضرآباد

شکل ۳. نمایی از آثار سیرک در جنوب غرب حوضهٔ خضرآباد

۲. نتایج محاسبات برای تعیین خط برف‌مرز به دو روش مختلف

۱.۲. روش رایت

باتوجه‌به نحوهٔ محاسبهٔ روش رایت (رابطهٔ ۵)، خط برف‌مرز در منطقهٔ خضرآباد، در ارتفاع حدود ۲۲۰۰ متری مشخص شد (شکل ۳)؛ به‌این‌معنا که در سردترین دورهٔ حاکم در منطقه، سطوح بالاتر از ارتفاع ۲۲۰۰ متر ممکن است متحمل انباشتگی‌های گستردهٔ یخ و برف طی زمان‌های متمادی شده باشد؛ چراکه دمای متوسط سالانهٔ این خط، صفر درجهٔ سانتی‌گراد است.

۲.۲. روش پورتر

برای تعیین خط برف‌مرز در منطقهٔ خضرآباد، از سه روش پورتر استفاده شد که عبارت‌اند از: الف) روش ارتفاع کف سیرک؛ ب) روش نسبت ارتفاعی؛ ج) روش نسبت مساحت تجمعی.

۱.۲.۲. روش ارتفاع کف سیرک[1]

باتوجه‌به رابطهٔ ۶، محاسبه‌ها برای تعیین ارتفاع کف سیرک صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. توزیع فراوانی سیرک‌های یخچالی در طبقات ارتفاعی حوضهٔ خضرآباد

فراوانی سیرک‌ها	ارتفاع به متر
۲	۲۰۰۰–۲۱۰۰
۶	۲۱۰۰–۲۲۰۰
۶	۲۲۰۰–۲۳۰۰
۰	۲۳۰۰–۲۴۰۰
۱	۲۴۰۰–۲۵۰۰

$$M_{۲۱۰۰-۲۲۰۰} = ۲۱۰۰ + \left(\frac{(۲۱۰۰-۶)}{(۲۱۰۰-۶)+(۲۲۰۰-۶)} \right) * ۱۰۰ = ۲۱۴۸/۸۳$$

$$M_{۲۲۰۰-۲۳۰۰} = ۲۲۰۰ + \left(\frac{(۲۲۰۰-۶)}{(۲۲۰۰-۶)+(۲۳۰۰-۶)} \right) * ۱۰۰ = ۲۲۴۸/۸۸$$

۲.۲.۲. روش نسبت‌های ارتفاعی[1]

در این روش ابتدا از راه میانگین محدودهٔ ارتفاعی پایانهٔ زبانهٔ یخچالی و بلندترین ستیغ حوضه یا منطقهٔ مورد نظر (رابطهٔ۷) خط برف‌مرز مشخص می‌شود.

$$\text{خط‌برف‌مرز} = \frac{2460+1560}{2} = 2010$$

با توجه به محاسبه‌های صورت‌گرفته، خط برف مرز در ارتفاع ۲۰۱۰ متری مشخص شد.

۳.۲.۲. روش نسبت مساحت تجمعی[2]

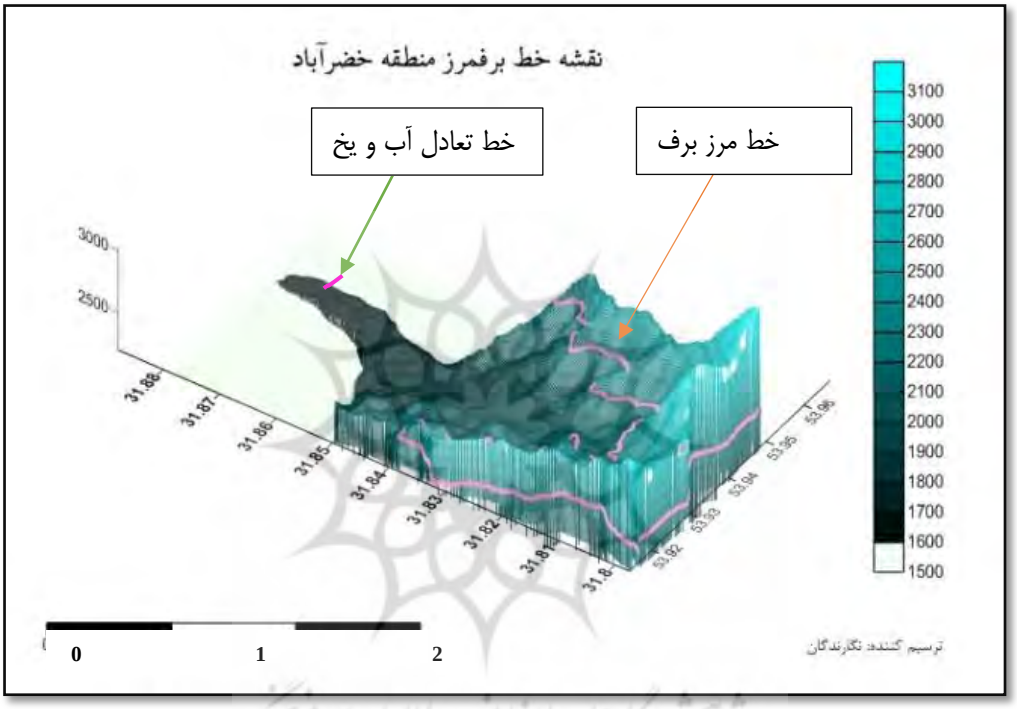
باتوجه‌به بررسی‌ها و محاسبه‌ها، همان‌طورکه جدول ۷ نشان می‌دهد، در ستون مربوط به درصد تجمعی میزان ۶۸/۸۴ در طبقهٔ ارتفاعی بین ۲۲۰۰–۲۱۰۰ قرار گرفته است. میانگین بین دو ارتفاع (۲۱۵۰ متر) خط برف‌مرز برآوردشده است.

جدول ۷. مساحت‌های تجمعی بین طبقات ارتفاعی

طبقه‌بندی ارتفاعی	مساحت به کیلومتر	مساحت به درصد	درصد تجمعیn
۳۰۰۰ء۰	۰/۱۵۷۰۱۱	۰/۶۸	۰/۶۸
۲۹۰۰–۳۰۰۰	۰/۴۰۴۶	۱/۷۶	۲/۴۴
۲۸۰۰–۲۹۰۰	۰/۴۰۶	۱/۷۶۳	۴/۲۰۳
۲۷۰۰–۲۸۰۰	۰/۶۳۴	۲/۷۵	۶/۹
۲۶۰۰–۲۷۰۰	۱/۰۴۰۸۷	۴/۵۲	۱۱/۴۷۳
۲۵۰۰–۲۶۰۰	۱/۷۲	۷/۴۷	۱۸/۹۴۳
۲۴۰۰–۲۵۰۰	۲/۱۸۵	۹/۴۹	۲۸/۴۳۳
۲۳۰۰–۲۴۰۰	۲/۸۴۸	۱۲/۳۶۶	۴۰/۷۹۹
۲۲۰۰–۲۳۰۰	۳/۴۱۵	۱۴/۸۲۸	۵۵/۶۲۷
۲۱۰۰–۲۲۰۰	۳/۰۴۳	۱۳/۲۱۳	۶۸/۸۴
۲۰۰۰–۲۱۰۰	۲/۹۹۹	۱۳/۰۲	۸۱/۸۶
۱۹۰۰–۲۰۰۰	۲/۰۴۹	۹/۰۹	۹۰/۹۵
۱۸۰۰–۱۹۰۰	۱/۲۰۳	۵/۲۳	۹۶/۱۷
۱۷۰۰–۱۸۰۰	۰/۸۶۹	۳/۷۷	۹۹/۹۴
۱۷۰۰ء۰	۰/۱۱۱۶	۰/۴۸۴	۱۰۰

1. Altitude ratios
2. Accumulation-area ratio (AAR)

هاگه‌دورن (۱۹۷۴) و کهل (۱۹۷۶) پژوهش‌هایی در ایران مرکزی انجام داده‌اند. پژوهش هاگه‌دورن در شیرکوه یزد حاکی از وجود توپوگرافی یخچالی قدیمی در ارتفاع ۴۲۰۰ متری این کوه است. البته پژوهش‌های دیگری مانند المدرسی و رامشت (۱۳۸۶: ۱۷)، محمودی و همکاران (۱۳۹۰: ۶۵)، افشاری آزاد و پورصبا (۱۳۸۸: ۲۹۸) و بقایی‌نیا و مهرشاهی (۱۳۸۶: ۱۳۴) مقدار خط برف‌مرز را در حوضه‌های متفاوت ایران مرکزی به‌ترتیب برای حوضهٔ سخوید یزد، ۳۲۲۰ متر؛ تیگران ماهان کرمان، ۲۹۰۰ متر؛ سیالان، ۲۱۰۰ متر؛ و فخرآباد، ۲۹۰۰ متر درنظر گرفته‌اند.



شکل ۴. خط برف‌مرز و خط تعادل آب و یخ منطقه در دورهٔ حاکمیت یخچال‌ها

۳. خط تعادل آب و یخ

جریان‌های یخی که از برف خانه‌های بالادست تغذیه می‌شدند، صدها و در مواردی هزاران متر پایین‌تر از خط برف دایم جریان پیدا می‌کرده و درنهایت، در نقطه‌ای بر اثر افزایش دمای سالانه متوقف و از آن نقطه به بعد، آب‌ذوبان زبانهٔ یخی آغاز می‌شده است؛ به این محل دراصطلاح، خط تعادل آب و یخ گفته می‌شود (طالبی، ۱۳۸۱: ۱۰۹). اغلب خط تعادل آب و یخ را بر پایهٔ آثار ژئومورفیک به دو صورت تعیین می‌کنند: یکی از این روش‌ها، وجود و مشاهدهٔ مورن‌های انتهایی یا به‌عبارتی سنگ‌های سرگردان[1] است. درواقع، این روش قلمرو انتهایی زبانهٔ یخچالی (محل برجای ماندن سنگ‌های حمل‌شده توسط زبانه) را خط تعادل آب و یخ درنظر می‌گیرد. اما روش دیگر، خط تعادل آب و یخ دوران کواترنر را بر پایهٔ

1. Erratic

فرم درهٔ یخچالی درنظر می‌گیرد؛ یعنی تا جایی را که دره به شکل عریض امتداد داشته و حالت Uشکل خود را حفظ کرده است، جزء قلمرو یخی گذشته قلمداد می‌کند. از این نظر، درست نقطه‌ای را که فرم دره تغییر می‌کند، خط تعادل آب و یخ درنظر می‌گیرند. اغلب در این نقطه، درهٔ عریض به‌طورناگهانی قطع شده، رها می‌شود.

براین‌اساس، با پژوهش‌های انجام‌گرفته دربارهٔ این منطقه مشخص شد که اگرچه خط برف‌مرز دایمی در ارتفاع ۲۲۰۰ متری قرار می‌گرفته، خط تعادل آب و یخ به‌مراتب از خط برف‌مرز دایمی پایین‌تر می‌آمده است. در حوضهٔ آبریز خضرآباد، برحسب روش اول، خط تعادل آب و یخ در ارتفاع حدود ۱۵۶۰ متری تعیین شد که معادل دمای ۴/۸ درجهٔ سانتی‌گراد محیطی در گذشته تلقی می‌شود. درواقع، براساس نقشهٔ هم‌دمای دوران پلیئستوسن حوضهٔ خضرآباد می‌توان گفت خط دمای ۴/۸ درجه متوسط سالانه در این حوضه در ابتدای خضرآباد قرار داشته که در بالادست دشت یزد–اردکان واقع شده است (شکل ۴). همچنین، باید به این نکته اشاره کرد که مهم‌ترین شواهد رسوب‌گذاری یخچالی، مجاور یخچالی و فلوویالی (جریانی) مربوط به دورهٔ کواترنر را می‌توان در این سامانهٔ دره‌ای به‌نام حوضهٔ خضرآباد مشاهده کرد. این شواهد شامل سیرک‌های بزرگ و کوچک، مورن‌های میانی، کناری و انتهایی، سنگ‌های سرگردان گرانیتی و آهکی، درهٔ یخچالی، ایجاد دامنه‌های سولیفلوکسیون و درنهایت، تیلیت‌های یخچالی است (فرح‌بخش، ۱۳۹۳).

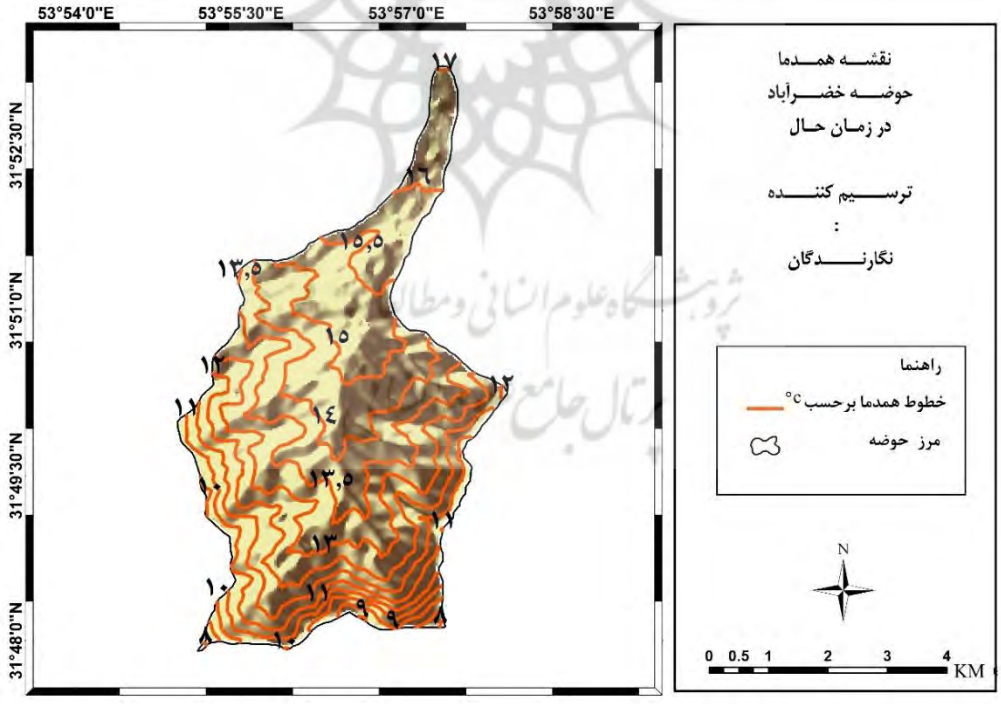
شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸. نمایی از سنگ‌های سرگردان در ابتدای درهٔ خضرآباد

۴. شرایط اقلیمی دورهٔ کواترنر در منطقه

برای بررسی شرایط اقلیمی دوران کواترنر در منطقه، از میراث ژئومورفولوژیک موجود و همچنین داده‌های اقلیمی کنونی استفاده شد. برای این منظور، ابتدا باید مقدار دما و بارش زمان گذشته را بازسازی و سپس آنومالی برودتی و رطوبتی منطقه را براساس برف‌مرز و همبستگی دما و رطوبت با ارتفاع مورد نظر مشخص کرد.

۱.۴. دمای محیطی حال منطقه

برای ترسیم نقشه‌های هم‌دمای حال، ابتدا همبستگی بین ارتفاع و متوسط دمای سالیانه (۹ سال) بین ایستگاه‌های اطراف منطقه با استفاده از رابطهٔ خطی ۱ برقرار شد. به‌این‌ترتیب، با اعمال این رابطه در محیط ArcGIS، نقشهٔ هم‌دمای منطقه در حال حاضر ترسیم شد (شکل ۹). براساس محاسبه‌های انجام گرفته، به‌ازای افزایش ۱۰۰ متر ارتفاع در محدودهٔ پژوهش، افت آهنگ دما ۰/۶۵ درجهٔ سانتی‌گراد برآورد شد. این نقشه نشان‌دهندهٔ مقدار متوسط دما در زمان حال در حوضه است که مقدار آن از ۸ درجهٔ سانتی‌گراد در ارتفاعات (جنوب شرق و جنوب غرب) تا ۱۷ درجهٔ سانتی‌گراد به‌سمت دشت متغیر است. براین‌اساس، با حرکت از ارتفاعات کوه مسجد به‌طرف دشت، دما افزایش می‌یابد و برعکس (شکل ۹).

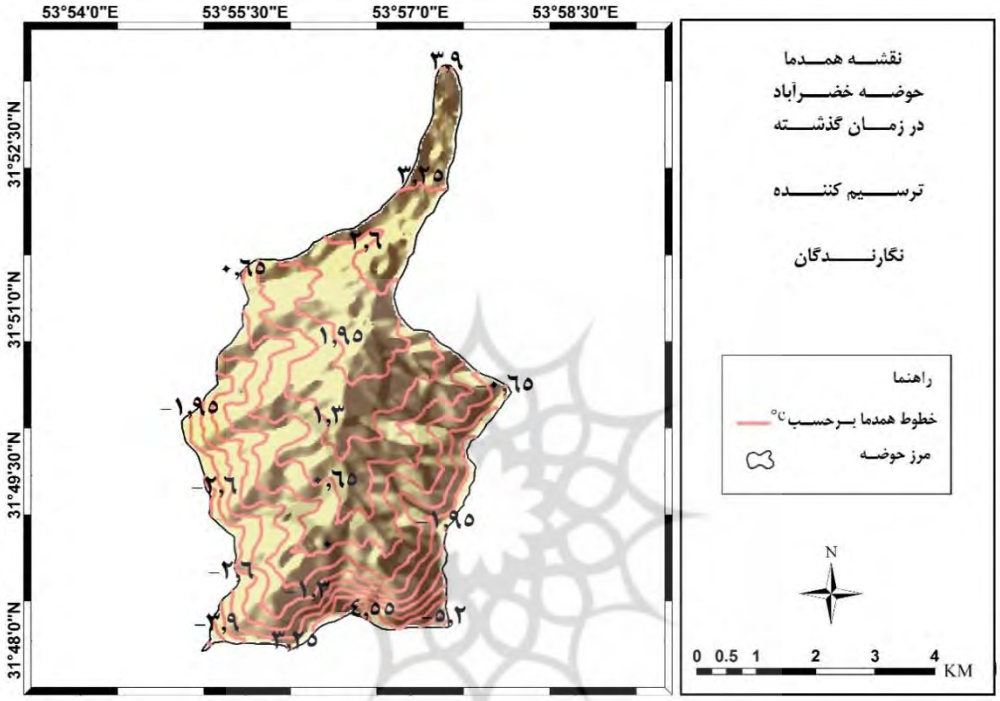


شکل ۹. نقشهٔ هم‌دمای حوضهٔ خضرآباد در زمان حال

۲.۴. بازسازی شرایط دمای محیط در کواترنر

باتوجه‌به رابطهٔ ۳ و همچنین با پردازش آن در سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی ArcGIS (روش کریجینگ) نقشهٔ هم‌دمای

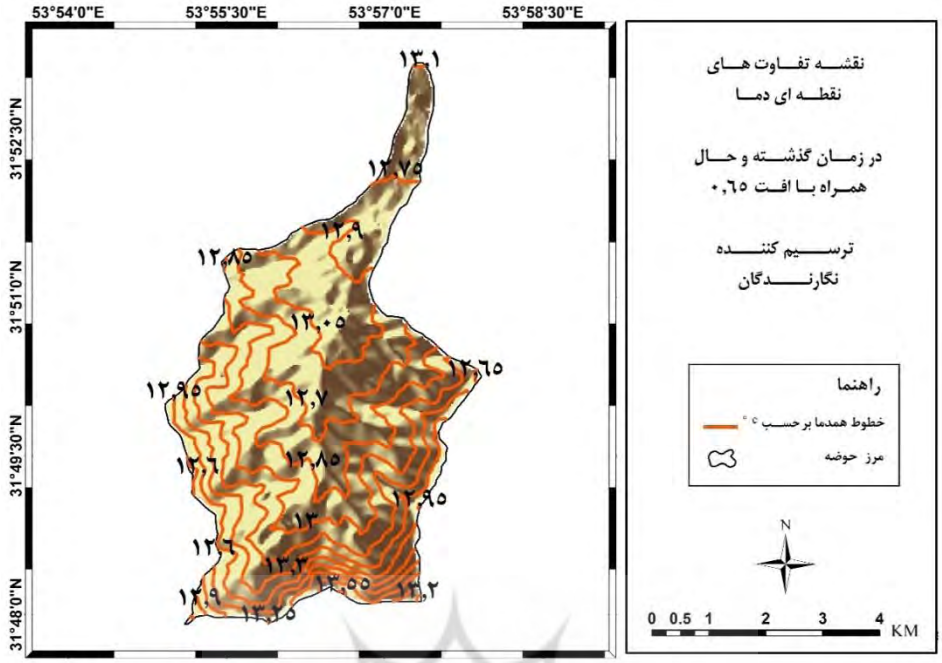
گذشته (کواترنر) بازسازی و ترسیم شد (شکل ۱۰). نتایج ارزیابی رقومی نقشهٔ هم‌دمای متوسط سالانه در دورهٔ گذشته نشان می‌دهد که در ارتفاعات مسجد، یعنی در سمت جنوب شرق و جنوب منطقه، سلول‌های برودتی بیش از هر مکان دیگر غلبه دارد و مقدار آن از کمترین، ۵/۲- درجهٔ سانتی‌گراد در ارتفاعات کوه مسجد، تا بیشترین آن، ۳/۹ درجهٔ سانتی‌گراد در حوضهٔ خضرآباد، متغیر است.



شکل ۱۰. نقشهٔ هم‌دمای متوسط سالانهٔ حوضهٔ خضرآباد در پلیئستوسن

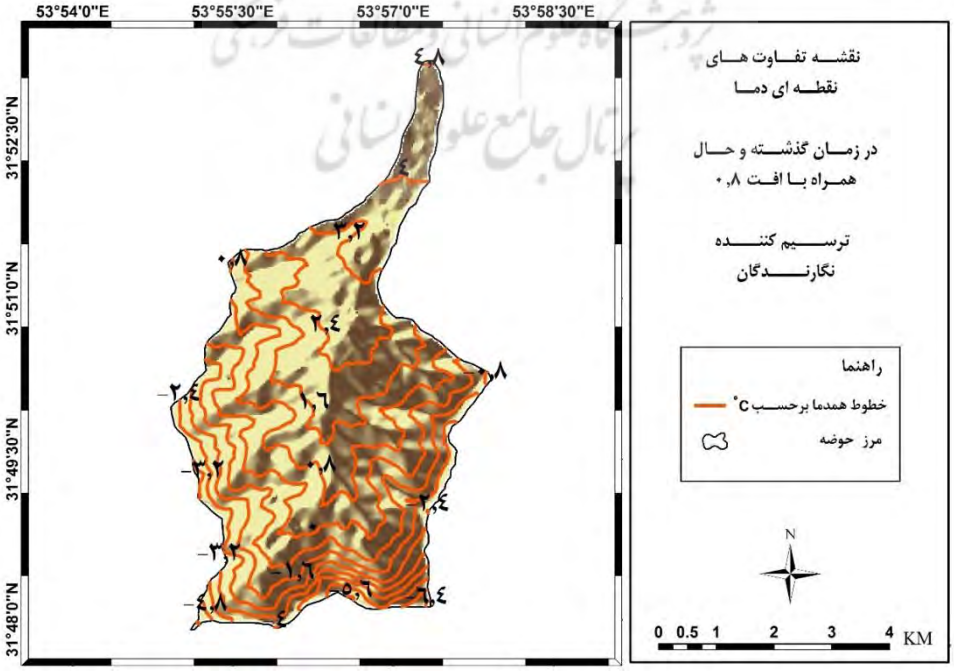
۳.۴. مقایسهٔ شرایط دمایی حال و گذشتهٔ منطقه (آنومالی برودتی)

مقایسهٔ دمای گذشته و حال را آنومالی حرارتی گویند. باتوجه‌به میانگین دمای متوسط سالانهٔ ۹ سالهٔ ایستگاه انتخابی موجود و با درنظر گرفتن رابطهٔ دمای گذشته با ارتفاع و همچنین دمای حال حاضر با ارتفاع که ارتباط مستقیم با هم دارند و با فرض اینکه این رابطه در تمام زمان‌ها ثابت است (افزایش یا کاهش دما به افزایش یا کاهش ارتفاع بستگی دارد)، مقدار آنومالی حرارتی با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ در سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی برآورد شد (شکل‌های ۹ و ۱۰). به‌این‌ترتیب، از مقایسهٔ شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان مقدار آنومالی حرارتی گذشته و حال را محاسبه کرد. براین‌اساس، آنومالی دمایی حوضه به‌طورمیانگین ۱۲/۹۳ (حدود ۱۳) درجهٔ سانتی‌گراد است. کمترین تفاوت مربوط به حوالی شرق و غرب ارتفاعات حوضه و تاحدودی مرکز دره است. نکتهٔ شایان توجه این است که در قسمت ابتدای دشت، مقدار آنومالی ۱۳/۱ درجهٔ سانتی‌گراد است؛ اما در امتداد ارتفاعات مسجد، این مقدار به ۱۳/۵۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نقشهٔ تفاوت نقطه‌ای دما در دورهٔ حاکمیت یخچال‌ها و زمان حال (افت دمایی ۰/۶۵ درجهٔ سانتی‌گرادی)

همچنین، با فرض افت آدیاباتیک دما در دوران سرد به مقدار ۰/۸، تفاوت دمای زمان گذشته و حال محاسبه شد. همان‌طور که در نقشهٔ تفاوت نقطه‌ای دما مشاهده می‌شود، در حوالی ارتفاعات ۳۰۰۰ متری، مقدار اختلاف دما ۱۴/۶ درجهٔ سانتی‌گراد و در ابتدای حوضه ۱۲/۲ درجهٔ است. براین‌اساس، میانگین دمای حال و گذشته برای کل حوضه با این افت دمایی، ۱۳/۴ درجه است (شکل ۱۲). این مقدار افت به این دلیل فرض شد که همواره در مناطق سردتر افت آدیاباتیک دما بیشتر از مناطق گرم است.

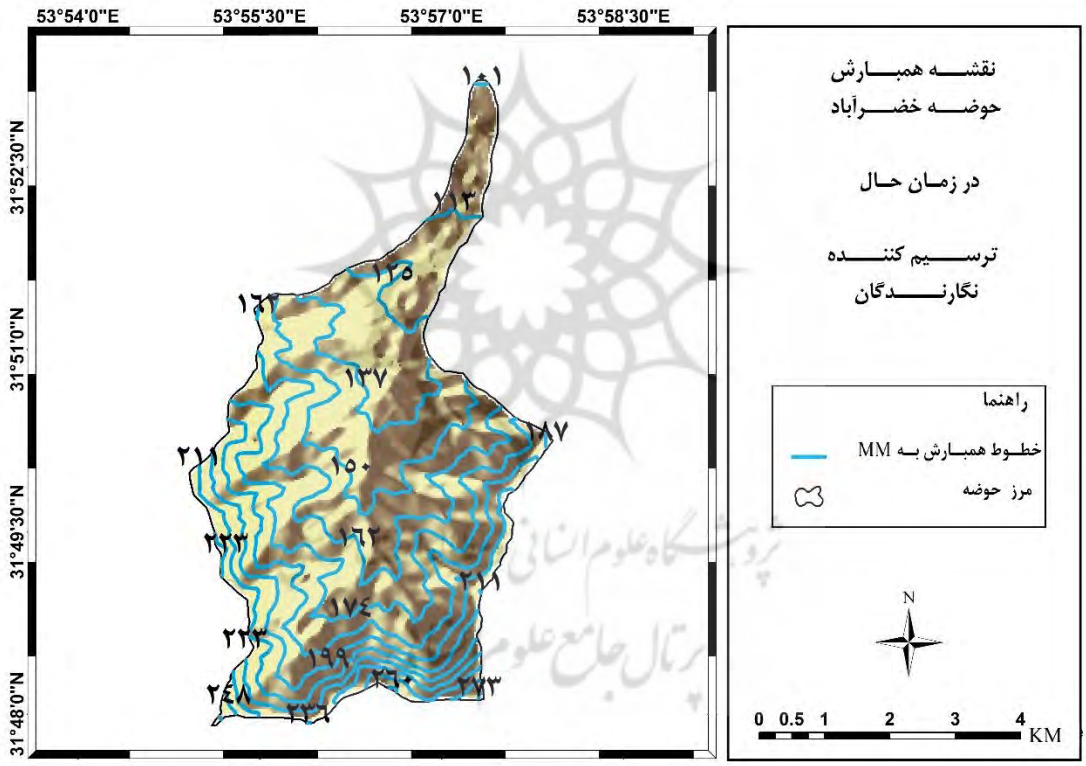


شکل ۱۲. نقشهٔ تفاوت نقطه‌ای دما در دورهٔ حاکمیت یخچال‌ها و زمان حال (افت ۰/۸ درجهٔ سانتی‌گرادی)

۴.۴. بارش محیطی فعلی حوضه

به‌طورکلی، افزایش بارندگی ارتباط مستقیم با افزایش ارتفاع دارد. باید توجه داشت علاوه بر ارتفاع، موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه و نحوهٔ قرار گرفتن آن در جهت حرکت سامانه‌های باران‌زا در گرادیان هر منطقه مؤثر است. برای تهیهٔ نقشهٔ هم‌بارش زمان حال نیز ابتدا رابطهٔ خطی از همبستگی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانهٔ ایستگاه‌ها به‌دست آمد.

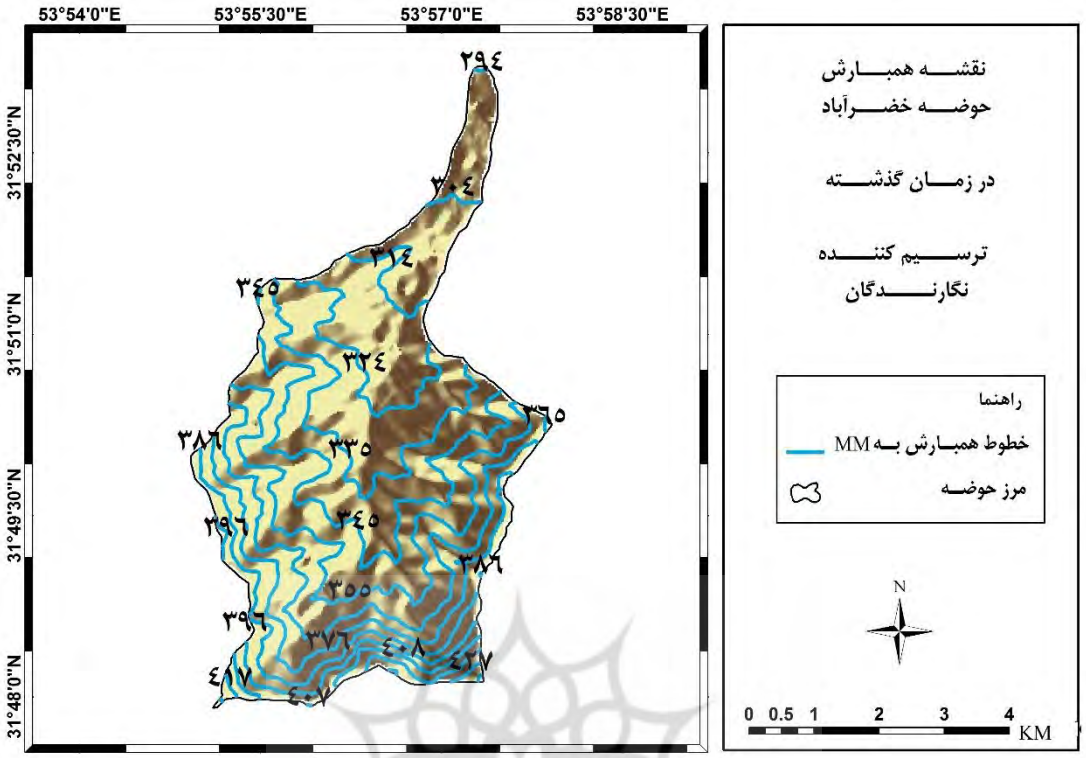
به این ترتیب، براساس پردازش میانگین بارش سالانه و نقاط ارتفاعی ایستگاه‌ها و اعمال این رابطه در محیط ArcGIS، نقشهٔ هم‌بارش حال حاضر منطقه ترسیم شد (شکل ۱۳). این نقشه نشان‌دهندهٔ مقدار متوسط بارش در زمان حال حوضه به مقدار ۱۸۷ میلی‌متر است که مقدار آن از ۲۷۳ میلی‌متر در ارتفاعات مسجد تا ۱۰۱ میلی‌متر در مدخل خروجی حوضه در روستای خضرآباد متغییر است. بنابراین، با حرکت از دشت به‌سمت ارتفاعات، بر میزان بارش افزوده می‌شود.



شکل ۱۳. نقشهٔ هم‌بارش حوضهٔ خضرآباد در زمان حال

۵.۴. بازسازی شرایط بارش محیطی در گذشته

باتوجه‌به ثابت بودن رابطهٔ دما و رطوبت در زمان حال می‌توان به بازسازی شرایط رطوبت گذشتهٔ منطقه براساس دمای محیطی حاصل‌شده اقدام کرد (رامشت و همکاران، ۱۳۹۰؛ یمانی و همکاران ۱۳۹۳؛ سیف و همکاران، ۱۳۹۴). براساس رابطهٔ خطی بین دما و بارش زمان حال و از راه معادلهٔ $P = -۱۵/۸۰۳T + ۳۵۵/۱۶$ نقشهٔ هم‌بارش زمان گذشته نیز ترسیم شد. سپس براساس این رابطه و برحسب رابطهٔ میان‌یابی کریجینگ در محیط سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی، نقشهٔ مقدار رطوبت حوضه در کواترنر ترسیم شد (شکل ۱۴).

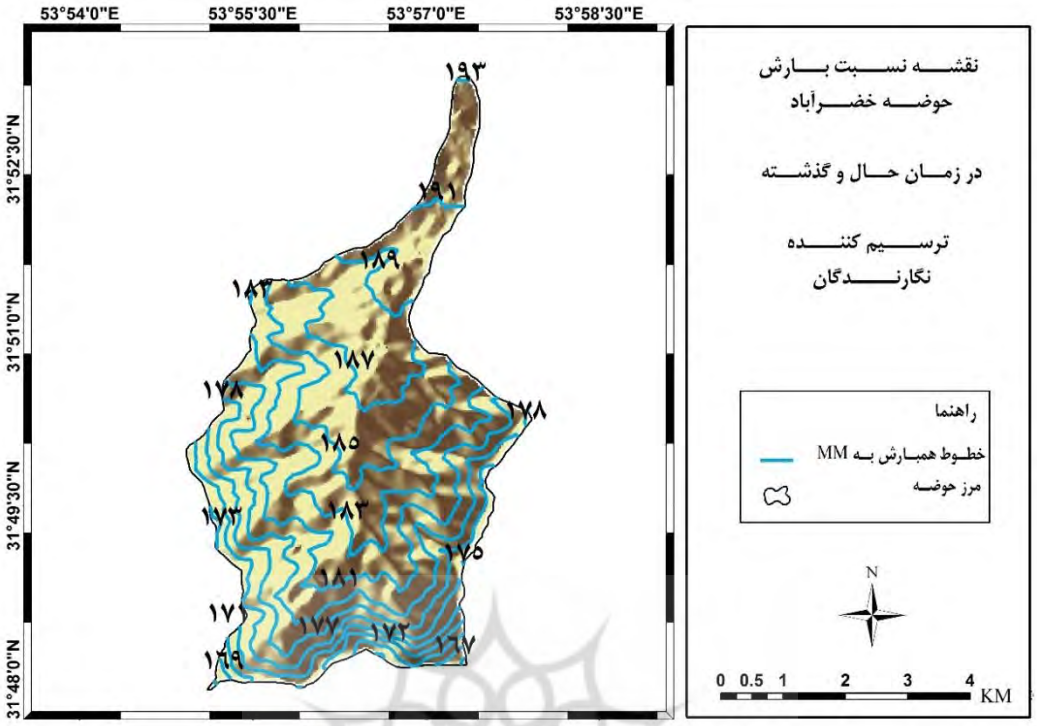


شکل ۱۴. نقشهٔ هم‌بارش حوضهٔ خضرآباد در زمان گذشته

همان‌طورکه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، سالانه به‌طورمتوسط ۳۶۵/۵ میلی‌متر از نزولات جوی در سطح حوضه فرو می‌ریخته که دامنهٔ تغییرات آن در حدود ۴۳۷ میلی‌متر در ارتفاعات مسجد و میل‌درویش تا حدود ۲۹۴ میلی‌متر در ابتدایی‌ترین بخش شمالی حوضه متغیر بوده است. این نقشه نشان می‌دهد که همانند زمان کنونی، بیشترین مقدار بارش مربوط به ارتفاعات جنوب شرق و جنوب غرب بوده و به‌سمت خروجی حوضه در بخش شمالی، از مقدار بارش کاسته می‌شده است. ازاین‌رو، بارش در مرحلهٔ اول در حدود ۱/۹۵ برابر بارش کنونی بوده است. مقدار بارش گذشته در خط هم‌دمای صفر درجهٔ سانتی‌گراد (برف‌مرز دایمی) ۳۵۵ میلی‌متر محاسبه شده است. با احتساب مساحت ۸/۹۵۹۱ کیلومتر مربعی حوضه در بالاتر از برف‌مرز دایمی (۲۲۰۰ متر)، مقدار آبی که سالیانه از راه بارندگی وارد این سطح می‌شده، در حدود ۳۲۱۶ میلیون متر مکعب بوده است.

۶.۴. مقایسهٔ بارش حال و گذشتهٔ منطقه (آنومالی بارش)

مقدار و نحوهٔ تغییر رطوبت محیطی با نسبت گرفتن مقدار بارش در دورهٔ سرد و بارش امروز در دو نقشهٔ ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که مقدار اختلاف بارش در زمان گذشته نسبت به حال، حدود ۱۷۶/۵۲ میلی‌متر بوده است. درواقع، بارش در دورهٔ گذشته نسبت به حال ۱/۹۵ برابر بیشتر بوده است؛ به‌عبارت‌دیگر در زمانی که دمای متوسط سالانه ۱۳ درجهٔ سانتی‌گراد نسبت به امروز کاهش یافته، بارش به‌طورمیانگین، دوبرابر افزایش یافته است.



شکل ۱۵. نقشهٔ نسبت بارش در دورهٔ حاکمیت یخچال‌ها و زمان حال

همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، آنومالی رطوبتی از ارتفاعات به‌سمت خروجی حوضه افزایش می‌یابد؛ به‌سخن‌دیگر، در ارتفاعات جنوب شرق و جنوب غرب (ارتفاعات حوالی ۳۰۰۰ متر) که قلهٔ اصلی بارشی را در زمان گذشته و حال دارد، آنومالی رطوبتی ۱۶۴ میلی‌متر و در خروجی حوضه (ارتفاع ۱۶۰۰ متر) که کمترین بارش را دریافت می‌کند، آنومالی رطوبتی ۱۹۳ میلی‌متر است.

تفاوت حجم بارش دریافتی در دورهٔ گذشته و حال

برای محاسبهٔ مقدار آب دریافتی حوضه می‌توان از نقشه‌های هم‌بارش و هم‌ارتفاع منطقه استفاده کرد؛ به‌این‌صورت که ابتدا باید مساحت بین خطوط تراز معین (آغاز ارتفاع از خط برف‌مرز) و سپس، برحسب نقشه‌های هم‌بارش، مقدار بارش (میانگین بارش در هر طبقهٔ ارتفاعی) بین این منحنی‌ها را به‌دست آورد. درادامه، با حاصل‌ضرب مساحت‌های معین در مقدار بارش می‌توان مقدار آب دریافتی در ارتفاعات مختلف را به‌دست آورد (جدول ۸). جدول ۸ محاسبه‌های انجام‌گرفته را در دو دورهٔ زمانی نشان می‌دهد. همچنان‌که از جدول برمی‌آید، حجم بارش دریافتی دورهٔ گذشته از ارتفاع ۲۲۰۰ متر (برف‌مرز دایمی) در حدود ۳۲۱۶ متر مکعب و در مقایسه با زمان کنونی (۱۸۱۴ متر مکعب) نزدیک به ۱/۹ برابر بیشتر بوده است. بیشترین حجم بارش گذشته در طبقهٔ ارتفاعی ۲۳۰۰–۲۲۰۰ متر و کمترین آن در ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر محاسبه شده است.

جدول ۸. حجم بارش دریافتی زمان گذشته و حال در ارتفاع بیش از ۲۲۰۰ متر

منحنی‌های تراز (m)	مساحت بین منحنی‌ها (km^2)	مقدار بارش در زمان حال (mm)	حجم آب خالص دریافتی در زمان حال (m^3)	مقدار بارش در زمان گذشته (mm)	حجم آب خالص دریافتی در زمان گذشته (m^3)
۲۲۰۰–۲۳۰۰	۲/۹۰۳	۱۸۲/۷	۵۳۰/۳۸	۳۶۱	۱۰۴۷/۹۸
۲۳۰۰–۲۴۰۰	۲/۱۲۲	۱۹۱	۴۰۵/۳۰۲	۳۶۸/۷	۷۸۲/۳۸
۲۴۰۰–۲۵۰۰	۱/۶۱۸	۲۰۸	۳۴۹/۴۴	۳۸۵	۶۲۲/۹۳
۲۵۰۰–۲۶۰۰	۱/۰۳۲	۲۱۵/۸	۲۲۲/۷۰۶	۳۹۰	۴۰۲/۴۸
۲۶۰۰–۲۷۰۰	۰/۶۱۱۷	۲۳۰/۸	۱۴۱/۱۸	۴۲۰/۸	۲۴۶/۳۹
۲۷۰۰–۲۸۰۰	۰/۴۰۱۵	۲۴۰/۸	۹۶/۶۸	۴۱۱,۲	۱۶۵/۰۹
۲۸۰۰–۲۹۰۰	۰/۲۵۹۵	۲۵۴	۶۵/۹۱	۴۲۲	۱۰۹/۵۱
۲۹۰۰–۳۰۰۰	۰/۰۰۷۵	۲۶۳/۲۵	۱/۹۷	۴۳۰	۳/۲۲۵
<۳۰۰۰	۰/۰۰۳۹	۲۷۳	۱/۰۶	۴۳۷	۱/۷۰
جمع	۸/۹۵۹۱		۱۸۱۴/۶۳		۳۲۱۶/۵۹۵

نتیجه‌گیری

یکی از راه‌های بررسی شواهد شرایط محیطی و اقلیمی گذشته، بازسازی این شرایط با آثار و داده‌های ژئومورفولوژیک است. آثار ژئومورفیک نشان‌دهندهٔ شرایط آب‌وهوایی گذشته اغلب شامل آثار لندفرمی و رسوب‌شناسی است. بررسی و بازدید میدانی حوضهٔ آبریز خضرآباد در غرب شیرکوه، لندفرم‌ها و آثاری را نشان می‌دهد که مربوط به دوره‌های سرد و مرطوب و شکل‌گیری فرایندهای یخچالی در این منطقه در دوران کواترنر است. مهم‌ترین آثار لندفرمی بیان‌کنندهٔ شرایط اقلیمی سرد و مرطوب دورهٔ کواترنر حوضهٔ خضرآباد عبارت از سیرک‌های یخچالی، یخرفت‌ها، درهٔ یخچالی Uشکل، تراس‌های یخچالی سواحل رودخانه، مخروط‌افکنهٔ بسیار بزرگ پایین‌تر از خط تعادل آب و یخ و همچنین، سنگ‌های سرگردان است (شریفی و فرح‌بخش، ۱۳۹۴الف). بررسی‌های رسوب‌شناسی نیز حاکی از آن است که بخش‌های بالادست و میان‌دست حوضهٔ رسوب‌ها جورشدگی پایینی دارد. به‌علاوه، انحراف‌معیار و کشیدگی زیاد آنها حاکی از فرایند یخچالی در گذشته در این حوضه است (شریفی و فرح‌بخش، ۱۳۹۴ب). تیلیت‌ها نیز در این منطقه حاکی از نخستین دورهٔ یخچالی در ایران مرکزی است که یخرفت‌های آخرین دورهٔ یخچالی بر روی آنها قرار گرفته است (شریفی و فرح‌بخش، ۱۳۹۴الف). بر مبنای این بررسی‌ها و براساس آثار سیرک‌ها و سنگ‌های سرگردان و همچنین روش‌های رایت و پورتر، خط برف‌مرز و خط تعادل آب و یخ تعیین شد. براین‌اساس و با محاسبهٔ مقدار افت آدیاباتیک دما برحسب همبستگی بین دما و ارتفاع و همچنین همبستگی بارش و ارتفاع، ابتدا براساس داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، نقشهٔ هم‌دما و هم‌بارش برای حال حاضر ترسیم شد. سپس بر پایهٔ خط برف‌مرز و خط تعادل آب و یخ گذشته، همچنین روش‌های رایت و پورتر و بر پایهٔ پژوهش‌های رامشت و همکاران (۱۳۹۰)، یمانی و همکاران (۱۳۹۳) و سیف و همکاران (۱۳۹۴) و بر پایهٔ نقشهٔ هم‌دما و هم‌بارش حال حاضر، نقشه‌های هم‌دما و هم‌بارش کواترنر حوضهٔ این پژوهش ترسیم شد

(شکل‌های ۱۰ و ۱۴). به‌این‌ترتیب، مقدار تغییرات و آنومالی‌های حرارتی حال حاضر به‌نسبت پلیئستوسن محاسبه و برآورد شد. براساس تحلیل‌های آماری و تعیین خط دمای صفر درجهٔ گذشته که خط برف‌مرز دایمی را نشان می‌دهد، مشاهده شد که خط برف‌مرز دایمی کواترنر در ارتفاع بالاتری نسبت به خط تعادل آب و یخ قرار می‌گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که خط برف‌مرز دایمی (روش رایت و پورتر) در ارتفاع ۲۱۰۰ تا ۲۲۰۰ متر واقع شده است؛ درحالی‌که خط تعادل آب و یخ تا ارتفاع حدود ۱۵۶۰ متری پایین می‌آمده است. این ارتفاعات با بیشتر پژوهش‌هایی که در ایران مرکزی دربارهٔ خطوط برف‌مرز و خط تعادل آب و یخ انجام گرفته است (مانند المدرسی و همکاران در سخوید یزد که ارتفاع برف‌مرز را ۳۲۲۰ متر و خط تعادل آب و یخ را ۲۳۵۰ متر برآورد کردند؛ یمانی و همکاران در کرکس که ارتفاع برف‌مرز را ۳۰۰۰ متر و خط تعادل آب و یخ را ۲۵۰۰ متر محاسبه کردند؛ و سیف و همکاران که ارتفاع برف‌مرز را ۲۸۳۶ متر و خط تعادل آب و یخ را ۲۱۰۹ متر برای محدودهٔ محوطهٔ ریگ برآورد کردند) تفاوت‌های چشمگیری را نشان می‌دهد.

باتوجه‌به این خطوط و برحسب افت آهنگ دما که مقدار ۰/۶۵ و ۰/۸ درجهٔ سانتی‌گراد به‌ازای هر ۱۰۰ متر ترفیع مکانی برآورد شد و نیز نقشه‌های هم‌دمای حال و گذشته، مقدار تفاوت دمای کنونی با گذشته در این منطقه به‌ترتیب معادل ۱۲/۹۲ و ۱۳/۴ درجه محاسبه شد. این مقدار تغییرات دمایی نیز تفاوت چشمگیری را با پژوهش‌های دیگر در ایران مرکزی نشان می‌دهد. برای نمونه، رامشت و همکاران در حوضهٔ تیگرانی دمای گذشته را ۸/۵ درجه سردتر برآورد کردند و در زفره کاهش ۹ درجه‌ای و در اقلید فارس کاهش ۱۰ درجه‌ای را تخمین زدند؛ مهرشاهی در حوضهٔ فخرآباد یزد به کاهش ۱۱ درجه‌ای دما در کواترنر رسید؛ رفیعی در ارتفاعات کهک این مقدار را ۹ درجه برآورد کرد؛ ابطحی در حوضهٔ دریاچهٔ نمک، این مقدار را ۵/۶ درجه؛ یمانی برای ارتفاعات کرکس ۱۲–۱۰ درجه و المدرسی ۸ درجه را برای سخوید یزد تخمین زدند. همچنین، بررسی‌ها دربارهٔ تغییرات بارش نشان داد که مقدار بارش در دورهٔ زمین‌شناسی گذشته، ۱۷۶/۵۲ میلی‌متر نسبت به میانگین امروزی بیشتر بوده است. البته مقدار این تغییرات برای همهٔ سطوح حوضه، یعنی ارتفاعات بالادست و پایین‌دست، یکسان نبوده است. بنابراین، با مقایسهٔ نتایج این پژوهش با پژوهش‌های دیگران، تفاوت‌های چشمگیری را می‌توان مشاهده کرد. برای نمونه، رامشت در حوضهٔ تیگرانی ماهان مقدار بارش گذشته را در حدود ۳۰۰ میلی‌متر، یعنی ۲/۵ برابر حال برآورد کرده و مهرشاهی بارش گذشته را در حوضهٔ فخرآباد بین ۱/۸ تا ۳ برابر تخمین زده است. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که خط تعادل آب و یخ در منطقهٔ پژوهش معادل خط هم‌دمای ۴/۸ درجهٔ سانتی‌گراد در گذشته بوده و در ارتفاع ۱۵۶۰ متری واقع شده است. این مرز نیز با نتایج پژوهش‌های دیگران تفاوت‌های عمده دارد؛ برای نمونه در اقلید فارس، رامشت و همکاران خط تعادل آب و یخ را در ارتفاع ۲۳۵۰ متری درنظر گرفته‌اند؛ رفیعی ارتفاع ۱۵۲۰ متر را برای ارتفاعات کهک لحاظ کرده است؛ المدرسی و همکاران در منطقهٔ سخوید یزد خط تعادل آب و یخ را ۲۳۵۰ متر برآورد کرده‌اند. به‌این ترتیب، مشاهده می‌شود که تفاوت‌های عمده‌ای بین این پژوهش با پژوهش‌های دیگران دربارهٔ ایران مرکزی وجود دارد که با فرض درستی روش، نقشه‌ها و داده‌های استفاده‌شده و دقت در اندازه‌گیری‌ها ممکن است به ویژگی‌های ارتفاعی و حجم زیاد شیرکوه –که سبب برف‌گیری زیاد در دامنه‌های آن می‌شده است– همچنین جهت دامنهٔ حوضهٔ پژوهش (غرب و شمال غرب شیرکوه) و تفاوت‌های سنگ‌شناسی نسبت داده شود. به‌علاوه، می‌توان احتمال داد که ویژگی‌های ارتفاعی شیرکوه، پرفشارهای حاکم بر ایران مرکزی را تشدید می‌کرده و درنتیجه، این محدوده دمای کمتری را متحمل می‌شده است.

منابع

Abtahi, S.M. (2013). "Studing of Paleoclimate of Jajroud Basin using glaciers evidences". Geographical Researches of desert regions. No. 1: 185-201.

_____ (2012). "The trend of changes in Playas of Salt Lake in the Late Quaternary and Holocene". Ph.D. Thesis. Supervisor Seif, A.. Isfahan University. Department of Geography.

Abtahi, S.M., Seif, A. and Khosroshahi, M. (2012). "Investigation of the Last Quaternary Climate from the Geomorphic Evidence in Namak Lake Basin, Central Iran". Journal of Geography and Regional Planning. Vol. 5. No. 3: 93-107.

Almodaresi, A. and Ramesht, M.H. (2005). "Traces of Glaciers of Shirkuh mountain in the Sakhvid Region". Geographic Space. No. 19: 2-31.

Almodaresi, A. (2005). "Hydrogeomorphology of Sakhvid Basin (Yazd Province)". M.S. Thesis. Supervisor Ramesht, M.H.. Najafabad Azad University. Department of Geography.

Afshari Azad, M. and Poursaba, A. (2009). "Studding of glaciers morphology and its spreading in the north Slopes of Sabalan mountain". Geography and regional development. No. 13: 284-300.

Amirahmadi. A. (2013). "Traces of glaciers in the Dehbala in the Shirkuh mountain and its role in the Development of Ecotourism". Growth Journal of Geography Education. Vol. 3: 41-43.

Bagheri Sadr, F. (2011). "Studding of Evidence of Glacier Morphologic in Lorestan in Quaternary". M.S. Thesis. Supervisor Seif, A.. Isfahan University. Department of Geography.

Baghaiynia, A. (2008). "Renovation of Climate Change in the Quaternary using hydrogeomorphology evidence in the Fakhrabad Basin". M.S Thesis. Supervisor Mehrshahi, D.. Yazd University. Department of Geography.

Farahbkhsh, Z. (2014). "Hydrogeomorphology of Khezrabad Basin with emphasis on glacier features". M.S. Thesis. Supervisor Sharifi, M.. Yazd University. Department of Geography.

Ghezeljeh, B. (2013). "Determine of boundary of preglaciers erosion and studding of its Geomorphological potential in the Gorganrood Basin". M.S. Thesis. Supervisor Amirahmadi, A.. Sabzevari University. Departement of Geography.

Hagedorn, H., Haars, W., Busche, D. and Grunert, j. (1978). "Some geomorphological observations from the Shir-kuh, mountains area.Geography". Journalof the Association of Iranin Geographers. Vol. 1: 10-15.

Mehrshahi, D. (1999). "Late Quaternary Environments, Ardakan Playa, Central Iran". Ph.D. thesis. Geography Department. Sheffield University. UK.

_____ (2010). "Finding of evidence of Glaciers activities in the mountain of Shirkuh". Roshd Geography Teaching. No. 14: 10-11.

Moayeri, M.; Ramesht, M.H., Taghvaiy, M. and Taghizadeh, M.M. (2008). "Glacier Traces in the basin of Safashar of Isfahan". Resaerch magazine of Isfahan University. 32. No. 4: 109-130.

Pedrami, M. (1991). "Geology of Quaternary and Paleoclimate of Arac Region (Mayghan Playa)". Internal report of Iran Geology Organization.

Pedrami, M, (1982). "Pleistocene Glaciation and Paleoclimate in Iran. Proceeding of the INQUA Conference". Geological Survey of Iran: 1-70.

Pourdehghan, D. and Ramesht, M.H. (2005). "Ice in fire, Glacier Traces in the Bam region". Geographical researches. No. 89: 130-143.

Ramsht, M.H. and Kazemi, M.H. (2002). "Traces of glacier in the Eghlid basin". growth Journal of Geography Education. Vol. 21. Closed. Issue. 4: 9. Tehran.

Ramesht, M.H., Lajevardi, M., Lashkari, H. and Mahmodi Mohamadabadi, T. (2012). "Tracing the effects of glaciers (Tygrani Basin MAHAN)". Geography and environment planning. No. 2 (42): 59˚78.

Ramesht, M.H. and Shoushtari, N. (2004). "Glacier Traces in the Salafchagan of Qom". Geographical researches. No. 73: 119-132.

Rahdanfard, M. (2012). "Studding of glaciers bounds in central Zagros in Late Quaternary". M.S. Thesis. Supervisor Seif, A.. Isfahan University. Department of Geography.

Rafiy, Gh.R. (2009). "Traces of Kahak Glacier". M.S. Thesis. Supervisor Ramesht, M. H.. Isfahan University. Department of Geography.

Seif, A; Servati, M. R. and Rahedanfard, M. (2015). "Renovation of Quaternary Snowline in the around of Rig Site". Geographical researches. 30. No. 1.

Sharifi, M. and Farahbakhsh, Z. (2015). "Studding of evidences of quaternary glaciers geoforms and changes in morphoclimatic and morphodynamic systems in Qezrabad basin". Geography and Environmental planning. accepted for publication.

Sharifi, M. and Farahbakhsh, Z. (2015). "The study and analysis of sediments of Qezrabad valley for knowing past morphodynamic processes". Geographical Researches of desert regions. Vol. 2. No.3.

Tahouni, P. (2004). "The role of outer dynamic processes in morphogenez Talesh's mountain". No. 47: 31-55.

Talebi, H.R. (2002). "Glacial evidence of the Zefreh". M.S Thesis. Supervisor Ramesht, M.H.. Azad University of Najafabad. Department of Geography.

Wright, H.E. Jr. (1961). "Pleistocene Glaciation in Kurdistan". Eiszeitalter und Gegenwart. 12: 31˚164.

Yamani, M. (2007). "The Geomorphological Traces of Glaciers Boundaries in Karkas Mountains". Human science Modares. 11. No. 1: 207-228.

Yamani, M., Shamsipour, A.A. and Jafari Aghdam, M. (2011). "Renovation of pleistocene snowline on Jajrorud Basin". Physical Geography research Quaternary 1. No 76: 35-50.

Yamani, M., Shamsipour, A.A. and Rahmati, M. (2014). "Determining of climate realms and morphogenetic processes in present and quaternary in the route of Khoramabad-Pole-Zal". Quantitative Geomorphological researches 3. No. 2: 90-103.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی