

بررسی تغییرات برف مرز در منطقه اشترانکوه از کوتاه‌ترین پسین تا کنون

علی احمد آبادی* - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی
محمد فتح اله زاده - کارشناس ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۴/۱۹

چکیده

یخچال‌های طبیعی جزء میراث طبیعی زمین محسوب می‌شوند که با پیشروی و عقب‌نشینی خود پاسخ‌های متناسبی به تغییرات اقلیمی کره زمین نشان می‌دهند به طوری که در چند دهه اخیر و با توجه به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو و به تبع آن گرمایش جهانی، ذوب یخچال‌های طبیعی افزایش یافته و از حجم آنها به میزان زیادی کاسته شده است. بررسی وضعیت یخچال‌های طبیعی به دلیل قرارگیری در پناه کوهستان‌های بلند با سختی و دشواری‌هایی روبروست از این رو مزایای کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور برای این مناطق به خوبی آشکار می‌شود. NDSI یا شاخص سطح نرمال شده پوشش برف معیاری برای تعیین سطوح برفی می‌باشد و مبنای تعیین این شاخص بازتابندگی بالای برف در ناحیه مرئی و بازتابندگی پایین در محدوده فروسرخ میانی می‌باشد. در این پژوهش جهت شناسایی و تعیین تغییرات برف مرز در اشترانکوه، ابتدا سیرک‌های یخچالی منطقه تعیین و موقعیت یابی شدند. پس از آن توسط مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از روش ارتفاع کف سیرک پورتر و روش رایت، حد برف مرز دائم در دوره کوتاه‌ترین پسین به ترتیب ۲۵۰۵ و ۲۵۴۹ متر تعیین شد. سپس به کمک تصاویر ماهواره ای لندست ۸، شاخص سطح نرمال شده پوشش برف محاسبه و سطوح برفی برای دو دامنه جنوب غربی و شمال شرقی برای ۴ سال پیاپی (سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶) تعیین و نهایتاً ارتفاع قرارگیری سطوح برفی در حال حاضر برابر ۳۳۴۶ متر برآورد شد. براین اساس ارتفاع قرارگیری سطوح برفی در حال حاضر نسبت به کوتاه‌ترین پسین افزایش ۸۴۱ متری با در نظر گرفتن روش ارتفاع کف سیرک پورتر و ۷۹۷ متری با در نظر گرفتن روش رایت نسبت به ارتفاع برف مرز در کوتاه‌ترین پسین را نشان می‌دهد که خود بیانگر افزایش میانگین دما در این منطقه نسبت به دوره کوتاه‌ترین پسین می‌باشد.

واژگان کلیدی: یخچال‌های طبیعی، اشترانکوه، برف مرز، NDSI.

مقدمه

یخچال‌ها، توده‌های بزرگی از یخ و برف می‌باشند که در مناطقی با آب و هوای سرد همراه با یخبندان تشکیل می‌شوند. در این مناطق ریزش برف بیش از مقدار ذوب و تبخیر آن است و بیلان تغذیه یخچالی مثبت می‌باشد. به طور کلی نحوه تشکیل یخچال‌های طبیعی به این صورت است که برف به صورت بلورهایی با شکل‌های گوناگون بر روی سطح زمین سقوط می‌کند و در مناطقی که از نظر شرایط محیطی و جوی مستعد تشکیل یخچال طبیعی هستند، انباشته شده و در اثر سه عامل مهم دمای محیط، تصعید و اثر فشار فزاینده دچار دگرگونی پیچیده شده و طی این فرآیند یخ یخچالی تشکیل می‌شود (وزیری، ۱۳۷۹). در اغلب مناطق، برف منبع اصلی تامین آب برای فعالیت‌های کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی و رشد و توسعه آنها می‌باشد. ذوب برف و یخ، رطوبت خاک و ذخیره آب زیر زمینی و منابع آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها را تامین کرده و رواناب حاصل از آن در حوضه‌های کوهستانی و مناطق مرتفع عامل مهم و کنترل‌کننده رژیم جریان محسوب می‌شود. این در حالی است که یخچال‌های طبیعی جزء پدیده‌هایی در سطح کره زمین محسوب می‌شوند که با پیشروی و عقب نشینی خود پاسخ‌های متناسبی به تغییرات اقلیمی کره زمین نشان می‌دهند به طوری که در چند دهه اخیر با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو و به تبع آن افزایش دمای کره زمین، یخچال‌های طبیعی عقب نشینی کرده و از حجم و سطح آنها به میزان زیادی کاسته شده است (پل اف کاب^۱، ۲۰۰۷). ذخایر برفی در بالادست کوه‌ها الگوی رواناب فصلی پایین دست را تحت تاثیر قرار می‌دهند، به خصوص در مناطق با فصل تابستان خشک که در آن رواناب حاصله از ذوب برف و یخچال یک منبع اساسی برای تامین آب می‌باشد (یانگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). بنابراین پایش مداوم وضعیت یخچال‌های طبیعی به علت ارتباطی که در تامین منابع آب دارند بسیار حائز اهمیت می‌باشد و بررسی وضعیت برف مرزهای یخچالی در مناطق مختلف یکی از روش‌های بررسی و پایش یخچال‌ها می‌باشد. مزایای مختلف داده‌های سنجش از دور، همچون امکان تهیه اطلاعات در مقیاس‌های مختلف جهانی، ملی و ناحیه‌ای، پوشش وسیع، مقرون به صرفه بودن، تولید اطلاعات چند زمانه و مواردی از این دست، کاربردهای گوناگونی را برای داده‌های سنجش از دور امکانپذیر ساخته است (حدادی و همکاران، ۱۳۸۸). از جمله این کاربردها تهیه نقشه‌های پوششی بخصوص نقشه پوشش برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور است. برای نخستین بار برف‌سنجی در سال ۱۹۶۰ در شرق کانادا توسط ماهواره تیروس^۳ انجام شد. پیشرفت‌های اخیر در فناوری و تعدد ماهواره‌ها، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای را در بررسی پوشش برف امری حیاتی ساخته است (سرگی^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). سطوح برفی دارای تغییرات زیادی نسبت به زمان می‌باشند، در نتیجه پایش آنها نیازمند استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا می‌باشد. بکارگیری نسبت بازتابندگی باند مرئی به فرورسرخ نزدیک، برای شناسایی سطوح برفی در سال ۱۹۶۰ توسط کایل و همکاران مورد استفاده قرار گرفت. این نسبت توسط سازمان فضایی ایالت متحده برای داده‌های سنجنده مودیس^۵ و به نام شاخص پوشش برفی معرفی گردید. به طور کلی این تکنیک اساس شناسایی برف و همچنین یخ در تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد (ایلدرومی و همکاران، ۱۳۹۴). در مطالعات متعددی جهت سنجش سطح برف از تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است و از آن جمله می‌توان به مائور و همکاران اشاره کرد که مساحت پوشش برفی تولید شده از تصاویر سنجنده مودیس را با مساحت پوشش برفی تولید شده از تصاویر سنجنده نورسک^۶ در شرایط بدون ابر مقایسه نمودند و دریافتند دقت سنجنده مودیس

¹. Paul. F. Kääb

². Yang

³. TIROS - 1

⁴. Sirguey

⁵. MODIS

⁶. NOHRSC

بالتر از سنجدۀ نورسک می باشد (مورر^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین بلاش و پاراژک به بررسی ارزش داده های سنجدۀ مودیس در کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل های هیدرولوژیکی نیمه توزیعی بر مبنای مقایسه غیرمستقیم آب معادل برف شبیه سازی شده به وسیله مدل و داده های پوشش برفی این سنجده پرداخته اند. این آنالیز برای ۱۴۸ حوضه در استرالیا با استفاده از تصاویر سنجدۀ مودیس و ماهواره های ترا^۲ و آکوا^۳ صورت گرفت که نتایج نشان داد، داده های تصاویر سنجدۀ مودیس کارایی مدل های ذوب برف را بهبود می بخشد (بلاچ^۴ و همکاران، ۲۰۰۸). سالومونسون و اپل در مقاله خود به برآورد نقشه های سطح پوشش برف در حد زیر پیکسل از تصاویر ۲۵ سنجدۀ مودیس به کمک شاخص سطح نرمال شده پوشش برف پرداختند. این پژوهشگران کار خود را در سه منطقه مختلف شامل آلاسکا، سیبری و کانادا انجام دادند. آنها ابتدا تصاویر با رزولیشن ۵۰۰ متر این سنجده را مبنا قرار دادند و به کمک شاخص سطح نرمال شده پوشش برف نقشه های سطوح پوشیده شده از برف را استخراج کردند، سپس به کمک تصاویر سنجده ETM+ لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر که به عنوان نقشه واقعیت زمینی در نظر گرفته شده بود درصد پوشش برف در شبکه های ۵۰۰ متری را تعیین کردند و پس از آن یک رابطه رگرسیونی بین مشاهدات NDSI، سنجدۀ مودیس و درصد پوشش برف برقرار کردند. نتایج نشان داد میانگین خطای مطلق این روش کمتر از ۰/۱ می باشد. در انتها چنین نتیجه گرفتند که رابطه مذکور قابلیت بسط و توسعه در مقیاس جهانی را دارد (سالومونسون^۵ و همکاران، ۲۰۰۴). در مطالعه ای که توسط گومز و همکاران صورت گرفت دو روش برای تهیه نقشه های سطوح برفی شامل روش ترکیب خطی باندهای مادون قرمز و نور مرئی طیف الکترومغناطیس بر پایه الگوریتم NDSI و NDVI^۶ مورد مقایسه قرار گرفت (گومز^۷ و همکاران، ۲۰۰۱). در پژوهشی دیگر قدیمی (۱۳۹۴) در رساله دکتری خود با استفاده از تصاویر سنجدۀ مودیس به محاسبه ارتفاع برف مرزهای موقت منطقه اشترانکوه در چهار ماه ژانویه، فوریه، آوریل و مارس، در یک بازه ۱۰ ساله در جهات شمال، جنوب، شرق و غرب پرداخت.

در این پژوهش جهت شناسایی و بررسی تغییرات برف مرز در اشترانکوه از کواترنر پسین تا به امروز، ابتدا سیرک های یخچالی منطقه تعیین و موقعیت یابی می شوند سپس با استفاده از روش ارتفاع کف سیرک پورتر و روش رایت، حد برف مرز دائم در دوره کواترنر پسین تعیین می شود. پس از آن به کمک تصاویر ماهواره ای لندست ۸، شاخص سطح نرمال شده پوشش برف محاسبه و سطوح برفی برای دو دامنه جنوب غربی و شمال شرقی در روزهای حداکثری ذوب سالیانه برف در منطقه تعیین، و نهایتاً ارتفاع قرارگیری سطوح برفی در حال حاضر مشخص می شود.

منطقه مورد مطالعه

اشترانکوه به معنی کوه آب در پارسی باستان نام رشته کوهی در شرق استان لرستان و یکی از بلندترین رشته کوه های زاگرس می باشد. منطقه مطالعاتی مورد نظر در حد فاصل ۳۳ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است و وسعتی حدود ۳۱۶ کیلومتر مربع را در بر دارد. بلندترین قله آن سن بران با ارتفاعی حدود ۴۰۸۱ متر می باشد که در شمال غربی این رشته کوه و مشرف بر دریاچه گهر قرار گرفته است. اشترانکوه از نظر موقعیت سیاسی در استان لرستان و از غرب به شهرستان دورود، از جنوب و شرق به

1. Maurer

2. Terra

3. Aqua

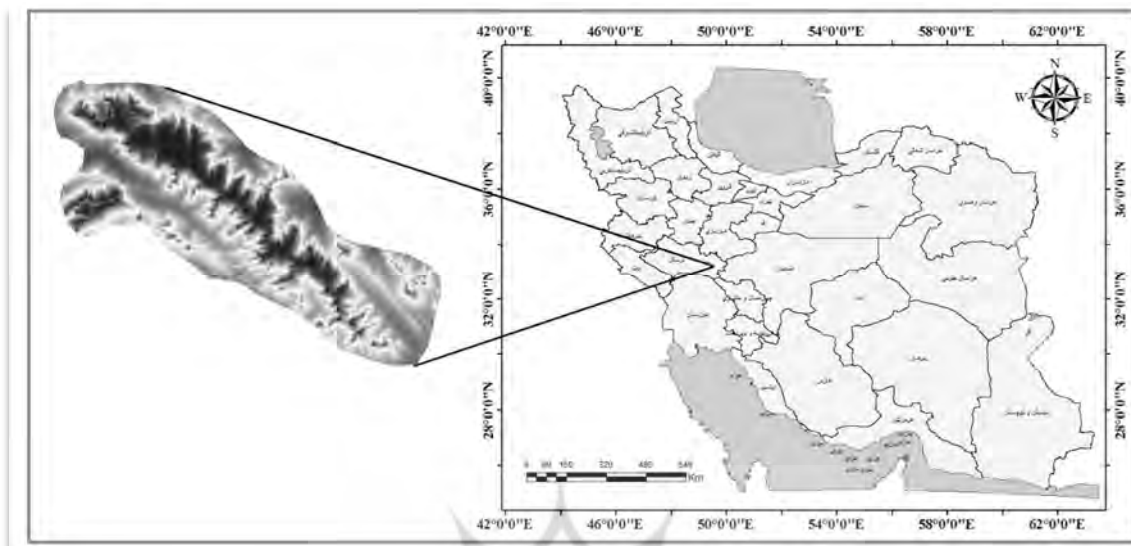
4. Bloch

5. Salomonson

6. Normalized Difference Vegetation Index

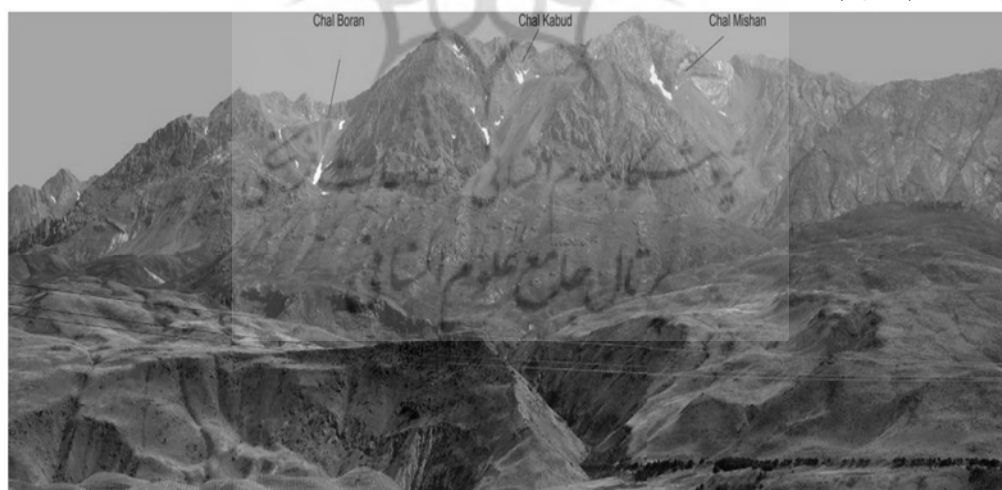
7. Gomes

شهرستان الیگودرز و از شمال به شهرستان ازنا منتهی می شود. اشترانکوه در امتداد زاگرس روانده و بلندترین قله زاگرس که از شاهو در کردستان تا دنا در فارس کشیده شده اند قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

وجود قله پشت سر هم و ممتد که همگی به ردیف و مانند کاروانی از شتر قرار گرفته اند موجب شده این رشته کوه به شترکوه یا اشترانکوه معروف شود. قله اشترانکوه به صورت قوس هایی هستند که به علت آنکه اکثر بارش های منطقه در زمستان و به صورت برف می باشد، در منتهی الیه هر قوس آن برفچال ها و یخچال های بزرگی در حد فاصل دو قله شکل گرفته است (شکل ۲).



شکل ۲: نمایی از سبک های اشترانکوه

اقلیم منطقه اشترانکوه

بدلیل موقعیت کوهستانی منطقه معمولاً دماهای پایین در این منطقه تسلط دارد بطوریکه حداکثر مطلق دمای سالانه در ارتفاع متوسط منطقه برابر ۳۶/۹ درجه سانتی گراد و متوسط حداکثر دمای سالانه در ارتفاع متوسط منطقه برابر ۷/۹ درجه سانتی گراد است. همچنین میانگین متوسط حداقل دمای سالانه در ارتفاع متوسط منطقه برابر ۰/۳- درجه سانتی گراد و حداقل مطلق دمای سالانه در ارتفاع متوسط منطقه برابر ۳۲/۱- درجه سانتی گراد است.

متوسط بارش سالانه منطقه ۷۴۴/۶ میلی متر و دامنه تغییرات بارش سالیانه ۷۰۰ تا ۸۵۰ میلی متر می باشد. از این میزان بارش ۷۲/۳ درصد در شش ماهه اول سال آبی و بخصوص در اسفند ماه رخ می دهد. رژیم بارندگی این محدوده شبیه به منطقه مدیترانه است. حداکثر مطلق بارش ماهیانه به ترتیب برای ایستگاه‌های الیگودرز، ازنا و دورود است که معمولاً در آبان ماه یا گاهی در اسفند ماه می بارد. حدود ۳۷/۶ درصد ریزش‌های جوی سالانه این منطقه بصورت برف است. طبق آمار حداکثر بارش منطقه در بالاترین ارتفاعات منطقه، یعنی قله گل گل و سن بران به میزان ۸۵۰ میلی متر اتفاق می افتد.

در منطقه اشترانکوه میزان متوسط تبخیر سالانه از سطح آزاد آب ۱۱۹۱/۱ میلی متر برآورد شده است. حداقل تبخیر در مرتفع ترین قسمت‌های کوهستان و منطبق بر منحنی هم تبخیر ۶۰۰ میلی متر است. این میزان در ارتفاعات حداقل منطقه به ۱۴۰۰ میلی متر نیز می رسد. معمولاً یخبندان برای ارتفاعات متوسط منطقه از اوایل آبان ماه آغاز و تا اواسط فروردین ماه ادامه می یابد. تعداد روزهای یخبندان منطقه اشترانکوه در سال حدود ۱۳۵ روز و تعداد ساعات آفتابی و ابرناکی سالانه براساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک الیگودرز به ترتیب ۳۱۷۳ ساعت در سال و برابر ۲ اکتاو می باشد (قدیمی، ۱۳۹۴).

پیشینه تحقیق در منطقه اشترانکوه

پس از بویک و دزیو محققان زیادی از جمله رایب 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؛ همچنین رایب در جنوب غرب ازنا در اشترانکوه، سیرک‌های یخچالی جبهه شمالی را در ۳۰۰۰ متر و یخرفت‌ها را در دره‌های کوچک تا ارتفاع ۲۶۰۰ متری مشاهده کرد (رامشت و همکاران، ۱۳۸۰). اما اشخاص دیگری بوده اند که پیش از آن در مورد وجود سیرک‌های یخچالی این منطقه اظهار نظر کرده اند، در این میان ژاک دومرگان در توصیف وضع طبیعی لرستان از سیرک یخچال قدیمی اشترانکوه در ارتفاع ۳۸۰۰ متری و سیرک دیگری در قالیکوه در ارتفاع ۲۴۴۰ متر سخن گفته است (جداری عیوضی، ۱۳۷۲). درویش زاده (۱۳۷۴) به شکل گیری دریاچه یخچالی گهر در دامنه جنوبی اشترانکوه اشاره کرده و عامل تشکیل آن را زمین لغزش می داند. احمدی (۱۳۸۵) در بررسی سازندهای دوره کواترنر به بررسی و تعیین وسعت سیرک‌های یخچالی در دامنه‌های شمالی اشترانکوه پرداخته و از ۱۰ یخچال و ۵ برفچال نام می برد. یاراحمدی (۱۳۹۱) در رساله خود به تحلیل عوامل مؤثر بر شکل گیری مورفولوژی یخچالی کواترنر در اشترانکوه پرداخته است. قدیمی (۱۳۹۴) در رساله دکتری خود ارتباط بین لیتوژئومورفولوژی، کارستی شدن و شبکه‌های سطحی در منطقه آهکی اشترانکوه بررسی کرد. سیف (۲۰۱۵) در مقاله‌ای به بررسی و تعیین ارتفاع خط تعادل آب و یخ سیرک‌های یخچالی منطقه اشترانکوه در دوره کواترنر پرداخته است. احمد آبادی و فتح الله زاده (۱۳۹۴) به بازسازی شرایط دمایی اشترانکوه در کواترنر پسین پرداختند.

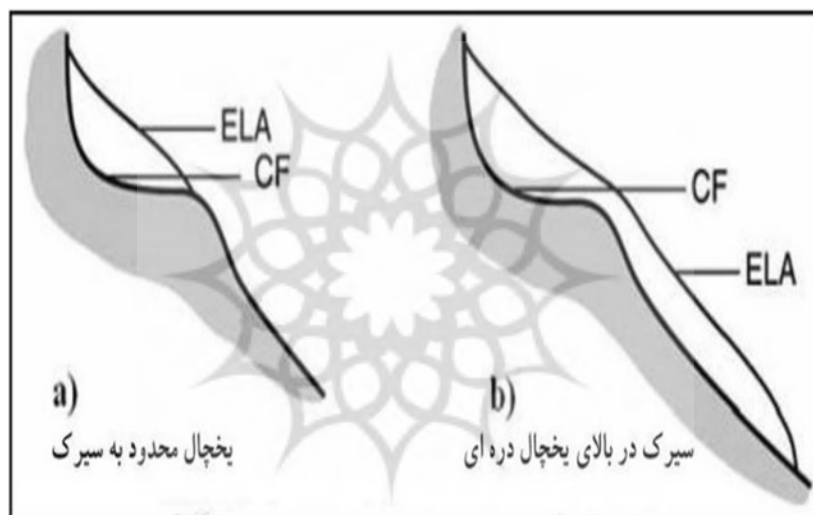
روش کار

برای تعیین و بررسی میزان تغییرات برف مرز در منطقه اشترانکوه ابتدا ارتفاع برف مرز منطقه را در کواترنر پسین تعیین می کنیم. برای اینکار لازم است سیرک‌های یخچالی منطقه به عنوان بارزترین لندفرم‌های یخچالی تعیین و مشخص شوند به همین دلیل ابتدا سیرک‌های یخچالی منطقه اشترانکوه مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ منطقه و مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر، تعداد ۳۳ سیرک یخچالی تعیین و موقعیت یابی شد. سپس با توجه به امتداد اشترانکوه در جهت شمال غربی - جنوب شرقی، سیرک‌ها به دو دسته سیرک‌های دامنه شمال شرقی که شامل ۱۸ سیرک و سیرک‌های دامنه جنوب غربی که مشتمل بر ۱۵ سیرک است تقسیم بندی شدند. تفاوت این دو دامنه در میزان شدت تابش و مدت تابش دریافتی است.

سیرک های دامنه جنوب غربی به دلیل دریافت تابش خورشیدی چه از نظر مدت و چه از نظر شدت بر دامنه شمال شرقی برتری دارند و همین امر موجب افزایش ذوب یخچالی در فصول گرم طوری که در اواخر تابستان اثری از برفچال و یخچال ها بر جای نمی ماند می شود. پس از تعیین وضعیت سیرک های منطقه، توسط مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از روش ارتفاع کف سیرک پورتر و روش راییت، حد برف مرز دائم در دوره کواترنر پسین تعیین و مشخص شد (جدول ۳ و ۴).

تعیین برف مرز های اشترانکوه با استفاده از روش ارتفاع کف سیرک پورتر در کواترنر پسین

روش ارتفاع کف سیرک یکی از پنج روشی است که پورتر در مطالعه کوهستان های یخچالی برای عرض های پایین جهت بازسازی ارتفاع خط تعادل ارائه داده است. از میان روش های پنجگانه پورتر، روش مطالعه کف سیرک برای سیرک هایی مناسب است که به مرحله بلوغ از نظر توسعه یافتگی رسیده باشند، زیرا براساس نظر پورتر، هنگامی که یخچالی فقط سیرک را پر می کند، (ELA^۱) دائمی آن خیلی بالاتر از میانگین ارتفاع کف سیرک (CF^۲) نیست و با توجه به توسعه یافتگی سیرک ها یخچالی منطقه اشترانکوه در طول زمان می توان از این روش برای این منطقه استفاده کرد (شکل ۳).



شکل ۳: سیرک هایی که در روش ارتفاع کف سیرک پورتر مورد استفاده قرار می گیرند

بنابراین روش ارتفاع کف سیرک برای تعیین ارتفاع خط های تعادل آب و برف نیز به کار می رود (پورتر، ۲۰۰۱). برای مقایسه ارتفاع متوسط سیرک های یخچالی و ارتفاعی که سیرک ها بیشترین فراوانی را در آن دارند، باید میانگین حسابی و مد (نما) ارتفاع کف هر یک سیرک ها مشخص شوند (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰). در این روش برف مرز دائمی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و سیرک های استخراج شده در هر دامنه و با تعیین ارتفاع کف هر یک از سیرک ها به صورت جدول (۱) تعیین و مشخص شد. پس از تعیین ارتفاع کف هر یک از سیرک ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه نما یا مد، صورت می پذیرد:

$$1) Mo = L + \left(\frac{d1}{d1+d2} \right) \times h$$

L: حد پایین رده نمادار.

d1: تفاضل فراوانی رده ماقبل رده نمادار، از فراوانی رده نمادار.

d2: تفاضل فراوانی رده مابعد رده نمادار، از فراوانی رده نمادار.

h: فاصله رده ها.

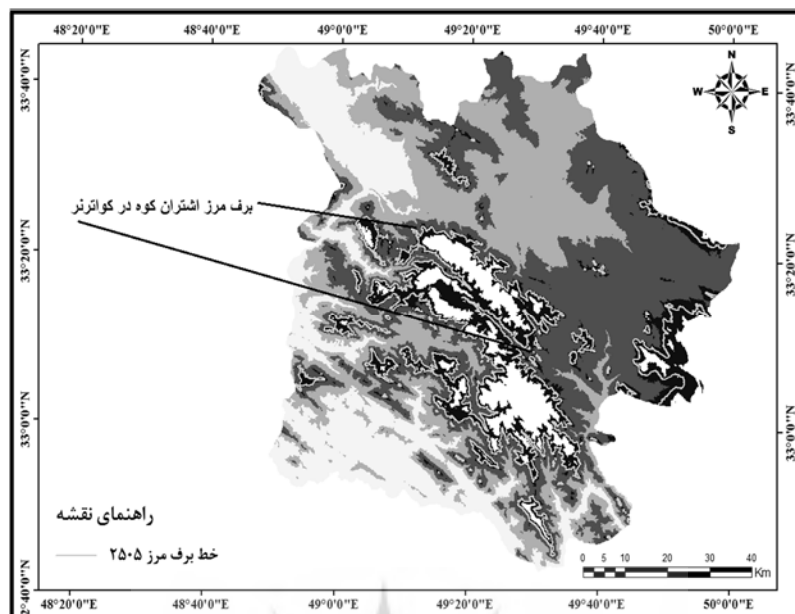
^۱. Equilibrium Line Altitude.

^۲. Cirque floor.

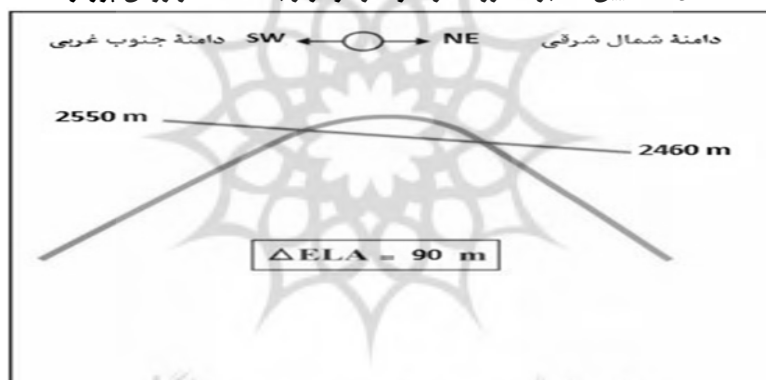
جدول ۱: توزیع فراوانی ارتفاع کف سیرک های یخچالی در اشترانکوه

طبقات ارتفاعی	فراوانی سیرک	دامنه جنوب غربی	دامنه شمال شرقی	درصد
۲۱۰۰-۲۲۰۰	۲	۱	۱	۶/۰۶
۲۲۰۰-۲۳۰۰	۲	-	۲	۶/۰۶
۲۳۰۰-۲۴۰۰	-	-	-	-
۲۴۰۰-۲۵۰۰	۲	-	۲	۶/۰۶
۲۵۰۰-۲۶۰۰	۹	۴	۵	۲۷/۲۷
۲۶۰۰-۲۷۰۰	۸	۵	۳	۲۴/۲۴
۲۷۰۰-۲۸۰۰	۴	۴	-	۱۲/۱۲
۲۸۰۰-۲۹۰۰	۲	۱	۱	۶/۰۶
۲۹۰۰-۳۰۰۰	۳	-	۳	۹/۰۹
۳۰۰۰-۳۱۰۰	-	-	-	-
۳۱۰۰-۳۲۰۰	-	-	-	-
۳۲۰۰-۳۳۰۰	۱	-	۱	۳/۰۳
جمع	۳۳	۱۵	۱۸	۱۰۰
میانگین ارتفاع (M)	-	۲۶۲۱	۲۶۲۶	۲۶۲۳
نما (M)	-	۲۵۵۰	۲۴۶۰	۲۵۰۵
سیرک های دامنه شمال شرقی (M)	مقدار نما		۲۴۶۰	
سیرک های دامنه جنوب غربی (M)	مقدار نما		۲۵۵۰	
ΔELA	اختلاف در دو دامنه		۹۰	

همانطور که در جدول (۱) مشخص است مقدار مد ارتفاع کف سیرک ها در منطقه اشترانکوه ۲۵۰۵ متر است که این ارتفاع بیانگر برف مرز منطقه در آخرین دوره یخچالی (کواترنر) می باشد (شکل ۴). همچنین ارتفاع برف مرز برای سیرک های دامنه شمال شرقی با استفاده از روش پورتر ۲۴۶۰ و برای سیرک های دامنه جنوب غربی ۲۵۵۰ محاسبه شد که اختلاف ارتفاع برف مرز برای دو دامنه ۹۰ متر می باشد (شکل ۵).



شکل ۴: تعیین حد برف مرز اشترانکوه در کوتاه‌ترین با استفاده از روش پورتر



شکل ۵: اختلاف برف مرز و خط تعادل در دو دامنه براساس مقدار نما ارتفاع کف سیرک‌ها

تعیین برف مرز های دائم اشترانکوه با استفاده از روش رایت

روش رایت یکی از ابتدایی ترین و ساده ترین روش های تعیین خط برف مرز دائمی در مناطق کوهستانی و یخچالی است که با اتکا بر شمارش سیرک های کوچک و محاسبه ارتفاع مدخل خروجی آنها استوار است. در این روش با در نظر گرفتن این فرض که مدخل خروجی سیرک ها دارای دمای متوسط حداقل صفر درجه سانتی گراد هستند و با محاسبه آهنگ افت دما، دمای مناطق مختلف در دوره حاکمیت یخچالی تعیین می شود (رامشت و پوردهقان، ۱۳۸۷). طبق روش رایت خط ۶۰ درصد سیرک های هر منطقه، برف مرز دائمی در دوران کوتاه‌ترین برای آن منطقه در نظر گرفته می شود. برای تعیین خط برف مرز منطقه اشترانکوه در کوتاه‌ترین پسین با استفاده از روش رایت پس از تعیین محدوده سیرک های منطقه و مشخص کردن ارتفاع بالاترین و پایین ترین سیرک (جدول ۲) از روی مدل رقومی ارتفاعی، خط برف مرز دائم به صورت زیر تعیین و مشخص سپس نتایج بدست آمده از آن با روش ارتفاع کف سیرک پورتر مقایسه شد (جدول ۳):

جدول ۲: تعیین حد پایین و بالای ارتفاع سیرک های منطقه اشترانکوه

وضعیت سیرک	ارتفاع سیرک	جهت قرار گیری سیرک
پایین ترین سیرک	۲۱۰۶	دامنه جنوب غربی
بالا ترین سیرک	۳۲۱۴	دامنه شمال شرقی

$(\text{ارتفاع پایین ترین سیرک} - \text{ارتفاع بالاترین سیرک}) \times 0/60 = \text{ارتفاع خط برف مرز دائم}$

$$= 3214 - ((2106 - 3214) \times 0/60)$$

متر ۲۵۴۹ = ارتفاع خط برف مرز دائم با استفاده از روش رایت

جدول ۳: مقایسه برف مرز های محاسبه شده با استفاده از روش کف سیرک پورتر و رایت

۴۴ متر	اختلاف ارتفاع در دو روش
۲۵۰۵ متر	ارتفاع خط برف مرز دائم در کواترنر با استفاده از روش کف سیرک پورتر
۲۵۴۹ متر	ارتفاع خط برف مرز دائم در کواترنر با استفاده از روش رایت

تعیین ارتفاع سطوح برفی اشترانکوه با استفاده از NDSI

NDSI یا شاخص سطح نرمال شده پوشش برف معیاری برای تعیین سطوح ارتفاعی دارای برف و یکی از تکنیک های سنجش دور برای بررسی وضعیت مناطق کوهستانی و برفگیر می باشد. مبنای تعیین این شاخص تصاویر ماهواره ای و با توجه به میزان بازتابش نور و گرما از سطح پوشیده از برف است که با در نظر گرفتن مشکلات دستیابی و صعب العبور بودن مناطق کوهستانی برای شناسایی سطوح پوشیده شده از برف همچنین تعیین دقیق مساحت برف روش مناسب و نوینی به شمار می رود. NDSI به عنوان یک الگوریتم استخراج اتوماتیک برف به همراه مجموعه ای از آستانه ها به کار می رود و به صورت پیکسل به پیکسل محاسبه می گردد. این شاخص بر مبنای این حقیقت که برف دارای بازتابندگی بالا در ناحیه مرئی و بازتابندگی پایین در محدوده فروسرخ میانی می باشد، جهت تشخیص برف از ابر و مناطق فاقد برف استفاده می شود (نولین^۱ و همکاران، ۲۰۰۰). NDSI به گستره شرایط نوردهی غیرحساس بوده و نسبت به تاثیرات اتمسفری قابل تنظیم می باشد. به بیان دیگر این شاخص فقط به مقادیر بازتابش در یک باند بستگی ندارد، بلکه به میزان ارزش رقومی بازتابش پیکسل ها نیز وابسته است (رسولی و ادهمی، ۱۳۸۶). برای محاسبه مقدار NDSI ابتدا تصاویر لندست ۸ مربوط به اواخر ماه جولای (اواسط شهریورماه) سال های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ (بعثت داشتن گپ در تصاویر لندست ۷ مربوط به این منطقه در سالهای قبل از ۲۰۱۳ این داده ها قابل استفاده نمی باشند همچنین تصاویر مربوط به لندست ۵ نیز در ماه جولای سالهای قبل از ۲۰۱۳ در دسترس نمی باشد لذا تنها از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ در ۴ سال متوالی استفاده شد) منطقه مورد نظر تهیه و در محیط نرم افزار ERDAS EMAGINE ترکیب باند های تصاویر انجام شد. علت این انتخاب به حداکثر رسیدن ذوب برف و یخ در این موقع از سال و قبل از شروع بارش های پاییزی در منطقه جهت محاسبه دقیق سطوح برفی دائمی می باشد. پس از آن با استفاده از فرمول (۲) مقدار NDSI برای هر تصویر تعیین و در محیط نرم افزار ARC GIS مورد پردازش قرار گرفت و در نهایت پولیگون های مربوط به سطح پوشیده از برف و مساحت مربوط به هر یک از آنها تعیین شد:

۱. Nolin.

$$2) \quad NDSI = \frac{(OLI3 - OLI6)}{(OLI3 + OLI6)}$$

$NDSI$: شاخص سطح نرمال شده پوشش برف

$OLI3$: باند ۳ تصویر لندست ۸

$OLI6$: باند ۶ تصویر لندست ۸

پس از محاسبه $NDSI$ با در نظر گرفتن سطوح ارتفاعی بالاتر از ۳۰۰۰ متر به کمک مدل رقومی ارتفاعی، تصحیح خطاهای ناشی از بازتابش سطوح شبه برف انجام و در نهایت مساحت پوشیده از برف و یخ منطقه اشترانکوه برای هر سال تعیین شد. در پایان با تعیین ارتفاع متوسط سطوح پوشیده از برف در هر یک از دامنه های جنوب غربی و شمال شرقی، ارتفاع سطوح برفی برای هر سال تعیین و مشخص شد (جدول ۴ و ۵).

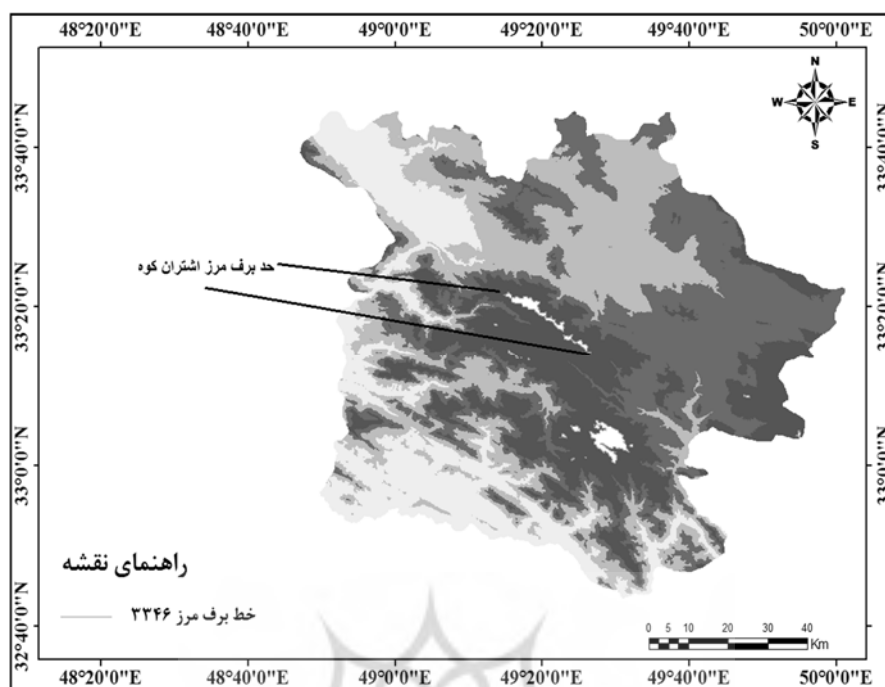
جدول ۴: محاسبه ارتفاع سطوح برفی دامنه جنوب غربی اشترانکوه با استفاده از $NDSI$

سال	کمترین ارتفاع	بیشترین ارتفاع	میانگین ارتفاع سطوح برفی
۲۰۱۳	۲۹۸۹	۳۸۸۱	۳۳۹۳ متر
۲۰۱۴	۲۹۲۷	۳۹۰۰	۳۳۹۸ متر
۲۰۱۵	۳۰۱۶	۳۹۵۶	۳۴۸۷ متر
۲۰۱۶	۲۸۴۳	۳۹۵۶	۳۴۴۹ متر
میانگین ارتفاع سطوح برفی ۴ ساله			۳۴۳۱ متر

جدول ۵: محاسبه ارتفاع سطوح برفی دامنه شمال شرقی اشترانکوه با استفاده از $NDSI$

سال	کمترین ارتفاع	بیشترین ارتفاع	میانگین ارتفاع سطوح برفی
۲۰۱۳	۲۹۷۸	۳۸۰۲	۳۳۳۷ متر
۲۰۱۴	۲۹۲۷	۳۷۹۹	۳۲۱۴ متر
۲۰۱۵	۲۹۸۱	۳۹۸۷	۳۳۴۹ متر
۲۰۱۶	۲۹۷۹	۳۹۸۸	۳۲۵۱ متر
میانگین ارتفاع سطوح برفی ۴ ساله			۳۲۶۲ متر

با توجه به داده های بدست آمده از جدول های ۴ و ۵ اختلاف ارتفاع سطوح برفی میانگین ۴ ساله در دو دامنه شمال شرقی و جنوب غربی ۱۶۹ متر و میانگین ارتفاع سطوح برفی در حال حاضر برای اشترانکوه ۳۳۴۶ متر تعیین شد (شکل ۶). نکته ای که می توان در جداول ارتفاع سطوح برفی اشترانکوه به وضوح مشاهده کرد، نوسانات قابل توجه ارتفاع سطوح برفی از سالی به سال دیگر است که علت آنرا می توان در شدت گرفتن نوسانات بارش و دما در منطقه در چند سال اخیر دانست.



شکل ۶: تعیین حد برف مرز کنونی اشترانکوه با استفاده از (NDSI)

نتیجه گیری

یخچال‌های طبیعی جزء میراث طبیعی زمین محسوب می‌شوند که با پیشروی و عقب نشینی خود پاسخ‌های متناسبی به تغییرات محیطی و اقلیمی کره زمین نشان می‌دهند بنابراین پایش مداوم وضعیت یخچال‌های طبیعی از حیث حساسیت آنها به گرمایش جهانی و همچنین به علت جایگاهی که در تأمین منابع آب مناطق پایین دست دارند بسیار حائز اهمیت می‌باشد و بررسی وضعیت و موقعیت برف مرزهای یخچالی در بخش‌های مختلف یکی از روش‌های موثر بررسی و پایش یخچال‌ها است. مزایای مختلف داده‌های سنجش از دور، همچون امکان تهیه اطلاعات در مقیاس‌های مختلف جهانی، ملی و ناحیه‌ای، پوشش وسیع، مقرون به صرفه بودن، تولید اطلاعات چند زمانه و مواردی از این دست، کاربردهای مختلفی را برای داده‌های سنجش از دور امکان‌پذیر ساخته است. در این پژوهش جهت شناسایی و تعیین تغییرات برف مرز اشترانکوه، ابتدا تعداد ۳۳ سیرک‌های یخچالی منطقه اشترانکوه با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ منطقه و مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر منطقه، تعیین و موقعیت یابی شدند. سپس با توجه به امتداد اشترانکوه در جهت شمال غربی - جنوب شرقی، سیرک‌ها به دو دسته سیرک‌های دامنه شمال شرقی که شامل ۱۸ سیرک و سیرک‌های دامنه جنوب غربی که مشتمل بر ۱۵ سیرک است تقسیم بندی شدند. تفاوت این دو دامنه در میزان شدت تابش و مدت تابش دریافتی است. سیرک‌های دامنه جنوب غربی به دلیل دریافت تابش خورشیدی چه از نظر مدت و چه از نظر شدت بر دامنه شمال شرقی برتری دارد و همین امر موجب افزایش ذوب یخچالی در فصول گرم طوری که در اواخر تابستان سطوح برفچال و یخچال‌ها به شدت کاهش می‌یابد. پس از تعیین وضعیت سیرک‌های منطقه توسط مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از روش ارتفاع کف سیرک پورتر و روش راییت، حد برف مرز دائم در دوره کوتاه‌تر پسین به ترتیب ۲۵۰۵ و ۲۵۴۹ متر تعیین شد (جدول ۱ و ۲). سپس با استفاده از شاخص سطح نرمال شده پوشش برف (NDSI) ارتفاع سطوح برفی برای دو دامنه جنوب غربی و شمال شرقی برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ محاسبه و نهایتاً ارتفاع سطوح برفی در حال حاضر برابر ۳۳۴۶ متر تعیین شد. براین اساس ارتفاع سطوح برف در حال حاضر نسبت به کوتاه‌تر پسین افزایش ۸۴۱ متری با در نظر گرفتن روش ارتفاع کف سیرک پورتر و ۷۹۷ متری با در نظر گرفتن روش راییت نسبت به ارتفاع برف مرز در کوتاه‌تر پسین را

نشان می دهد که خود بیانگیر افزایش میانگین دما در این منطقه نسبت به دوره کوتاهتر می باشد. نتیجه این افزایش دما، به وجود آمدن تغییرات هیدرولوژیکی منطقه نسبت به گذشته در نتیجه تغییر در نوع بارش از برف به باران و همچنین کاهش دوره یخبندان سالیانه در منطقه است که خود موجب شده نیروهای شکل دهنده چشم انداز منطقه از یخچالی به رواناب در ارتفاعات مذکور تغییر کنند که شواهد این امر در لندفرم ها و رسوبات موجود در منطقه قابل مشاهده است. با توجه به نتایج تحقیق و استناد به سایر تحقیقاتی که در داخل و خارج کشور انجام شده به نظر می رسد استفاده از داده های سنجش از دور و به طور مشخص نسبت های باندی که از این داده ها استخراج می شود علاوه بر زمینه کاربردی شناخته شده مانند استخراج تراکم پوشش گیاهی، خاک، آب و... بواسطه شاخص هایی از قبیل NDSI در زمینه مطالعات یخچال های حال حاضر کشور نیز به صورت کاملاً کاربردی امکان پذیر باشد و پایش مستمر تغییرات یخچالها در واکنش به گرمایش جهانی را میسر نماید.

منابع

- احمدآبادی، علی و فتح الله زاده، محمد، ۱۳۹۴، بازسازی شرایط دمایی اشترانکوه در کوتاهتر پشین، مجموعه مقالات دومین همایش ملی انجمن کوتاهتری ایران، اصفهان.
- احمدی، حسن؛ فیض نیا، سادات، ۱۳۸۵، سازندهای دوره کوتاهتر، مبانی نظری و کاربردی آن در منابع طبیعی، انتشارات دانشگاه تهران، صص ۳۲۴-۳۳۶.
- ایلدرمی، علیرضا و همکاران، ۱۳۹۴، استفاده از تصاویر ماهواره ای MODIS و NDSI به منظور تهیه نقشه پوشش برف، مطالعه موردی حوضه آبخیز بهار، فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، سال پانزدهم، شماره ۵۰، تابستان ۹۴، صص ۱۴۰-۱۲۵.
- جداری عیوضی، جمشید، ۱۳۷۲، ژئومورفولوژی ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، صص ۱۵-۳۱.
- حدادی، عطا الله؛ صاحبی، محمدرضا؛ مختارزاده، مهدی؛ فتاحی، هیرش، ۱۳۸۸، ارائه روشی ترکیبی از شبکه های عصبی نظارت شده و نظارت نشده در طبقه بندی تصاویر سنجش از دور، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۳، صص ۵۰-۳۳.
- درویش زاده، علی، ۱۳۷۴، زمین شناسی ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، صص ۱۱۲-۱۱۶.
- رامشت، محمدحسین، ۱۳۸۰، دریاچه های دوران چهارم بستر تبلور و گسترش مدنیت در ایران، نشریه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۶، شماره ۱، صص ۹۰-۱۱۱.
- رامشت، محمدحسین؛ پوردهقان، داوود، ۱۳۸۷، یخ در آتش، آثار یخچالی در منطقه بم، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۸۹، صص ۱۲۹-۱۴۴.
- رسولی، علی اکبر؛ ادهمی، سلام، ۱۳۸۶، محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجنده MODIS، نشریه جغرافیا و توسعه، شماره ۱۰، صص ۳۶-۲۳.
- قدیمی، مهنوش، ۱۳۹۴، ارتباط بین لیتوژئومورفولوژی، کارستی شدن و شبکه های سطحی در منطقه آهکی اشترانکوه، رساله دکتری ژئومورفولوژی و مدیریت محیطی، استاد راهنما ابراهیم مقیمی، دانشگاه تهران.
- وزیری، فریبرز، ۱۳۷۹، هیدرولوژی کاربردی در ایران، جلد دوم، شناخت آب های سطحی در ایران، شناسایی مقدماتی یخچال های طبیعی، صص ۳۵-۳۹.
- یاراحمدی، علی محمد، ۱۳۹۱، تحلیل مؤثر در شکل گیری مورفولوژی یخچالی کوتاهتر در اشترانکوه، رساله دکتری ژئومورفولوژی و مدیریت محیطی، استاد راهنما ابراهیم مقیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- یمانی، مجتبی؛ شمسی پور، علی اکبر؛ جعفری اقدم، مریم، ۱۳۹۰، بازسازی برف مرزهای پلیستوسن در حوضه های جاجرود، پژوهش های جغرافیایی، شماره ۷۶، صص ۳۵-۵۰.

- *Blosch, G., Parajka, J., 2008, The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models, Journal of Hydrology, pp. 240-258.*
- *Desio, A., 1934. Sull'esistenza di piccoli ghiacciai nella Persia occidentale (Concerning the existence of small glaciers in western Persia), Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano, Volume 14, pp. 39-52.*
- *Gomes, E., Rango, A., Hall, DK., 2001, Improved snows cover Remote Sensing for snow melt Run off for ecasting, Proceeding Symposium of Remote Sensing and Hydrology, Sanata, Fe, New Mexico. USA. IAHS Public, 267, pp. 61-65.*
- *Maurer, E., Rhoads, J., Dubayah, R., Lattenmeier, D., 2003, Evaluation of the snow covered area data product from MODIS, Hydrology. Processes., 17, pp. 59-71.*
- *Nolin, A., liang, S., 2000, Progress in bidirectional reflectance modeling and application for surface particulate media: snow and soil, Remote Sensing Review., 14, pp. 307-342.*
- *Paul. F. Kääb, A& Haeberli, W., 2007, Recent glacier changes in the Alps observed by satellite 6, Consequences for future monitoring strategies, Global and Planetary Change, 56, pp. 111-122.*
- *Porter, Stephen C., 2001, Snowline depression in the tropics during the last glaciation, Quaternary Science Reviews 20, pp. 1067-1091.*
- *Salomonson, V., Apple, V., 2004, Estimating Fractional Snow Cover from MODIS using the Normalized Difference Snow Index, Remote Sensing of Environment, 89, pp. 351-360.*
- *Seif A., E. B., 2015. Combined use of GIS and experimental functions for the morphometric study of glacial cirques, Zardkuh Mountain, Iran, Quaternary International, pp. 1-14.*
- *Sirguey, P., Mathieu, R., Arnaud, Y., 2009, Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250~m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand, methodology and accuracy assessment, Remote Sensing of Environment, 113, pp. 160-181.*
- *Yang, D.B., 2005, The Urumqi River source Glacier No. 1, Tianshan, China, changes over the past 45 years, Geophysical Research Letters, 32: L21504. Doi: 10.1029/2005GL024178.*