

ارزیابی رابطه میان دمای سطح زمین و نسبت سطح برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کسلیان)

حامد محمودی^۱، مهدی پژوهش^{۲*}، خدایار عبدالهی^۲، افشین هنربخش^۳

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲. استادیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۵/۱۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۹/۱۲)

چکیده

دمای سطح زمین بر میزان تغییرات مکانی و زمانی برف پشته‌ها به عنوان یکی از اجزای مهم بیلان آبی اثر می‌گذارد... به‌رغم سهولت دسترسی به داده‌های سنجش از دور، نظیر محصولات ماهواره مودیس در پایش و ارزیابی اثر دمای سطح زمین بر مساحت پوشش برفی گاهی به دلایلی سری پیوسته آن موجود نیست. به منظور غلبه بر این محدودیت، با استفاده از روابط رگرسیونی، ارتباط دمای سطح زمین و گستره پوشش سطح برف در هر ۸ روز و به صورت میانگین ماهانه طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد حداقل و حداکثر میانگین سالانه درصد پوشش سطح برف در حوضه کسلیان به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ برابر با ۵/۸۶ و ۲۰/۳۲ درصد و همچنین، میزان میانگین سالانه دمای حداقل و حداکثر سطح زمین در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹ برابر با ۱۷/۶۵ و ۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد است. بررسی الگوی تغییرات دو متغیر طی دوره مطالعاتی نشان داد تغییرات سطح پوشش برف نسبت به دمای سطح زمین به صورت معکوس و به تدریج در حال افزایش است. همچنین، نتایج نشان داد در رگرسیون توانی، مقادیر NSE برای شبیه‌سازی میزان درصد پوشش سطوح برفی، R^2 ، RMSE و Bias به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۶۴، ۹/۸۸ و ۲/۱۴- است. این ضرایب در رگرسیون خطی به ترتیب برابر با ۰/۱۶، ۰/۴۷، ۱۴/۳۷ و ۸۶/۳۲ به دست آمد. بنابراین، مطالعه حاضر می‌تواند برای برآورد پوشش سطح برف و بازسازی نواقص آماری موجود در تصاویر ماهواره‌ای مؤثر باشد.

کلیدواژگان: ذوب برف، شبیه‌سازی، گرادیان دمایی، ماهواره مودیس، مقیاس مکانی و زمانی.

مقدمه

برف پشته‌ها، یکی از اجزای مهم ذخایر آبی هستند که تعیین تغییرات مکانی و زمانی آنها در حوضه‌های کوهستانی بسیار مورد توجه است [۱ و ۲]. نقش مشخصات برف و محدوده تحت پوشش آن در درک سیستم جوی بسیار مهم است، زیرا واکنش سطوح پوشیده از برف و یخ نسبت به عوامل تأثیرگذار بر سیستم جوی، میزان حساسیت برف پشته‌ها را نشان می‌دهد [۳]. در خصوص اهمیت برف در زندگی انسان، همین بس که در بیشتر مناطق دنیا، پوشش برف و ذوب شدن آن بر وضعیت هیدرولوژیکی منطقه تأثیر می‌گذارد. حدود ۲۰ درصد از جمعیت موجود روی این کره خاکی در تأمین منابع آبی خود، نیازمند آب استحصال شده از منابع برف و یخچال‌ها هستند که مردم ساکن در این مناطق حدود ۲۵ درصد از تولید ناخالص داخلی جهان را تولید می‌کنند [۴]. در این زمینه، حدود ۶۰ درصد از آب‌های سطحی و ۵۷ درصد از آب‌های زیرزمینی ایران در مناطق برفگیر قرار دارند [۵]. در خصوص عوامل متعددی که بر مساحت و عمق برف پشته‌ها تأثیر می‌گذارند، عامل دمای هوا و به تبع آن، تغییرات مکانی و زمانی دمای سطح زمین^۱ [۶ و ۷] در نگهداشت و یا تولید رواناب حاصل از ذوب برف و برآورد میزان آب حاصل مورد توجه قرار می‌گیرد [۸]. از آنجا که مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات دمایی در ابعاد وسیع به‌صورت میدانی و با وسایل اندازه‌گیری موجود در ایستگاه‌های هواشناسی امکان‌پذیر نیست و داده‌های دمایی ثبت‌شده به‌صورت نقطه‌ای هستند، قادر به محاسبه بهینه و مناسب تغییرات مکانی و زمانی دما در سطح یک حوضه آبخیز نیستند. این امر به‌ویژه در مناطقی که پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی به‌صورت پراکنده و با طول دوره آماری متفاوت است، بسیار اهمیت دارد [۹-۱۱]. از این‌رو، استفاده از دمای سطح زمین و تغییرات مکانی و زمانی آن در برآورد تغییرات سطح برف می‌تواند مؤثر باشد. از دمای سطح زمین در پایش و مدل‌سازی برف پشته‌ها و یخبندان، در مطالعات محیطی مربوط به ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها [۱۲]، برآورد دمای هوا و تبخیر و تعرق [۱۳ و ۱۴] و نیز مدل‌سازی و پایش جزایر حرارتی شهرها [۱۵] استفاده می‌شود. بنابراین،

مطالعه و ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی این شاخص و تأثیر آن بر عوامل محیطی نیز اهمیت دارد. این امر به‌خصوص در مورد نواحی کوهستانی که در قرن بیستم نسبت افزایش دمایی آنها در مقایسه با میانگین جهانی بیشتر بود، چشم‌گیرتر است [۱۶]. تغییرات موجود در برهم‌کنش عوامل محیطی در مناطق کوهستانی نتیجه الگوهای پیچیده مکانی و زمانی دمای سطح زمین با گرادیان دمایی در فاصله‌های اندک است [۱۷ و ۱۸]. این الگوها و گرادیان‌ها نیز اغلب بر اثر تغییرات شدید توپوگرافی حاصل می‌شوند که با پوشش برفی و زمینی ناهمگن و شرایط هواشناسی برهم‌کنش دارند [۱۹]. به دلیل اینکه شرایط جوی مناسب برای ریزش برف نیازمند دمای پایین و رطوبت کافی است و این شرایط در مناطق کوهستانی تحقق می‌یابد، از این‌رو مطالعه و بررسی برف پشته‌ها به‌صورت مستقیم و با استفاده از روش‌های زمینی بسیار هزینه‌بر و دشوار خواهد بود [۲۰]. از این‌رو، مطالعات برف و ویژگی‌های مربوط به آن و بررسی تغییرات مکانی و زمانی برف پشته‌ها و دمای سطح زمین و شناسایی روابط بین آنها، نیازمند ابزارهای مناسب و جامع است. بنابراین، امروزه در روند مدیریت بهینه منابع آبی، استفاده از داده‌های سنجش از دور برای کسب اطلاعات دقیق و پایش برف پشته‌ها و عوامل مؤثر بر تغییرات آن و به دلیل ارائه نتایج بهتر، به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر بیلان آبی در مطالعات منابع آبی در یک حوضه آبخیز به‌صورت عملیاتی انجام می‌شود [۲۰]. فناوری سنجش از دور و استفاده از داده‌های حاصل از ماهواره‌های مختلفی که در اتمسفر قرار داده شده‌اند، به این منظور مفید خواهد بود. نصب سنجنده مودیس روی فضاپیما Terra تحول جدیدی را در زمینه دقت مکانی و زمانی تولید نقشه‌های پوشش سطح برف^۲ به وجود آورده است [۲۱-۲۳] و این امر موجب تنوع در تصاویر ماهواره‌ای مرتبط با برف و گستره تحت پوشش آن و انجام مقایسه‌های مختلف بین توانایی و کیفیت محصولات سنجش از دور در برآورد سطوح برفی شده است [۲۴-۲۶]. علت انتخاب محصولات برف و به طور کلی، داده‌های حاصل از ماهواره مودیس، به علت توانایی این محصولات در پایش مداوم سطوح برفگیر، دوره بازگشت کوتاه [۲۷] پوشش مکانی و زمانی مناسب [۲۸-۳۲] است.

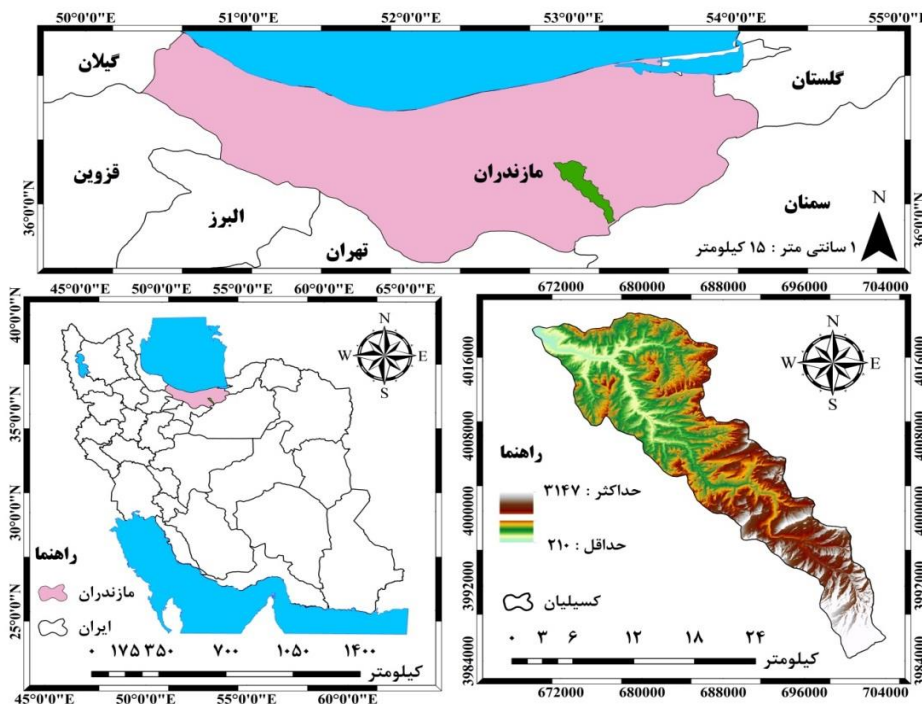
درجه و ۱ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. مساحت حوضه آبخیز کسلیان ۳۴۳ کیلومتر مربع و میانگین ارتفاع آن ۹۸۵ متر از سطح دریا و شیب متوسط آن، ۳۵ درصد است. ارتفاع حداکثر و حداقل حوضه آبخیز کسلیان به ترتیب، ۳۱۴۷ متر و ۲۱۰ متر و ارتفاع متوسط آن ۹۸۵ متر از سطح دریا است. این حوضه از لحاظ طبقه‌بندی اقلیمی توسط شاخص طبقه‌بندی دومارتن و آمبرژه به صورت نیمه‌مرطوب است. علاوه بر این، میانگین دمای سالانه در نواحی کم‌ارتفاع ۱۸ و در بخش مرتفع آن ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. از لحاظ کاربری اراضی نیز، بخش اعظم آن از جنگل‌های معتدل خزری به میزان ۸۲/۲ درصد، مرتع به میزان ۱۴ درصد و باقی آن به میزان ۲/۴ درصد به صورت مسکونی و ۱/۴ درصد اراضی کشاورزی تشکیل شده است [۳۴]. مناطق مرتفع و برفگیر در جنوب حوضه قرار دارند و به علت نقش مهم نسبت سطح برف در بیلان آبی و تأثیر دمای سطح زمین بر فرایند ذوب برف، می‌توانند بر تغییرات مکانی و زمانی فرایند تولید و شبیه‌سازی رواناب و رسوب معلق در سراسر حوضه آبخیز کسلیان تأثیر بگذارند [۳۴].

در بیشتر کاربردهای عملی نیاز به یک سری زمانی کامل از پوشش برفی است؛ در حالی که در مواردی به دلایلی مانند تأثیر ابر، مشکل ارتباطی با گیرنده‌ها، خطای فنی و... این پیوستگی از بین می‌رود. تا کنون تحقیقات اندکی روی تغییرات مکانی و زمانی سطوح برفی و ارتباط آن با دمای سطح زمین [۳۳ و ۳۴] انجام شده است که روش مورد استفاده آنها با تحقیق حاضر متفاوت است و فقط به بیان رابطه میان دمای سطح زمین و سطح پوشش برف پرداخته‌اند. اما در مطالعه حاضر، به عنوان یک راه‌حل ساده، با استفاده از محصولات سنجنده مودیس، ارتباط رگرسیونی میان سطح پوشش برف و دمای سطح زمین [۳۳] از ابتدای سال ۱۳۸۲ تا پایان ۱۳۹۴ برای پیش‌بینی سطوح برفی با استفاده از مقادیر دما محاسبه شد و مزیت این تحقیق، شبیه‌سازی پوشش سطح برف و امکان پیش‌بینی میزان هر دو متغیر هنگام عدم پوشش محصولات مودیس است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز کسلیان بخشی از حوضه آبریز تالار است که در شمال شهر شیرگاه واقع در استان مازندران و جنوب دریاچه خزر قرار دارد. این حوضه در طول جغرافیایی ۵۳



شکل ۱. منطقه مطالعه شده، حوضه آبخیز کسلیان در استان مازندران

روش انجام تحقیق

جمع‌آوری اطلاعات

به‌منظور بررسی ارتباط بین گستره پوشش سطح برف و دمای سطح زمین در حوضه آبخیز کسپلیان مبنای کار بر محصولات سنجش از دور قرار داده شد. به این منظور، محصولات رستری سنجنده مودیس شامل پوشش سطح برف (MOD10A2) و دمای سطح زمین (MOD11A2) از سایت <https://modis.gsfc.nasa.gov> برای سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ تهیه شد و مطابق توضیحات ارائه‌شده در زیر بخش‌های بعدی آماده‌سازی و استخراج اطلاعات از آنها انجام شد.

آماده‌سازی و استخراج داده‌ها

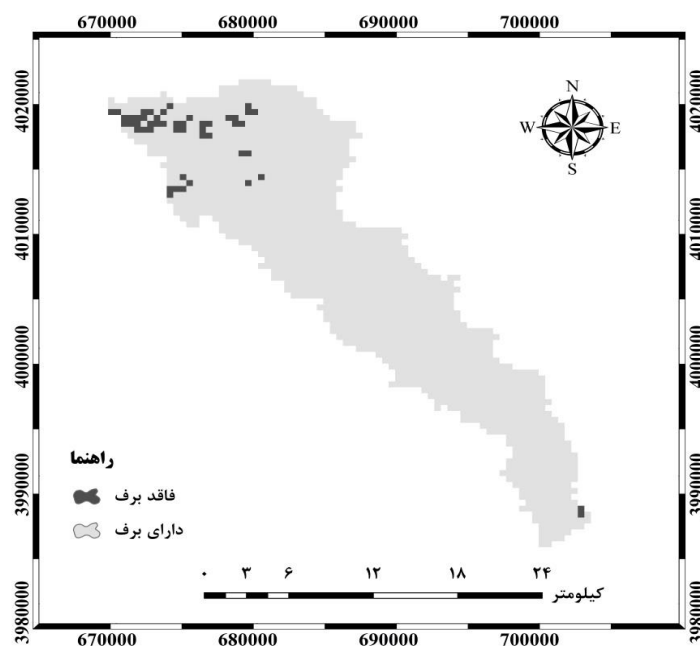
محصول پوشش سطح برف (MOD10A2)

تصاویر محصول برف ماهواره مودیس با ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ کیلومتر و سیستم مختصات سینوسی تشکیل شده است. اطلاعات رستری ثبت‌شده در این محصول نشان‌دهنده حداکثر مساحت سطح برف با مقیاس زمانی ۸ روز و قدرت تفکیک مکانی ۴۶۳/۳ متر است که از محصول روزانه سطح برف ماهواره مودیس (MOD10A1) در دوره زمانی مشابه به‌دست می‌آید. علت استفاده از حداکثر مساحت پوشیده از برف به دلیل به حداقل رساندن اثر پوشش ابر در تشخیص سطوح برفی و غیربرفی است [۳۶].

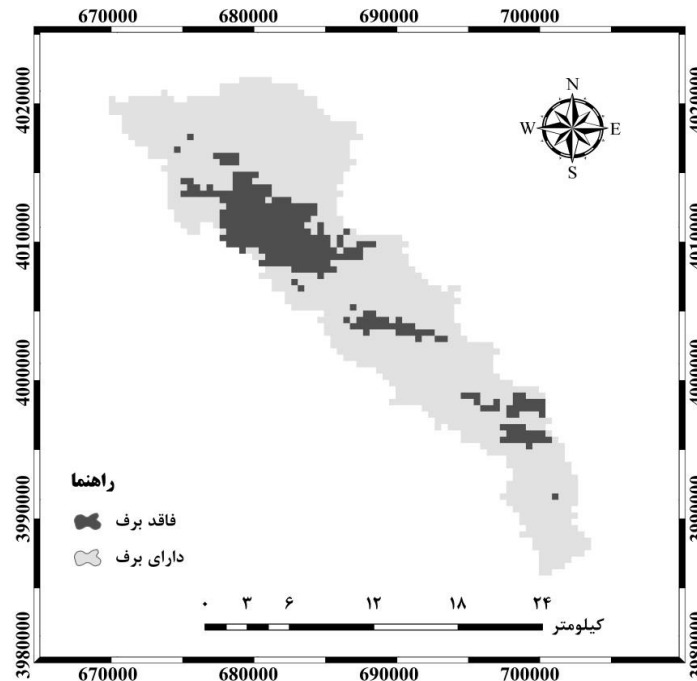
بعد از جمع‌آوری داده‌های حاصل، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی ArcGIS 10.6 و ابزار مدل‌ساز موجود در این نرم‌افزار (Model Builder)، مرز تمام لایه‌های رستری برف موجود با مقیاس زمانی ۸ روز طی دوره ۱۳ سال با توجه به محدوده حوضه آبخیز جداسازی شد. از آنجا که در محصول برف مودیس، پیکسل‌هایی که ارزش آنها برابر با ۲۰۰ است، نشان‌دهنده برف است، با برقرار کردن این شرط در محاسبات، محدوده سطوح برفگیر از کل مساحت حوضه آبخیز مورد نظر جدا شد؛ به این صورت که نقشه رستری حاصل، سطح منطقه مورد نظر را به ۲ بخش برف و غیر برف تقسیم می‌کند (شکل‌های ۲ و ۳). در ادامه، مقادیر کمی حاصل از تصاویر رستری سطح برف به نرم‌افزار اکسل وارد شده و مقادیر میانگین مربوط به سطح برف در هر ماه برای کل دوره مطالعه شده محاسبه شد. در انتها با استفاده از رابطه ۱، میزان درصد نسبت سطح برف محاسبه شد که در زیر نشان داده شده است [۳۷].

$$SCA = \frac{A_{SL}}{A_T} * 100 \quad (1)$$

در این رابطه، SCA: نسبت سطح پوشش برف در حوضه برحسب درصد A_{SL} : مساحت تحت پوشش برف یا بالاتر از خط برف و A_T : ب مساحت کل حوضه آبخیز است.



شکل ۲. نمونه تصویری از میزان پوشش سطح برف در حوضه آبخیز کسپلیان مورخ ۱۳۸۴/۱۰/۲۷



شکل ۳. نمونه تصویری از میزان پوشش سطح برف در حوضه آبخیز کسلیان در ۱۳۹۲/۱۱/۱۳

رستری دمای سطح زمین با مقیاس زمانی ۸ روز محاسبه شده و آماده ورود به نرم‌افزار اکسل شد. بعد از این مرحله، براساس تعداد محصول موجود در هر ماه، مقادیر میانگین ماهانه دمای سطح زمین محاسبه شد.

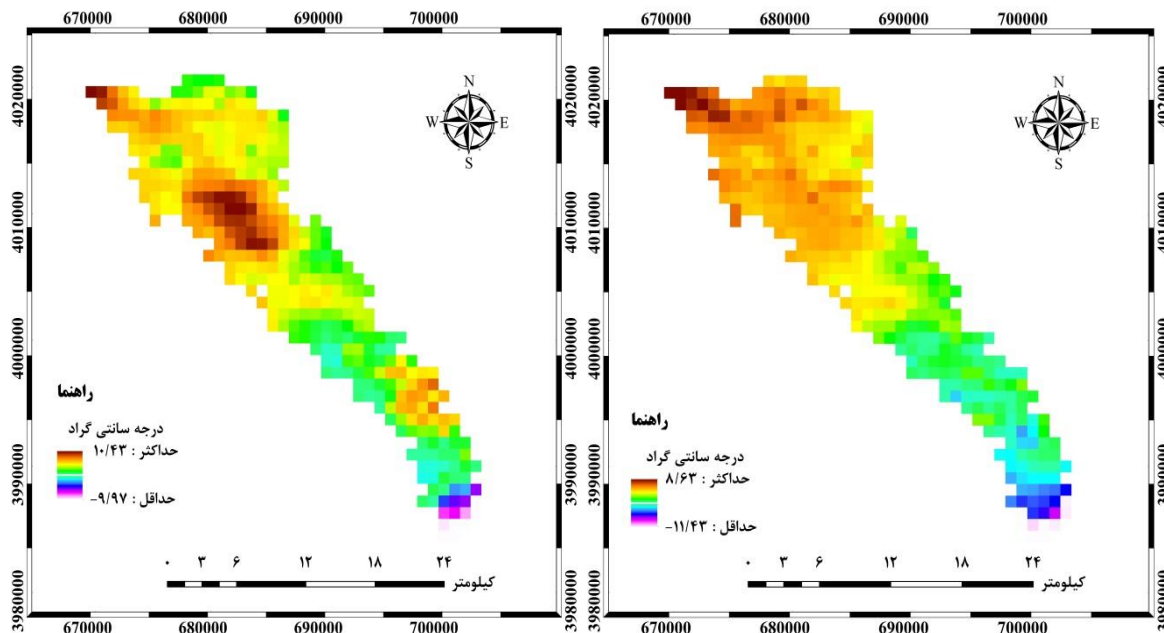
برآورد سطح برف با استفاده از دمای سطح زمین

دمای متوسط حوضه، عامل مؤثری بر ذوب سطح پوشش برفی است [۱۹]. به منظور بررسی ارتباط و اثرگذاری دمای سطح زمین بر تغییرات سطح برف، نمودار درصد پوشش سطح برف در مقابل دمای سطح زمین ترسیم شد. از آنجا که درصد پوشش سطح برف به میزان دمای سطح زمین وابسته است، این وابستگی می‌تواند به شکل مدل جعبه‌سیاه آماری توصیف شود. در نتیجه، با جای‌گذاری مقادیر دما به عنوان متغیر مستقل، مقادیر درصد سطح برف محاسباتی به عنوان متغیر وابسته به دست آمد. هر مدل آماری دارای پارامترهایی است که برای منطقه مورد نظر باید بهینه شود. بنابراین، برای افزایش میزان ضریب نش‌ساتکلیف (معادله ۲) پارامترهای مدل آماری، ضرایب رگرسیونی در معادلات توانی و خطی بهینه شدند. در نهایت، با رسم مقادیر نسبت سطح برف محاسباتی و مشاهداتی در مقابل یکدیگر و برازش آنها با هم و در نظر گرفتن ضریب نش، معادله رگرسیونی مناسب بین این دو

محصول دمای سطح زمین (MOD11A2)

این محصول از ماهواره مودیس نیز مشخصاتی مانند سیستم مختصات سینوسی دارد و ابعاد هر تصویر آن ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ کیلومتر است. از لحاظ تغییرات مکانی و زمانی، دارای مقیاس زمانی ۸ روز و قدرت تفکیک مکانی ۹۲۶/۶۲ متر است. هر ارزش دمایی ثبت‌شده در پیکسل‌های این محصول که از آدرس <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006/> دانلود شد، میانگین ساده‌ای از مقادیر محصول روزانه (MOD11A1) دمای سطح زمین برحسب کلون است [۳۸]. بعد از جمع‌آوری داده‌های حاصل، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.6 و ابزار مدل بیلدر، مرز تمام لایه‌های رستری دمای سطح زمین طی دوره ۱۳ ساله با توجه به محدوده حوضه آبخیز تعیین شد. برای آماده‌سازی این محصول، ابتدا هر یک از لایه‌های دمای سطح زمین در ضریبی معروف به عامل مقیاس (SF¹) برابر با ۰/۰۲ ضرب شدند و برای تبدیل به درجه سانتی‌گراد، عدد ۲۷۳/۱۵ از آنها کسر شد. نقشه حاصل به صورت یک شبکه رستری از دمای سطح زمین برحسب درجه سانتی‌گراد به دست آمد (شکل ۴). در ادامه، مقدار میانگین برای هر محصول

1. Scale Factor



شکل ۴. تصاویر انتخابی از دمای سطح زمین برحسب درجه سانتی‌گراد در حوضه آبخیز کسلیان در زمان‌های ۱۳۸۴/۱۰/۲۷ سمت راست تصویر و ۱۳۹۲/۱۱/۱۳ در سمت چپ تصویر

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{si} - S_{oi}}{\sum_{i=1}^N S_{oi}} * 100 \quad (5)$$

که در این روابط S_{oi} : میزان میانگین مساحت مشاهداتی حاصل از سطح برف در هر ماه که از تصاویر مودیس به‌دست آمده است، S_{si} : میزان مساحت محاسبه‌شده از رابطه رگرسیونی میان دمای سطح زمین و سطح برف مشاهداتی در زمان i : تعداد کل داده‌ها و \bar{S}_{oi} : میزان میانگین داده‌های مشاهداتی سطح برف طی دوره آماری ۱۳ سال است.

نتایج و بحث

تحلیل رابطه دمای سطح زمین و نسبت سطح برف

به‌طور کلی، عامل دما می‌تواند به‌عنوان یک شاخص پویا برای پیش‌بینی میزان خطا و دقت برآورد مکانی و زمانی محصولات پوشش سطح برف ماهواره مودیس در شرایط مختلف مکانی و زمانی باشد [۴۰]. با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت با افزایش دمای سطح زمین طی روزهای سال از میزان درصد سطح برف کاسته می‌شود. با توجه به پراکنش نقاط روی شکل ۵ می‌توان دریافت که از دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد به بالا تا حداکثر دمای میانگین ماهانه نشان‌داده‌شده از سطح زمین که حدود ۳۱ درجه است، تراکم و میزان دقت در

عامل به‌دست آمد. معادلات رگرسیونی با توجه به میزان دقت و کارایی خود در بهترین وضعیت ممکن، سطح برف را محاسبه کردند.

ارزیابی دقت رابطه برآورد سطح برف

در تحقیق حاضر از دو نوع رابطه خطی و توانی برای استخراج سطوح برفی از رگرسیون حاصل از دمای سطح زمین و درصد پوشش برف استفاده شد. به‌منظور برآورد میزان دقت رابطه سطح برف و دمای سطح زمین در شبیه‌سازی سطوح پوشیده از برف از معادلات ۲ تا ۵، ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R^2) میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نسبی (Bias) استفاده شد [۳۹ و ۴۰].

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (S_{oi} - S_{si})^2}{\sum_i (S_{oi} - \bar{S}_{oi})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{si} - \bar{S}_{si})(S_{oi} - \bar{S}_{oi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_{si} - \bar{S}_{si})(S_{oi} - \bar{S}_{oi})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_{oi} - S_{si})^2}{N}} \quad (4)$$

برآورد رابطه میان دمای سطح زمین و درصد پوشش برف بسیار بیشتر از دماهای کمتر از آن است. در محدوده یادشده تغییرات دمای سطح زمین و درصد سطح پوشش برف به حد ثابتی نزدیک به ۱۰ تا ۱۱ درصد می‌رسد؛ اما هنگامی که دمای سطح زمین از این آستانه دمایی یعنی حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد به سمت مقادیر دمایی کمتر کاهش می‌یابد، یک تغییر ناگهانی و صعودی شدید در میزان درصد سطح پوشش برف مشاهده می‌شود که در کمترین میانگین دمای ماهانه سطح زمین به میزان ۶ درجه سانتی‌گراد، میزان سطح پوشش برف حدود ۸۵ درصد از سطح حوضه آبخیز کسلیان را شامل می‌شود. یادآوری این نکته ضروری است که وقوع درصد سطح پوشش برف به میزانی بیشتر از حداکثر درصد مساحت نمایش داده شده یعنی ۸۵ درصد نیز محتمل است. این حالت زمانی رخ داده است که وقوع ریزش برف در سراسر حوضه آبخیز انجام شده باشد و دمای هوا و به تبع آن، دمای سطح زمین [۴۱ و ۴۲] نیز به مقادیر کمتر از حداقل دمای نمایش داده شده در شکل ۵ برسد. نکته مهمی که در فناوری سنجش از دور به‌رغم تمامی مزایای آن مطرح است، موضوعاتی همچون مقیاس استفاده شده، طول دوره اطلاعات موجود و هزینه دسترسی و سهولت استفاده از تصاویر و محصولات ماهواره‌ای است. به‌طور مثال، ماهواره لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بهتر از ماهواره مودیس است، اما مقیاس زمانی آن ۱۶ روز و نیازمند تصحیحات لازم است [۴۳] اما از طرفی، قدرت تفکیک محصولات ماهواره مودیس در بهترین حالت ۲۵۰ متر است، ولی در عوض، مقیاس زمانی آن در حد هر روز یک‌بار هم موجود است و نیازی به تصحیحات مورد نیاز قبل از استفاده ندارد [۴۴]. با توجه به موارد یادشده در تحقیق حاضر، مقیاس مکانی و زمانی استفاده شده در تصاویر مودیس به صورت میانگین ماهانه تنظیم شده است که متأثر از این فرض، مقیاس زمانی تغییرات لحظه‌ای سطوح پوشش برف و دمای سطح زمین را نادیده می‌گیرد. شکل ۵ مقادیر میانگین دمای سطح زمین و درصد سطح پوشش برف را به صورت میانگین ماهانه و میانگین سالانه طی دوره ۱۳ ساله نشان داده است. با توجه به فیزیک مسئله و رابطه معکوس دما با سطح برف در توضیح این شکل می‌توان گفت که تغییرات دمای سطح زمین و پوشش سطح برف در هر ماه و حتی هر سال تا حد زیادی از یک الگوی معکوس پیروی می‌کند؛ به‌طوری که طی فصل

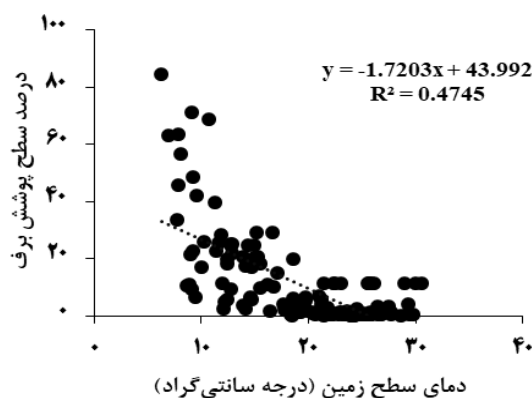
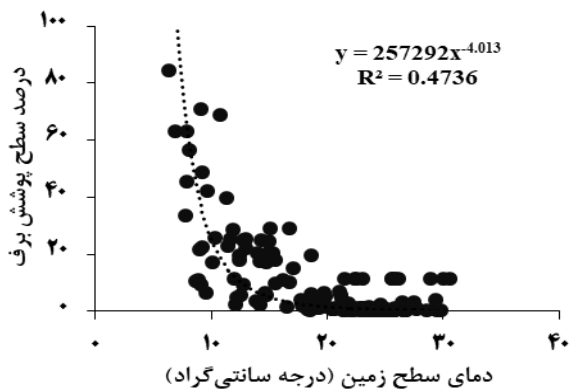
تابستان، دمای سطح زمین به بیشترین میزان خود می‌رسد و در مقابل، میزان درصد پوشش برف نیز کاهش یافته است و با فرا رسیدن فصل سرما و ریزش نزولات جوی به صورت باران و برف، میزان دمای سطح زمین کاهش می‌یابد و سطح پوشش برف به سمت مقادیر بیشتر حرکت می‌کند. بیشترین و کمترین میزان برای دمای سطح زمین در هر ماه به ترتیب مربوط ماه شهریور و در سال ۱۳۸۵ حدود ۳۱ درجه و ماه دی همان سال و حدود ۳ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، حداکثر درصد پوشش برف ماهانه در سال ۱۳۹۰ و به میزان ۸۵ درصد در ماه دی و کمترین میزان درصد پوشش سطح برف نیز در سال ۱۳۹۳ و ماه مهر حدود ۰/۰۱ درصد است. از جنبه تغییرات میانگین سالانه دمای سطح زمین و درصد پوشش برف که در شکل ۵ نشان داده شده است؛ بیشترین و کمترین دمای سطح زمین به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ به ترتیب ۲۱ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. در مورد تغییرات سالانه میانگین درصد پوشش برف می‌توان بیان کرد که در سال ۱۳۹۰ بیشترین میانگین درصد پوشش برف حدود ۲۰ درصد و کمترین آن در سال ۱۳۸۸ و به میزان ۵ درصد بوده است. به‌منظور ارزیابی روند کلی تغییرات، با ترسیم یک خط از ابتدای دوره تا انتهای آن طی مدت مطالعه شده، با توجه به روند تغییرات دمای سطح زمین و درصد سطح برف می‌توان یک روند رو به کاهش را در میزان دمای سطح زمین دید که در مقابل، افزایش تدریجی درصد سطح پوشش برف دیده می‌شود. روند ایجادشده مشابه با تحقیقی [۳۳] است که در کوه‌های هیمالیا، قره‌قوم و هندوکش روی تغییرات سطح پوشش برف و یخچال و ارتباط آن با دما طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ انجام دادند. نتایج کار ایشان بیانگر افزایش تدریجی در میزان سطوح برف به ازای کاهش دما طی این مدت بود. در مطالعات دیگر نیز به وجود رابطه و پیروی مناسب الگوهای تغییرات دمای سطح زمین و تغییرات سطح پوشش برف در برآورد متغیرهای نقطه‌ای مانند دمای هوا و دبی جریان در حوضه آبخیز ایندوس واقع در کشور پاکستان اشاره شده است [۴۱ و ۴۲]. همچنین، علاوه بر بحث دقت مکانی و زمانی در استخراج سطوح برفی، عموماً توزیع سطوح برفی تا حد زیادی به میزان انتقال رطوبت در دسترس در سراسر آن منطقه وابسته است [۴۵] و [۴۶]. در توضیح این مورد باید گفت که با توجه به موقعیت قرارگیری حوضه آبخیز کسلیان که در منطقه‌ای

ارتفاعات بالاتر منتقل می‌شود و جریان حاصل از ذوب برف به تدریج وارد چرخه هیدرولوژیکی می‌شود که می‌تواند در تأمین بخشی از بیلان آبی بالادست حوضه آبخیز نقش مؤثری را ایفا کند [۴۶]. عوامل مربوط به سطح زمین نظیر لکه‌های برف در مناطق با پستی و بلندی زیاد، میزان تاج پوشش درختان و عوارض زمینی متنوع [۵۰ و ۵۱] در برآورد و میزان خطای حاصل از پوشش سطح برف نقش دارند که ارتباط نزدیکی با دمای سطح زمین دارد. بررسی برازش توابع توانی و خطی در شکل ۵ نشان داد چگونگی تغییرات سطح برف و دمای سطح زمین به صورت یک تابع معکوس است که تغییرات این دو متغیر در جهت عکس یکدیگر را نشان می‌دهد. برای انتخاب تابع مناسب برای شبیه‌سازی شرایطی در انتخاب نوع تابع لحاظ شد که عبارت‌اند از: داشتن ضریب تعیین و نش بالاتر، سادگی و تعداد پارامتر کمتر. براینده تمامی موارد یادشده منجر به انتخاب تابع توانی معکوس برای ارزیابی و برآورد بهینه از تغییرات درصد پوشش برف و دمای سطح زمین شد. در ارتباط با تغییرات میان دمای سطح زمین و درصد سطح پوشش برف باید به این نکته اشاره کرد که از دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد به سمت مقادیر بیشتر دمایی میزان تغییرات درصد سطح برف تقریباً ناچیز و در دامنه محدودی نوسان می‌کند و میزان ضریب تعیین بسیار ناچیز؛ به این علت که منطقه مطالعه شده دارای اقلیم نیمه‌مرطوب [۳۴] است و به علت کم بودن میزان مساحت مناطق کوهستانی در سطح حوضه آبخیز کسپیلان پوشش برف همیشگی و پایدار کمتر در آن دیده می‌شود و به محض افزایش یافتن دما میزان سطوح برفی به شدت کاهش می‌یابد. اما با وجود این وضعیت، در مناطقی از ایران که متوسط سالانه دمای سطح زمین کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد است، شرایط ایجاد پوشش برف امکان‌پذیر است [۵۲] چون با توجه به [۳۴] میزان میانگین دمای سالانه در بخش کم‌ارتفاع حوضه آبخیز کسپیلان برابر با ۱۸ و در بخش‌های مرتفع آن ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، شکل ۸ نشان می‌دهد میزان میانگین سالانه دمای سطح زمین طی دوره مطالعاتی از ۱۷ تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است. در شکل ۶ تعدادی نقاط دیده می‌شوند که به نسبت سایر نقاط دمایی در محدوده بالاتری از سطح برف قرار دارند و در تفسیر این امر می‌توان گفت که احتمالاً میزان عمق بارش برف در آن دوره زمانی بیشتر بوده که دارای پایداری بیشتری هستند و به

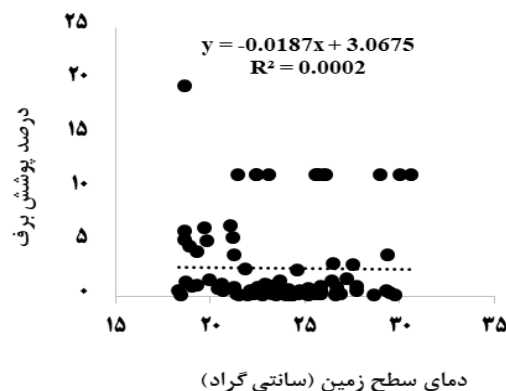
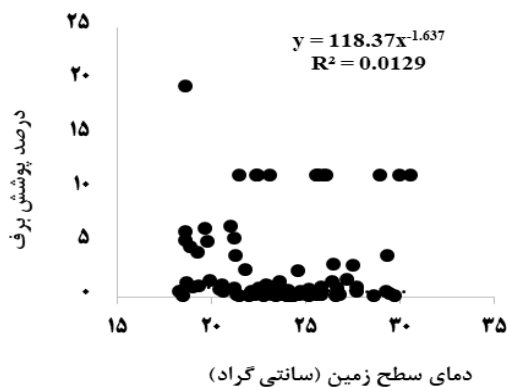
نیمه‌مرطوب [۳۴] و نزدیک به دریاچه خزر است، با کاهش ارتفاع حوضه آبخیز از جنوب به سمت شمال و خروجی حوضه، شاهد افزایش دمای سطح زمین (شکل ۴) و به تبع آن، کاهش پایداری پوشش برف روی سطح زمین خواهیم بود و این امر سبب افزایش تبخیر از سطح و افزایش میزان رطوبت می‌شود. افزایش رطوبت موجود در هوا در بخش‌های جنوبی و جلگه‌ای حوضه آبخیز به علت ارتفاع کم و دمای بیشتر، شرایط را برای تشکیل بلورهای برف فراهم نمی‌کند و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا بلورهای برف بتوانند با ذوب شدن و گرفتن گرما از محیط اطراف شرایط را برای تشکیل و انباشت برف در سطح زمین فراهم کنند. در نتیجه، این امر سبب کاهش احتمال وقوع ریزش برف و ماندگاری پوشش سطوح برفی در نواحی کم‌ارتفاع و پست می‌شود. عامل دیگری که در تغییر دمای سطح زمین و به دنبال آن تغییر مساحت سطوح برفی طی ایام سال تأثیرگذار است، تغییرات نوع کاربری اراضی و نوع پوشش موجود در سطح حوضه آبخیز طی دوره مطالعه شده است. به طور مثال، تغییر اراضی زراعی و جنگلی به مناطق شهری سبب افزایش میانگین دمای سطح زمین و تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به روستایی باعث کاهش میانگین دمای سطح زمین می‌شود [۴۷]. به طور نمونه، بر اساس مطالعه صورت‌گرفته [۴۸] در یک دوره ۳۰ ساله از تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز کسپیلان، میزان تغییرات کاربری‌های مختلف از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶ به ترتیب از ۸۴/۹۸ به ۸۴/۸۴ درصد برای جنگل، ۱۳/۴۷ تا ۱۳/۸۱ درصد به مرتع و ۱/۵۴ به ۱/۳۴ درصد به زمین‌های کشاورزی رسیده است. براساس این روند کاهش، میزان مساحت کاربری مناطق مسکونی که بیشتر به صورت روستا هستند، افزایش پیدا کرده و به میزانی حدود ۲/۴ درصد از سطح حوضه آبخیز رسیده است [۳۴]. در مناطقی که پوشش برف وجود دارد، دمای سطح زمین هم کمتر خواهد بود و علت این امر نیز به علت ویژگی‌های ذاتی برف نظیر آلبیدوی بالا، هدایت گرمایی پایین و انعکاس انرژی تابشی حاصل از نور خورشید است [۴۹]. با توجه به مدل رقومی ارتفاعی نمایش داده‌شده در شکل ۱ و تغییرات ارتفاعی موجود، سطوح پوشیده از برف بیشتر به قسمت کوهستانی در جنوب حوضه آبخیز محدود می‌شود که دمای کمتری دارند و دور از تابش مستقیم آفتاب قرار دارند. با فرا رسیدن فصول گرم، مساحت سطوح برفی کاهش یافته و خط برف به سمت

درصد سطح برف در دمای کمتر از ۱۸ درجه سلسیوس هم در حقیقت می‌تواند در ادامه روال ذوب برف از روزهای قبل باشد. عوامل دیگری نیز بر این ارتباط تأثیرگذار هستند که پیش‌تر به آنها پرداخته شده است.

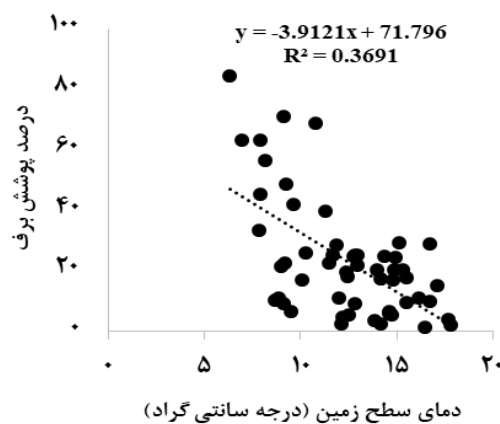
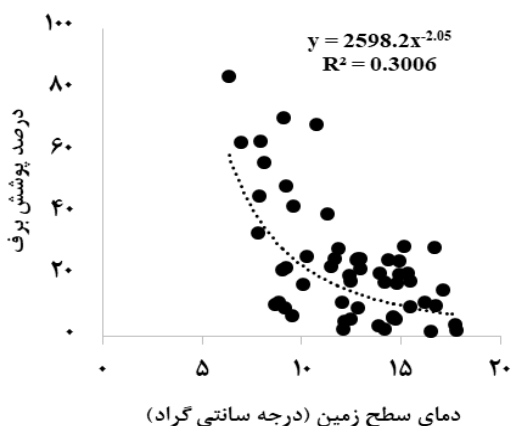
محض افزایش میزان دمای سطح زمین به میزان کمتری ذوب‌شده و در تصاویر ۸ روزه محصول برف مودیس ثبت شده است. اما در شکل ۷ مقادیر دمایی کمتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد روال رو به افزایش دیده می‌شود. مقادیر ناچیز



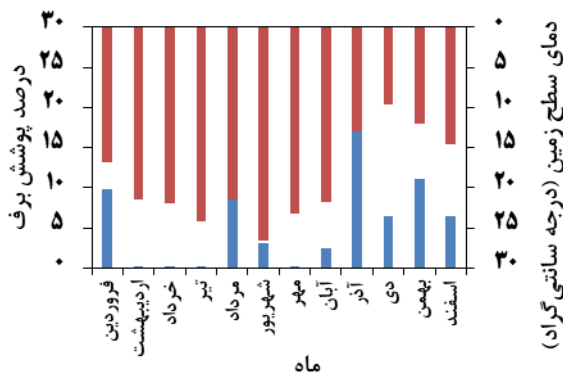
شکل ۵. رابطه میان میانگین ماهانه دمای سطح زمین و میانگین ضریب برف‌گیری ماهانه در حوضه آبخیز کسلیان



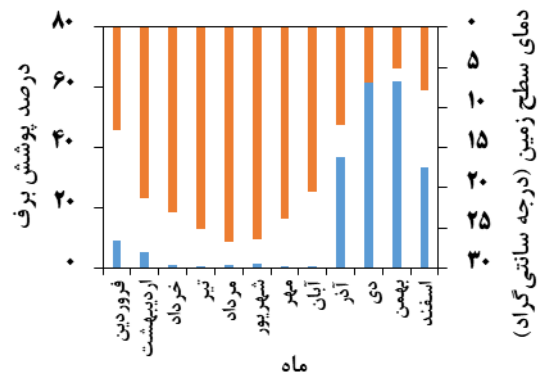
شکل ۶. رابطه میان میانگین ماهانه دمای سطح زمین بیشتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین ضریب برف‌گیری ماهانه در حوضه آبخیز کسلیان



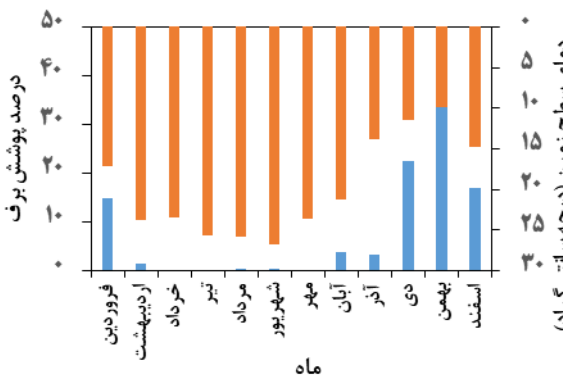
شکل ۷. رابطه میان میانگین ماهانه دمای سطح زمین کمتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین ضریب برف‌گیری ماهانه در حوضه آبخیز کسلیان



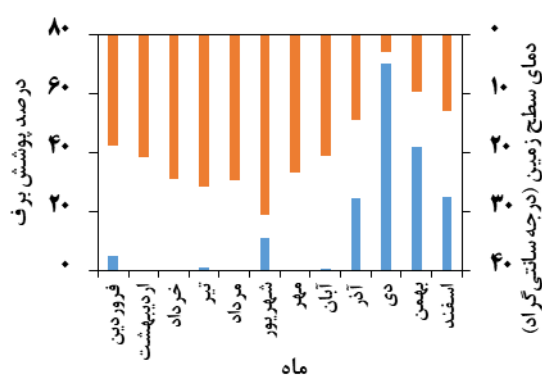
۱۳۸۲ دمای سطح زمین پوشش برف



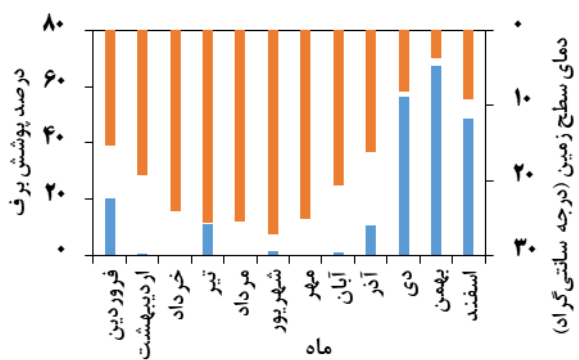
۱۳۸۳ دمای سطح زمین پوشش برف



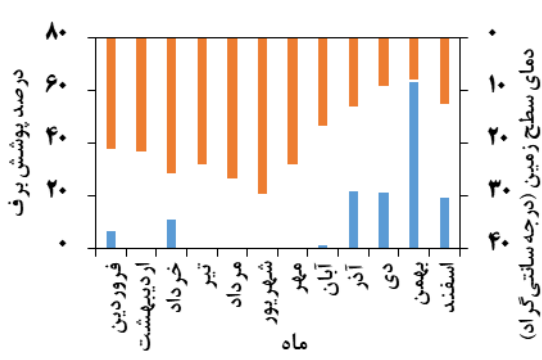
۱۳۸۴ دمای سطح زمین پوشش برف



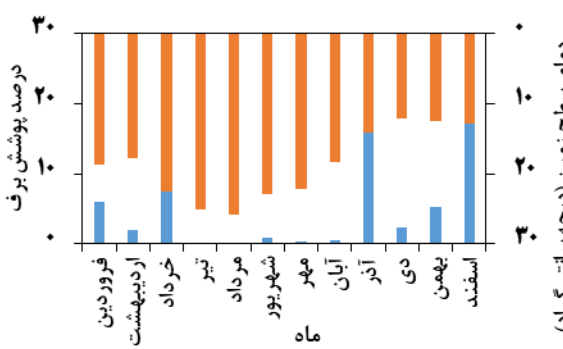
۱۳۸۵ دمای سطح زمین پوشش برف



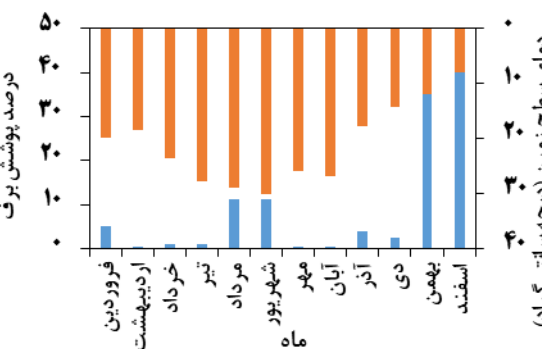
۱۳۸۶ دمای سطح زمین پوشش برف



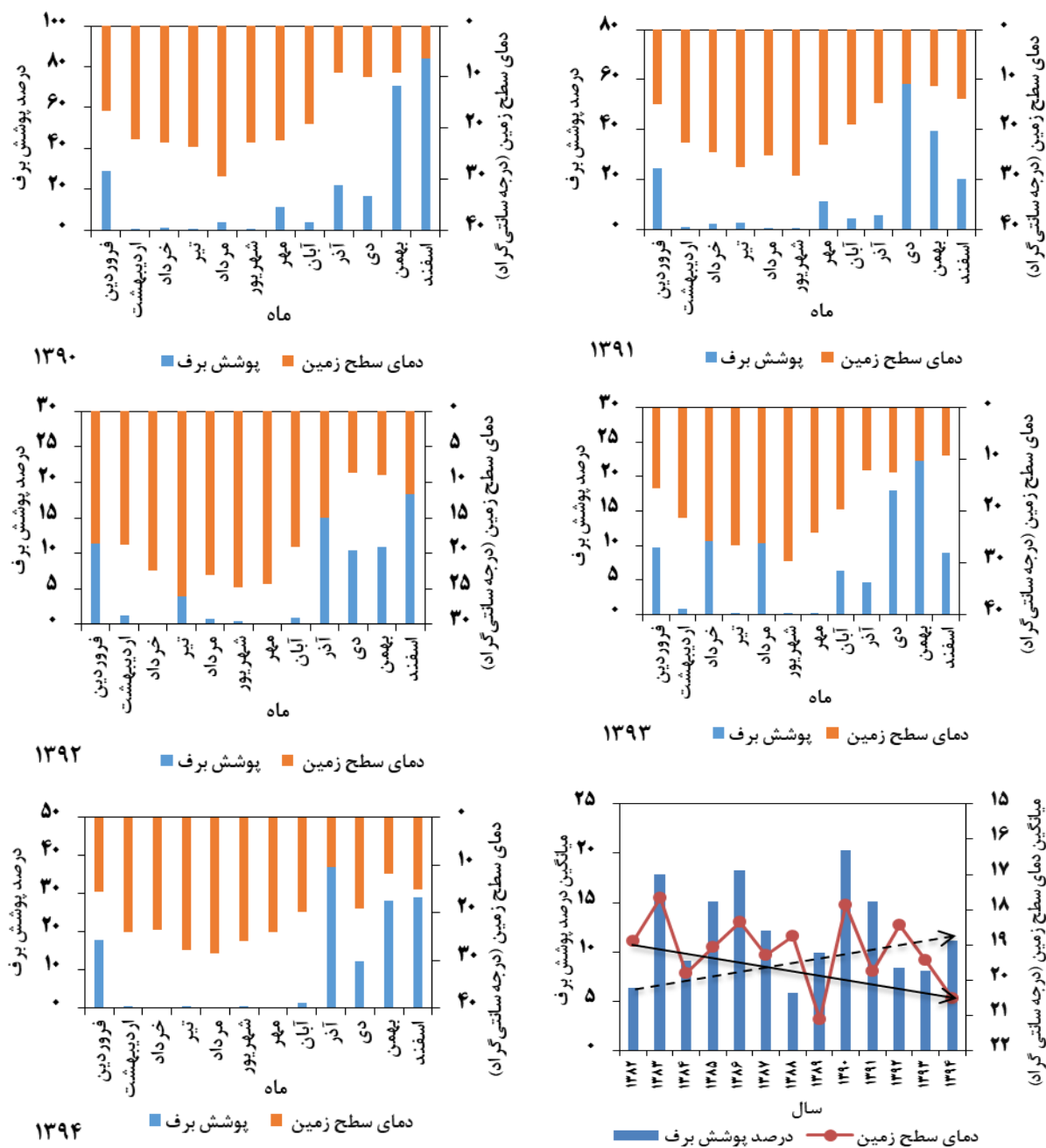
۱۳۸۷ دمای سطح زمین پوشش برف



۱۳۸۸ دمای سطح زمین پوشش برف



۱۳۸۹ دمای سطح زمین پوشش برف



شکل ۸. میانگین تغییرات دمای سطح زمین و درصد پوشش برف در مقیاس ماهانه و سالانه در حوضه آبخیز کسبلیان طی سال‌های

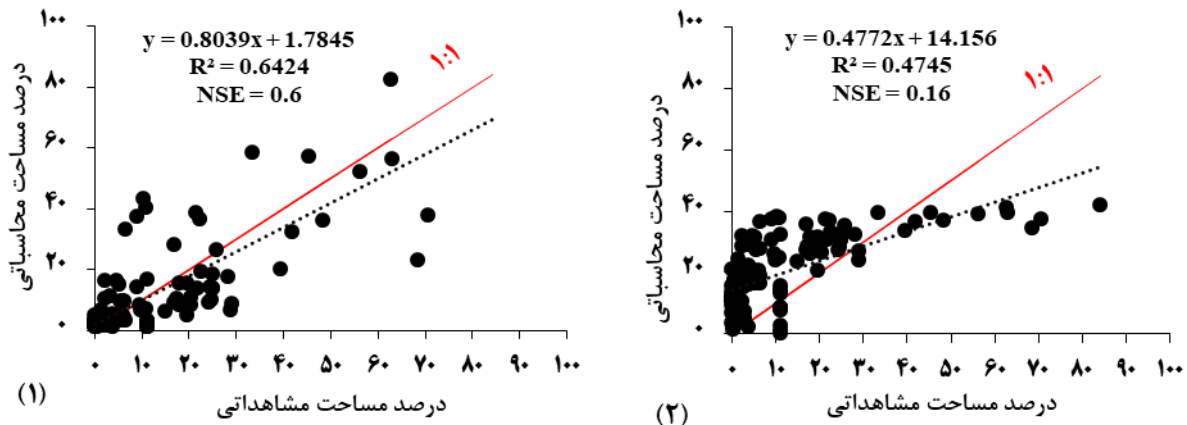
۱۳۸۲-۱۳۹۴

برفی نیز فاکتور مؤثری محسوب می‌شود. از طرفی، چون فرایند ذوب برف به میزان دمای محیط و سطح زمین بستگی دارد، بررسی تغییرات مکانی و زمانی پوشش سطح برف تحت تأثیر عامل دمای زمین می‌تواند مهم باشد. از این‌رو، با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که تغییرات نسبت سطح برف محاسباتی و مشاهداتی که از رابطه رگرسیونی میان دمای سطح زمین و سطح برف حاصل از

تحلیل شبیه‌سازی سطوح پوشیده از برف میزان سطح پوشش برف به‌عنوان یک متغیر اقلیمی و هیدرولوژیک در تولید رواناب سطحی در یک حوضه آبخیز نقش مهمی دارد. بنابراین، هر چقدر نسبت رواناب ناشی از ذوب برف به کل رواناب سالانه افزایش یابد، اهمیت پایش سطح پوشش برف نیز بیشتر می‌شود. در مدل‌های هیدرولوژیکی پیوستگی زمانی این داده‌های سطح پوشش

تعیین R^2 ، میزان شاخص میانگین مجذور مربعات خطا RMSE و میزان خطای نسبی Bias به ترتیب برابر با ۰/۶۴، ۹/۸۸ و ۲/۱۴- است. مقدار منفی در میزان Bias به معنای برآورد کمتر از میزان مشاهداتی است [۵۵] که نشان می‌دهد در حالت رابطه توانی معکوس سطح برف و دمای سطح زمین، میزان خطای نسبی کم بوده است. در حالت انتخاب رابطه خطی میان درصد پوشش برف و دمای سطح زمین، ضریب نش برای کل داده‌ها در حالت بهینه به میزان ۱۶ درصد به دست آمد و با انجام صحت‌سنجی و اعتبارسنجی برای میزان سطح برف شبیه‌سازی شده ضرایب نش حاصل به ترتیب به میزان ۰/۲۱ و ۰/۰۴- درصد به دست آمد. علت این امر را می‌توان این گونه تفسیر کرد که رابطه میان دمای سطح زمین و درصد سطح پوشش برف از الگوی خطی پیروی نمی‌کند و برای بیان ارتباط میان این دو عامل، الگوهای غیرخطی و توانی کارایی بهتری دارد (شکل ۹-۲). همچنین، میزان ضریب تعیین R^2 ، میزان میانگین مجذور مربعات خطا RMSE و درصد میزان خطای نسبی Bias، به ترتیب برابر با ۰/۴۷، ۱۴/۳۷ و ۸۶/۳۲ است که برآورد بیشتری از مقادیر مشاهداتی را بیان می‌کند [۵۵]. ارزش مطالعه حاضر آن است که از این روش می‌توان در تأمین پیوستگی محصولات پوشش سطح برف در بازه‌های زمانی مورد نظر که به علل مختلفی همچون ابرناکی، اختلال در سیستم تصویربرداری و مخابره به ایستگاه‌های زمینی و... وجود ندارند و یا به صورت ناقص بخشی از منطقه را می‌پوشانند، استفاده کرد. بنابراین، می‌توان برای مقادیر ناموجود درصد سطح پوشش برف با دقت مناسبی مقدار متناظری را با توجه به رابطه خطی حاصل قرار داد. همچنین، از مزایای دیگر این روش می‌توان به ساده بودن و توانایی تأمین داده‌های مورد نیاز برای مطالعات وابسته به برف پشته‌ها و دمای سطح زمین اشاره کرد. تحقیقاتی مانند اولیری^۱ و همکاران، هاموند^۲ و همکاران [۵۶] در ایجاد نقشه‌های ذوب برف و نواحی برفگیر [۵۷]، به مناسب بودن محصول برف مودیس اشاره کردند.

محصولات ماهواره مودیس به دست آمده است، یک رابطه خطی را از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹-۱ مشخص شده است و ضریب نش بالاتری نسبت به شکل ۹-۲ دارد، پراکنش و تراکم نقاط شبیه‌سازی شده تا سطح پوشش ۲۰ درصد بسیار به هم نزدیک و زیاد است و هر چه میزان درصد سطح پوشش برف افزایش بیابد، به علت کاهش حضور نقاط، دارای پراکنش و انحراف بیشتری از نیمه‌ساز رسم شده است. از آنجا که اقلیم منطقه مطالعه شده، نیمه‌مرطوب است و به ندرت مساحت چشم‌گیری طی سال پوشیده از برف خواهد بود؛ تعداد نقاط موجود با درصدهای بیشتر پوشش سطح برف دارای تراکم کمتر و پراکندگی بیشتری است. به طور کلی، میزان دقت برآورد مساحت پوشش برفی در ماهواره مودیس در مناطق مسطح نسبت به مناطق کوهستانی بیشتر است [۴۰]. در خصوص علل ایجاد خطا و پراکندگی نقاط محاسباتی در سطوح برفی بیشتر از ۲۰ درصد می‌توان گفت که چون بخش اعظم حوضه آبخیز کسلیان از جنگل پوشیده شده است و از آنجا که محصول برف ماهواره مودیس در مناطق جنگلی متراکم و پراکنده میزان خطای بیشتری از خود نشان می‌دهند. خطاها را می‌توان با تعدیل و اصلاح دمای سطح زمین تا حدی کاهش داد و میزان صحت سطح برف محاسباتی را نیز بهبود بخشید [۴۰]. برای برآورد کارایی نسبت سطح برف محاسبه شده به میزان سطح برف مشاهداتی حاصل از ماهواره مودیس، از ضریب کارایی نش‌ساتکلیف استفاده شد که برای مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با یکدیگر ضروری است [۵۳ و ۵۴]. براساس مواردی که در این تحقیق بیان شد، می‌توان دریافت که دقت محصول برف ماهواره مودیس تحت عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که پیش‌تر یادآوری شد. اما با وجود تمامی این عوامل، با انتخاب رابطه معکوس توانی بین درصد سطح پوشش برف و دمای سطح زمین، میزان ضریب نش‌ساتکلیف محاسبه شده برای تمامی داده‌های موجود طی مدت ۱۳ سال برابر با مقدار ۰/۶ بوده است. همچنین، میزان ضریب نش حاصل از شبیه‌سازی نسبت سطح برف در مرحله صحت‌سنجی که از ۷۰ درصد از داده‌های موجود طی این دوره آماری استفاده شد، برابر با ۰/۵۹ و ۳۰ درصد باقی‌مانده نیز در مرحله اعتبارسنجی برابر با ۰/۶۲ است (شکل ۹-۱). و میزان ضریب



شکل ۹. میانگین درصد مساحت ماهانه پوشش سطح برف حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و محاسباتی

بیشتر محصولات مودیس در برآورد پوشش سطح برف در ارتفاعات، به نظر می‌رسد که نتیجه رضایت‌بخش حاصل به این علت است که مناطق مرتفع و کوهستانی با گرادبان شدید ارتفاعی، سطح اندکی از حوضه آبخیز کسلیان را شامل می‌شوند و به همین دلیل تأثیر چندانی بر کاهش دقت برآورد سطح برف نداشتند. در مقیاس گسترده، ترکیب داده‌های دمای سطح زمین به همراه سطوح پوشش برف برای پایش تغییرات مساحت سطوح برفی، دمای کاربری‌ها و پوشش‌های متنوع اراضی و پیش‌بینی میزان محصولات کشاورزی و... بسیار مفید است و می‌تواند به عنوان یک ورودی مهم برای انواع مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده شود. مقایسه خطوط برف شبیه‌سازی شده از روی دمای سطح زمین و مقادیر موجودی که به صورت عمده ناموجود فرض شده‌اند، در پژوهش پیش رو نشان داد روش کار حاضر می‌تواند در تکمیل خلأهای آماری و تأمین پیوستگی پوشش برف محصولات سنجش از دور مودیس رویکردهای جدیدی را در شناخت رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبخیز کسلیان فراهم کند. چنانچه بتوان از دمای سطح زمین به صورت جایگزین برای تولید پوشش سطح برف استفاده کرد، یک ارزش افزوده کاربردی محسوب می‌شود.

منابع

- [1]. Doesken NJ, Judson A. The snow booklet: A guide to the science, climatology, and measurement of snow in the United States. Colorado State University Publications & Printing; 1997.

نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه کم و در دسترس بودن داده‌های حاصل از سنجش از دور، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور پایش عوامل اقلیمی و محیطی تأثیر زیادی در برآورد سطوح برفی به صورت پیوسته دارد. به لحاظ فنی حفظ این پیوستگی امکان‌پذیر نیست و به‌ناچار گاهی لازم است خلأهای آماری نبود محصول پوشش برف تکمیل شود. در این مطالعه به بررسی اثرات تغییر اقلیمی با تکیه بر تغییرات دمای سطح زمین طی ۱۳ سال روی تغییرات مساحت سطح برف در حوضه آبخیز کسلیان پرداخته شد. شبیه‌سازی نسبت پوشش سطح برف با استفاده از رابطه توانی معکوس حاصل از مقایسه دمای سطح زمین و نسبت سطح برف حاصل از تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفت. هر چند تغییرات سطوح برفی تابع عوامل دیگری مانند توپوگرافی، اقلیم و... است، اما موضوع تفاوت مقیاس و قدرت تفکیک مکانی محصولات سطح برف و دمای سطح زمین نیز یکی از چالش‌های پیش رو در این کار است. همچنین، میزان دقت برآورد داده‌های ماهواره مودیس در بخش جنوبی حوضه آبخیز یعنی در مناطق کوهستانی خطای بیشتری نسبت به مناطق مسطح دارد و در شکل ۶ پراکندگی بیشتر نقاط در دمای کمتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد خود بیانگر افزایش میزان خطا در مناطق مرتفع است که همراه با کاهش دمای سطح زمین است. اما این مطالعه نشان داده است که پارامتر دمای سطح زمین به عنوان یک متغیر مؤثر، به صورت ساده و مناسبی توانست تغییرات نسبت سطح برف در حوضه آبخیز را با ضریب نش مناسبی شبیه‌سازی کند. با توجه به خطای

- [2]. Fassnacht SR, López-Moreno JI, Ma C, Weber AN, Pfohl AK, Kampf SK, et al. Spatio-temporal snowmelt variability across the headwaters of the Southern Rocky Mountains. *Frontiers of Earth Science*. 2017 Sep 1; 11(3):505-14.
- [3]. Rittger K, Painter TH, Dozier J. Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Advances in Water Resources*. 2013 Jan 1; 51:367-80.
- [4]. Barnett TP, Adam JC, Lettenmaier DP. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*. 2005 Nov; 438(7066):303-9.
- [5]. Najafi A, Ghodoosi J, Saqafian B, Porhemat J. Snowmelt runoff estimation by using RS & GIS (A case study in Shahar-chi watershed-Orumiyeh). *Pajouhesh-va-Sazandegi*. 2007; 3(76):177-185. [Persian].
- [6]. Martin MA, Ghent D, Pires AC, Götsche FM, Cermak J, Remedios JJ. Comprehensive in situ validation of five satellite land surface temperature data sets over multiple stations and years. *Remote Sensing*. 2019 Jan; 11(5):479.
- [7]. Sekertekin A, Bonafoni S. Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*. 2020 Jan; 12(2):294.
- [8]. Karnieli A, Agam N, Pinker RT, Anderson M, Imhoff ML, Gutman GG, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of climate*. 2010 Feb; 23(3):618-33.
- [9]. Geiger R. *The Climate Near the Ground* Harvard University Press. Massachusetts, Cambridge. 1965.
- [10]. Prihodko L, Goward SN. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 1997 Jun 1; 60(3):335-46.
- [11]. Zhu W, Lü A, Jia S. Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *Remote Sensing of Environment*. 2013 Mar 15; 130:62-73.
- [12]. Manzo-Delgado L, Sánchez-Colón S, Álvarez R. Assessment of seasonal forest fire risk using NOAA-AVHRR: a case study in central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*. 2009 Sep 22; 30(19):4991-5013.
- [13]. Bhattarai N, Mallick K, Stuart J, Vishwakarma BD, Niraula R, Sen S, et al. An automated multi-model evapotranspiration mapping framework using remotely sensed and reanalysis data. *Remote Sensing of Environment*. 2019 Aug 1; 229:69-92.
- [14]. Lu N, Liang S, Huang G, Qin J, Yao L, Wang D, et al. Hierarchical Bayesian space-time estimation of monthly maximum and minimum surface air temperature. *Remote Sensing of Environment*. 2018 Jun 15; 211:48-58.
- [15]. Li F, Sun W, Yang G, Weng Q. Investigating spatiotemporal patterns of surface urban heat islands in the Hangzhou Metropolitan Area, China, 2000–2015. *Remote Sensing*. 2019 Jan; 11(13):1553.
- [16]. McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS, editors. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press; 2001 Jul 2.
- [17]. Liu Y, Hiyama T, Yamaguchi Y. Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sensing of Environment*. 2006 Nov 30; 105(2):115-28.
- [18]. Pouteau R, Rambal S, Ratte JP, Gogé F, Joffre R, Winkel T. Downscaling MODIS-derived maps using GIS and boosted regression trees: the case of frost occurrence over the arid Andean highlands of Bolivia. *Remote Sensing of Environment*. 2011 Jan 17; 115(1):117-29.
- [19]. Van De Kerchove R, Lhermitte S, Veraverbeke S, Goossens R. Spatio-temporal variability in remotely sensed land surface temperature, and its relationship with physiographic variables in the Russian Altay Mountains. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013 Feb 1; 20:4-19.
- [20]. Khosravi M, Tavousi T, Raeespour K, Omidi Ghaleh mohammadi, M. A Survey on Snow Cover Variation in Mount Zardkooh-Bakhtyare Using Remote Sensing (R.S). *Hydrogeomorphology*. 2017; 3(12): 25-44. [Persian].
- [21]. Carroll T, Cline D, Fall G, Nilsson A, Li L, Rost A. NOHRSC operations and the simulation of snow cover properties for the coterminous US. In *Proc. 69th Annual Meeting of the Western Snow Conf* 2001 Apr (pp. 1-14).

- [22]. Li ZL, Tang BH, Wu H, Ren H, Yan G, Wan Z, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of environment*. 2013 Apr 15; 131:14-37.
- [23]. Isaya Ndossi M, Avdan U. Application of open source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps from Landsat: a PyQGIS plugin. *Remote sensing*. 2016 May; 8(5):413.
- [24]. Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV, DiGirolamo NE, Bayr KJ. MODIS snow-cover products. *Remote sensing of Environment*. 2002 Nov 1; 83(1-2):181-94.
- [25]. Lee S, Klein AG, Over TM. A comparison of MODIS and NOHRSC snow-cover products for simulating streamflow using the Snowmelt Runoff Model. *Hydrological Processes: An International Journal*. 2005 Oct 15; 19(15):2951-72.
- [26]. Sahu R, Gupta RD. Snow cover area analysis and its relation with climate variability in Chandra basin, Western Himalaya, during 2001–2017 using MODIS and ERA5 data. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020 Aug; 192(8):1-26.
- [27]. Rayegani B, Khajeddin S J, Soltani S, Barati S. Analysis of MODIS Snow-Cover Map Changes During Missing Data Period. *JWSS*. 2008; 12 (44):315-332. [Persian].
- [28]. Wang X, Xie H, Liang T. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*. 2008 Apr 15; 112(4):1497-513.
- [29]. Georgievsky MV. Application of the Snowmelt Runoff model in the Kuban river basin using MODIS satellite images. *Environmental Research Letters*. 2009 Oct 21; 4(4):045017.
- [30]. Mu Q, Zhao M, Running SW. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*. 2011 Aug 15; 115(8):1781-800.
- [31]. Hall DK, Riggs GA, DiGirolamo NE, Román MO. MODIS cloud-gap filled snow-cover products: Advantages and uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. 2019 Apr 23:1-23.
- [32]. Sahu R, Gupta RD. Snow Cover Analysis in Chandra Basin of Western Himalaya from 2001 to 2016. In *Applications of Geomatics in Civil Engineering 2020* (pp. 557-566). Springer, Singapore.
- [33]. Halabian A, Solhi S. Spatiotemporal Changes in Snow-Cover related to the Land Surface Temperature over Central Alborz. *Physical Geography 2020*; 13(47): 53-75.
- [34]. Jabbar A, Othman AA, Merkel B, Hasan SE. Change detection of glaciers and snow cover and temperature using remote sensing and GIS: A case study of the Upper Indus Basin, Pakistan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2020 Mar 24:100308.
- [35]. Motevalli A, Vafakhah M. Flood hazard mapping using synthesis hydraulic and geomorphic properties at watershed scale. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2016 Oct 1; 30(7):1889-900.
- [36]. Maurer EP, Rhoads JD, Dubayah RO, Lettenmaier DP. Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrological Processes*. 2003 Jan; 17(1):59-71.
- [37]. Mir RA, Jain SK, Saraf AK, Goswami A. Accuracy assessment and trend analysis of MODIS-derived data on snow-covered areas in the Sutlej basin, Western Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*. 2015 Aug 3; 36(15):3837-58.
- [38]. Krajčí P, Holko L, Parajka J. Variability of snow line elevation, snow cover area and depletion in the main Slovak basins in winters 2001–2014. *Journal of hydrology and hydromechanics*. 2016 Mar 1; 64(1):12-22.
- [39]. Wan Z, Hook S, Hulley G. MOD11A2 MODIS/Terra land surface temperature/emissivity 8-day L3 global 1km SIN grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015; 10.
- [40]. Fritz P, Suzuki O, Silva C, Salati E. Isotope hydrology of ground waters in the Pampa del Tamarugal, Chile. *Journal of Hydrology*. 1981 Sep 1; 53(1-2):161-84.
- [41]. Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007;50(3):885-900.
- [42]. Dong J, Peters-Lidard C. On the relationship between temperature and MODIS snow cover retrieval errors in the Western US. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. 2010 Feb 5; 3(1):132-40.

- [43]. Forsythe N, Kilsby CG, Fowler HJ, Archer DR. Assessment of runoff sensitivity in the Upper Indus Basin to interannual climate variability and potential change using MODIS satellite data products. *Mountain Research and Development*. 2012 Feb; 32(1):16-29.
- [44]. Forsythe N, Fowler HJ, Kilsby CG, Archer DR. Opportunities from remote sensing for supporting water resources management in village/valley scale catchments in the Upper Indus Basin. *Water resources management*. 2012 Mar 1; 26(4):845-71.
- [45]. Jarchow CJ, Nagler PL, Glenn EP, Ramírez-Hernández J, Rodríguez-Burgueño JE. Evapotranspiration by remote sensing: An analysis of the Colorado River Delta before and after the Minute 319 pulse flow to Mexico. *Ecological Engineering*. 2017 Sep 1; 106:725-32.
- [46]. Hazaymeh K, Hassan QK. Spatiotemporal image-fusion model for enhancing the temporal resolution of Landsat-8 surface reflectance images using MODIS images. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2015 Jan; 9(1):096095.
- [47]. Pu Z, Xu L. MODIS/Terra observed snow cover over the Tibet Plateau: distribution, variation and possible connection with the East Asian Summer Monsoon (EASM). *Theoretical and Applied Climatology*. 2009 Aug 1; 97(3-4):265-78.
- [48]. Li C, Su F, Yang D, Tong K, Meng F, Kan B. Spatiotemporal variation of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS snow product, 2001–2014. *International Journal of Climatology*. 2018 Feb; 38(2):708-28.
- [49]. Chaudhuri G, Mishra NB. Spatio-temporal dynamics of land cover and land surface temperature in Ganges-Brahmaputra delta: A comparative analysis between India and Bangladesh. *Applied Geography*. 2016 Mar 1; 68:68-83.
- [50]. Rahmani N, Shahedi K, Soleymani K, Yaqhoubzadeh, M. Evaluation of the Land use Change Impact on Hydrologic Characteristics (Case Study: Kasilian Watershed). *jwmr*. 2016; 7 (13):32-23. [Persian].
- [51]. Shrestha M, Wang L, Koike T, Xue Y, Hirabayashi Y. Modeling the spatial distribution of snow cover in the Dudhkoshi region of the Nepal Himalayas. *Journal of Hydrometeorology*. 2012 Feb; 13(1):204-22.
- [52]. Keikhosrvaï Kiany, M., Masoudian, S. Identification of snow reservoirs in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 2017; 49(3): 395-408.
- [53]. Painter TH, Rittger K, McKenzie C, Slaughter P, Davis RE, Dozier J. Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2009 Apr 15; 113(4):868-79.
- [54]. Salomonson VV, Appel I. Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2006 Jun 26; 44(7):1747-56.
- [55]. Liston GE, Pielke RA, Greene EM. Improving first-order snow-related deficiencies in a regional climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999 Aug 27; 104(D16):19559-67.
- [56]. Rodell M, Houser PR. Updating a land surface model with MODIS-derived snow cover. *Journal of hydrometeorology*. 2004 Dec; 5(6):1064-75.
- [57]. Emami H, Salajegheh A, Moghaddam Nia, A, Khalighi, S. Evaluation of TRMM satellite accuracy and efficiency in estimating monthly rainfall in Gorganroud watershed. *ECO Hydrology*. 2020; 7(3): 719-729. [Persian].
- [58]. O'Leary D, Hall D, Medler M, Flower A. Quantifying the early snowmelt event of 2015 in the Cascade Mountains, USA by developing and validating MODIS-based snowmelt timing maps. *Frontiers of Earth Science*. 2018 Dec 1; 12(4):693-710.
- [59]. Hammond JC, Saavedra FA, Kampf SK. Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016. *International Journal of Climatology*. 2018 Oct; 38(12):4369-83.