

بررسی کاربرد نقشه‌های پوشش برفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مدل‌سازی رواناب ذوب برف (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد کرج)

میرحسین میریعقوب‌زاده^{۱*} و محمدرضا قنبرپور^۲

^۱دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه مازندران، مازندران، ایران.

^۲دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۵/۲۹

چکیده

سطح تحت پوشش برف یکی از پارامترهای مهم و دخیل در میزان جریان رواناب حاصل از ذوب برف بوده و با توجه به مشکل بودن پایش و اندازه‌گیری میزان سطح تحت پوشش برف در حوزه‌های آبخیز کوهستانی تصاویر ماهواره‌ای به عنوان جایگزین پایش‌ها و عملیات‌های زمینی تهیه نقشه سطح تحت پوشش برف در حوزه‌های آبخیز مطرح شده‌اند. سطح تحت پوشش برف حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف تلقی نمود. در این نوشتار، از تصاویر ماهواره‌ای MODIS برای تهیه نقشه سطح تحت پوشش برف در حوزه آبخیز سد کرج استفاده شده است. به منظور بررسی میزان اختلاف در بازتابش باندهای مختلف در تصاویر، نمرخ‌برداری انجام و بدین شکل قابلیت کاربرد شاخص پوشش برفی در تصاویر ماهواره‌ای MODIS مورد تأیید قرار گرفت. در انتها، شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوزه آبخیز سد کرج به عنوان یکی از کاربردهای اساسی پردازش تصاویر ماهواره‌ای و استخراج سطح پوشش برف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد شاخص پوشش برفی همراه با آستانه‌گذاری طیفی بر روی باند ۲ و ۴ رابطه‌ای پایدار در استخراج نقشه پوشش برفی را ارائه می‌نماید. همچنین جریان شبیه‌سازی شده در سال آبی ۸۰-۸۱ با ضریب تبیین ۰/۴۶۷۸ و تفاضل حجم ۰/۱۲۹۲ متر مکعب بر ثانیه نشان از دقت داده‌های حاصل از نقشه‌های پوشش برفی به دست آمده از تصاویر MODIS دارد.

کلیدواژه‌ها: سطح تحت پوشش برف، تصاویر ماهواره‌ای، MODIS، SRM، حوزه آبخیز سد کرج

E-mail: m.miryaghoobzadeh@gmail.com

*نویسنده مسئول: میرحسین میریعقوب‌زاده

۱- مقدمه

برف یکی از اشکال مهم بارش در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی بوده که در تأمین منابع آب آشامیدنی و کشاورزی به صورت جریان‌های تأخیری در فصول پرآبی و جریان‌های کمینه در فصول کم آبی و تولید انرژی نقش ارزنده ایفا می‌کند. از سوی دیگر رواناب حاصل از ذوب برف به دلیل نقش تأخیری آن منبع اصلی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و در برخی از موارد به دلیل همزمانی با بارش‌های بهاره منشأ بروز سیلاب‌های مخرب با حجم جریان بیش از ظرفیت رودخانه‌ها می‌شود (قنبرپور، ۱۳۸۳). توسعه مدل‌های پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف به تعیین پارامترهای مکانی زیادی نیاز دارد. توزیع بارندگی ویژه توزیع زمانی و مکانی بارش برف، رطوبت خاک برای شکل‌گیری رواناب لازم هستند. با این وجود این اطلاعات اغلب پراکنده و دارای کیفیت پایینی هستند و برای رفع این کمبودها سنجش از دور دارای پتانسیل خوبی است. از آنجا که انباشت برف در مناطق کوهستانی در طول فصل سرما یکی از منابع مهم انرژی بوده و نیز متغیر هیدرولوژیکی سطح تحت پوشش برف به عنوان یکی از متغیرهای اساسی مدل به شمار می‌رود، لذا دستیابی به اطلاعات مربوط به برف در مناطق مرتفع حائز اهمیت فراوانی است و تنها از طریق تصویربرداری پیوسته به کمک فن‌آوری سنجش از دور ممکن است، چرا که برداشت زمینی این اطلاعات نیاز به شبکه متراکمی از ایستگاه‌های برف سنجی داشته که نه تنها از لحاظ اجرایی با مشکلاتی مواجه است، بلکه از نظر اقتصادی در مورد نگهداری و سرویس آنها مقرون به صرفه نیست. اندازه‌گیری و سنجش برف در حوزه‌های کوهستانی و شناخت تغییرات آن به دلیل عدم دسترسی مناسب، تأثیر تنوع ویژگی‌های توپوگرافی و فیزیوگرافی در برآورد پارامترهای هیدرولوژیکی برف و ناکافی بودن ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مرتفع ضرورت کاربرد روش‌های غیر مستقیم از جمله تحلیل داده‌های دورسنجی را نشان می‌دهد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و کاربرد الگوریتم‌های موجود می‌توان

سطح تحت پوشش برف را با دقت مناسب استخراج نمود (پرهمت، ۱۳۸۱). برآورد سطح تحت پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجش از دور به طور معنی‌داری روند محاسبه و کارایی مدل‌های ذوب برف را بهبود می‌بخشد (Kite, 1991; Singh and Jain, 2003; Armstrong and Hardman, 1991; Seidel et al., 1994). برف برای نخستین بار در سال ۱۹۶۰ در خاور کانادا توسط ماهواره TIROS-1 سنجش شد. از آن پس، این سنجش به‌وسیله ماهواره‌هایی با قدرت زمانی بالاتر چون Geostationary Operational Envisat (Geostationary Operational Envisat) و سری‌های لندست انجام پذیرفت (Engman et al., 1992). (Barton et al., 2001). روش رگرسیون چندگانه (Multiple Linear Regression) را با استفاده از شاخص NDSI برای برآورد سطح تحت پوشش برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS به کار برده‌اند. (Hall & Riggs (2002) با آستانه‌گذاری طیفی بین باندهای انعکاسی و مادون قرمز با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر (۰/۵۵ میکرومتر و ۱/۶۷ میکرومتر) و همچنین نسبت‌گیری طیفی میان باندهای یاد شده، برف و ابر را در تصاویر سنجنده MODIS جداسازی نموده‌اند. (Songwen et al., 2003) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و NOAA رواناب حاصل از ذوب برف حوزه‌های ریوگرانند و ریوواجو را با تفاضل حجمی به ترتیب ۱۲/۱ و ۱۰/۳ و با ضریب همبستگی ۰/۷ و ۰/۸۹ شبیه‌سازی کرده‌اند. (Salomonson & Appel, 2004) با استفاده از داده‌های ۳۰ متر لندست به عنوان نقشه صحت زمینی درصد سطح تحت پوشش برف را برای داده‌های ۵۰۰ متر سنجنده MODIS محاسبه کردند. (Embretths et al., 2005) با استفاده از داده‌های MODIS و با به‌کارگیری شاخص پوشش برفی NDSI، نقشه سطح تحت پوشش برف را با ضریب تبیین کلی ۶۲٪ تا ۸۲٪ در حوزه آبخیز کاراسو از سرشاخه‌های رودخانه انوفرا تیس واقع در خاور ترکیه برای استفاده در مدل رواناب حاصل از ذوب برف برآورد کرده‌اند. (Hall et al., 2005) در تحقیقی خطای حاصل از نقشه‌های

آستانه‌گذاری بر شدت روشنایی که در این حالت بیشترین درجه روشنایی به برف نسبت داده می‌شود و روش رقومی که با استفاده از ارقام طیفی هر پیکسل در تصاویر چند طیفی نقشه برف تهیه می‌شود. روش‌های کلاسیک تهیه نقشه پوشش برفی بر پایه کنتراست بین ابر و پوشش برفی استوار هستند (جلوخوانی، ۱۳۸۳). روش‌های متعددی بر پایه تفسیر رقومی وجود دارد که برای برآورد و جداسازی پوشش برفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوشتار، از روش شاخص پوشش برفی و با استفاده از روش دانش مبنا (Knowledge Base) بر اساس ویژگی‌های بازتابش برف و همچنین ابر، زمین و آب نسبت به تهیه نقشه پوشش برفی اقدام شد. روشی را که در آن دانش موجود در داخل یک سری از قوانین فرموله می‌شود در اصطلاح دانش مبنا نامیده می‌شود.

۲-۲. ویژگی‌های بازتابش برف و شاخص پوشش برفی NDSI (Normalized Difference Snow Index):

بازتابندگی سطح برف به شدت از تغییر عواملی چون دانه‌بندی، شکل، محتوی آب، زبری سطح، ژرفا و ناخالصی برف و همچنین زاویه فرود خورشیدی و زاویه انعکاس تأثیر می‌پذیرد. افزایش سن برف از میزان بازتابندگی آن در نواحی طیفی مرئی و فروسرخ نزدیک می‌کاهد که عامل اصلی این کاهش افزایش دانه‌بندی برف به دلیل ذوب و انجماد دوباره آن است (Barton, 2001). میزان امواج کوتاه و بلند که در سطح برف دریافت می‌شود می‌تواند منبع مهمی برای فرایند ذوب برف باشد. مهم‌ترین ویژگی نوری (اپتیک) برف که باعث اختلاف در بازتابش طیفی برف می‌شود، اختلاف در محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز است. به منظور بررسی نحوه بازتابش باندهای مورد اشاره در تفکیک برف از ابر و زمین در جهت محور عمود نیم‌رخ طیفی زده شد و بازتابش عناصر برف، ابر و زمین مورد بررسی قرار گرفت.

سنجنده MODIS نقشه‌های با قابلیت مشاهده پوشش برفی با استفاده از شاخص پوشش برفی را در مقیاس‌های وسیع و استفاده سریع در مطالعات منطقه‌ای را فراهم می‌نماید (Salomanson & Appel, 2004). شاخص پوشش برفی NDSI یک نسبت‌گیری طیفی است که از اختلاف طیفی باندهای مادون قرمز و باند مرئی در سنجنده MODIS برای تشخیص تغییرات سطح تحت پوشش برف همانند الگوریتم شاخص پوشش گیاهی NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) استفاده می‌کند (Dozier, 1989; Hall et al., 1995). شاخص NDSI از برتری‌های بازتاب طیفی برف که در باند مرئی دارای بازتاب بالا و محدوده طیفی مادون قرمز دارای بازتاب پایین است، برای بازسازی برف از ابر و نواحی بدون پوشش برفی استفاده می‌کند (Hall et al., 1995; Nolin & Liang, 2000). این شاخص همانند بسیاری از روش‌های نسبت‌گیری طیفی اثرات اتمسفر را کاهش می‌دهد (Hall et al., 2002). شاخص NDSI اختلاف بازتاب طیفی در باند مرئی (۰.۵۵۵ μm) نسبت به باند مادون قرمز آن (۱.۶۴ μm) به مجموع دو باند یاد شده است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Hall & Riggs, 2002).

$$NDSI = \frac{Band(0.555 \mu m) - Band(1.64 \mu m)}{Band(0.555 \mu m) + Band(1.64 \mu m)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

طبق مطالعات Salomanson & Appel (2004) برای برآورد سطح تحت پوشش برف با باندهای ۵۰۰ متر سنجنده MODIS به کارگیری شاخص NDSI کافی است.

این الگوریتم همراه با دو آستانه‌گذاری دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱- بازتاب باند ۲ بالاتر از ۱۱٪ که این عامل برای جداسازی برف از آب است.

۲- بازتاب باند ۴ بالاتر از ۱۰٪ که این عامل اشیای تاریک را از صحنه خارج می‌کند. شاخص پوشش برفی NDSI تنها به انواع خاصی از ابرهایی که دارای ذرات یخ هستند و یا بعضی از ابرهایی که بازتاب آنها مانند برف است، حساس می‌باشد (Hall et al., 1995).

پوشش برفی سنجنده MODIS را در نیمکره شمالی مورد آزمایش قرار دادند. Julienne et al. (2006) با استفاده از داده‌های MODIS تغییرات آلبدو در یخچال‌های گرینلند را با داده‌های اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار دادند. راه چمنی و شفیعی علویچه (۱۳۶۷) طی تحقیقی از سوی وزارت نیرو یک مطالعه موردی به منظور شناخت پتانسیل و امکانات مرکز سنجنش از دور و به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای موجود برای برآورد سطح تحت پوشش برفی در محدوده البرز مرکزی بویژه حوزه سد کرج انجام دادند. تصاویر ماهواره لندست سنجنده MSS به تعداد ۷ صحنه در ۳ تاریخ ۱۹۷۶/۱۱/۴ و ۱۹۷۵/۴/۸ و ۱۹۷۵/۵/۱۵ در این مطالعه به کار گرفته شده بود که به منظور برآورد سطح تحت پوشش برف از برگردان تصاویر بر روی کاغذ ترانسپارانت و تغییر مقیاس به صورت دستی و خطوط توپوگرافی استفاده شده بود. پر همت (۱۳۸۱) در مطالعه‌ای با عنوان مدل تفکیک برف، ابر و زمین در تصاویر ماهواره‌ای NOAA الگوریتمی ارائه نموده است که بر اساس استخراج آستانه از هیستوگرام‌های ارزش داده‌های ورودی، تحلیل چند طیفی چند مرحله‌ای عمل می‌کند. دینی (۱۳۸۵) در مطالعه‌ای موردی تغییرات سطوح برفی را در ارتفاعات البرز با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS و AVHRR مورد بررسی قرار داده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این نوشتار به منظور بررسی کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در مدل‌سازی ذوب برف، از آمار سال آبی ۸۱-۸۰ در حوزه آبخیز سد کرج استفاده شده است. حوزه آبخیز سد کرج یکی از حوزه‌های برفگیر در رشته کوه البرز که به دلیل قرار داشتن سد کرج در خروجی حوزه از حوزه‌های مهم در تأمین منابع آب شهرستان تهران به شمار می‌رود، است. حوزه آبخیز سد کرج (سد امیرکبیر) با مساحت ۸۴۱/۶۶۰ کیلومتر مربع در پهنه جنوبی رشته کوه البرز مرکزی بین ۳۵° ۵۳' ۰۲" ۶۷" تا ۳۵° ۱۰' ۳۸" ۲۶" عرض شمالی و ۵۱° ۰۳' ۶" ۲۹" تا ۵۱° ۳۵' ۲۴" ۳۰" طول خاوری واقع شده است. رقوم ارتفاعی آن از ۱۷۰۰ تا ۴۳۰۰ متر متغیر و در آن رودخانه‌های مهمی چون کرج، شهرستانک، آب ورزن، مورود، سبدک، وارنگرود، ولت‌رود جریان دارند. شکل ۱ موقعیت این حوزه را در پهنه ایران نشان می‌دهد.

به منظور بررسی کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در مدل‌سازی جریان رواناب حاصل از ذوب برف از تصاویر ماهواره‌ای MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) به دلیل قدرت تفکیک زمانی بالا که دارای دوره بازگشت یک روز است، همچنین دارای قدرت تفکیک مکانی بالا نسبت به تصاویر ماهواره‌های مشابه است، استفاده شده است. این سنجنده در ۱۸ دسامبر سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره TERRA مستقر و در مدار زمین قرار گرفته است. این پوشش با پرتاب ماهواره Aqua در ۴ May 2002 افزایش چشمگیری یافته است. سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند در محدوده طیفی ۰/۴۱ تا ۱۴/۵ میکرومتر بوده و قدرت تفکیک آن در زاویه عمود به سطح زمین ۲۵۰ متر در ۲ باند طیفی، ۵۰۰ متر در ۵ باند و ۱۰۰۰ متر در ۲۹ باند طیفی است. ۲۰ باند آن در ناحیه باند مرئی محدوده ۰/۴۱ الی ۲/۱ میکرومتر بوده و ۱۶ باند طیفی باقی‌مانده این سنجنده در ناحیه حرارتی بالاتر از ۳/۷ میکرومتر است. باندهای انعکاسی (Reflective solar band) سنجنده MODIS توسط جسم متحرک تابشی و یا صفحه ثابت تابشی و باندهای حرارتی (Thermal emissive band) آن نیز توسط جسم سیاه که در داخل سکو تعبیه شده‌اند و اسنچی می‌شوند. ماهواره Aqua دارای ۵ سنجنده از جمله MODIS است و پهنه روبش آن ۲۳۳۰ کیلومتر است. جدول ۱ سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای MODIS به کار رفته در این نوشتار را نشان می‌دهد.

۲-۱. نقشه پوشش برفی

در تهیه نقشه پوشش برفی عمده روش‌های رایج عبارتند از روش تفسیر چشمی یا روش

۳- نتایج

۳-۱. تصحیحات هندسی

زمین مرجع نمودن داده‌های ماهواره‌ای MODIS با توجه به قدرت تفکیک ۵۰۰ متر و با در نظر گرفتن این که هر پیکسل از تصاویر، سطحی معادل ۵۰۰×۵۰۰ را می‌پوشاند در برآورد سطح تحت پوشش برف بسیار مهم بوده و زمین مرجع نمودن این داده‌ها حائز اهمیت فراوانی است. تصحیحات هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش تصویر به تصویر (Image to Image Registration) بر مبنای تصویر زمین مرجع شده ETM و با معادله درجه یک و روش نزدیک‌ترین همسایه (Nearest Neighbor Method) صورت پذیرفت. افزون بر بررسی درستی تصحیحات هندسی توسط مجموع میانگین مربعات باقی‌مانده (Root Mean Square Error) (طبق رابطه ۲)، فرایند زمین مرجع تصاویر با استفاده از لایه آبراهه و مرز حوزه که با توجه به قدرت تفکیک مکانی تصاویر از عوارض قابل اطمینان است که در این مورد تصحیحات هندسی اشتباه منجر به ورود داده‌های سطح پوشش برف نادرست به مدل و در نتیجه شبیه‌سازی نادرست خواهد شد، استفاده شد. شکل ۲ آزمون دقت فرایند زمین مرجع با استفاده از لایه آبراهه‌های حوزه را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۲ میزان خطای میانگین مربعات باقی‌مانده را نشان می‌دهد.

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{k=1}^N (e_{ik})^2}{N} \right)^{1/2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن e_{ik} : مقادیر باقی‌مانده ناشی از اختلاف میان پیکسل‌های زمین مرجع و پیکسل‌های تصحیح نشده، N : تعداد کل پیکسل‌ها

۳-۲. بررسی میزان بازتابش عناصر زمین و برف در تصاویر ماهواره‌ای

MODIS

با در نظر گرفتن این مطلب که پایش برف به دلیل متغیر بودن زمانی و مکانی (Temporal and Spatial variable) برف که تابع شرایط ذوب و بارش دوباره است و نیز به دلیل عدم نقشه‌برداری زمینی (Snow Telemetry) پدیده یاد شده در نتیجه تهیه نقشه دقت زمینی برای بررسی دقت تفسیر رقومی امکان‌پذیر نیست (Townshend, 1996; Wilkinson, 1992). به منظور تعیین درستی دانش مربوط به ویژگی‌های بازتابی برف و سایر پدیده‌ها و نیز میزان دقت شاخص پوشش برفی در تصاویر ماهواره‌ای MODIS برای برآورد سطح تحت پوشش برفی و ورود اطلاعات پوشش برف به مدل SRM (Snow Melt Runoff Model)، میزان اختلاف در بازتابش باندهای پیشنهادی در جهت عمود بر سطح منطقه مورد مطالعه نیم‌رخ‌برداری و نتایج مقایسه شد. منظور از نیم‌رخ استخراج اطلاعات درجه روشنایی در طول یک برش مشخص از نقطه a تا b در تصویر است. محور افقی در نیم‌رخ تعداد پیکسل‌های مقطع و محور عمودی مقادیر داده‌های ورودی در هر پیکسل از تصویر را نشان می‌دهد.

۳-۳. برآورد سطح تحت پوشش برفی

میزان سطح تحت پوشش برف در تصاویر ماهواره‌ای MODIS بعد از تصحیحات هندسی با استفاده از شاخص پوشش برفی و با آستانه‌گذاری طیفی بر روی باندهای ۲ و ۴ و تفکیک عناصر ابر و زمین از تصاویر محاسبه شد. شکل ۸ سطح تحت پوشش برف را در دوره آماری به کار رفته را نشان می‌دهد.

مقادیر سطح تحت پوشش برف در حوزه آبخیز سد کرج در سال آبی ۸۱-۸۰ با استفاده از طبقه‌بندی شاخص پوشش برفی طبق جدول ۳ به دست آمده است.

۳-۴. درون‌یابی سطح تحت پوشش برف

در این تحقیق مساحت حوزه آبخیز سد کرج جهت مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف به ۵ زون ارتفاعی با حدود طبقات (Altitude Range) ۵۰۰ متر در محیط GIS تقسیم‌بندی و سطح تحت پوشش برف در هر یک از زون‌های تفکیک شده به دست

آمد. سپس سطح تحت پوشش برف به روزهای فاقد تصاویر ماهواره‌ای درون‌یابی شد. سطح تحت پوشش برف در حوزه آبخیز سد امیرکبیر توسط درون‌یابی و برون‌یابی از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای MODIS بر اساس الگوریتم ارائه شده توسط (Malcher & Heidinger, 2001) محاسبه شد. ماهواره حامل سنجنده MODIS به صورت روزانه از سطح زمین تصویربرداری می‌نماید اما به دلیل هزینه‌بر بودن تهیه تصاویر ماهواره‌ای و همچنین زمان‌بر بودن پردازش و استخراج روزانه سطح تحت پوشش برف در حوزه‌های آبخیز عملاً امکان استفاده روزانه از تصاویر ماهواره‌ای منتفی است. انتخاب تاریخ تصاویر ماهواره‌ای به دلیل ماهیت پیچیده برف و تغییرات زمانی و مکانی آن بسیار مهم بوده و می‌تواند دقت تعیین سطح پوشش برف را تحت تأثیر خود قرار دهد. مضاف بر این که عامل تغییرات دمایی نیز در این بین بسیار حیاتی است و با در نظر داشتن روند ذوب در فصل ذوب برف که پیش‌تر به آن اشاره شد، عامل دما در ذوب برف بیشتر از پدیده‌های دیگر مانند بارش باران بر روی برف پشته و یا مقادیر پرتوافشانی در روند ذوب شدن برف پشته تأثیرگذار است. برون‌یابی سطح پوشش برف نیز با توجه به تعیین دمای ریزش برف در هر یک از زون‌های ارتفاعی تعیین می‌شود. در آخر، با در نظر گرفتن تمامی این عوامل سطح تحت پوشش برف با درون‌یابی و برون‌یابی سطح پوشش برف استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS به دست می‌آید. بر اساس الگوریتم مالچر عامل ذوب تابعی از درجه حرارت بحرانی و فاکتور درجه-روز است و طبق معادله زیر بیان می‌شود (Malcher & Heidinger, 2001):

$$\Delta M(t_1, t_2) = \sum_{t_1}^{t_2} (aT) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن ΔM : ژرفای تجمعی ذوب برف، a : فاکتور درجه-روز و T : دمای بحرانی است.

سطح تحت پوشش برف با توجه به دمای بحرانی، بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود (نجف‌زاده، ۱۳۸۳):

$$S(t_n) = S(t_{n-1}) - \frac{S(t_1) - S(t_2)}{\Delta M(t_1, t_a) + \Delta M(t_b, t_2)} \cdot \Delta M(t_{x-1}, t_x) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن $S(t_n)$: مساحت تحت پوشش برف در روز n ام، ΔM : میزان ذوب، t_1 : روز شروع ذوب، t_2 : روز خاتمه ذوب، $t_{a,b}$: فاصله زمانی بدون ذوب، t_x : فاصله زمانی دارای ذوب است.

۳-۵. شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف

در این نوشتار برای مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوزه آبخیز سد کرج از مدل SRM که سطح تحت پوشش برف را از طریق تصاویر ماهواره‌ای تأمین و به عنوان یکی از متغیرهای اساسی وارد مدل می‌نماید، استفاده شده است. مدل‌های کمی در زمینه هیدرولوژی وجود دارند که از داده‌های سنجش از دور به عنوان ورودی اطلاعات استفاده می‌کنند. یکی از مدل‌هایی که از داده‌های دور سنجی به صورت مستقیم استفاده می‌کند مدل هیدرولوژیکی SRM است (Martinez & Rango, 1996). این مدل برای اولین بار توسط Martinez (1975) به منظور مدیریت صحیح منابع آب در حوزه‌های کوهستانی آلپ ارائه شده و نسخه تحت ویندوز آن در سال ۲۰۰۳ ارتقا یافته است. برای محاسبه جریان ناشی از بارش باران و ذوب برف در این مدل نیاز به ورود ۱۴ پارامتر و متغیر به ترتیب ذیل هستیم: مساحت و ارتفاع هیپسومتریک حوزه، نواحی ارتفاعی به عنوان ویژگی‌های فیزیکی حوزه و دما، بارش، سطح تحت پوشش برف، جریان اندازه‌گیری شده به عنوان متغیرهای ورودی و ضریب جریان برف، ضریب رواناب باران، فاکتور ذوب، گرادیان دما، دمای بحرانی، سطح مشارکت‌کننده در بارش، ضریب فروکش جریان و زمان تأخیر به عنوان پارامترهای ورودی به مدل. ایستگاه سیرابه دلیل قرار داشتن در قسمت تقریباً "خروجی حوزه و همچنین به علت دارا

بویژه حوضه‌های کوهستانی می‌تواند اطلاعات بسیار با اهمیتی را در اختیار مدل‌های هیدرولوژیکی قرار دهد. در تحقیق راه چمنی و شفیع (۱۳۶۷) از تصاویر سنجنده MSS در طی ۳ تاریخ استفاده کرده بودند. با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر ماهواره لندست نسبت به تصاویر سنجنده‌های هواشناسی از لحاظ مدل‌سازی هیدرولوژیکی به دلیل تغییرات مکانی و زمانی زیاد پدیده برف قدرت تفکیک زمانی تصاویر با تعداد زیاد در فصل انباشت و ذوب برف نیز در مدل‌سازی هیدرولوژی برف حائز اهمیت فراوان است. تصاویر ماهواره‌ای MODIS با قدرت تفکیک زمانی یک روز پتانسیل لازم در برآورد بهتر سطح تحت پوشش برفی را دارا هستند.

اعتبارسنجی نقشه‌های سطح تحت پوشش برف حاصل از داده‌های سنجنش از دور با داده‌های برف‌سنجی دارای محدودیت فراوانی است. به عنوان نمونه می‌توان دلایل زیر را برای محدودیت داده‌های اندازه‌گیری زمینی در اعتبارسنجی نقشه‌های حاصل عنوان نمود:

- ۱- از لحاظ مکانی داده‌های برف‌سنجی و دورسنجی دارای شرایط یکسان نیست.
- ۲- تشتک برف‌سنجی نسبت به داده‌های سنجنش از دور با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر اندازه کوچک‌تری را دارا هستند.
- ۳- داده‌های برف‌سنجی تنها می‌توانند برف و زمین را از یکدیگر تفکیک نمایند.
- ۴- میان‌نقاط کنترل زمینی و قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای اختلاف وجود دارد. به عبارت دیگر سطح یک پیکسل ۵۰۰×۵۰۰ متر بوده که نقاط کنترل زمینی سطح کمتری را پوشش می‌دهند بنابراین ممکن است درصدی از سطح یک پیکسل دارای برف نباشد.
- ۵- تداوم بین داده‌های برف‌سنجی زمینی موجود نیست. بنابراین داده‌های اندازه‌گیری زمینی یکی از گزینه‌های کمتر عملی در اعتبارسنجی نقشه‌های پوشش برفی ناشی از داده‌های دورسنجی است (Simpson et al., 1998).

با توجه به هیدروگراف در سال آبی ۸۱-۸۰ دیده می‌شود که حجم جریان در فصل ذوب بویژه در ماه آوریل به بیشترین مقدار خود می‌رسد و از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه در ماه‌های سپتامبر تا مارس (مهر الی اواخر اسفند) به ناگاه به ۳۵ متر مکعب بر ثانیه در ماه آوریل (اواسط فروردین) می‌رسد. که این میزان دبی در طول فصل بهار ادامه می‌یابد. هیدروگراف خروجی در ابتدا بیان‌گر این مطلب است که عمده بودجه آبی حوزه آبخیز سد کرج از بارش برف تأمین می‌شود. همچنین اثر تأخیری برف بر روی جریان حوزه نیز در هیدروگراف‌های خروجی دیده می‌شود که لزوم مدیریت منابع آب این حوزه را در کاهش خسارت‌های ناشی از سیل ذوب برف در اوایل فصل ذوب و در طی فصل بهار با بارش باران در روزهای گرم این فصل که دمای قطرات باران بالا است را گوشزد می‌نماید. مدل SRM برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف سطح تحت پوشش برف را در حوزه‌هایی که فاقد آمار برف‌سنجی است، از طریق تأمین این داده‌ها از تصاویر ماهواره‌ای فراهم می‌کند. این مسئله با توجه به این که در ایران در بیشتر حوزه‌ها برداشت داده‌های برف‌سنجی صورت نمی‌پذیرد یک برتری بسیار عالی به شمار می‌آید. ارزیابی جریان شبیه‌سازی شده با مدل رواناب حاصل از ذوب برف از نقطه نظر توابع ارزیابی که نحوه کارکرد مدل را نتیجه می‌دهد با دو شاخص ضریب تبیین و تفاضل حجم در سال آبی ۸۱-۸۰ با نتایج حاصل از تحقیقات Songwen et al. (2003) در حوزه آبخیز ریوگراند با تفاضل حجمی ۱۲/۱ و ۱۰/۳ و ضریب تبیین ۰/۸۹ و ۰/۷ مطابقت می‌نماید. نتایج حاصل از تحقیقات Schaper & Seidel (2000) که رواناب حاصل از ذوب برف را در حوزه ماسا- بلاتن با مدل SRM با ضریب تبیین ۰/۶۴ و تفاضل حجم ۳۱/۶% به دست آمده است نیز نتایج حاصل از این تحقیق را تأیید می‌کند.

سپاسگزاری

نگارندگان از داوران محترم که با صبر و شکیبایی مقاله حاضر را نقد و بررسی نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

بودن آمار کامل و دقیق به عنوان ایستگاه معرف در نظر گرفته و داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در این ایستگاه وارد مدل شد. با محاسبه ورود اطلاعات متغیرها و پارامترهای یاد شده، مدل هیدرولوژیکی رواناب حاصل از ذوب برف (SRM) اجرا شد. میزان دبی محاسبه شده توسط مدل و نیز جریان اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میزان خطای حاصل از مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از آزمون مقایسه میانگین‌ها (t-test)، ۰/۴۷۵ محاسبه شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده از نمای آماری t-test دیده می‌شود که دبی اندازه‌گیری شده و مشاهداتی اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵% ندارند. مقادیر ضریب تبیین و تفاضل حجم حاصل از مدل‌سازی ذوب برف نیز به ترتیب ۰/۴۶۷۸ و ۰/۱۲۹۲ محاسبه شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

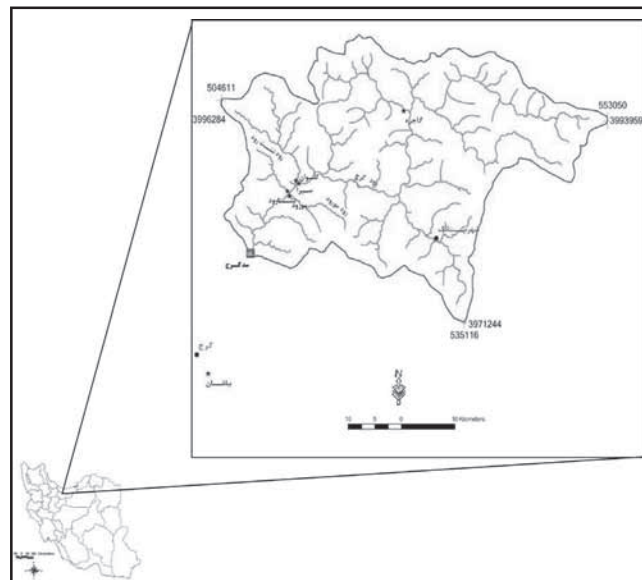
شاخص پوشش برفی به دلیل در نظر گرفتن اختلاف طیفی ما بین پدیده‌های بازتابش نزدیک به برف مانند ابر الگوریتم قابل قبولی را ارائه می‌دهد. با در نظر گرفتن این که مدل رواناب حاصل از ذوب برف به داده‌های روزانه سنجنش از دور برای مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف نیازمند است و نیز این مطلب که به کارگیری روش‌های متعدد حتی با دقت بالاتر مستلزم صرف وقت و هزینه است قابل توجه بوده و در تهیه نقشه پوشش برفی روزانه برای مدل‌سازی ذوب برف مورد استفاده قرار می‌گیرد. از عواملی که موجب تغییر در برآورد سطح تحت پوشش برفی حاصل از شاخص NDSI می‌شود، تغییر پذیری در اندازه دانه‌های برف است. همچنین تغییر در زاویه دید سنجنده و درجات روشنایی برف ناشی از ناهمسانی پوشش برف و تغییر شرایط جوی می‌تواند در تجزیه طیف توسط شاخص پوشش برفی خطا ایجاد نماید. نتایج پژوهشگران نشان می‌دهد که تغییرات سطح پوشش برف و شاخص پوشش برفی به صورت معنی‌داری به یکدیگر وابسته‌اند بویژه زمانی که به صورت منطقه‌ای و در سطح وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به پروفیل‌های بازتابشی باندهای شاخص پوشش برفی می‌توان چنین نتیجه گرفت که باندهای یاد شده در شاخص پوشش برفی توان جداسازی برف را از سایر پدیده‌ها مانند زمین و ابر را دارا است. آستانه گذاری‌های یاد شده بر روی باندهای ۴ و ۶ نیز برف را از سایر منابع رطوبتی جداسازی می‌نماید که نتایج حاصل از تحقیقات Salomonson & Appel (2004) در سه حوزه آبخیز در کانادا، آلاسکا و سیبری و همچنین با تحقیقات Hall et al. (2002) مطابقت دارد. با توجه به نتایج حاصل از نیرخ تصاویر تاریخ‌های ۲۰۰۱/۱۲/۲۵ و ۲۰۰۲/۲/۲ و ۲۰۰۲/۴/۳۰ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که میزان بازتابش طیفی سطح برف در ناحیه باند مرئی بالاتر از پدیده زمین و میزان بازتابش برف در ناحیه باند مادون قرمز نسبت به زمین بسیار کم است، با توجه به این که باند مادون قرمز حامل اطلاعات دمایی است و برای مطالعه آن لازم است تا میزان تابش رسیده به سنجنده به میزان تابش از پدیده تصحیح شود اما بدون تبدیل دمای روشنایی (Brightness Temperature) به دمای درخشندگی (Radiance) می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که میزان دمای سطح (Surface Temperature) زمین از برف بیشتر است. با توجه به نتایج حاصل از نیرخ در تصاویر ۲۰۰۲/۱/۶ و ۲۰۰۲/۴/۳۰ می‌توان چنین ابراز داشت که میزان بازتابش طیفی ابر بسیار نزدیک به برف بوده و میزان بازتابش زمین در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. در ناحیه باند مادون قرمز دمای روشنایی ابر و برف از زمین کمتر است همچنین نتایج، گویای آن است که میزان دمای روشنایی ابر از برف نیز کمتر است که این مسئله می‌تواند از قرارگیری ابر در ناحیه ارتفاعی بالاتر ناشی شود. سنجنده MODIS با دارا بودن باند مادون قرمز میانی و با ترکیب با باندهای مرئی می‌تواند برف را از انواع پدیده‌های ابر و زمین تفکیک نماید. با توجه به قدرت تفکیک نسبتاً پایین تصاویر MODIS نسبت به تصاویر با قدرت تفکیک بالا مانند لندست فرایند زمین مرجع بایستی با دقت بالایی صورت پذیرد. تصاویر ماهواره‌ای رواناب‌سازی ذوب برف به عنوان یکی از منابع مهم آب در حوضه‌های کشور

جدول ۱- ویژگی های تصاویر MODIS مورد استفاده

ماهواره	روز	ماه	سال	ردیف
Terra(am)	۲۵	دسامبر	۲۰۰۱	۱
Terra(am)	۶	ژانویه	۲۰۰۲	۲
Terra(am)	۲	فوریه	۲۰۰۲	۳
Terra(am)	۲	مارس	۲۰۰۲	۴
Terra(am)	۳۰	آوریل	۲۰۰۲	۵

جدول ۳- سطح تحت پوشش برف در سال آبی ۸۱-۸۰ در تصاویر MODIS به کیلومتر مربع

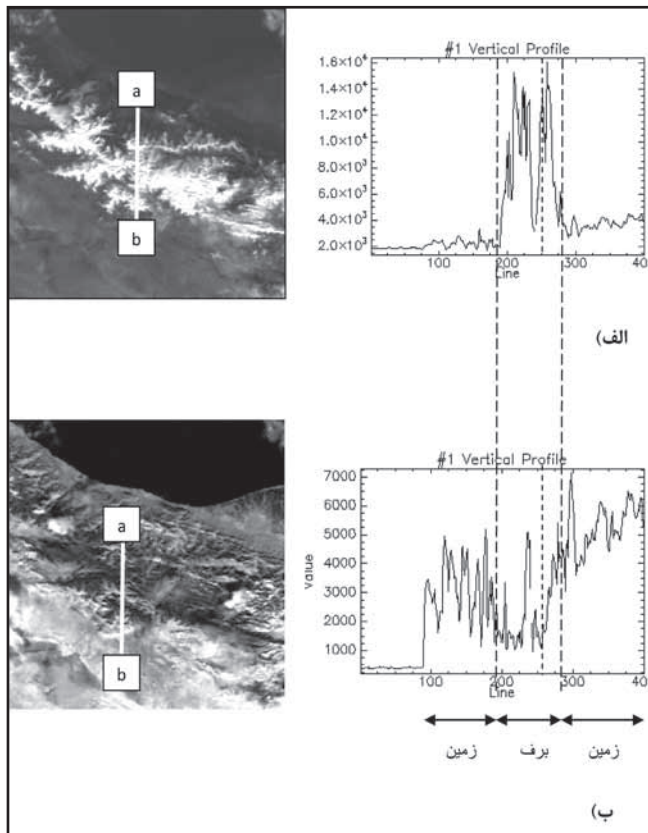
تاریخ	سطح پوشش برف	سطح تحت پوشش بدون برف
۸۰/۱۰/۴	۶۹۲/۵۴۶	۱۲۶/۲۲
۸۰/۱۰/۱۶	۵۸۹/۹۱	۲۲۴/۷۰
۸۰/۱۱/۱۳	۵۸۹/۲۹	۹۰/۳۲
۸۰/۱۲/۱۱	۷۰۶/۸۲	۱۰۷/۷۹
۸۱/۲/۱۰	۱۹۴/۲۲	۶۲۰/۳۹



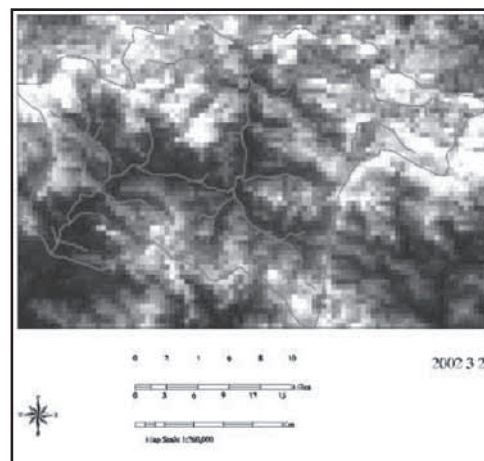
شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد کرج و ایستگاه های هیدرومتری

جدول ۲- میزان میانگین مربعات خطای تولید شده در فرایند زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره ای MODIS

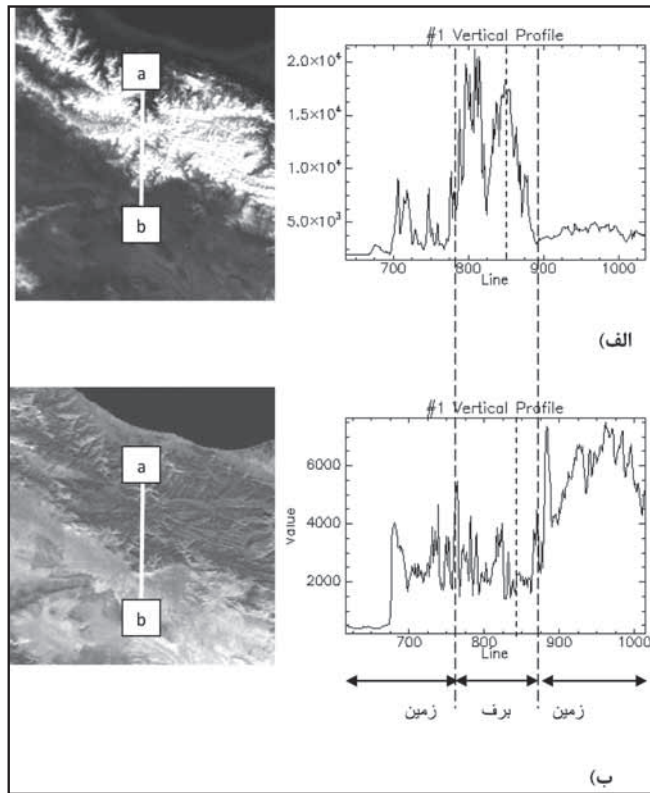
سال	ماه	روز	تعداد نقاط کنترل	RMSE
۲۰۰۱	۱۲	۲۵	۳۸	۰/۹۵۰۱
۲۰۰۲	۱	۶	۲۹	۰/۸۱۶۰
۲۰۰۲	۲	۲	۳۶	۰/۹۷۱۷
۲۰۰۲	۳	۲	۴۰	۰/۶۰۷۸
۲۰۰۲	۴	۳۰	۳۹	۰/۷۳۹۳



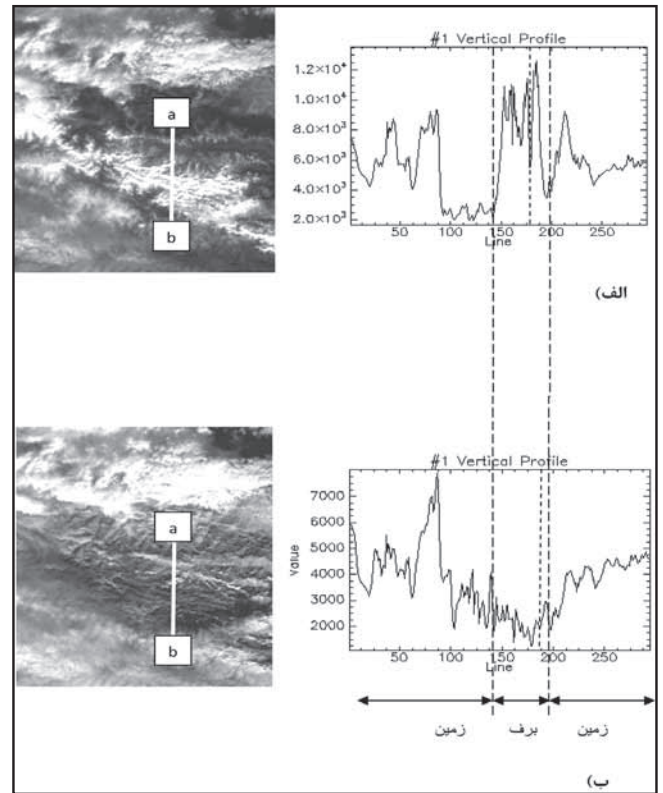
شکل ۳- نیمرخ بازتابی در تصویر تاریخ ۲۰۰۱/۱۲/۲۵ ، الف) باند مرئی ب) باند مادون قرمز میانی



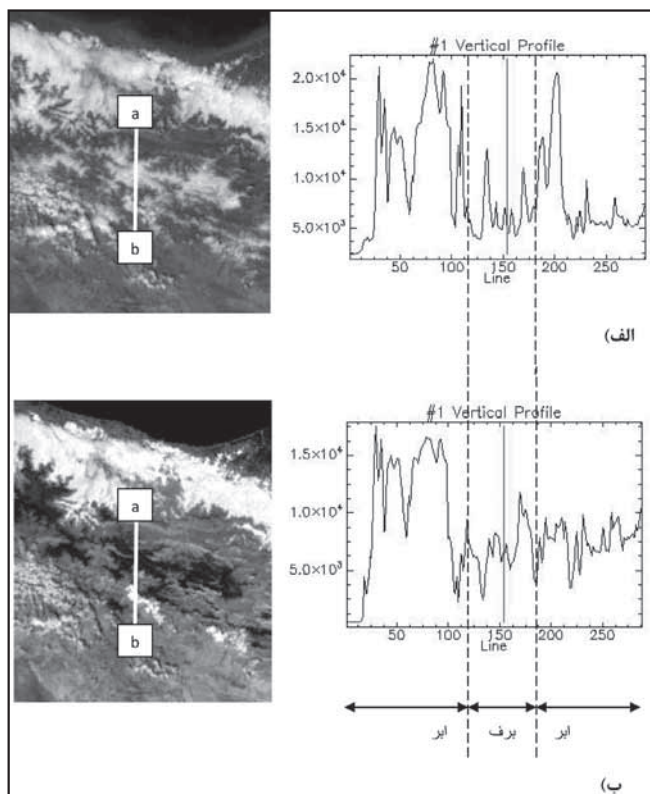
شکل ۲- آزمون دقت فرایند زمین مرجع با استفاده از لایه آبراهه های حوزه



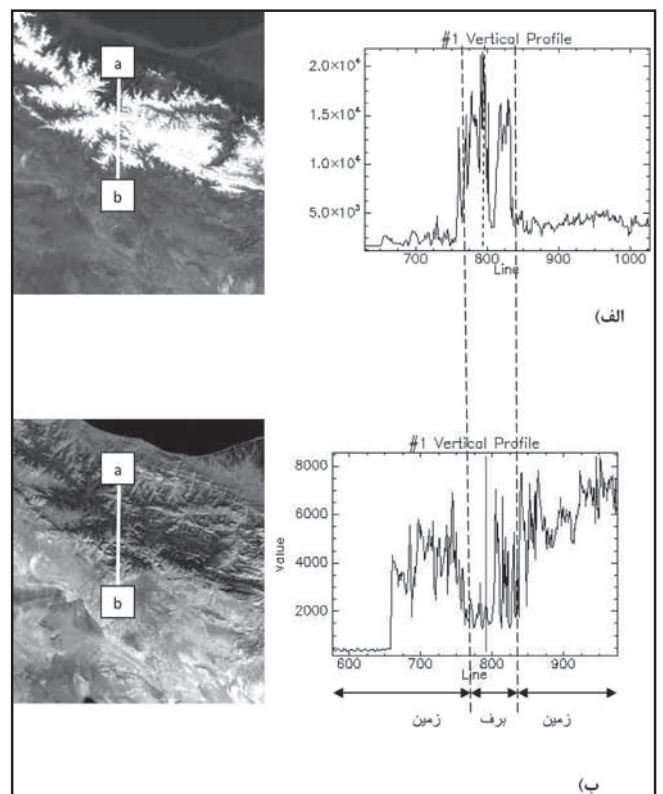
شکل ۴- نیمرخ بازتابی در تصویر تاریخ ۲۰۰۲/۲/۲، الف) باند مرئی ب) باند مادون قرمز میانی



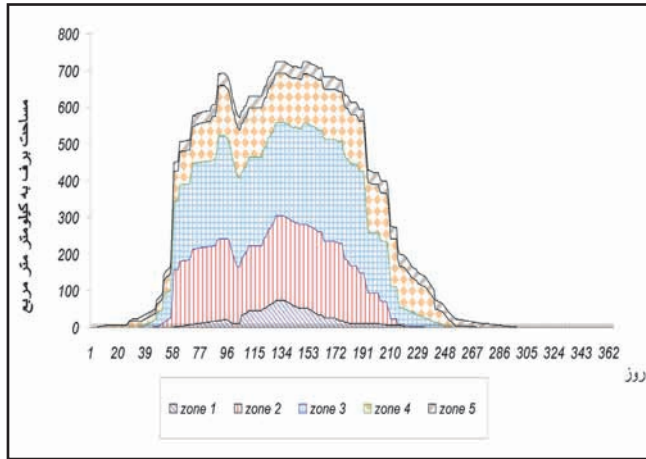
شکل ۵- نیمرخ بازتابی در تصویر تاریخ ۲۰۰۲/۱/۶، الف) باند مرئی ب) باند مادون قرمز میانی



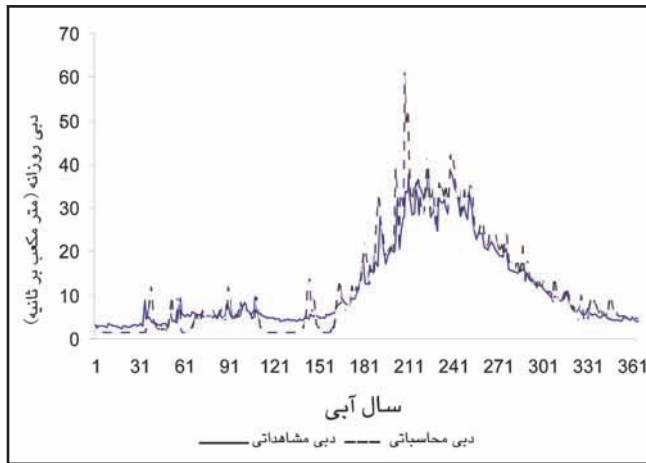
شکل ۶- نیمرخ بازتابی در تصویر تاریخ ۲۰۰۲/۴/۳۰، الف) باند مرئی ب) باند مادون قرمز میانی



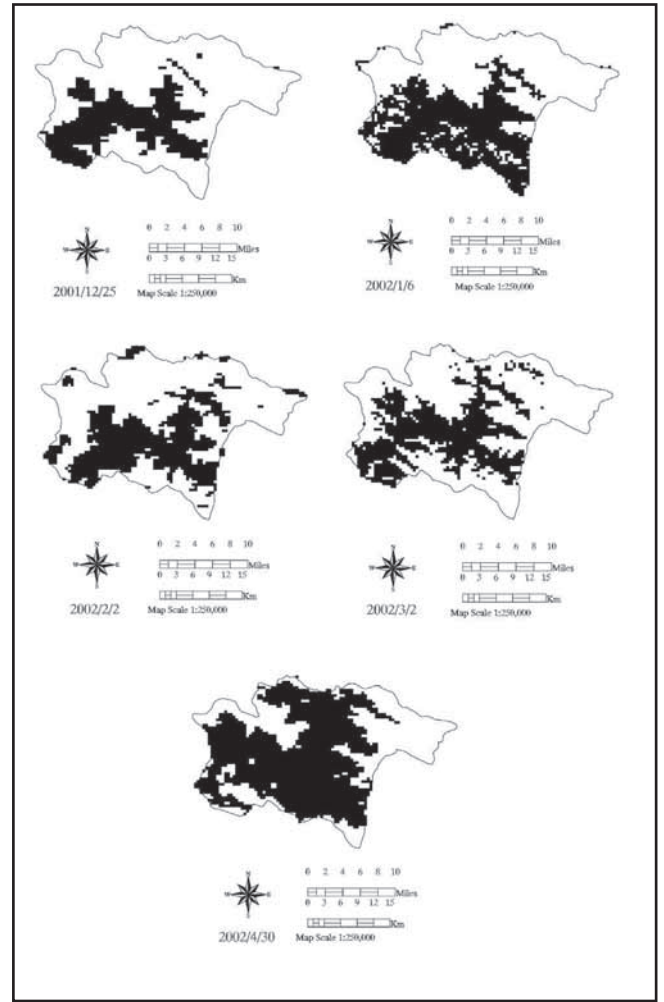
شکل ۷- نیمرخ بازتابی در تصویر تاریخ ۲۰۰۲/۳/۲، الف) باند مرئی ب) باند مادون قرمز میانی



شکل ۹- سطح تحت پوشش برف درون‌یابی شده به روزهای فاقد دریافت تصاویر ماهواره‌ای در سال آبی ۸۱-۸۰



شکل ۱۰- جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM



شکل ۸- تغییرات سطح پوشش برف استخراج شده از الگوریتم شاخص پوشش برفی در سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ (پیکسل‌های سفید= برف، پیکسل‌های تیره= زمین و ابر)

کتاب‌نگاری

- پرهت، ج، ۱۳۸۱- مدل توزیعی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور، رساله دکتری، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد تهران.
- جلوخوانی نیارکی، م، ۱۳۸۲- تهیه نقشه پوشش برف با استفاده از تصاویر ماهواره نوآ، مطالعه موردی حوزه آبخیز سد کرج، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۲۱ صفحه.
- دینی، غ، ضیائی، پ، فرج‌زاده، م، ۱۳۸۵- بررسی تغییرات سطوح برفی در ارتفاعات البرز مرکزی با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS و AVHRR، مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۷ صفحه.
- راه‌چمنی، ع، شفیعی علویچه، ر، ۱۳۶۷- کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در هیدرولوژی برف، گزارش مأموریت به مرکز سنجش از دور ایران، دفتر بررسی‌های منابع آب وزارت نیرو.
- نجف‌زاده، ر، ابریشم‌چی، ا، و تجربی، م، ۱۳۸۳- شبیه‌سازی جریان رواناب رودخانه با مدل SRM و با استفاده از داده‌های سنجش از دور، مجله آب و فاضلاب، شماره ۵۲.

References

- Armstrong, R., Hardman, M., 1991- Monitoring global snow cover. Proceedings of IGARSS, Remote sensing: Global monitoring for earth management, IEEE, vol. 4, 1947– 1949 pp.
- Barton, J. S., Hall, D. K. & Riggs, G. A., 2001- Remote sensing of fractional snow covers using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, Proceedings of the 57th Eastern Snow Conference, May 17–19, 2000, Syracuse, NY, 171– 183 pp.
- Dozier, J., 1989- Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper, Remote Sensing of Environment, no. 28, 9–22 pp.
- Engman, E. T. & Gurney, R. J., 1992- Remote Sensing in hydrology, Chapman and Hall, pp. 225
- Ghanbarpour, M. R., Saghafian, B., Saravi, M. & Abaspour, K., 2007- Evaluation of spatial and temporal variability of snow cover in a large mountainous basin in Iran, Nordic hydrology journal, vol. 38, no. 1, 45-58 pp.
- Hall, D. K., Foster, J. L., Salomonson, V.V., Klein, A. G. & Chien, J. Y. L., 2005- Error Analysis for Global Snow-Cover Mapping in the Earth Observation System (EOS) Era, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt
- Hall, D. K., Riggs, G. A. & Salomonson, V. V., 1995- Development of the methods for mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. Remote Sensing of Environment. no. 54, 127-140 pp.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DeGirolo, N. E., Bayr, K. J. & Jin, J. M., 2002- MODIS Snow-cover products. Remote Sensing of Environment, 83, 181– 194 pp.
- Julienne, C., Jason, E. & Haran, T., 2006- Evaluation of the MODIS daily snow albedo product over the Greenland ice sheet, Remote Sensing of Environment Journal, vol.105, 155-171 pp.
- Kite, G. W., 1991- Watershed model using satellite data applied to a mountain basin in Canada. Journal of Hydrology, no. 128(1– 4), 157–169 pp.
- Malcher, P., Heidinger, M., 2001- Processing and data assimilation scheme for satellite snow cover products in the hydrological model, 28.04. 2004, version 1, Envisnow, EVG1-CT-2001-00052
- Martinez, J. & Rango, A., 1996- Parameter value for snowmelt runoff modeling, J.Hydrology, no. 84, 197-219 pp.
- Nolin, A. & Liang, S., 2000- Progress in bidirectional reflectance modeling and applications for surface particulate media: Snow and soils. Remote Sensing Reviews, no. 14, 307–342 pp.
- Salomonson, V. V. & Appel, I., 2004- Estimating Fractional Snow Cover from MODIS Using the Normalized Difference Snow Index, Remote Sensing of Environment journal, no. 89, 351-360 pp.
- Schaper, J. & Seidel, K., 2000- Modeling daily runoff from snow and glacier melt using remote sensing data. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow, Dresden/FRG, 10 pp.
- Seidel, K., Brusch, W. & Steinmeier, C., 1994- Experiences from Real Time runoff Forecasts by Snow Cover Remote Sensing. Proceedings IGARSS, “surface and atmospheric remote sensing: Technologies, data analysis and interpretation”. IEEE, vol. 4, 2090– 2093 pp.
- Simpson, J. J., Stitt, J. R. & Sienko, M., 1998- Improved Estimates of Aerial Extent of Snow Cover From AVHRR Data, Journal of Hydrology, no. 204, 1-23 pp.
- Singh, P. & Jain, S. K., 2003- Modelling of streamflow and its components for a large Himalayan basin with predominant snow melt yields. Hydrological Sciences Journal, 48, 257– 275 pp.
- Songwen, L., Klein, A. G. & Over, T. M., 2003- An assessment of the suitability of modis snow products for simulating stream flow in the upper Rio Grande river basing using the snowmelt runoff model
- Tekeli, A. Emre., Akyurek, Z., Sorman, A. Arda., Sensoy, A. & Sorman, U., 2005- Using MODIS Snow Cover Maps in Modeling Snowmelt Runoff Process in the Eastern Part of Turkey, Remote Sensing of Environment. No. 97, 216-230 pp.
- Townshend, J. R. G., 1992- Land cover, International Journal of Remote Sensing, no. 13, 1319– 1328 pp.
- Wilkinson, G. G., 1996- Classification algorithms—where next? In: E. Brivio, P. A. Brivio, & A. Rampini (Eds.), Soft computing in remote sensing data analysis, Singapore: World Scientific, 93-99 pp.