

شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضه شهرچای با استفاده از مدل SRM

سعید جهانبخش اصل: استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

یعقوب دین‌پژوه: دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمدحسین عالی‌نژاد*: دانشجوی ارشد آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

خلیل ولیزاده کامران: دانشیار گروه سنجش از دور، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مرتضی پرهیزکار: دانشجوی ارشد رشته سنجش از دور، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۶/۲۷ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷، صص ۱-۱۴

چکیده

با توجه به اهمیت بارش برف در تأمین آب در مناطق کوهستانی، برآورد دقیق آب معادل برف و همچنین تغییرات سطح پوشش آن، در بخش‌های کشاورزی، انرژی، مدیریت مخزن و هشدار سیل مؤثر است. در این مطالعه، به منظور برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه شهرچای، نخست سطح پوشش برف برای سال آبی ۹۲ با استفاده از تصاویر روزانه ماهواره ترا-مودیس با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در محیط نرم‌افزار ENVI استخراج شد. آنگاه با استفاده از الحاقیه Hec_GeoHMS در نرم‌افزار GIS، مشخصات فیزیوگرافی حوضه به دست آمد. در مرحله بعد، با وارد کردن داده‌های پوشش برف، متغیرهای هواشناختی و شاخص‌های لازم به مدل SRM، رواناب ناشی از ذوب برف شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد، سهم جریان رودخانه از ذوب برف در ماه‌های فروردین و اردیبهشت چشمگیر است، ولی با افزایش درجه حرارت هوا در خردادماه، سهم باران در جریان پررنگ‌تر است. همچنین نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت بالای این مدل است، به طوری که ضریب تعیین (R^2) معادل ۰/۹ و درصد خطای حجمی آن (D_V) ۱/۹۶ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: برف، سنجش از دور، رواناب، SRM، مودیس، شهرچای

۱- مقدمه

برف یکی از اشکال بارش است که به دلیل طبیعت ایجاد تأخیر در تبدیل آن به رواناب، تفاوت خاصی با سایر مؤلفه‌های بیلان آب دارد. پوشش برفی در یک حوضه بر بیلان آب و انرژی آن حوضه اثر می‌گذارد؛ بنابراین، عامل مهمی در تغییرات آب و هوایی یک منطقه محسوب می‌شود. تعیین تغییرات زمانی ذوب برف و آب معادل برف برای پیش‌بینی سیلاب، مدیریت مخازن و کشاورزی یک منطقه بسیار اهمیت دارد (کاراموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۱۶۸).

۱-۱- شرح و بیان مسأله پژوهش

در بیشتر حوضه‌های کوهستانی کشور آمار و اطلاعات برف‌سنجی در دسترس نیست و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مرتفع با اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی تناسب ندارد؛ بنابراین، ضرورت استفاده از روش‌های غیرمستقیم، مانند تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای برای به‌دست‌آوردن شاخص‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی مطرح می‌شود و این یکی از مؤثرترین و باصرفه‌ترین روش در تخمین رواناب ناشی از برف است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نووا^۱ برای پهنه‌بندی پوشش برف در سال ۱۹۶۱ در ایالات متحده آغاز شد و تا به امروز (که قدرت تفکیک مکانی و زمانی تصاویر ماهواره‌ای با شروع به‌کار سنجنده مودیس^۲ افزایش یافته است)، ادامه دارد (کارول و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۷). تخمین دقیق رواناب حوضه‌های آبخیز در مناطق کوهستانی با پوشش برف فصلی، نیاز به یک الگوریتم مناسب برای تخمین رواناب ناشی از ذوب برف به‌عنوان جزئی از سیستم

مدل‌سازی دارد (بیلز و کلاین، ۲۰۰۳: ۴۴۹).

۱-۲- بررسی پیشینه موضوع

مدل SRM^۳ برای نخستین بار در سال ۱۹۷۵ به‌منظور شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوچک کوهستانی ارائه شد (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۳). مالچر و هیدینگر^۴ (۲۰۰۱)، با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس سطح پوشش برف چهار زیر حوضه از حوضه اتزال در شرق اتریش را به دست آوردند و با استفاده از مدل SRM رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کردند. مدل SRM برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در ارتفاعات آلپ سوئیس را سیدل و مارتینک^۵ (۲۰۰۲) به‌کار گرفتند و رواناب ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست، اسپات و نووا برای ۱۳ زیرحوضه محاسبه شد. در ترکیه تکلی^۶ و همکاران (۲۰۰۵)، به‌منظور مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در بالادست حوضه آبریز فرات از منحنی‌های تخلیه برف (استخراج شده از نقشه‌های پوشش برف مودیس) استفاده کردند. نتایج اولیه مطالعه آنها نشان داد، این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب برف منطقه دارد. هارشبرگر^۷ و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل SRM، داده‌های برف سنجنده مودیس و اطلاعات ایستگاه‌های تله‌متری برف در حوضه‌های کوهستانی غرب ایالات متحده، به بررسی جریان‌های کوتاه‌مدت تا متوسط (۱ تا ۱۵ روزه) پرداختند و به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل و کمک به اجرای آن از روش شاخص درجه-روز برای تخمین آب معادل

3 - Snowmelt Runoff Model

4 - Malcher and Heidinger

5 - Seidel and Martinec

6 - Tekeli

7 - Harshburger

1- NOAA

2- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

مدل SRM رواناب حاصل از ذوب برف حوضه‌های ليقوان‌چای و صوفی‌چای آذربایجان شرقی را شبیه‌سازی کرد. نتایج مطالعه وی بیانگر سهم ۲۴ تا ۴۲ درصدی رواناب ناشی از ذوب برف در این دو حوضه بود. شهابی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس با تفکیک ۵۰۰ متر و مدل SRM، رواناب برف را در حوضه زاب واقع در استان آذربایجان غربی شبیه‌سازی کردند. نتایج گویای مقدار ضریب تبیین ۰/۸۹ و درصد خطای حجمی معادل ۰/۱۴ بود.

۳-۱- اهداف پژوهش

رودخانه شهرچای در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این رود از وسط شهر ارومیه می‌گذرد و مهم‌ترین منبع تأمین آب این شهرستان به‌شمار می‌رود. سد شهرچای در ۱۲ کیلومتری بالادست این شهر و بر روی این رودخانه احداث شده است و نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز در بخش تأمین آب شهری، کشاورزی و صنعت منطقه ایفا می‌کند. آگاهی از میزان رواناب حاصل از ذوب برف (به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب این سد در فصل ذوب) برای برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت منابع آب منطقه ضرورت دارد. هدف این مطالعه، شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده تصاویر ماهواره‌ای و مدل SRM در حوضه شهرچای ارومیه است.

۴-۱- محدوده و قلمرو پژوهش

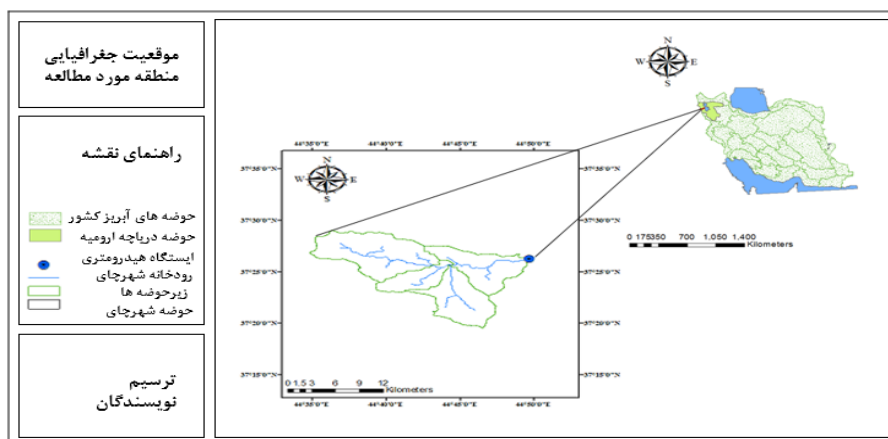
حوضه آبریز شهرچای ارومیه از سمت شمال به حوضه آبریز نازلوچای، از جنوب به حوضه آبریز باراندوزچای، از غرب به کشور ترکیه و از شرق به سد شهرچای محدود می‌شود. مساحت تقریبی آن ۱۶۷/۷۵ کیلومترمربع است. موقعیت جغرافیایی آن بین 37° تا 82° و 44° تا 58° طول شرقی و 32° تا 37°

برف استفاده کردند. نامبردگان از حداکثر و حداقل دمای بحرانی برای جداسازی بارش جامد و مایع و یا مخلوطی از باران و برف استفاده کردند. مقایسه این شبیه‌سازی نشان داد، نتایج حاکی از عملکرد رضایت‌بخش مدل بود. طاهر و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از مدل SRM به تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب ذوب برف حوضه رودخانه هونزاد در پاکستان پرداختند. یانگ گنگ^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ذوب برف حوضه کایدو در شمال غربی چین پرداختند، آنها از خروجی مدل HADCM3 با سناریوهای مختلف بهره بردند. نتایج بیانگر افزایش رواناب در فصل بهار و کاهش قابل ملاحظه آن در فصل تابستان بود. نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳)، تغییرات سطح پوشش برف را در یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز زاینده‌رود (پلاسجان) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نووا در دو سال زراعی شامل سال‌های ۷۲-۱۳۷۰ استخراج کردند. این پژوهشگران همچنین برای شبیه‌سازی رواناب از مدل SRM استفاده کردند، طوری که مدل، دبی جریان روزانه را با ضریب تعیین ۰/۹۵ شبیه‌سازی کرد. رسولی و ادهمی (۱۳۸۶)، در پژوهشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و براساس الگوریتم‌های مختلف، سطح پوشش برف حوضه آبریز آجی‌چای را محاسبه کردند. فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه آبریز بازفت از تصاویر ماهواره‌ای ۸ روزه مودیس و مدل SRM استفاده کردند. نتایج کاربرد مدل، شبیه‌سازی موفق و قابل‌قبولی را نشان داد. انصاری (۱۳۹۱)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و

^۱ - Yonggang

ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه واقع است. جریان آب رودخانه پس از عبور از دره‌های ارتفاعات یادشده، وارد سد شهرچای می‌شود. شکل ۱ موقعیت حوضه شهرچای را نشان می‌دهد.

۴۸° ۳۷ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع ایستگاه هیدرومتری برده‌سور از ۱۵۹۱ متر از سطح دریا و حداکثر ارتفاع حوضه معادل ۳۵۷۴ متر در مرز ایران و ترکیه است. متوسط بارش سالانه حوضه ۹/۶۱۴ میلی‌متر است. سرشاخه‌های این حوضه در



شکل ۱- موقعیت حوضه شهرچای ارومیه در میان حوضه‌های آبریز کشور

شد. همچنین، از داده‌های دما و بارش ایستگاه سینوپتیک ارومیه و میزان دبی روزانه جریان رودخانه در ایستگاه هیدرومتری برده‌سور (واقع در خروجی حوضه) در دوره آماری دی‌ماه سال ۹۱ تا خردادماه سال ۹۲ استفاده شد. جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۱-۵- روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف، همزمان از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی هیدرولوژیکی رواناب استفاده شد. بدین‌منظور، نخست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌دست‌آمده از سنجنده مودیس سطح پوشش برف در حوضه شهرچای ارومیه در سال آبی ۱۳۹۲ محاسبه

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

| نام ایستگاه | نوع ایستگاه | طول جغرافیایی | | عرض جغرافیایی | | ارتفاع (متر) |
|-------------|-------------|---------------|-------|---------------|-------|--------------|
| | | درجه | دقیقه | درجه | دقیقه | |
| ارومیه | سینوپتیک | ۳۷ | ۴۰ | ۴۵ | ۰۳ | ۱۳۲۸ |
| برده‌سور | هیدرومتری | ۳۷ | ۴۲ | ۴۴ | ۶۲ | ۱۵۹۱ |

اطلاعات یادشده، شامل دو بخش به شرح زیر بودند: ابتدا مشخصات فیزیوگرافی حوضه، شامل مرز حوضه، نقشه آبراهه‌ها، مساحت و مناطق ارتفاعی از

سپس اطلاعات هواشناسی و سطح پوشش برفی (از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای) به‌عنوان ورودی مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف، استفاده شد.

است، قابل تفکیک هستند؛ بنابراین، اگر بازتابش باند ۲ بزرگتر از ۱۱ درصد و NDSI هم بیشتر از ۰/۴ باشد، آن پیکسل، برف در نظر گرفته می‌شد و اگر بازتابش باند ۴ مودیس کمتر از ۱۰ درصد می‌بود، سطح زمین در آن پیکسل، برف در نظر گرفته نمی‌شد (کلاین و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۷۴۲).

در مرحله نهایی عملیات پردازش تصاویر شامل تبدیل سیستم مختصات، عملیات برش تصویر، جداسازی منطقه مورد مطالعه و تفکیک مناطق ارتفاعی، با استفاده از ابزار پردازش تصویر در نرم‌افزار GIS و ENVI صورت گرفت. در نهایت با روی هم قراردادن لایه‌های اطلاعاتی شامل لایه‌های کلاس ارتفاعی و تصاویر سطح برف، سطح پوشیده از برف به تفکیک هر کلاس ارتفاعی تعیین شد.

همان‌طور که اشاره شد، برای شبه‌سازی جریان حاصل از ذوب برف در منطقه مورد مطالعه از مدل SRM استفاده شد. در این مدل، رواناب ناشی از بارندگی و ذوب برف در هر روز محاسبه و به جریان پایه رودخانه اضافه شد و سپس رواناب روزانه با استفاده از معادله زیر تخمین زده شد (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۸).

(۲)

$$Q_{n+1} = [C_{Sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \frac{A \cdot 10000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1}$$

که در رابطه فوق: Q : دبی روزانه ($m^3 \cdot s^{-1}$)، C_s : ضریب رواناب برف، a : عامل درجه روز ($cm \cdot ^\circ C^{-1}$)، d^{-1} : T : درجه حرارت ایستگاه مبنا ($^\circ C$)، ΔT : گرادیان حرارتی هر ناحیه ارتفاعی، S : نسبت مساحت پوشش برف به مساحت کل حوضه (به درصد)، C_R : ضریب رواناب باران، P : مقدار بارش برف و باران (cm)، A : مساحت حوضه (km^2)، $\frac{10000}{86400}$: ضریب تبدیل واحد $cm \cdot km^2 \cdot d^{-1}$ به cm^3/s : K : ضریب

نقشه DEM به دست آمد. برای این منظور، از الحاقیه Hec_GeoHMS در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد. سپس سطح پوشش برفی از تصاویر سنجنده مودیس در فواصل زمانی ۸ روزه از سایت نووا دریافت و سطح پوشش برف از این داده‌ها درون‌یابی شد که در ادامه نحوه محاسبه سطح پوشش برف به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

در این مطالعه، از تصاویر سنجنده مودیس، برای تخمین مساحت تحت پوشش برف در حوضه شهرچای استفاده شد. محصول سطح برف سنجنده مودیس با استفاده از الگوریتم Snow map و در گام‌های زمانی ۸ روزه تولید شد. الگوریتم برف مودیس در سال ۱۹۹۸ ارائه شد (هال و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۲). این الگوریتم بر پایه شاخص NDSI و بازتابش باندهای ۲ و ۴ است (کمالی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۴۹۶). به دلیل انعکاس پایین برف در باندهای مادون قرمز و انعکاس باندها در باندهای مرئی، این شاخص در تشخیص پوشش ابر از دیگر پدیده‌ها بسیار مفید است. شاخص یادشده از رابطه زیر به دست می‌آید (هال و همکاران، ۱۹۹۵: ۸۶):

$$NDSI = \frac{(band4 - band6)}{(band4 + band6)} \quad (1)$$

در تهیه نقشه پوشش برف، زمانی که پیکسل دارای NDSI بزرگتر و یا مساوی ۰/۴ است، پیکسل برفی در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که کمتر از ۰/۴ باشد، پیکسل عاری از برف فرض شد. در این شاخص پیکسل‌هایی که تقریباً ۵۰ درصد یا بیشترشان را برف پوشانده است، دارای NDSI حداقل ۰/۴ هستند. از آنجایی که آب نیز ممکن است دارای NDSI حدود ۰/۴ باشد، آزمایش دیگری نیز برای جداسازی آب و برف صورت می‌پذیرد. آب و برف به دلیل اینکه بازتابش آب در باند ۲ کمتر از ۱۱ درصد

فروکش جریان، n : شماره روز در یک دوره محاسباتی. هریک از شاخص‌های مذکور می‌توانند با اندازه‌گیری یا بر اساس نظر کارشناسی و با استفاده از خصوصیات حوضه، روابط فیزیکی، تجربی و روابط همبستگی به دست آید (مک کوئن، ۱۹۹۸: ۵۴۸).

درجه حرارت به دو صورت میانگین یا حداقل و حداکثر به مدل وارد می‌شود و به وسیله گرادیان درجه حرارت به متوسط ارتفاع هیسومتریکی منتقل می‌شود. رابطه زیر به ترتیب میانگین درجه حرارت و مقدار تصحیح مورد نیاز برای انتقال دما از ایستگاه مبنا تا متوسط ارتفاع هیسومتریکی منطقه را نشان می‌دهند (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۱۲).

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (۳)$$

$$\Delta T = \gamma \cdot (h_{st} - \bar{h}) \cdot \frac{1}{100} \quad (۴)$$

که در آن γ : شدت گرادیان دما (درجه سانتیگراد در هر ۱۰۰ متر)، h_{st} : ارتفاع ایستگاه هواشناسی (متر)، \bar{h} : متوسط ارتفاع هیسومتریکی منطقه (متر). زمانی که مقدار درجه - روز ($T + \Delta T$) منفی شود، مقدار آن به صورت خودکار به صفر تبدیل می‌شود.

تعمیم بارش نقطه‌ای برای سطح حوضه‌های کوهستانی مشکل و پیچیده است. بارش‌هایی که در ارتفاعات و در دمای کمتر از دمای بحرانی اتفاق می‌افتند، به صورت برف است و تأثیر تأخیری در جریان دارند و اگر دما بیشتر از دمای بحرانی باشد، دبی‌های اوج به وقوع می‌پیوندند.

ضریب رواناب به نسبت رواناب اندازه‌گیری شده به بارش اندازه‌گیری شده گفته می‌شود. در ابتدای فصل ذوب برف تلفات خیلی کم است و در مراحل بعدی زمانی که خاک بدون محافظ باشد، بر اثر رشد گیاهان، تلفات به علت تبخیر - تعرق، برگاب و نفوذ بیشتر

است. در اواخر فصل ذوب برف، ممکن است جریان مستقیم آبراهه‌های ناشی از قطعات برف و باقیمانده توده‌های متشکل از برف آبدار، در بعضی حوضه‌ها رایج باشد که در این صورت تلفات کاهش می‌یابد و ضریب رواناب افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، ضریب رواناب برف و باران متفاوت است و در برنامه رایانه‌ای، مقدار ضریب رواناب برف و ضریب رواناب باران از یکدیگر تفکیک شده‌اند. از میان شاخص‌های SRM، ضریب رواناب اولین گزینه برای واسنجی مدل است (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۱۸).

فاکتور درجه روز به صورت مقدار عمق آب ذوب شده از برف به تعداد درجه - روز تعریف می‌شود و به شکل رابطه زیر بیان می‌شود (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۱۹).

$$M = a \cdot T \quad (۵)$$

که در آن a : فاکتور درجه روز ($cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$)، M : عمق ذوب برف روزانه (cm)، T : تعداد درجه روز ($^\circ C \cdot d$) است. در صورت نبودن داده، فاکتور درجه روز با استفاده از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۲۱).

$$a = 1.1 \frac{P_s}{P_w} \quad (۶)$$

که در آن a : فاکتور درجه روز ($cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$)، P_s : وزن مخصوص برف (kg/m^3)، P_w : وزن مخصوص آب (kg/m^3) است.

مدل SRM این قابلیت را دارد که فاکتورهای درجه روز متفاوت برای حداکثر ۸ کلاس ارتفاعی (که معمولاً ۲ بار در ماه تغییر می‌کند)، به مدل معرفی شود. در برخی مواقع اثر وقوع یک پیشامد، مانند بارش برف جدید، مقدار a باید به صورت دستی اصلاح و وارد مدل شود (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۲۱).

درصد و S : ضریب نگهداشت سطحی است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (۸)$$

که در آن CN: شماره منحنی خاک حوضه و بسته به نوع پوشش منطقه از ۵۰ تا ۹۵ متغیر است. برای محاسبه زمان تمرکز از رابطه زیر استفاده شد:

$$TC = 1.67 * Tlag \quad (۹)$$

که در آن TC: زمان تمرکز حوضه بر حسب ساعت و Tlag: زمان تأخیر حوضه است.

معیار ارزیابی مدل: در این مطالعه برای ارزیابی مدل SRM از دو معیار دقت کمی، شامل ضریب تبیین R^2 و درصد خطای حجمی D_v به شرح روابط زیر استفاده شد (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۳۲).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (۱۰)$$

که در آن R^2 : ضریب تعیین، Q_{mi} : دبی اندازه گیری شده در روز i ام (m^3/s)، Q_{ci} : دبی محاسبه شده در روز i ام، Q_a و Q_{mi} : میانگین دبی اندازه گیری شده روزانه (m^3/s) در طول دوره آماری که داده های آن برای مدل سازی استفاده شده و n تعداد روز است.

$$D_v = \frac{V_R - V'_R}{V_R} * 100 \quad (۱۱)$$

که در آن D_v : درصد خطای حجمی بین کل رواناب اندازه گیری شده و شبیه سازی شده، V_R : حجم رواناب اندازه گیری شده، V'_R : حجم رواناب شبیه سازی شده است (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۳۲). شکل ۲، روند کار با مدل SRM را در شبیه سازی رواناب ناشی از ذوب برف نشان می دهد.

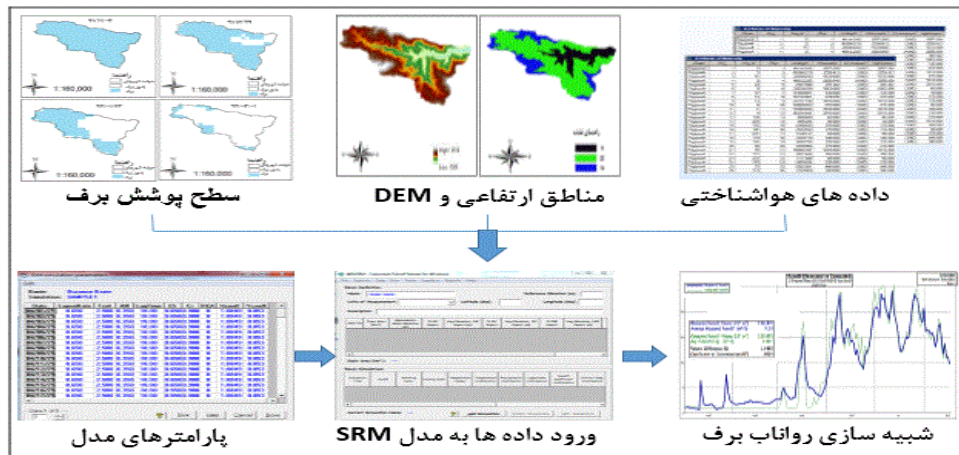
شاخص درجه حرارت بحرانی (T_{CRIT}) برای مشخص کردن نوع بارش به کار می رود. اگر T بزرگتر از T_{CRIT} باشد، تأثیر بارش در رواناب فوری و بارش به صورت باران است و در صورتی که کوچکتر یا مساوی T_{CRIT} باشد، بارش به صورت برف است و روی هم انباشته می شود و تأثیر آن در رواناب به صورت تأخیری است. در این حالت مدل SRM بارش برف جدید را به عنوان ذخیره نگه می دارد تا روزهای گرم بعدی ذوب شود (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۲۳).

ضریب فروکش (K) یکی از شاخص های بسیار مهم در مدل SRM است، زیرا ($K-1$) قسمتی از ذوب روزانه است که بلافاصله به رواناب اضافه می شود. معمولاً تحلیل داده های دبی اندازه گیری شده در روزهای قبلی، روش خوبی برای تعیین K است. در این روش مقادیر دبی (Q_n) در مقابل دبی یک روز بعد (Q_{n+1}) (در مواقعی که هیدروگراف جریان در حالت فروکش است)، رسم شد. شیب خط برازش شده بر نقاط در مقیاس نیم لگاریتمی مقدار K را به دست می دهد. باید توجه داشت که K ثابت نیست و با کاهش دبی مقدار K افزایش می یابد (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۲۳).

محاسبه زمان تأخیر (CN Lag): زمان تأخیر حوضه عبارت است از فاصله زمانی میان مدت بارش تا زمان رخ دادن دبی اوج که برای حوضه های کمتر از ۲۰۰۰ ایکرز از رابطه زیر به دست می آید (علیزاده امین، ۱۳۸۷: ۵۰۴).

$$Lag = \frac{L^{0.8} * (S+)^{0.7}}{(1900 * Y^{0.5})} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق: L : طول هیدرولوژیکی حوضه آبریز بر حسب فوت، Y : شیب حوضه آبریز بر حسب

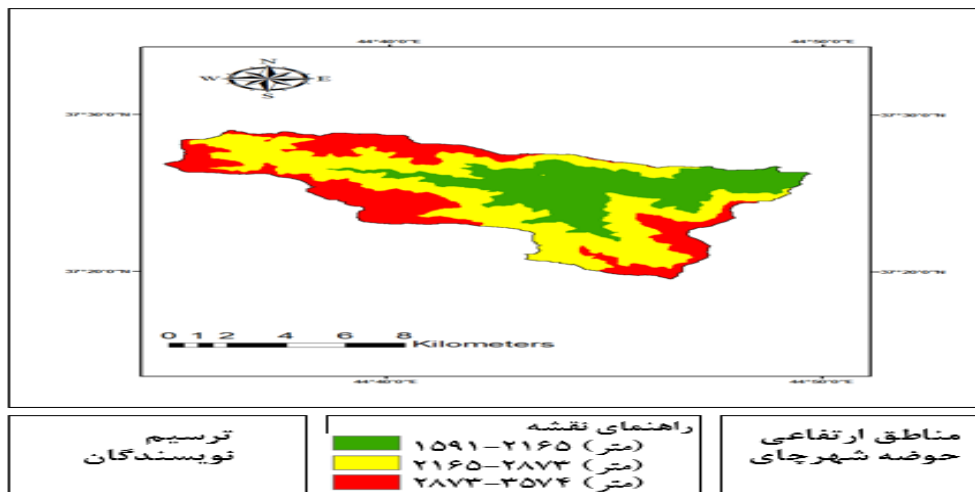


شکل ۲- روند شبیه‌سازی رواناب ذوب برف با استفاده از مدل SRM

ایستگاه هیدرومتری برده‌سور) مرز حوضه مشخص و کلاس‌بندی حوضه بر اساس سه منطقه ارتفاعی تعیین شد (جدول ۲ و شکل ۳).

۲- یافته‌ها و بحث

با استفاده از نقشه ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه، ابتدا نقشه جهت جریان، نقشه تراکم جریان و نقشه آبراهه‌ها ترسیم شد و با معرفی نقطه خروجی به برنامه



شکل ۳- نقشه مناطق ارتفاعی و DEM حوضه شهرچای

جدول ۲- نتایج محاسبات هیپسومتریک در زیرحوضه شهرچای

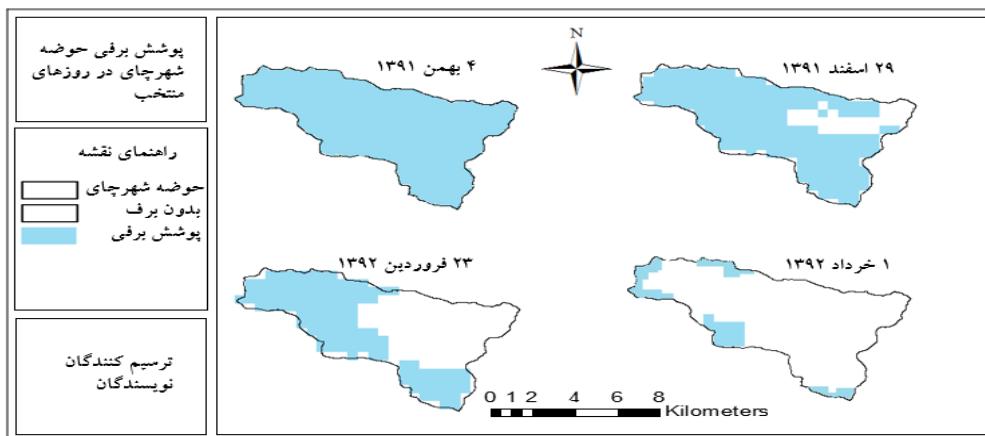
| طبقه ارتفاعی (متر) | مساحت (کیلومترمربع) | درصد مساحت (درصد) | ارتفاع متوسط (متر) |
|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| ۱۵۹۱-۲۱۶۵ | ۳۱/۵۵ | ۱۷/۸۵ | ۱۹۶۲ |
| ۲۱۶۵-۲۸۷۳ | ۱۱۱/۲ | ۶۲/۹۱ | ۲۵۳۴ |
| ۲۸۷۳-۳۵۷۴ | ۳۴ | ۱۹/۲۴ | ۳۰۳۸ |
| جمع | ۱۷۶/۷۵ | ۱۰۰ | ۲۵۳۰ |

در شکل ۴، تصاویر پوشش برف ۴ روز منتخب در طول دوره آماری مورد مطالعه ترسیم شده است. در

در شکل ۴، تصاویر پوشش برف ۴ روز منتخب در

منطقه در اوایل فصل زمستان اغلب پوشیده از برف است و با گذشت زمان این پوشش به خاطر ذوب برف کمتر می شود که دلیل آن افزایش دمای هواست. جدول ۴، مقدار شاخص های وارد شده به مدل در این مطالعه را نشان می دهد. همان طور که از جدول مذکور می توان فهمید، بعضی از شاخص ها در طول دوره شبیه سازی ثابت و بعضی دیگر متغیر بودند.

این اشکال، قسمت رنگی مشخص کننده برف است. همان طور که از اشکال مشهود است، سطح پوشش برف در طول سال متغیر است، ولی در حالت کلی با بالا رفتن درجه حرارت، سطح پوشش برف و نیز ماندگاری آن کاهش پیدا می کند. جدول ۳، سطح برف محاسباتی در طول دوره آماری به صورت ۸ روزه را نشان می دهد. از این جدول می توان فهمید که سطح



شکل ۴- تصاویر پوشش برف روزهای منتخب در حوضه شهرچای

جدول ۳- درصد پوشش سطح برف در سال آبی ۱۳۹۲ با استفاده از تصاویر ۸ روزه مودیس در حوضه شهرچای

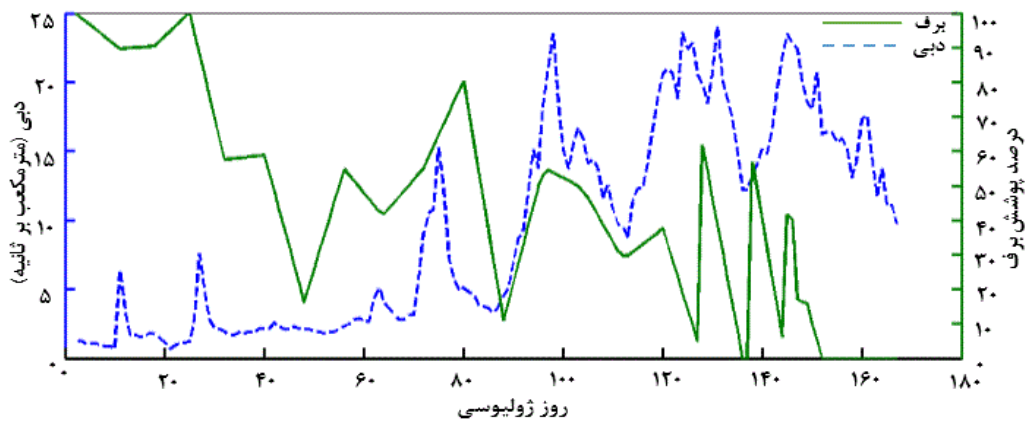
| تاریخ تصویر | درصد سطح برف تصاویر ۸ روزه مودیس (درصد) | تاریخ تصویر | سطح برف تصاویر ۸ روزه مودیس (درصد) |
|-------------|---|-------------|------------------------------------|
| ۱۳ دی | ۱۰۰ | ۷ فروردین | ۱۷ |
| ۲۰ دی | ۹۴ | ۱۵ فروردین | ۵۴ |
| ۲۷ دی | ۹۲ | ۲۴ فروردین | ۴۶ |
| ۴ بهمن | ۱۰۰ | ۳۰ فروردین | ۳۰ |
| ۱۱ بهمن | ۶۲ | ۸ اردیبهشت | ۲۲ |
| ۱۹ بهمن | ۵۳ | ۱۶ اردیبهشت | ۰ |
| ۲۷ بهمن | ۲۵ | ۲۴ اردیبهشت | ۵ |
| ۵ اسفند | ۵۳ | ۱ خرداد | ۲۰ |
| ۱۳ اسفند | ۴۴ | ۹ خرداد | ۰ |
| ۲۱ اسفند | ۵۸ | ۱۷ خرداد | ۰ |
| ۲۹ اسفند | ۷۲ | ۲۵ خرداد | ۰ |

جدول ۴- مقدار شاخص‌های استفاده‌شده در مدل SRM در این مطالعه

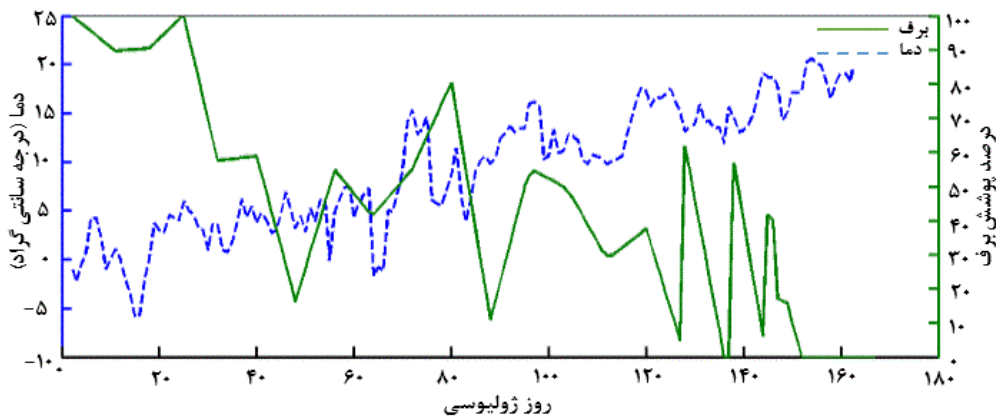
| ماه | ضریب فروکش (K) X و Y | درجه حرارت بحرانی (°C) | ضریب رواناب باران | ضریب رواناب برف | عامل درجه روز (cm. °C ⁻¹ d ⁻¹) |
|--------|----------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|--|
| ژانویه | ۰/۸۸ و ۱/۲ | ۰ | ۰/۵-۰/۵۲ | ۰/۴-۰/۴۵ | ۰/۳-۰/۳۵ |
| فوریه | ۰/۸۸ و ۱/۲ | ۰ | ۰/۵۲-۰/۵۸ | ۰/۴۵-۰/۵ | ۰/۳۵-۰/۴ |
| مارس | ۰/۸۸ و ۱/۲ | ۰ | ۰/۶-۰/۶۳ | ۰/۵-۰/۵۲ | ۰/۴۲-۰/۵ |
| آوریل | ۰/۸۸ و ۱/۲ | ۰ | ۰/۶۴-۰/۶۸ | ۰/۵۵-۰/۶ | ۰/۵۲-۰/۶۵ |
| مه | ۰/۸۸ و ۱/۲ | ۰ | ۰/۶۸-۰/۷۲ | ۰/۶-۰/۶۶ | ۰/۷-۰/۷۵ |
| ژوئن | ۰/۸۸ و ۱/۲ | ۰ | ۰/۷۴-۰/۸ | ۰/۶۸-۰/۷ | ۰/۷۵-۰/۸ |

در شکل‌های ۵ تا ۷، تغییرات سطح پوشش برف نسبت به دبی، دما و بارش نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، با افزایش دما، سطح پوشش برف نیز کاهش می‌یابد و باعث افزایش

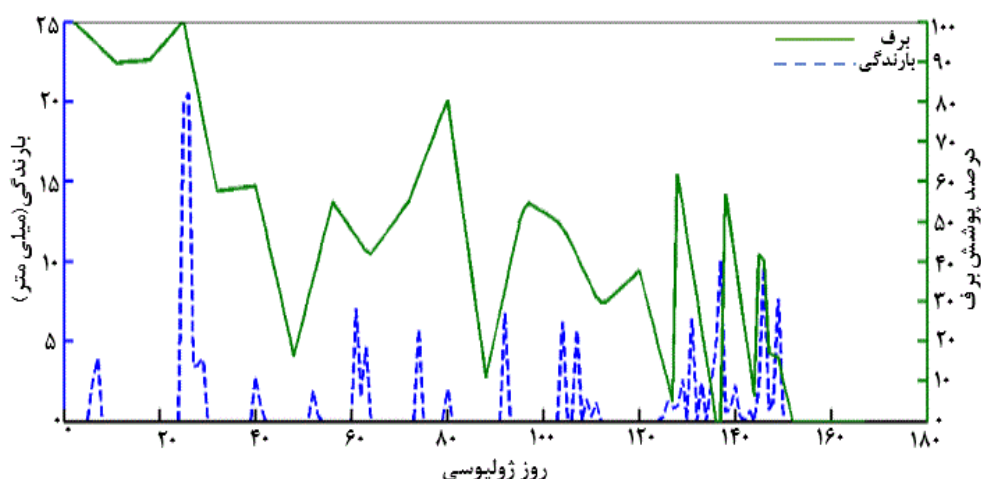
دبی رودخانه شده است. همچنین، بارندگی در فصل زمستان باعث افزایش پوشش برف و در فصل بهار باعث افزایش دبی شده است که خود متأثر از افزایش درجه حرارت است.



شکل ۵- تغییرات پوشش برف و دبی رودخانه در حوضه شهرچای



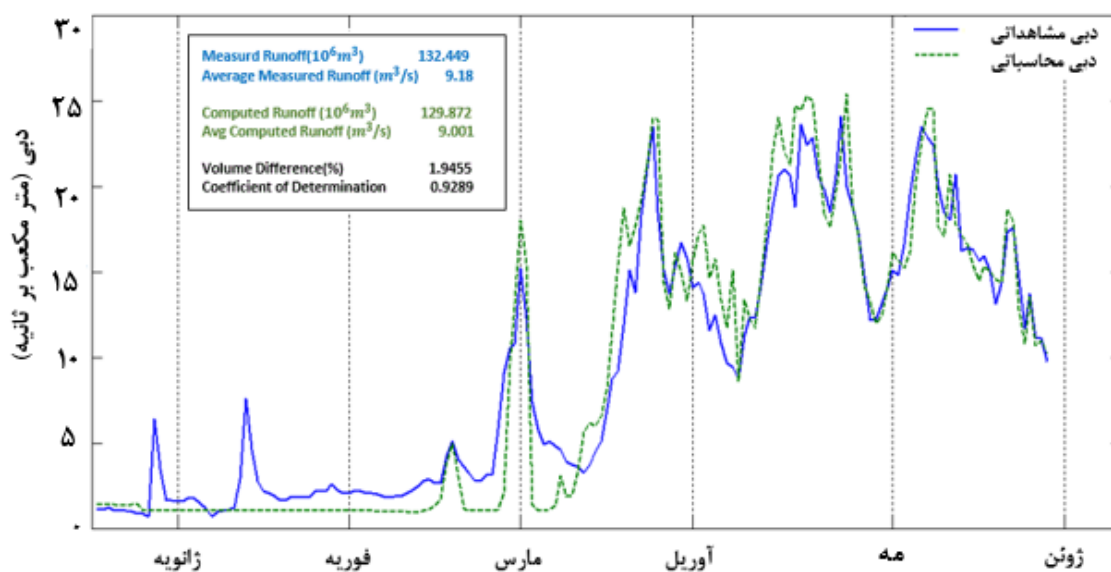
شکل ۶- تغییرات سطح پوشش برف و دما در حوضه شهرچای



شکل ۷- تغییرات سطح پوشش برف و بارندگی در حوضه شهرچای

SRM را در شبیه سازی رواناب ذوب برف در حوضه شهرچای و در محل ایستگاه هیدرومتری برده سور نشان می دهد، به طوری که از این جدول استنباط می شود، مدل SRM قابلیت خوبی در شبیه سازی رواناب ذوب برف دارد، طوری که درصد خطای حجمی مدل کمتر از ۲ درصد و مقدار ضریب تعیین بالای ۰/۹ است.

شکل ۸، شبیه سازی رواناب ذوب برف حوضه شهرچای را با مدل SRM در طول دوره آماری مورد مطالعه نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است، مدل با دقت خوبی شبیه سازی رواناب ذوب برف را انجام داده است. در طول فصل زمستان به دلیل پایین بودن درجه حرارت مدل ذوب برف را نشان نداده است و اوج ذوب برف مربوط به فروردین ماه و اوایل اردیبهشت ماه است. جدول ۵، نتایج ارزیابی مدل



شکل ۸- تغییرات دبی محاسباتی و مشاهداتی در دوره آماری دی ماه ۹۱ تا خرداد ماه ۹۲ در حوضه شهرچای

جدول ۵- نتایج ارزیابی شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضه شهرچای با مدل SRM

| شاخص یا معیار ارزیابی | مقدار | واحد |
|--|--------|-------------------|
| حجم رواناب مشاهداتی | ۱۳۲/۴ | میلیون متر مکعب |
| حجم رواناب محاسباتی | ۱۲۹/۹ | میلیون متر مکعب |
| میانگین دبی مشاهداتی | ۹/۲ | متر مکعب بر ثانیه |
| میانگین دبی محاسباتی | ۹/۰۲ | متر مکعب بر ثانیه |
| درصد خطای حجمی (D_V) | ۱/۹ | درصد |
| ضریب تعیین دبی مشاهداتی و محاسباتی (R^2) | ۰/۹۰۸۹ | بی‌بعد |

۳- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از تصاویر سنجنده مودیس، برآورد قابل قبولی از سطح پوشش برف حوضه شهرچای ارائه می‌دهد که اطلاعات برف‌سنجی ندارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی با مدل SRM نشان از قابلیت مدل در شبیه‌سازی رواناب برف در منطقه مورد مطالعه داشت، به طوری که ضریب تعیین و درصد خطای حجمی مدل به ترتیب ۰/۹۰ و ۱/۹۴ محاسبه شد. این رقم در مطالعه نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳)، ۰/۷۸ و در مطالعه فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، ۰/۸۲ و در مطالعه انصاری (۱۳۹۱)، ۰/۸۲ و ۰/۸۹ بوده است. نتایج این مطالعه ضمن تطابق با مطالعات قبلی نشان داد، علاوه بر شاخص‌های مدل، فیزیوگرافی حوضه نقش زیادی در دقت شبیه‌سازی ایفا می‌کند. همچنین برای به‌دست آوردن دقیق‌تر پوشش سطح برفی، بهتر است در حد امکان، تاریخ اخذ تصاویر ماهواره‌ای همزمان با تاریخ‌های بارندگی انتخاب شود و فاصله زمانی اخذ تصاویر در فصل ذوب نزدیک‌تر انتخاب شوند. با نگاهی به رواناب محاسباتی و مشاهداتی چهار دبی اوج بزرگ در طول ماه‌های فروردین تا خرداد مشاهده می‌شود که در سه دبی اوج اول، برف نقش عمده‌ای در تولید

رواناب دارد، اما در دبی اوج آخر به دلیل افزایش حرارت هوا و نبودن پوشش برف، سهم آن در مقابل باران بسیار ناچیز بود. صرف‌نظر از شبیه‌سازی قابل قبول مدل، نبودن ایستگاه برف‌سنجی در منطقه مورد مطالعه، واسنجی مدل را با مشکل روبه‌رو کرد و برای جبران این نقص از پیش فرض‌های مدل و مقادیر توصیه‌شده استفاده شد. با در نظر گرفتن تمام موارد یادشده، شبیه‌سازی رواناب برف و سطح پوشش آن تابعی از متغیرهایی مانند دمای هوا، بارش و برخی عوامل ناشناخته دیگر است که در سال‌های مختلف دچار نوساناتی می‌شوند؛ بنابراین، برای یک برآورد صحیح از میزان رواناب برف، لازم است شبیه‌سازی برای یک دوره طولانی‌تر در منطقه انجام شود.

منابع

انصاری، هادی، (۱۳۹۱). برآورد رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی (مطالعه موردی: حوضه‌های ليقوان چای و صوفی چای). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی آب. دانشگاه تبریز.

رسولی، علی‌اکبر. و ادهمی، سلام، (۱۳۸۶). محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجنده

- J., Chien Y.L. and Andrew G.K.(1998). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow-,Lake Ice- and Sea Ice-Mapping Algorithms, modis Algorithm TheoreticalBasis Document Number ATBD-MOD-10,NASA Goddard Space Flight Center.
- Harshburger B.J., Karen S.H., Von P.W., Brandon C.M. Troy R.B. and Rango A. (2010). Evaluation of short-to-medium range stream flow forecasts obtained using an enhanced version of SRM. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 15(1):1752-1688.
- <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data>.
- McCuen R. H. (1998). Hydrologic analysis and design. Printice-Hall Pub., Inc. N.J., PP.548.
- Malcher P. and Heidinger M. 2001. Processing and data assimilation scheme for satellite snow cover products in the hydrological model. Envisnow EVG1-CT- 2001-00052.
- Klein A.G., Hall D.K. and Riggs G.A. (1998). Improving snowcover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. Hydrological Processes, 12: 1723-1744.
- Rango A. and Martinec J. (1998). The snowmelt runoff model (SRM) user's manual, version 4, URL: [ftp // hydrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf](ftp://hydrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf).
- Shahabi H., Khezri S., Bin Ahmad B. and Ariffin M T. (2014). Application of moderate resolution imaging spectroradiometer snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the central zab basin, Iran. Journal of Applied Remot Sensing, 12:1212-1223.
- Seidel K. and Martinec J. (2002). Hydrological applications of Satellite Snow Cover mapping in the swiss Alps. Proceedings of Earsel-Lissig-Workshop Observing Our Cryosphere from Space, Bern, March 11-13.
- Tahir A A, Chevallier P, Arnaud Y and Ahmad B.(2011). "Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan," Hydrology and Earth System Sciences, no. 7, pp. 2275-2290.
- Tekeli A.E., Akyurek Z., Arda Sorman A., Sensoy A. and Unal Sorman A. (2005). مودیس. جغرافیا و توسعه. (۱۰) ۲۳-۳۶.
- علیزاده، امین، (۱۳۸۷). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). چاپ سی.ام. مشهد.
- فتاحی، ابراهیم. دلاور، مسعود و قاسمی، الهه، (۱۳۹۰). شبیه سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه های کوهستانی با استفاده از مدل SRM، مطالعه موردی: حوضه آبریز بازفت. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. (۲۳): ۱۲۹-۱۴۱.
- کارآموز، محمد. و عراقی نژاد، شهاب، (۱۳۹۳). هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران). چاپ سوم.
- کمالی، مرتضی. حجام، سهراب و وظیفه دوست، مجید، (۱۳۹۰). بررسی سطح پوشش برف و تأثیر آن بر عملکرد گندم دیم در استان خراسان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). (۶): ۱۵۰۲ - ۱۴۹۴.
- نجف زاده، رضا. ابریشم چی، احمد. تجریشی، مسعود و طاهری شهرآئینی، حمید، (۱۳۸۳). شبیه سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف. مجله آب و فاضلاب. (۵۲): ۱۱-۲.
- Bales R.C. and Cline D. (2003). Snow hydrology and water resources: western united states, In Handbook of Weather, Climate and Water: Dynamics, Climate, Physical Meteorology, Weather Systems, and Measurements, Ed. Potter T.D., Colman B.R., Wiley-Interscience, 10:443-459.
- Carroll T., Cline D., Fall G., Nilsson A., Li L. and Rost A. (2001). Nohrs cooperations and the simulation of snow cover properties for the coterminous U.S. Proceedings of the 69th Western Snow Conference, Sun Valley, 25: 16-19.
- Hall D.K., Riggs G.A. and Salomonson V.V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. Remote Sens. Environ. 54(2):127-140.
- Hall D.K., Tait G.A., Riggs V.V., Salomonson

Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the easternpart of Turkey. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 97: 216-230.

Yonggang Ma, Yue Huang, Xi chen, Yongping Li, Anming Bao. (2013). Modelling Snowmelt Runoff under climate change scenarios in an ungauged Mountainous watershed, Northwest China. *Mathematical problems in Engineering*. Article ID 808565, 9 pages.