

واسنجی چند ایستگاه مدل ذوب برف رواناب (SRM) با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبی چای)

وحید نورانی*^۱، امین افخمی نیا^۲، صغری اندریانی^۳

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۹/۷/۱، پذیرش: ۹۹/۹/۲۹، نشر آنلاین: ۹۹/۹/۲۹)

چکیده

منابع آبی موجود و توانایی دسترسی به آن‌ها روز به روز محدودتر می‌شود. به همین دلیل، اهمیت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بیش از پیش مشخص می‌گردد. پوشش برف در نواحی کوهستانی نقش بسیار مهمی در حفظ تعادل بین ورودی و خروجی آب دارد. امروزه با توجه به مشکل کمبود آب و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه هیدرولوژی و مدیریت منابع آب در جهت مدیریت بهتر منابع برای آیندگان باید از مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی موجود استفاده کرد و توسعه داد. یکی از مهم‌ترین متغیرها برای تخمین ذوب برف، مساحت پوشش برف می‌باشد که به‌منظور محاسبه آن می‌توان از فناوری‌های جدید سنجش از راه دور بهره برد. در این پژوهش سعی بر آن شد که با استفاده از مدل SRM (Snowmelt Runoff Model) درصد تأثیرگذاری ذوب برف بر روی جریان خروجی حوضه آبی چای برآورد شود. به این منظور با استفاده از پارامترهای ضرایب رواناب برف و باران که عدم قطعیت بالاتری نسبت به پارامترهای دیگر دارند، دو روش واسنجی چندایستگاه و تک‌ایستگاه موردبررسی و مقایسه قرار گرفت و جهت تخمین مساحت پوشش برف از تصاویر سنجه MODIS هشت روزه (MOD10A2) استفاده گردید. عملکرد مدل SRM بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ ارزیابی شد. نتایج شاخص R^2 نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در حالت واسنجی چندایستگاه نسبت به روش تک‌ایستگاه به طور میانگین ۱۵٪ در طول دوره پنج‌ساله شبیه‌سازی می‌باشد و همچنین سهم ذوب برف در منطقه مورد مطالعه در ماه‌های فرودین و اردیبهشت به اوج خود می‌رسد و با افزایش دما سهم مذکور به تدریج کم‌تر می‌شود.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی رواناب ذوب برف، شبیه‌سازی چندایستگاه، سنجش از دور، SRM، MODIS.

۱- مقدمه

می‌تواند در تغییر زمان ذوب برف و مقدار رواناب ناشی از آن در حوضه‌های کوهستانی مؤثر باشد. در نتیجه، شبیه‌سازی دقیق این پدیده برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بسیار مهم بوده و همچنین با پیش‌بینی درست منابع موجود، می‌توان ریسک وقوع پدیده‌هایی مانند سیلاب را کاهش و زیان‌های ناشی از آن که به دلیل ذوب سریع برف رخ می‌دهد را مدیریت کرد (نخج‌زاده، ۱۳۸۳).

در دهه‌های گذشته آشناسان به دنبال روش‌هایی مناسب برای مدل‌سازی ذوب برف و تأثیر آن بر روی رواناب خروجی در پایین‌دست حوضه بودند و دو رویکرد اصلی برای این موضوع معرفی نموده‌اند:

گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی بر روی ذخایر منابع آب موجود و محدود شدن توانایی دسترسی به منابع جدید در سال‌های اخیر تأثیر گذاشته است. با توجه به این موضوع، ضرورت مدیریت منابع آب بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. منابع آب یکی از مهم‌ترین مباحث در سال‌های اخیر بوده و تاکنون تحقیقات متعددی در این مورد انجام شده است. در حوضه‌های کوهستانی ذوب برف در اکثر مواقع به‌ویژه در فصول گرم سال، اصلی‌ترین منبع تأمین آب و تضمین آن در پایین‌دست حوضه است. ذوب برف تقریباً ۵۰٪ از آب‌های سطحی و زیرزمینی مناطق کوهستانی را تأمین می‌کند (Vafakhah و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین درک فرآیند ذوب برف در مدیریت منابع آب این مناطق بسیار حائز اهمیت است. پدیده تغییر اقلیم و گرمایش زمین

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۴۰۳۰۳۳۲

انجام شده است که دقت آن‌ها را مناسب ارزیابی کرده‌اند (Tekeli و همکاران، ۲۰۰۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Han و همکاران، ۲۰۱۹). لازم به ذکر است که در دو دهه اخیر با پیشرفت ماهواره‌های سنجش‌ازدور برای برآورد سطح پوشیده از برف، این مدل در حوضه‌های مختلف به‌صورت موفقیت‌آمیز اجرا شده است که از جمله می‌توان به تحقیقات Malcher و Heidinger (۲۰۰۱) در اتریش^۵، Seidel و Martinec (۲۰۰۲) در آلپ سوئیس، Harshburger و همکاران (۲۰۱۰) در غرب آمریکا و Saydi و همکاران (۲۰۱۹) در چین و مختاری مطلق و همکاران (۱۳۹۳) و فتاحی و همکاران (۱۳۹۰) در ایران اشاره کرد.

در تحقیق حاضر با استفاده از رویکرد درجه-روز، مدل SRM^۶ با بهره‌گیری از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای، رواناب منطقه مورد مطالعه به دو روش واسنجی چندایستگاه (تقسیم حوضه به چندین زیر حوضه که دارای دبی سنج در خروجی هستند) و تک-ایستگاه (خروجی کل حوضه) شبیه‌سازی گردید. تا به امروز روش چندایستگاه برای واسنجی مدل SRM مورد استفاده قرار نگرفته است. در این روش واسنجی پارامترها به طور هم‌زمان و با استفاده از داده‌های چندین ایستگاه مشاهداتی صورت می‌پذیرد. تحقیقات صورت گرفته بر روی مدل‌های هیدرولوژیکی دیگر نشان می‌دهد که با استفاده از روش واسنجی چندایستگاه خطاها کاهش و دقت مدل‌سازی افزایش می‌یابد چراکه داده‌های جریان مشاهداتی در طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل در حوضه‌های بزرگ از لحاظ ناهمگونی‌های قسمت‌های کوچک‌تر حوضه ناتوان می‌باشند (Andersen و همکاران، ۲۰۰۱؛ Saeidifarzad و همکاران، ۲۰۱۴). در مدل‌های دارای پایه فیزیکی، تعداد پارامترها زیاد است و مدل‌سازی تک‌ایستگاه توانایی توصیف تغییرات مکانی در حوضه‌های بزرگ را ندارد. در کل، استفاده از روش واسنجی چند ایستگاه امکان استفاده از تمامی داده‌های موجود در حوضه را فراهم می‌نماید که باعث کاهش عدم قطعیت در مدل‌سازی، مخصوصاً حوضه‌های بزرگ که دارای ناهمگونی‌ها فیزیکی متعددی هستند، می‌گردد (Bai و همکاران، ۲۰۱۷؛ Bekelr و Nicklow، ۲۰۰۷).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- حوضه مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبریز آچی‌چای با مساحتی حدود ۱۳۸۵۵ کیلومترمربع در شمال غربی ایران و استان آذربایجان شرقی واقع شده و یکی از بزرگ‌ترین زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. میزان ورودی سالانه آن به دریاچه ارومیه ۳۸۰

(الف) رویکرد تعادل-انرژی^۱ (ب) رویکرد درجه-روز^۲ (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴). رویکرد تعادل- انرژی جامع‌ترین روش برای شبیه‌سازی و تخمین جریان سطحی با به‌کارگیری جریان انرژی بین برف، خاک و هوا می‌باشد. این روش تعداد داده‌ها و پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارد و در حوضه‌هایی که با کمبود داده مواجه می‌باشند قابلیت اجرا ندارند (Abudu و همکاران، ۲۰۱۶). برخلاف مدل‌های پیچیده مبتنی بر رویکرد تعادل- انرژی، استفاده از روش درجه- روز یکی از آسان‌ترین روش‌ها برای محاسبه مقدار ذوب برف است چراکه کاربرد مدل برای شبیه‌سازی در مناطق خشک کوهستانی که با محدودیت داده مواجه هستند، مناسب می‌باشد (Rulin و همکاران، ۲۰۰۸).

علیرغم موفقیت مدل‌های ذوب برف در شبیه‌سازی رواناب با رویکرد درجه- روز، برخی محققان استدلال کرده‌اند که پارامتر دما را نمی‌توان به عنوان تنها عامل مؤثر در ذوب برف در نظر گرفت و بر لزوم به‌کارگیری تابش خورشیدی^۳ و آلودگی محیط به عنوان عوامل مؤثر در تأمین انرژی ذوب برف تأکید کرده‌اند (Wang و Li، ۲۰۰۸؛ Vafakhah و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی چندین محقق در تحقیقات خود با استفاده از تابش خورشیدی و آلودگی به این نتیجه رسیدند که دما به تنهایی مؤثرترین عامل تأثیرگذار در ذوب برف است (Smedt و Zeinivand، ۲۰۱۰؛ Saydi و همکاران، ۲۰۱۹) مدل‌های این رویکرد به‌سادگی آن‌ها شناخته می‌شوند و در مطالعات گذشته با موفقیت اجرا و بررسی شده است (Tekeli و همکاران، ۲۰۰۵؛ Lee و همکاران، ۲۰۰۵).

مدل ذوب برف رواناب (SRM) یک مدل مفهومی بوده و بر اساس قوانین فیزیکی شکل گرفته است و به عنوان یکی از مدل‌های مبتنی بر رویکرد درجه- روز، به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب روزانه در حوضه‌های کوهستانی که ذوب برف عامل اصلی تولید رواناب است، توسعه یافته است (Martinec، ۱۹۷۵).

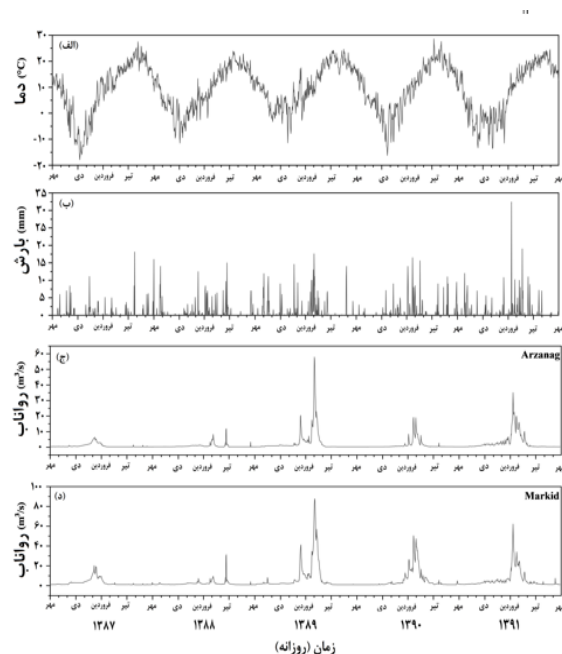
برآورد دقیق سطح پوشیده از برف (SCA)^۴ به عنوان اصلی‌ترین ورودی مدل، یکی از عملیات پایه‌ای در زمینه مدیریت منابع آب در مناطق کوهستانی است چراکه بخش زیادی از نزولات به‌صورت برف می‌باشد. به این منظور در حوضه‌هایی که ایستگاه برف‌سنجی مناسبی ندارند، می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای برای محاسبه مساحت پوشش برف استفاده نمود. سنجنده MODIS یکی از پرکاربردترین سنجنده‌های حال حاضر است که با توجه به رایگان بودن تصاویر و تفکیک زمانی بالا (روزانه) از محبوبیت بالایی بین محققین برخوردار است (Hall و Ringgs، ۲۰۱۶). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در مورد کارایی این تصاویر و مقایسه آن‌ها

4. Snow Covered Area
5. Ötztal
6. Snowmelt runoff model

1. Energy-balance
2. Degree-day
3. Solar radiation

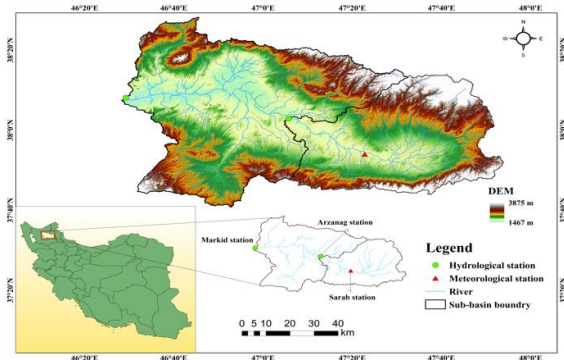
برف بیشتر از ۴ سانتی‌متر باشد، ۹۰ درصد تطابق بین مشاهدات زمینی و تصاویر ماهواره‌ای جود دارد (Hall و Riggs، ۲۰۰۷؛ Klien و Barnett، ۲۰۰۳؛ Huang و همکاران، ۲۰۱۱).

تصاویر مجموع هشت روزه (MOD10A2) (مجموع مساحت برف هشت روز متوالی) باعث کاهش دقت تفکیک زمانی داده‌ها می‌شود ولی در محاسبه پوشش برف، این تصاویر در مقایسه با تصاویر MOD10A1 (روزانه) از دقت بالاتری برخوردار هستند (Abudu و همکاران، ۲۰۱۶). برای پایش مؤثر مساحت سطح برف، نیاز به تصاویری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب می‌باشد. با توجه به این که این دو مقوله مهم در یک‌جا جمع نمی‌شود از این‌رو با توجه به هدف مطالعه از تصاویر MOD10A2 با تفکیک زمانی هشت روز و تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شد. همچنین تصویر ASTER به عنوان لایه رقومی ارتفاعی (DEM) و برآورد ویژگی‌های فیزیوگرافی^۹ حوضه با تفکیک مکانی ۳۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. ایستگاه هیدرومتری ارزنق به عنوان خروجی زیرحوضه بالادست و ایستگاه مرکید به عنوان خروجی کل حوضه مطالعاتی انتخاب شد و داده‌های مشاهداتی آن‌ها برای ارزیابی دقت مدل مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از داده‌های بارندگی و دمای ایستگاه هواشناسی سراب، استفاده گردید. سری زمانی داده‌های مذکور در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- سری زمانی ایستگاه‌های مورد استفاده در بازه زمانی ۱۳۸۷-۱۳۹۱: (الف) سری زمانی دما در ایستگاه سراب، (ب) بارش ایستگاه سراب، (ج) دبی روزانه ایستگاه ارزنق، (د) دبی روزانه ایستگاه مرکید

میلیون مترمکعب در سال است (Fazel و همکاران، ۲۰۱۷). میانگین دمای سالانه و بارش به ترتیب ۹ درجه سانتی‌گراد و ۲۳۰/۷ میلی‌متر است. حوضه رودخانه آجی‌چای بزرگ‌ترین حوضه در آذربایجان شرقی است (Barzegar و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به این که سرشاخه‌های اصلی حوضه از دامنه کوه سبلان سرچشمه می‌گیرد، محدوده مورد مطالعه به بالادست ایستگاه هیدرومتری مرکید و بین مختصات جغرافیایی $46^{\circ}47'$ تا $47^{\circ}18'$ طول شرقی $37^{\circ}68'$ تا $38^{\circ}47'$ عرض شمالی ناحیه محدود گشته است و مساحت ناحیه انتخابی ۶۹۱۳/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. شکل (۱) موقعیت، ارتفاع، شبکه زهکشی، ایستگاه‌های مورد مطالعه و موقعیت زیرحوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوضه مطالعاتی و ایستگاه‌های مورد استفاده

در مدل‌سازی حاضر از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای به صورت هم‌زمان استفاده شده است. داده‌های هواشناسی و هیدرومتری به عنوان داده‌های زمینی و مساحت پوشیده از برف نیز با استفاده از تصاویر هشت روزه سنجنده MODIS به دست آمده است. آشکارسازی و تعیین ویژگی‌های مختلف برف با استفاده از داده‌های سنجنش‌آزادور که در هیدرولوژی کاربرد وسیعی دارد، روش نوینی را در به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز هیدرولوژی از جمله مساحت تحت پوشش برف پدید آورده است. به عبارت دیگر می‌توان با داده‌های سنجنش‌آزادور توزیع مکانی برف را در سطح حوضه به دست آورد (Jain و همکاران، ۲۰۱۰؛ Saydi و همکاران، ۲۰۱۹). به منظور برآورد مساحت پوشش برف از تصاویر MOD10A2 با تفکیک زمانی هشت روز و مکانی ۵۰۰ متر در بازه زمانی ۱۳۸۷-۱۳۹۱ و نرم‌افزارها ARCGIS و ENVI استفاده شد. الگوریتم NDSI^۷ به منظور ایجاد تمایز میان برف، ابر و پوشش خالی از برف به صورت اتوماتیک بر تصاویر سنجنده MODIS اعمال می‌شود (Hall و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعات متعددی در مورد بررسی دقت تصاویر فوق در مقایسه با مشاهدات زمینی انجام شده که عمدتاً نشان داده‌اند در شرایطی که آسمان صاف و عمق

۲-۲- ساختار مدل SRM

مدل SRM از رویکرد درجه-روز برای مدل‌سازی استفاده نموده و از دما به عنوان جایگزین شار انرژی بین برف، خاک و هوا برای نمایش فرآیند ذوب برف استفاده می‌کند. طبق رابطه (۱)، مدل SRM از ترکیب مقادیر برف و باران برای تخمین رواناب روزانه استفاده می‌کند (Martinec و همکاران، ۲۰۰۸):

$$Q_{n+1} = \underbrace{C_{Sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) S_n \cdot A \cdot 0.116(1 - k_{n+1})}_{\text{رواناب ذوب برف}} + \underbrace{C_{Rn} P_n \cdot A \cdot 0.116(1 - k_{n+1})}_{\text{رواناب بارش باران}} + \underbrace{(Q_{Sn} + Q_{Rn}) k_{n+1}}_{\text{رواناب مشارکت داده شده از روز قبل}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q میانگین دبی جریان روزانه ($m^3 s^{-1}$)، c ضریب رواناب که تلفات را به عنوان درصدی از بارش تبدیل شده به رواناب بیان می‌کند، c_s ضریب رواناب برف و c_r ضریب رواناب باران، a ضریب درجه-روز که نشان دهنده ارتفاع ذوب برف برای هر یک درجه بالای صفر می‌باشد ($cm \cdot ^\circ C^{-1} d^{-1}$)، T میانگین دمای روزانه حوضه ($^\circ C d$)، ΔT مقدار تعدیل دما می‌باشد که با استفاده از آهنگ کاهش دما و برون‌یابی از ایستگاه هواشناسی مینا تا میانگین ارتفاع هیپسومتری هر منطقه ارتفاعی به دست می‌آید ($^\circ C d$)، S نسبت پوشش برف به مساحت است، P بارش روزانه شرکت کننده در رواناب (cm)، A مساحت حوضه یا نواحی تقسیم شده ارتفاعی (km^2)، k ضریب فروکش جریان که به صورت پارامترهای Y_c و X_c وارد مدل می‌شود و نشان دهنده افت دبی رودخانه در دوره‌ای بدون حضور ذوب برف و باران می‌باشد که با استفاده از نمودار لگاریتمی داده‌های تاریخی به صورت Q_{n+1} و Q_n از طریق روابط (۲) و (۳) به دست می‌آید:

$$k = \frac{Q_{n+1}}{Q_n} \quad (2)$$

$$k_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y} \quad (3)$$

طبق رابطه تجربی (۴)، مقدار پارامتر درجه-روز (a) حاصل می‌شود:

$$a = 1.1 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (4)$$

که ρ_s چگالی برف و ρ_w چگالی آب می‌باشند.

داده باران با توجه به دمای روز می‌تواند به صورت باران یا برف در نظر گرفته شود که پارامتر دمای بحرانی (T_{crit}) به همین منظور تبیین شده است. با توجه به توصیه‌های صورت گرفته از مطالعات قبلی (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Adnan و همکاران، ۲۰۱۷) در

مقاله حاضر دمای صفر درجه سانتی‌گراد برای این پارامتر در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به تأثیر ارتفاع بر دما، یکی از مزیت‌های مدل SRM این است که از پارامتر آهنگ کاهش دما (γ) بهره می‌برد و با استفاده از میانگین ارتفاع هیپسومتریک^{۱۰} منجر به یافتن مقدار تعدیل دما در هر طبقه ارتفاعی می‌شود. به طور معمول عدد $0.165 \text{ } ^\circ C/100 \text{ m}$ برای پارامتر γ به کار گرفته می‌شود ولی طبق پژوهشی که قبلاً در این حوضه انجام شده است مقدار $0.16 \text{ } ^\circ C/100 \text{ m}$ انتخاب گردید (Andaryani و همکاران، ۲۰۱۹). پارامتر زمان تأخیر (L) نشان دهنده زمان بین ذوب برف و ظاهر شدن تأثیر آن در ایستگاه اندازه‌گیری رواناب می‌باشد (Abudu و همکاران، ۲۰۱۶). اگرچه محاسبه دقیق این پارامتر نیازمند سری زمانی ساعتی رواناب و دما است، نبود داده مورد نیاز باعث شده که روشی جایگزین ارائه شود که با استفاده از مقایسه مساحت حوضه-های مدل‌سازی شده، به تخمین تقریبی پارامتر زمان تأخیر می‌پردازد (Martinec و همکاران، ۲۰۰۸).

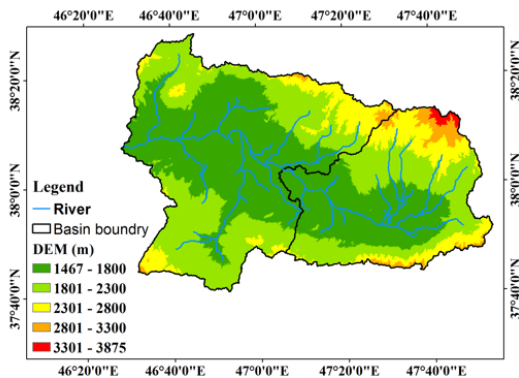
تأثیر بارش باران بر رواناب در دمای بالای درجه بحرانی (T_{crit}) به پارامتر ناحیه مشارکت کننده باران (RCA)^{۱۱} بستگی دارد که آن را می‌توان به دو حالت در شبیه‌سازی در نظر گرفت. در حالت اول، باران باریده بر روی برف در برف ذخیره می‌شود زیرا برف خشک و عمیق است و به مقدار ذوب برف اضافه می‌شود که در این حالت RCA به عدد صفر جایگزین می‌شود. اما در حالت دوم باران باریده شده بر روی برف به همان مقدار از برف خارج شده و در آن ذخیره نمی‌شود که در این حالت RCA با عدد یک نشان داده می‌شود. در مطالعه حاضر، ماههایی که مساحت برف در حال افزایش بوده و دما در اکثر روزها زیر صفر درجه سانتی‌گراد را تجربه کرده بود RCA برابر با ۱ و برای بقیه ماه‌ها صفر در نظر گرفته شد.

محوری‌ترین پارامترها که تأثیرگذاری و عدم قطعیت بالایی نسبت به بقیه پارامترها دارند ضرایب رواناب (C_s و C_r) می‌باشند. ضرایب رواناب مدل بیان کننده اطلاعات مهمی در زمینه نفوذ آب می‌باشند. عواملی همچون پوشش گیاهی و ژئومورفولوژی حوضه مطالعاتی در تعیین این ضرایب دخیل می‌باشند. لازم به ذکر است که مدل SRM ضرایب باران و برف را جداگانه وارد محاسبات می‌کند. در پژوهش حاضر واسنجی مدل برای تخمین ضرایب رواناب با استفاده از روش‌های واسنجی چندایستگاه و تک‌ایستگاه انجام گرفت. برای اجرای مدل از نرم‌افزار WINSRM^{۱۲} استفاده شد. نحوه به‌کارگیری آن و همچنین مقادیر پارامترها نیز از طریق سنجش هیدرولوژیکی، روابط تجربی و ریاضی که توضیحات کامل آن‌ها توسط Martinec و همکاران (۲۰۰۸) ارائه گردیده است و همچنین پیشنهادات مطالعات قبلی اختیار گردید (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Adnan و همکاران، ۲۰۱۷)

12. Snowmelt Runoff Model for Windows

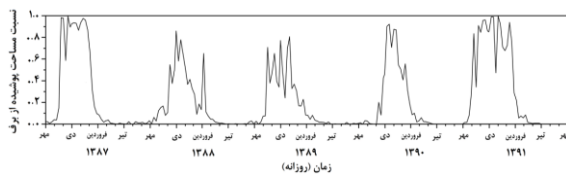
10. Hypsometric

11. Rainfall Contribution Area



شکل ۳- نقشه طبقات ارتفاعی کل حوضه مورد مطالعه و زیرحوضه‌ها تهیه شده با استفاده از تصویر ASTER

بر اساس جدول (۱)، منطقه مورد مطالعه دارای مساحتی بیش از ۳۷۰۰ کیلومتر مربع (تقریباً ۵۴ درصد) در محدوده ارتفاعی بیش از ۱۸۰۰ متر است که خود مؤید کوهستانی بودن منطقه است. دیگر پارامتر ورودی در مدل ذوب برف- رواناب، مساحت پوشش برف در منطقه مورد مطالعه است. برای استخراج مساحت برف از تصاویر سنجنده MODIS برای سال‌های آبی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ استفاده شد. با توجه به تفکیک زمانی هشت روز و نیاز مدل به مقادیر روزانه، از درون‌یابی خطی برای محاسبه مساحت روزانه برف استفاده شد (شکل (۴)). با توجه به شکل (۴)، در حوضه مورد مطالعه، ماه‌های آذر، دی و بهمن دارای بیش‌ترین سطح برف در طول سال بوده و در ماه اردیبهشت به این مقدار به کم‌ترین سطح خود می‌رسد. از ماه خرداد در سطح منطقه پوشش برفی مشاهده نمی‌گردد، البته این تفاسیر می‌تواند با تغییر شرایط اقلیمی دارای تأخیر یا تأخر در بازه زمانی چندروزه باشد.



شکل ۴- سری زمانی نسبت پوشش برفی بین سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۱

۱۳۹۱

جدول ۱- مشخصات ارتفاعی و مساحتی نواحی تقسیم‌بندی شده

زیرحوضه بالادست		زیرحوضه پایین‌دست		کل حوضه	
مساحت (km ²)	مساحت (km ²)	مساحت (km ²)	مساحت (km ²)	تغییرات ارتفاعی (m)	طبقه
۲۱۱۰/۹۹	۱۰۹۴/۰۱	۴۶/۴	۳۲۰۵	۱۴۶۷ - ۱۸۰۰	A
۱۶۹۶/۴۵	۹۱۲/۵۵	۳۷/۷	۲۶۰۹	۱۸۰۱ - ۲۳۰۰	B
۴۱۲/۰۸	۴۶۱/۹۲	۱۲/۶	۸۷۴	۲۳۰۱ - ۲۸۰۰	C
۳۹/۳۲	۱۵۱/۷۷	۲/۸	۱۹۱	۲۸۰۱ - ۳۳۰۰	D
۰/۶۷	۳۳/۳۳	۰/۵	۳۴	۳۳۰۱ - ۳۸۷۵	E
۴۲۵۹/۶	۲۶۵۳/۶	۱۰۰	۶۹۱۳	۱۴۶۷ - ۳۸۷۵	کل

۳-۲- معیار ارزیابی مدل

صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی به منظور سنجش دقت مدل‌ها در انجام شبیه‌سازی و پیش‌بینی صورت می‌گیرد. برای این منظور آماره‌های مختلفی تدوین شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Martinec و همکاران، ۲۰۰۸). در این پژوهش ضریب تبیین (R^2) و درصد اختلاف حجمی (D_v) به منظور ارزیابی مدل‌سازی استفاده شد. مقادیر آماره‌های مذکور توسط روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه هستند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

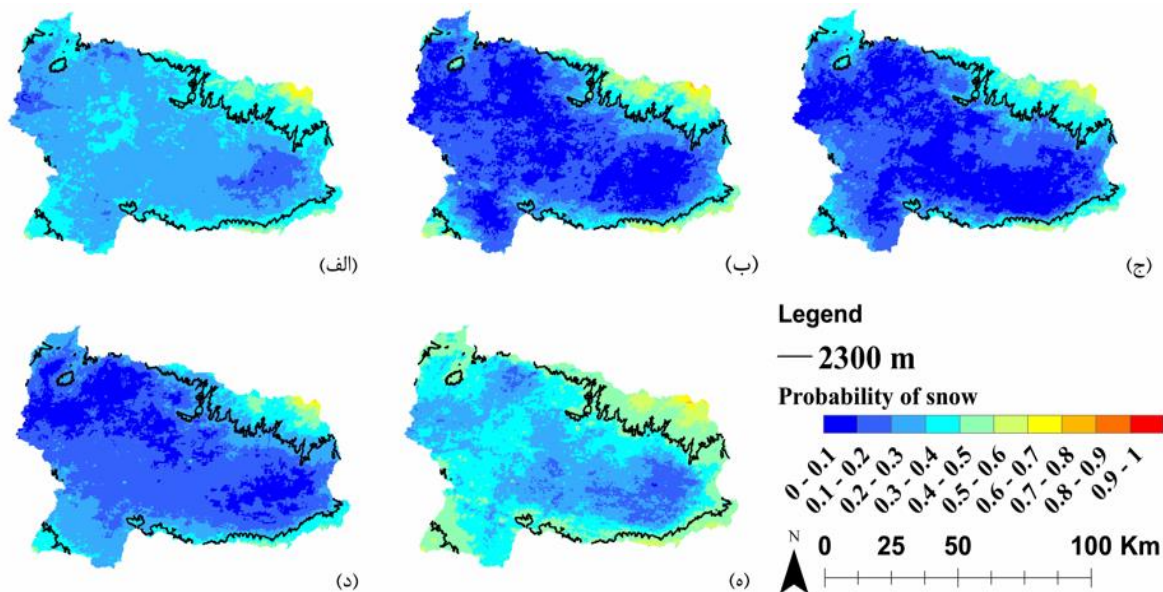
$$D_v = \frac{V_R - V'_R}{V_R} \cdot 100 \quad (6)$$

که در رابطه (۵)، Q'_i داده‌های محاسباتی و Q_i داده‌های مشاهداتی، \bar{Q} میانگین داده‌های مشاهداتی و در رابطه (۶)، V_R حجم رواناب مشاهداتی و V'_R حجم رواناب محاسباتی می‌باشند. مقدار منفی D_v به معنی این است که مقدار رواناب محاسباتی بیشتر از مقدار محاسباتی است.

۳- نتایج و بحث

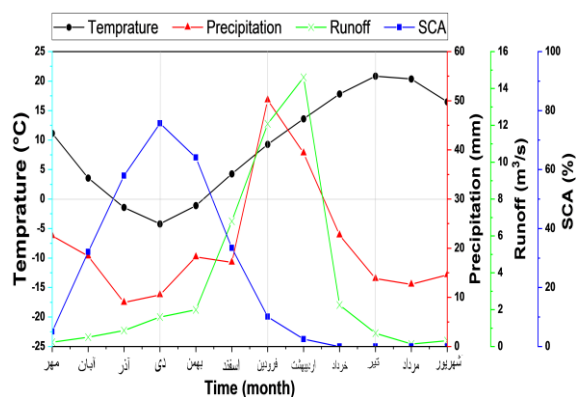
۳-۱- طبقات ارتفاعی و SCA

در مناطق کوهستانی بیشتر پدیده‌های هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی برای مثال دما، هیپسومتري و برف انباشته تحت تأثیر ارتفاع قرار دارند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴). به منظور مدل‌سازی ذوب برف- رواناب برای حوضه مطالعاتی با استفاده از مدل SRM، حوضه بر اساس پایین‌ترین کد ارتفاعی (۱۴۶۷ متر) و بالاترین کد ارتفاعی (۳۸۷۵ متر) با استفاده از لایه رقمی ارتفاعی به ۵ طبقه دسته‌بندی شد (شکل (۳)). مساحت هر یک از طبقات ارتفاعی در جدول (۱) ارائه گردیده است.



شکل ۵- مقادیر احتمال وجود برف در یک سال آبی: الف) ۱۳۸۷، ب) ۱۳۸۸، ج) ۱۳۸۹، د) ۱۳۹۰، ه) ۱۳۹۱

برف‌های کم حجم باعث کاهش مساحت پوشش برف و افزایش دبی آستانه بالا شده که متأسفانه این شرایط را مدل SRM نمی‌تواند به‌درستی لحاظ و محاسبه کند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۶- مقادیر میانگین ماهانه پوشش برف، دما، باران و رواناب ایستگاه‌های هواشناسی سراب و هیدرومتری مرکید

در ادامه نمونه‌هایی از تصاویر پوشش برف در حوضه در شکل (۷) نشان داده می‌شود. هر تصویر نشان دهنده مجموع پوشش برف هشت روزه است که واضح است با کاهش دما، پوشش برف در منطقه افزایش پیدا میکند به طوری که در تصویر (۷-ج) بیشتر مساحت حوضه پوشش برف را تجربه کرده است.

با استفاده از تصاویر استخراج‌شده می‌توان درصد احتمال وجود برف در یک سال آبی را محاسبه کرد. در شکل (۵) احتمال وجود برف در پیکسل‌های خروجی از الگوریتم NDSI برای هر سال آبی ارائه شده است. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، بیش‌ترین احتمال وجود برف در کل سال (بیش از ۶۰٪) در ارتفاع بالای ۲۳۰۰ متری اتفاق افتاده است. همچنین بیش‌ترین روزهای برفی در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ رخ داده است که در این حالت میانگین پوشش برف نسبت به مساحت کل حوضه به‌ترتیب ۳۴/۳ و ۲۹/۶ درصد بوده است.

شکل (۶) نشان‌دهنده مقادیر میانگین ماهانه مساحت پوشیده از برف، دما، باران و رواناب مشاهداتی برای سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ می‌باشد. میانگین دما به جز در سه ماه دی، بهمن و اسفند بالای صفر درجه سانتی‌گراد بوده و ماه تیر گرم‌ترین ماه را به خود اختصاص داده است. بارش باران در ایستگاه سراب در ماه‌های آذر و دی دارای کم‌ترین در فروردین بیشترین مقدار بوده است. همچنین، ماه دی دارای بیش‌ترین درصد پوشش برف با کم‌ترین مقدار دما و بارش باران است و با افزایش دما و بارش باران، پوشش برف نیز کاهش یافته و به کم‌ترین مقدار خود در ماه اردیبهشت رسید که در نتیجه آن، بیش‌ترین مقدار رواناب در این ماه به ثبت رسیده است. از ماه خرداد تا اواخر مهر به‌جز در مرتفع‌ترین نقاط (ارتفاع بیشتر از ۳۳۰۰ متر) پوشش برف قابل توجهی مشاهده نمی‌شود؛ در نتیجه می‌توان ابراز کرد که رابطه‌ای کاملاً مشهود میان پوشش برف و رواناب وجود دارد چراکه نقش بارش باران بر روی برف به عنوان عامل تسریع‌کننده در فرآیند ذوب برف است (Singh و همکاران، ۱۹۹۷) زیرا دمای قطرات باران با ذوب

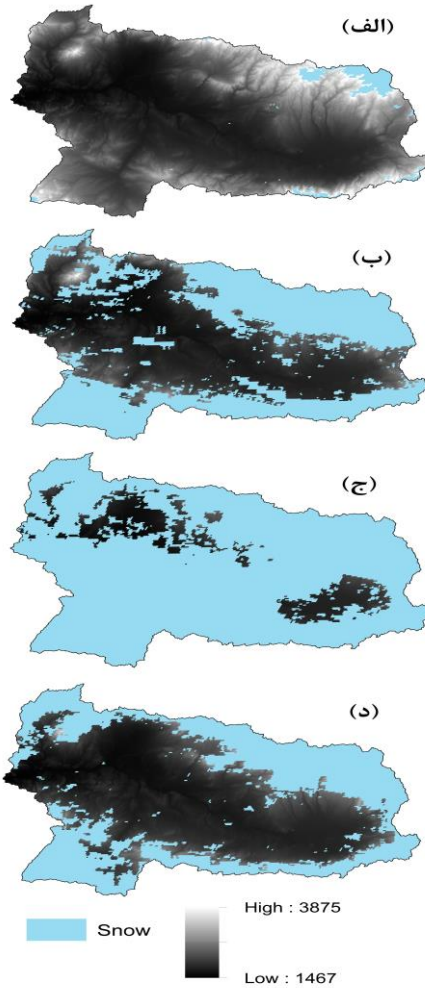
برای دوره صحت‌سنجی به‌صورت میانگین روزانه روزهای متناظر دوره واسنجی به مدل اعمال شدند.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای از پیش تعیین‌شده برای دوره

واسنجی و صحت‌سنجی		
پارامتر	مقدار	توضیحات*
Lapse rate (°C /100 m)	۰/۶	آهنگ تغییرات دما با تغییر هر ۱۰۰ متر نسبت به ایستگاه مرجع
T_{crit} (°C)	۰	دمای بحرانی (جهت تشخیص بارش به عنوان برف یا باران)
DDF (cm °C ⁻¹ d ⁻¹)	۰/۱۵	نرخ ذوب برف به ازای افزایش یک درجه سانتی‌گراد بالای دمای بحرانی
Lag time (h)	۱۸	اختلاف زمانی برف ذوب‌شده و حضور آن در خروجی حوضه
RCA	(فروردین-آبان) ۰ (آذر- بهمن) ۱	ناحیه مشارکت بارش باران در رواناب به‌صورت رواناب ناشی از باران یا برف
X_c	۰/۸۸	ضرایب داخلی فرمول ضریب فروکش
Y_c	۰/۰۵	رواناب

* Martinec و همکاران، ۲۰۰۸

در روش چندایستگاه، مدل برای هر دو زیر حوضه به‌صورت هم‌زمان اجرا و با ایجاد تغییرات در پارامترهای ضرایب رواناب برف و باران (C_r و C_s)، مقدار شاخص R^2 برای هر دو زیر حوضه با پارامترهای یکسان محاسبه شد و بهترین مقادیر برای دوره صحت‌سنجی انتخاب شدند که در شکل (۸) نحوه تغییرات شاخص R^2 در روش واسنجی چندایستگاه، برای هر دو زیر حوضه نشان داده شده است. جهت صحت‌سنجی مدل، میانگین روزانه داده‌ها به‌دست آمده برای هر طبقه ارتفاعی، به عنوان ورودی در نظر گرفته شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول (۳) نشان داده شده است. منحنی‌های ارائه‌شده در شکل (۸) برای سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ (دوره واسنجی) نشان‌دهنده بهترین مقادیر برای دو زیرحوضه پایین دست و بالادست است. برای دستیابی به بهینه‌ترین مقادیر پارامترها، با ایجاد تغییرات در پارامترهای ضرایب رواناب برف و باران (C_r و C_s)، مقدار شاخص R^2 نیز تغییر می‌کند. با ادامه همین روند شاخص R^2 برای یک زیر حوضه افزایش ولی برای دیگری کاهش می‌یابد که همین نقاط (نقاط قرمز رنگ) حالت بهینه را ارائه می‌کند. در روش واسنجی چند ایستگاه همه تکرارها با تغییرات ضرایب رواناب انجام شد چراکه این ضرایب بیش‌ترین عدم قطعیت را برای حوضه‌های بزرگ (از نظر مکانی و ارتفاعی) دارا می‌باشند. همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است در هر بار تلاش، شدت



شکل ۷- نمونه تصاویر پوشش برف در سال ۱۳۸۹:
الف) ۱۰ آبان، ب) ۱۱ دی، ج) ۱۳ بهمن، د) ۱۵ اسفند

۳-۲- نتایج مدل‌سازی SRM

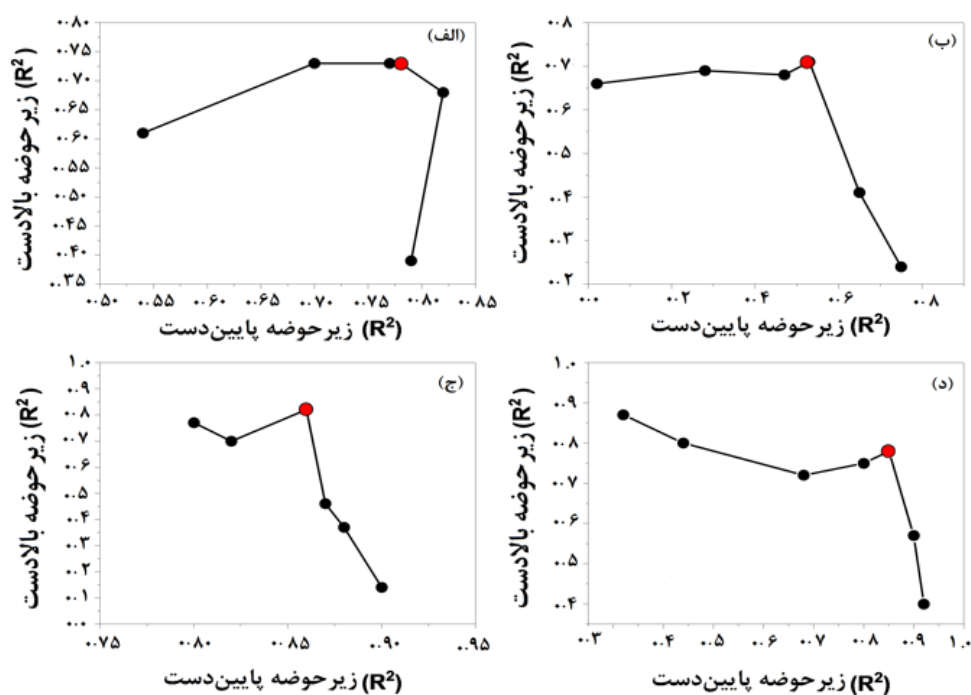
بعد از تهیه تصاویر ماهواره‌ای و نسبت مساحت پوشیده از برف برای حوضه مطالعاتی، ورودی‌های مدل SRM تکمیل می‌شود. شروع فرآیند شبیه‌سازی نیازمند یافتن پارامترهای مدل است که با از طریق روابط نظری و تجربی (روابط (۲)، (۳) و (۴)) و همچنین پیشنهادات پژوهش‌های گذشته مقادیر مربوطه اختیار گردید (جدول (۲))، درنهایت واسنجی مدل SRM از طریق دو سناریوی واسنجی چندایستگاه و تک‌ایستگاه برای چهار سال آبی در بازه ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ انجام شد.

در فرآیند واسنجی مقادیر پارامترهای مدل به اندازه‌ای تغییر می‌یابد تا هیدروگراف^{۱۳} مشاهداتی و محاسباتی بهترین تطابق را داشته باشند. در ادامه مدل برای سال آبی ۱۳۹۱ فرآیند صحت‌سنجی شد. ضرایب رواناب برف و باران به عنوان پارامترهای واسنجی‌شده برای هر پنج طبقه ارتفاعی مقادیر به‌دست آمد و

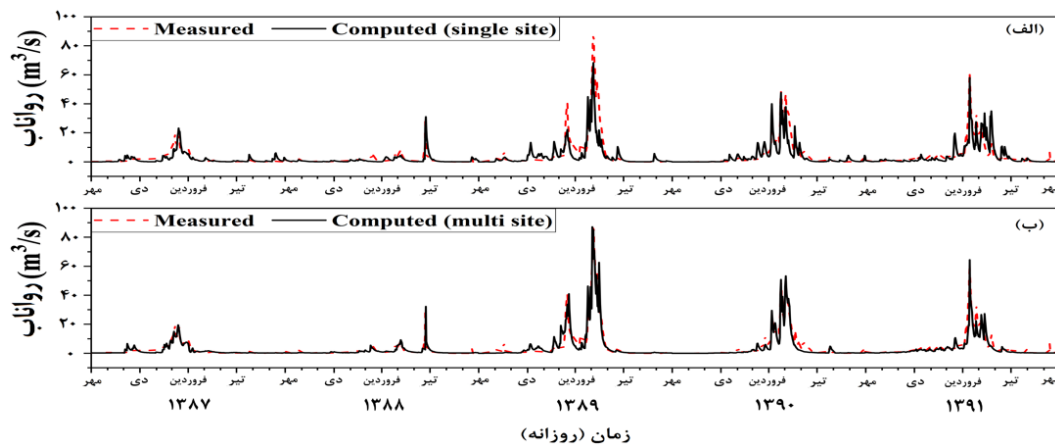
جدول ۳- نتایج دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای روش

شبه‌سازی تک‌ایستگاه		شبه‌سازی چندایستگاه		سال آبی (دوره)
R^2	D_v (%)	R^2	D_v (%)	
۰/۷۱	-۷/۰۱	۰/۸۴	۸/۸۲	۱۳۸۷ (واسنجی)
۰/۵۸	۲/۷۲	۰/۶۱	۱/۱۵۵	۱۳۸۸ (واسنجی)
۰/۷۳	۲۲/۲۲	۰/۸۹	۰/۱۷۵	۱۳۸۹ (واسنجی)
۰/۸۳	۲۷/۲۱	۰/۹۱	۲۲/۳	۱۳۹۰ (واسنجی)
۰/۶۶	-۴/۳	۰/۸۰	۲۱/۱۴۶	۱۳۹۱ (صحت‌سنجی)

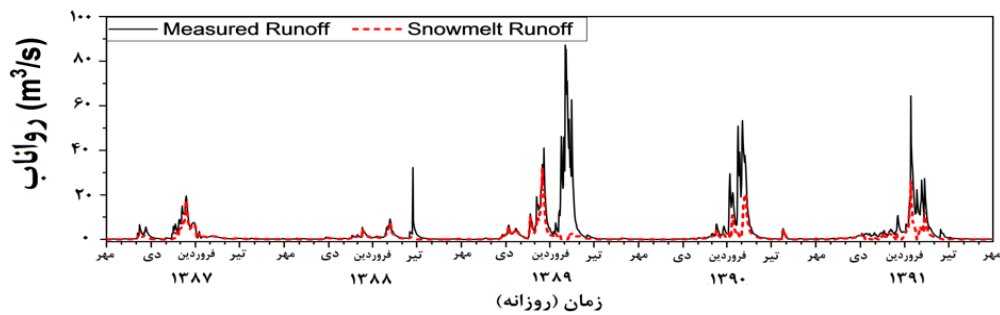
تغییرات در زیر حوضه پایین‌دست بیشتر از زیر حوضه بالادست می‌باشد که دلیل آن مساحت دو برابری این زیرحوضه است، زیرا ضریب رواناب بارش یکسان در هر دو زیرحوضه باعث تولید رواناب خروجی بیشتری در حوضه با مساحت بیشتر می‌شود که در شکل (۸-ب) به خوبی تأثیر ضریب رواناب بارش بر شاخص R^2 را نشان می‌دهد زیرا تأثیر برف در این سال پایینی‌ترین مقدار SCA را داشته است و بارش عامل اصلی تغییرات بوده است. ضریب رواناب برف در ارتفاعات بیش‌ترین مقدار را اختیار می‌کند زیرا تأثیر این ضریب در سه طبقه ارتفاعی بالا (ارتفاعات بالاتر از ۲۳۰۰ متر) که درصد پوشش برف در هر سال آبی بیشتر از ۲ طبقه ارتفاعی پایین‌تر است.



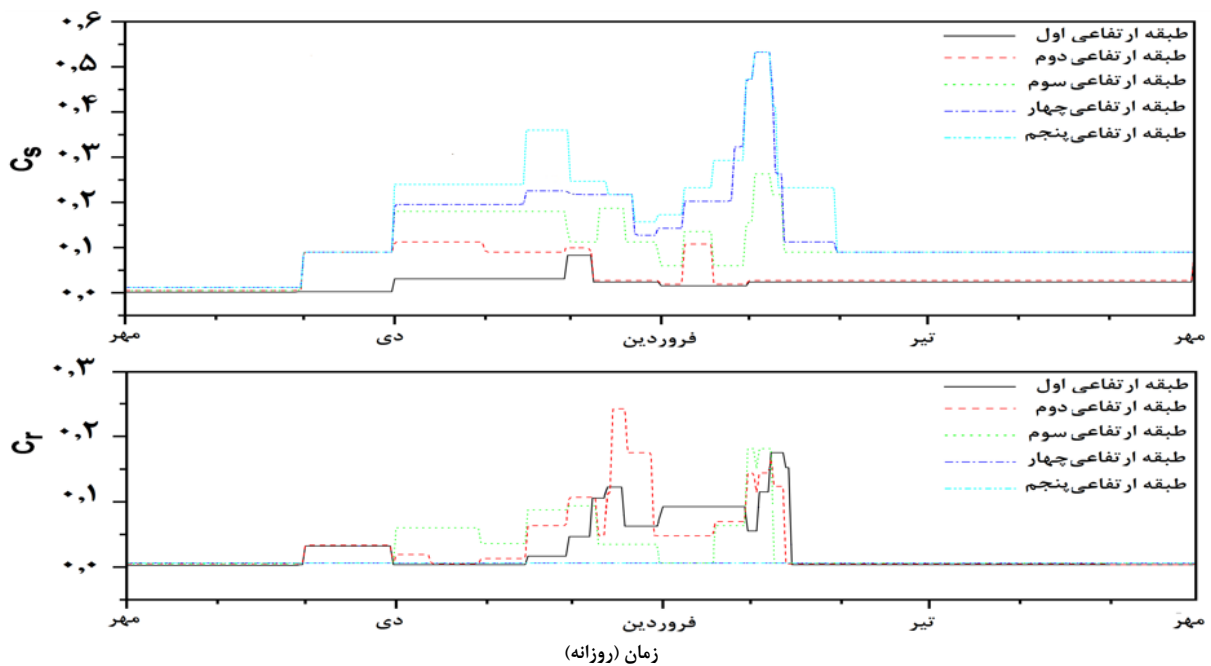
شکل ۸- نتایج واسنجی چند ایستگاه مدل SRM برای دوره واسنجی: الف) ۱۳۸۷، ب) ۱۳۸۸، ج) ۱۳۸۹، د) ۱۳۹۰



شکل ۹- ضرایب رواناب برف و باران محاسبه‌شده از طریق واسنجی چندایستگاه و مورد استفاده در دوره صحت‌سنجی (۱۳۹۱)



شکل ۱۰- هیدروگراف مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری مرکید و محاسباتی: الف) تک ایستگاه، ب) چند ایستگاه (۱۳۸۷-۱۳۹۱)



شکل ۱۱- رواناب خروجی کل حوضه و رواناب حاصل از ذوب برف (۱۳۸۷-۱۳۹۱)

رواناب باران تا اواخر بهمن ما تغییرات زیادی نداشته زیرا دما در اکثر روزها زیر صفر (دمای بحرانی) بوده و باران به شکل برف در نظر گرفته شده است. در مقابل با افزایش دما از ماه بهمن ضریب رواناب برف اعداد بزرگتری را در بر گرفته است و در دبی‌های اوج در ماه‌های اردیبهشت و فروردین (شکل ۱۰)) تأثیر آن بیشتر می‌شود. در کل این ضرایب با استفاده از روش واسنجی چند ایستگاه به دست آمده است و این روش باعث افزایش دقت پارامترها شده و تطابق فیزیکی با شرایط حوضه را بالا می‌برد. در دوره تابستان که دبی عددی نزدیک به صفر داشت مقادیر این ضرایب تغییری نداشته‌اند.

با توجه به نتایج معیارهای ارزیابی (شاخص R^2 و D_v) ارائه شده در جدول (۳) مدل SRM از دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب با استفاده از ذوب برف برخوردار است. روش چند ایستگاه با توجه به جدول (۳) نتایج بهتری را در مقایسه با مدل‌سازی کل حوضه ارائه می‌دهد. با توجه به این که کل حوضه مساحت بزرگی دارد،

مدل‌سازی و واسنجی هم‌زمان دو ایستگاه منجر به انتشار اثرات و شرایط پارامترهای زیرحوضه بالادست به پایین دست و بالعکس شده که در صورت تخمین مناسب این پارامترها همراه با مقادیر رواناب خروجی از ایستگاه‌ها می‌تواند مفهوم و تفسیر فیزیکی پارامترهای مدل را قابل درک می‌کند. تعداد آزمون‌ها برای دستیابی به بهترین مقدار پارامترهای واسنجی متفاوت بوده تا به بهترین مقادیر با حداکثر مقدار شاخص R^2 دست یافت.

ضرایب رواناب برف و باران (C_r و C_s) به دست آمده از روش واسنجی چند ایستگاه به صورت سری زمانی در شکل (۹) ارائه شده است. طبق انتظار، ضریب رواناب برف در طبقات ارتفاعی چهارم و پنجم اعداد بزرگتری را به خود اختصاص داده و تأثیر این دو طبقه ارتفاعی را بر رواناب بالا برده است. در آن سو ضریب رواناب باران نیز در طبقه ارتفاعی اول و دوم نقش بیشتری را ایفا می‌کند و دلیل این امر نبود پوشش برف در این ناحیه و همچنین مساحت بیشتر نسبت به بقیه طبقات ارتفاعی. مقادیر ضریب

۴۳ و ۳۶ درصد از حجم رواناب محاسباتی را تشکیل داده‌اند. بیش-ترین مقادیر تأثیر برف در یک سال به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ رخ داده است (به ترتیب حدود ۶۰٪ و ۴۰٪).

با توجه نتایج و بحث ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که تصاویر هشت روزه MODIS (MOD10A2) با توجه به عملکرد مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی، برای حوضه مورد نظر مناسب بوده و مساحت پوشش برف با دقت بالایی به دست آمده است. در کل کیفیت داده‌های ورودی، دقت پارامترهای واسنجی شده و پارامترهای واسنجی نشده در کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی بسیار مؤثر می‌باشد و در مدل SRM نیز کیفیت داده‌های برف و دما به‌عنوان دو ورودی مهم و همچنین تعداد طبقات ارتفاعی می‌تواند بر عملکرد مدل تأثیر بگذارد.

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق فرآیند ذوب برف و تأثیر آن بر رواناب یکی از مهم‌ترین مسائل مدیریت منابع آبی است که در زمینه‌های مختلفی همچون آبیاری اراضی، کنترل سیل، تولید انرژی آبی بسیار پرکاربرد است. عمده حوضه‌های شمال غرب و غرب کشور برف‌گیر بوده و استفاده از مدل‌های مختلف در جهت پیش‌بینی مقدار رواناب ذوب برف بسیار اهمیت دارد. از این جهت، مدل SRM یک ابزار تأثیرگذار برای شبیه‌سازی با دقت بالا در حوضه‌های کوهستانی مورد استفاده قرار گرفت که مدیریت منابع آب و پیش‌بینی سیل‌های ناشی از ذوب برف به‌خوبی می‌تواند با استفاده از این مدل بهینه و کنترل شود.

مشکل کمبود یا نبود ایستگاه‌های برف‌سنجی در حوضه‌های برف‌گیر و کوهستانی باعث شده است که استفاده از ابزار سنجش از راه دور در سال‌های اخیر محبوبیت بالایی پیدا کند و در این زمینه بسیار کارگشا بوده و با هزینه کم‌تر نتایج مطلوبی را در اختیار محققین قرار داده است. در این تحقیق تصاویر MOD10A2 که در بازه زمانی هشت روزه پوشش برف در هر پیکسل را ثبت می‌کنند، برای استخراج مساحت پوشش برف به‌کار گرفته شدند که نتایج نشان از قابل اعتماد بودن این تصاویر دارد.

با توجه به نتایج و بحث مطرح‌شده، مدل SRM توانایی شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های برف‌گیر را دارا می‌باشد. روش چند ایستگاه با کاربرد گسترده داده‌ها و اطلاعات فیزیکی زیرحوضه‌ها نتایج قابل اعتمادتری را نسبت به روش خروجی کل گزارش کند که در این پژوهش دقت در دوره واسنجی به طور میانگین ۱۲٪ و در دوره صحت‌سنجی ۲۲٪ در مقایسه با روش واسنجی تک‌ایستگاه بهبود داشته است و همچنین پارامترها را نزدیک‌تر به شرایط فیزیکی حوضه ارائه می‌دهد.

در واسنجی کل حوضه نمی‌توان مشخصات و ویژگی‌های هر زیرحوضه را لحاظ کرد. اما با تقسیم منطقه به چند زیر حوضه کوچک‌تر دقت نهایی افزایش می‌یابد. مقادیر شاخص R^2 در سال ۱۳۸۸ برای هر دو روش واسنجی مقادیری پایین است که می‌تواند به دلیل رواناب حجمی سالانه بسیار پایین در مقایسه با سال‌های دیگر باشد. حجم رواناب سالانه برای سال ۱۳۸۸ عددی برابر با ۳۶/۴۱ میلیون مترمکعب است که مقداری بسیار کم نسبت به میانگین سال موردبررسی، ۱۱۲/۱۱ میلیون مترمکعب است و با این‌که تفاوت حجمی بسیار کم بوده ولی دقت تطابق (شاخص R^2) به دلیل کوچک بودن مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی، با مقداری اختلاف باعث کاهش زیادی در دقت مدل‌سازی مشاهده می‌شود. دلیل دیگر برای این موضوع این می‌تواند باشد که در بعضی روزها رواناب به شدت افزایش و سپس سریع کاهش پیدا کرده است و در نتیجه مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق آن نبوده است، زیرا در اکثر روزهای سال مقدار رواناب تغییرات نرم‌تری^{۱۴} نسبت به تک‌روزها داشته و مقدار ضریب فروکش (که شیب فروکش هیدروگراف با این ضریب تغییر می‌یابد) متأثر از این روزها بوده است. استفاده از یک ایستگاه هواشناسی می‌تواند باعث کاهش دقت در محاسبه دبی روزانه در مدل‌سازی گردد، زیرا در حوضه‌ای با وسعت زیاد دما در طول شبانه روز در نقاط متفاوت از حوضه تفاوت زیادی می‌تواند داشته باشد، البته با روش‌های مختلف واسنجی می‌توان این نقیصه را جبران کرد.

شکل (۱۰) مقادیر دبی شبیه‌سازی شده با استفاده از هر دو روش تک‌ایستگاه و چندایستگاه و مشاهداتی نشان می‌دهد طبق آن روش واسنجی چند ایستگاه عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی دبی‌های پیک از خود نشان داد ولی در تخمین حجم رواناب، شبیه‌سازی به روش تک‌ایستگاه (۹۷/۷۵ میلیون مترمکعب) عملکردی نسبتاً بهتری در مقایسه با روش واسنجی چند ایستگاه (۹۲/۶۱ میلیون مترمکعب) داشته و اختلاف حجمی کم‌تر بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی ملاحظه می‌شود (جدول (۳)). هیدروگراف رواناب ذوب برف محاسباتی و مشاهداتی در خروجی حوضه (ایستگاه مرکید) در شکل (۱۱) ارائه شده است. مدل SRM توانایی محاسبه رواناب با مشارکت برف و باران به‌صورت هم‌زمان را داراست پس با حذف تأثیر بارش باران می‌توان اثرگذاری ذوب برف بر رواناب را محاسبه نمود. نتایج حاکی است که مقدار میانگین حجمی تأثیر ذوب برف بر رواناب برای پنج سال آبی در شبیه‌سازی با روش واسنجی چند ایستگاه برابر ۳۶/۷۳ میلیون مترمکعب است که در مدت مشابه مقداری حدود ۳۳ میلیون مترمکعب برای تک‌ایستگاه محاسبه شد که به ترتیب

- multi-site calibration and validation: a case study of SWAT in the Miyun Reservoir watershed", China. *Frontiers of Earth Science*, 2017, 11, 592-600.
- Bekele EG, Nicklow JW, "Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II", *Journal of Hydrology*, 2007, 341 (3-4), 165-176.
- Hall DK, Riggs GA, "Accuracy assessment of the MODIS snow products", *Hydrological Processes*, 2007, 21 (12), 1534-1547.
- Han P, Long D, Han Zh, Du M, Dai L, Hao X, "Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modelling", *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224, 44-59.
- Harshburger BJ, Karen SH, Von PW, Brandon CM, Troy RB, Rango A, "Evaluation of short-to-medium range stream flow forecasts obtained using an enhanced version of SRM", *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 2010, 15 (1), 1752-1688.
- Huang X, Liang T, Zhang X, Guo Zh, "Validation of MODIS snow cover products using Landsat and ground measurements during the 2001-2005 snow seasons over northern Xinjiang, China", *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32 (1), 133-152.
- Jain SK, Goswami A, Saraf AK, "Snowmelt runoff modelling in a Himalayan basin with the aid of satellite data", *Journal International Journal of Remote Sensing*, 2011, 31 (24), 6603-6618.
- Klein AG, Barnett AC, "Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000-2001 snow year", *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86 (2), 162-176.
- 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*, 2005, 19 (15), 2951-2972.
- Li H, Wang J, "The snowmelt runoff model applied in the Upper Heihe River Basin", *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30 (5), 769-775.
- Malcher P, Heidinger M, "Processing and data assimilation scheme for satellite snow cover products in the hydrological model", *Envi snow EVG1-CT*, 2001, 00052.
- Martinez J, "Snowmelt-runoff model for streamflow forecasts", *Nordic Hydrology*, 1975, 6, 145-154.
- Martinez J, Rango A, Roberts R, "Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual", *USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, USA*, 2008.
- Ringgs GA, Hall DK, "MODIS Snow Products Collection 6 User Guide", <https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/MODIS-snow-user-guide-C6.pdf>, 2016.
- Rulin O, Liliang R, Weiming C, Zhongbo Y, "Application of hydrological models in a snowmelt region of Aksu River Basin", *Water Science and Engineering*, 2008, 1 (4), 1-13.
- Saeidifarzad B, Nourani V, Aalami MT, Chau KW, "Multi-site calibration of linear reservoir based geomorphologic rainfall-runoff models", *Water*, 2014, 6 (9), 2690-2716.
- با توجه به بزرگی حوضه مطالعاتی، استفاده از چندین ایستگاه هواشناسی برای محاسبه دقیق پارامتر آهنگ کاهش دما و دمای روزانه حوضه اهمیت بالایی دارد. همچنین ضریب فروکش که در چنین حوضه‌ها که مقدار رواناب در بازه‌های زمانی کوتاه شدت نوسان بالایی دارند باید در گام‌های زمانی کوتاه‌تری محاسبه شود؛ این موضوعات را می‌توان در مطالعات آتی برای افزایش دقت مدل‌سازی لحاظ کرد به طوری که مقادیر پارامترهای واسنجی شده به واقعیت‌های فیزیکی حوضه نزدیک‌تر گردند. همین‌طور می‌توان پارامترهای درجه-روز (a) و تأخیر زمانی (b) را نیز با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مناسب مورد واسنجی قرار داد و همچنین با استفاده از روش‌های تجربی دقیق‌تری مانند داده‌برداری در محل دقت این پارامترها را افزایش داد.
- آنالیز حساسیت پارامترهای مدل برای حوضه مورد مطالعه مؤلف‌های مهم برای یافتن متغیرهای مؤثر در تغییرات دقت مدل است و در مطالعات آتی می‌تواند زمینه را برای واسنجی دقیق مدل SRM فراهم سازد.
- ### ۵- مراجع
- فتاحی، دلاور م، قاسمی، "شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM مطالعه موردی حوضه آبریز بازیافت"، *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۳۹۰، ۲۰ (۲۳)، ۱۲۹-۱۴۱.
- مختاری مطلق پ، جوانی ب، شریفان ح، "برآورد رواناب حاصل از ذوب برف فصلی به کمک مدل SRM (مطالعه موردی: حوضه آبریز زیارت در استان گلستان)"، *اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، اصفهان، انجمن ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان*، ۱۳۹۲.
- نجف‌زاده ر، ابریشم‌چی، ا، تجریشی م، طاهری آیینی ح، "شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف"، *آب و فاضلاب*، ۱۳۸۳، ۱۵ (۴)، ۲-۱۱.
- Abudu S, Sheng Z, Cui C, Saydi M, Sabzi HZ, King JP, "Integration of aspect and slope in snowmelt runoff modelling in a mountain watershed", *Water Science and Engineering*, 2016, 9 (4), 265-273.
- Adnan M, Nabi G, Poomee MS, Ashraf A, "Snowmelt runoff prediction under changing climate in the Himalayan cryosphere: A case of Gilgit River Basin", *Geoscience Frontiers*, 2017, 8, 941-949.
- Andaryani S, Trolle D, Nikjoo MR, Rezaei Moghadam MH, Mokhtari D, "Forecasting near-future impacts of land use and climate change on the Zilbier river hydrological regime, northwestern Iran", *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78 (6), 1-14.
- Andersen J, Refsgaard JC, Jensen KH, "Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin-Model construction and validation", *Journal of Hydrology*, 2001, 247, 200-214.
- Bai J, Shen Zh, Yan T, "A comparison of single-site and

- Saydi M, Ding JL, Sagan V, Yan Q, "Snowmelt modeling using two melt-rate models in the Urumqi river watershed, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China", *Journal of Mountain Science*, 2014, 16, 2271-2284.
- Seidel K, Martinec J, "Hydrological applications of Satellite Snow Cover mapping in the swiss Alps", *Proceedings of Earsel-Lissig-Workshop Observing Our Cryosphere from Space*, 2002, 79-87.
- Singh P, Spitzbart G, Hübl H, Weinmeister HW, "Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: a field study", *Journal of Hydrology*, 1997, 202 (1-4), 1-20.
- Tekeli AE, Akyürek Z, Şorman A, Şensoy A, Şorman AÜ, "Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey", *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97, 216-230.
- Vafakhah M, Nouri A, Alavipanah SK, "Snowmelt-runoff estimation using radiation SRM model in Taleghan watershed", *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73 (3), 993-1003.
- Zhang G, Xie H, Yao T, Li H, Duan S, "Quantitative water resources assessment of Qinghai Lake basin using Snowmelt Runoff Model (SRM)", *Journal of Hydrology*, 2014, 519, 976-987.
- Fazel N, Torabi Haghighi A, Kløve B, "Analysis of land use and climate change impact by comparing river flow records for headwater and lowland reaches", *Global and Planetary Change*, 2017, 158, 47-56.

EXTENDED ABSTRACT

Multi-station Calibration of Snowmelt Runoff Model (SRM) Using Remote Sensing Tools in Aji-Chay Basin, Iran

Vahid Nouran^{*}, Amin Afkhaminia, Soghra Andaryani

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 23 September 2020; Accepted: 20 December 2020

Keywords:

Snowmelt runoff simulation, multi-station simulation, MODIS, SRM, RS.

1. Introduction

Global warming and climate change affect the depletion of available water resources and limited access to new resources in recent years. Due to these issues, the essential of managing water resources feels more than ever. Water resources have been one of the most important topics in recent years, and many types of researches have been done so far (Rulin et al., 2008). Snow is one of the essential factors in maintaining and sustaining people's livelihood. The snowmelt runoff model (SRM) is a degree-day-based method. The SRM was presented to calculate the snowmelt impact on watershed daily runoff (Martinec, 1975). The SRM was successfully applied in some basins to simulate melt season runoff (Zhang et al., 2014; Tekeli et al., 2005). Multi-station calibration has been used in this study that is a useful way to overcome the limitations of Single-site calibration strategy (e.g., large-scale basins with much spatial variability).

2. Methodology

2.1. Data acquiring

The SRM needs three inputs to run: a) temperature, b) precipitation, and c) the snow-covered area (SCA) on a daily scale. Using remote sensing tools or ground observation stations data are two primary ways to provide these variables. The MODIS snow data was used in this study to calculate the SCA that is a substantial input in the SRM. These data have various levels that have been divided into different temporal resolutions, i.e., daily, 8-day, and monthly average. Also, these images are driven from the Normalized Difference Snow Index (NDSI) algorithm, which uses MODIS reflectance bands 4 and 6, according to Eq. (1) (Hall and Riggs, 2007):

$$NDSI = \frac{Band\ 4 - Band\ 6}{Band\ 4 + Band\ 6} \quad (1)$$

2.2. Snowmelt runoff model (SRM)

The SRM is a degree-day model; in this kind of model, the temperature is the principal element to advocate melting in mountainous regions. According to the Eq. (2), the SRM is used to simulate and forecast runoff by the contribution of snowmelt and rainfall (Martinec et al., 2008):

$$Q_{n+1} = \underbrace{C_{Sn} \cdot a_n(T_n + \Delta T_n)S_n \cdot A \cdot 0.116(1 - k_{n+1})}_{\text{snowmelt runoff}} + \underbrace{C_{Rn}P_n \cdot A \cdot 0.116(1 - k_{n+1})}_{\text{rainfall-runoff}} + \underbrace{(Qs_n + Qr_n)k_{n+1}}_{\text{runoff contribution from the previous day}} \quad (2)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: nourani@tabrizc.ac.ir (Vahid Nourani), : a.afkhami97@ms.tabrizu.ac.ir (Amin Afkhaminia), s.andaryani@gmail.com (Soghra Andaryani).

Where Q is the mean daily discharge (m^3/s); C is the snow (C_s) or rain (C_r) runoff coefficient; a is the degree-day factor (DDF) ($cm\ ^\circ C^{-1}\ d^{-1}$); T is number of the degree-day ($^\circ C\ d$); ΔT is the temperature adjustment factor ($^\circ C\ d$); S is the ratio of the snow-covered area to the total area; P is precipitation contributing to runoff (cm); A is the area of basin or elevation zone (km^2); n is the sequence of days during the discharge computation period, and k is the recession coefficient (X_c and Y_c). The most uncertain parameters are the runoff coefficients (C_s and C_r), so they have been implemented to calibrate the model with both of the mentioned calibration strategies (Multi-station and Single-site).

3. Results and discussion

3.1. Elevation zones and SCA

To improve the efficiency of the SRM, the study basin has been divided into different elevation zones by DEM. This feature has an essential capability concerning the height, which affects the temperature variable and modifies its accuracy. Therefore, the basin has been shared into five elevation zones with a 500m increment in each zone. The case study has been divided into two sub-basins to use in the multi-station strategy.

SCA is the most important parameter to run the model. MODIS 8-day snow cover images (MOD10A2) have been used to compute the SCA by ENVI and ArcMap programs. SRM needs daily data. Therefore, linear interpolation has been applied to transform the 8-day temporal resolution to a daily scale.

3.2. Simulation of SRM

The model was run for five hydrologic years, four years (2008-2011) for calibration, and one year (2012) for validation. Results show that multi-station calibration improves the accuracy of the model. Fig. 1 illustrates the hydrograph of simulation runoff and measured runoff for both calibration strategies.

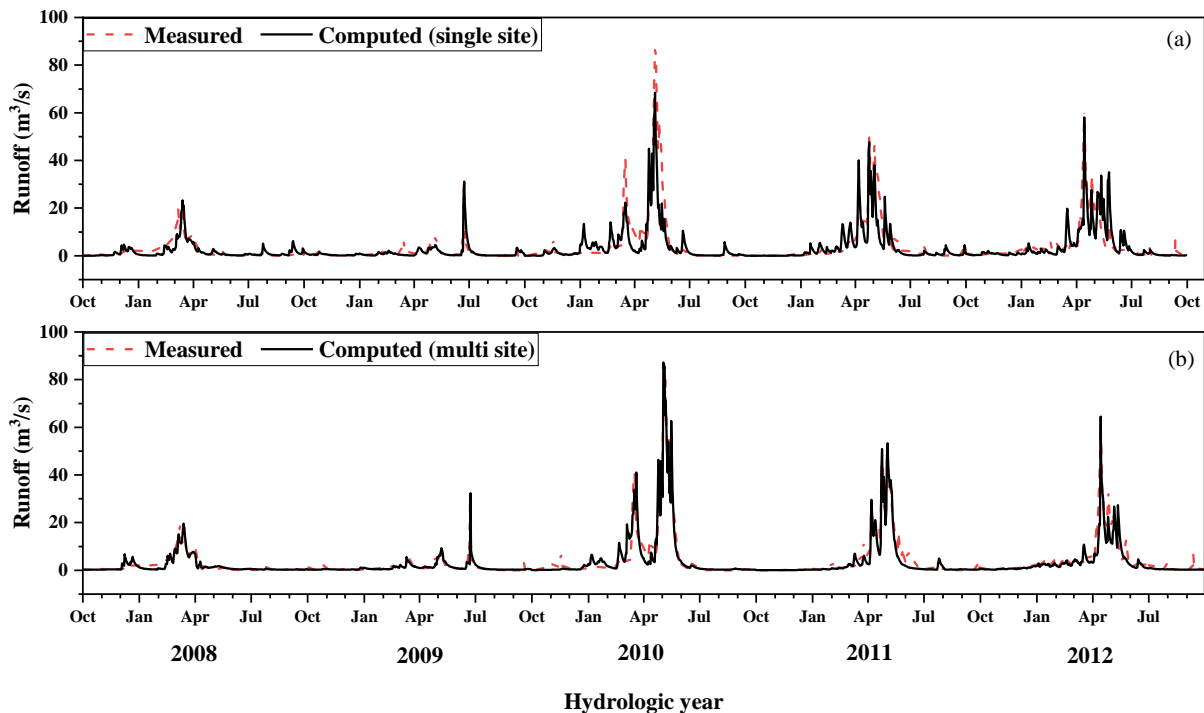


Fig. 1. Hydrograph of Measured and computed runoff for: a) Single-site, b) Multi-station strategies (2008-2012)

According to Fig. 1, the peak runoffs' simulation accuracy in multi-station calibration strategy is more than single-site calibration strategy. Computed daily snowmelt, which impacts runoff, is the critical part of this model; thus, snowmelt contribution is an average of 40%. The multi-station calibration provided more proportion of snowmelt rate in comparison with the single-site strategy.

4. Conclusions

The results outline that the SRM has an appropriate ability to simulate and forecast the daily runoff contributing to the snowmelt, and the temperature is a proper element to calculate the daily snowmelt rate.

The MOD10A2, which has 8-day temporal resolution, has been used for gathering the snow-covered area. Results show that this product is reliable for the Aji-Chay basin.

5. References

- Hall, DK, Riggs, GA, "Accuracy assessment of the MODIS snow products", *Hydrological Processes*, 2007, 21 (12), 1534-1547.
- Martinec, J, "Snowmelt-runoff model for streamflow forecasts", *Nordic Hydrology*, 1975, 6, 145-154.
- Martinec, J, Rango, A, Roberts, R, "Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual", USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, USA, 2008.
- Rulin, O, Liliang, R, Weiming, C, Zhongbo, Y, "Application of hydrological models in a snowmelt region of Aksu River Basin", *Water Science and Engineering*, 2008, 1 (4), 1-13.
- Tekeli, AE, Akyüreb, Z, Şorman, A, Şensoy, A, Şorman, AÜ, "Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey", *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97, 216-230.
- Zhang, G, Xie, H, Yao, T, Li, H, Duan, S, "Quantitative water resources assessment of Qinghai Lake basin using Snowmelt Runoff Model (SRM)", *Journal of Hydrology*, 2014, 519, 976-987.