

شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از نرم افزار آب‌شناسی SRM

(مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز سدکارده)

مرتضی اکبری^{۱*}، احسان رعنائی^۲، حسن میرزاخان^۳، علیرضا درگاهی^۴

چکیده

در این تحقیق، بدهی روزانه‌ی جریان ناشی از ذوب برف در حوضه‌ی آبخیز سد کارده، به عنوان یکی از منابع مهم تامین‌کننده‌ی آب در شهرستان مشهد، شبیه‌سازی گردید. اطلاعات آب‌سنجی و آمار بده روزانه از ایستگاه آب‌سنجی سد کارده برای یک دوره‌ی ۱۷ ساله استخراج شد. فراسنج‌های هواشناسی بارندگی و دما نیز از اطلاعات نزدیکترین ایستگاه‌های موجود در حوضه شامل گلمکان، مشهد و قوچان به دست آمدند. متغیرهای گیتاشناسی مانند: مساحت، متوسط ارتفاع وزنی هر طبقه ارتفاعی، و درصد مساحت هر جهت جغرافیایی با استفاده از شبیه‌رقومی ارتفاع و نقشه‌های پستی و بلندی ۱:۲۵۰۰۰م به دست آمده و به شبیه معرفی شدند. به منظور برآورد سطح پوشش برف از شاخص NDSI و تصاویر ماهواره‌ی لندست ETM⁺ سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۸۰ استفاده شد. نتایج نشان دادند که بهترین مقدار x و y (ضرایب معادله‌ی فروکش جریان) شبیه‌سازی شده به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۴ بوده که پس از معرفی به شبیه، توانست آب نگار جریان روزانه را بر اساس اطلاعات سال آبی مربوطه، با تطابق مناسبی با مقادیر واقعی، شبیه‌سازی نماید. در ارزیابی نرم افزار، مقادیر ضریب همبستگی و درصد تفاضل حجمی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۲۱ به دست آمدند. حجم رواناب محاسباتی ۴/۸۷۶ میلیون مترمکعب، مینگین و بدهی محاسباتی ۰/۲۱۲ متر مکعب بر ثانیه برآورد گردید، که با توجه به حجم رواناب مشاهداتی ۴/۸۸۶ میلیون مترمکعب، نشان دهنده‌ی انطباق خوب شبیه با مقادیر اندازه گیری شد. علاوه بر آن، از بین فراسنج‌های معرفی شده به مدل، بیشترین میزان حساسیت نسبت به تغییر ضریب رواناب، پوشش برف و ضریب فروکش جریان بوده که با مورد واسنجی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: نرم افزار SRM، شبیه‌سازی بدهی رواناب، تغییرات سطح پوشش برف، تصاویر ماهواره‌ای.

۱- استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

* نویسنده مسئول: (M_Akbari@um.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری عمران آب، دانشگاه صنعتی میلان

۳- کارشناس ارشد مهندسی آبخیزداری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

برف و رواناب ناشی از ذوب آن، نقشی اساسی را در تامین منابع آب شرب و کشاورزی، به صورت جریانهای تأخیری، بویژه در مناطق کوهستانی، ایفا می‌کنند. در بسیاری از مناطق، پوشش برف تأثیر شگرفی در تامین منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد. برای شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف، روشهای شاخص دما، روش تراز انرژی، و روش دما-تابش ارائه شده‌اند که از این بین، شبیه‌سازی درجه-روز، براساس روش اول (شاخص-دما)، بیشتر مورد توجه می‌باشد (رنگو و مارتینک، ۱۹۹۵). شبیه رواناب ناشی از ذوب برف (SRM)^۱ یک نرم افزار آب شناسی مفهومی و عینی بر اساس روش درجه-روز است که به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان روزانه‌ی متأثر از ذوب برف، در حوضه‌ها و رودهای کوهستانی، استفاده می‌شود. این نرم افزار برای اولین بار به وسیله‌ی مارتینک در سال ۱۹۷۵ برای حوضه‌های کوچک در اروپا توسعه یافت، بطوری که نسخه‌ی چهارم آن، که در سال ۱۹۹۴ ارائه شد، با استفاده از داده‌های سنجش از دور برای حوضه‌های بزرگتر، تا ۱۲۰۰۰۰ کیلومترمربع، نیز به‌کار گرفته شد (سیدل و مارتینک، ۲۰۰۴). نرم افزار SRM برای سه هدف متفاوت کاربرد دارد، که شامل شبیه‌سازی جریان روزانه درفصل ذوب برف و یا در مدت یک‌سال، پیش‌بینی رواناب فصلی، و ارزیابی توان تاثیر تغییرات اقلیمی بر سطح پوشش برف و رواناب فصلی است (رنگو و مارتینک، ۱۹۹۸).

سنجش از دور و استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای در چند دهه‌ی اخیر رشد سریع و چشمگیری داشته، و در رشته‌های مختلف منابع طبیعی و علوم زمینی کاربرد وسیعی یافته‌اند. درموردی که اطلاعات زمینی موجود نباشند، و یا به روز نشده باشند، می‌توان از پایگاه اطلاعات جغرافیایی نیز در تحلیل و مدیریت اطلاعات بهره‌مند شد. با توجه به ضرورت و اهمیت برف به عنوان مهمترین منبع آبی، بخصوص در حوضه‌های کوهستانی، تصاویر ماهواره‌ای، از جمله تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا، می‌توانند ابزار ارزشمندی در بررسی سطح پوشش برف و تغییرات آن در طول سال محسوب گردند. از کاربردهای مهم سنجش از دور در آب‌شناسی، به دست آوردن

داده‌های مربوط به برف، همچون سطح پوشیده از برف^۲ و آب معادل برف^۳ را می‌توان نام برد، که جهت پیش‌بینی رواناب ناشی از ذوب برف به صورت همزمان بسیار مهم می‌باشند. برای بدست آوردن فراسنج‌های آب‌شناسی با استفاده از این فن‌آوری، بایستی بازتابش برف در طول موجهای مختلف بررسی شود. علاوه بر آن، گزینش نوع سنجنده نیز باید بر اساس شرایط جوی، جغرافیای منطقه، فراسنج‌های آب‌شناسی مورد نیاز، و همچنین قدرت تفکیک مکانی آن صورت گیرد (روشنی و همکاران، ۱۳۸۷).

پرهمت و ثقفیان (۱۳۸۶)، با مقایسه‌ی دقت تصاویر ماهواره‌ای AVHRR^۴ و TM^۵ در تعیین پوشش برفی حوضه‌ی کارون، به این نتیجه رسیدند که استفاده از تصاویر نگاره‌های مزبور با قدرت تفکیک‌پذیری مکانی کمتر، باعث می‌شود تا سطوح دارای پوشش برفی بیشتر از حد و مقدار واقعی خود نسبت به آنچه در طبیعت وجود دارد، برآورد شوند، لذا استفاده از نگاره‌هایی با دقت مکانی بالا، مانند تصاویر لندست در تعیین سطوح پوشش برفی مناسبتر دانسته‌اند. روشنی و همکاران (۱۳۸۷) در منطقه‌ی یخچالی علم چال علم کوه، جهت تفکیک برف تازه و برف فشرده از تصاویر لندست و داده‌های ماهواره‌ی هند بهره برده و به این نتیجه رسیدند که طیف‌های الکترومغناطیس مرئی، مادون قرمز نزدیک و حرارتی، و همچنین طول موج بسیار ریز برای برف‌سنجی مناسبند. آنان در مطالعات خود از شاخص نرمال شده‌ی تمایز برف^۶ استفاده کردند.

رایگان و همکاران (۱۳۸۷) در محاسبه‌ی تغییرات نقشه‌ی پوشش برفی با استفاده از بیشترین و میانگین دمای روزانه، وسیله‌ی اندازه‌گیری میزان ذوب روزانه‌ی برف، و همچنین تصاویر ماهواره‌ای مودیس (MODIS)^۷ در حوضه‌ی سد زاینده رود، رواناب برف را با روشی کاملاً جدید و پیشنهادی مورد محاسبه قرار دادند. با استفاده از نتایج این تحقیق مشخص شد که می‌توان با کاربرد از

^۲ - snow cover area

^۳ - snow water equivalent

^۴ - advanced very high resolution radiometer

^۵ - thematic mapper

^۶ - normalized difference vegetation index, NDSI

^۷ - moderate-resolution imaging spectroradiometer

^۱ - snowmelt runoff model

معمول برای تعیین ذوب برف به کار می‌روند. یکی از پراستفاده‌ترین شبیه‌های تحلیل بده، گرفتن همبستگی بین درجه‌ی حرارت و اندازه‌گیریهای آبنجی ایستگاه است، مانند شبیه‌های تک لایه‌ای. دما متغیری اساسی برای برآورد ذوب برف در شبیه‌های مورد نظر است. در سال ۱۹۹۸ رنگو و مارتینک^۱ مقادیر درجه‌ی حرارت هوا را با درجه‌ی روزانه ترکیب نمود تا عامل فرساینده‌ی پوشش برفی را به دست آورد. به دلیل داشتن یک نرم افزار رواناب ساده، بیشتر شبیه‌های رواناب ذوب برف تنها از یک لایه استفاده می‌کنند. در شبیه‌های ذوب برف، جریان انرژی میان برف و نیوار مشخصاً به وسیله‌ی دما اداره می‌شود البته، شبیه‌های تک لایه‌ای دارای نقاط ضعفی نیز می‌باشند از جمله، نمایش ضعیف آنها در مراحل تبدیل کارمایه‌ی، ورودی به برف. در شبیه‌هایی که نیاز به برآورد درجه حرارت سطحی برف دارند، اشتباه در جزئیات داخلی برف منجر به لغزش در برآورد نرم افزار می‌شود (سیدل و مارتینک، ۲۰۰۴).

فتاحی و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعات خود در حوضه‌ی آبخیز بازفت، جهت شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف، با استفاده از داده‌های هشت روزه‌ی دانسته، MODIS و نرم افزار SRM، مدل مذکور را، مدلی مناسب و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با دقت بالا ارزیابی نموده‌اند. نجفی و همکاران (۱۳۸۶) نیز با استفاده از سنجش از دور و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی^۲، اقدام به تهیه شبیه ذوب برف در حوضه‌ی شهرچای ارومیه نموده‌اند. لی و ویلیام، (۲۰۰۸) در مطالعات خود، قابلیت نرم افزار SRM را در شبیه‌سازی ذوب برف در منطقه‌ی خشک کوهستانی با در نظر گرفتن تاثیر بازتابش برف و اشعه‌ی خورشیدی موج کوتاه بر عامل درجه-روز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که نرم افزار SRM قابلیت شبیه سازی ذوب برف را در این منطقه با ضریب خطای ۰/۶۴ در واسنجی یک‌ساله دارد. در مطالعه‌ی دیگر، ضریب همبستگی^۳ و تفاضل حجم مربوط به ارزیابی دقت نرم افزار SRM در حوضه‌های کوهستانی ایران مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از ارزیابی دقت شبیه در حوضه‌های خارج از کشور مقایسه گردید. نتایج نشان

تصاویر ماهواره‌ای مودیس با دقت بسیار مناسبی نقشه‌ی سطح پوشیده از برف را برداشته، و آن را برای محاسبات مربوط به توده‌ی برفی مورد استفاده قرار داد. همچنین با بررسی‌های مختلفی که در مورد تصاویر ماهواره‌ای انجام گرفت، و با روش‌هایی جدید، تغییرات سطح برف در زمانهایی که تصاویر ماهواره‌ای وجود نداشتند، برآورد گردید و در مقایسه با واقعیت، دقت روش بسیار خوب ارزیابی شد. رسولی ادهمی (۱۳۸۶) نیز از داده‌های ماهواره‌ای مودیس برای محاسبه‌ی آب معادل از پوشش برفی استفاده کردند. در مطالعات مشابهی نیز، تغییرات پوشش برف در یکی از حوضه‌های برفگیر سوییس با استفاده از داده‌های NOAA-AVHRR طی سال‌های آبی ۸۴-۱۹۸۳ و ۹۳-۱۹۹۲ میلادی مورد بررسی قرار گرفته است (بومگارتتر و همکاران، ۱۹۹۴). در مطالعه‌ای در شمال آمریکا، اثرات تغییر درجه حرارت به عنوان فراسنجی اصلی در پدیده‌ی ذوب برف مورد بررسی قرار گرفت (مارتینک و همکاران، ۲۰۰۸). در بررسی پوشش برف در منطقه شرقی ترکیه در کوه‌های سراب رود فرات از داده‌های زمینی موجود در ۵ ایستگاه هواشناسی، و تصاویر ماهواره‌ای MODIS با دقت ۵۰۰ متر استفاده شد. نتایج نشان دادند که دقت تصاویر ماهواره‌ای در تخمین سطح پوشیده از برف، مناسب است (تکلی و همکاران ۲۰۰۵). از نرم افزار SRM در شبیه‌سازی ذوب برف حوضه‌ی آپرایندوز رود آستور در شمال پاکستان در سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ میلادی، و همچنین تصاویر MODIS، به منظور برآورد سطح پوشش برف استفاده شد (بات و بیلال، ۲۰۱۱).

تعدادی از روش‌ها، برای سنجش میزان ذوب و رواناب برف، مانند شبیه‌های اندازه‌گیری کننده‌ی چند لایه، و مدل‌های تک لایه‌ای وجود دارند. شبیه‌های رواناب برف چند لایه، به علت استفاده از فراسنج‌های مهم زمین و ریخت شناسی، هیدروشمیای و آب‌شناسی در حال فراگیر شدند. شبیه‌های رواناب برف چندلایه، نرم افزارهایی می‌باشند که به غیر از عامل درجه‌ی حرارت از متغیرهای دیگری نیز برای پیش‌بینی رواناب برف استفاده می‌کنند. مهمترین و پر استفاده‌ترین شبیه چند لایه، نرم افزار تراز کارمایه می‌باشد. در بیشتر شرایط، کل کارمایه را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد، بنابراین، معادله‌ها یا روش‌های ذوب برف به کمک شاخص درجه‌ی حرارت به صورت

^۱-rango andmartinec

^۲-geographic information system

^۳-corrélation coefficient

نشان می‌دهد. حوضه‌ی آبخیز سد کارده از دو زیرحوضه‌ی اصلی تشکیل شده است، که آنها نیز به چندین زیرحوضه‌ی دیگر تقسیم می‌گردند. مساحت زیرحوضه‌ی اصلی اول ۹۱/۲۹ کیلومتر مربع می‌باشد که از دو زیرحوضه‌ی گوش و بهره و کوشک آباد تشکیل شده است. مساحت زیرحوضه‌ی اصلی دوم ۴۵۷/۳۷ کیلومتر مربع می‌باشد که از ۵ زیرحوضه حرکت، کریم آباد، مارشک، بلغور و سیج تشکیل شده است؛ در جدول ۲ به پاره‌ای از خصوصیات گیاتاشناسی زیرحوضه‌های نامبرده مستخرج از نقشه DEM^۲ منطقه در محیط نرم افزار GIS، با استفاده از نقشه‌های پستی و بلندی ۲۵۰۰۰ ام اشاره گردیده. مشخصات گیاتاشناسی حوضه‌ی آبخیز سد کارده، به همراه زیر حوضه‌های آن در جدول ۱ نشان داده شده اند.

مواد و روش‌ها

داده‌های ماهواره‌ای: به منظور برآورد سطح پوشش برف، از تصاویر ماهواره‌ی لندست، سنجنده ETM⁺ مربوط به سال آبی ۲۰۰۱-۲۰۰۲ میلادی با مسیر و گذار ۱۵۹-۳۴ و ۱۵۹-۳۵ استفاده شد (جهت همپوشانی کامل منطقه، تصاویر در ابتدا با یکدیگر جفت و جور^۳ شده‌اند). این سنجنده به دلیل دارا بودن قدرت تفکیک‌پذیری مکانی بالا، قابلیت خوبی را در تعیین بهینه‌ی پوشش برفی دارد؛ لذا، با استفاده از شاخص نرمال شده‌ی تمایز برفی (NDSI) رابطه‌ی ۱، سطوح پوشیده از برف تفکیک شدند. مناطقی از نوار ۲ با طول موج ۰/۵۶ تا ۰/۶ میکرو متر و نوار ۴ با طول موج ۰/۷۴ تا ۰/۹ که برف تازه در آن دارای بازتابش بالایی است، انتخاب گردیدند. به دلیل نداشتن داده‌های آموزشی برای طبقه‌بندی تصویر (مناطق دارای برف و بدون برف)، از الگوریتم طبقه بندی نظارت نشده k-means استفاده گردید (روشنی و همکاران، ۱۳۸۷).

$$NDSI = \frac{band2 - band4}{band2 + band4} \quad (1)$$

استخراج آمار و اطلاعات از ایستگاه‌های

هواشناسی و آب‌سنجی: با توجه به این که در محل سد کارده تنها یک ایستگاه آب‌سنجی واقع شده است، از آمار

نشان دادند که تفاضل حجم در مقایسه با R² تغییرپذیری بیشتری را در حوضه‌های ایران و دیگر کشورها از خود نشان می‌دهد (سیدی علم آباد و همکاران، ۱۳۸۷). هدف اصلی این تحقیق ارزیابی اندازه‌ی رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده داده‌های سنجش از دور به عنوان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و همچنین محاسبه‌ی بدهی روزانه با استفاده از نرم افزار آب‌شناسی SRM در حوضه‌ی آبخیز سد کارده می‌باشد.

منطقه‌ی مورد مطالعه

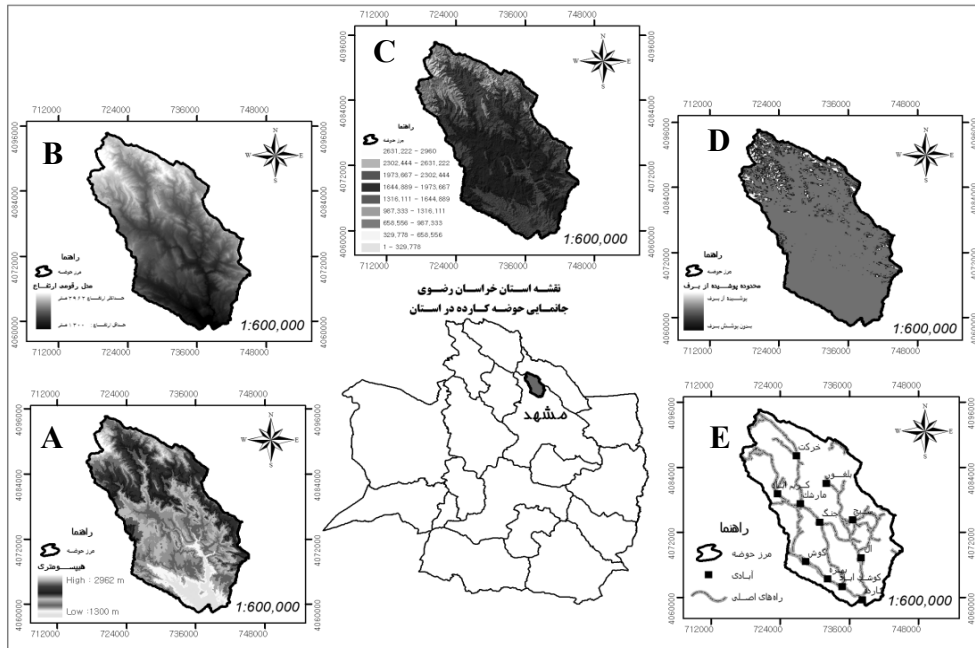
حوضه‌ی آبخیز سد کارده با مساحتی حدود ۵۶۰ کیلومتر مربع در شمال شهرستان مشهد و در شرق زون ۱ هزار مسجد-کپه داغ واقع شده، و یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه‌ی آبخیز کشف‌رود، محسوب می‌شود. حوضه‌ی آبخیز سد کارده از نظر موقعیت بین ۳۷°۲۶' تا ۵۸°۲۶' طول، و ۲۶°۵۹' تا ۴۶°۵۹' عرض جغرافیایی قرار داشته و جزء نواحی کوهستانی و مرتفع شمال شهر مشهد محسوب می‌رود. حدود ۲۶۱/۶۶ کیلومتر مربع این حوضه در ارتفاعی بالاتر از ۲۰۰۰ متر واقع شده است. پایینترین نقطه‌ی ارتفاعی حوضه‌ی آبخیز در قسمت خروجی و در پایاب آبادی کارده با ارتفاع ۱۳۰۰ متر، و بالاترین آن در شمال غرب حوضه با ارتفاع ۲۹۶۲ متر از سطح دریا می‌باشد. رود کارده دارای حجم آورد سالانه به میزان ۲۳/۲۱ میلیون مترمکعب می‌باشد، که سد کارده، با هدف استفاده از آب این رود، برای شرب و کشاورزی، بر روی آن احداث گردیده است. شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه را در استان خراسان رضوی نشان می‌دهد. برای برآورد رواناب سطحی سالانه، با استفاده از سه فراسنج بارندگی، دما و شیب و با کاربرد روش جاستین محاسبه شد. براین اساس، حجم رواناب سالانه‌ی حوضه ۲۲/۲۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. جدول شماره ۱ مشخصات برخی از فراسنج‌های هواشناسی و آب‌شناسی منطقه را در سال ۷۹-۸۰ نشان می‌دهد.

در شکل شماره ۱، حروف انگلیسی به ترتیب (A) طبقات ارتفاعی حوضه، (B) شبیه رقومی ارتفاع، (C) شبکه‌ی نامنظم مثلثاتی، (D) سطوح پوشیده از برف و فاقد برف در تصویر ماه فوریه ۲۰۰۱ میلادی، و (E) محدوده‌ی حوضه به همراه راه‌های اصلی و آبادی‌ها را

^۲-Digital Elevation Model

^۳-mosaic

^۱-Zone



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه.

جدول ۱- فراسنج‌های هواشناسی و آب‌شناسی زیر حوضه‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه.

زیرحوضه‌های اصلی	زیرحوضه‌های فرعی	مساحت (کیلومتر مربع)	بارندگی سالانه (میلی متر)	حجم بارش سالانه (میلیون متر مکعب)	ارتفاع رواناب (سانتی‌متر)	حجم رواناب (میلیون متر مکعب)	ضریب رواناب (درصد)	زیرحوضه‌های اصلی	
								گوش و بهره	کوشک‌آباد
اول	گوش و بهره	۴۶/۲۳	۴۰۸/۸	۱۸/۹	۴/۱۶	۱/۹۲	۱۰/۲		
	کوشک‌آباد	۴۵/۰۶	۳۱۴	۱۴/۱	۲/۰۲	۰/۹۱	۶/۴		
	خرکت	۹۷/۳۱	۴۳۳/۸	۴۲/۲	۴/۵۸	۴/۴۶	۱۰/۶		
دوم	کریم‌آباد	۶۹/۰۳	۴۲۲/۵	۲۹/۲	۴/۴۰	۳/۰۴	۱۰/۴		
	مارشک	۴۴/۵۲	۳۶۴/۹	۱۶/۲	۲/۹۱	۱/۳۰	۸		
	بلغور	۹۳/۱۹	۳۴۰/۳	۳۱/۷	۲/۳۲	۲/۱۶	۶/۸		
	سیج	۱۵۳/۳۲	۳۵۴/۵	۵۴/۳	۲/۶۹	۴/۱۲	۷/۶		

جدول ۲- خصوصیات گیتاشناسی زیر حوضه‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه.

زیرحوضه‌های اصلی	زیرحوضه‌های فرعی	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	طول (کیلومتر)	حد اکثر ارتفاع (متر)	حد اقل ارتفاع (متر)	اختلاف ارتفاع (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	شیب متوسط (%)	زیرحوضه‌های اصلی	
										گوش و بهره	کوشک‌آباد
اول	گوش و بهره	۴۶/۲۳	۳۴۲۹۸	۱۱/۱۸	۲۸۰۰	۱۵۰۰	۱۳۰۰	۲۱۶۸/۸	۳۸/۱		
	کوشک‌آباد	۴۵/۰۶	۴۰۴۰۷	۱۲/۴۴	۲۱۰۰	۱۳۰۰	۸۰۰	۱۶۱۰/۷	۳۱/۳		
	خرکت	۹۷/۳۱	۵۴۰۹۵	۱۹/۲۰	۳۰۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	۲۳۱۵/۵	۴۵/۳		
دوم	کریم‌آباد	۶۹/۰۳	۴۵۲۵۳	۱۵	۳۰۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	۲۲۴۹/۱	۳۸/۶		
	مارشک	۴۴/۵۲	۳۷۴۳۷	۷/۸۹	۲۴۰۰	۱۶۰۰	۸۰۰	۱۹۱۰/۴	۳۵/۲		
	بلغور	۹۳/۱۹	۵۵۳۸۳	۱۹	۲۲۰۰	۱۴۰۰	۸۰۰	۱۷۶۵/۷	۴۶/۸		
	سیج	۱۵۳/۳۲	۷۴۶۵۷	۲۰/۹۷	۲۷۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰	۱۸۴۸/۹	۴۷/۲		

یک دوره‌ی زمانی بدون تأثیر برف می‌باشد، و n توالی روزها طی دوره‌ی محاسبه (شبیه‌سازی) می‌باشند. داده‌های مورد نیاز جهت اجرای شبیه ذوب برف به دو دسته تقسیم می‌شوند: ویژگی‌های فیزیکی منطقه مانند مساحت و منحنی رتبه‌بندی ارتفاعی حوضه؛ متغیرهای هواشناسی و آب‌شناسی نظیر دما، بارندگی، سطح پوشش برف و بده می‌باشند.

بارش: حوضه‌ی آبخیز سد کارده در محدوده‌ی ارتفاعی ۱۲۹۵ تا ۲۹۶۱ متر واقع شده است، بنابراین، استفاده از روش استخراج روابط شبیه‌ی بین بارندگی و ارتفاع در منطقه‌ی مورد مطالعه غیر منطقی نخواهد بود؛ بنابراین، این روش، مقادیر بارندگی ایستگاه‌ها (مشهد، قوچان و گل‌مکان) با کاربرد به طبقات ارتفاعی حوضه تعمیم داده شدند.

دما: یکی از متغیرهای اساسی در برآورد رواناب ناشی از ذوب برف می‌باشد، که در تحقیق حاضر اندازه‌ی آن از طریق روش برونیایی، و به دست آوردن روابط شبیه‌ی بین دما و ارتفاع در ایستگاه‌های مشهد، قوچان و گل‌مکان به مناطق ارتفاعی حوضه‌ی مورد مطالعه انتقال داده شد.

ضریب رواناب Cs: مقادیر فراسنج‌های ضریب رواناب برف و باران به صورت روزانه، به تفکیک طبقات ارتفاعی حوضه‌ی مورد مطالعه، به شبیه وارد شدند. با توجه به این مطلب که ضریب باران (اگر چنانچه فرآیند شبیه‌سازی در یکبار اجرا کامل نشود)، را می‌توان به عنوان انتخاب اولیه برای تنظیم شبیه منظور نمود (مارتینک و رنگو، ۱۹۸۶) در نتیجه، سعی شد طی روند واسنجی شبیه، و در صورت نیاز، تغییراتی در مقادیر این ضریب اعمال گردد.

دمای بحرانی: این فراسنج باعث تعیین نوع بارش (برف یا باران) در هر واقعه‌ی بارندگی در نرم افزار آب‌شناسی SRM می‌شود، که بایستی برحسب دمای روزانه مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این که در حوضه‌ی مورد نظر اطلاعات دراز مدت جهت تعیین دقیق دمای بحرانی موجود نبود، لذا طبق توصیه‌ی توسعه‌دهندگان شبیه، ۲/۵ درجه‌ی سانتیگراد به عنوان دمای بحرانی برای حوضه‌ی آبخیز سد کارده تعریف گردید. ضمناً طبق بررسی‌های انجام شد، و با توجه به

بده‌ی روزانه ثبت شده در آن به عنوان مبنا در یک دوره‌ی ۱۷ ساله استفاده گردید. جهت استخراج فراسنج‌های هواشناسی، مانند بارندگی و دما، از اطلاعات سه ایستگاه هواشناسی گل‌مکان، مشهد و قوچان، نزدیکترین ایستگاه‌های به حوضه‌ی آبخیز سد کارده، شد. جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

معرفی شبیه آب‌شناسی رواناب ذوب برف SRM:

نخستین بار در سال ۱۹۶۸ به وسیله‌ی سازمان جهانی هواشناسی برای شبیه‌سازی ذوب برف مورد استفاده قرار گرفت، که در مقایسه با سایر شبیه، با داشتن کمترین خطا دقیقترین نرم افزار تشخیص داده شده است. نرم افزار SRM و متغیرهای آن در بیش از ۱۰۰ حوضه در ۲۵ کشور، از ۳۳ تا ۵۴ درجه‌ی جنوبی و از ۳۲ تا ۶۰ درجه‌ی شمالی، در حوضه‌هایی از ۱ تا ۱۲۰ هزار کیلومترمربع به کار رفته است (سیدل و مارتینک، ۲۰۰۲). نرم افزار SRM شبیه آب‌شناسی بر اساس درجه-روز می‌باشد. مدل SRM یک شبیه ناحیه‌ای بوده و درجه‌ی حرارت به صورت ناحیه‌ای وارد محاسبه گردیده و دمای مربوط به هر نقطه لحاظ نمی‌شود. همچنین، این نرم افزار روابط مربوط به دما را با ذوب، و میزان ذوب را با رواناب خطی و همیشه ثابت، در نظر می‌گیرد. در معادله‌ی SRM (رابطه‌ی ۲) مؤلفه‌های مختلفی مشتمل بر ۱۴ فراسنج، و متغیر ورودی متعلق به هر طبقه‌ی ارتفاعی مشارکت دارند که در زیر به آنها اشاره شده است (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۰):

$$Q_{TH} = [C_{S_n} \times \alpha_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{R_n} \times P_n] \frac{A \times 10000}{86400} (1 - k_{n-1}) + Q_n K_{TH} \quad (2)$$

اجزای این رابطه شامل Q: متوسط بده‌ی روزانه بر حسب مترمکعب بر ثانیه، Cs ضریب رواناب برف، CR ضریب رواناب باران، α عامل درجه-روز که، عمق ذوب ناشی از یک درجه‌ی روز را نشان می‌دهد (سانتیمتر بر درجه‌ی سانتیگراد بر روز)، T، تعداد درجه روز بر حسب سانتیگراد-روز، ΔT تعدیل دما با استفاده از شیب دما به محل متناظر متوسط ارتفاع (بلندی و پهنا) حوضه (سانتیگراد-روز)، S پوشش نسبی برف (نسبت پوشش برف به کل حوضه)، P بارش مولد رواناب (سانتیمتر)، A مساحت منطقه‌ی ارتفاعی مورد نظر (کیلومتر مربع)، K ضریب فروکش جریان که نشان‌دهنده‌ی نرخ کاهش بده در

زمانی بده قابل محاسبه بوده و از طریق رابطه‌ی شماره ۶ به دست می‌آید:

$$K_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y} \quad (۶)$$

که در آن K_{n+1} ضریب فروکش جریان، x و y ضرایب معادله و Q_n بده در یک روز معین می‌باشد.

ارزیابی دقت نرم افزار: جهت تشخیص صحت

عملکرد نرم افزار SRM، که آیا فرآیند شبیه‌سازی با کیفیت و دقت قابل قبولی انجام شده است یا خیر، از دو معیار ضریب همبستگی و تفاضل حجمی استفاده شد. این دو ضریب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

ضریب همبستگی: با استفاده از رابطه‌ی شماره ۷ به

دست می‌آید:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i')^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (۷)$$

در رابطه فوق Q_i بده‌ی اندازه‌گیری شده‌ی روزانه، Q_i' بده‌ی محاسبه شده‌ی روزانه با کاربرد شبیه، \bar{Q} بده‌ی متوسط اندازه‌گیری شده در سال مورد نظر و یا فصل ذوب برف و n تعداد روزهایی است که آمار ثبت شده از بده، در دسترسند

تفاضل حجمی:

$$D_V [\%] = \frac{V_R - V_R'}{V_R} \times 100 \quad (۸)$$

در رابطه‌ی بالا V_R حجم رواناب اندازه‌گیری شده فصلی یا سالانه، و V_R' حجم رواناب محاسبه شده فصلی یا سالانه می‌باشد.

از محاسن نرم افزار SRM قابلیت نمایش همزمان آب نگار رواناب محاسبه و اندازه‌گیری شده است، بطوری که می‌توان با معیارهای مجذور ضریب همبستگی (R^2)، و درصد اختلاف حجمی (D^v)، شبیه را ارزیابی کرد.

نتایج و بحث

پس از تعیین محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه نقشه‌ی DEM آن در محیط نرم‌افزار GIS با استفاده از نقشه‌های پستی و بلندی ۲۵۰۰۰:۱ تولید شد، توزیع ارتفاعی مساحت حوضه‌ی آبخیز سد کارده انجام، و حوضه به ۴ طبقه‌ی ارتفاعی ۵۰۰ متری تقسیم شد. به این ترتیب، نقشه‌ی ارتفاع مساحت منطقه به همراه نقشه‌ی شیب، و جهت جغرافیایی از روی نقشه‌ی DEM استخراج

روابط شبیه‌ی، بین دما و ارتفاع، که به منظور تعمیم دمای ایستگاه‌های مشهد، قوچان و گلمکان تهیه گردیده، بود نرخ افت محیطی دما برای کل طبقات ارتفاعی حوضه‌ی مورد مطالعه همان مقدار پیش‌فرض شبیه، یعنی ۰/۶۵ درجه‌ی سانتیگراد کاهش دما به ازای هر ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد.

زمان تاخیر: از لحاظ فیزیکی، زمان تأخیر نصف

زمان حرکت آب از تمام سطح حوضه به سمت نقطه‌ی خروجی برای یک رگبار معین است، که در این تحقیق بر اساس رابطه‌ی پیشنهادی SCS و خصوصیات گیتاشناسی حوضه‌ی آبخیز کارده ۴/۵ ساعت محاسبه و در نرم افزار منظور گردید.

عامل درجه-روز: عامل ذوب به صورت ژرفای ذوب

شده به تعداد درجه-روز بوده و به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$M = \alpha \cdot T \quad (۳)$$

که در آن M ذوب روزانه به سانتی‌متر، α شاخص درجه-روز ($cm \cdot C^{-1} d^{-1}$) و T تعداد درجه-روز ($^{\circ}Cd$) می‌باشند. تحت شرایطی که حوضه‌ی مورد مطالعه فاقد آمار اندازه‌گیری شده‌ی در خصوص این فراسنج بوده و صرفاً چگالی برف در دسترس باشد، مقدار α از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$\alpha = 1.1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (۴)$$

که در آن ρ_s چگالی برف و ρ_w چگالی آب می‌باشند. در این تحقیق با توجه به این که در حوضه‌ی مورد مطالعه مشاهداتی در زمینه چگالی برف موجود نبود، در نتیجه، این فراسنج طی عملیات واسنجی محاسبه گردید.

بعد از به دست آوردن سطح پوشش برف در زمان‌های مختلف، و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست، تغییرات سطح پوشش برف از عمق تجمعی ذوب برف، برآورد گردید. عمق تجمعی ذوب برف (ΔM)، تابعی از عامل درجه-روز و تعداد درجه روز بالای دمای بحرانی (T^+) بوده، و در بازه‌ی زمانی بین t_1 و t_2 از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$\Delta M(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^{t_2} (aT^+) \quad (۵)$$

ضریب فروکش جریان: این ضریب از طریق تحلیل گروه

تحقیق حاضر، عملیات شبیه‌سازی بدهی روزانه رود حوضه‌ی آبخیز سد کارده با استفاده از نرم افزار SRM برای دوره‌ی زمانی دی سال ۷۹ الی شهریور سال ۸۰ انجام پذیرفت.

نتایج شبیه‌سازی بدهی روزانه و خروجی شبیه، در شکل ۴ نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می‌گردد، نرم افزار توانسته است آب نگار جریان روزانه را طی دوره‌ی زمانی دی سال ۷۹ الی شهریور سال ۸۰ (در مدت ۲۶۶ روز، ۹ ماه دارای اطلاعات) با تطابق قابل قبولی نسبت به مقادیر واقعی شبیه‌سازی نماید.

به منظور بررسی و ارزیابی نرم افزار برای سال شبیه‌سازی شده، از مقادیر ضریب همبستگی و تفاضل حجمی استفاده گردید، که مقادیر ارزیابی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۲۱ به دست آمدند (جدول شماره ۴) که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای نرم افزار بوده، و مقادیر به دست آمده از شبیه با مقادیر ثبت شده و یا مشاهداتی مطابقت دارد. حجم رواناب محاسباتی ۴/۸۷۶ میلیون مترمکعب و بدهی محاسباتی ۰/۲۱۲ متر مکعب بر ثانیه نیز برآورد گردیدند که با توجه به حجم رواناب مشاهداتی ۴/۸۸۶ میلیون مترمکعب، نشان دهنده‌ی انطباق خوب شبیه با ارزش‌های مشاهداتی است که معیارهای ارزیابی این موضوع را (طبق شکل شماره ۴ و جدول شماره ۴) تایید می‌تایند.

برای تحلیل حساسیت نرم افزار SRM نسبت به فراسنج‌ها، فراسنج‌های دمای بحرانی، ضریب درجه - روز و ضریب رواناب برف و باران را به اندازه‌ی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش و کاهش داده، و با استفاده از نرم افزار SRM حجم آورد سالانه در سال آبی ۷۹ - ۸۰ برآورد گردید. نتایج نشان دادند که از بین فراسنج‌های معرفی شده به نرم افزار، بیشترین میزان حساسیت شبیه نسبت به تغییر ضریب رواناب باران، برف و ضریب فروکش جریان بود که واسنجی آنها صورت گرفت، به گونه‌ای که مقادیر فراسنج‌های مذکور بیشترین هماهنگی را با واقعیت منطقه داشته باشند؛ و کمترین حساسیت شبیه نسبت به دمای بحرانی بود. در شکل ۶ حجم تجمعی رواناب مشاهداتی نسبت به رواناب شبیه‌سازی ترسیم گردیده است، که معرف حداقل اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه گردیده با کاربرد شبیه می‌باشد.

گردیدند. متغیرهایی که به نرم افزار SRM معرفی شد عبارتند از: مساحت و متوسط ارتفاع هر طبقه ارتفاعی (از منحنی ارتفاع مساحت)، و درصد مساحت مربوط به هر جهت جغرافیایی برای هر طبقه‌ی ارتفاعی. در جدول ۳ مشخصات طبقات ارتفاعی حوضه‌ی آبخیز سد کارده آورده شده اند.

متوسط وزنی ارتفاع حوضه ۲۰۰۷/۴۹ متر می‌باشد. همان طور که در جدول شماره ۳ مشاهده می‌گردد، طبقه‌ی ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر، در حدود ۴۷/۰۴ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده است که بیشترین فراوانی را دارا می‌باشد. با توجه به جدول فوق، جهت شیب جغرافیایی غالب منطقه، جنوب غربی (SW) است. شکل ۲ منحنی ارتفاع مساحت را نشان داده است.

سپس، به ازای هر طبقه‌ی ارتفاعی، کلیه متغیرها و فراسنج‌های اندازه‌گیری و یا برآورد شده به صورت روزانه به شبیه معرفی گردیدند (مقادیر برخی از فراسنج‌ها بر حسب ضرورت و یا کمبود آمار در طول ماه ثابت فرض شدند). شکل ۳ آب نگار بدهی روزانه مشاهده شده در ایستگاه آبنجی سد کارده را برای دوره‌ی زمانی مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

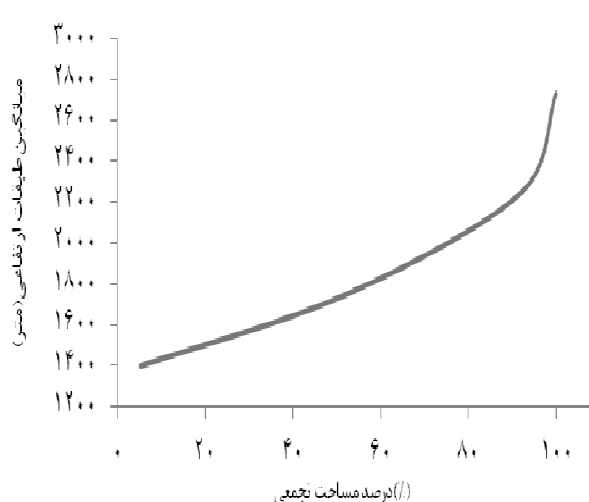
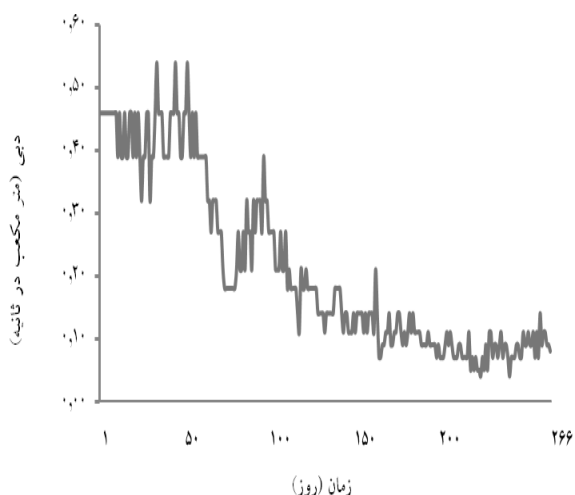
با توجه به این که در مطالعه‌ی حاضر از آمار ایستگاه آب‌سنجی سد کارده در یک دوره‌ی ۱۷ ساله استفاده شده است، لذا به منظور تهیه نمودار فروکش بدهی جریان، آب نگار بدهی روزانه هر سال به طور مجزا ترسیم و فهرست بدهی‌های مربوط به شاخه‌ی نزولی آب نگارهای سالانه استخراج شدند، در نهایت از فهرست بدهی‌های به دست آمده متعلق به هر سال، بدهی هر روز و بدهی متناظر آن در روز بعد حاصل شد و این فرآیند برای کل ۱۷ سال انجام گردید. سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده نمودار فروکش بدهی جریان در قالب محور لگاریتمی به صورت بدهی جریان در روز $n+1$ ام (Q_{n+1}) در برابر بدهی روز n ام (Q_n) ترسیم گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. با استفاده از نمودار فوق، محاسبه‌ی مقادیر ضرایب معادله فروکش جریان برای شبیه‌سازی انجام گردید. بهترین مقدار x و y (ضرایب معادله فروکش جریان) شبیه‌سازی شده برای حوضه‌ی آبخیز سد کارده به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۰۸۴ به دست آمدند که جهت شبیه‌سازی دبی جریان به نرم افزار معرفی شدند. در

جدول ۳- مشخصات طبقات ارتفاعی حوضه‌ی آبخیز سد کارده.

طبقات ارتفاعی	متوسط ارتفاع (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت	درصد مساحت جهت شیب NE	درصد مساحت جهت شیب SE	درصد مساحت جهت شیب NW	درصد مساحت جهت شیب SW
۱۵۰۰-۱۲۹۵	۱۳۹۸	۲۸/۹	۵/۲۷	۱۰/۰۱	۱۰/۰۴	۵/۸۲	۱۰/۲۵
۲۰۰۰-۱۵۰۰	۱۷۵۰	۲۵۸/۰۹	۴۷/۰۴	۱۱/۷۷	۱۰/۱۷	۷/۲۴	۱۲/۸۸
۲۰۰۰-۲۵۰۰	۲۲۵۰	۲۱۸/۸۲	۳۹/۸۸	۱۱/۶۵	۱۱/۳۹	۸/۲۴	۱۶/۱۹
۲۵۰۰-۲۹۶۱	۲۷۳۱	۴۲/۸۵	۷/۸۱	۱۳/۹۸	۱۲/۴۴	۷/۵۷	۱۶/۳۸

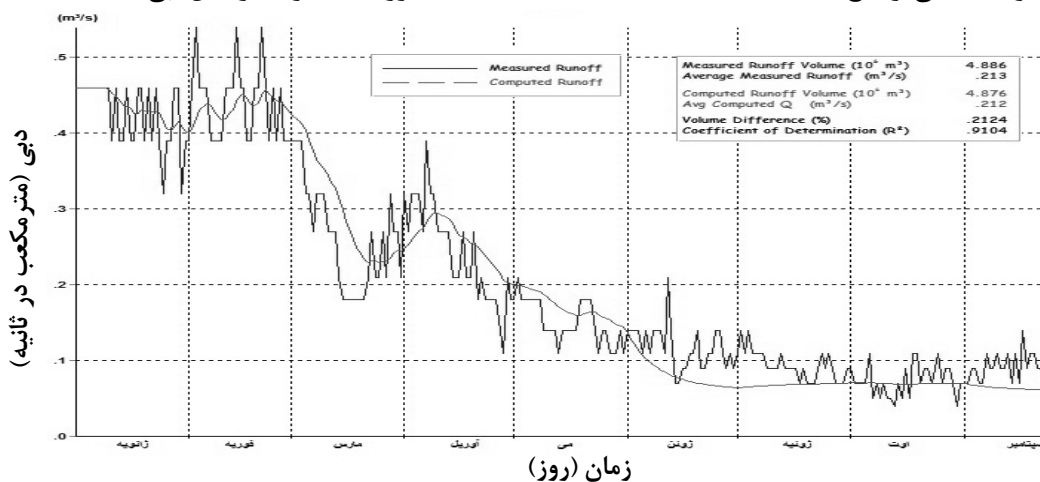
جدول ۴- ارزیابی آماری نرم افزار برای شبیه‌سازی جریان در سال آبی ۷۹-۸۰.

سال آبی	بدهی مشاهداتی (مترمکعب در ثانیه)	بدهی محاسباتی (مترمکعب در ثانیه)	حجم رواناب مشاهداتی (میلیون مترمکعب)	حجم رواناب محاسباتی (میلیون مترمکعب)	ضریب همبستگی	تفاضل حجمی (%)
۷۹-۸۰	۰/۲۱۳	۰/۲۱۲	۴/۸۸۶	۴/۸۷۶	۰/۹۱	۰/۲۱

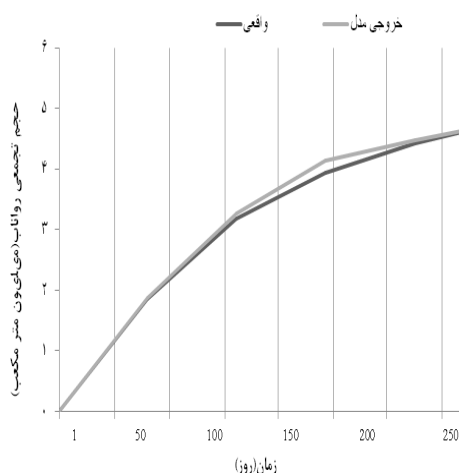


شکل ۳- آب نگار بدهی روزانه‌ی اندازه‌گیری شده برای رودخانه کارده در سال آبی ۷۹-۸۰.

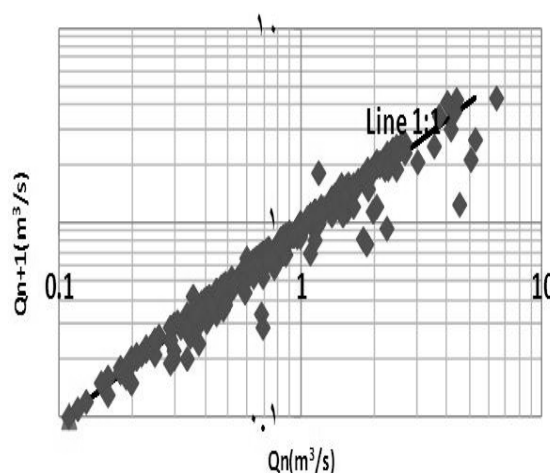
شکل ۲- منحنی رتبه‌بندی ارتفاع حوضه‌ی آبخیز سد کارده (منحنی ارتفاع-مساحت).



شکل ۴- آب نگارهایی که با اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی برای حوضه‌ی آبخیز سد کارده جهت سال آبی ۷۹-۸۰ ترسیم گردیده اند. (۲۰۰۱/۲۳/۹ - ۲۰۰۱/۱/۱)



شکل ۶- نمودارهای مقایسه‌ی حجم تجمعی رواناب واقعی و محاسبه شده نرم افزار SRM.



شکل ۵- نمودار فروکش بدهی جریان برای بده روز Q_{n+1} نسبت به بده روز Q_n .

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در برآورد رواناب ناشی از ذوب برف، همان‌طور که مطالعات انجام شده نشان می‌دهند استفاده از نگاره‌هایی با دقت مکانی بالا مانند، تصاویر ماهواره‌ی ETM^+ ، نتایج خوبی را در تعیین سطوح پوشیده از برف نشان داده، این نتایج با مطالعات نجفی و همکاران (۱۳۸۶)، روشنی و همکاران (۱۳۸۷)، و همچنین تکلی و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد، بنحوی که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست می‌توان نقشه‌ی سطح پوشیده از برف را با دقت مناسبی تهیه کرد، و آن را برای محاسبات مربوط به توده‌ی برفی مورد استفاده قرار داد. در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف، نرم افزار SRM، به عنوان یک شبیه‌آشناسی و مفهومی، کاربرد مناسب و خوبی را در ارزیابی نتایج به دست آمده با دقت بالا داشته است. نتایج به دست آمده در کاربرد نرم افزار SRM جهت شبیه‌سازی با مطالعات فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، و همچنین سیدی علم‌آباد و همکاران (۱۳۸۷) مطابقت دارد. علاوه بر آن، دستاوردهای تحقیق حاضر بیانگر این موضوع است که نرم افزار SRM از توانایی بالایی جهت برآورد رواناب حاصل از ذوب برف برخوردار است. بدین ترتیب، می‌توان و در حوضه‌هایی که فاقد آمار دقیقی از سطح پوشش برف باشند از تصاویر ماهواره‌ای نیز استفاده کرد. به نظر می‌رسد که برای صحت سنجی و آزمون درستی نتایج می‌توان از سایر روش‌ها مانند شبیه‌های شبکه عصبی (ANN و ANFIS) نیز در این رابطه بهره برد.

منابع

- پرهت، ج و ثقفیان، ب، ۱۳۸۶. ارزیابی قدرت مکانی داده‌های ماهواره‌ای در تخمین پوشش برف، مجله علمی پژوهش منابع طبیعی، ۶۰: ۳۸۳-۳۹۵.
- رایگانی، ب. خواجه‌الدین، س. ج، سلطانی کوپایی، س، و براتی، س، ۱۳۸۷. محاسبه تغییرات نقشه‌های پوشش برفی تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در دوره‌های فاقد تصویر. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲: ۳۱۵-۳۳۱.
- رسولی، ع. ا، و ادهمی، س، ۱۳۸۶. محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجنده MODIS. جغرافیا و توسعه، ۲۳: ۱۰-۳۶.
- روشنی، ن، ولدان زوج، م. ج، و رضایی، ی، ۱۳۸۷. برف‌سنجی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنش از دور در منطقه یخچالی علم چال. همایش ژئوماتیک ۸۷، تهران. http://www.civilica.com/Paper-GEO87-GEO87_067.html
- سیدی علم‌آباد، م، مرادی، ح، قنبرپور، م، و میریعقوب زاده، م، ۱۳۸۷. بررسی کارکرد مدل SRM در برآورد حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی ایران و مقایسه آن با سایر نقاط جهان، سومین کنفرانس مدیریت رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی ایران و مقایسه آن با سایر نقاط جهان. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. http://www.civilica.com/Paper-WRM03-WRM03_303.html
- فتاحی، ا، دلآور، م، و قاسمی، ا، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM. مطالعه موردی: حوضه آبریز بافت. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۰: ۱۲۹-۱۴۱.

- (۷) نجفی، ا. قدوسی، ب. ثقفیان، و پرهمت، ج، ۱۳۸۶. برآورد رواناب ذوب برف با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه شهر چایی ارومیه. پژوهش و سازندگی، ۷۶: ۱۷۶-۱۸۵.
- 8) Baumgartner, M.F,G. Apfl and T. Holzer. 1994. Monitoring alpine snow cover variations using NOAA-AVHRR data. Paper presented at the Geosci and Remote Sen Symp. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies.
- 9) Butt, M.J, and M. Bilal. 2011. Application of snowmelt runoff model for water resource management. Hydrol Proc 25:3735-3747.
- 10) Li, X. and M.W. Williams. 2008. Snowmelt runoff modeling in an arid mountain watershed, Tarim Basin. China. Hydrol Proc 22:3931-3940.
- 11) Martinec, J. and A. Rango. 1986. Parameter values for snowmelt runoff modeling Hydrol,14:197-219 .
- 12) Martinec, J. A. Rango and R. Roberts. 2008. SRM snowmelt runoff model user's manual. SRM Snowmelt Runoff Model User's Manual .
- 13) Rango, A. and J. Martinec. 1995. Revisiting the degree day method for snowmelt computations. JAWRA Am Water Resour Assoc 31:657-669.
- 14) Rango, A. and J. Martinec. 1998. The Snowmelt runoff model (SRM) user's manual, Version 4, URL: <ftp://hudrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf>.
- 15) Seidel, K. and J. Martinec. 2004. Hydrological applications of satellite snow cover mapping in the Swiss Alps. Paper presented at the Proc of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space.
- 16) Tekeli, A.E. Z. Akyürek A. Arda Şorman A. Şensoy and A. Ünal Şorman. 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey Remote Sens Environ. 97:216-230.

