

شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف حوضه قره‌سو با مدل SRM

محمدحسین عالی نژاد^۱

سعید جهانبخش اصل^۲

علی محمد خورشیددوست^۳

چکیده

تامین منابع آب توسط برف در حوضه‌های کوهستانی بعلت خاصیت تاخیر در ایجاد رواناب، ضروری است. بنابراین شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف و تغییرات فصلی پوشش آن در مدیریت منابع آب بسیار اهمیت دارد. در این مطالعه، به‌منظور برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه قره‌سو از زیرحوضه‌های سیمره، نخست سطح پوشش برف برای سال‌های آبی ۹۵ الی ۹۷ با استفاده از تصاویر روزانه ماهواره ترا-مودیس با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از طریق سامانه گوگل ارث انجین استخراج شد. سپس در محیط نرم‌افزار GIS، مشخصات فیزیوگرافی حوضه به‌دست آمد. مرحله بعد، با وارد کردن داده‌های پوشش برف، متغیرهای هواشناختی و شاخص‌های لازم به مدل SRM، رواناب ناشی از ذوب برف شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی سال ۹۵-۹۶ برای واسنجی و سال ۹۶-۹۷ جهت اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که، سهم جریان رودخانه از ذوب برف در ماه‌های اسفند و فروردین ماه چشمگیر است، ولی با افزایش درجه‌حرارت هوا در اردیبهشت‌ماه، سهم باران در جریان پرننگ‌تر می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت بالای این مدل می‌باشد، به‌طوری که ضریب تعیین (R^2) برای سال‌های آبی ۹۵-۹۶ الی ۹۷-۹۶ به ترتیب معادل ۰/۹۳ و ۰/۹ و درصد خطای حجمی آن نیز به ترتیب (D_V) ۰/۳ و ۳/۳۳ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: برف، سنجش از دور، SRM، مودیس، حوضه قره سو.

مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه شهرها و تغییرات اساسی در سبک زندگی باعث استفاده بی‌رویه و محدودیت‌های فراوانی در آب در دسترس بشر شده است. یکی از منابع مهم تامین آب، ذوب فصلی پوشش برفی می‌باشد. پوشش برفی در یک حوضه بر بیلان آب و انرژی آن حوضه اثر می‌گذارد بطوریکه تخمین آب معادل برف برای پیش‌بینی سیلاب، مدیریت مخازن و کشاورزی یک منطقه بسیار حائز اهمیت است (کاراموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۱۶۸). تخمین دقیق رواناب حوضه‌های آبخیز در مناطق کوهستانی با پوشش برف فصلی، نیاز به یک الگوریتم مناسب برای تخمین رواناب ناشی از ذوب برف به عنوان جزئی از سیستم مدل‌سازی دارد (بیلز و کلاین، ۲۰۰۳: ۴۴۹). مدل SRM^۴ جهت شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضه‌های کوچک کوهستانی که عمده رواناب آن ناشی از ذوب برف می‌باشد، در سال ۱۹۷۵ توسط مارتینس ارائه شد (رانگو و مارتینس، ۱۹۹۸). با پیشرفت سنجش از دور علاوه بر حوضه‌های کوچک در حوضه‌های بزرگ نیز از این مدل استفاده شد. به عنوان مثال سیدل^۵ و همکاران (۲۰۰۰)، این مدل را در حوضه رودخانه گنگ واقع در هیمالیا با مساحتی بیش

^۱ دانشجوی دکتری رشته آب و هواشناسی دانشگاه تبریز. (نویسنده مسئول)

Email: Aalineghad63@yahoo.com – Tel: 09363488212

^۲ استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

^۳ استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

^۴ - Snowmelt Runoff Model

^۵ - Seidel

از نهصد هزار کیلومتر مربع استفاده نمودند. مدل SRM برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در ارتفاعات آلپ سوئیس را سیدل و مارتینس^۱ (۲۰۰۲) به‌کار گرفتند و رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست، اسپات و نووا برای ۱۳ زیرحوضه محاسبه شد. در ترکیه تکلی^۲ و همکاران (۲۰۰۵)، به‌منظور مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در بالادست حوضه آبریز فرات از منحنی‌های تخلیه برف (استخراج‌شده از نقشه‌های پوشش برف مودیس) استفاده کردند. نتایج اولیه مطالعه آنها نشان داد که، این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب ناشی از برف منطقه دارد. هارشبرگر^۳ 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 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 بیانگر عملکرد رضایت‌بخش مدل بود. عدنان^۴ و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه‌ای با هدف برآورد تغییرات بر روی رواناب ذوب برف حوضه آبریز رودخانه گیلگیت از حوضه‌های هیمالیا انجام دادند. در این مطالعه از خروجی مدل مکانیکی PRECIS برای اواخر قرن ۲۱ استفاده شد. نتایج این مطالعه ضمن قابل قبول بودن شبیه‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل SRM در دوره پایه حکایت از افزایش ۳۵ الی ۴۰ درصدی رواناب ذوب برف بر اثر افزایش میانگین دمای سالانه تا سه درجه سانتیگراد در اواخر قرن ۲۱ را دارد. شان پینگ^۵ و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی پارامترهای زمان - متغیر در مدل رواناب ناشی از ذوب برف (SRM) را با استفاده از یک روش جدید توسعه داده‌اند. در این روش از الگوریتم‌های SOA و PSOA برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل در شبیه‌سازی جریان ذوب برف در حوضه رودخانه ماناسی در شمال غرب چین، در طول فصل ذوب برف در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که PSOA می‌تواند به طور موثری پارامترهای مدل را تنظیم کند در حالی که از زمان محاسباتی بسیار زیاد ناشی از افزایش قابل توجه ابعاد پارامتر جلوگیری می‌کند. نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳)، تغییرات سطح پوشش برف را در یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز زاینده‌رود (پلاسجان) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نووا برای دو سال زراعی ۷۲-۱۳۷۰ استخراج کردند، در پژوهش مذکور 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 آچی‌چای 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 قابل قبولی را نشان داد. میرموسوی و همکاران (۱۳۹۳)، برای پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه‌ی شمال غرب ایران، از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس منطقه‌ی شمال غرب ایران مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ میلادی و از روش شاخص NDSI طبقه نظارت شده به عنوان روش مناسب استفاده گردید. نظم‌فر و مرادی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای که در آن از داده‌های سنجنش از دور برای تخمین پوشش برف و مدل هیدرولوژیکی SRM برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه آبی دهگلان استفاده کردند نتایج نشان داد که با توجه به این که مدل SRM برای حوضه‌های کوهستانی طراحی شده است و منطقه مورد مطالعه تلفیقی از دشت و کوهستان است، مدل در این منطقه کارایی کمتری دارد. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی اثرات تغییرات بر روی رواناب ناشی از ذوب برف حوضه شهرچای ارومیه را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که رواناب ناشی از ذوب برف در اواسط ماه اردیبهشت به بعد کاهش می‌یابد و دبی پیک نسبت به دوره پایه ۱۵ روز سریعتر و با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شد. محمدی و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس تغییرات پوشش برف

¹ Seidel, And Martinec

² Tekeli

³ Harshburger

⁴ Adnan

⁵ Shunping

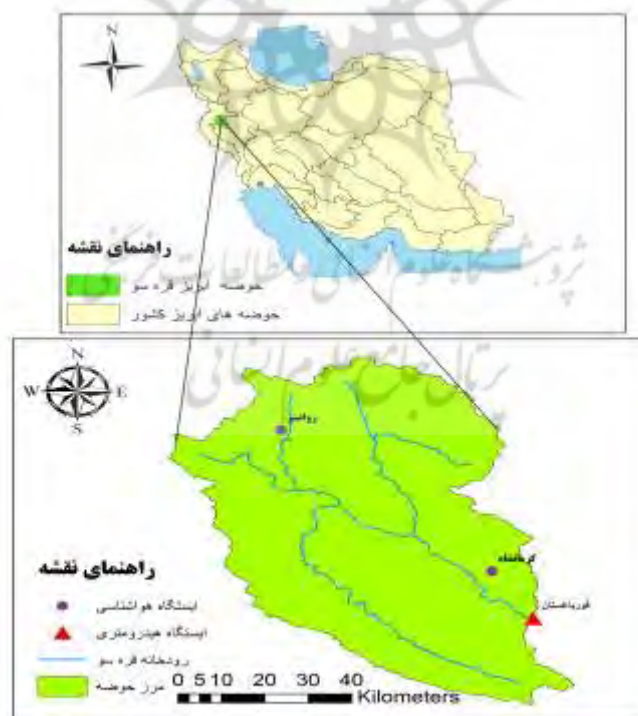


زاگرس را برای بازه زمانی (۲۰۱۶-۲۰۰۰) مورد بررسی قرار دادند. آنها برای صحت سنجی داده‌های سنجنده مودیس از ۱۲ تصویر سنجنده ASTER به عنوان نقشه صحت زمینی بهره بردند که نتایج حاکی از ضریب تبیین بالا و خطای کم بوده است.

حوضه قره سو یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه سیمره می‌باشد که با توجه به قرار گرفتن در ارتفاعات زاگرس از ارتفاع نسبتاً بالایی برخوردار است، نقش مهمی در تامین آب شهرستان کرمانشاه و سد سیمره علی‌الخصوص از طریق رواناب ناشی از ذوب برف دارد. آگاهی از میزان رواناب حاصل از ذوب برف (به‌عنوان مهمترین منبع تأمین‌کننده آب این سد در فصل ذوب) برای برنامه‌ریزی دقیق، مدیریت منابع آب و بحران‌های ناشی از سیل علی‌الخصوص سیل‌های ناشی از ذوب برف منطقه ضرورت دارد. تا کنون مطالعات زیادی در خصوص رژیم جریان رودخانه و اثرات تغییرات اقلیم بر آن از طرف محققان انجام شده است ولی تا کنون در مورد رواناب ذوب برف این حوضه مطالعه‌ای صورت نگرفته است لذا هدف این مطالعه، شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل SRM در حوضه قره سو است.

مواد و روش‌ها

رودخانه قره سو در بخش شمال غربی حوضه آبریز کرخه و در دشت کرمانشاه جریان دارد که از سراب روانسرا با جهت شمال غربی جنوب شرقی سرچشمه می‌گیرد. در ۱۵ کیلومتری کرمانشاه رودخانه رازآور و شاخه‌های فرعی آن به قره سو می‌ریزد. سپس در سطح دشت جریان یافته و در نزدیکی روستای قزانچی رودخانه مرگ نیز به آن متصل می‌شود. حوضه آبریز قره سو با مساحتی در حدود ۵۳۹۰ کیلومتر مربع در خروجی حوضه واقع شده در ایستگاه هیدرومتری قورباغستان بین طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی واقع شده است. ارتفاع از سطح دریا در این حوضه بین ۱۲۷۲ تا ۳۳۸۶ متر می‌باشد و میانگین بارندگی سالانه آن ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ حوضه آبریز قره سو را نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت حوضه قره سو در میان حوضه‌های آبریز کشور.

در این مطالعه برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف، از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی هیدرولوژیکی رواناب استفاده شد. بدین منظور، نخست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌دست‌آمده از سنجنده مودیس که در سامانه گوگل ارث انجین^۱ تجزیه و تحلیل شدند، تمامی تصحیحات هندسی و فرایند کالیبره شدن تصاویر در سامانه مذکور با دقت بالایی صورت می‌گیرد. سطح پوشش برف در حوضه قره سو در سال‌های آبی ۹۷-۱۳۹۵ تخمین زده شد. همچنین، از داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه (جدول شماره ۱) و میزان دبی روزانه جریان رودخانه در ایستگاه هیدرومتری غورباغستان (واقع در خروجی حوضه) در دوره آماری آبان سال ۹۵ تا خردادماه سال ۹۷ استفاده شد. لازم به ذکر است که برنامه SRM داده‌های ورودی را برای هر منطقه ارتفاعی از یک ایستگاه دریافت می‌کند و این ورودی باید ترکیب صحیحی از ایستگاه‌های موجود در منطقه باشد در این مطالعه نیز از ایستگاه‌های بارانسنجی منطقه برای مقایسه و اصلاح برخی داده‌ها استفاده شده است با این وجود به دلیل مبنا قرار دادن ایستگاه‌های سینوپتیک با دقت بیشتر از ذکر ایستگاه‌های بارانسنجی اجتناب شده است. جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول(۱): مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی		طول جغرافیایی		نوع ایستگاه	نام ایستگاه
	درجه	دقیقه	درجه	دقیقه		
۱۳۴۰	۴۷	۰۵	۳۴	۱۹	سینوپتیک	کرمانشاه
۱۴۲۰	۴۶	۳۹	۳۴	۴۳	سینوپتیک	روانسر
۱۵۹۱	۴۴	۶۲	۳۷	۴۲	هیدرومتری	قورباغستان

مشخصات فیزیوگرافی حوضه، مساحت و مناطق ارتفاعی از نقشه DEM در محیط نرم‌افزار GIS به‌دست آمد. سطح پوشش برفی روزانه یکی از متغیرهای بسیار مهم در ورودی مدل می‌باشد. این متغیر را می‌توان از دیده‌بانی‌های زمینی در حوضه‌های کوچک، عکسبرداری هوایی و در بهترین و مقرون به صرفه‌ترین روش از تصاویر ماهواره‌ای دریافت کرد. در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دو مولفه تفکیک مکانی و زمانی سنجنده بسیار مهم است و چون پوشش برفی یک پارامتر در طول زمان متغیر است، بنابراین تفکیک زمانی بر تفکیک مکانی ترجیح داده می‌شود. در این مطالعه بعلاوه تفکیک زمانی مناسب سنجنده مودیس از تصاویر این سنجنده استفاده شد. تفسیر تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و دیگر سنجنده‌ها در نرم‌افزارهای سنجنش از دور از جمله ENVI و ERDAS نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد جهت دانلود تصاویر پر حجم ماهواره‌ای و تفسیر آن می‌باشد که اکثر محققان در زمینه پوشش برفی از تصاویر هشت روزه استفاده می‌کنند که خود منبع خطا در مدل‌های مورد نظر می‌باشد. بدین جهت برآورد پوشش برفی حوضه از سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. سامانه مذکور، یک سامانه پرسرعت و کم‌هزینه‌ی تحت وب برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای بصورت رایگان است. از جمله دلایل آن می‌توان به رایگان بودن، عدم نیاز به صرف هزینه و وقت برای دانلود تصاویر ماهواره‌ای و تصحیحات لازم، پشتیبانی از فرمت اکثر تصاویر سنجنده‌های مختلف اشاره کرد. در کنار مزایای فوق باید عنوان کرد که کار با این سامانه نیازمند تسلط به زبان برنامه‌نویسی جاوا (تحت وب) و تئوری‌های لازم و کافی در خصوص مباحث سنجنش از دور می‌باشد. برای این منظور در این مطالعه از تصاویر سنجنده مودیس، برای تخمین مساحت تحت پوشش برف در حوضه قره‌سو استفاده شد. محصول سطح برف سنجنده مودیس با استفاده از الگوریتم Snow map و در گام‌های زمانی روزانه تولید شد. این الگوریتم در سال ۱۹۹۸ ارائه شد (هال و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۲) و بر پایه شاخص NDSI و بازتابش باندهای ۲ و ۴ است. به دلیل انعکاس پایین برف در باندهای مادون قرمز و انعکاس تابش در باندهای مرئی، این شاخص می‌تواند در تشخیص پوشش ابر از دیگر پدیده‌ها بسیار مفید باشد. شاخص مذکور از رابطه زیر به‌دست می‌آید (هال و همکاران، ۱۹۹۵: ۸۶):

¹ Google Earth Engine

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

همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی 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).

$$Q_{n+1} = [C_{Sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \frac{A \cdot 10000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad (2)$$

که در رابطه فوق: Q: دبی روزانه (m³. s-1)، C_S: ضریب رواناب برف، a: عامل درجه روز (cm. °C-1 d-1)، T: درجه حرارت ایستگاه مبنا (°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 (km²)، 86400: ضریب تبدیل واحد cm.km².d-1 به m³/s، K: ضریب فروکش جریان، n: شماره روز در یک دوره محاسباتی. شاخص‌های مذکور می‌توانند با اندازه‌گیری یا بر اساس نظر کارشناسی و با استفاده از خصوصیات حوضه، روابط فیزیکی، تجربی و یا روابط همبستگی به‌دست آیند (مک کوئن، ۱۹۹۸: ۵۴۸).

معیار ارزیابی مدل: در این مطالعه برای ارزیابی مدل SRM از دو معیار دقت کمی، شامل ضریب تبیین R² و درصد خطای حجمی D_v به شرح روابط زیر استفاده شد (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۳۲).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3)$$

که در آن R²: ضریب تعیین، Q_mi: دبی اندازه‌گیری شده در روز iام (m³/s)، Q_ci: دبی محاسبه شده در روز iام (m³/s) و Q_a: میانگین دبی اندازه‌گیری شده روزانه (m³/s) در طول دوره آماری که داده‌های آن برای مدل‌سازی استفاده شده و n تعداد روز است.

$$D_v = \frac{V_R - V'_R}{V_R} * 100 \quad (4)$$

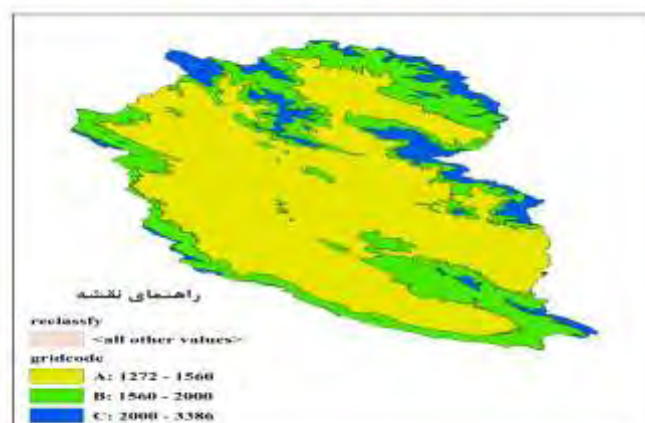
که در آن D_v: درصد خطای حجمی بین کل رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، V_R: حجم رواناب اندازه‌گیری شده، V'_R: حجم رواناب شبیه‌سازی شده است (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۳۲).

نتایج 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 (ایستگاه هیدرومتری غورباغستان) مرز حوضه مشخص و کلاس‌بندی حوضه بر اساس سه منطقه ارتفاعی تعیین شد. شکل ۲، نقشه تراز ارتفاعی^۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نقشه از مدل ارتفاعی رقومی^۲ منطقه مورد مطالعه با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شده است و در جدول ۲، نتایج محاسبات ارتفاعی در حوضه قره‌سو ارائه شده است. بطوری‌که از جدول ۲ می‌توان استنباط کرد فواصل طبقات ارتفاعی در حوضه قره‌سو به گونه‌ای است که ۶۲ درصد مساحت حوضه در قسمت کم‌ارتفاع حوضه و فقط ۸ درصد حوضه در قسمت مرتفع‌تر را شامل می‌شود.

¹ Hypsometric

² DEM (Digital Elevation Model)

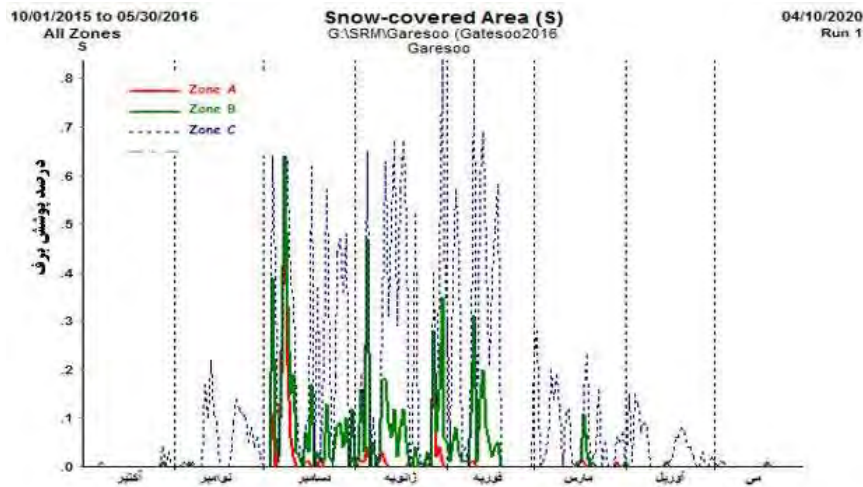


شکل (۲): نقشه مناطق ارتفاعی حوضه قره‌سو.

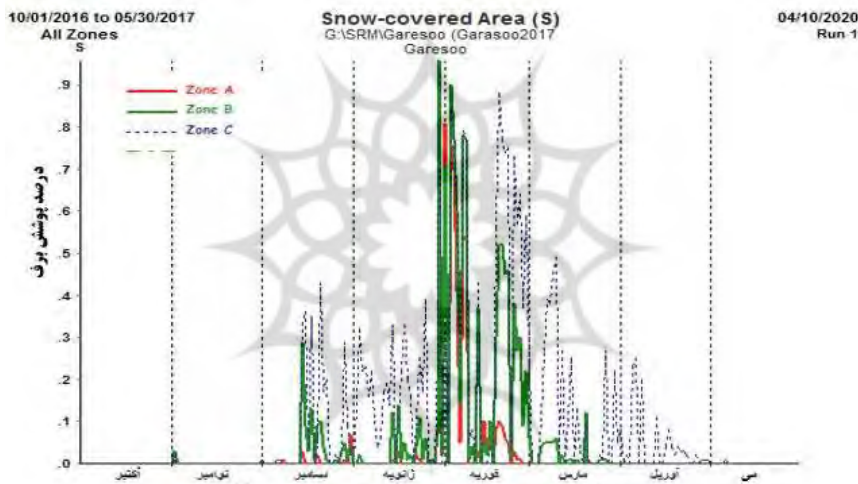
جدول (۲): نتایج محاسبات هیپسومتریک در زیرحوضه قره‌سو.

طبقه ارتفاعی (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت (درصد)	ارتفاع متوسط (متر)
۱۲۷۲-۱۵۲۶	۳۳۹۹	۶۳/۰۳	۱۴۱۶
۱۵۲۶-۲۰۰۰	۱۵۲۶	۲۸/۳۹	۱۷۶۳
۲۰۰۰-۳۳۸۶	۴۶۸	۸/۶۷	۲۶۹۳
جمع	۵۳۹۳	۱۰۰	۲۳۲۹

شکل ۳، منحنی پوشش برف در طول اکتبر ۲۰۱۴ الی می ۲۰۱۵ (سال آبی ۹۵-۹۶) در دوره واسنجی مدل را نشان می‌دهد. در این شکل درصد پوشش برف در سه منطقه ارتفاعی (شکل ۲) با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده‌اند. این داده‌ها به صورت روزانه و با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در سامانه گوگل ارث انجین تهیه شده‌اند. همانطور که از این شکل می‌توان فهمید درصد پوشش برف با ارتفاع نسبت مستقیم دارد و در منطقه سوم ارتفاعی (۲۰۰۰-۳۳۸۶) بعلاوه ارتفاع بالاتر درصد پوشش برف بیشتر و همچنین تعداد روزهای برفی بیشتری مشاهده می‌شود و این در صورتی است که در منطقه ارتفاعی اول (۱۲۷۲-۱۵۲۶) که بیشترین مساحت حوضه را نیز در بر گرفته است کمترین روزهای برفی و همچنین کمترین درصد پوشش برفی را شامل می‌شود. بیشترین پوشش برف در تمامی مناطق ارتفاعی مربوط به ماه‌های ژانویه و فوریه می‌باشد و می‌توان گفت در حوضه قره‌سو از ماه سپتامبر تا ماه آوریل درصد قابل توجهی از مساحت حوضه شامل پوشش برفی می‌باشد. شکل ۴ نیز درصد پوشش برفی حوضه قره‌سو در مناطق ارتفاعی سه‌گانه را برای سال آبی ۹۶-۹۷ (دوره اعتبارسنجی مدل) نشان می‌دهد. از مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان نتیجه گرفت که سال آبی ۹۶-۹۷ دارای پوشش برفی بیشتری بوده است و زمان پوشش برفی منطقه نیز از سال قبل طولانی‌تر بوده است که از بارش بیشتر و دمای کمتر در این سال نتیجه می‌شود.



شکل (۳): منحنی پوشش برف در مناطق ارتفاعی حوضه قره سو سال آبی ۹۵-۹۶



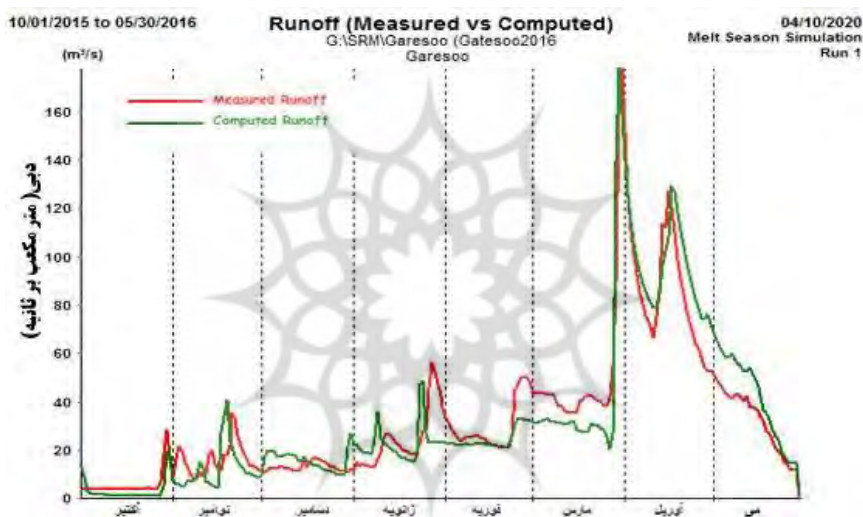
شکل (۴): منحنی پوشش برف در مناطق ارتفاعی حوضه قره سو سال آبی ۹۶-۹۷

مدل SRM بر پایه درجه - روز استوار می‌باشد و نسبت به این فاکتور حساس است، همچنین ضریب فروکش جریان در این مدل از موثرترین پارامترها برای اجرای مدل می‌باشد که باید به دقت مورد واسنجی قرار گیرد. برای هماهنگ کردن رواناب مشاهداتی و محاسباتی لازم است تمامی پارامترهای لازم در ورودی مدل به دقت تعیین گردند. جدول ۳ پارامترهای مورد نیاز مدل SRM را نشان می‌دهد. همانطور که از جدول مشهود است این پارامترها در طول زمان ثابت نیستند و بنا به شرایط حوضه تغییر می‌کنند.

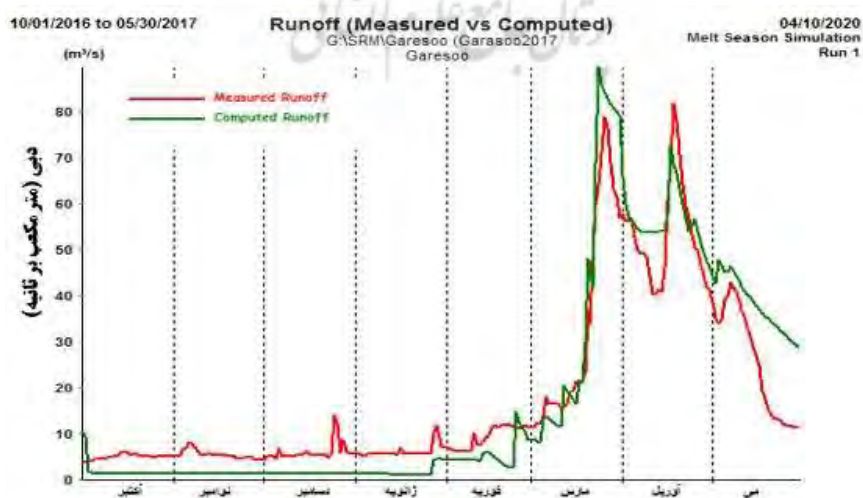
شکل‌های ۵ و ۶ شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضه قره‌سو در دوره واسنجی و اعتبارسنجی را با مدل SRM در طول دوره آماری مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است مدل با دقت خوبی شبیه‌سازی رواناب ذوب برف را انجام داده است، اوج ذوب برف مربوط به فروردین‌ماه و اوایل اردیبهشت‌ماه است. جدول ۴، نتایج ارزیابی مدل SRM را در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضه قره‌سو (در محل ایستگاه هیدرومتری قورباغستان) نشان می‌دهد، به طوری که از این جدول استنباط می‌شود، مدل SRM قابلیت خوبی در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف دارد، طوری که ضریب تعیین (R^2) برای سال‌های آبی ۹۵ الی ۹۶ به ترتیب معادل ۰/۸۶ و ۰/۸۵ و درصد خطای حجمی آن نیز به ترتیب (DV) ۰/۲۸ و ۰/۴۱ به دست آمد.

جدول (۳): 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	۰/۵۰-۰/۵۲	۰/۴۰-۰/۴۵	۰/۳۰-۰/۳۵
فوریه	۰/۸ و ۱/۴	۰	۰/۵۲-۰/۵۸	۰/۴۵-۰/۵	۰/۳۵-۰/۴
مارس	۰/۵ و ۱/۱	۰	۰/۶۰-۰/۶۳	۰/۵۰-۰/۵۲	۰/۴۲-۰/۵
آوریل	۰/۴ و ۱/۰۴	۰	۰/۶۴-۰/۶۸	۰/۵۵-۰/۶	۰/۵۲-۰/۶۵
مه	۰/۶ و ۱/۰۱	۰	۰/۶۸-۰/۷۲	۰/۶۰-۰/۶۶	۰/۷۰-۰/۷۵
ژوئن	۰/۵ و ۱/۵	۰	۰/۷۴-۰/۸	۰/۶۸-۰/۷	۰/۷۵-۰/۸



شکل (۵): تغییرات دبی محاسباتی و مشاهداتی در دوره آماری آبان‌ماه ۹۵ تا خردادماه ۹۶ در حوضه قره‌سو.



شکل (۶): تغییرات دبی محاسباتی و مشاهداتی در دوره آماری آبان‌ماه ۹۵ تا خردادماه ۹۶ در حوضه قره‌سو.



جدول (۴): نتایج ارزیابی شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضه قره سو با مدل SRM.

شاخص یا معیار ارزیابی	مقدار ۹۵-۹۶	مقدار ۹۶-۹۷	واحد
حجم رواناب مشاهداتی	۶۷۷/۲۵۸	۳۷۷/۷۴۱	میلیون متر مکعب
حجم رواناب محاسباتی	۶۷۵/۳۶۳	۳۷۶/۱۸۲	میلیون متر مکعب
میانگین دبی مشاهداتی	۳۲/۲۵۸	۱۸/۰۶۶	متر مکعب بر ثانیه
میانگین دبی محاسباتی	۳۲/۱۶۷	۱۷/۹۹۲	متر مکعب بر ثانیه
درصد خطای حجمی (D_V)	۰/۲۸	۰/۴۱	درصد
ضریب تعیین دبی مشاهداتی و محاسباتی (R^2)	۸۶	۸۵	بی‌بعد

نتیجه‌گیری

این مطالعه که روی حوضه آبریز قره‌سو انجام شد، طبق تقسیمات حوضه‌های مطالعه شده توسط مدل SRM در زمرة مطالعه حوضه‌های بزرگ بشمار می‌آید که از پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به حوضه‌ها در مقیاس کوچک برخوردار است. با توجه به اینکه استفاده از تصاویر سنجنده مودیس که از تفکیک زمانی بسیار خوبی برای مطالعات اقلیم‌شناسی از جمله تخمین پوشش برف برخوردار است نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از سامانه گوگل ارث انجین در منطقه مورد مطالعه که اطلاعات برف‌سنجی ندارد، برآورد قابل قبولی از سطح پوشش برف حوضه قره سو را ارائه می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی با مدل SRM نشان از قابلیت مدل در شبیه‌سازی رواناب برف در منطقه مورد مطالعه داشت، به طوری که ضریب تعیین مدل در سال‌های ۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷ به ترتیب معادل با ۰/۸۶ و ۰/۸۵ و درصد خطای حجمی به همان ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۴۱ محاسبه شد. این رقم در مطالعه نجف زاده و همکاران (۱۳۸۳)، ۰/۷۸ و در مطالعه فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، ۰/۸۲ 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 استفاده از سامانه گوگل ارث انجین که از دقت و سرعت بالایی برخوردار است برای به دست آوردن دقیق‌تر پوشش سطح برفی، موجب افزایش دقت مدل گردید به طوری که به جای تصاویر هشت‌روزه مودیس، از تصاویر آن در مقیاس روزانه استفاده شد و با دقت بالاتر تعداد تصویر بیشتری را برای تخمین پوشش برفی استفاده شد. از طرف دیگر با نگاهی به رواناب محاسباتی و مشاهداتی، در هر دو سال مورد مطالعه دبی‌های اوج در ماه مارس و همزمان با گرم شدن هوا و ذوب شدن برف‌ها شروع می‌شود و تا ماه آوریل نیز ادامه دارد. با توجه به پوشش برفی می‌توان نتیجه گرفت که عمده رواناب ماه مارس مربوط به ذوب برف است ولی با تغییر شکل بارش از برف به باران و گرم شدن هوا دبی اوج ماه آوریل مربوط به باران می‌باشد. 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 پیش‌فرض‌های مدل و مقادیر توصیه‌شده استفاده شد.

منابع

- 0 جهانبخش اصل، سعید. دین‌پژوه، یعقوب و عالی‌نژاد، محمدحسین. ۱۳۹۸. تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب ناشی از ذوب برف (مطالعه موردی: حوضه آبریز شهرچای ارومیه)، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۳ (۶۷)، ۹۱-۱۰۷.
- 0 رسولی، علی‌اکبر و ادهمی، سلام. ۱۳۸۶. محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجنده مودیس. *جغرافیا و توسعه*. ۲۳-۳۶(۱۰).
- 0 فتاحی، ابراهیم. دلاور، مسعود و قاسمی الهه. 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*. ۲۳ (۳۳): ۱۲۹-۱۴۱.
- 0 کارآموز، محمد و عراقی‌نژاد، شهاب. ۱۳۹۳. هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران). چاپ سوم.
- 0 محمدی احمد محمودی، پیمان، خورانی، اسداله. (۱۳۹۸). تغییرات پوشش برف در رشته‌کوه زاگرس با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده MODIS. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۵ (۲)، ۳۷۱-۳۵۵.
- 0 میرموسوی، سیدحسین؛ صبور، لیلا. ۱۳۹۳. پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه ی شمال غرب ایران، *جغرافیا و توسعه*، ۳۵، ۱۹۱-۱۸۱.
- 0 نجف زاده، رضا. ابریشم چی احمد. تجریشی، مسعود و طاهری شهرآئینی، حمید. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف. *آب و فاضلاب*. ۵۲ (۵): ۱۱-۲.
- 0 نظم فر، حسین، مرادی، مسعود. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجنش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبی دهگلان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی* ۲۰ (۵۵)، ۲۷۳-۲۸۹.

- 0 Adnan, M. Nabi, G. Poomee, M, S and Ashraf, A. 2017. Snowmelt runoff prediction under changing climate in the Himalayan cryosphere: A case of Gilgit River Basin. *Geoscience Frontiers*, Volume 8, Issue 5, Pages 941-949.
- 0 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.
- 0 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.
- 0 Hall D.K., Tait G.A., Riggs V.V., Salomonson 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 Theoretical Basis Document Number ATBD-MOD-10, NASA Goddard Space Flight Center.
- 0 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.
- 0 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.
- 0 McCuen R. H. 1998. Hydrologic analysis and design. Printice-Hall Pub., Inc. N.J., PP.548.

- 0 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>.
- 0 Shunping Xie, Jinkang Du, Xiaobing Zhou, Xueliang Zhang, Xuezhi Feng, Wenlong Zheng, Zhiguang Li, Chong-Yu Xu. 2018. A progressive segmented optimization algorithm for calibrating time-variant parameters of the snowmelt runoff model (SRM), *Journal of Hydrology*, Volume **566**, Pages 470-483.
- 0 Tekeli A.E., Akyurek Z., Arda Sorman A., Sensoy A. and Unal Sorman A. 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the easternpart of Turkey. *Journal of Remote Sensing of Environment*, **97**: 216-230.

