نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
صفحات ۲۱ – ۳۶

شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف حوضه گاماسیاب با مدل SRM

سعید جهانبخش اصل؛ استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکدهٔ جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
محمد حسین عالی‌نژاد[1]؛ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکدهٔ جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دریافت مقاله : ۱۳۹۹/۰۱/۲۰ پذیرش نهایی:۱۳۹۹/۰۵/۲۸

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 حوضهٔ گاماسیاب، نخست سطح پوشش برف برای سال‌های آبی ۹۵ الی ۹۷ با استفاده از تصاویر روزانهٔ ماهوارهٔ ترا- مودیس با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از طریق سامانه گوگل ارث انجین استخراج شد. سپس در محیط نرم-افزار GIS، مشخصات فیزیوگرافی حوضه به‌دست آمد. در مرحلهٔ بعد، با واردکردن 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 فروردین‌ماه چشمگیر است، ولی با افزایش درجه‌ی حرارت هوا در اردیبهشت‌ماه، سهم باران در جریان پررنگ‌تر می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت بالای این مدل می‌باشد، به‌طوری که ضریب تعیین (R^2) برای سال‌های آبی ۹۵-۹۶ الی ۹۶-۹۷ به ترتیب معادل ۰/۹۳ و ۰/۹ و درصد خطای حجمی آن نیز به ترتیب (Dv) ۰/۳ و ۳/۳۳ به‌دست آمد.

واژه های کلیدی: برف، سنجش از دور، SRM، مودیس، حوضه گاماسیاب.

[1]:نویسنده مسئول: Email: Aalineghad٦٣@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

مقدمه

پوشش برفی در یک حوضه بر بیلان آب و انرژی آن حوضه اثر می‌گذارد بطوریکه تخمین آب معادل برف برای پیش بینی سیلاب، مدیریت مخازن و کشاورزی یک منطقه بسیار حائز اهمیت است (کاراموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۱۶۸). اما باید دانست که علاوه بر این مورد بدیهی و محرز، حجم خارق‌العاده‌ای از فعالیت‌های زیستی در درون و زیر پوشش برف به دلیل شرایط گرم ناشی از عایق بودن آن رخ می‌دهد (Jones et al ،۲۰۰۱). اثر عایق‌بندی برف بسیاری از گونه‌های گیاهی را نیز در طول دوره سرما و یخبندان حفظ می‌کند که از آن نمونه می‌توان به گندم پاییزه در زیر یک پوشش ده سانتیمتری برف اشاره کرد. بر اساس تخمین سازمان خواروبار جهانی[۱] (۱۹۷۸)، برای محصول گندم در مقیاس جهانی، سود حاصل از تاثیر هر سانتییمتر برف به عمق پنج تا ده سانتیمتری در زنده‌مانی گیاه حدود ۲۹۷ میلیون دلار می‌باشد(Stephan ،۱۹۸۱) . بنابراین کاهش پوشش برف بر اثر تغییرات آب و هوا می‌تواند از این لحاظ نیز برای بشر زیان‌آور باشد.

برآورد رواناب ناشی از ذوب برف نقش مهمی در محاسبات مربوط به طراحی سازه‌های آبی و مخازن سدها ایفاء می‌نماید. با توجه به اینکه در بیشتر حوضه‌های کوهستانی کشور آمار و اطلاعات برف‌سنجی در دسترس نیست و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مرتفع متناسب با اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی نیست. بنابراین، ضرورت استفاده از روش‌های غیرمستقیم، مانند تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای برای به‌دست آوردن شاخص‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی مطرح می‌شود و این یکی از مؤثرترین و باصرفه‌ترین روش در تخمین رواناب ناشی از ذوب برف است. مدل SRM 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(Rango and Martinec ،۱۹۹۸). با پیشرفت سنجش از دور علاوه بر حوضه‌های کوچک در حوضه‌های بزرگ نیز از این مدل استفاده شد. به عنوان مثال سیدل و همکاران (Seidel et al, ۲۰۰۰)، این مدل را در حوضه رودخانه گنگ واقع در هیمالیا با مساحتی بیش از نهصدهزار کیلومتر مربع استفاده نمودند. مالچر و هیدینگر (Malcher and Heidinger ،۲۰۰۱)، با استفاده از تصاویر سنجندهٔ مودیس سطح پوشش برف چهار زیرحوضه از حوضهٔ اتزال در شرق اتریش را به‌دست آوردند و با استفاده از مدل SRM رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کردند. مدل SRM برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در ارتفاعات آلپ سوئیس را سیدل و مارتینس (Seidel. And Martinec ،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 و همکاران (Tekeli et al ،۲۰۰۵)، به‌منظور مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در بالادست حوضهٔ آبریز فرات از منحنی‌های تخلیهٔ برف (استخراج‌شده از نقشه‌های پوشش برف مودیس) استفاده کردند. نتایج اولیهٔ مطالعهٔ آنها نشان داد که، این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب ناشی از برف منطقه دارد. هارشبرگر و همکاران (Harshburger et al, ۲۰۱۰)، با استفاده از مدل SRM، داده‌های برف سنجندهٔ مودیس و اطلاعات ایستگاه‌های تله‌متری برف در حوضه‌های کوهستانی غرب ایالات متحده، به بررسی جریان‌های کوتاه‌مدت تا متوسط (۱ تا ۱۵روزه) پرداختند و به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل و کمک به اجرای آن از روش شاخص درجه-روز برای تخمین آب معادل برف استفاده کردند.

۱ - Food and Agriculture Organization.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

نامبردگان از حداکثر و حداقل دمای بحرانی برای جداسازی بارش جامد و مایع و یا مخلوطی از باران و برف استفاده کردند. مقایسهٔ این شبیه‌سازی نشان داد، نتایج بیانگر عملکرد رضایت‌بخش مدل بود. عدنان و همکاران (۲۰۱۷، Adnan et al)، مطالعه‌ای با هدف برآورد تغییراقلیم 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[1] و همکاران (۲۰۱۸، Shunping et al)، 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 قابل‌توجه ابعاد پارامتر جلوگیری می‌کند همچنین عملکرد بهتری نسبت به SOA برای هر دو شبیه‌سازی ذوب برف و ذوب برف و باران دارد. نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳)، تغییرات سطح پوشش برف را در یکی از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز زاینده‌رود (پلاسجان) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نووا برای دوسال زراعی ۷۲-۱۳۷۰ استخراج کردند، در پژوهش مذکور برای شبیه‌سازی رواناب از مدل SRM استفاده کردند، طوری‌که مدل، دبی جریان روزانه را با ضریب تعیین ۰/۹۵ شبیه‌سازی کرد. رسولی و ادهمی (۱۳۸۶)، در پژوهشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجندهٔ مودیس و براساس الگوریتم‌های مختلف، سطح پوشش برف حوضهٔ آبریز آجی‌چای را محاسبه کردند. فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضهٔ آبریز بازفت از تصاویر ماهواره‌ای ۸ روزهٔ مودیس و مدل SRM استفاده کردند. نتایج کاربرد مدل، شبیه‌سازی موفق و قابل‌قبولی 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. نتایج نشان دهنده‌ی تغییرات هزار درصدی در طول یک دهه در میزان پوشش برف منطقه شمال غرب ایران بوده و آسیب‌پذیری منابع آب وابسته به ذوب برف را در این منطقه نشان می‌دهد. نظم‌فر و مرادی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای که در آن از داده‌های سنجش 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. تیرگر فاخری و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی اثرات تغییراقلیم بر روی رواناب ذوب برف زیرحوضه ارمند را شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش که از خروجی سه مدل گردش عمومی جو استفاده شد و شبیه‌سازی رواناب ذوب برف بوسیله مدل SRM شبیه‌سازی انجام شد، حاکی از کاهش ۱۲ درصدی رواناب در دوره آتی بود. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی اثرات تغییراقلیم بر روی رواناب ناشی از ذوب برف حوضه شهرچای ارومیه را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که رواناب ناشی از ذوب

۱ - Shunping

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

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.

رودخانه گاماسیاب یکی از رودخانه‌های پرآب غرب کشور است که از ارتفاعات زاگرس واقع شده در غرب شهرستان بروجرد سرچشمه می‌گیرد و عمده جریان آن خصوصا در فصل بهار ناشی از ذوب برف انباشته شده در ارتفاعات می‌باشد. آب این رودخانه دشت‌های استان‌های کرمانشاه، ایلام و خوزستان را مشروب می‌کند و نقش مهمی در تغذیه سد مخزنی سیمره واقع شده در پایین دست آنرا دارد. اگر چه عمده جمعیت واقع شده در دشت خوزستان و پایین‌دست حوضه کرخه به صورت مستقیم شاهد بارش برف نیستند ولی عمده جریان رود کرخه در این استان ناشی از تغذیه آن به وسیله ذوب پوشش برفی در سرشاخه‌های برفگیر از جمله حوضه گاماسیاب در فصل ذوب برف می‌باشد. بررسی رفتار هیدرولوژیکی برف در این منطقه می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های مربوط به کشاورزی، مدیریت مخزن و مدیریت بحران داشته باشد. برای ضرورت این امر می‌توان به سیل ویرانگر فروردین ۹۸ در لرستان و خوزستان اشاره کرد که به گواه اکثر صاحب‌نظران بیشتر رواناب جاری شده در سیل ناشی از ذوب برف حوضه‌های کوهستانی از جمله حوضه گاماسیاب بود. هدف این مطالعه، شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل SRM در این حوضه است.

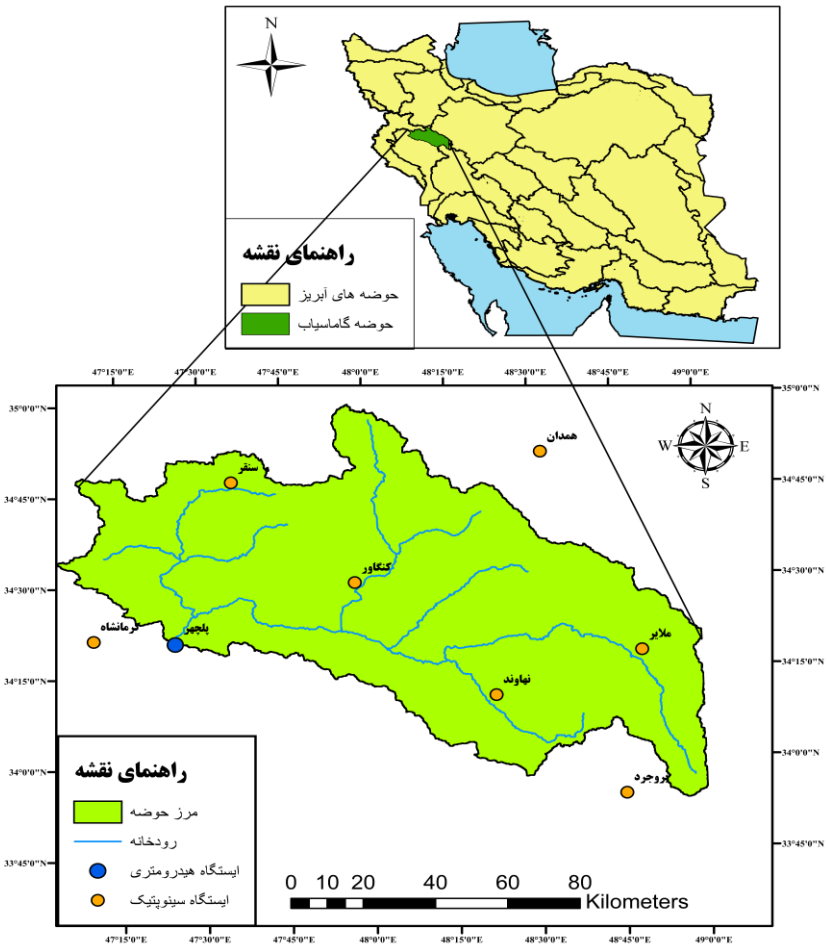
داده ها و روش کار

- **قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه**

حوضه گاماسیاب در بخش شمال شرقی حوضه آبریز کرخه واقع شده است که از سراب سنگ سوراخ و چشمه-سارهای اطراف نهاوند سرچشمه می‌گیرد(زارع‌زاده مهریزی و همکاران، ۱۳۹۶). در مسیر رودخانه گاماسیاب رشته‌های فرعی مختلفی به آن ملحق می‌شود در جنوب بیستون، شاخه فرعی رودخانه دینور به آن پیوسته و به نام گاماسیاب ادامه مسیر می‌دهد و در نزدیکی فرامان به رودخانه قره‌سو متصل شده و بعد از آن به نام سیمره وارد خاک لرستان می‌شود. حوضه آبریز آن با مساحتی در حدود ۱۱۰۴۰ کیلومترمربع بین طول جغرافیایی ۴۷ درجه و۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۴ درجه و ۸۵ دقیقه شمالی واقع شده ا ست. ارتفاع از سطح دریا در این حوضه بین ۱۲۷۵ تا ۳۶۸۰ متر می‌باشد. شکل ۱ حوضه آبریز گاماسیاب را نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]



شکل۱. موقعیت حوضهٔ گاماسیاب در میان حوضه‌های آبریز کشور

- **روش کار**

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 سنجندهٔ مودیس که در سامانه گوگل ارث انجین تجزیه و تحلیل شدند، سطح پوشش برف در حوضهٔ گاماسیاب 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 روزانهٔ جریان رودخانه در ایستگاه هیدرومتری پل‌چهر (واقع در خروجی حوضه) در دورهٔ آماری آبان سال ۹۵ تا خردادماه سال ۹۷ استفاده شد. جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

جدول ۱.مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع (متر)
		دقیقه	درجه	دقیقه	درجه	
نهاوند	سینوپتیک	۱۱	۳۴	۲۲	۴۸	۱۶۷۰
کرمانشاه	سینوپتیک	۱۹	۳۴	۰۵	۴۷	۱۳۴۰
همدان	سینوپتیک	۴۸	۳۴	۳۰	۴۸	۱۷۸۰
بروجرد	سینوپتیک	۵۴	۳۳	۴۵	۴۸	۱۶۱۲
ملایر	سینوپتیک	۱۸	۳۴	۴۹	۴۸	۱۷۶۰
کنگاور	سینوپتیک	۳۰	۳۴	۵۷	۴۷	۱۵۲۰
سنقر	سینوپتیک	۴۶	۳۴	۳۵	۴۷	۱۶۹۰
پل‌چهر	هیدرومتری	۴۲	۳۷	۶۲	۴۴	۱۵۹۱

مشخصات فیزیوگرافی حوضه شامل مرز حوضه، نقشهٔ شبکه آبراهه‌ها، مساحت و مناطق‌ارتفاعی 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 بعلت تفکیک زمانی مناسب سنجنده مودیس از تصاویر این سنجندهٔ استفاده شد. تفسیر تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و دیگر سنجنده‌ها در نرم‌افزارهای سنجش از دور از جمله ENVI و ERDAS نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد جهت دانلود تصاویر پرحجم 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 جهت برآورد پوشش برفی حوضه از سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. سامانه مذکور، یک سامانه پرسرعت و کم-هزینه‌ی تحت وب برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای بصورت رایگان است. این سامانه باعث شده است که سرعت پردازش تصاویر نسبت به روش‌های دیگر از جمله استفاده از نرم‌افزارهای سنجش از دور به میزان بسیار زیادی بالا رود. 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 سنجش از دور می‌باشد. برای این منظور در این مطالعه از تصاویر سنجندهٔ مودیس، برای تخمین مساحت تحت پوشش برف در حوضهٔ گاماسیاب استفاده شد. محصول سطح برف سنجندهٔ مودیس با استفاده از الگوریتم Snow map و در گام‌های زمانی روزانه تولید شد. این الگوریتم در سال ۱۹۹۸ ارائه شد (Hall et al ،۱۹۹۸) و بر پایهٔ شاخص NDSI و بازتابش باندهای ۲و ۴ است. به‌دلیل 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 رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید (Hall et al ،۱۹۹۵):

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

$$NDSI = \frac{(band4 - band6)}{(band4 + band6)} \quad (۱)$$

همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی جریان حاصل از ذوب برف در منطقهٔ مورد مطالعه از مدل SRM استفاده شد. در این مدل، رواناب ناشی از بارندگی و ذوب برف در هر روز محاسبه و به جریان پایهٔ رودخانه اضافه شد و سپس رواناب روزانه با استفاده از معادلهٔ زیر تخمین زده شد (Rango and Martince ، ۱۹۹۸: ۸).

$$Q_{n+1} = [C_{Sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \frac{A.10000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad (۲)$$

که در رابطهٔ فوق: Q: دبی روزانه ($m^3 . s^{-1}$)، Cs: ضریب رواناب برف، a: عامل درجه روز ($cm. °c^{-1} d^{-1}$)، T: درجه حرارت ایستگاه مبنا ($^{°}C$)، ΔT: گرادیان حرارتی هر ناحیهٔ ارتفاعی، S: نسبت مساحت پوشش برف به مساحت کل حوضه (به درصد)، CR: ضریب رواناب باران، P: مقدار بارش برف و باران (cm)، A: مساحت حوضه (km^2)، $\frac{10000}{86400}$: ضریب تبدیل واحد $cm.km^2.d^{-1}$ به m^3/s، K: ضریب فروکش جریان، n: شمارهٔ روز در یک دورهٔ 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 (McCuen، ۱۹۹۸: ۵۴۸).

درجه‌حرارت به دو صورت میانگین یا حداقل و حداکثر به مدل وارد می‌شود و به‌وسیلهٔ گرادیان درجه‌حرارت به متوسط ارتفاع هیپسومتریک منتقل می‌شود. بارش(بر حسب سانتی‌متر) از جمله پارامترهای مهم در ورودی مدل می‌باشد که به دو صورت می‌توان به مدل وارد کرد. در حالت اول بارش ایستگاه مبنا وارد مدل شده و برای کل حوضه به نسبت ارتفاع تعمیم داده می‌شوند و در حالت دوم و در صورت وجود ایستگاه اندازه‌گیری می‌توان برای هر ناحیه از ایستگاه مجزا استفاده کرد.

ضریب رواناب به نسبت رواناب اندازه‌گیری‌شده به بارش اندازه‌گیری شده اطلاق می‌شود. در ابتدای فصل ذوب برف تلفات خیلی کم است و در مراحل بعدی، زمانی که خاک بدون محافظ باشد، بر اثر رشد گیاهان، تلفات (به‌علت تبخیر- تعرق، برگاب و نفوذ) بیشتر است. از میان شاخص‌های SRM، ضریب رواناب اولین گزینه برای واسنجی مدل است (Rango and Martince ، ۱۹۹۸: ۱۸).

فاکتور درجه-روز به‌صورت مقدار عمق آب ذوب‌شده از برف به تعداد درجه-روز تعریف می‌شود و به شکل رابطهٔ زیر بیان می‌شود (Rango and Martince، ۱۹۹۸: ۱۹).

$$M = a.T \quad (۳)$$

که در آن a: عامل درجه روز ($cm.°C^{-1}.d^{-1}$)، M: عمق ذوب برف روزانه (cm) ،. T تعداد درجه-روز ($^{°}C.d$) است. در صورت نبودن داده، فاکتور درجه-روز با استفاده از رابطهٔ تجربی زیر به‌دست می‌آید(Rango and Martince،۱۹۹۸: ۲۱).

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

که در آن a: فاکتور درجه- روز (cm.°C-۱.d-۱)، ρs: جرم مخصوص برف (kg/m۳)، ρw: جرم مخصوص آب (kg/m۳) است.

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

چون تشخیص نوع بارش در حوضه(باران و برف) امکان‌پذیر نیست در این مدل برای برطرف کردن این اشکال از دمای بحرانی استفاده شد. ضریب فروکش (K) یکی از شاخص‌های بسیار مهم در مدل SRM است زیرا (K-۱) قسمتی از ذوب روزانه است که بلافاصله به رواناب اضافه می‌شود. معمولا تحلیل داده‌های دبی اندازه‌گیری‌شده در روزهای قبلی، روش خوبی برای تعیین K است. در این روش، مقادیر دبی (Qn) در مقابل دبی یک روز بعد(Qn+۱) (در مواقعی که هیدروگراف جریان در حالت فروکش است) رسم شد. شیب خط برازش‌شده بر نقاط و پراکنش داده‌ها در مقیاس نیم لگاریتمی مقدار K را به‌دست می‌دهد. باید توجه داشت که K ثابت نیست و با کاهش دبی مقدار K افزایش می‌یابد.

معیار ارزیابی مدل: در این مطالعه برای ارزیابی مدل SRM از دو معیار دقت کمی، شامل ضریب تبیین R۲ و درصد خطای حجمی Dv به شرح روابط زیر استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - Q_i')^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \bar{Q})^2} \qquad (۵)$$

که در آن R۲: ضریب تعیین، Qmi: دبی اندازه‌گیری‌شده در روز iام(m۳/s) ، Qci : دبی محاسبه‌شده در روز iام، (m۳/s) و Qa: میانگین دبی اندازه‌گیری شده روزانه (m۳/s) در طول دورهٔ آماری که داده‌های آن برای مدل‌سازی استفاده شده و n تعداد روز است.

$$D_v = \frac{V_R - V_R'}{V_R} * 100 \qquad (۶)$$

که در آن Dv: درصد خطای حجمی بین کل رواناب اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده، VR: حجم رواناب اندازه-گیری‌شده، V_R': حجم رواناب شبیه‌سازی‌شده است (Rango and Martince ، ۱۹۹۸: ۳۲).

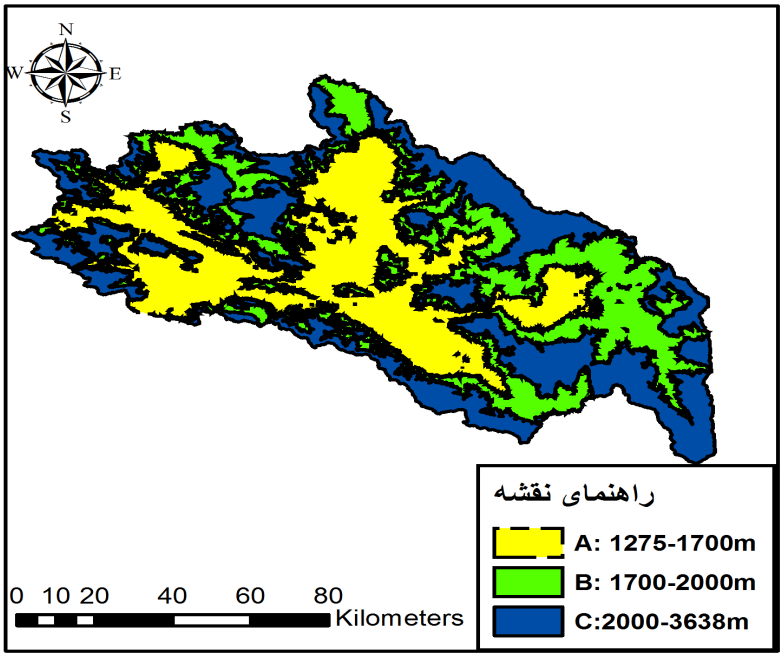
شرح و تفسیر نتایج

اختلاف ارتفاع در سطح حوضه بر اندازه‌گیری پارامترهای لازم برای اجرای مدل اثرگذار است، برای به حداقل رساندن تاثیر اختلاف ارتفاع بر پارامترهای بارش و دما، حوضه به سه ناحیه ارتفاعی تقسیم شد. شکل ۲، نقشهٔ تراز ارتفاعی[۱] منطقهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نقشه از مدل ارتفاعی رقومی[۲] منطقهٔ مورد مطالعه با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شده است و در جدول ۲، نتایج محاسبات ارتفاعی ارائه شده است. بطوری‌که از جدول ۲ می‌توان استنباط کرد فواصل طبقات ارتفاعی در هر کلاس مساوی با طبقات دیگر طوری تعیین شده است که مساحت ناحیه‌های ارتفاعی تقریبا با هم برابر باشد. اساسا ارتفاع به کار رفته برای نشان دادن مناطق، میانگین ارتفاع هیپسومتری منطقه

۱- Hypsometric
۲ - DEM (Digital Elevation Model)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

است که نشان می‌دهد ارتفاع آن منطقه در کدام قسمت ناحیه واقع شده است. شیب زیاد حوضه نیز می‌تواند بر روند ذوب برف بر اثر دریافت انرژی تابشی خورشید اثر بگذارد زیرا شیب و جهت شیب عامل کنترل‌کننده در دریافت تابش موج بلند و کوتاه می‌باشند.



شکل ۲. نقشهٔ مناطق ارتفاعی و DEM حوضهٔ گاماسیاب

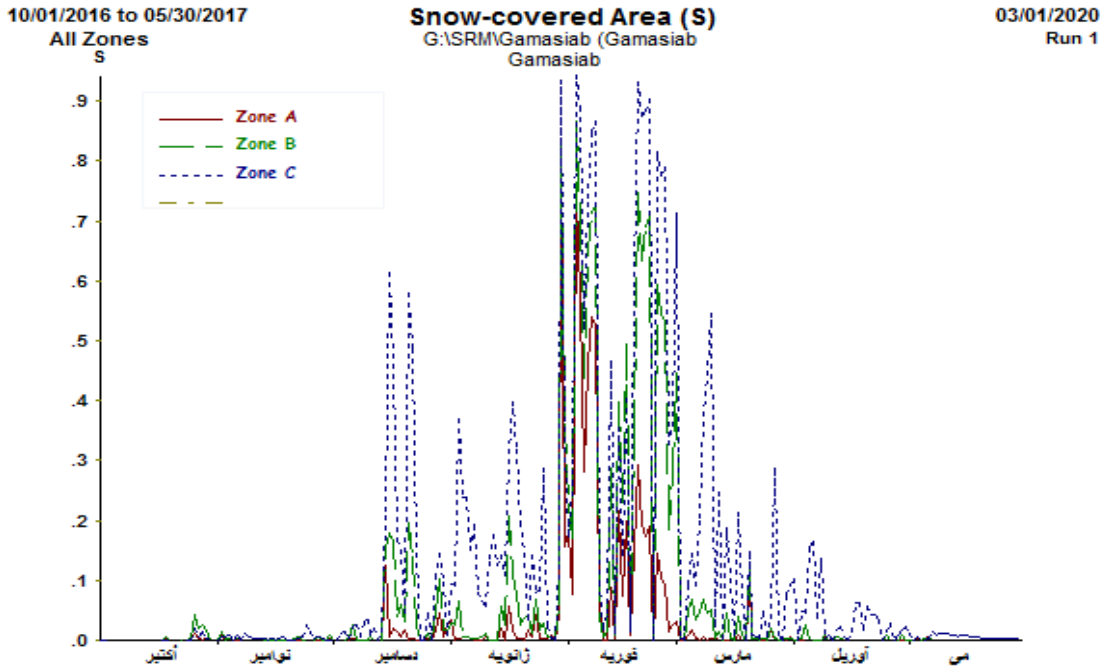
جدول ۲. نتایج محاسبات هیپسومتریک در زیرحوضهٔ گاماسیاب

طبقه ارتفاعی (متر)	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت (درصد)	ارتفاع متوسط (متر)
۱۲۷۵-۱۷۰۰	۳۴۷۵	۳۳/۴۱	۱۴۹۰
۱۷۰۰-۲۰۰۰	۳۴۴۳	۳۳/۱۰	۱۸۵۰
۲۰۰۰-۳۶۳۸	۳۴۵۳	۳۳/۱۹	۲۸۰۰
جمع	۱۰۴۰۱	۱۰۰	۲۵۳۰

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 که برای تمامی روزها اعدادی بین صفر و یک می‌باشد. 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 (۳۶۲۸-۲۰۰۰) بعلت ارتفاع بالاتر درصد پوشش برف بیشتر و همچنین تعداد روزهای برفی بیشتری مشاهده می‌شود و این در صورتی است که در منطقه ارتفاعی اول (۱۷۰۰-۱۲۷۵) که

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

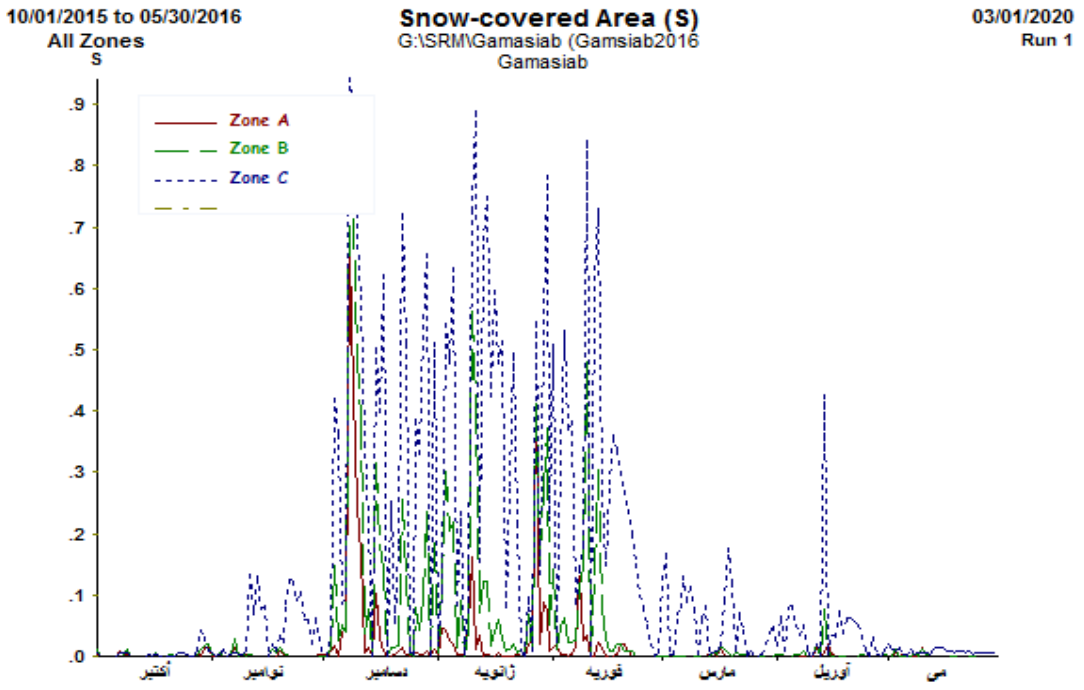
بیشترین مساحت حوضه را نیز در بر گرفته است کمترین روزهای برفی و همچنین کمترین درصد پوشش برفی را شامل می‌شود. بیشترین پوشش برف در تمامی مناطق ارتفاعی مربوط به ماه‌های ژانویه، فوریه و اوایل مارس می‌باشد و می‌توان گفت در حوضه گاماسیاب از ماه سپتامبر تا ماه آوریل درصد قابل توجهی از مساحت حوضه شامل پوشش برفی می‌باشد. شکل ۴ نیز درصد پوشش برفی حوضه گاماسیاب 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 ۹۷-۹۶ 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 گاماسیاب سال آبی ۹۵-۹۶

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]



شکل ۴. منحنی پوشش برف در مناطق ارتفاعی حوضه گاماسیاب سال آبی ۹۶-۹۷

برای هماهنگ کردن رواناب مشاهداتی و محاسباتی لازم است تمای پارامترهای لازم در ورودی مدل به دقت تعیین گردند. جدول ۴ 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.

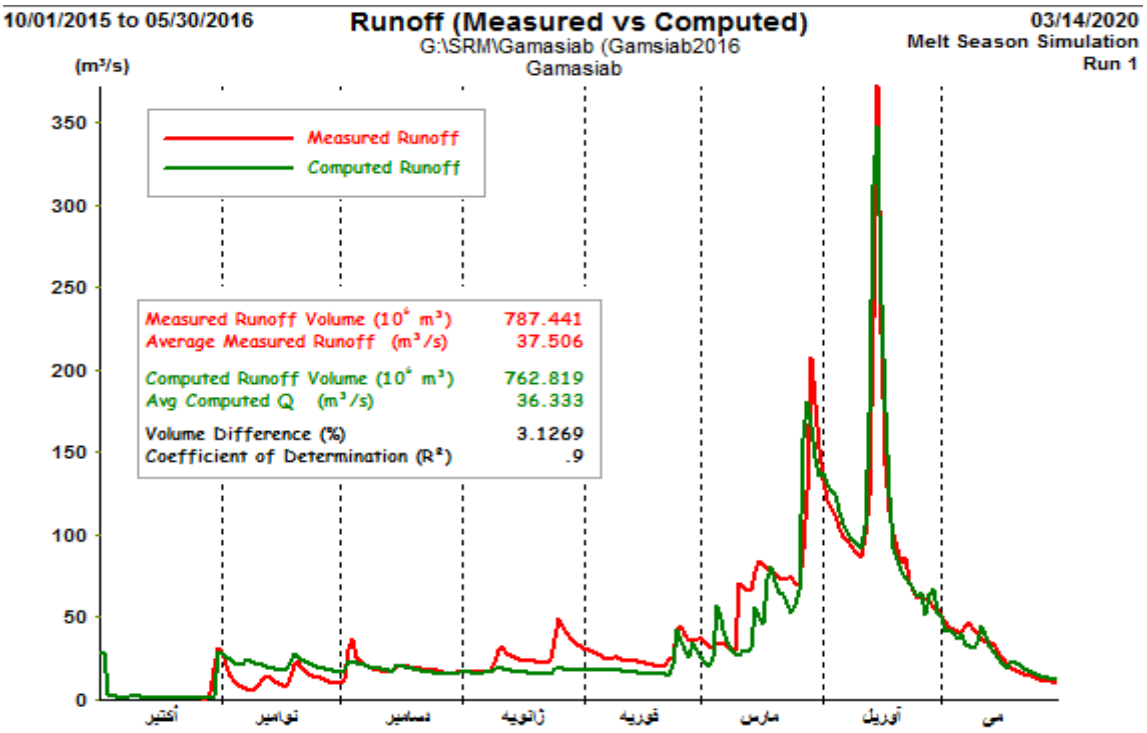
جدول ۴. مقدار شاخص‌های استفاده‌شده در مدل SRM در این مطالعه

ماه	ضریب فروکش (K) X و Y	درجه حرارت بحرانی (°C)	ضریب رواناب باران	ضریب رواناب برف	عامل درجه روز (cm. °c^{-1} d^{-1})
ژانویه	۱/۲ و ۰/۸۸	۰	۰/۰-۵/۵۲	۰/۰-۴/۴۵	۰/۳-۰/۳۵
فوریه	۱/۴ و ۰/۸	۰	۰/۵۲-۰/۵۸	۰/۰-۴۵/۵	۰/۳۵-۰/۴
مارس	۱/۱ و ۰/۵	۰	۰/۰-۶/۶۳	۰/۰-۵/۵۲	۰/۴۲-۰/۵
آوریل	۱/۰۴ و ۰/۴	۰	۰/۶۴-۰/۶۸	۰/۵۵-۰/۶	۰/۵۲-۰/۶۵
مه	۱/۰۱ و ۰/۶	۰	۰/۶۸-۰/۷۲	۰/۶-۰/۶۶	۰/۷-۰/۷۵
ژوئن	۱/۵ و ۰/۵	۰	۰/۷۴-۰/۸	۰/۶۸-۰/۷	۰/۷۵-۰/۸

شکل‌های ۵ و ۶، شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضهٔ گاماسیاب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی را با مدل SRM در طول دورهٔ 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 ۵، نتایج ارزیابی مدل SRM را در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضهٔ گاماسیاب (در محل ایستگاه هیدرومتری پلچهر) نشان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

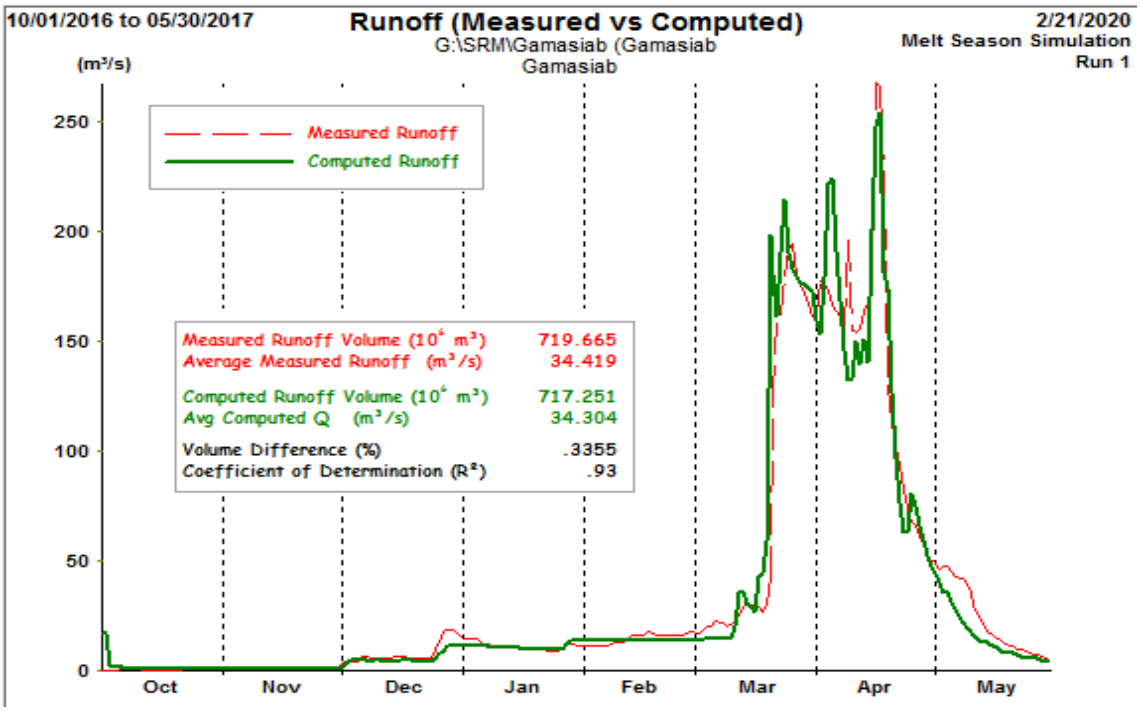
می‌دهد، به‌طوری‌که از این جدول استنباط می‌شود، مدل SRM قابلیت خوبی در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف دارد، طوری‌که ضریب تعیین (R^2) برای سال‌های آبی ۹۵ الی ۹۶ به ترتیب معادل ۰/۹۳ و ۰/۹ و درصد خطای حجمی آن نیز به ترتیب (DV) ۰/۳ و ۳/۳۳ به‌دست آمد.



شکل ۵. تغییرات دبی محاسباتی و مشاهداتی در دورهٔ آماری آبان‌ماه ۹۵ تا خردادماه ۹۶ در حوضهٔ گاماسیاب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]



شکل ۶. تغییرات دبی محاسباتی و مشاهداتی در دورهٔ آماری آبان‌ماه ۹۵ تا خردادماه ۹۶ در حوضهٔ گاماسیاب

جدول ۵. نتایج ارزیابی شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضهٔ گاماسیاب با مدل SRM

شاخص یا معیار ارزیابی	مقدار ۹۶-۹۵	مقدار ۹۷-۹۶	واحد
حجم رواناب مشاهداتی	۷۸۷/۴۴۱	۷۱۹/۶۶۵	میلیون متر مکعب
حجم رواناب محاسباتی	۷۶۲/۸۱۹	۷۱۷/۲۵۱	میلیون متر مکعب
میانگین دبی مشاهداتی	۳۷/۵۰۶	۳۴/۴۱۹	متر مکعب بر ثانیه
میانگین دبی محاسباتی	۳۶/۳۳۳	۳۴/۳۰۴	متر مکعب بر ثانیه
درصد خطای حجمی (D_V)	۳/۱۲۶۹	۰/۳۳۵۵	درصد
ضریب تعیین دبی مشاهداتی و محاسباتی (R^2)	۹۰	۹۳	بی‌بعد

نتیجه‌گیری

این مطالعه که روی حوضه آبریز گاماسیاب انجام شد، طبق تقسیمات حوضه‌های مطالعه شده توسط مدل SRM در زمره 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 حوضهٔ گاماسیاب را ارائه می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی با مدل SRM نشان از قابلیت مدل در شبیه‌سازی رواناب برف در منطقهٔ مورد مطالعه داشت، به‌طوری‌که ضریب تعیین مدل در سال‌های ۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷ به‌ترتیب معادل با ۰/۹۳ و ۰/۹ و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

درصد خطای حجمی به همان ترتیب ۰/۳ و ۳/۳۳ محاسبه شد. این رقم در مطالعهٔ نجف زاده و همکاران (۱۳۸۳)، ۰/۷۸ و در مطالعهٔ فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، ۰/۸۲ بوده‌است. 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 به‌دست آوردن دقیق‌تر پوشش سطح برفی، موجب افزایش دقت مدل گردید به طوریکه 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 منطقهٔ مورد مطالعه، واسنجی مدل را با مشکل روبه‌رو کرد و برای جبران این نقص از پیش‌فرض‌های مدل و مقادیر توصیه‌شده استفاده شد. با توجه به وسعت حوضه گاماسیاب و بارش نسبتا خوب در این حوضه، در صورت افزایش دما رواناب ناشی از ذوب برف افزایش چشمگیری خواهد داشت که برای ذخیره‌سازی این رواناب و جلوگیری از سیل‌های ویرانگر نظیر سیل فروردین ۹۸، ایجاد سدهای استاندارد که اکوسیستم را نیز دچار تغییر نکند، جهت ذخیره رواناب ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

تیرگرفاخری، فاطمه؛ بهلول علیجانی، پرویز ضیاییان فیروزآبادی و مهری اکبری. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف تحت سناریوهای تغییر اقلیم در حوضهٔ ارمند ،*اکوهیدرولوژی*(۲) **۴** ، ۳۵۷-۳۶۸.

رسولی، علی‌اکبر و سلام ادهمی. ۱۳۸۶. محاسبهٔ آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجندهٔ مودیس. *جغرافیا و توسعه*. (**۱۰**)۲۳-۳۶.

جهانبخش اصل، سعید؛ یعقوب دین‌پژوه، و محمدحسین عالی‌نژاد. ۱۳۹۸. تاثیر تغییراقلیم بر رواناب ناشی از ذوب برف (مطالعه موردی: حوضه آبریز شهرچای ارومیه)، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، **۲۳**(۶۷)، ۱۰۷-۹۱.

زارع زاده مهریزی، شهاب الدین؛ اسداله خورانی، جواد بذرافشان و ام البنین بذرافشان. ۱۳۹۶. ارزیابی کارآیی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب. *مرتع و آبخیزداری*, **۷۰**(۴), ۸۸۱-۸۹۳

فتاحی، ابراهیم؛ مسعود دلاور و الهه قاسمی. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM، مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز بازفت. *نشریهٔ تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. (**۲۳**): ۱۲۹-۱۴۱.

کارآموز، محمد و شهاب عراقی‌نژاد،. ۱۳۹۳. *هیدرولوژی پیشرفته*. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران). چاپ سوم.

میرموسوی ، سیدحسین و لیلا صبور. ۱۳۹۳. پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه ی شمال غرب ایران، *جغرافیا و توسعه*، **۳۵** .۱۹۱-۱۸۱.

نجف‌زاده، رضا؛ احمد ابریشم‌چی، مسعود تجریشی و حمید طاهری شهرآئینی. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف. *آب و فاضلاب*. (**۵۲**) :۱۱-۲.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

نظم فر، حسین و مسعود مرادی. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبی دهگلان) . *جغرافیا و برنامه ریزی* ۲۰ (**۵۵**)، ۲۷۳-۲۸۹.

Adnan, M.; G, Nabi. M, S, Poomee and A, Ashraf. ۲۰۱۷. Snowmelt runoff prediction under changing climate in the Himalayan cryosphere: A case of Gilgit River Basin. *Geoscience Frontiers*, Volume ۸, Issue ۵, Pages ۹٤۱-۹٤۹.

Food and Agriculture Organization .۱۹۷۸. ۱۹۷۷ *Production Yearbook: FAO Statistics*, vol. ۳۱, Ser. No. **۱۵**. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization.

Hall D.K.; G.A. Riggs and V.V. Salomonson. ۱۹۹۵. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sens. Environ.* **٥٤**(۲):۱۲۷–۱٤۰.

Hall D.K.; G.A. Tait, V.V. Riggs, J. Salomonson, Y.L. Chien and G.K. Andrew. ۱۹۹۸. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow-,Lake Ice- and Sea Ice-Mappin Algorithms, modis Algorithm TheoreticalBasis Document Number ATBD-MOD-۱۰,NASA Goddard Space Flight Center.

Harshburger B.J., Karen S.H., Von P.W., Brandon C.M. Troy R.B. and Rango A. ۲۰۱۰. Evaluation of short-to-medium range stream flow forecasts obtained using an enhanced version of SRM. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA),* **۱۵**(۱):۱۷٥۲-۱٦۸۸.

Jones, H. G.; J. W. Pomeroy, D. A Walker and R. W. Hohem .۲۰۰۱. Snow Ecology. Cambridge: *Cambridge university* press. **۲۰۰۱**. ۳۹۸ p.

Malcher, P.; and M, Heidinger.۲۰۰۱. *Processing and data assimilation scheme for satellite snow cover products in the hydrological model*. Envisnow EVG۱-CT- ۲۰۰۱-۰۰۰٥۲.

McCuen R. H.۱۹۹۸. *Hydrologic analysis and design. Printice-Hall Pub*., Inc. N.J., PP.٥٤۸.

Rango, A.; and J. Martinec. ۱۹۹۸. *The snowmelt runoff model (SRM) user/s manual*, version ٤, URL: fttp // hydrolab. arsusda. gov/ pub / srm / srm٤.pdf.

Shunping, X.; D. Jinkang, Z. Xiaobing, Z. Xueliang, F. Xuezhi, Z. Wenlong, Li. Zhiguang, Yu Xu Chong. ۲۰۱۸. A progressive segmented optimization algorithm for calibrating time-variant parameters of the snowmelt runoff model (SRM), *Journal of Hydrology*, Volume **٥٦٦**, Pages ٤۷۰-٤۸۳.

Seidel, K.; and J, Martinec. ۲۰۰۲. Hydrological applications of Satellite Snow Cover mapping in the swiss Alps. *Proceedings of Earsel-Lissig-Workshop Observing Our Cryosphere from Space, Bern*, March ۱۱-۱۳.

Stephan, H.; ۱۹۸۱. Snow and Agriculture. In The Handbook of Snow, ed. D. M. Gray and D. H. Male, Willowdale, Ontario: Pergamon Press, pp. ٦۰–۱۲٥.

Tekeli, A.E.; Z. Akyurek, A. Sorman, A, Sensoy. and A, Sorman. ۲۰۰٥. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the easternpart of Turkey. *Journal of Remote Sensing of Environment*, **۹۷**: ۲۱٦-۲۳۰.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.21]