

ارزیابی عملکرد مدل SRM تحت تأثیر ماه‌های مختلف ذوب برف (مطالعه‌ی موردی: حوزه دوآب صمصامی)

مرضیه خرم^۱ و محمدرضا شریفی^{۲*}

چکیده

استفاده از مدل‌های تخمین رواناب در حوضه‌های برفی، نیازمند شناخت تأثیر عوامل مؤثر بر رواناب ذوب است. دما، یکی از عوامل مزبور است. برای بررسی تأثیر دما بر عملکرد مدل SRM، در زیرحوضه‌ی صمصامی به مساحت ۲۶۶ کیلومتر مربع، اقدام به ارزیابی عملکرد مدل SRM، در ماه‌های مختلف فصل ذوب سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ با استفاده از محصول ماکزیمم پوشش برف هشت روزه (MOD10A2) و شاخص کارایی EI و نسبت اختلاف حجمی D_v ، محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل، طی هر یک از ماه‌های فصل ذوب شامل فوریه، مارس، آوریل و مه، با دامنه‌ی اختلاف دمای حدوداً ۱۵ درجه سانتی‌گراد، عملکرد متفاوتی دارد؛ به گونه‌ای که تفسیر نتایج شبیه‌سازی، منوط به بررسی تغییرات دمایی در طبقات مختلف ارتفاعی است. علاوه بر اینکه استفاده از مدل، در ماه مه، دارای اختلاف حجمی ۴۰ درصد و شاخص کارایی منهای ۰/۵۵ به‌دست آمد. این نتایج در حالی به‌دست آمد که در ماه مارس، با میانگین دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، اختلاف حجمی ۳/۵ درصد و شاخص کارایی ۰/۸۱ به‌دست آمد. از این‌رو، عملکرد مدل SRM با افزایش دما، تقلیل می‌یابد. استفاده از مدل در ماه‌های با میانگین دمای بالاتر و انتهای فصل ذوب، دارای خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: درجه-روز، ذوب برف، شبیه‌ساز رواناب برف، صمصامی.

ارجاع: خرم م. و شریفی م. ر. ۱۳۹۹ ارزیابی عملکرد مدل SRM تحت تأثیر ماه‌های مختلف ذوب برف (مطالعه‌ی موردی: حوزه دوآب صمصامی). مجله پژوهش آب ایران. ۳۶: ۱۰۹-۱۱۷.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲- استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: msharifi@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

مقدمه

شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل SRM قادر به مشخص کردن و تخمین رواناب روزانه در حوضه‌ی مطالعاتی است. هارشبرگر و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل SRM، به بررسی جریان‌های کوتاه‌مدت تا متوسط ۱ تا ۱۵ روزه پرداختند و برای بهینه‌سازی عملکرد مدل SRM و کمک به اجرای آن از حداکثر و حداقل درجه حرارت بحرانی استفاده کردند. مقایسه‌ی این شبیه‌سازی، حاکی از بهبود قابل توجهی در عملکرد مدل بود.

با توجه به اهمیت دما در ذوب برف و نقش اساسی آن در عملکرد نتایج حاصل از مدل SRM، از یکسو و تغییرات میانگین ماهانه دما و تأثیر آن در دقت نتایج مدل SRM (گراتن و ریچرک، ۲۰۰۱)، به نظر می‌رسد، به دلیل تفاوت در دامنه تغییرات دما در ماه‌های مختلف فصل ذوب برف، دقت عملکرد شبیه‌ساز SRM، در ماه‌های مزبور، متفاوت باشد؛ زیرا بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مدل SRM در طول فصل انباشت برف، در مقایسه با فصل ذوب برف، نتایج متفاوتی دارد (ریچارد و گراتن، ۲۰۰۱). همچنین در پژوهش دیگری، عملکرد مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف، در فصل برفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این‌رو، برای هر چه بهتر شدن دقت نتایج کاربردی مدل SRM، و ضرورت بررسی حساسیت مدل مزبور، نسبت به تغییرات دمایی، در تحقیق حاضر، عملکرد مدل SRM در حوضه برفی صمصامی، از زیرحوضه‌های کارون شمالی، در ماه‌های مختلف ذوب برف در محدوده‌ی مورد مطالعه، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مطالعاتی

حوضه‌ی دوآب صمصامی با مساحتی بالغ بر ۲۶۶ کیلومتر مربع در حد فاصل طول ۵۰ درجه، ۱۰ دقیقه و ۲/۲ ثانیه تا ۵۰ درجه، ۲۶ دقیقه و ۱۷/۶ ثانیه شرقی و عرض ۳۲ درجه، ۵ دقیقه و ۱۶/۵ ثانیه تا ۳۲ درجه، ۱۵ دقیقه و ۱ ثانیه شمالی واقع شده است. این حوضه، یکی از زیرحوضه‌های کارون شمالی در استان چهارمحال و بختیاری با میانگین بارندگی سالیانه ۱۱۷۵ میلی‌متر است. ۶۱ درصد بارندگی مزبور، برف و ۳۹ درصد آن باران است. به دلیل ریزش قابل توجهی از برف در سطح این حوضه، چشمه‌های کوچک و بزرگ دائمی و فصلی زیادی در آن جاری است. از مهم‌ترین آن‌ها، چشمه دزداران و چشمه

رواناب ناشی از ذوب برف، در حوضه‌های برفی، عاملی مهم در تغییرات رژیم جریان به شمار می‌آید. به دلیل پیچیدگی‌های عملکرد برخی از ویژگی‌های برفی شامل عمق، چگالی، تأخیر زمانی بین دوران انباشت برف و ذوب آن، بر رواناب حاصل از ذوب برف، به کارگیری مدل‌های بارش-رواناب در مناطق برفی، از ویژگی‌های خاصی برخوردار هستند؛ به طوری که استفاده‌ی دقیق از مدل‌های مزبور، نیازمند شناخت کمی و کیفی تأثیر عوامل مؤثر بر ذوب و رواناب حاصل از آن است. از جمله‌ی این عوامل، درجه حرارت یا دماست. یامازاکی و کندو (۱۹۹۲)، ذوب برف را با روش بیلان انرژی بررسی کردند و تأثیر کمی دمای هوا بر ذوب برف را نشان دادند. همچنین، نیل و فیتزهاریس (۱۹۹۷)، با محاسبه‌ی ذوب برف به روش بیلان انرژی، نشان دادند که گرمای تابشی سهم عمده‌ای بر ذوب برف دارد. دما علاوه بر اهمیتش به عنوان یک عامل مؤثر بر ذوب برف، در برخی از رویکردهای محاسبه‌ی ذوب برف، نقش کلیدی را ایفا می‌کند. برای نمونه در رویکرد درجه-روز به عنوان یکی از رویکردهای توسعه‌یافته برای تعیین میزان ذوب (رانگو و مارتینک، ۱۹۹۵)، عامل دما، علاوه بر نقش عاملیت، به دلیل تأثیر بر مقدار ضریب ذوب برف^۱ و بیان ویژگی‌های برف انباشته، نقش کلیدی را نیز در روش درجه-روز دارد (هوک، ۲۰۰۳؛ دبل و همکاران، ۲۰۱۰). به عبارت دیگر، تغییرات دمایی، در رویکرد درجه-روز، به طور مستقیم در رابطه‌ی تعیین آب به دست آمده از ذوب برف، دخالت می‌کند.

از سویی دیگر، توسعه‌ی هر یک از مدل‌های برآورد رواناب حاصل از ذوب برف، مبتنی بر یکی از رویکردهای تعیین ذوب برف، شامل بیلان انرژی^۲، درجه-روز Degree - Day و تابش-دما، است؛ به این معنی که شبیه‌سازهای ذوب برف، هر یک با توسل به یکی از رویکردهای مزبور، اقدام به برآورد ذوب می‌کنند. به عنوان نمونه، مدل SRM به عنوان یکی از مدل‌های رایج در تعیین رواناب حاصل از ذوب برف، مبتنی بر رویکرد درجه-روز، توسعه‌یافته است. دار و رامشو (۲۰۱۲)، با کمک مدل SRM، به تعیین آب معادل ذوب برف پرداختند. فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، رواناب حاصل از ذوب برف را با استفاده از مدل SRM

1- Snowmelt index
2- Energy balance

حوضه‌ی مطالعاتی دارای ایستگاه هواشناسی دوآب صمصامی و ایستگاه هیدرومتری صفاآباد واقع در نقطه‌ی خروجی حوضه است. حوضه ایستگاه برف‌سنجی ندارد؛ به همین دلیل از آمار ایستگاه سینوپتیک کوه‌رنگ، نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به حوضه‌ی دوآب صمصامی، کمک گرفته شد. موقعیت حوضه در شکل ۱ آورده شده است.

کوفی را می‌توان نام برد. این چشمه‌ها از آبدهی نسبتاً زیادی برخوردارند و منشأ تشکیل دو رودخانه به این دو نام شده‌اند. از به هم پیوستن این دو رودخانه در موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه، ۱۷ دقیقه و ۱۵ ثانیه طول شرقی و ۳۲ درجه، ۱۰ دقیقه و ۱۴/۱ ثانیه عرض شمالی در مجاورت روستای صمصامی در تراز ارتفاعی ۱۹۹۳ متر از سطح دریا، رودخانه دو آب صمصامی تشکیل می‌شود.



شکل ۱- موقعیت حوضه دوآب صمصامی و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی و رودخانه دوآب صمصامی در نقشه ایران

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

Q_i ، دبی اندازه‌گیری شده‌ی روزانه؛ Q'_i ، دبی محاسبه شده‌ی روزانه؛ \bar{Q} ، متوسط دبی اندازه‌گیری شده در سال مورد نظر یا فصل ذوب و n تعداد روزهای دارای اندازه‌گیری است. شاخص کارایی تطابق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی یک پارامتر داده‌شده را به عنوان نسبت کل دامنه این پارامتر در داده‌ها اندازه‌گیری می‌کند. هر قدر مقدار EI بالاتر باشد، عملکرد مدل بهتر است (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰). درصد اختلاف حجمی از معادله‌ی (۳) به دست می‌آید:

$$D_v [\%] = \frac{V_R - V'_R}{V_R} * 100 \quad (3)$$

که در آن: V_R ، حجم سالانه رواناب اندازه‌گیری شده؛ V'_R ، حجم سالانه یا فصلی رواناب محاسبه شده است.

مدل SRM

مدل شبیه‌سازی رواناب ذوب برف تحت ویندوز WinSRM ویرایشی از مدل SRM است. در مدل SRM رواناب حاصل از ذوب برف و باران، از معادله‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

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

که در آن: Q ، متوسط دبی روزانه به متر مکعب بر ثانیه؛ C_s ، ضریب رواناب برف؛ C_R ، ضریب رواناب باران؛ a ، ضریب ذوب برف [$cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$]; T ، تعداد درجه-روز [$^\circ C \cdot d$]; ΔT ، تعدیل درجه حرارت [$^\circ C \cdot d$]; S ، نسبت سطح پوشش برف به مساحت حوضه؛ P ، باران [cm]; A ، مساحت حوضه [km^2]; k ، ضریب فروکش است.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی نتایج SRM، از دو معیار شاخص کارایی Efficiency Index و تفاضل حجمی Volume Difference که به ترتیب توسط معادلات (۲) و (۳) ارائه می‌شوند، استفاده شده است (قربانی‌زاده خرازی و پرهت، ۱۳۸۹).

اطلاعات ورودی مدل SRM

هیپسومتری حوضه

با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰.۱ و مدل ارتفاعی رقومی تهیه‌شده، مرز حوضه با توجه به نقطه‌ی خروجی حوضه در ایستگاه هیدرومتری صفآباد و نیز توزیع ارتفاعی، تحت عنوان هیپسومتری حوضه تعیین می‌شود.

متغیرهای مدل SRM

سطح پوشش برف

مدل SRM، تغییرات پوشش برف را به صورت منحنی‌های فروکش پوشش برف که نمایانگر تغییرات درصد پوشش برف در منطقه در برابر زمان است، دریافت می‌کند. استخراج پوشش برف حوضه دواب صمصامی تا ایستگاه هیدرومتری صفآباد، از محصول ماکزیمم پوشش برف هشت روزه (MOD10A2) به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار ENVI پردازش شد و در نرم‌افزار ArcGIS مدل رقومی، ترکیب و منحنی‌های سطح پوشش برف تهیه شد. تعیین فصل ذوب برف با کمک منحنی‌های سطح پوشش برف انجام شد. برای تعیین آغاز فصل ذوب برف، تغییرات سطح پوشش برفی بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۶ در حوزه دواب صمصامی مورد بررسی قرار گرفت. نیمه‌ی اول ماه فوریه منحنی شروع به فروکش کرد و تا اواخر ماه مه برف به اتمام می‌رسد. از این‌رو شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف برای فاصله زمانی فوریه تا سپتامبر ۲۰۱۵ برای واسنجی ضرایب حوضه‌ی دواب صمصامی صورت گرفت.

درجه‌ی حرارت

درجه‌ی حرارت در مدل SRM به صورت متوسط روزانه متناظر با ارتفاع متوسط نواحی ارتفاعی مورد نیاز است (مارتینک و همکاران، ۱۹۹۸). از این‌رو، میانگین روزانه‌ی دما در ایستگاه هواشناسی دواب صمصامی به وسیله‌ی گرادیان دما به متوسط ارتفاع هیپسومتریک هر طبقه منتقل شد و مقدار دما با استفاده از معادله‌ی (۴) در هر یک از طبقات A، B، C، D و E به دست آمد.

$$\Delta T = \gamma \cdot (h_{st} - \bar{h}) \cdot \frac{1}{100} \quad (4)$$

γ ، افتاهنگ درجه‌ی حرارت (درجه سانتی‌گراد در هر ۱۰۰ متر)؛ h_{st} ، ارتفاع ایستگاه هواشناسی مینا (متر) است.

بارش

در این تحقیق با استناد به راهنمای مدل SRM، بارش روزانه ایستگاه هواشناسی دواب صمصامی با گرادیان ۴ درصد به ازای هر ۱۰۰ متر ارتفاع، به طبقات ارتفاعی منتقل و وارد مدل شد.

دبی

مدل SRM به منظور تعیین مقدار دبی اولیه برای شبیه‌سازی جریان روزانه، تعیین ضریب فروکش و همچنین واسنجی پارامترهای مدل و ارزیابی عملکرد مدل، به اطلاعات دبی روزانه در محل خروجی حوضه مورد نظر، نیاز دارد. در این مطالعه از داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی سطح آب روزانه ایستگاه هیدرومتری صفآباد در خروجی حوضه طی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ و تبدیل آنها به دبی، برای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد.

پارامترهای مدل SRM

ضریب رواناب (C)

ضریب رواناب برف C_s و باران C_r حوضه با استفاده از مقادیر تجربی به دست آمده توسط مارتینک و رانگو (۱۹۸۶)، به ازای ماه‌های مختلف، به عنوان تخمین اولیه و سپس با کمک سعی و خطا در مرحله واسنجی، تعیین شدند

ضریب ذوب برف

ضریب ذوب برف، ارتفاع معادل ذوب ناشی از یک درجه-روز است و به شکل معادله‌ی (۵) بیان می‌شود:

$$M = a \cdot T \quad (5)$$

که در آن: M ، ارتفاع ذوب برف روزانه (cm)؛ a ، ضریب درجه-روز $(cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1})$ ؛ و T ، تعداد درجه-روز $(^\circ C \cdot d)$ است. مارتینک (۱۹۶۰) معادله‌ی (۶) را برای تغییر ضریب ذوب برف در اثر تغییرات فصلی چگالی برف پشته ارائه کرد:

$$a = 1.1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (6)$$

که در آن ρ_s ، چگالی برف پشته $(kg \cdot m^{-3})$ ؛ و ρ_w ، چگالی آب مایع $(kg \cdot m^{-3})$ است. چگالی برف بر اساس نتایج شریفی (۱۳۸۶)، ۰/۴۶۵ در نظر گرفته شد. از این‌رو، فاکتور درجه-روز با توجه به فرمول تجربی (۶)، ۰/۵۱

واسنجی مدل SRM

شکل ۲، با شاخص کارایی ۰/۸۲ و اختلاف حجمی ۱۳/۵ درصد (جدول ۲)، نتایج واسنجی شبیه‌سازی جریان را در دوره‌ی فصل ذوب برف در سال آبی ۲۰۱۵ نمایش داده است.

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، از ۲۹ بهمن تا ۸ اسفند، شروع فصل ذوب، در رواناب شبیه‌سازی‌شده، افت مشاهده می‌شود. این در حالی است که در بازه‌ی مزبور در همان شکل، افزایش دبی مشاهده‌ای و در شکل شماره ۳ الف و ب، بارش و افزایش دما قابل مشاهده است. علت اختلاف مزبور، اثر تأخیری جریان خروجی ناشی از رسیده‌شدن برف است. از ۲۷ فوریه به بعد، ادامه وقوع بارش و افزایش درجه‌حرارت، سبب افزایش جریان شبیه‌سازی‌شده است؛ ولی همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از جریان اندازه‌گیری‌شده، مجدداً کمتر است. وجود چشمه‌های متعدد و جریان‌های زیرزمینی درون حوضه، سبب به‌وجودآمدن اختلاف حجمی است. این در حالی است که دبی‌های پیک در مقادیر شبیه‌سازی‌شده، و همچنین نوسانات دبی، به خوبی نمایش داده شده است. از این‌رو، با اتکا به نتایج بارش و دما، قابلیت شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب توسط مدل SRM قابل ملاحظه است.

صحت‌سنجی مدل SRM

شکل ۴، نتایج صحت‌سنجی مدل SRM را در فصل ذوب برف (از ابتدای فوریه تا انتهای سپتامبر سال آبی ۲۰۱۶) با شاخص کارایی ۰/۸۲ و درصد اختلاف حجمی ۲۷/۱ نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، در طول فصل ذوب یکسان نیست؛ به طوری که در برخی ماه‌ها بیشتر و در برخی از ماه‌ها کمتر است. با توجه به این نکته، می‌توان گفت عملکرد مدل در ماه‌های مختلف ذوب شامل فوریه، مارس، آوریل و مه، متفاوت است. از این‌رو، در هر یک از ماه‌های مزبور مدل اجرا شد. جدول ۱، مقادیر شاخص‌های کارایی و اختلاف حجمی به‌دست‌آمده از مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده را به ازای هر یک از ماه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

محاسبه شد. سپس از نتایج مارتینک و رانگو (۱۹۸۶)، درباره تغییرات ماهانه ضریب ذوب برف استفاده شد.

افتاهنگ درجه حرارت (۴)

از گرادیان درجه حرارت برای انتقال درجه حرارت از ایستگاه مبنا به هر یک از طبقات ارتفاعی استفاده شد (مارتینک و همکاران، ۲۰۰۸). مقدار گرادیان ۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد به ازای هر ۱۰۰ متر ارتفاع، در نظر گرفته شد.

درجه حرارت بحرانی (T_{CRIT})

درجه حرارت بحرانی برای تفکیک باران از برف به‌کار می‌رود. اگر $T_{CRIT} > T$ بارش به‌صورت باران و اگر $T_{CRIT} < T$ به‌صورت برف است. در تحقیق حاضر، درجه حرارت بحرانی ۲/۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

ضریب فروکش (k)

با استفاده از روش ترسیم مقادیر دبی روز در مقابل مقادیر دبی روز قبل، در مواقع فروکشی جریان، در مختصات دو لگاریتمی، مقدار k با استفاده از معادله‌ی $k = \frac{Q_{n+1}}{Q_n}$ محاسبه می‌شود. در تحقیق حاضر، دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری صفآباد هر روز در برابر دبی روز بعد، از اول ماه ژوئن تا آخر ماه سپتامبر، در دو سال آبی ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، به‌صورت متوالی در مختصات لگاریتمی رسم شد. سپس با مشخص‌شدن منحنی پوش، مقادیر x و y در معادله‌ی (۷)، تعیین و ضریب فروکشی، محاسبه شد:

$$K_{n+1} = x(Q_n)^{-y} \quad (7)$$

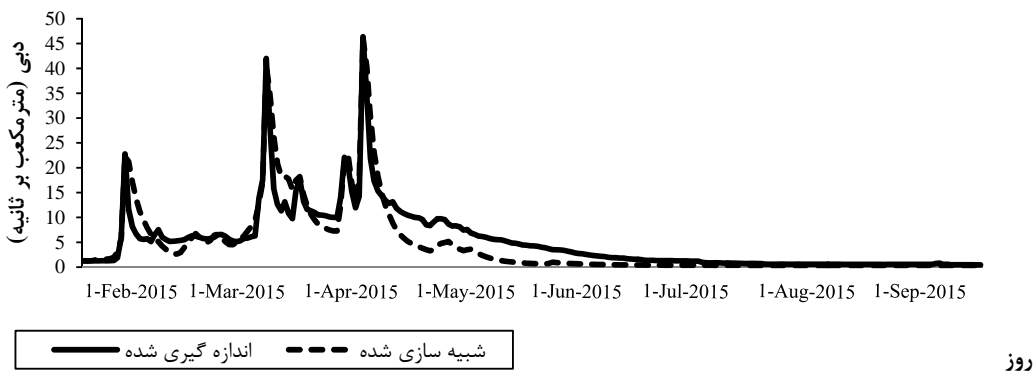
زمان تأخیر L

زمان تأخیر با عقب‌نشینی خط برف افزایش پیدا می‌کند. زمان تأخیر با توجه به وسعت کم حوضه دوآب صمصامی، ۶ ساعت در نظر گرفته شد.

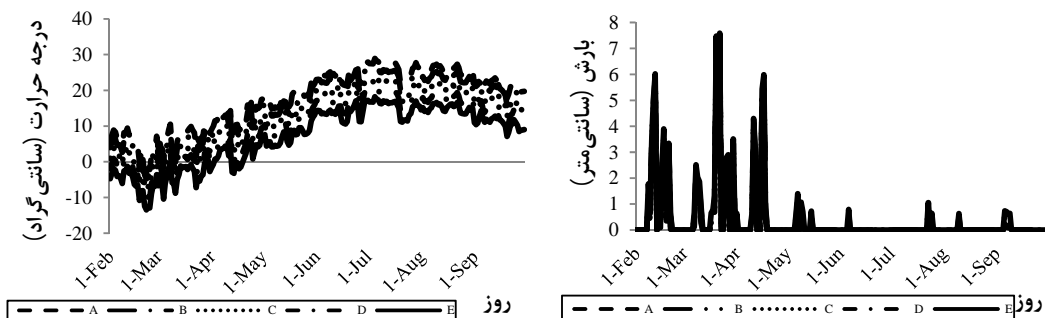
نتایج و بحث

هیپسومتری

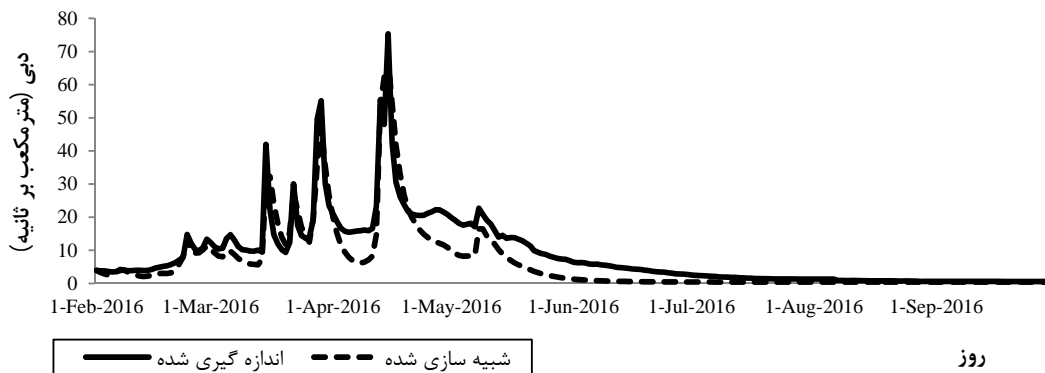
بر اساس نتایج هیپسومتری، کمترین و بیشترین ارتفاع حوضه به‌ترتیب، ۱۸۱۱ متر و ۳۸۷۵ متر است. حوضه با توجه به دامنه ارتفاعی زیاد و بنا به راهنمای مدل SRM به ۵ منطقه ارتفاعی با بازه‌های ارتفاعی ۵۰۰ متر تقسیم شد.



شکل ۲- مقایسه دبی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در دوره‌ی واسنجی (از ابتدای ماه فوریه تا انتهای ماه سپتامبر)



شکل ۳- (الف) بارش روزانه (ب) میانگین درجه‌حرارت روزانه در طبقات ارتفاعی A, B, C, D و E در فصل ذوب برف ایستگاه دوآب صمصامی، سال آبی ۲۰۱۵



شکل ۴- مقایسه دبی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در دوره صحت‌سنجی (از ابتدای فوریه تا انتهای سپتامبر سال آبی ۲۰۱۶)

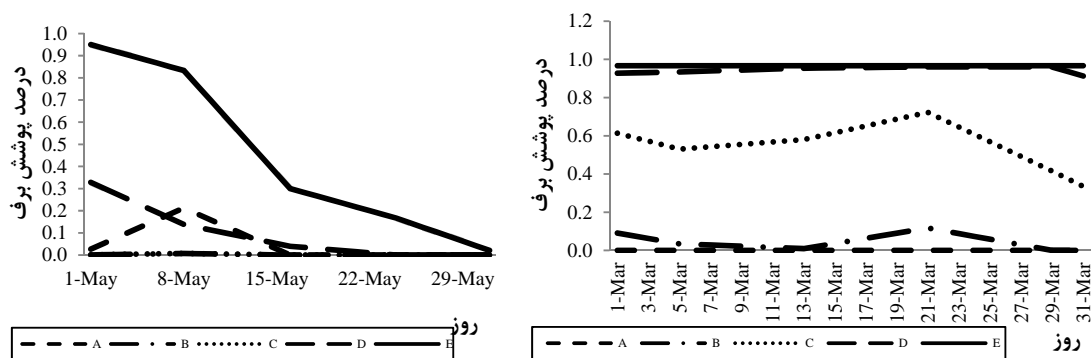
جدول ۱- مقایسه‌ی ملاک‌های آماری شبیه‌سازی هر یک از ماه‌های فوریه، مارس، آوریل، مه

| پارامتر | فوریه | مارس | آوریل | مه |
|---|-------|------|-------|-------|
| حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده (میلیون متر مکعب) | ۱۵/۲ | ۴۷/۲ | ۶۴/۱ | ۳۶/۸ |
| حجم رواناب شبیه‌سازی‌شده (میلیون متر مکعب) | ۱۲/۶ | ۴۵/۵ | ۵۵/۲ | ۲۲ |
| دبی متوسط اندازه‌گیری‌شده (متر مکعب بر ثانیه) | ۶/۱ | ۱۷/۶ | ۲۴/۷ | ۱۳/۷ |
| دبی متوسط شبیه‌سازی‌شده (متر مکعب بر ثانیه) | ۵ | ۱۷ | ۲۱/۳ | ۸/۲ |
| اختلاف حجمی (درصد) | ۱۷/۱ | ۳/۵ | ۱۴ | ۴۰ |
| شاخص کارایی | ۰/۸۳ | ۰/۸۱ | ۰/۶۶ | -۰/۵۵ |

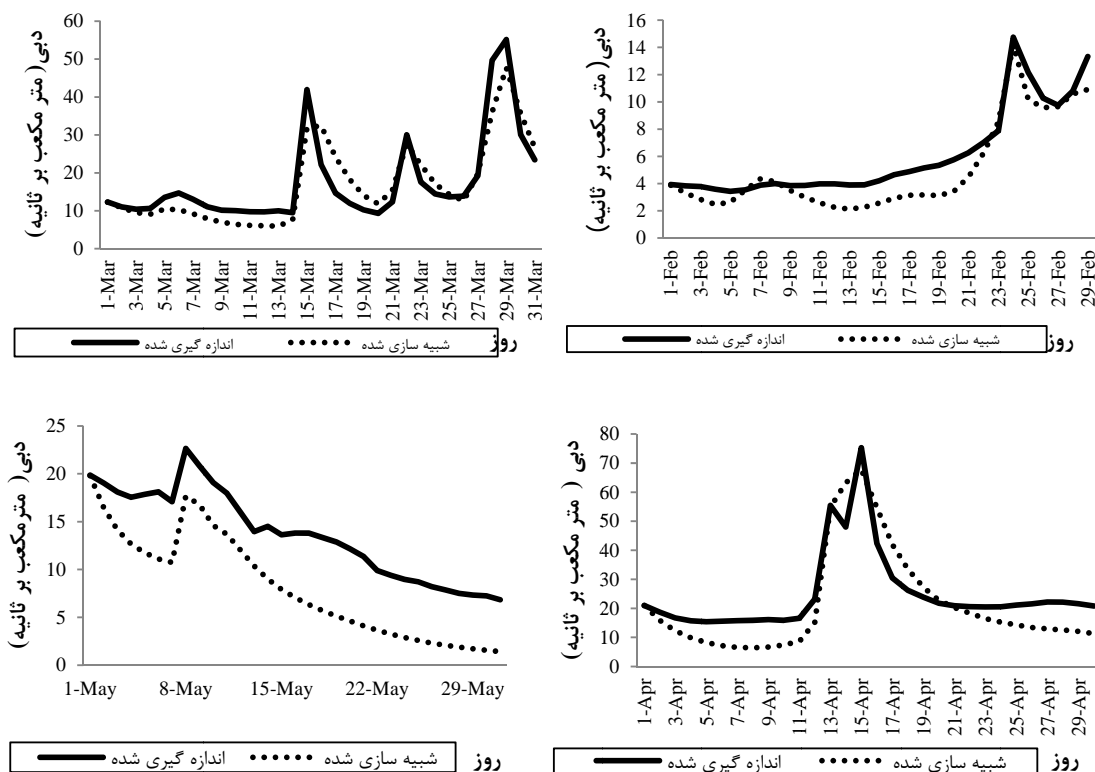
کامل برف در ارتفاعات بالا، و همچنین جاری شدن چشمه‌ها و عدم قابلیت مدل در شبیه‌سازی جریان چشمه‌ها، مقادیر شبیه‌سازی، کمتر از مشاهده‌ای ملاحظه شد. از این‌رو، اثر افزایش دما در عملکرد مدل SRM تأیید می‌شود. شکل ۷- الف، میانگین دمای ماهانه چهار ماه مورد مطالعه را در قالب نموداری نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، اختلاف بین آخرین ماه ذوب (مه) و اولین ماه آن، حدوداً ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. اختلاف مزبور در ماه‌های مزبور، با تأثیری که بر توده‌ی برف انباشته می‌گذارد، سبب رسیده‌شدن برف می‌شود. از طرفی، رسیده‌شدن برف، موجب تأخیر در رواناب حاصل از ذوب و در نتیجه اختلاف بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده می‌شود و از طرفی، چون پدیده‌ی رسیدگی توده‌ی برف مستقیماً با دما در ارتباط است، از این‌رو، می‌توان گفت عملکرد مدل SRM با افزایش دما، متناسب با سپری‌شدن فصل ذوب، تقلیل می‌یابد. این نکته را می‌توان در شکل ۷- ب مشاهده کرد. بدین ترتیب که در امتداد ماه‌های ذوب، شاخص اختلاف حجمی، به‌عنوان یکی از ملاک‌های مهم ارزیابی مدل SRM، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است بیشتر بودن مقادیر دبی مشاهده‌ای، در مقایسه با رواناب شبیه‌سازی‌شده، به علت وجود چشمه‌های فراوانی است که در محدوده‌ی مورد مطالعه وجود دارند.

نتایج مندرج در جدول ۱ نشان می‌دهد که ماه مارس، با کمترین درصد اختلاف حجمی معادل با ۳/۵ درصد و شاخص کارایی ۰/۸۱ و همچنین با درصد قابل توجه پوشش برفی در این ماه شکل ۵- الف، بهترین عملکرد شبیه‌سازی ذوب برف محدوده مورد مطالعه توسط مدل SRM را دارا بوده است. این در حالی است که در انتهای فصل ذوب، یعنی در ماه مه، با بیشترین درصد اختلاف حجمی معادل با ۴۰ درصد و کمترین کارایی برابر با ۰/۵۵، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. لازم به ذکر است که مطابق با شکل ۵- ب، سطح پوشش برفی محدوده‌ی مورد مطالعه در ماه مه، در طبقه ارتفاعی E به میزان ۳۰ درصد، هنوز وجود دارد. برای مقایسه‌ی عملکرد SRM در ماه‌های مختلف، همچنین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای دبی به تفکیک هر یک از ماه‌های فوریه، مارس، آوریل و مه، در شکل ۶ آورده شده است.

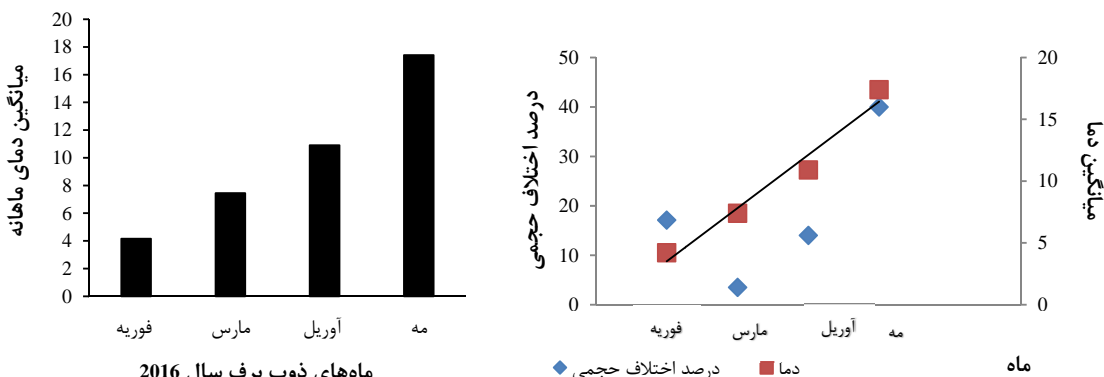
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با وجود اختلاف‌های بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای در هر یک از ماه‌ها که با توجه به چگونگی تغییرات زمانی و مکانی سطح پوشش برفی، دما و بارش، توجیه می‌شوند، انطباق مقادیر شبیه‌سازی‌شده با رواناب مشاهده‌ای، در ماه‌های مختلف در مقایسه با یکدیگر متفاوت است؛ به طوری که در ماه مارس، بهترین انطباق و در ماه مه، کمترین انطباق مشاهده می‌شود. در ماه مه به علت افزایش دما و ذوب



شکل ۵- تغییرات سطح پوشش برفی در طبقات مختلف ارتفاعی محدوده مورد مطالعه (الف) ماه مارس (ب) ماه مه



شکل ۶- مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده با دبی مشاهده‌ای در هر یک از ماه‌های فصل ذوب ۹۵-۹۴ (الف) فوریه (ب) مارس (ج) آوریل (د) مه



شکل ۷- (الف) تغییرات میانگین دمای ماهانه (ب) مقادیر شاخص اختلاف حجمی عملکرد مدل SRM، در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل و مه

نتیجه‌گیری

نظر، منوط به بررسی تغییرات دمایی در طبقات مختلف ارتفاعی است. علاوه بر اینکه استفاده از مدل مزبور برای تخمین رواناب در حوضه‌ی برفی، در انتهای فصل ذوب و متناسب با ازدیاد دما و کاهش سطح پوشش برفی، مستلزم تمهیدات بیشتری برای نزدیک‌ساختن نتایج شبیه‌سازی به مقادیر واقعی است؛ زیرا اختلاف مشاهده‌شده بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در ماه مه، انتهای فصل ذوب، به حدی بود که ملاک اختلاف حجمی را تا مقدار ۴۰

مطابق با نتایج دیگر محققان نظیر فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، ریچار و گراتن (۲۰۰۱)، در تحقیق حاضر مشخص شد که دما، به علت تأثیری که بر ماهیت برف انباشته دارد و از طرفی، به دلیل نحوه‌ی استفاده از آن در مبنای محاسباتی به‌کار رفته در مدل SRM، تأثیر زیادی در تفسیر نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل SRM دارد؛ به گونه‌ای که استفاده و تفسیر نتایج شبیه‌سازی مدل مورد

نشریه مهندسی آب. ۱(۱): ۴۳-۵۲.

4. Dar R. A. and Ramshoo S. A. 2012. Estimating Daily Stream Flow in the Glacierized Mountainous Kashmir Himalayan Basin. *Journal of Research and Development*. 12: 113-130.
5. Debele B. Srinivasan R. and Gosain A. K. 2010. Comparison of process-based and temperature-index snowmelt modeling in SWAT. *Water Resource Management*. 24: 1065-1088.
6. Harshburger B. J. Humes K. S. Walden V. P. Moore B. C. Blandford T. R. and Rango A. 2010. Evaluation of Short-to-Medium Range Streamflow Forecasts Obtained Using an Enhanced Version of SRM1. *Journal of the American Water Resources Association*. 46(3): 603-617.
7. Hoke R. T. 2003. Temperature index snowmelt modeling in mountain areas. *Journal of Hydrology*. 282: 104-114-5.
8. Martinec J. Rango A. and Roberts R. 2008. *Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual*. College of Agriculture and Home Economics. NM State University. 180 p.
9. Martinec J. Rango A. Roberts R. and Baumgartner M. F. 1998. *Snowmelt runoff model (SRM) user's manual*. University of Berne. Department of Geography.
10. Martinec J. and Rango A. 1986. Parameter values for snowmelt runoff modelling. *Journal of Hydrology*. 84(3-4): 197-219.
11. Martinec J. 1960. The degree-day factor for snowmelt runoff forecasting. *IUGG General Assembly of Helsinki, IAHS Commission of Surface Waters*. 468-477.
12. Nash J. E. and Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282-290.
13. Neals S. M. and Fitzharris B. B. 1997. Energy balance and synoptic climatology of a melting snowpack in the southern Alps. *climate*. New Zealan. 17 p.
14. Rango A. and Martinec J. 1995. Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. *Journal of the American Water Resources Association*. 31: 657-669.
15. Richard C. and Gratton D. J. 2001. The importance of the air temperature variable for the snowmelt runoff modelling using the SRM. *Hydrological Processes*. 15(18): 3357-3370.
16. Yamazaki T. and Kondo J. 1992. The snowmelt and heat balance in snow-covered forested areas. *Applied Meteorology*. 31: 1322-1327.

درصد افزایش داد و سبب کاهش کارایی به مقدار منهای ۰/۵۵ شد. این نتایج در حالی به دست آمد که در ماه مارس، دومین ماه ذوب، با میانگین دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، مقدار اختلاف حجمی با ۳/۵ درصد کاهش و شاخص کارایی به ۰/۸۱ افزایش یافت. از این‌رو، به واسطه نتایج بسیار خوب مدل SRM، در ماه مارس، می‌توان از نتایج شبیه‌سازی آن، با قابلیت قابل قبولی برای برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌ی مورد مطالعه استفاده کرد. اما استفاده از مدل در ماه‌های با میانگین دمای بالاتر و انتهای فصل ذوب، که به علت دگرگونی ساختار برف، دارای خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی است، برای تخمین رواناب خروجی حوضه برفی، باید توجه بیشتری به نقش چشمه‌ها و اصلاحات لازم در نتایج شبیه‌سازی شود.

سیاس‌گذاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN:SCU.WH98.26878) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از جناب آقای مهندس روانبخش رئیس‌انست علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری به سبب همکاری در جمع‌آوری اطلاعات مشاهده‌ای مورد استفاده در تحقیق حاضر، کمال تشکر و سپاس را دارد.

منابع

۱. شریفی م. ر. ۱۳۸۶. بررسی توزیع مکانی آب معادل برف با استفاده از روش‌های ترکیبی. پایان‌نامه دکتري. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۲۷ ص.
۲. فتاحی ا. دلاورم. و قاسمی ا. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM (مطالعه موردی: حوضه آبریز بازفت). نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۰(۲۳): ۱۲۹-۱۴۱.
۳. قربانی‌زاده خرازی ح. صدقی ح. ثقفیان ب. و پرهت ج. ۱۳۸۹. پیش‌بینی توزیع زمانی جریان رواناب ناشی از ذوب برف در نیم قرن آینده تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه کارون).

