

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۵، زمستان ۱۳۹۴، صص ۱۱۷-۱۰۱

وصول مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۵

مقایسه مدل‌های SRM و HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب

ناشی از ذوب برف حوضه آبریز شهرچای ارومیه

سعید جهانبخش اصل^۱

یعقوب دین‌پژوه^۲

محمدحسین عالی‌نژاد^{۳*}

چکیده

هدف این مطالعه، شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه شهرچای، با استفاده از دو مدل SRM و HEC-HMS است. بدین منظور، ابتدا با وارد کردن داده‌های پوشش برف، متغیرهای هواشناختی و پارامترهای لازم به مدل SRM، رواناب ناشی از ذوب برف شبیه‌سازی شد. در مدل HEC-HMS نیز پس از ایجاد مدل حوضه با نرم‌افزار HEC-GeoHMS در محیط GIS و ایجاد مدل هواشناختی و وارد کردن پارامترهای لازم مانند تلفات، روندیابی و ذوب برف شبیه‌سازی انجام شد. ضریب تعیین (R^2) مدل SRM معادل ۰/۹ و درصد خطای حجمی آن (D_V) ۱/۹۶ به دست آمد. از طرفی مدل HEC-HMS نیز با دقت رضایت‌بخش (ولی کمتر از SRM) شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف را انجام داد. به طوری که ضریب تعیین (R^2) آن ۰/۸۵ و درصد خطای حجمی آن (D_V) ۲/۱ درصد به دست آمد. صرف نظر از دقت بالای مدل SRM یکی از نقاط قوت مدل HEC-HMS، استفاده از داده‌های دما و بارش است؛ در صورتی که مدل SRM علاوه بر این پارامترها نیازمند داده‌های مساحت سطح پوشش برف است که از تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید. نتایج نشان داد که مقدار کل رواناب در منطقه‌ی مورد مطالعه با مدل SRM، معادل $۱۲۹/۹ \times ۱۰^۶$ متر مکعب بود. در حالی که این رقم با مدل HEC-HMS معادل با $۱۲۹/۶ \times ۱۰^۶$ متر مکعب به دست آمد. با مقایسه این ارقام با مقدار مشاهداتی (یعنی $۱۳۲/۴ \times ۱۰^۶$ متر مکعب) می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مدل SRM در مقایسه با مدل HEC-HMS نسبتاً خوب است.

واژه‌های کلیدی: برف، سنجش از دور؛ HEC-HMS، SRM؛ شهرچای.

۱- استاد گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول).

مقدمه

برف یکی از اشکال بارش است که به دلیل طبیعت ایجاد تأخیر در تبدیل آن به رواناب، تفاوت خاصی با سایر مؤلفه‌های بیلان آب دارد. پوشش برفی در یک حوضه بر بیلان آب و انرژی آن حوضه اثر می‌گذارد، بنابراین، عامل مهمی در تغییرات آب و هوایی یک منطقه محسوب می‌شود. تعیین تغییرات زمانی ذوب برف و آب معادل برف برای پیش‌بینی سیلاب، مدیریت مخازن و کشاورزی یک منطقه بسیار حایز اهمیت است (کارآموز 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^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ به منظور شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوچک کوهستانی ارائه شد (رانگو و مارتینک^۲، ۱۹۹۸: ۳). مالچر^۳ و هیدینگر^۴ (۲۰۰۱)، با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی مودیس سطح پوشش برف چهار زیرحوضه از حوضه‌ی اتزال در شرق اتریش را به دست آورده و با استفاده از مدل SRM رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کردند. سیدل^۵ و مارتینک^۶ (۲۰۰۲) از مدل SRM جهت شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در ارتفاعات آلپ سوئیس استفاده و رواناب ذوب برف را با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست، اسپات و نووا برای ۱۳ زیرحوضه محاسبه کردند. هارشبرگر و همکاران^۷ (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل SRM، داده‌های برف سنجنده‌ی مودیس و اطلاعات ایستگاه‌های تله‌متری برف در حوضه‌های کوهستانی غرب ایالات متحده، به بررسی جریان‌های کوتاه مدت تا متوسط (۱ تا ۱۵ روزه) پرداختند و به منظور 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. نتایج نشان‌گر عملکرد رضایت‌بخش مدل بود. در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی حوضه‌ی آبریز رودخانه تونگا در هند که توسط مینو و همکاران (۲۰۱۲) انجام گرفت، برای شبیه‌سازی رواناب از مدل HEC-HMS استفاده شد. وردهن و همکاران^۸ (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در یکی از زیرحوضه‌های هیمالیا را با استفاده از شاخص دما و تجزیه و تحلیل فضایی و زمانی پارامترهای

1- Snowmelt Runoff Model
 2- Rango & Martinec
 3- Malcher
 4- Heidinger
 5- Seidel
 6- Martinec
 7- Harshbarger et al.,
 8- Verdhen et al.,

مدل بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی با ضریب تعیین ۰/۷ رضایت‌بخش بود، همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل HEC-HMS حساسیت زیادی به پارامتر تابع میزان ذوب سرد^۱ دارد.

نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳)، تغییرات سطح پوشش برف در یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز زاینده‌رود (پلاسجان) را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نووا در دو سال زراعی ۷۲-۱۳۷۰ استخراج کردند، این پژوهشگران همچنین برای شبیه‌سازی رواناب از مدل SRM استفاده کردند؛ به طوری که مدل، دبی جریان روزانه را با ضریب تعیین ۰/۹۵ شبیه‌سازی کرد. کاراندیش و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای رواناب ناشی از ذوب برف را با مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کرده و نتیجه گرفتند مدل مذکور قابلیت بالایی در تفکیک رواناب برف از باران دارد. فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌ی آبریز بازفت از تصاویر ماهواره‌ای ۸ روزه‌ی مودیس و مدل SRM استفاده کردند. نتایج کاربرد مدل، شبیه‌سازی موفق و قابل قبولی را نشان داد. یعقوبی و مساح بوانی (۱۳۹۲) به تحلیل حساسیت و عملکرد سه مدل هیدرولوژیکی IHARCES، HIV و HEC-HMS در شبیه‌سازی پیوسته پرداختند، در این بررسی پارامترهای مربوط به روش تلفات SMA در مدل HEC-HMS به عنوان پارامترهای حساس معرفی شدند.

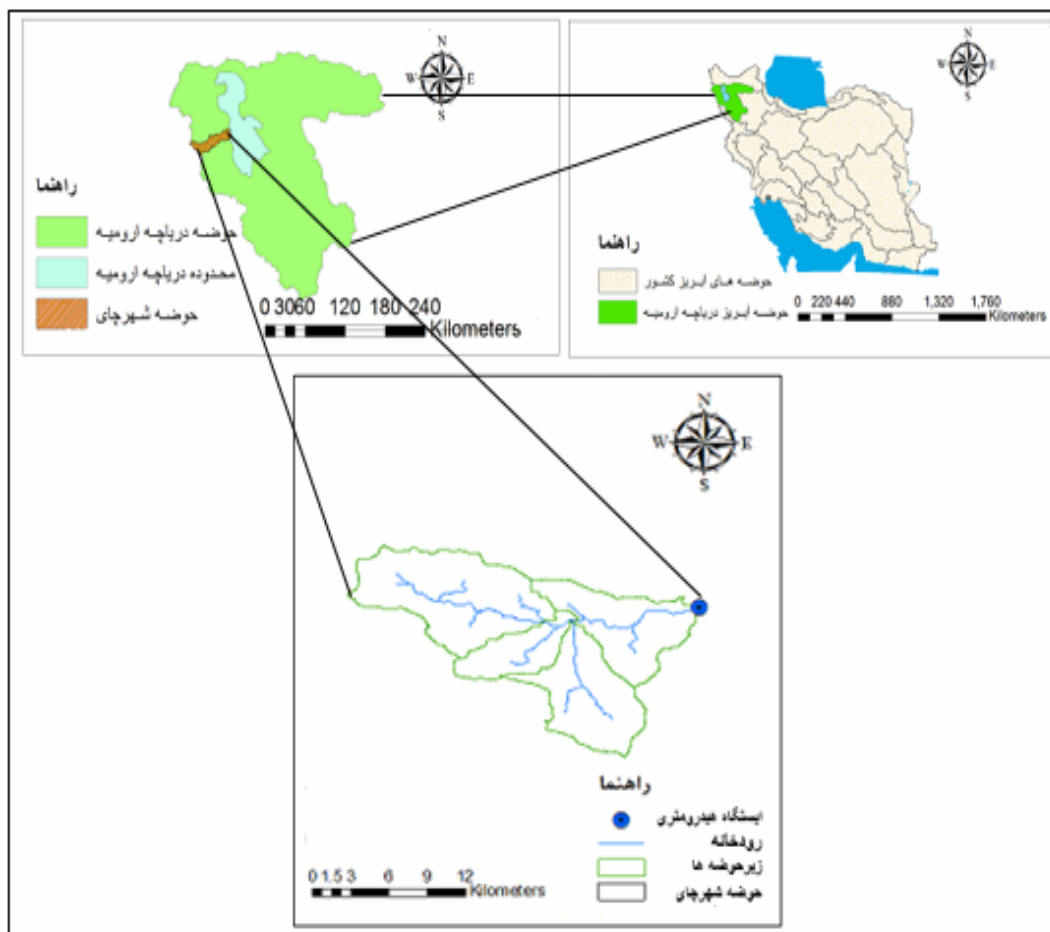
رودخانه‌ی شهرچای در استان آذربایجان غربی جریان دارد. این رودخانه مهم‌ترین منبع تأمین آب ارومیه است و از مرکز این شهر می‌گذرد. سد شهرچای در ۱۲ کیلومتری بالادست این شهر و بر روی این رودخانه احداث شده و نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز شهری، کشاورزی و صنعت منطقه ایفا می‌کند. آگاهی از میزان رواناب حاصل از ذوب برف (به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب این سد در فصل ذوب) برای برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت منابع آب منطقه ضرورت دارد. با توجه به اینکه جریان این رودخانه نقش حیاتی در کشاورزی، صنعت و گردشگری منطقه دارد، این مطالعه به منظور شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از مدل‌های SRM و HEC-HMS و مقایسه‌ی نتایج آن در حوضه‌ی شهرچای ارومیه انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز شهرچای ارومیه با مساحت تقریبی آن ۱۶۷/۷۵ کیلومتر مربع، در قسمت غربی دریاچه ارومیه واقع شده است، موقعیت جغرافیایی آن بین ۴۴° ۸۲ تا ۴۴° ۵۸ طول شرقی و ۳۷° ۳۲ تا ۳۷° ۴۸ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع ایستگاه آب‌سنجی برده‌سور ۱۵۹۱ متر و حداکثر ارتفاع حوضه معادل

۳۵۷۴ متر (واقع در مرز ایران و ترکیه) می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه‌ی آبریز شهرچای ارومیه را در میان حوضه‌های آبریز کشور و حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه نشان می‌دهد.



شکل (۱) موقعیت حوضه‌ی شهرچای ارومیه در میان حوضه‌های آبریز کشور و دریاچه‌ی ارومیه

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف، همزمان از دو مدل SRM و HEC-HMS استفاده شد. برای هر دو مدل از داده‌های دما و بارش ایستگاه همدید ارومیه و میزان دبی روزانه جریان رودخانه در ایستگاه آبرسنجی برده‌سور (واقع در خروجی حوضه) در دوره‌ی آماری دی ماه سال ۹۱ الی خرداد ماه سال ۹۲ استفاده شد. 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 | | |
| ۱۳۲۸ | ۴۵ | ۰۳ | ۳۷ | ۴۰ | همدید | ارومیه |
| ۱۵۹۱ | ۴۴ | ۶۲ | ۳۷ | ۴۲ | آب سنجی | برده‌سور |

مدل SRM

برای شبیه‌سازی در مدل SRM نخست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده از سنجنده‌ی مودیس، سطح پوشش برف در حوضه شهرچای ارومیه در سال آبی ۱۳۹۲ محاسبه گردید. سپس از اطلاعات هواشناسی و سطح پوشش برفی (از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای) به عنوان ورودی مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف، استفاده شد. اطلاعات مذکور شامل دو بخش به شرح زیر بودند:

مشخصات فیزیوگرافی حوضه شامل مرز حوضه، نقشه‌ی آبراهه‌ها، مساحت و مناطق ارتفاعی که از نقشه‌ی DEM به دست آمد. بدین منظور از الحاقیه‌ی Hec_GeoHMS در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد. سپس سطح پوشش برفی از تصاویر سنجنده‌ی مودیس در فواصل زمانی ۸ روزه از سایت نووا دریافت شد.

در این مطالعه از تصاویر سنجنده مودیس، برای تخمین مساحت تحت پوشش برف در حوضه‌ی شهرچای استفاده شد. محصول سطح برف سنجنده مودیس با استفاده از طرحواره‌ی نقشه برف^۱ و در گام‌های زمانی ۸ روزه تولید گردید. طرحواره‌ی برف مودیس در سال ۱۹۹۸ ارائه شد (هال و همکاران^۲، ۱۹۹۸: ۵). این الگوریتم بر پایه شاخص تفاضل برف نرمال^۳ و بازتابش باندهای ۴ و ۶ می‌باشد که به دلیل انعکاس پایین برف در باندهای مادون قرمز و انعکاس باندها در باندهای مرئی، می‌تواند در تشخیص پوشش ابر از دیگر پدیده‌ها بسیار مفید باشد. شاخص مذکور از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (هال و همکاران، ۱۹۹۵: ۱۳۰):

$$NDSI = \frac{P_{vis} - P_{nir}}{P_{vis} + P_{nir}} \quad (۱) \quad \text{رابطه‌ی}$$

که در آن P_{vis} : بازتابش در طول موج مرئی (۵۶۵-۰/۵۴۵ میکرومتر) و P_{nir} : بازتابش در طول موج مادون قرمز (۶۲۸-۱/۶۵۲ میکرومتر) است. هر پیکسل دارای $NDSI \geq ۰/۴$ پوشیده از برف محسوب می‌شود.

در مرحله‌ی نهایی عملیات پردازش تصاویر شامل تبدیل سیستم مختصات، عملیات برش تصویر، جداسازی منطقه‌ی مورد مطالعه و تفکیک مناطق ارتفاعی، با استفاده از ابزار پردازش تصویر در نرم‌افزار ENVI و GIS صورت گرفت. در نهایت با روی هم قرار دادن لایه‌های اطلاعاتی شامل لایه‌های کلاس ارتفاعی و تصاویر سطح برف، سطح پوشیده از برف به تفکیک هر کلاس ارتفاعی تعیین گردید.

1- Snow Map Algorithm

2- Hall et al.,

3-Normalize Difference Snow Index (NDSI)

در مدل SRM، رواناب ناشی از بارندگی و ذوب برف در هر روز محاسبه و به جریان پای، رودخانه اضافه گردید و سپس رواناب روزانه با استفاده از معادله‌ی زیر تخمین زده شد (رانگو و مارتینک^۱، ۱۹۹۸: ۴).

$$Q_{n+1} = [C_{Sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \frac{410000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad (2)$$

که در رابطه فوق: Q : دبی روزانه ($m^3 \cdot s^{-1}$)، C_s : ضریب رواناب برف، a : عامل درجه روز ($cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$)، T : درجه حرارت ایستگاه مبنا ($^\circ C$)، 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 (km^2)، ضریب تبدیل واحد $\frac{10000}{86400}$: ضریب تبدیل واحد $cm \cdot km^2 \cdot d^{-1}$ به $K \cdot m^3/s$ ، ضریب فروکش جریان، و n : شماره روز در یک دوره محاسباتی است. اطلاعات بیشتر را می‌توان در منبع مورد اشاره پیدا کرد.

هریک از پارامترهای مذکور را می‌توان با اندازه‌گیری یا بر اساس نظرات کارشناسی و با استفاده از خصوصیات حوضه، روابط فیزیکی، تجربی و روابط همبستگی به دست آورد (مک کوئین^۲، ۱۹۹۸: ۵۴۸).

مدل HEC-HMS

نرم‌افزار HEC-HMS یک نرم‌افزار مدل‌سازی هیدرولوژیکی از نوع شبیه‌سازی (با قابلیت بهینه‌سازی پارامترها) است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیکی ارتش آمریکا تولید شده است (Hydrologic Engineering Center, 2000:4) همچنین این مرکز مهندسی در راستای افزایش دقت اطلاعات ورودی به نرم‌افزار HEC-HMS، الحاقیه‌ای را با عنوان HEC-GeoHMS ایجاد کرده است (Users Manual of HEC-GeoHMS, 2010: 3) برای شبیه‌سازی در مدل HEC-HMS ابتدا مدل حوضه‌ی آبریز با استفاده از نقشه‌ی DEM منطقه‌ی مورد مطالعه و با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS در محیط GIS ساخته شد. بدین منظور ابتدا مراحل پیش پردازش مدل شامل تهیه‌ی نقشه‌ی جهت جریان، جهت تجمعی جریان، تعیین مسیر جریان و در نهایت استخراج زیرحوضه‌ها و استخراج لایه‌ی خطی آبراهه انجام شد. در مرحله‌ی بعد با معرفی موقعیت ایستگاه آب‌سنجی برده‌سور به عنوان خروجی حوضه، محدوده‌ی پروژه مشخص شد. برخی از پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی از جمله مساحت، طول و شیب رودخانه، شیب حوضه و مرکز ثقل حوضه، تعیین زمان تمرکز و زمان تأخیر حوضه توسط نرم‌افزار مذکور انجام شد.

محاسبه‌ی زمان تأخیر (CN Lag): زمان تأخیر حوضه (برحسب ساعت) عبارت است از فاصله‌ی زمانی میان مدت بارش تا زمان رخ دادن دبی اوج (که برای حوضه‌های کمتر از ۲۰۰۰ ایکرز) از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

1- Rango & Martinec

2- MacCuen

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{(1900 \times Y^{0.3})} \quad \text{رابطه ی (۳)}$$

که در رابطه ی فوق: L: طول آبراهه اصلی بر حسب فوت، Y: میانگین شیب حوضه ی آبریز بر حسب درصد و S: ضریب نگهداشت سطحی است که از رابطه ی زیر به دست آمد.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{رابطه ی (۴)}$$

که در آن CN: شماره ی منحنی خاک حوضه است که بسته به نوع پوشش منطقه از ۵۰ تا ۹۵ متغیر است. برای محاسبه ی زمان تمرکز (بر حسب ساعت) از رابطه ی زیر استفاده شد.

$$TC = 1.67 \times T_{lag} \quad \text{رابطه ی (۵)}$$

بعد از ایجاد مدل حوضه برای محاسبه ی تلفات آب در حوضه، جریان پایه، روندیابی رودخانه و چندین پارامتر دیگر اقدام گردید^۱.

محاسبه ی میزان ذوب برف:

برای شبیه سازی در حوضه های کوهستانی (که بارش عمدتاً به صورت برف است) محاسبه ی این پارامتر ضروری است. در این مطالعه از روش شاخص دما^۲ استفاده شد، این شاخص یکی از ملحقات روش درجه-روز برای مدل سازی برف است. این روش در نظر گرفتن مقدار مشخص از ذوب برف برای هر درجه حرارت بالای حد انجماد است. بدین منظور حوضه ی آبریز به طبقات ارتفاعی تقسیم شده و درصد مساحت هر زیرحوضه در هر منطقه ی ارتفاعی به مدل معرفی گردید.

نتایج و بحث

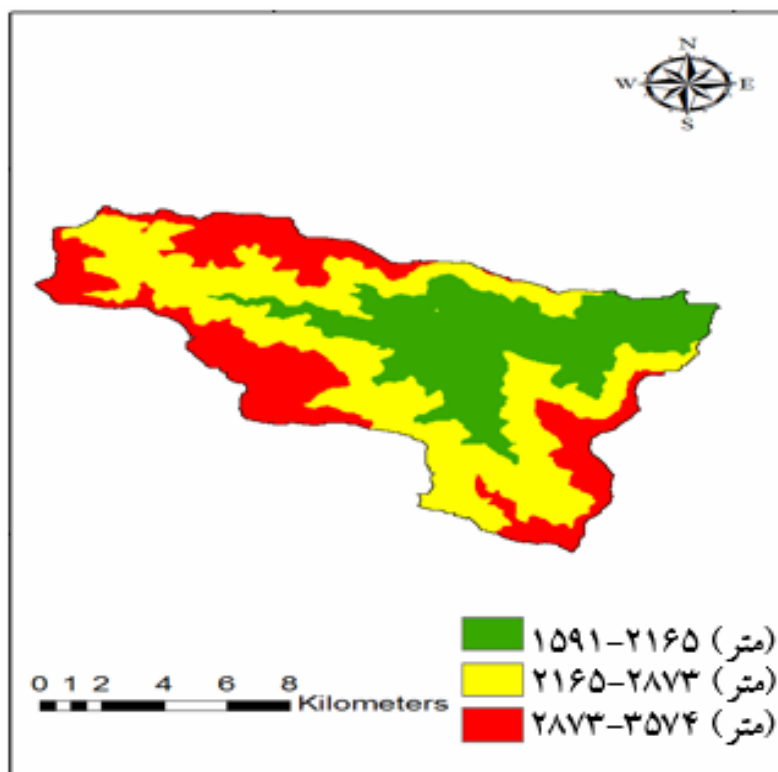
شکل (۲) نقشه ی تراز ارتفاعی^۳ منطقه ی مورد مطالعه را نشان می دهد. این نقشه از مدل ارتفاعی رقومی^۴ منطقه ی مورد مطالعه با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شده است. در جدول ۲ نتایج محاسبات ارتفاعی در حوضه ی شهرچای ارائه شده است. به طوری که از جدول ۲ استنباط می شود گرچه فواصل طبقات ارتفاعی در هر کلاس مساوی با طبقات دیگر است، لیکن بیشترین درصد مساحت متعلق به کلاس وسط می باشد به عبارت دیگر حدود ۶۳ درصد مساحت حوضه دارای ارتفاع متوسط (مابین ۲۸۷۳-۲۱۶۵ متر) است. در این طبقه مساحت اراضی حدود ۱۱۱ کیلومتر مربع است.

۱- جزئیات بیشتر را در منبع زیر می توان مطالعه نمود (Users Manual of HEC-GeoHMS, 2010:35).

2- Temperature Index

3- Hypsometric

4- DEM (Digital Elevation Model)



شکل (۲) مناطق ارتفاعی حوضه‌ی شهرچای

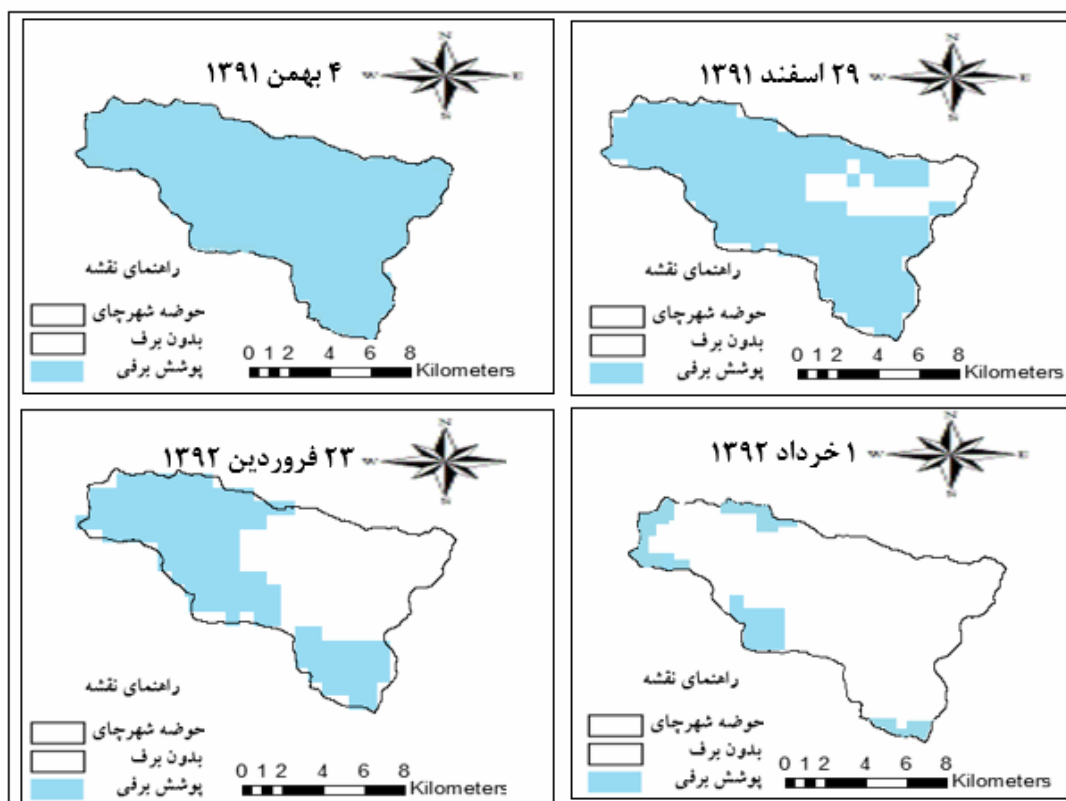
جدول (۲) نتایج محاسبات ارتفاعی در زیر حوضه شهرچای

| ارتفاع متوسط (متر) | درصد مساحت (%) | مساحت (کیلومتر مربع) | طبقه‌ی ارتفاعی (متر) |
|--------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| ۱۹۶۲ | ۱۷/۸۵ | ۳۱/۵۵ | ۱۵۹۱-۲۱۶۵ |
| ۲۵۳۴ | ۶۲/۹۱ | ۱۱۱/۲ | ۲۱۶۵-۲۸۷۳ |
| ۳۰۳۸ | ۱۹/۲۴ | ۳۴ | ۲۸۷۳-۳۵۷۴ |
| ۲۵۳۰ | ۱۰۰ | ۱۷۶/۷۵ | جمع |

شکل (۳) تصاویر پوشش برف در ۴ روز منتخب دوره‌ی آماری مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این اشکال قسمت رنگی مشخص‌کننده‌ی سطح پوشیده از برف است. همان‌طور که از این شکل می‌توان نتیجه گرفت، سطح پوشش برف در روز ۴ بهمن ۹۱ کل حوضه‌ی مورد مطالعه را پوشانده است؛ ولی در حالت کلی با بالا رفتن درجه حرارت در انتهای همان سال (۲۹ اسفند) بخش‌های پست حوضه عاری از پوشش برف شده و در ۲۳ فروردین ۹۲ تقریباً نیمی از حوضه شامل قسمت‌های کم ارتفاع فاقد پوشش برفی است و در نهایت در اول خرداد ۹۲ تقریباً همه جای حوضه به جز بخش‌های مرتفع آن فاقد پوشش برفی می‌باشد.

جدول (۳) مقدار پارامترهای وارد شده به مدل در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مذکور می‌توان استنباط کرد، بعضی از پارامترها (مانند درجه حرارت بحرانی و ضریب فروکش) در طول دوره‌ی

شبیه‌سازی ثابت و بعضی دیگر متغیر در نظر گرفته شده‌اند. مثلاً درجه حرارت بحرانی برای ذوب برف معادل صفر درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب رواناب باران ۰/۵ به این معنی است که پنجاه درصد باران نازل شده در زمین در قالب رواناب از حوضه خارج می‌شود. مقدار ضریب روند آبراهه در روش ماسکینگهام در تمام ماه‌ها ثابت فرض شده است.

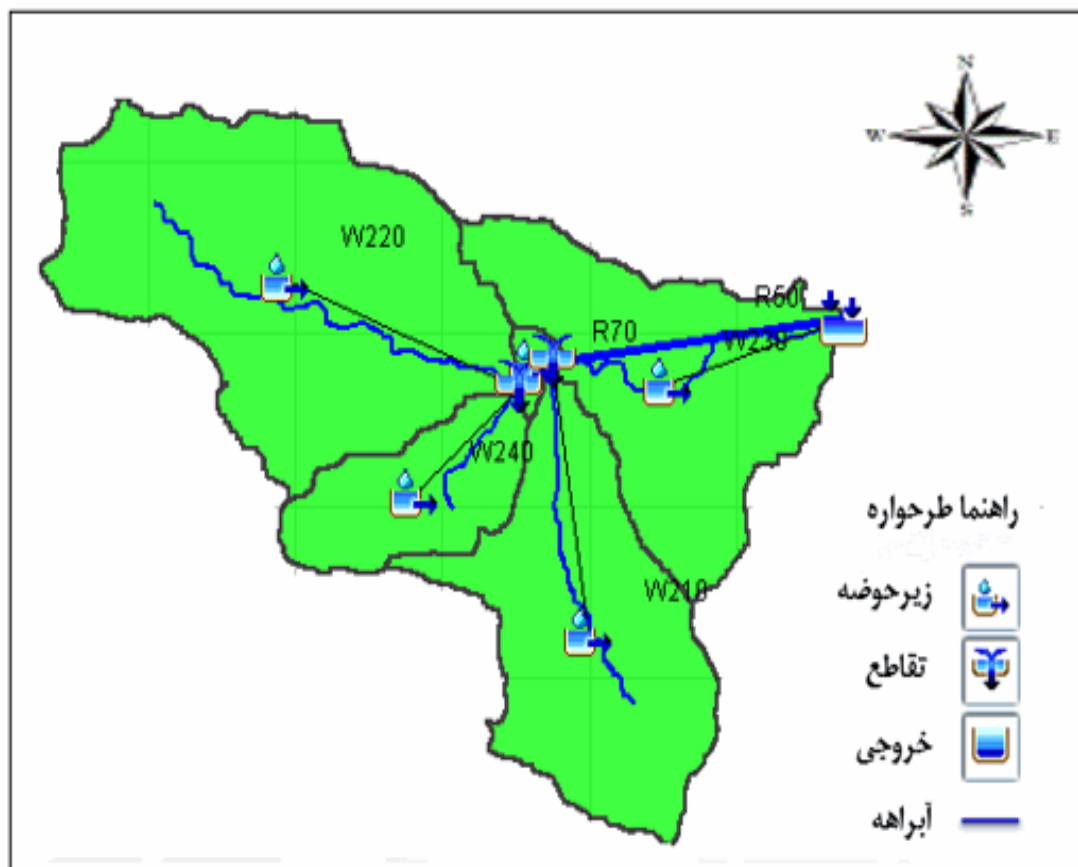


شکل (۳) تصاویر پوشش برف در چهار روز منتخب و متفاوت در حوضه‌ی شهرچای ارومیه

جدول (۳) مقدار پارامترهای استفاده شده در مدل SRM در این مطالعه

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

در شکل (۴) مدل حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حوضه‌ی مورد مطالعه به ۵ زیرحوضه تقسیم شده است، طوری که هر زیرحوضه یک آبراهه‌ی فرعی از حوضه‌ی شهرچای را در بر می‌گیرد. همچنین جدول (۴) مشخصات فیزیوگرافی کمینه، متوسط و بیشینه‌ی برخی عناصر مهم را نشان داده است. در جدول (۵) پارامترهای مورد نیاز برای ذوب برف در مدل HEC-HMS نشان داده شده است. جدول ۶ مقدار پارامترهای مورد استفاده در زیرحوضه‌ی W230 در قسمت خروجی حوضه و آبراهه‌ی R70 را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که این پارامترها برای هر زیرحوضه متفاوت است. همچنین می‌توان برای به دست آوردن هر کدام از پارامترهای مذکور از روش‌های مختلفی در عناصر حوضه استفاده کرد. با توجه به جدول ۶ مقدار ثابت k در آبراهه برای روندیابی ۲۰ ساعت و مقدار ضریب X در مدل ماسکینگهام ۰/۵ در نظر گرفته شد. با این مفروضات، روندیابی جریان از ابتدای هر زیربازه از رودخانه تا انتهای آن به انجام رسید. تعداد این زیربازه‌ها ۱۱ بود.



شکل (۴) طرحواره‌ی حوضه‌ی شهرچای ارومیه در نرم‌افزار HEC-HMS

جدول (۴) مشخصات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها در حوضه‌ی شهرچای

| عنصر | کمینه | متوسط | بیشینه | جمع |
|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| مساحت زیر حوضه (کیلومتر مربع) | ۱/۷۵ | ۳۵/۷ | ۷۱/۶۲ | ۱۷۸/۴۸ |
| طول رودخانه (متر) | ۲۴۲ | ۵۴۵۹ | ۱۳۰۸۷ | ۳۸۲۱۶ |
| شیب زیرحوضه (درجه) | ۳۸/۸ | ۴۵/۹ | ۵۳/۹ | - |

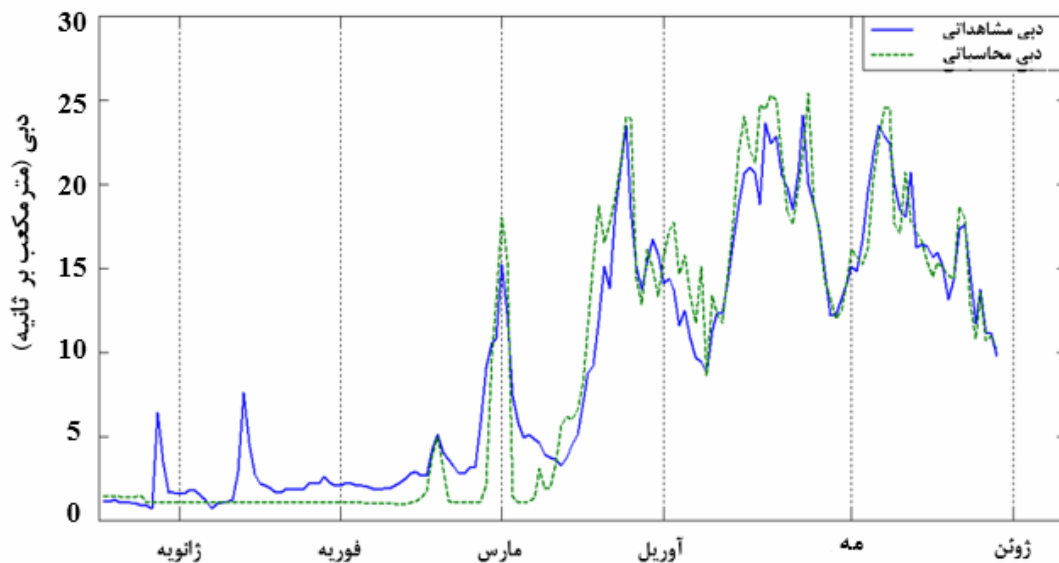
جدول (۵) پارامترهای در نظر گرفته شده برای ذوب برف و مقدار ورودی آن به مدل HEC-HMS

| پارامتر (واحد) | توضیح مختصر درباره‌ی پارامتر | مقدار پارامتر در این مطالعه |
|---|---|-----------------------------|
| PX Temperature (deg C) | دمایی که کمتر از آن بارش به صورت برف است. | ۲ |
| Base Temperature (deg C) | دمایی که بالاتر از آن ذوب برف رخ می‌دهد. | ۰ |
| Wet Melt rate (mm/deg C-day) | شاخص ذوب برف زمانی که بارش باران سبب آن می‌شود | ۱/۵ |
| Rain Rate Limit (mm/ day) | شاخص متمایزکننده‌ی ذوب خشک از ذوب بارانی | ۰/۵ |
| ATI-Meltlate Coefficient | شاخص دمای پیشین نرخ ذوب برف برای تعیین مقدار اولیه‌ی نرخ ذوب برف | ۰/۹۸ |
| ATI (deg F-day) Meltrate (in/deg F-day) | | |
| | | ۰/۰۳ |
| | | ۰ |
| | | ۰/۰۳ |
| | | ۵ |
| | | ۰/۰۳۵ |
| | | ۱۰ |
| ATI-Meltrate Function | شاخص ذوب برف وقتی باران نمی‌بارد. | ۰/۰۴۵ |
| | | ۲۰ |
| | | ۰/۰۴۵ |
| | | ۵۰ |
| | | ۰/۰۶۵ |
| | | ۲۰۰ |
| | | ۰/۰۶۵ |
| | | ۱۰۰۰۰ |
| Cold Limit (mm/day) | حد سرمایشی برای تغییرات سریع در دمایی که پوشش برفی در طول بارش‌های با سرعت بالا محتمل می‌شود. | ۰/۸ |
| ATI-Coldrate Coefficient | ضریب به روز رسانی شاخص ظرفیت سرمایشی پیشین از یک بازه‌ی زمانی به بازه‌ی زمانی دیگر | ۰/۹ |
| ATI (deg F-day) Meltrate (in/deg F-day) | | |
| | | ۰/۰۲۸ |
| | | ۰ |
| | | ۰/۰۳۰ |
| | | ۱۰۰ |
| ATI-Coldrate Function | تابعی برای تعریف رابطه‌ی میان نرخ ظرفیت سرمایشی و شاخص دمای پیشین | ۰/۰۳۰ |
| | | ۲۰۰ |
| | | ۰/۰۳۰ |
| | | ۳۰۰ |
| | | ۰/۰۳۰ |
| | | ۱۰۰۰۰ |
| Water Capacity (%) | حداکثر ظرفیت آب (در فاز مایع) درون برف | ۳ |
| Fixed Ground Melt (mm/day) | نرخ ذوب برف ناشی از گرمای زمین | ۰/۴ |

جدول (۶) پارامترهای نفوذ و جریان در مدل HEC-HMS در حوضه‌ی شهرچای

| پارامتر | توضیح | عنصر | مقدار پارامتر |
|----------------------|--|---------|---------------|
| Initial Deficit(mm) | شرایط اولیه‌ی خاک برای اشباع | زیرحوضه | ۱ |
| Maximum Deficit(mm) | حداکثر ظرفیت خاک برای اشباع | زیرحوضه | ۲ |
| Constant Rate(mm/hr) | سرعت نفوذ آب در خاک اشباع | زیرحوضه | ۰/۳ |
| Impervious(%) | قسمت غیرقابل نفوذ حوضه | زیرحوضه | ۲۰ |
| Muskingum K (hr) | زمان سفر در آبراهه | آبراهه | ۲۰ |
| Muskingum X | وزن اثرگذاری جریان بر میزان ذخیره‌ی آبراهه | آبراهه | ۰/۵ |
| Subreaches | تعداد بخش‌های آبراهه | آبراهه | ۱۱ |

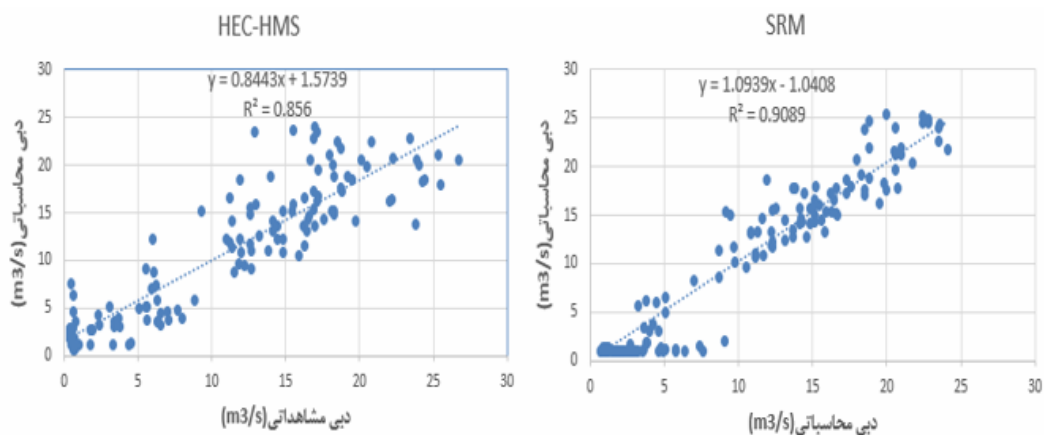
بعد از وارد کردن متغیرها و پارامترهای لازم مدل‌ها مطابق جداول ۳، ۴ و ۵ اجرا شدند. شکل‌های ۵ و ۶ نتایج شبیه‌سازی را به ترتیب با مدل‌های SRM و HEC-HMS نشان می‌دهد، همانطور که در این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد، گرچه هر دو مدل شبیه‌سازی را با دقت بالایی انجام داده‌اند، ولی دقت مدل SRM بیشتر است که دلیل آن می‌تواند حساسیت کمتر SRM نسبت به متغیر بارش باشد (رانگو و مارتینگ، ۱۹۹۸: ۱۵). در دبی‌های پائین دقت هر دو مدل (SRM و HEC-HMS) کم و بیش مشابه یکدیگر اما در دبی‌های بالاتر (بیشتر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه) نمودار دبی محاسباتی در مدل SRM به نمودار نظیر دبی مشاهداتی بسیار نزدیک شده است. بنابراین، چون دبی مشاهداتی در دبی‌های بالا برای مدل SRM در مقایسه با مدل HEC-HMS نزدیک به دبی نظیر محاسباتی است. می‌توان نتیجه گرفت که مدل SRM در مقایسه با مدل HEC-HMS دقت زیادی داشته است. نتیجه‌گیری چشمی در مطالعه‌ی حاضر با سنجه‌های R^2 و RMSE مقایسه شد که نتایج آن در مقاله‌ی حاضر ارایه شده است. یافته‌های قبلی را تأیید کرد. همچنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نیز در بهبود این شبیه‌سازی مؤثر بوده است. شکل (۷) نمودار پراکنش نقاط مربوط بر روی دبی محاسباتی را در مقابل دبی مشاهداتی در دستگاه مختصات عمود بر هم نشان می‌دهد. به طوری که از این نمودار می‌توان دریافت در هر دو مدل نقاط به صورت ابری در اطراف خط نیمساز واقع شده‌اند؛ لیکن در مدل SRM نقاط بیشتر از مدل HEC-HMS به این خط نزدیک‌ترند. ضریب تعیین مدل SRM معادل ۰/۹ و در مدل HEC-HMS حدود ۰/۸۵ بوده است که نتایج قبلی را تأیید می‌کند.



شکل (۵) مقایسه شبیه‌سازی رواناب ذوب برف مدل SRM با رواناب مشاهداتی در حوضه‌ی شهرچای



شکل (۶) مقایسه شبیه‌سازی رواناب ذوب برف مدل HEC-HMS با رواناب مشاهداتی در حوضه‌ی شهرچای



شکل (۷) نمودار پراکنش نقاط دبی محاسباتی و مشاهداتی در مدل‌های SRM و HEC-HMS در حوضه‌ی آبریز شهرچای

جدول (۷) نتایج ارزیابی مدل SRM را در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضه‌ی شهرچای و در محل ایستگاه آب‌سنجی برده‌سور نشان می‌دهد، همانطور که از این جدول می‌توان استنباط کرد مدل SRM قابلیت خوبی در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف دارد. به طوری که درصد خطای حجمی مدل SRM کمتر از ۲ درصد (۱/۹) و مقدار آن در HEC-HMS ۲/۱ درصد است. با ضرب مقدار دبی مشاهداتی (یا محاسباتی) حجم رواناب به دست آمد. این رقم برای دبی مشاهداتی ۱۳۲/۴ میلیون متر مکعب در سال است در مدل SRM حجم رواناب ۱۲۹/۹ میلیون متر مکعب به دست آمد که یک بار دیگر تأییدکننده دقت بیشتر مدل SRM در مقایسه با مدل HEC-HMS است.

جدول (۷) نتایج ارزیابی شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضه‌ی شهرچای با مدل SRM و HEC-HMS

| واحد | مقدار | پارامتر یا معیار ارزیابی |
|-----------------|--------|--|
| میلیون متر مکعب | ۱۳۲/۴ | حجم رواناب مشاهداتی |
| میلیون متر مکعب | ۱۲۹/۹ | حجم رواناب محاسباتی SRM |
| میلیون متر مکعب | ۱۲۹/۶ | حجم رواناب محاسباتی HEC-HMS |
| درصد | ۱/۹ | درصد خطای حجمی SRM (D_v) |
| درصد | ۲/۱ | درصد خطای حجمی HEC-HMS (D_v) |
| بی بعد | ۰/۹۰۸۹ | ضریب تعیین دبی مشاهداتی و محاسباتی SRM (R^2) |
| بی بعد | ۰/۸۵۶ | ضریب تعیین دبی مشاهداتی و محاسباتی HEC-HMS (R^2) |

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی با مدل SRM حاکی از قابلیت بالای مدل مذکور در شبیه‌سازی رواناب برف در منطقه‌ی مورد مطالعه بود؛ به طوری که ضریب تعیین و درصد خطای حجمی مدل به ترتیب ۰/۹۱ و ۱/۹۴ درصد محاسبه شد. این رقم در مطالعه‌ی نجف‌زاده و همکاران (۱۳۸۳)، ۰/۷۸ و در مطالعه‌ی فتاحی و همکاران (۱۳۹۰)، ۰/۸۲ بوده است. همچنین شبیه‌سازی با مدل HEC-HMS حاکی از قابلیت این مدل در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف دارد. به طوری که ضریب تعیین بالای ۰/۸۵ درصد و درصد خطای حجمی حدود ۲ درصد به دست آمد. در مطالعه‌ی یعقوبی و مساح بوانی (۱۳۹۲)، قابلیت مدل HEC-HMS به خوبی نشان داده نشده است؛ که به نظر می‌رسد دلیل این امر استفاده نکردن نامبردگان از الحاقیه‌ی HEC-GeoHMS مدل است؛ زیرا که این الحاقیه با دقت مضاعفی پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی را برآورد می‌کند. دلیل دیگر آن احتمالاً عدم استفاده از داده با کیفیت بالا به دلیل فقدان ایستگاه همدید در منطقه‌ی مورد مطالعه است. تطابق نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی نشان داد که علاوه بر پارامترهای مدل، فیزیوگرافی حوضه نقش زیادی در دقت شبیه‌سازی ایفا می‌کند. صرف نظر از دقت بالای مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب ناشی

از ذوب برف در مقایسه با مدل HEC-HMS، تنها استفاده از داده‌های دما و بارش می‌تواند یکی از نقاط قوت مدل HEC-HMS باشد؛ در حالی که در مدل SRM محاسبه‌ی مساحت سطح پوشش برف نیاز به تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و صرف وقت بیشتری دارد. همچنین با نگاهی به رواناب محاسباتی و مشاهداتی در هر دو مدل، چهار دبی اوج بزرگ در طول ماه‌های فروردین تا خرداد مشاهده می‌شود که در سه دبی اوج اول، برف نقش عمده‌ای در تولید رواناب داشته اما در دبی اوج آخر به دلیل افزایش حرارت هوا و فقدان پوشش برف، سهم آن در مقابل رواناب ناشی از باران بسیار ناچیز است. در کل بیشترین مقدار رواناب در منطقه‌ی مورد مطالعه مربوط به ماه اردیبهشت (به دلیل تأثیر همزمان رواناب ناشی از ذوب برف و باران) و کمترین رواناب مربوط به دی ماه (به دلیل فقدان ذوب برف و بارش باران) بود. با در نظر گرفتن تمام موارد یاد شده شبیه سازی رواناب برف و سطح پوشش آن تابعی از متغیرهایی مانند دمای هوا، بارش و برخی عوامل ناشناخته دیگری است که مقدار آن‌ها در سال‌های مختلف تغییر می‌کند. بنابراین، برآورد صحیح از میزان رواناب برف منطقه، نیازمند دوره‌ی طولانی‌تر شبیه‌سازی است.

منابع

- فتاحی، ابراهیم؛ دلاور، مجید و قاسمی، الهه (۱۳۹۰)، «شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM، مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز بازفت». نشریه‌ی تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره‌ی ۲۳، صص ۱۲۹-۱۴۱.
- کارآموز، محمد و عراقی‌نژاد، شهاب (۱۳۹۳)، هیدرولوژی پیشرفته، چاپ سوم، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران).
- کاراندیش، فاطمه؛ ابراهیمی، کیومرث و شاه‌نظری، علی (۱۳۸۹)، «شبیه‌سازی رواناب حاصل از بارش برف و باران با استفاده از برنامه HEC-HMS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی کارون- خروجی پل شالو)»، اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- نجف‌زاده، رضا؛ ابریشم‌چی، احمد؛ تجریشی، مسعود و طاهری شهرآیینی، حمید (۱۳۸۳)، «شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف». مجله‌ی آب و فاضلاب، شماره‌ی ۵۲، صص ۱۱-۲.
- یعقوبی، مژگان و مساح بوانی، علیرضا (۱۳۹۲)، «تحلیل حساسیت و مقایسه‌ی عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه‌های نیمه‌خشک (بررسی موردی: حوضه‌ی اعظم هرات-یزد)»، مجله‌ی فیزیک زمین و فضا، دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۲، صص ۱۵۳-۱۷۲.
- 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: pp. 443-459.
- 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-Mapp in Algorithms", Modis Algorithm Theoretical Basis Document Number ATBD-MOD-10, NASA Goddard Space Flight Center.
- Hall D.K.; Riggs G.A. and Salomonson V.V. (1995), "Development of Methods for Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectror Radiometer Data", Remote Sens. Environ. Vol. 54, No. 2, pp. 127-140.
- Harshburger, B.J.; Karen, S.H.; Von, P.W.; Brandon, C.M.; Troy, R.B. & 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), Vol. 15, No. 1, pp. 1752-1688.
- Hydrologic Engineering Center (HEC) (2000), "Hydrologic Modeling System HEC-HMS", Technical Reference Manual, March 2000.

-
-
- Hydrologic Engineering Center (HEC) (2000). “**Hydrologic Modeling System HEC-HMS**”, User’s Manual, Version 4. Desember 2013.
 - Malcher P. & Heidinger M. (2001), “**Processing and Data Assimilation Scheme for Satellite Snow Cover Products in the Hydrological Model**”, Envisnow EVG1-CT- 2001-00052.
 - Meenu, R.; Rehana, S. & Mujumdar, p.p. (2012), “**Assessment of Hydrologic Impact of Climate Change in Tunga- Bhardra River Basin, India with HEC-HMS and SDSM**”, Hydrological Processes.
 - McCuen, R.H. (1998), “**Hydrologic Analysis and Design, Printice-Hall pub.**”, Inc. N. J., PP. 548.
 - Rango, A. & Martinec, J. (1998), “**The Snowmelt Runoff Model (SRM) User/s Manual**”, Version 4, URL: [ftp //hydrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf](http://hydrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf).
 - Seidel, K. & Martinec, J. (2002), “**Hydrological Applications of Satellite Snow Cover Mapping in the Swiss Alps**”, Proceedings of Earsel-Lissig-Workshop Observing Our Cryosphere from Space, Bern, March 11-13.
 - Verdhen, A.; Chahar, B. & Sharma, O. (2013), “**Snowmelt Runoff Simulation Using HEC-HMS in a Himalayan Watershed**”, World Environmental and Water Resources Congress 2013: pp. 3206-3215.