



Performance Evaluation of SRM and HBV Models in Simulation of Snowmelt Runoff in Bujin Basin

M.M. Artimani¹, H. Zeinivand^{2*},
and N. Tahmasebipour³

Abstract

The snow melt forecast in mountainous basins plays an important role in the management of water resources. For this reason, snow hydrology in mountainous areas is of great importance. In this study, due to the lack of snow data in the Bujin area, SRM and HBV models were used to simulate snow melting. At first, discharge and precipitation data was prepared and verified during the period of 1387 until 1389. The MODIS sensor data was used at daily time step to monitor the time and location of snow cover surface in the SRM model. ArcGIS software was employed to implement the physical properties of the basin into SRM and HBV models and the snow melt was then simulated. Using the results of parameters values in the calibration step, the validation step was performed. The value of R² criteria obtained by the SRM and HBV model for the Bujin area was respectively about 0.71 and 0.61 for calibration and about 0.72 and 0.69 for validation steps. These results, together with the values of the other evaluation criteria such as Nash-Sutcliff (coefficient of 0.71 for SRM model and 0.61 for HBV model at validation step), showed reliable accuracy of models in runoff simulation. Also, for this basin the SRM model, due to the use of satellite images, showed a more reliable performance in snowmelt runoff simulation compared to the HBV model.

Keywords: Bojin, Snowmelt, Runoff, Simulation, SRM, HBV.

Received: October 18, 2018

Accepted: April 4, 2019

ارزیابی کارایی مدل SRM و HBV در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوزه آبخیز بوجین

محمد مهدی آرتیمانی^۱، حسین زینی‌وند^{۲*}
و ناصر طهماسبی‌پور^۳

چکیده

پیش‌بینی ذوب برف در حوزه‌های کوهستانی نقش مهمی در مدیریت منابع آبی ایفا می‌کند. لذا هیدرولوژی برف در این مناطق از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش به دلیل نبود داده برف در حوزه بوجین از مدل SRM و HBV برای شبیه‌سازی ذوب برف استفاده گردید. ابتدا داده‌های دبی، بارش در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ تهیه و صحت‌سنجی گردید. به منظور پایش زمانی و مکانی سطح پوشش برف در مدل SRM، از داده‌های سنجنده MODIS در فواصل زمانی یک‌روزه استفاده شد. برای اجرای مدل‌ها خصوصیات فیزیکی حوزه به کمک نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد. با اجرای مدل‌های SRM و HBV شبیه‌سازی ذوب برف انجام شد. مقادیر پارامترهای مدل‌ها در مرحله واسنجی تدقیق و به کمک مقادیر اصلاح‌شده در مرحله واسنجی، در سال دوم مرحله اعتبارسنجی انجام شد. میزان ضریب تبیین (R²) به‌دست‌آمده برای مدل‌های SRM و HBV در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۱ و ۰/۶۱ و مقدار ۰/۷۲ و ۰/۶۹ برای مرحله اعتبارسنجی به دست آمد. این نتایج به همراه سایر معیارهای ارزیابی همانند نش-ساتکلِف (ضریب ۰/۷۱ برای مدل SRM و ۰/۶۱ برای مدل HBV در مرحله اعتبارسنجی)، دقت خوب مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب را نشان داد. همچنین، مدل SRM به دلیل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نسبت به مدل HBV عملکرد قابل‌قبول‌تری در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: بوجین، ذوب برف، رواناب، شبیه‌سازی، SRM، HBV.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱/۱۵

1- M.Sc. Graduate of Watershed Manegment, Department of Range and Watershed, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Lorastan University, Khoramabad, Iran. Email: artimanih@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Lorastan University, Khoramabad, Iran. Email: zeinivand.h@lu.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Range and Watershed, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Lorastan University, Khoramabad, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان.

۲- دانشیار، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان.

۳- دانشیار، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

توسعه یافته در بیش از ۱۰۰ حوزه در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۲ تا ۶۰ درجه شمالی و ۳۳ تا ۵۴ درجه جنوبی در بیش از ۳۰ کشور مورد استفاده قرار گرفت (Seidel & Martinec, 2004). شبیه‌سازی رواناب حوزه رودخانه سوات پاکستان با استفاده از مدل رواناب ذوب برف SRM و به کمک تصاویر مودیس مورد استفاده جهت استخراج سطح پوشیده از برف، نشان داد برای سال‌های مختلف مدل به خوبی رواناب را شبیه‌سازی می‌نماید (Dahri et al., 2011). اگرچه مدل‌های مختلف شبیه‌سازی بارش- رواناب کارایی خوبی در حوزه‌های فاقد آمار از خود نشان می‌دهند لیکن مدل SRM با دقت بالایی می‌تواند رواناب حاصل از ذوب برف در مناطق کوهستانی و عرض‌های جغرافیایی بالا را شبیه‌سازی کند (Nouri, 2012). کاربرد مدل SRM در همانندسازی رواناب به دست آمده از ذوب برف با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای در حوزه آبخیز خرسان (واقع در جنوب غربی ایران) نشان داد که بیشترین ناهمخوانی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و برآورد شده در زمان اوج سیلاب‌هاست. ضریب تبیین همانندسازی شده و مشاهده‌ای و اختلاف حجم آن‌ها به میزان ۰/۷۷۴ نشان از دقت خوب مدل می‌باشد (Porhamat et al., 2015). مدل اصلاح شده فیزیکی SRM (SRM تابشی) توانست شبیه‌سازی جریان رواناب را نسبت به مدل SRM کلاسیک به میزان ۹ درصد در حوزه آبخیز سد کرج بهبود ببخشد (Fathizadeh et al., 2009). نتایج قابل قبول شبیه‌سازی جریان رواناب توسط مدل SRM در حوزه سد کرج نشان از دقت داده‌های حاصل از نقشه‌های پوشش برفی به دست آمده از تصاویر MODIS دارد (Mir Yaghoubzadeh et al., 2010). مدل SRM با استفاده از داده‌های هیدرواقلمی (دما، بارش و دبی) و تصاویر ماهواره‌ای پوشش برف (در این مطالعه تصاویر سنجنده MODIS) نتایج شبیه‌سازی فرآیندهای رواناب ناشی از ذوب برف را انجام می‌دهد. نتایج مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس معیار ارزیابی نش در مدل SRM به ترتیب برابر ۰/۵۴ و ۰/۵۳ به دست آمد. همچنین با مقایسه پوشش برف مستخرج از مدل با پوشش برف مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در دوره‌های زمانی یکسان مشخص شد که پوشش برف شبیه‌سازی شده با پوشش برف مشاهده‌ای تطابق خوبی دارد (Karimi Haji Pamap et al., 2014). برآورد رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از مدل SRM به کمک فناوری سنجنش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوزه سد شش‌پیر نشان داد این مدل با دقت خوب و قابل قبولی رواناب را شبیه‌سازی نموده است (Tavanpour et al., 2016). نتایج اجرای سه مدل ANN، ANFIS، SRM در پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف در حوزه آبخیز سد کارده نشان داد هر سه مدل از نظر پارامترهای آماری میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین تقریباً وضعیت مشابهی داشته و اختلاف ناچیزی دارند با این حال، مدل SRM توانست روند تغییرات دبی روزانه

مدیریت منابع آب در بخش‌های مختلف خصوصاً در بهره‌برداری از مخازن سدها و نیازهای آبی طرح‌های کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ارزیابی رواناب و جریان حاصل از ذوب برف در مناطق کوهستانی یکی از فعالیت‌های مهم در مدیریت منابع آب به شمار می‌آید (Akbari et al., 2015). برف یکی از اشکال مهم بارش در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی بوده که در تأمین منابع آب شرب و کشاورزی به صورت جریان‌های تأخیری در فصول پرآبی و جریان‌های حداقل در فصول کم‌آبی و تولید انرژی نقش ارزنده ایفا می‌کند. از سوی دیگر رواناب حاصل از ذوب برف به دلیل نقش تأخیری آن منبع اصلی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و در برخی از موارد به دلیل هم‌زمانی با بارش بهاره، باعث بروز سیلاب‌های مخرب با حجم جریان بیش از ظرفیت رودخانه‌ها می‌گردد (Ghanbarpour et al., 2007). ذوب برف تأمین‌کننده رطوبت خاک، ذخیره آب زیرزمینی و منابع آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها بوده و رواناب حاصل از آن در حوزه‌های کوهستانی و مرتفع عامل مهم و کنترل‌کننده رژیم جریان و تأمین‌کننده نیازهای آبی در بخش‌های مختلف مصرف محسوب می‌شود (Ebrahimi et al., 2016). تجمع و ذوب برف می‌تواند خسارات جانی و مالی زیادی را سبب شود. همچنین، مدل‌سازی ذوب برف برای مدیریت منابع آب و ارزیابی خطر سیل ناشی از ذوب برف در فصول مختلف مهم بوده و باعث شده مدل‌سازی مکان‌هایی که ذوب برف سهم قابل توجهی در تولید رواناب و توزیع آب دارند از اهمیت خاصی برخوردار باشند (Zeinivand & De Smedt, 2009). پژوهش‌های زیادی در مورد مدل‌های بارش- رواناب حاصل از ذوب برف در حوزه‌های آبخیز کشورهای مختلف از جمله ایران انجام شده است که دقت آن‌ها در شبیه‌سازی‌ها متفاوت گزارش شده است. یکی از مهم‌ترین این مدل‌ها، مدل SRM¹ می‌باشد، که یک مدل هیدرولوژیکی، مفهومی و تجربی بر اساس روش درجه- روز است. SRM به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه در حوزه‌های کوهستانی که ذوب برف مهم‌ترین عامل در تولید رواناب در این حوزه‌ها، می‌باشد، طراحی شده است (WinSRM, 2007). اگرچه مدل‌های مختلف شبیه‌سازی بارش- رواناب کارایی خوبی در حوزه‌های فاقد آمار جریان نشان می‌دهند لیکن مدل SRM با دقت بالایی می‌تواند رواناب حاصل از ذوب برف در مناطق کوهستانی و عرض‌های جغرافیایی بالا را شبیه‌سازی کند (Nouri, 2012).

مدل ذوب برف SRM توسط مارتینک برای حوزه‌های کوچک ابداع شده و به کمک علم سنجنش‌ازدور و در نتیجه امکان تهیه نقشه‌های سطح پوشش برف، برای حوضه‌های بزرگ‌تر توسعه یافته است. مدل

از فن سنجش‌ازدور به کمک تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای برای پهنه‌بندی پوشش برف می‌توانند به‌عنوان ورودی در مدل‌های تخمین رواناب نظیر مدل SRM بکار رود. جهت تکمیل تحقیقات ذکرشده، در این مقاله تحقیقی در خصوص مقایسه‌ی کارایی عملکرد دو مدل SRM و HBV در حوزه بوجین به‌عنوان یک حوزه آبخیز واقع در منطقه نیمه‌خشک کوهستانی ایران بر مبنای روش درجه-روز و تعیین دقت این دو مدل در شبیه‌سازی جریان حاصل از ذوب برف در دو حالت با و بدون به‌کارگیری فن سنجش‌ازدور صورت می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد تحقیق

حوزه آبخیز بوجین در غرب استان همدان در محدوده جغرافیایی ۴۷ درجه ۵۴ دقیقه تا ۴۸ درجه ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه ۴۹ دقیقه تا ۳۴ درجه ۵۷ دقیقه عرض شمالی با مساحت ۲۳۳/۵۳ کیلومتر مربع قرار دارد. مناطق کوهستانی این حوزه با حداکثر ارتفاع ۲۷۰۰ متر عمدتاً در بخش‌های شرقی و غربی حوزه و نقاط پست و دشت‌های آن با ارتفاع ۱۹۰۰ متر غالباً در بخش‌های میانی حوزه قرار دارند. بر اساس اطلاعات روزانه در دوره آماری ۱۵ساله در ۳ ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان (۱۷۴۰متر) و تبخیرسنجی خسروآباد (۱۵۱۰ متر) و ایستگاه کلیما‌تولوژی گردنه اسدآباد (۲۲۴۳ متر) متوسط دما و بارش سالانه حوزه به ترتیب ۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۴۰۰ میلی‌متر بوده و بارش عموماً در فصل زمستان و بهار رخ می‌دهد. اقلیم حوزه بر مبنای روش آمبروزه جزء اقلیم نیمه‌خشک می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز بوجین در ایران و استان همدان را نشان می‌دهد.

۲-۲- تئوری و ساختار مدل SRM

مدل SRM برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان روزانه در حوزه‌های کوهستانی که ذوب برف مهم‌ترین فاکتور مؤثر در رواناب است، طراحی گردیده است. این مدل برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم روی سطح پوشش برف فصلی و رواناب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای حوزه‌های کوچک در اروپا توسعه یافته و با پیشرفت سنجش‌ازدور و در نتیجه امکان تهیه نقشه‌های سطح پوشش برف، مدل SRM برای حوزه‌های بزرگ‌تر مورد استفاده قرار گرفت. مدل SRM با استفاده از داده‌های زیر شبیه‌سازی و یا پیش‌بینی جریان را انجام می‌دهد: خصوصیات حوضه آبریز، حوضه و ناحیه‌های ارتفاعی، منحنی سطح-ارتفاع، متغیرهای دما، باران، سطح پوشش برف، ضریب رواناب برف، ضریب رواناب باران، فاکتور درجه روز، گرادیان درجه حرارت، درجه حرارت بحرانی، سطح شرکت‌کننده در بارش، ضریب فروکشی جریان و زمان تأخیر.

را باکیفیت نسبتاً بهتری نسبت به مدل ANFIS شبیه‌سازی نماید (Akbari et al., 2016). شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با مدل WINSRM برای داده‌های روزانه در حوزه آبریز دربند سملقان در خراسان شمالی در سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ به کمک اطلاعات برف به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنده مودیس نشان داد که شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی موفق بوده و درجه اعتبارسنجی مدل نیز در حد قابل قبولی بوده است (Rashidi et al., 2017). مدل HBV² یک مدل مفهومی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوزه است و در حکم مدلی نیمه توزیعی با تقسیم حوزه به چندین زیر حوزه، قابل اجرا است (Yaghoubi and Mashane, 2014). در مدل HBV روال ذوب برف به کمک بارش و درجه حرارت مشاهداتی یا پیش‌بینی شده شبیه‌سازی می‌شود (Lindstrom et al., 1997). پژوهشی جهت تعیین کارایی مدل HBV در شبیه‌سازی جریان رواناب زیر حوزه‌های سد کرخه و امکان انتقال پارامترهای واسنجی شده این حوزه‌ها به حوزه‌های فاقد آمار در ۱۱ زیر حوزه کوهستانی آبخیز این سد صورت گرفت که نتایج اجرای این مدل کارایی آن را در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی در این حوزه تأیید نمود. همچنین با انتقال پارامترهای واسنجی شده این حوزه به حوزه‌های فاقد آمار نتایج قابل قبولی از عملکرد مدل به دست آمد (Masih et al., 2010). در حوزه آبخیز شرق رودخانه ترکیه با مقایسه دو مدل HBV و SRM مشخص شد که هر دو مدل به‌خوبی رواناب را پیش‌بینی کرده و ضریب اعتبارسنجی در دوره آماری بالای ۰/۸۶ و ضریب تغییرات حجم رواناب ۲/۵ درصد به دست آمده است (Sorman et al., 2012). همچنین، تحقیقی با مدل HBV در حوزه آبخیز رودخانه اعظم در یزد نشان داد این مدل در تعیین کارایی حساسیت پارامترهای مؤثر در تولید رواناب و عملکرد مناسب در شبیه‌سازی بارش- رواناب در حوزه‌های مناطق نیمه خشک موفق بوده است. علاوه بر آن، مدل عملکرد خوبی در شبیه‌سازی رواناب پیوسته در این حوزه داشته است (Yaghoubi and Mashane Boani., 2014). در تحقیقی برای بررسی اثرات اقلیم بر خشک‌سالی هیدرولوژیکی و الگوی فصلی رواناب به کمک مدل HBV در حوزه زاینده‌رود اصفهان مشخص شد واسنجی جریان شبیه‌سازی شده در این حوزه به‌طور رضایت بخشی انجام شده است (Karimi, 2014). جانسون و همکاران در حوزه‌ای در کشور سوئد برای شبیه‌سازی ذوب برف به کمک مدل HBV از تصاویر ماهواره‌ای برای سطح پوشش برف استفاده کردند و مشخص شد در این مدل ضرایب عملکرد برای شبیه‌سازی در حالت عدم استفاده از تصاویر نسبت به به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای بهتر بوده است (Johansson et al., 2003). شبیه‌سازی رواناب و سیلاب حاصل از ذوب برف تنها به کمک روابط تجربی از دقت کافی برخوردار نبوده و به‌طور معمول با خطای زیادی روبرو می‌شود. بنابراین، استفاده

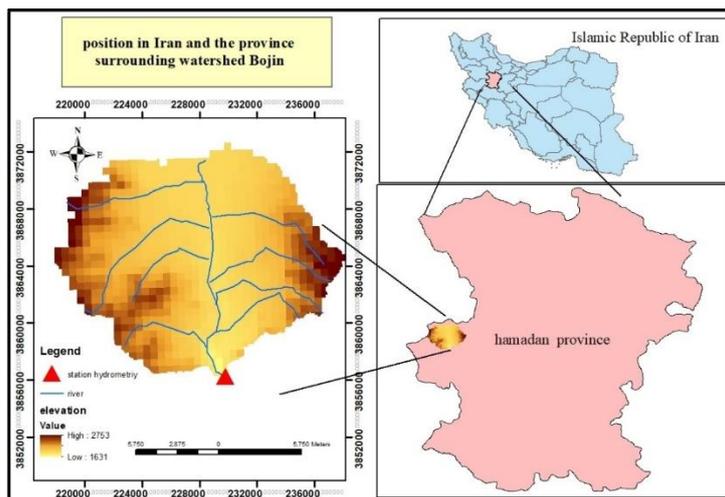


Fig. 1- Bujin watershed in Hamedan province

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز بوجین در استان همدان

ج- پارامترهای مدل شامل ضریب درجه- روز، ضریب رواناب برف و باران، سطح مؤثر بارش، درجه حرارت بحرانی، زمان تأخیر و ضریب فروکش جریان (Tavanpour et al., 2016).

در ابتدا ویژگی‌های حوزه شامل مختصات مرکز ثقل حوزه، مساحت حوزه، درصد جهت شیب، مساحت نواحی ارتفاعی و منحنی ارتفاع- مساحت جهت به دست آوردن ارتفاع متوسط هیپسومتریک حوزه یا نواحی ارتفاعی به کمک نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ و مدل ارتفاعی- رقومی (DEM) منطقه در محیط ArcGIS تهیه می‌شود. داده‌های هواشناسی موردنیاز همانند درجه حرارت در مدل SRM به صورت متوسط روزانه متناظر با ارتفاع متوسط تقسیمات ارتفاعی موردنیاز در این نواحی طبق یک ایستگاه مینا و نرخ کاهش درجه حرارت روزانه تهیه می‌شود. ضمناً می‌توان مقدار ماکزیمم و مینیمم درجه حرارت روزانه را جایگزین درجه حرارت روزانه ایستگاه مینا نمود تا مدل از معادله ۲ مقدار متوسط دمای روزانه را محاسبه نماید:

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2)$$

برای محاسبه درجه حرارت متناظر با متوسط هیپسومتریک محدوده ارتفاعی، معادله ۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\Delta T = \gamma(h_{st} - \bar{h}) \frac{1}{100} \quad (3)$$

که γ گرادیان درجه حرارت و برحسب درجه سانتی‌گراد در ۱۰۰ متر h_{st} ارتفاع ایستگاه مینی و \bar{h} ارتفاع متوسط هیپسومتریک حوزه یا منطقه ارتفاعی هست (Vazifah Dost et al., 2010).

همچنین جهت تعیین دقت مدل لازم است تا دبی اندازه‌گیری شده خروجی حوزه به مدل وارد گردد (Karimi Haji Pamap et al., 2014). محاسبه میزان آب تولیدشده در این مدل در اثر ذوب برف و بارش با استفاده از معادله ۱ انجام می‌شود:

$$Q_{n+1} = [C_{sn} a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \times \frac{A \times 1000}{86400} (1 + K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad (1)$$

در این رابطه: A مساحت حوزه در هر ناحیه ارتفاعی به km^2 ، شماره n روز در یک دوره محاسباتی و $\frac{1000}{86400}$ ضریبی است که واحد Q را از $cm.km^2/day$ به m^3/s تبدیل می‌کند. متغیرهای Q_n : خروجی روزانه برحسب m^3/s ; T: درجه حرارت ایستگاه مینا (سانتی‌گراد)، C_{sn} : ضریب رواناب برف، C_{Rn} : ضریب رواناب باران، ΔT_n : اختلاف درجه حرارت ایستگاه مینا با درجه حرارت نقطه متوسط ارتفاعی زیر حوزه‌ها (درجه سانتی‌گراد)، S_n : نسبت سطح پوشیده شده از برف به کل محدوده، a_n : فاکتور درجه- روز (سانتیمتر بر درجه سانتی‌گراد بر روز): ضریب فروکش و P_n : بارش برحسب سانتی‌متر می‌باشد (Mokhtari Motlagh et al., 2013).

۲-۲-۱- مراحل اجرای مدل

برای اجرای مدل نیاز به داده‌های سه‌گانه ذیل می‌باشد:

- الف- ویژگی‌های فیزیکی (مساحت حوزه یا ناحیه ارتفاعی، منحنی سطح- ارتفاع)
- ب- داده‌های هواشناسی و هیدرومتری (دما، بارش، سطح پوشیده از برف به کمک تصاویر ماهواره‌ای و دبی روزانه)

۲-۱-۱-۱- بارندگی روزانه

بحرانی باشد مدل بارش را برف در نظر می‌گیرد و به برف قبلی اضافه می‌کند که تأثیر آن در رواناب به صورت تأخیری می‌باشد. اگر درجه حرارت بیشتر از درجه حرارت بحرانی باشد مدل بارش را رواناب باران در نظر می‌گیرد که تأثیر آن در رواناب سریع است (Mokhtari Motlagh et al., 2013).

۲-۱-۲-۱- ضریب رواناب کل

ضریب رواناب کل شامل ضریب رواناب مربوط به ذوب برف و ضریب رواناب مربوط به باران طبق تعریف برابر است به نسبت جریان خروجی از حوزه به کل آب حاصل از ریزش باران و ذوب برف می‌باشد و آب قابل دسترس مستقیماً از بارندگی که به شکل باران به سطح زمین می‌رسد تأمین شده و یا از آب حاصل از ذوب برف انباشته می‌شود. هرچند در شرایط بارش باران تفکیک این ضریب به دو بخش مشکل و یا از نظر فیزیکی غیرممکن می‌باشد ولی در شرایط باران و یا ذوب برف مجزا از هم قابل تفکیک می‌باشند. ضریب رواناب به دلیل کمبود داده‌های مشاهده‌ای زمینی بخصوص ناکافی بودن داده‌ها در ارتفاعات برای مدل به صورت سعی و خطا تعیین می‌شود.

۲-۱-۲-۲- ضریب فروکش

ضریب فروکش پارامتر مهمی در مدل SRM می‌باشد زیرا کسر (K) قسمتی از ذوب روزانه می‌باشد که بلافاصله به رواناب تبدیل می‌گردد. به منظور دستیابی به پارامتر K تحلیل تاریخی داده‌های دبی اندازه‌گیری شده روش مناسبی می‌باشد. در این روش مقادیر دبی هر روز Q_{n+1} در مقابل Q_n رسم و خط پوش پایینی بر همه نقاط به عنوان K در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که مقدار K ثابت نبوده و با کاهش دبی مطابق رابطه زیر افزایش می‌یابد.

$$K_{n+1} = xQ_n^{-y} \quad (4)$$

که در رابطه ۴ مقادیر x و y ضرایب ثابت هستند و برای هر حوزه بر اساس داده‌های تاریخی تعیین می‌گردد. در این معادله توان منفی نشان‌دهنده فروکش جریان بوده و لذا مقادیر x و y باید مثبت باشند. متغیر بودن این پارامترها بر اساس رابطه ۵ در حوزه‌های مختلف مورد تأیید قرار گرفته است. این تغییرات دال بر آن است که فروکش از معادله معمول زیر پیروی نمی‌کند:

$$Q_{n+1} = Q_0 K^n \quad (5)$$

ضریب فروکش جریان نشان‌دهنده رفتار حوزه در شرایط عادی ذوب برف است. درحالی‌که برای شرایط بارش سنگین، ورودی‌ها در یک حوزه زمانی کوتاه متمرکز شده و هیدرو گراف جریان با شاخه صعودی حاوی شیب تند و متعاقب آن شاخه نزولی را ایجاد می‌نماید. در این

بارندگی از پارامترهای مهم ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد، که مقادیر آن بر اساس داده‌های مشاهده‌ای ولی محدود برآورد می‌شود. در مدل SRM بارندگی به صورت روزانه مورد نیاز می‌باشد. در این تحقیق به کمک پنج ایستگاه سینوپتیک، تبخیرسنجی و کلیماتولوژی منطقه و پس از آزمون روش‌های مورد استفاده در درون‌یابی داده‌ها از روش Trend Surface توزیع مکانی بارش تعیین و نقشه هم‌باران در محیط GIS ترسیم گردید. همچنین بر اساس نقشه رستری، نقشه بارندگی در کل حوزه در هر روز تهیه و بارندگی متوسط به صورت روزانه استخراج شده است.

۲-۱-۲-۳- سطح پوشش برف

مقدار سطح پوشیده از برف به کل سطح حوزه را نسبت پوشش برف می‌نامند. مقادیر پوشش برف از متغیرهای مهم ورودی به مدل می‌باشد که در مدل SRM به صورت روزانه وارد نرم‌افزار می‌شود. به دلیل وسعت کم منطقه و نیاز به دقت بالا و با توجه به قدرت کم تفکیک مکانی ماهواره‌هایی که با دوره بازگشت کوتاه حرکت می‌کنند از تصاویر MODIS با دوره زمانی یک‌روزه و قدرت تفکیک ۵۰۰ متر استفاده شده است.

۲-۱-۲-۴- نرخ کاهش درجه حرارت نسبت به ارتفاع

نرخ کاهش درجه حرارت نسبت به ارتفاع از جمله پارامترهایی است که بر اساس داده‌های مشاهده‌ای موجود درجه حرارت در ارتفاعات مختلف قابل برآورد می‌باشد. در این تحقیق از اطلاعات روزانه درجه حرارت در ۳ ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان (۱۷۴۰ متر) و تبخیرسنجی خسروآباد (۱۵۱۰ متر) و ایستگاه کلیماتولوژی گردنه اسدآباد (۲۲۴۳ متر) برای محاسبه نرخ کاهش درجه حرارت استفاده شده است.

۲-۱-۲-۵- ضریب درجه-روز

ضریب درجه-روز که در مدل SRM دارای بعد سانتیمتر بر درجه سانتی‌گراد در روز می‌باشد و تعداد درجه-روز را به عمق آب روزانه ذوب برف (سانتیمتر) تبدیل می‌کند.

۲-۱-۲-۶- درجه حرارت بحرانی

درجه حرارت بحرانی برای تعیین برف یا باران بودن بارش به کار می‌رود. مدل رواناب ذوب برف به درجه حرارت بحرانی در دو فصل بارش و ذوب برف نیاز دارد. اگر درجه حرارت در متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوزه یا هر یک از ناحیه‌های ارتفاعی، کمتر از دمای

۳-۲- تئوری و ساختار مدل HBV

مدل HBV در موسسه هواشناسی و هیدرولوژیکی سوئد در اوایل سال ۷۰ میلادی توسعه داده شد (برگستروم، ۱۹۷۶). این مدل برای طیف وسیعی از حوزه‌ها با شرایط اقلیمی گوناگون استفاده می‌شود. این مدل برای پیش‌بینی سیلاب و ارزیابی منابع آب در کشورهای اسکاندیناوی به کار می‌رود. مدل HBV یک مدل مفهومی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوزه است و در حکم مدلی نیمه توزیعی با تقسیم حوزه به چندین زیر حوزه، قابل اجرا است (Yaghoubi and Mashane Boani, 2014). نسخه استفاده شده در این تحقیق HBV-light-GUI ورژن ۴,۰,۰,۱ سال ۲۰۱۰ توسعه یافته توسط سیلبرت^۳ می‌باشد. ساختار این مدل طبق شکل ۲ شامل مراحل توزیعی روال برف، روال خاک، مرحله مفهومی عکس‌العمل حوزه (فرآیند هیدرولوژیکی تولید رواناب) و روندیابی حوزه است (Driessen et al., 2010).

۱- زیرمدل برف: در این مرحله بارش در دمای کمتر از دمای آستانه تعیین شده (T_T) به صورت برف لحاظ می‌شود. محاسبه ذوب برف به روش ساده درجه-روز طبق روابط زیر می‌باشد:

$$\text{Melt} = C_{\text{FMAX}} (T(t) - T_T) \quad (8)$$

$$\text{Refreezing} = C_{\text{FR}} \cdot C_{\text{FMAX}} (T_T - T(t)) \quad (9)$$

که در آن Melt مقدار ذوب برف بر حسب میلیمتر در روز، C_{FMAX} فاکتور درجه-روز بر حسب میلیمتر بر روز بردرجه سانتیگراد، T_T دمای آستانه ذوب، T(t) میانگین دمای روزانه و C_{FR} ضریب تصحیح انجماد آب ذوب شده و Refreezing آب یخ زده داخل توده برف است.

۲- زیرمدل خاک: این قسمت تغذیه آب زیرزمینی و تبخیر واقعی به صورت تابعی از ذخیره واقعی آب شبیه‌سازی می‌شود. این قسمت اصلی‌ترین بخش کنترل رواناب است و دارای ۵ پارامتر به شکل زیر است:

$$\frac{\text{recharge}}{p} = \left(\frac{S_{\text{sm}}}{FC}\right) \text{BETA} \quad (10)$$

که در رابطه ۱۰ پارامتر BETA سهمی از رواناب (تابع عکس‌العمل یا افزایش رطوبت خاک) است که هر میلی‌متر بارش یا ذوب برف را کنترل می‌کند، FC حداکثر ظرفیت ذخیره رطوبت در خاک و recharge تغذیه (ورودی آب به خاک) است. همچنین S_{sm} ذخیره واقعی خاک و p مجموع بارش (باران و برف) است.

۳- تابع عکس‌العمل (پاسخ): در این مرحله رواناب و دبی در خروجی زیر حوزه‌ها محاسبه می‌شود. با فرض دو لایه خاک، بارش ورودی در حالت‌های زیر بر طبق معادله ۱۱ بصورت رواناب از آنها خارج می‌شود: اگر پارامتر آستانه از حالت ذخیره تجاوز کند مازاد آن با ضریب ذخیره

مدل برای بارش‌های بیش از ۶ سانتیمتر از رابطه ۶ برای محاسبه ضریب فروکش استفاده می‌شود:

$$K_{n+1} = x(4Q_n)^{-y} \quad (6)$$

به منظور محاسبه پارامترهای x و y روش دیگری نیز طبق معادله ۷ ارائه شد (Li and Williams, 2008):

$$\ln Q_{n+1} = \ln X + (1-Y) \ln Q_n = a + b \ln Q_n \quad (7)$$

در صورتی که دبی‌های فروکش ln Q_n را در مقابل Ln Q_{n+1} رسم کنیم، با برازش رگرسیون خطی به نقاط و استفاده از معادله بالا X و Y به صورت زیر تعیین می‌شوند. با توجه به معادله بالا b=1-Y و a=Ln(X) است. کاربرد X و Y در تعیین دبی در دوره‌ی بدون بارندگی است. این پارامترها از داده‌های تاریخی دبی به دست می‌آیند و مربوط به دبی‌های روزانه دو دوره‌ی فروکش جریان می‌باشند (Tavanpour et al., 2016).

۲-۲-۱-۸- زمان تأخیر

زمان تأخیر را می‌توان بر اساس خصوصیات نوسانات روزانه رواناب حاصل از ذوب برف به طور مستقیم از هیدروگراف جریان سال‌های گذشته تعیین نمود. به عنوان مثال، اگر دبی هرروز در حوالی ظهر شروع به افزایش نماید، تأخیر دبی نسبت به درجه حرارت حدود شش ساعت می‌باشد. ولی به هر حال، به طور معمولی دبی در دوره زمانی نیمه‌شب تا نیمه‌شب گزارش می‌شود و برای مقادیر شبیه‌سازی شده نیاز به تطبیق دارد (Mokhtari Motlagh et al., 2013).

۲-۲-۱-۹- سطح فعال بارش باران

سطح فعال بارش باران در تبدیل بارش به رواناب مهم می‌باشد. زمانی که بارش بر اساس درجه حرارت بحرانی به صورت باران می‌باشد، دو نوع رفتار قابل وقوع می‌باشد. رفتار نوع اول هنگامی است که باران بر روی برف پشته می‌بارد و به دلیل رطوبت پایین و نیز عمق زیاد برف پشته در آن نگهداری می‌شود. در این صورت رواناب ناشی از باران فقط در بخشی از حوزه که فاقد پوشش است شکل می‌گیرد. در این صورت سطح فعال باران به نسبت سطح پوشش برف کاهش می‌یابد. در حالت دوم برف انباشته رسیده است و در نتیجه دارای شرایط اشباع از رطوبت بوده و به همان میزان بارش باران بر سطوح برفی آب از آن خارج می‌گردد. بنابراین تمامی آب باران به آب حاصل از ذوب برف اضافه می‌گردد. سطح بارش باران مستقیماً توسط کاربر برای مدل تعیین می‌شود (Tavanpour et al., 2016).

پیش‌بینی عبارتست از $e=Q_0-Q_S$ بنابراین برای یک دوره زمانی و برای n مقدار پیش‌بینی شده، معیارهای سنجش پیش‌بینی عبارتند از:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_S)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \bar{Q}_0)^2} \quad (12)$$

$$MSE = \frac{1}{n} |\sum Q_0 - Q_S|^2 \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} |\sum (Q_S - Q_0)| \quad (14)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_S - Q_0)^2}{\sum (Q_0 - \bar{Q}_0)^2} \quad (15)$$

در این روابط R^2 : معیار تبیین مدل، MSE: معیار میانگین مجذور خطا پیش‌بینی شده، MAE: معیار میانگین خطای مطلق و NS: معیار نش-ساتکلیف می‌باشد. مقادیر معیارهای NS و R^2 هرچه به عدد یک نزدیک‌تر و مقدار MSE و MAE به عدد صفر نزدیک‌تر شوند نشان‌دهنده تناسب بهتر بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی‌شده می‌باشد (Niromandfar et al., 2017).

۴- نتایج و تحلیل نتایج

پس از تعیین خصوصیات فیزیکی حوزه نظیر مساحت، ارتفاع متوسط و درصد شیب در جهت‌های مختلف جغرافیای، نسبت به تهیه تصاویر ماهواره‌ای MODIS جهت تعیین مقادیر مساحت پوشش برف و درصد آن نسبت به کل حوزه اقدام شد. نتایج تغییرات سطح پوشش برف حاصل از داده‌های ماهواره‌ای با اطلاعات ثبت‌شده میزان آبدهی در ایستگاه بوجین با گام‌های زمانی روزانه در دوره زمانی آذرماه ۱۳۸۷

K_0 از لایه اول خارج می‌شود. همچنین در صورتی که پارامتر آستانه از حالت ذخیره کمتر باشد خروج رواناب از لایه اول با ضریب ذخیره سریع K_1 اتفاق می‌افتد و در نهایت نفوذ مازاد آب به لایه دوم خاک با نرخ ثابت به صورت رواناب با توجه به ضریب ذخیره آهسته این لایه K_2 خارج می‌گردد:

$$Q(t) = K_2 SLZ + K_1 SUZ + K_0 \max(SUZ - UZL, 0) \quad (11)$$

که در آن: SUZ ذخیره در لایه بالایی بر حسب میلیمتر، SLZ ذخیره در لایه پایینی بر حسب میلیمتر، K ضرایب ذخیره، UZL پارامتر آستانه بر حسب میلیمتر و $Q(t)$ دبی رواناب ترکیبی (جزیی) بر حسب میلیمتر بر روز می‌باشد (Martinez et al., 2008).

۴- زیرمدل روندیابی: برای روندیابی جریان رواناب خروجی در این مدل از یک تابع وزن مثلثی به کمک پارامتر MAXBAS جهت شبیه‌سازی با مقادیر متفاوت این پارامتر (حداکثر ۵ روزه) استفاده می‌شود (Driessen et al., 2010). کلیات روند هیدرولوژیکی این مدل در شکل ۲ آورده شده است.

۳- ارزیابی مدل‌ها

برای سنجش انطباق یک پیش‌بینی با یک الگوی داده سری زمانی، از معیارهای سنجش خطای پیش‌بینی استفاده خواهد شد، اگر Q_S و Q_0 نشانگر مقدار واقعی و پیش‌بینی شده متغیر در زمان t باشد خطای

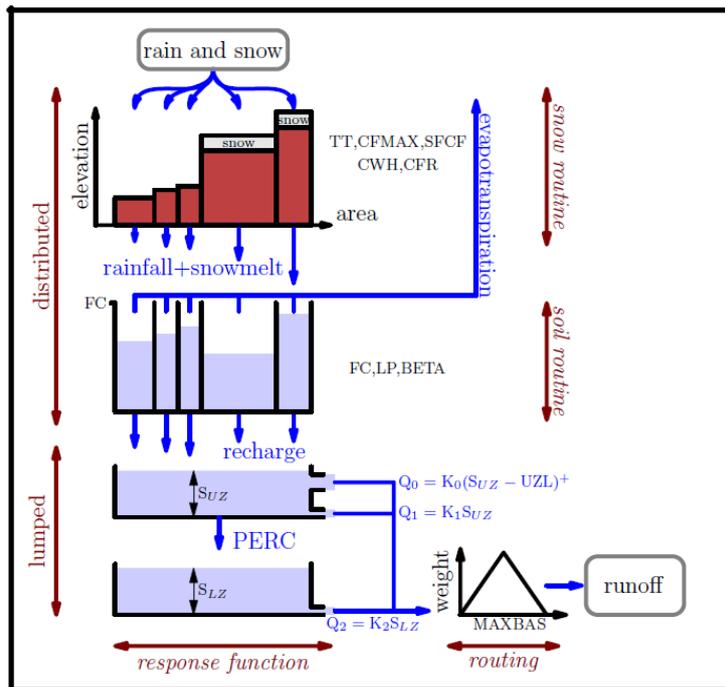


Fig. 2- Structure of HBV model (Driessen et al., 2010)
شکل ۲- ساختار کلی مدل HBV (Driessen et al., 2010)

مقدار و شدت ذوب برف در دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده کاملاً مشهود است.

در ادامه داده‌های مشاهده‌ای روزانه دما، بارندگی و سطح پوشش برف به‌عنوان ورودی مدل SRM و همچنین پارامترهای موردنیاز مدل جهت واسنجی در محیط نرم‌افزار وارد گردید. جهت به دست آوردن نتایج مناسب ارزیابی مدل در مرحله واسنجی برای سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ اقدام به تعیین مقادیر پارامترهای مدل گردید. همچنین اعتبارسنجی مدل به کمک مقادیر آماری سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و مقادیر بهینه‌شده پارامترهای مرحله واسنجی، صورت گرفت که مقدار ضرایب R^2 و NS در این مرحله به ترتیب در کلاس خوب و خیلی خوب قرار گرفت (Mohammadi et al., 2015). طبق اشکال ۷ تا ۹ بیشترین انطباق هیدروگراف سیلاب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو مدل در زمان پیک سیلاب و کمترین انطباق زمانی در زمان ذوب برف اتفاق می‌افتد (دبی رودخانه ناشی از جریان پایه است).

تا اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۸۸ نشان داد که تغییرات سطح پوشش برف با میزان آبدهی روند خاصی را دنبال نمی‌کنند، اما به‌صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت که کاهش سطح برف در اواخر فصل زمستان با افزایش میزان آبدهی رودخانه همراه بوده است. هرچند که سهم بارندگی نیز در افزایش آبدهی رودخانه قابل توجه می‌باشد. در شکل ۳ میزان سطح برف محاسبه‌شده در سطح حوزه بر اساس تصاویر مودیس در محیط ArcGIS در کنار آبدهی نشان داده‌شده است. با کاهش سطح برف و افزایش دما در بهار، آبدهی ایستگاه هیدرومتری بوجین افزایش می‌یابد که نشانگر ذوب برف می‌باشد.

شکل ۴ روند ذوب برف در تصاویر ماهواره‌ای در یک دوره زمانی از سال ۱۳۸۷ در آبدهی ایستگاه بوجین را نشان می‌دهد. همچنین طبق شکل ۵ شدت تغییرات کاهشی و یا ناگهانی سطح پوشش برف در فصول گرم خصوصاً از اواخر اسفندماه افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۶ در مقطع زمانی بهار مشخص است با افزایش دما تأثیر

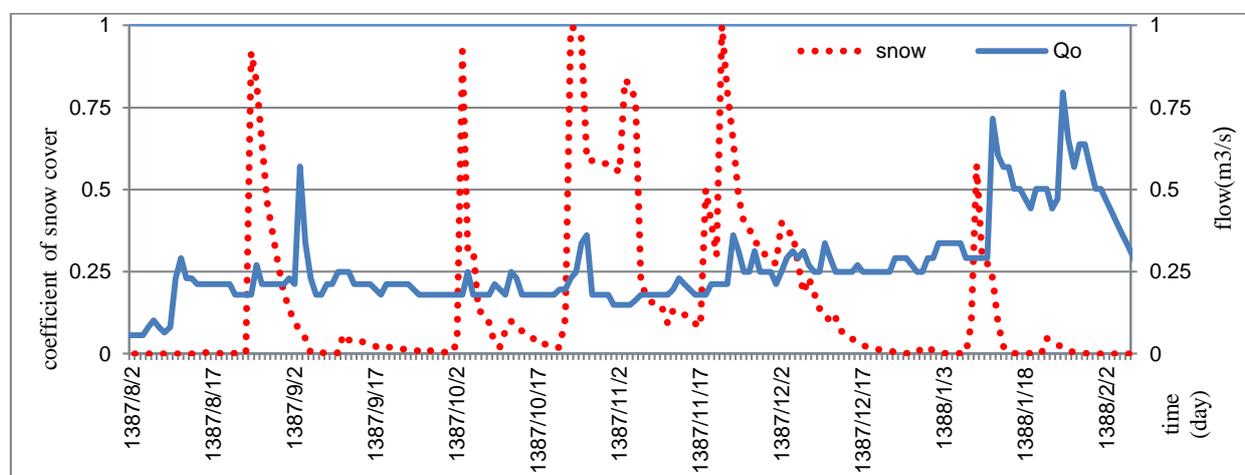


Fig. 3- Daily distribution coefficient of snow cover relative to daily flow

شکل ۳- توزیع روزانه ضریب پوشش برف نسبت به دبی روزانه

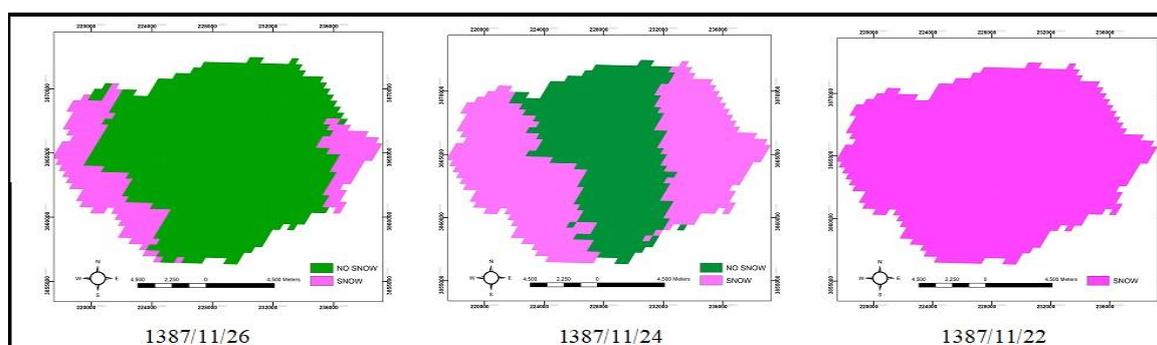


Fig. 4- Daily sequence of snow covering in January of 2009-2010 water year

شکل ۴- توالی روزانه پوشش برف در بهمن‌ماه سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷

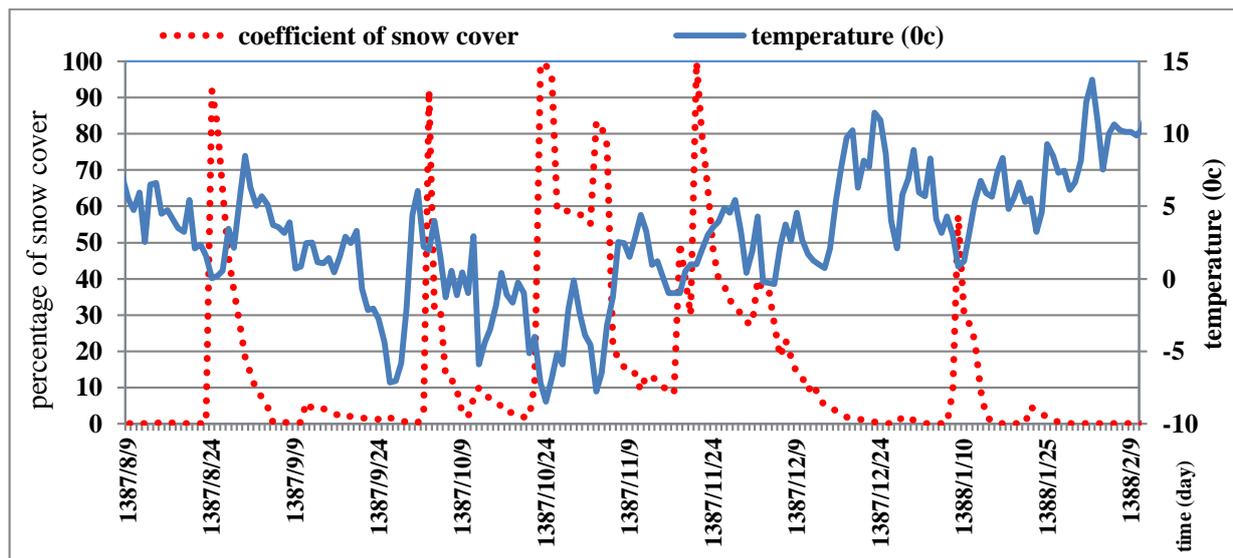


Fig. 5- Daily chart of snow cover percentage relative to daily temperature in the Bujin Watershed

شکل ۵- نمودار روزانه درصد پوشش سطح برف نسبت به دما روزانه در حوزه آبخیز بوجین

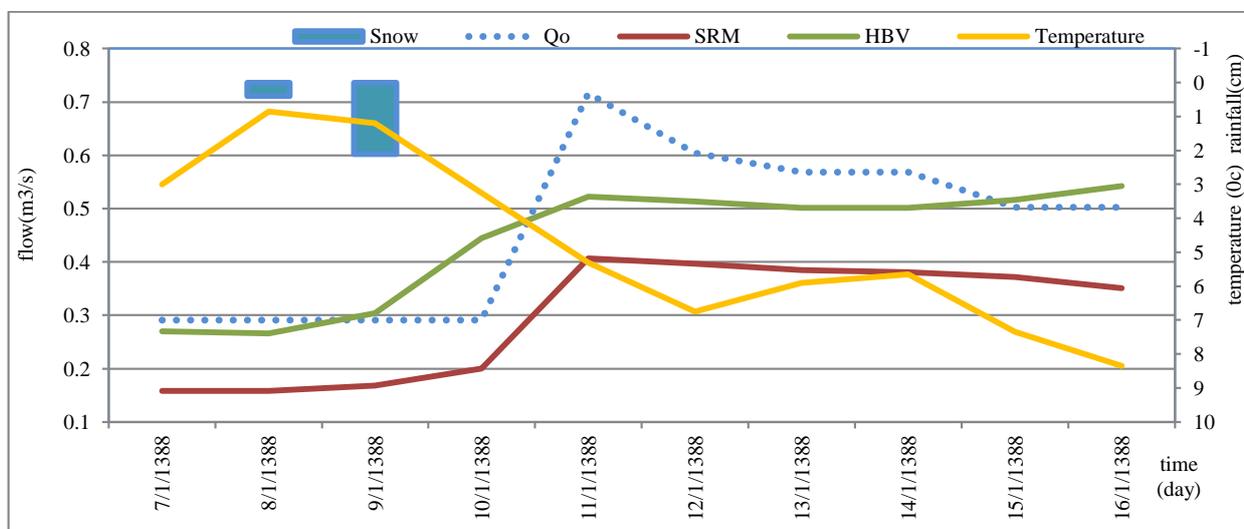


Fig. 6- Observed and simulated daily flow using SRM and HBV models in April 2010

شکل ۶- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل‌های SRM و HBV در فروردین‌ماه سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸

فروردین تا اردیبهشت‌ماه مشاهده شده است که این امر به دمای حوزه و میزان بارش در حوزه بستگی دارد.

نمودار هیدروگراف خروجی در شروع ماه‌های گرم (فروردین تا اردیبهشت‌ماه) مؤید این مطلب است که عمده حجم رواناب سالانه حاصل از ذوب برف می‌باشد و افتادگی هیدروگراف شبیه‌سازی شده در ماه‌های سرد سال (آذر تا اوایل ماه اسفند) نیز می‌تواند به این دلیل باشد که مدل بارش وارده را به‌صورت برف محاسبه نموده است. میزان جریان شبیه‌سازی شده و میزان رواناب مشاهداتی در فصل ذوب و بعد از آن تطابق قابل قبولی دارد. تغییرات رواناب مشاهداتی نسبت به

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد ضرایب همبستگی در دو روش R^2 و NS برای دبی شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی به‌طور میانگین معادل ۰/۷ برای مدل SRM و ۰/۶ برای مدل HBV می‌باشد.

همچنین مدل قادر است جریان شبیه‌سازی شده و جریان مشاهداتی را به‌صورت گراف خروجی نمایش دهد که به لحاظ بصری نیز می‌توان نتیجه گرفت که مدل در فرآیند شبیه‌سازی جریان موفق عمل کرده است. با توجه به شکل ۷، ۸ و ۹ تأثیر ذوب برف در سال خشک (سال ۱۳۸۷) در آبدهی ایستگاه بوجین در اسفندماه مشاهده می‌شود درحالی‌که در سال‌های دیگر، بیشترین تأثیر ذوب بر آبدهی در ماه‌های

Table 1- The results of the evaluation of observed and simulated criteria in the SRM HBV models

جدول ۱- نتایج معیارهای ارزیابی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل SRM و HBV

Model	Parametr	Calibration 2008-2009	Validation 2009-2010
SRM	R ²	0.7094	0.717
	NS	0.7024	0.711
	MAE	0.011	0.00046
	MSE	0.00647	0.0483
HBV	R ²	0.615	0.69
	NS	0.56	0.61
	MAE	0.03	0.083
	MSE	0.00949	0.0646

شبیه‌سازی شده در ماه‌های پایانی دوره می‌تواند در اثر فعالیت‌های آبیاری داخل حوزه و کمبود ناشی از تبخیر و تعرق باشد. مدل SRM به ضریب فروکش جریان و نرخ کاهش دما با ارتفاع، حساس می‌باشد. لذا محاسبه دقیق آن در ارتقاء دقت شبیه‌سازی صورت گرفته به وسیله مدل مؤثر خواهد بود. بنابراین لازم است تا به دقت مورد واسنجی قرار گیرند. همچنین با توجه به حساسیت دو مدل به فاکتور درجه- روز لازم است برای تخمین دقیق این فاکتور، اطلاعات نسبتاً دقیقی از منطقه تهیه گردد. جدول ۱ نتایج معیارهای ارزیابی جریان شبیه‌سازی شده مدل SRM و HBV در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج مدل HBV نیز با دقت رضایت- بخشی شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف را انجام داد. به طوری که ضریب تبیین (R²)، معیار نش- ساتکلیف (NS)، معیار میانگین مجذور خطا و میانگین خطای مطلق برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در این مدل مطلوب اما کمتر از مدل SRM به دست آمد.

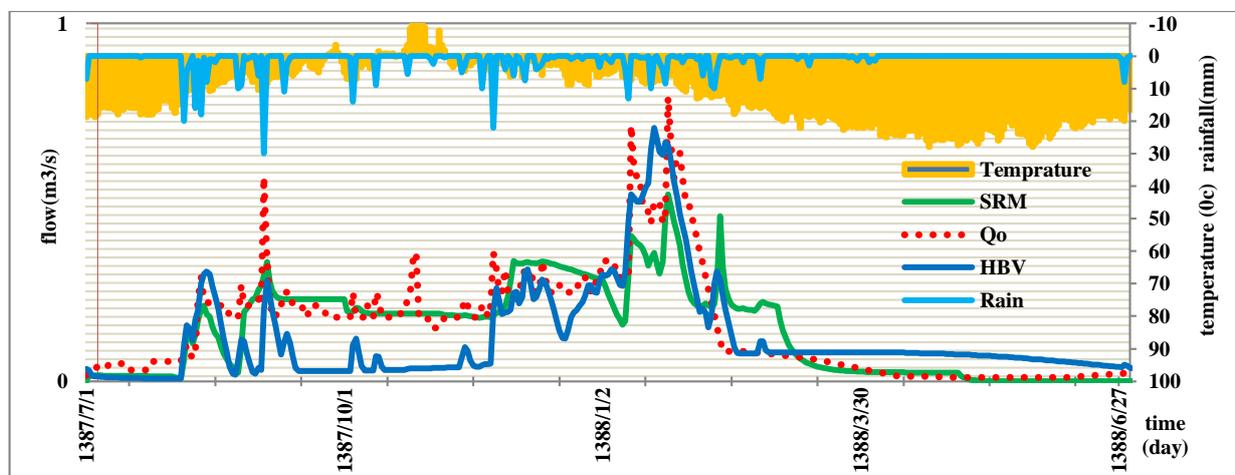


Fig. 7- Snow melting simulation by SRM and HBV models in water year 2009-2010 (calibration period)
شکل ۷- شبیه‌سازی ذوب برف توسط مدل SRM در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ (دوره واسنجی)

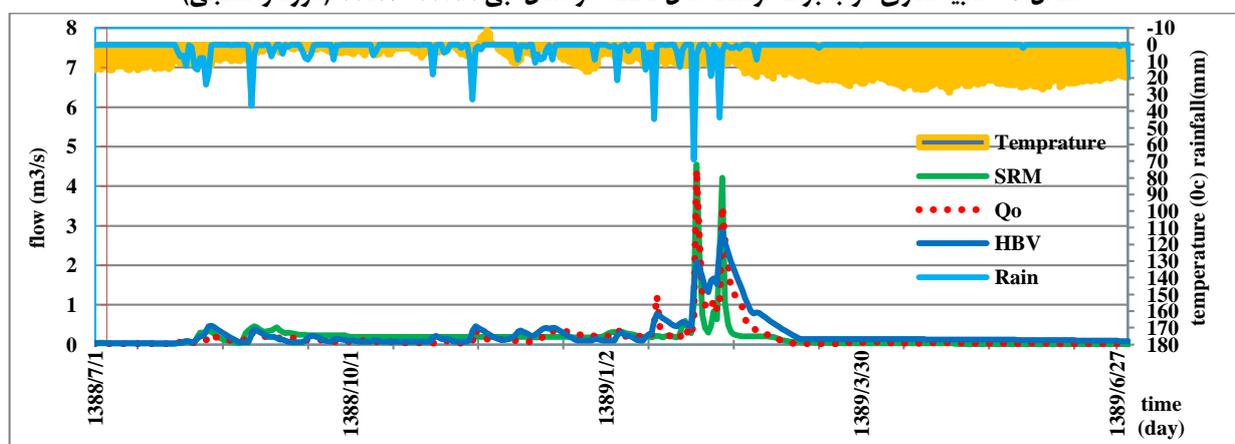


Fig. 8- Snow melting simulation by SRM and HBV models in water year 2010-2011 (validation period)
شکل ۸- شبیه‌سازی ذوب برف توسط مدل‌های SRM و HBV در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹ (دوره اعتبارسنجی)

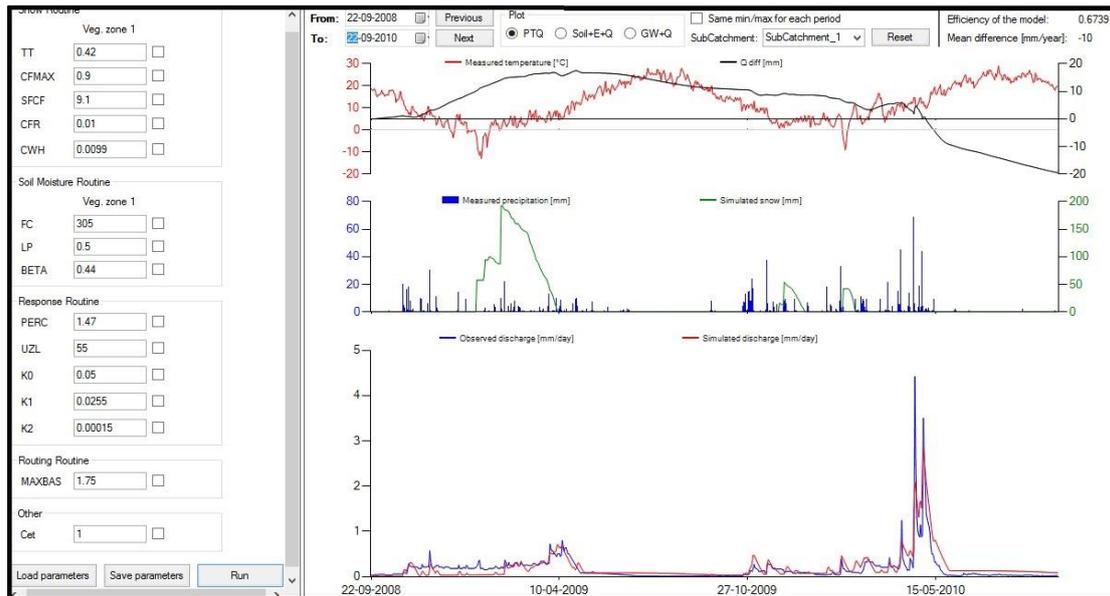


Fig. 9- Simulation of runoff and snow melting in the statistical period of 2009-2011 in HBV model

شکل ۹- شبیه‌سازی رواناب و ذوب برف در دوره آماری ۱۳۸۹-۱۳۸۷ در مدل HBV

و (2011) Fattahi et al. در حوزه آبخیز بازفت در فریدن، (2015) Jahanbakhsh et al. در حوزه آبخیز شهرچای ارومیه، (2016) NazmFarh et al. در حوزه آبخیز دهگلان، کارایی این مدل‌ها در نقاط مختلف را نشان می‌دهد.

۵- جمع‌بندی

این تحقیق به منظور تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی ذوب برف با استفاده از مدل SRM و HBV در مقیاس زمانی روزانه صورت گرفته است. پس از تهیه اطلاعات فیزیکی حوزه و آمار هواشناسی و هیدرولوژیکی و تصاویر ماهواره‌ای اقدام به ورود پارامترهای مورد نیاز مدل به نرم‌افزار WINSRM.V.1.12 و HBV-light-GUI و اجرای برنامه گردید. برای ارزیابی کارایی مدل‌ها در دوره اعتبارسنجی از ضرایب اصلاح شده دوره واسنجی استفاده شد و نتیجه کار توسط مشاهده انطباق هیدروگراف شبیه‌سازی شده با مشاهداتی و همچنین با معیارهای ارزیابی (NS و R²) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی نمودار شبیه‌سازی با مشاهداتی و مقادیر معیار ارزیابی برابر ۰/۷ در مدل SRM نشان از انطباق خیلی خوب دو هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی دارد. همچنین با توجه به مقادیر معیار ارزیابی NS در مدل HBV شبیه‌سازی در این مدل در کلاس خوب قرار می‌گیرد. کارایی خوب مدل SRM را با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی ارائه شده، می‌توان به استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (تصاویر یک‌روزه MODIS) به‌عنوان ورودی‌های مدل نسبت داد. همچنین می‌توان گفت که مدل SRM در حوزه‌های آبخیزی که برف عمده آورد سالانه حوزه را به

صرف‌نظر از دقت بالای مدل SRM یکی از نقاط قوت این مدل، استفاده از اطلاعات واقعی و قابل‌اندازه‌گیری در حوزه و داده‌های مساحت سطح پوشش برف است که از تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید. در صورتی که در مدل HBV از داده‌های کمتر و قسمتی از پارامترها و ضرائب مدل نیز با سعی و خطا به دست می‌آید که در نتیجه دقت مدل را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که مقدار کل رواناب در منطقه‌ی مورد مطالعه با مدل SRM، معادل با $5/64 \times 10^6$ مترمکعب بود. درحالی‌که این رقم با مدل HBV معادل با $8/3 \times 10^6$ مترمکعب به دست آمد. با مقایسه‌ی این ارقام با مقدار مشاهداتی (یعنی $5/66 \times 10^6$ مترمکعب) می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مدل SRM در مقایسه با مدل HBV کاملاً خوب بوده است.

این نتایج با تحقیقات (Swamy and Brivio, 1996) در حوزه کوردول ایتالیا (Schaper et al., 2000)، در سه حوزه در جنوب سوئیس (Emre et al., 2005)، در حوزه‌های شرق ترکیه (Martinec et al., 2008) در آرژانتین (Sorman et al., 2009)، در آبخیز رودخانه تاش‌کورگان چین با استفاده از مدل SRM (Shalamu et al., 2012) در آبخیز رودخانه تاش‌کورگان چین با استفاده از مدل SRM (Yonggang Ma et al., 2013) و در حوزه کایدو در شمال غرب چین با استفاده از مدل SRM هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج پژوهش‌های انجام گرفته جهت شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف به کمک مدل SRM در داخل کشور نظیر تحقیقات (Najafi Iqdir et al., 2004) در حوزه آبخیز مهاباد، (Najafi Iqdir et al., 2007) در حوزه شهر چای ارومیه، (Vazifah Dost et al., 2010)

- Emre AZ, Akyu AS, Ormanc A, Ensoyc S, and Orman AU (2005) Using Modis snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment* (97):216-230
- Fathizadeh A, Mahdavi M, Bills R, Abarkar AA, and Askarizhrazi H (2009) Evaluation of comparison of day and time version of SRM model in snowmelt runoff replication. *Journal of Natural Resources Iran* 62(1):10-99 (In Persian)
- Fattahi I, Delavar M, and Ghasemi E (2011) Snow melt runoff simulation in mountainous areas using SRM model (Case study of Bazoft Watershed Area). *Geographic Applied Research Journal* 2(23) (In Persian)
- Ghanbarpour MR, Saghafian B, Mohseni Saravi M, and Abbaspour KC (2007) Evaluation of spatial and temporal variability of snow cover in a large mountainous basin in Iran. *Nordic Hydrology* 38(1):45-58
- Lindström G, Johansson B, Persson M, Gardelin M, and Bergström S (1997) Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* 201:272-288
- Li X and Williams MW (2008) Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed. *Tarim Basin China, Hydrological Processes* 22:3931-3940
- Jahanbakhsh ASL S, DinPajouh Y, and Avaznejad MH (2015) Comparison of SRM and HEC-HMS models in simulation of snowmelt runoff in Urmia Shahrechai basin. *Journal of Hydrogeomorphology, Tabriz University* 2(5):171 (In Persian)
- Johansson B, Andreasson J, Rango A, and Jansson j (2003) Satellite data on snow cover in the HBV model Method development and evaluation. *Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Hydrology* 90
- Karimi S (2014) The efficiency of HVB model in investigating climate change effects on hydrological drought in Zayanderood Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Iranian* 2(8) (In Persian)
- Karimi Haji Pump H (2014) Comparison of the efficiency of WetSpa and SRM Physical models in snow melt runoff simulation and evaluation of the results of the experimental melting of snow with WetSpa model in Hero Basin- Dehno in Lorestan province. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University (In Persian)
- Martinez J, Rango A, and Roberts R (2008) Sownmelt runoff model users manual (WINSRM).
- Masih I, Uhlenbrook S, Maskey S, and Ahmad MD (2010) Regionalization of a conceptual rainfall-
خود اختصاص داده است توانایی شبیه‌سازی جریان رواناب حاصل از ذوب برف را دارد. بنابراین کارایی بهتر مدل SRM نسبت به مدل HBV در این تحقیق ثابت شد که لازم است جهت تعمیم نتایج به سایر حوزه‌های مشابه و حصول نتایج دقیق‌تر، عملیات واسنجی به‌صورت درازمدت انجام پذیرد. با توجه به نتایج این پژوهش و نتایج سایر محققین در زمینه کارایی مدل SRM و HBV می‌توان اظهار داشت که در صورت موجود بودن داده دقیق از پارامترهای فیزیکی و هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز برف‌گیر کشور، این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی جریان و برآورد رواناب به‌صورت قابل قبول می‌باشند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Snowmelt Runoff Model
- 2- Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
- 3- Bergstrom
- 4- Seibert

۶- مراجع

- Abudu S, Cul CL, Saydi M, and Phillip King j (2012) Application of snowmelt runoff model (SRM) in mountainous watersheds. *Water Science and Engineering* 5(2):123-136
- Akbari M, Ranayi A, Mirza Khan H, Darghi A, and Jirga MR (2015) Snow melt runoff estimation using SRM model and comparison with ANFIS model and ANN neural network (Case study: Kardeh Dam Basin). *Journal of Science and Agriculture* 6(30):1794-1807 (In Persian)
- Bergstrom S (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. *Bulletin Series, Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology* 52:134
- Dahri ZH, Ahmad B, Leach JH, and Ahmad S (2011) Satellite-based snow cover distribution and associated snowmelt runoff modeling in Swat River Basin of Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences* (48):9-32
- Driessen TLA, Hurkmans RTWL, Terink W, Hazenberg P, Torfs PJF, and Uijlenhoet R (2010) The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Science* (14):651-665
- Ebrahimi M, Hamzeh H, and Maroufi S (2016) Surface coating and runoff modeling by snow melting using combined hydrological model of SRM and satelliteimages. *Journal of Water Engineering and Irrigation* 6(23) (In Persian)

- National Soil Conference, Sustainable Agriculture, Malayer University (In Persian)
- Porhamat J, Saghafian B, and Sedghi H (2005) Application of SRM model in simulation of snowmelt runoff using satellite data in snowless areas (Case study in Khorasan-Karoon area). *Iran-Water Resources Research* 1(1):1:11 (In Persian)
- Rashidi M, Haji Beygloo M, Sarbazi M, and Ghaderi M (2017) Estimation of snowmelt runoff in the catchment waters of North Khorasan Province using WINSRM model (Case study: Damand Sameghan Watershed Basin). *Shahid Chamran University of Science and Engineering* 2(40):171-159 (In Persian)
- Schaper J and Seidel K (2000) Modeling daily runoff from snow and glacier melt using remote sensing data. *Proceedings of EARSeL-SIGWorkshop Land Ice and Snow, DresdenFRG10*
- Seibert J (1997) Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nord. Hydrol* 28:247-262
- Seibert J and Vis MJP (2012) Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Science* 6:3315-3325
- Seidel K and Martinec J (2004) Hydrological applications of satellite snow cover mapping in the Swiss Alps. Paper presented at the Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space
- Sorman AA, Sensoy A, Yamankurt E, and Gozel E (2009) modelling and forecasting snowmelt runoff process using the HBV model in the eastern part of Turkey. *Hydrological Processes* 23(7):1031-1040
- Sorman AA, Sensoy A, Yamankurt E, and Gozel (2012) A comparison of SRM and HBV models for real time runoff forecasting in the Upper Euphrates Basin Turkey. *Geophysical Research Abstracts* 14:780
- Swamy AN and Brivio PA (1996) Hydrological modeling of snowmelt in the Italian Alps using visible and infrared remote sensing. *Journal of Remote Sensing* 17(16):3169-3188
- Tavanpour Ni and Tavanpour Na (2016) Snow melt runoff estimation using SRM model and geotechnical data measurement technology (Case study: Six Pan Dam Basin). *Fourth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Urban Architecture and Management, Tehran* (In Persian)
- Vazifah Dost M, SamiPour F, Ashrafzadeh A, and Musavi SA (2010) Determination of the share of runoff from Snow Melt in polroad watershed. *Company of Water Gilan, Abanjan Kavosh Hamoon Co.* (In Persian)
- runoff model based on Similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin. *Iran, Journal of Hydrology* 391:188-201
- Ma Y, Huang Y, Chen Xi, Li Y, and Bao A (2013) Modelling snowmelt runoff under climate change scenarios in an ungauged mountainous watershed. *Northwest China, Mathematical Problems in Engineering* 2013
- Mir Yaghoubzadeh MH and Ghanbarpour MR (2010) Application of snow covering using MODIS satellite images in modeling of snow melt runoff (Case study of Karaj Dam Basin). *Journal of Geosciences* 19(76):141-148 (In Persian)
- Mir Yaghoubzadeh MH, Ghanbarpour MR, and Habibnejad Roshan M (2011) Modeling of flood melt flow using hydrological model of runoff from snow melt (Case study: Karaj Dam Basin). *Journal of Water Resources Research* 7(3) (In Persian)
- Mohammadi M, Zeinidand H, Moradi H, Pour Ghasemi H, and Faraz Joo H (2015) Investigating the effects of land use on runoff production using the WetSpa model. *Journal of Eco-Hydrology* 4(2) (In Persian)
- Mokhtari Motlagh P, Javani B, and Sharifian H (2013) Estimation of seasonal snow melt runoff using SRM model- Case study: Ziarat Basin in Golestan Province. *First National Conference on Water and Agriculture Resources Challenges* (In Persian)
- Najafi Iqdir A, Ghodousi j, Saghafian B, and Porhamat j (2007) Estimation of snow melt runoff using remote sensing and geographic information system in the urmia township. *Journal of Resource and Planning* 76(20) (In Persian)
- Najafi MR, Sheikhi-Vand j, and Porhamat j (2004) Seasonal snow melt runoff estimation in the snow flood areas using the SRM model (Mahabad Dam Basin). *Journal of Agricultural and Natural Resources* 11(3) (In Persian)
- NazmFarh H and Moradi M (2016) Snow melt runoff simulation using remote sensing data (Case study: Dehgholan Water Basin). *Journal of Geography and Planning* 20(55):289- 273 (In Persian)
- Niromandfar F, Zakiri Nia M, and Yazrlou B (2017) The effect of climate change on the flow of the river using the HBV-Light runoff model (Case study of Mohammad Abad Basin in Golestan province). *Journal of Irrigation and Water Watering* 7(28):152-162 (In Persian)
- Nouri H (2012) Simulation of snow flood runoff and sediment discharge using SRM model combination and statistical model in Sardarabad watershed.

Zeinivand H and De Smedt F (2009) Hydrological modeling of snow accumulation and melting on river basin scale. *Water Resources Management* 23(11):2271-2287

Yaghoubi M and Mashane Boani A (2014) Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins (Case study: Herat-Yazd High Zone). 40(2):153-172 (In Persian)