



Snow Melt River Flow Modeling Using SRM Model (Case Study: Karaj Dam Basin)

M. Miryaghoobzadeh^{1*}, M. R. Ghanbarpour²
and M. Habibnejad Roshan³

Abstract

Snowfall is one important form of precipitation in hydrology cycle in mountainous basin which plays reliable role on agricultural and domestic water supply in low and high flow seasons as well as on energy production. The main objective of hydrological modeling in watersheds is the better understanding of the hydrology cycle including governing processes in water cycle. Snow covered area is a basic parameter in global hydrology cycle and climatology. In this research snow melt runoff was simulated in Karadj dam watershed, using SRM model in water year 2001-2002 and validated for water year 2002-2003. SRM, a degree-day model which simulates snow melt runoff, needs 14 parameters and variables. These include rain, temperature, discharge, daily surface of snow, recession curve, snow and rain runoff coefficients, and degree-day factor. Model also needs physical parameters such as elevation boundary. Temperature and rain were distributed using gradient equation in elevation boundaries. Also physical parameters of the watershed were added to the model using geographic information system. The R^2 and the deviation of the runoff volume in 2001-2002 were calculated as 0.4678, 0.1292%, respectively. These values for 2002-2003 are 0.935, 6.7736%, respectively. SRM model can effectively be used to modeling of snow melt runoff.

Keywords: Snow, Modeling, Precipitation, SRM, Watershed, Karadj basin.

Received: January 28, 2008

Accepted: June 21, 2011

مدل سازی جریان ناشی از ذوب برف با استفاده از مدل هیدرولوژیکی رواناب حاصل از ذوب برف (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد کرج)

میرحسین میریعقوب زاده^{۱*}، محمدرضا قنبرپور^۲
و محمود حبیب نژاد روشن^۳

چکیده

برف یکی از اشکال مهم بارش در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی بوده که در تامین منابع آب شرب و کشاورزی به صورت جریانهای تاخیری در فصول پرآبی و جریانهای حداقل در فصول کم آبی و تولید انرژی نقش ارزنده ایفا می کند. هدف اساسی مدل سازی هیدرولوژیکی در حوضه های آبخیز، درک بهتر از روند چرخه آب نظیر فرآیندهای حاکم بر چرخه آب و منابع آب می باشد. منطقه پوشیده از برف پارامتری اساسی در سیکل هیدرولوژی و اقلیم شناسی زیست کره است. در این تحقیق رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه آبخیز سد کرج با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SRM^۱ در دو سال آبی ۸۰-۸۱ و ۸۱-۸۲ مدل سازی شده است. SRM یک مدل شبیه سازی جریان رواناب حاصل از ذوب بر پایه درجه - روز است که از ۱۴ پارامتر و متغیر ورودی نظیر بارش، دما، دبی و سطح پوشش برف به صورت روزانه و ضریب فروکش، ضریب رواناب برف و باران، فاکتور درجه روز و همچنین خصوصیات فیزیکی مانند طبقات ارتفاعی استفاده می نماید. متغیرهای دما و بارش روزانه با توجه به معادله گرادیان به طبقات ارتفاعی توزیع گردید. خصوصیات فیزیکی حوضه نیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به مدل اضافه گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهند مدل رواناب حاصل از ذوب برف (SRM) در حوضه آبخیز سد کرج با ضریب تبیین ۰/۴۷ و ۰/۹۴ به خوبی قادر به مدل کردن فرآیند رواناب حاصل از ذوب برف می باشد.

کلمات کلیدی: برف، مدل سازی، بارش، SRM، آبخیز، حوضه کرج.

تاریخ دریافت مقاله: ۸ بهمن ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۳۱ خرداد ۱۳۹۰

1- Ph.D. candidate, Watershed Management and Engineering, University of Mazandaran, Sari, Iran, Email: m.miryaghoobzadeh@gmail.com

2- Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, Agricultural and Natural Resources University of Sari, Iran

3- Associate Prof., Faculty of Natural Resources, Agricultural and Natural Resources University of Sari, Iran

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری- دانشگاه مازندران، ساری، ایران.

۲- استادیار دانشکده منابع طبیعی- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

۳- دانشیار دانشکده منابع طبیعی- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

*- نویسنده مسئول

Swamy and Brivio, (1996) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، سطح تحت پوشش برف حوضه کوردول در شمال ایتالیا را بدست آورده و با استفاده از مدل SRM رواناب ناشی از ذوب برف را با تفاضل حجمی $4/6\%$ و $0/89$ شبیه سازی نمودند. Mukkoth (2004) رواناب حاصل از ذوب برف را با مدل SRM و با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در حوضه آبخیز Elhao واقع در ایالت British colombia کانادا مدل‌سازی نموده است. در این تحقیق زون‌های ارتفاعی و مناطق پوشش برفی با بکارگیری داده‌های چند طیفی سنجنش از دور ماهواره TERRA سنجنده MODIS تعیین شده است. مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده دبی روزانه در خروجی حوضه اعتبارسنجی شده و نتایج حاصل از آن با ضریب تبیین $0/43$ بر اساس میانگین دبی روزانه محاسبه شده است. Emre et al. (2005) با استفاده از داده‌های MODIS و با به‌کارگیری شاخص پوشش برفی NDSI، نقشه سطح تحت پوشش برف را با ضریب تبیین کلی 62% تا 82% در حوضه آبخیز Karasu از سرشاخه‌های رودخانه Euphrates واقع در شرق ترکیه جهت استفاده در مدل رواناب حاصل از ذوب برف تخمین زده اند.

Gupta et al (2007) با تحلیل نواحی ذوب برف در حوضه‌های رشته کوه‌های هیمالیا به این نتیجه رسیده‌اند که ذوب برف به شدت به توزیع دما در محدوده $5-0$ درجه سانتی‌گراد وابسته است. پر همت (1381) مدل SRM را در حوضه خراسان بکار برده و نتیجه گرفته است که این مدل در پیش بینی رواناب روزانه در حوضه‌های برف‌گیر با استفاده از سطح تحت پوشش برف که از اطلاعات ماهواره‌ای قابل دسترسی می‌باشند دارای قابلیت پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف می‌باشد. به علاوه اینکه مدل دارای قابلیت تبدیل بارش به رواناب روزانه نیز است. همچنین نتیجه گرفته است که مدل حجم سالانه جریان ناشی از ذوب برف و باران را با دقت بالایی برآورد می‌کند. نجف زاده و همکاران (1383) در تحقیقی تحت عنوان شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف، مدل SRM را در حوضه آبخیز پلاسجان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نوآ به کار برده و رواناب حاصل از ذوب برف را با ضریب همبستگی $0/95$ و تفاضل حجمی $0/25\%$ شبیه سازی کرده است. نجفی (2003) در تحقیقی مدل SRM را در حوضه آبخیز میرآباد دریاچه ارومیه به کار برده و رواناب حاصل از ذوب برف را با ضریب همبستگی $0/81$ و تفاضل حجمی $3/75\%$ شبیه سازی نموده است. در تحقیق حاضر سعی شده است کارایی مدل شبیه ساز رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه آبخیز سد کرج که یکی از حوضه‌های

برف یکی از اشکال مهم بارش در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی بوده که در تامین منابع آب شرب و کشاورزی به صورت جریان‌های تاخیری در فصول پرآبی و جریان‌های تاخیری در فصول پرآبی و جریان‌های حداقل در فصول کم آبی و تولید انرژی نقش ارزنده ایفا می‌کند. از سوی دیگر رواناب حاصل از ذوب برف به دلیل نقش تاخیری آن منبع اصلی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و در برخی از موارد به دلیل همزمانی با بارش‌های بهاره منشاء بروز سیلابهای مخرب با حجم جریان بیش از ظرفیت رودخانه‌ها می‌گردد (Ghanbarpour et al, 2007). منطقه پوشیده از برف پارامتری اساسی در سیکل هیدرولوژی و اقلیم شناسی زیست کره است. با وجود ظرفیت گرمایی بالای برف، پوشش برف سطح خاک را از برخورد مستقیم با هوا و افت فرآیند گرم شدگی زمین در بهار حفظ می‌کند؛ بنابراین برف اثری مستقیم بر جریان اتمسفری با تأثیر بر جذب انرژی و گرم شدن دمای حوضه دارد. حضور برف در یک حوضه بر رطوبت ذخیره شده در سطح مؤثر بوده و تأثیر تاخیری در رواناب دارد (Maurer et al, 2003). وقوع بارندگی به شکل برف یا باران، تعیین کننده نحوه پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز نسبت به ورودی اصلی حوضه می‌باشد؛ زیرا برف در سیکل هیدرولوژی به عنوان یک متغیر تاخیری مدت‌ها در حوضه باقی می‌ماند (Rango, 2003). هدف اساسی مدل‌سازی هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز، درک بهتر از روند چرخه آب نظیر فرآیندهای حاکم بر چرخه آب و منابع آب می‌باشد (Fergousen, 1999). Martinec and Rango مدل SRM را برای اولین بار در سال 1975 به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب روزانه حاصل از ذوب برف حوضه‌های کوچک کوهستانی اروپا ارائه نمودند (Martinec and Rango, 2003). Landesa et al. (2000) با استفاده از داده‌های سنجنش از دور، مدل SRM را برای پیش بینی در 42 حوضه اسپانیا به کار گرفته و نتیجه گیری نمودند مدل برای پیش بینی حجمی با $6/9$ درصد خطا در حوضه‌های مختلف روبروست. Schaper et al. (1999) با استفاده از تصاویر ماهواره ای TM و MSS رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه Massa-Blaten با مساحت 196 کیلومتر مربع را محاسبه نمودند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان رواناب حاصل از ذوب برف در منطقه با ضریب تبیین $0/64$ و تفاضل حجم $31/6\%$ نشان از دقت بالای محاسبات در شبیه سازی جریان با مدل SRM دارند. ایشان جهت مطالعه جریان رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های آلپ مقدار متغیر دما را از طریق داده‌های ثبت شده در 3 ایستگاه بدست آورده و به میانگین ارتفاع هیپسومتریک هر زون برون یابی نموده‌اند.

برفگیر کشور بوده و سهم عمده‌ای از رواناب حوضه را بخود اختصاص می‌دهد، مورد بررسی قرار گرفته و همچنین کارایی تصاویر ماهواره‌ای MODIS که در این تحقیق بهره گرفته شده است، به‌طور ضمنی آشکار گردد.

۲- مواد و روش‌ها

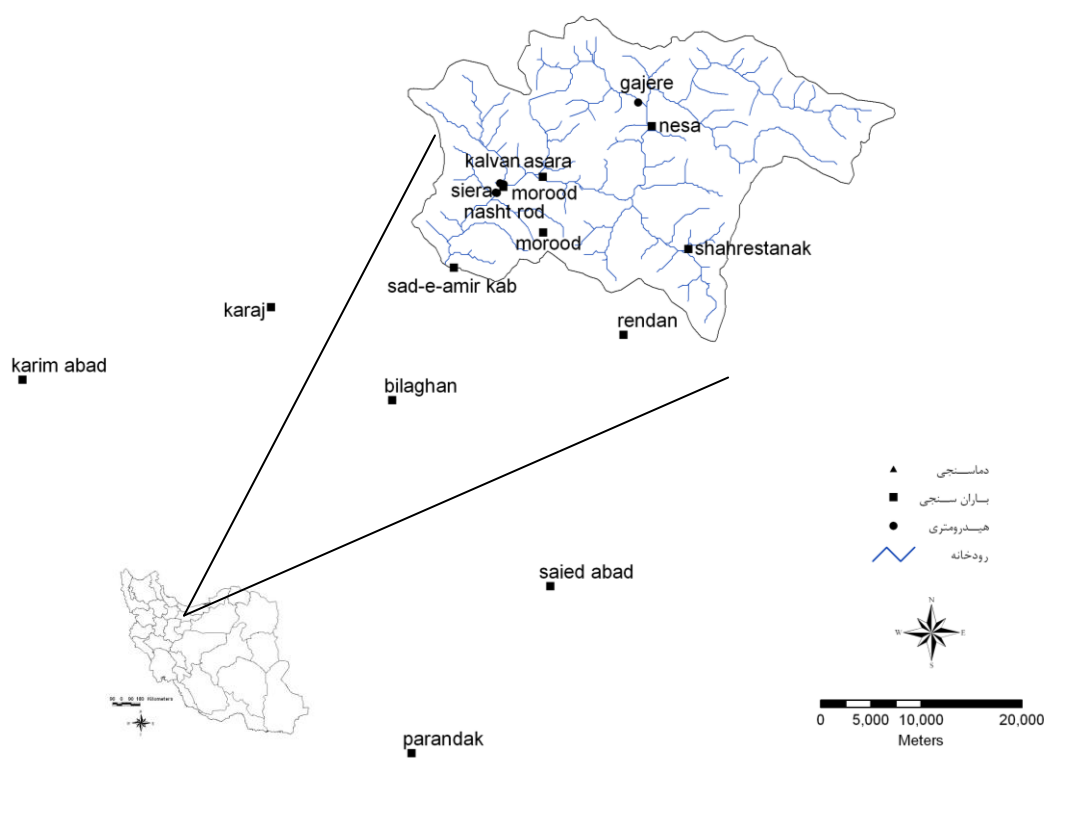
۲-۱- حوضه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد کرج (سد امیرکبیر) با مساحت ۸۴۱/۶۶۰ کیلومتر مربع در پهنه جنوبی رشته کوه البرز مرکزی بین ۲" ۵۳' ۳۵° تا ۳۸' ۱۰' ۳۶° عرض شمالی و ۶" ۳' ۵۱° تا ۲۴' ۳۵' ۵۱° طول شرقی واقع شده است. رقوم ارتفاعی حوضه آبخیز سد کرج از ارتفاع ۴۵۰۰ متری قله کهار تا دیواره سد که حدود ۱۷۰۰ متر از سطح دریا واقع است، متغیر می‌باشد و در آن رودخانه‌های مهمی چون کرج، شهرستانک، آب ورزن، مورود، سبدک، وارنگه رود، ولیت رود جریان دارند. بطور کلی ۹۶/۵٪ از سطح حوضه در ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر واقع شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در این تحقیق از تصاویر MODIS² در برآورد سطح تحت پوشش برف جهت شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه آبخیز کرج استفاده شده است. سری زمانی تصاویر به کار رفته در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. سنجنده MODIS یکی از دقیقترین پروژه‌های سیستم مشاهدات زمینی سازمان فضایی آمریکا (ناسا) به شمار می‌آید. سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند در محدوده طیفی ۰/۴۱ تا ۱۴/۵ میکرومتر بوده و قدرت تفکیک آن در زاویه عمود به سطح زمین ۲۵۰ متر در ۲ باند طیفی، ۵۰۰ متر در ۵ باند و ۱۰۰۰ متر در ۲۹ باند طیفی می‌باشد.

۲-۲- ایستگاه‌های هیدرومتری، باران‌سنجی و دماسنجی

در این تحقیق از آمار روزانه ایستگاه‌های بیلقان، گاجره، سیرا، نشت رود، پل خواب، کلوان به عنوان ایستگاه‌های هیدرومتری و از آمار روزانه آسارا، بیلقان، رندان، سد امیرکبیر، سعیدآباد، سیرا، شهرستانک، مورود، نساء، کریم آباد، پرندک، کرج به عنوان ایستگاه‌های باران‌سنجی و از آمار ایستگاه‌های سد امیرکبیر، شهرستانک، نساء و کرج به عنوان ایستگاه‌های برداشت روزانه دما استفاده شده است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز سد کرج و ایستگاه‌های مورد استفاده

جدول ۱- سری زمانی تصاویر MODIS مورد استفاده در مدل سازی ذوب برف

ردیف	سال	ماه	روز
۱	۲۰۰۱	دسامبر	۲۵
۲	۲۰۰۲	ژانویه	۶
۳	۲۰۰۲	فوریه	۲
۴	۲۰۰۲	مارس	۲
۵	۲۰۰۲	آوریل	۳۰
۶	۲۰۰۲	دسامبر	۵
۷	۲۰۰۳	ژانویه	۳۰
۸	۲۰۰۳	فوریه	۱۰
۹	۲۰۰۳	مارس	۱۹
۱۰	۲۰۰۳	آوریل	۲۴

n : توالی روزها در طی دوره محاسبه می‌باشد. شرح هر کدام از متغیرها و پارامترهای مذکور در ذیل ارائه شده است. فلوجارت الگوریتم مدل نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

۲-۴- سطح پوشش برف

پوشش برفی فصلی در طول فصل زمستان شکل گرفته و به تدریج در طول فصل بهار و تابستان ذوب می‌شود. پوشش برفی موقتی از بارش‌های ناگهانی و طوفانی برف حاصل می‌شود که ممکن است چند ساعت و یا حتی کمتر از چند روز باقی بماند (Amelin, 2003). جهت استخراج سطح پوشش برف در این تحقیق از شاخص پوشش برفی^۳ به منزله الگوریتم استخراج کننده سطح پوشش برف از تصاویر ماهواره‌ای MODIS استفاده شده است. شاخص NDSI از مزیت‌های برف در بازتاب طیفی بالای باند مرئی و بازتاب پایین آن در محدوده طیفی مادون قرمز جهت بارزسازی برف از ابر و نواحی بدون پوشش برفی استفاده می‌کند (Nolin and Liang, 2000). (Hall et al., 1995) شاخص NDSI را طبق رابطه (۲) که اختلاف بازتاب طیفی در باند مرئی نسبت به باند مادون قرمز آن به مجموع دو باند مذکور است بیان کرده‌اند:

$$NDSI = \frac{Band(0/555 \mu m) - Band(1/64 \mu m)}{Band(0/555 \mu m) + Band(1/64 \mu m)} \quad (2)$$

۲-۵- بارش

تعمیم بارش برای یک سطح وسیع و کوهستانی بسیار مشکل و پیچیده می‌باشد. در مناطق حاره که لایه پایینی جو سرشار از رطوبت است ولی لایه‌های میانی از نظر رطوبتی بسیار فقیر هستند

۲-۳- ساختار مدل رواناب حاصل از ذوب برف SRM:

مدل SRM برای محاسبه جریان ناشی از ذوب برف و بارش باران به ۱۴ پارامتر و متغیر ورودی در هر زون ارتفاعی مطابق رابطه (۱) نیازمند است.

ساختار اصلی مدل در حالت نیمه توزیعی به صورت رابطه ریاضی ذیل بیان می‌شود (Martinec and Rango, 1996):

$$Q_{n+1} = [C_{S_n} * \alpha_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{R_n} * P_n] \cdot \left| \frac{A * 10000}{86400} (1 - k_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \right| \quad (1)$$

که در آن:

Q : متوسط دبی روزانه بر حسب m^3/sec

C_S : ضریب رواناب برف

C_R : ضریب رواناب باران

α : شاخص درجه-روز که عمق ذوب ناشی از یک درجه روز را

نشان می‌دهد بر حسب $cm.c^{-1}.d^{-1}$

T : تعداد درجه روز بر حسب $C.d$

ΔT : تعدیل دما با استفاده از گرادیان دما به متوسط ارتفاع حوضه بر

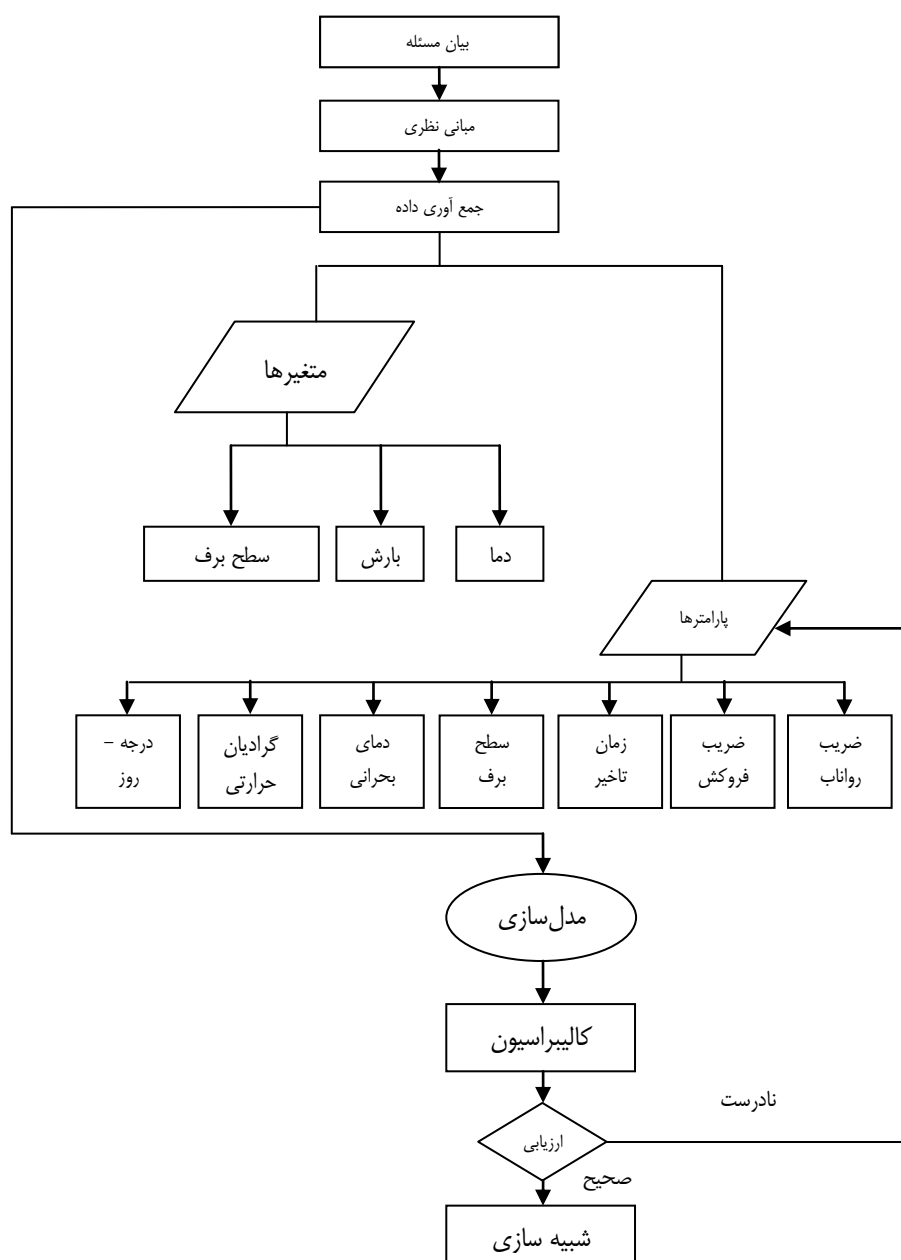
حسب $C.d$

S : نسبت پوشش برف به کل حوضه

P : بارشی که در رواناب شرکت می‌کند بر حسب cm

A : مساحت ناحیه انتخابی بر حسب km^2

K : ضریب فروکش جریان



شکل ۲- فلوجارت مدل SRM (اقتباس از Najafi et al, 2003)

۲-۶- دما

دما یکی از متغیرهای اساسی در تخمین و برآورد جریان ناشی از ذوب به شمار می‌رود و اهمیت ویژه‌ای در حوضه‌های با مساحت زیاد دارد (Martinec and Rango, 1996). در مدل‌هایی همچون SRM دما در اغلب اوقات در یک یا چند ایستگاه اندازه‌گیری شده و معمولاً به کل حوضه با روش برون‌یابی مطابق گرادینان حرارتی تعمیم داده می‌شود. متغیر دمای روزانه ایستگاه‌ها نیز با استفاده از رابطه دما و ارتفاع استخراج شده به زون‌های ارتفاعی منتقل گردید.

حرکات همرفتی به لایه‌های پایین جو محدود می‌شوند و در نواحی حاره بارش تا ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۱۹۰۰ متری افزایش و از آن پس رو به کاهش می‌گذارد. اما در نواحی برون حاره مقدار بارش تا ارتفاع ۵۰۰۰ تا ۵۵۰۰ متری افزایش می‌یابد (Barry and Charley, 1982). بنابراین با توجه به اینکه محدوده ارتفاعی حوضه آبخیز سد کرج از ۴۳۰۰-۱۷۰۰ متر می‌باشد و استفاده از رابطه گرادینان، اختلالی در انتقال بارش نمی‌کند میزان بارش روزانه ایستگاه‌های باران سنجی توسط رابطه بارش و ارتفاع به نواحی ارتفاعی در مدل انتقال داده شد.

۷-۲- دمای بحرانی

ضریب فروکش برای شرایط عادی ذوب را در حوضه‌های آبخیز ارائه کرده‌اند:

$$K_{n+1} = X \cdot Q_n^{-y} \quad (3)$$

که در آن: K_{n+1} : ضریب فروکش، X و y : ضرایب معادله، Q_n : دبی روز معین

۱۲-۲- فاکتور درجه - روز

فاکتور درجه-روز و یا به عبارت دیگر شاخص ذوب به صورت مقدار عمق ذوب شده به تعداد درجه-روز بوده و به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد (Rango and Martinec, 2003):

$$M = a.T \quad (4)$$

که در آن: M : ذوب روزانه به cm ، a : شاخص درجه-روز $cm.^{\circ}C^{-1}$ ، T : تعداد درجه-روز $^{\circ}C.d$ که مقدار a از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Rango and Martinec, 2003):

$$a = 1.1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (5)$$

ρ_s : چگالی برف، ρ_w : چگالی آب

۱۳-۲- ارزیابی دقت مدل

مدل SRM از یک معیار کیفی مشاهده تطابق هیدروگراف‌ها و از دو معیار دقت کمی شامل ضریب تبیین (R)، تفاضل حجم (DV)، استفاده می‌کند. این ضرایب از طریق معادلات (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند:

الف) ضریب تبیین یا رابطه ناش-ساتکلیف:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

\bar{Q} : دبی اندازه‌گیری شده روزانه، Q'_i : دبی محاسبه شده روزانه،
 \bar{Q} : متوسط دبی اندازه‌گیری شده در سال مورد نظر یا فصل ذوب،
 n : تعداد روزهای دارای اندازه‌گیری

ب) انحراف حجم

$$DV(\%) = \frac{V_R - V'_R}{V_R} * 100 \quad (7)$$

V_R : حجم سالانه یا فصلی رواناب اندازه‌گیری شده؛ V'_R : حجم سالانه یا فصلی رواناب محاسبه شده

در مدل هیدرولوژیکی SRM این پارامتر به عنوان معیار تشخیص نوع بارش در هر واقعه بارندگی بر حسب دمای روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر دمای محیط بیشتر از دمای بحرانی بارش به صورت باران و اگر دمای محیط کوچکتر از دمای بحرانی باشد، بارش به صورت برف منظور می‌گردد. در این تحقیق نیز براساس توصیه‌های پدید آورندگان مدل و با توجه به اینکه در حوضه مورد نظر اطلاعات دراز مدت سینوپتیک جهت تعیین دقیق دمای بحرانی موجود نبود، دمای ۲/۵ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بحرانی برای حوضه آبخیز سد کرج انتخاب گردید.

۸-۲- سطح مشارکت کننده در بارش

موقعی که بارش به صورت بارش باران باشد، دو نوع رفتار در مدل قابل بررسی خواهد بود: در نوع اول باران بر روی برف پشته باریده و در آن نگهداری می‌شود اگر برف خشک و عمیق باشد در این حالت عمق بارش نسبت به سطح بدون پوشش برف به کل سطح کاهش می‌یابد. در نوع دوم سطح پوشش برفی رسیده و پرآب است و تمامی آب باران بدون دست خوردگی به رواناب حاصل از ذوب برف اضافه خواهد گردید.

۹-۲- زمان تأخیر

از لحاظ فیزیکی زمان تأخیر عبارت است از نصف زمان حرکت آب از تمام سطح حوضه به سمت نقطه خروجی برای یک رگبار معین است؛ که در این تحقیق بر اساس رابطه پیشنهادی اشنايدر ۶ ساعت محاسبه و در مدل منظور گردیده است.

۱۰-۲- ضریب رواناب

ضریب رواناب اختلاف بین آب در دسترس و جریان خروجی از حوضه می‌باشد. مدل SRM مقادیر ضریب رواناب را برای برف و همچنین برای بارش باران بصورت مجزا می‌پذیرد.

۱۱-۲- ضریب فروکش

ضریب فروکش پارامتر بسیار مهمی در مدل SRM می‌باشد که به وسیله توابع نمایی حل می‌گردد. ضریب فروکش نشان دهنده رفتار حوضه در شرایط عادی ذوب برف است. (Rango and Martinec 2003) رابطه (۳) را جهت محاسبه

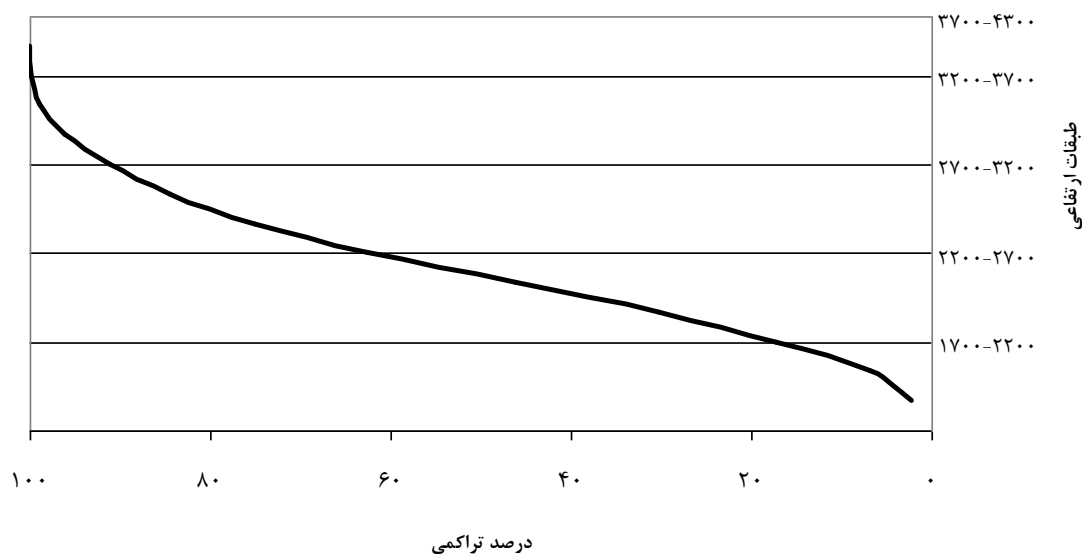
۳- نتایج

۱-۳- خصوصیات فیزیوگرافی

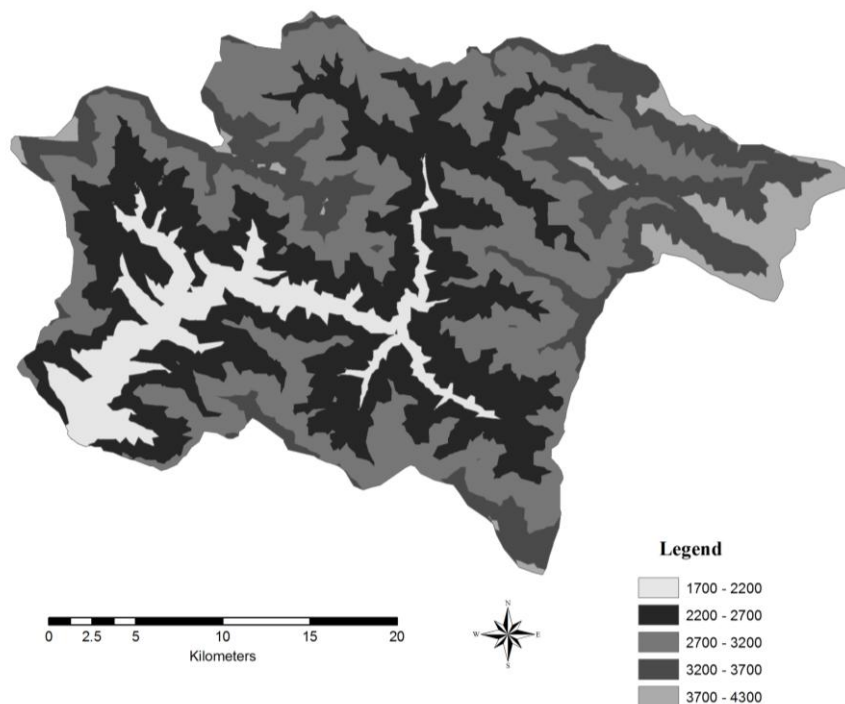
جهت استخراج منحنی هیپسومتری حوضه آبخیز سد کرج، مساحت آبخیز به ۵ طبقه ارتفاعی تقسیم گردید و در محیط نرم افزاری GIS مقدار مساحت هر طبقه ارتفاعی بدست آمد. منحنی هیپسومتری حوضه آبخیز سد کرج در شکل ۳ ارائه شده است.

۲-۳- طبقات ارتفاعی

حدود ارتفاعی حوضه از ۱۷۰۰ متر الی ۴۳۰۰ متر بوده که به ۵ طبقه ارتفاعی با حدود ۵۰۰ متر در سیستم اطلاعات جغرافیایی تقسیم شده است. شکل ۴ زون‌های ارتفاعی در حوضه آبخیز سد کرج را نشان می‌دهد.



شکل ۳- منحنی هیپسومتری حوضه آبخیز سد کرج



شکل ۴- زون‌های ارتفاعی در حوضه آبخیز سد کرج

۳-۳- استخراج نقشه‌های حاصل از اجرای الگوریتم‌های ذوب برف

بعد از زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره‌ای MODIS اقدام به اجرای الگوریتم تفکیک کننده برف از ابر و زمین (شاخص پوشش برفی) گردید. در این تحقیق از الگوریتم پیشنهادی Hall and Riggs به عنوان الگوریتم استاندارد و شاخص تشخیص پوشش برفی در تصاویر ماهواره‌ای MODIS بهره‌برداری گردید. سطح تحت پوشش برف در حوضه آبخیز سد امیرکبیر توسط درون‌یابی و برون‌یابی از سری زمانی تصاویر ماهواره ای MODIS بر اساس الگوریتم ارائه شده توسط مالچر محاسبه گردید. بر اساس الگوریتم Malcher عامل ذوب تابعی از درجه حرارت بحرانی و فاکتور درجه-روز است و طبق رابطه (۸) بیان می‌شود (Malcher and Heidinger, 2001):

$$\Delta M(t_1, t_2) = \sum_{t_1}^{t_2} (aT) \quad (8)$$

که در آن: ΔM : عمق تجمعی ذوب برف به سانتی‌متر، a : فاکتور درجه-روز، T : دمای بحرانی به درجه سانتی‌گراد

مقادیر سطح تحت پوشش برف در حوضه آبخیز سد کرج به تفکیک هر زون ارتفاعی در سال آبی ۸۰-۸۱ و همچنین ۸۱-۸۲ با استفاده از طبقه بندی شاخص پوشش برفی طبق جدول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲- سطح برف در سال آبی ۸۰-۸۱ در تصاویر MODIS به کیلومتر مربع

تاریخ	زون ارتفاعی ۱	زون ارتفاعی ۲	زون ارتفاعی ۳	زون ارتفاعی ۴	زون ارتفاعی ۵
۸۰/۱۰/۴	20/434	221/605	281/175	136/337	32/995
۸۰/۱۰/۱۶	33/185	155/915	234/772	133/303	32/731
۸۰/۱۱/۱۳	73/822	229/876	255/631	133/305	31/652
۸۰/۱۲/۱۱	33/438	227/127	277/212	136/104	32/939
۸۱/۲/۱۰	0/816	3/244	45/996	111/484	32/683

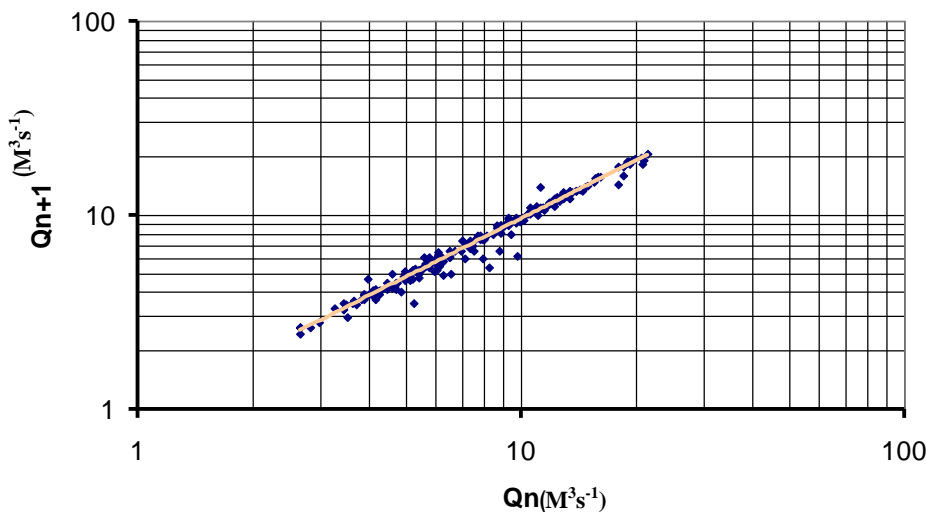
جدول ۳- سطح برف در سال آبی ۸۱-۸۲ در تصاویر MODIS به کیلومتر مربع

تاریخ	زون ارتفاعی ۱	زون ارتفاعی ۲	زون ارتفاعی ۳	زون ارتفاعی ۴	زون ارتفاعی ۵
۸۱/۹/۱۴	11/032	164/650	238/488	128/557	32/574
۸۱/۱۱/۱۰	82/143	266/567	267/929	128/557	32/574
۸۱/۱۱/۲۱	40/835	243/180	263/215	118/910	31/229
۸۱/۱۲/۲۸	3/036	250/180	349/916	129/910	45/229
۸۲/۲/۳	0	16/465	171/813	135/539	32/939

۳-۴- منحنی فروکش

ایستگاه‌های سیرا، گاجره، نشت رود و مورود از جمله ایستگاه‌های هیدرومتری روزانه حوضه آبخیز سد امیرکبیر می‌باشند. منحنی فروکش نشانگر نحوه پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به بارش بویژه شرایط حوضه پس از قطع بارش و برگشت به حالت عادی هیدرولوژیکی می‌باشد. با توجه به اینکه ایستگاه‌های سیرا، مورود و نشت رود در زون‌های ارتفاعی پایین حوضه قرار داشتند، در ابتدا اقدام به محاسبه منحنی‌های فروکش سه ایستگاه یاد شده گردید. اما با توجه به طولانی بودن و معرف بودن ایستگاه سیرا که هم در پایین دست حوضه قرار داشته و معرف بهتر خصوصیات و نحوه پاسخ هیدرولوژیکی حوضه می‌باشد و نیز با بررسی منحنی‌های فروکش به دست آمده از سایر ایستگاه‌های هیدرومتری، جهت محاسبه ضریب فروکش حوضه از آمار دبی روزانه ایستگاه سیرا استفاده گردید. برای محاسبه ضریب فروکش از رابطه ارائه شده توسط رانگو و مارتینک استفاده شد. منحنی شاخه خشکیدگی هیدروگراف ایستگاه سیرا نیز با توجه به هیدروگراف روزانه در سالیان متمادی به روش گراف و انتقال دبی هیدروگراف روی محور لگاریتمی به دست آمد (شکل ۵).

در این شکل Q_n : دبی روز معین و Q_{n+1} : انتقال دبی روز معین به یک روز پس از آن می‌باشد.



شکل ۵- منحنی فروکش در ایستگاه سیرا

۳-۵- فاکتور ذوب

فاکتور درجه-روز و یا شاخص ذوب برای هر زون ارتفاعی از طریق درون‌یابی ایستگاهها و برون‌یابی آن به دو زون ارتفاعی پایین‌تر Z_1 و بالاتر Z_4 و Z_5 محاسبه شده است. این فاکتور با توجه به مقدار افزایش دما در طی فصل ذوب افزایش تدریجی دارد.

۳-۷- کالیبراسیون^۵

در فرآیند کالیبراسیون مقادیر پارامترهای مدل به اندازه‌ای تغییر می‌یابند که هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی بهترین برازش را ایجاد کند.

۳-۶- شبیه‌سازی^۴

شبیه‌سازی فرآیند محاسبه جریان بر اساس پارامترهای مدل به گونه‌ای که با جریان مشاهده‌ای مطابقت و رفتارهای هیدرولوژیکی را تقلید نماید نامیده می‌شود. فرآیند شبیه‌سازی جریان حاصل از ذوب برف در حوضه آبخیز سد کرج با محاسبه فاکتورها و پارامترهای مورد لزوم در سال آبی ۸۰-۸۱ صورت پذیرفت. شکل ۶ مقادیر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

۳-۸- اعتبارسنجی^۶

به منظور ارزیابی نحوه کارکرد مدل مقادیر تصحیح شده به سال آبی ۸۱-۸۲ انتقال داده شد و فرآیند شبیه‌سازی جریان تکرار گردید. شکل ۷ مقادیر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

اشکال ۸ و ۹ میزان همبستگی میان جریان محاسبه شده توسط مدل و جریان اندازه‌گیری شده در سالهای آبی ۸۰-۸۱ و ۸۱-۸۲ را نشان می‌دهد.

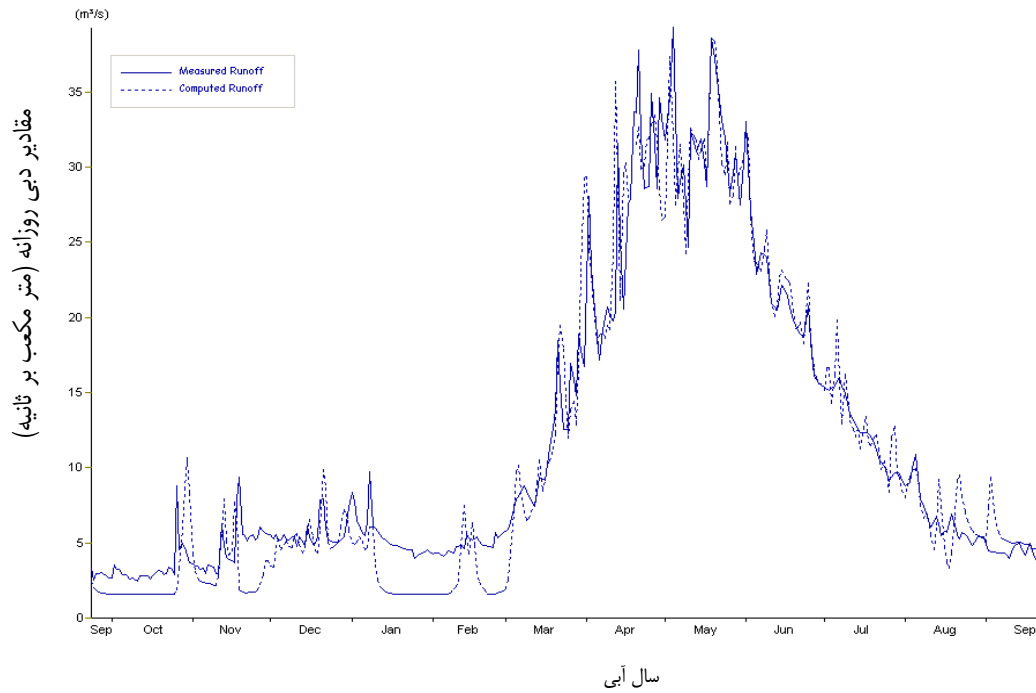
جدول ۴- ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل در سالهای آبی ۸۱-۸۲ و ۸۰-۸۱

سال آبی	Q مشاهداتی (m ³ /s)	Q محاسباتی (m ³ /s)	q مشاهداتی (m ³)	q محاسباتی (m ³)	Nash	RMSE	ΔV %
۸۰-۸۱	۱۱/۵	۱۱/۴۹	۳۲۶/۷۶	۳۲۶/۲۹	-۰/۴۶۷۸	۶/۸۹۸	۰/۱۲۹۲
۸۱-۸۲	۴۶۳/۲۳	۴۳۱/۸۵	۱۴/۶۹	۱۳/۶۹	-۰/۹۳۸۵	۳/۶۰۳۶	۶/۷۷۳۶

09/23/2001 to 09/22/2002

Runoff (Measured vs Computed)
H:\Thesis\Data\SRM folder\2001-2002\SRM folder-2 (2001-10)
KARAJ BASIN

11/7/2007
Year Round Simulation
(Updated every 0 days)

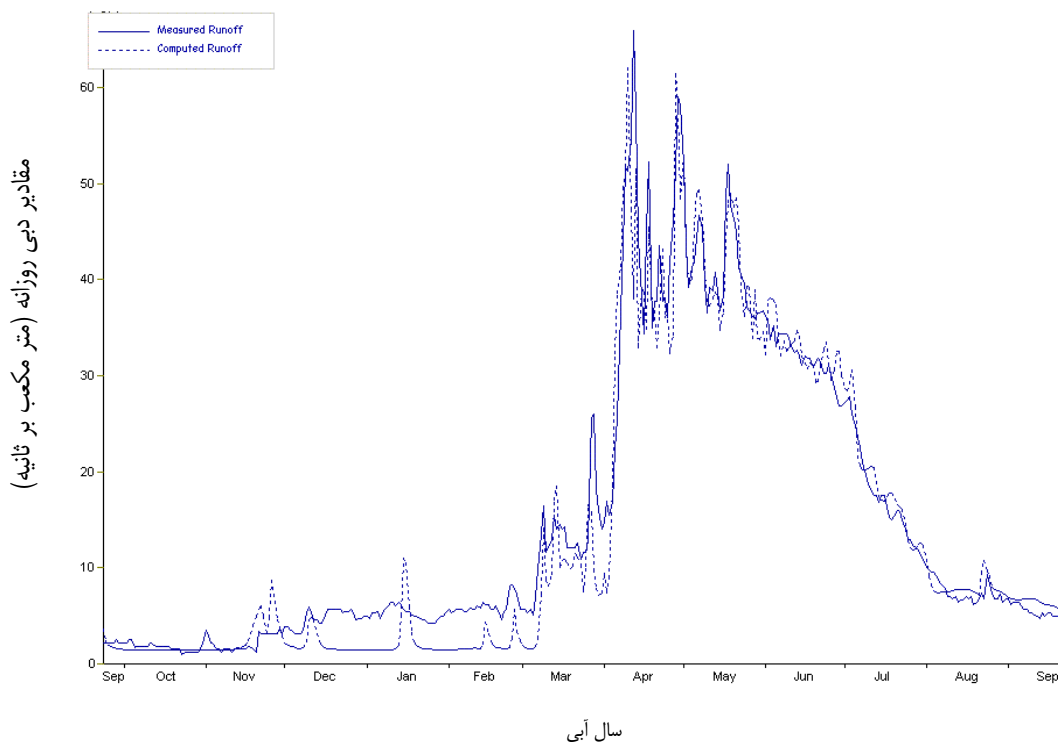


شکل ۶- شبیه‌سازی جریان حوضه آبخیز سد کرچ در سال آبی ۸۱-۸۰

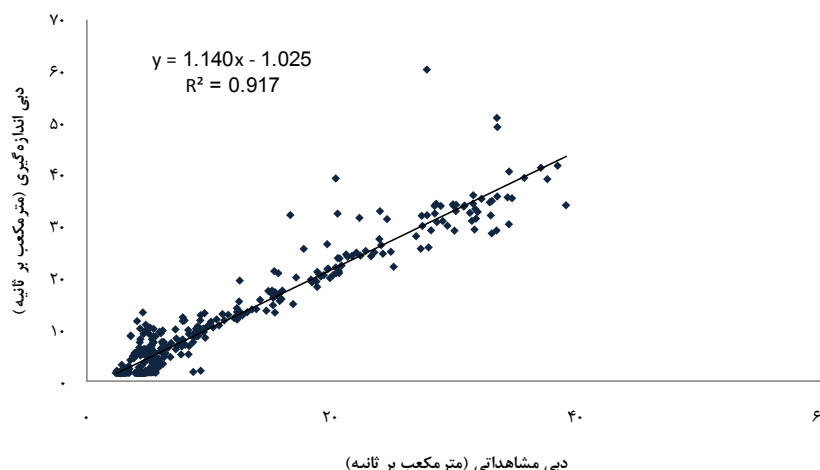
09/23/2002 to 09/22/2003

Runoff (Measured vs Computed)
H:\Thesis\Data\SRM folder\2002-2003\SRM folder (2002-2)
KARAJ BASIN

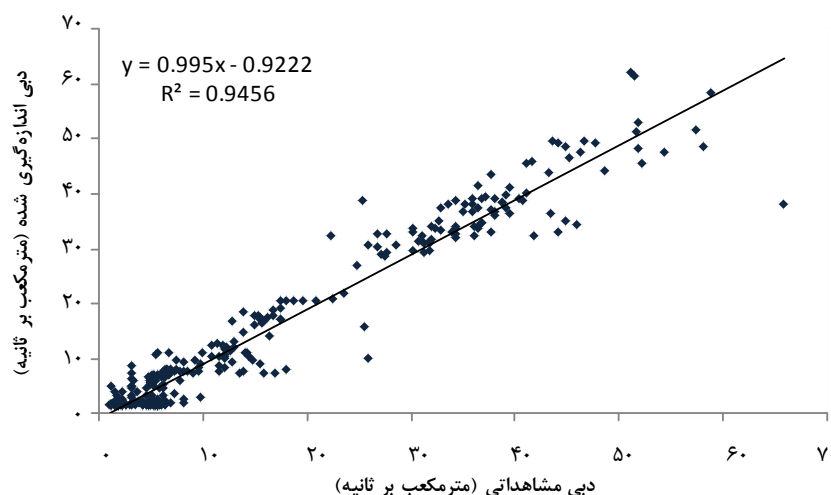
11/7/2007
Year Round Simulation



شکل ۷- اعتبارسنجی مدل در حوضه آبخیز سد کرچ در سال آبی ۸۲-۸۱



شکل ۸- همبستگی مقادیر جریان محاسباتی و مشاهداتی در سال آبی ۸۱-۸۰



شکل ۹- همبستگی مقادیر جریان محاسباتی و مشاهداتی در سال آبی ۸۲-۸۱

پایین افتادگی هیدروگراف شبیه سازی شده نسبت به هیدروگراف مشاهداتی در ماه ژانویه و فوریه سال آبی ۸۱-۸۰ به دلیل فرض نمودن نوع بارش به صورت برف توسط مدل می‌باشد که این خود نتیجه پایین بودن دما نسبت به دمای بحرانی فرض شده می‌باشد. در نتیجه بارش در محاسبات رواناب وارد نشده و توسط مدل به عمق تجمعی برف افزوده شده تا در روزهای گرم بعدی وارد چرخه محاسبه رواناب گردد. در ماههای بعدی و بویژه در فصل ذوب مدل توانایی خود را در شبیه سازی جریان نشان می‌دهد که میزان جریان شبیه‌سازی شده و میزان رواناب مشاهداتی در فصل ذوب و بعد از آن تطابق کامل و قابل قبولی دارد. هیدروگراف خروجی در ابتدا بیان‌گر این مطلب می‌باشد که عمده بودجه آبی حوضه آبخیز سد کرج از

۴- بحث و نتیجه گیری

مدل رواناب حاصل از ذوب SRM، دارای دو معیار ارزیابی میزان دقت شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف می‌باشد. با توجه به ضریب تبیین ارائه شده توسط مدل می‌توان نتیجه گرفت که مدل SRM توانایی شبیه‌سازی جریان رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های آبخیزی که برف عمده آورد سالانه حوضه را به خود اختصاص داده است را دارد. همچنین مدل قادر است جریان شبیه‌سازی شده و جریان مشاهداتی را بصورت گراف خروجی نمایش دهد که به لحاظ بصری نیز می‌توان نتیجه گرفت که مدل در فرآیند شبیه سازی جریان موفق عمل کرده است. نمودار همبستگی‌های ارائه شده نیز مطالب ذکر شده را تأیید می‌نماید.

بارش برف تامین می شود. برف انباشته شده در فصل بارش برف می تواند هنگام ذوب در فصل بهار سیلاب های سهمگینی را ایجاد نماید؛ بنابراین خالی نگهداشتن بخشی از حجم مخزن سد می تواند روند سیل را کاهش داده و از بروز خسارت و بازگشایی ناگهانی دریاچه های سد هنگام بروز سیلاب جلوگیری نماید. جریان در اواخر ماه ژولای (تیر) به دبی پایه برگشت داده می شود کاهش ها و افزایش های پیک های جزئی هیدروگراف می تواند از این علت ناشی گردد که بارشهایی که در اوایل سال آبی جزء برف محاسبه شده بود به تدریج توسط مدل وارد چرخه رواناب می گردد.

نمودار هیدروگراف خروجی در سال آبی ۸۱-۸۲ نیز این مطلب را که عمده بودجه جریان سالانه رواناب حاصل از ذوب برف می باشد را قویا تایید می نماید. افتادگی هیدروگراف شبیه سازی شده در ماههای دسامبر (آذر) تا اواسط ماه مارس (اسفند) نیز طبق مطالب ذکر شده می تواند به این دلیل باشد که مدل، بارش وارده را به صورت برف محاسبه نموده است. با بالا رفتن دما در ماههای فصل ذوب، برف انباشته شده در حوضه وارد جریان رواناب می گردد که حاصل آن بالا بودن حجم رواناب در این فصل از سال می باشد. با توجه به دو هیدروگراف روزانه سال های آبی ۸۱-۸۲ و ۸۰-۸۱ می توان نتیجه گرفت که عمده جریان حوضه آبخیز سد کرج ناشی از ذوب برف می باشد. همچنین اثر تأخیری برف بر روی جریان حوضه نیز در هیدروگراف های خروجی مشاهده می شود که لزوم مدیریت منابع آب این حوضه را در کاهش خسارت های ناشی از سیل ذوب برف در اوایل فصل ذوب و در طی فصل بهار با بارش باران در روزهای گرم این فصل که دمای قطرات باران بالا می باشد را گوشزد می نماید. مدل شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف SRM میزان جریان را در سال آبی ۸۱-۸۲ و ۸۰-۸۱ به ترتیب ۰/۴۶۷۸ و ۰/۹۳۸۵ برآورد نموده است که نمودار همبستگی میان جریان شبیه سازی شده و اندازه گیری شده نیز از همبستگی بالای میزان رواناب شبیه سازی در مقیاس روزانه حکایت می کند. ارزیابی مدل با دو شاخص ضریب تبیین و تفاضل حجم در دو سال آبی ۸۱-۸۲ و ۸۰-۸۱ به ترتیب ۰/۹۳۵ و ۰/۴۶۷۸ و ۰/۱۲۹۲٪ و ۶/۷۷۳۶٪ برآورده شده است که نتایج به دست آمده از مدل با نتایج تحقیقات (Swamy and Brivio, 1996) در حوضه کوردول ایتالیا با تفاضل حجمی ۴/۶٪ و ضریب تبیین ۰/۸۹ تطابق دارد. نتایج حاصل از تحقیقات (Schaper et al., 2000) که رواناب حاصل از ذوب برف را در حوضه ماسا- بلاتن با مدل SRM با ضریب تبیین ۰/۶۴ و تفاضل حجم ۳/۱۶٪ بدست آمده است نیز نتایج حاصل از این تحقیق را تایید می کند. نتایج حاصل از مدل رواناب

حاصل از ذوب برف همچنین با نتایج حاصل از تحقیقات (Emre et al., 2005) با ضریب تبیین ۰/۶۲ تا ۰/۸۲ همخوانی دارد. نتایج حاصل از مدل سازی رواناب حاصل از ذوب برف در داخل کشور نیز کارایی مدل SRM را نشان می دهد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیقات نجف زاده (۱۳۸۳) که رواناب حاصل از ذوب برف را در حوضه آبخیز پلاسجان با ضریب تبیین ۰/۹۵ و تفاضل حجمی ۰/۲۵٪ بدست آورده است مطابقت می کند. همچنین نتایج این مطالعه با نتایج حاصل از تحقیقات (Najafi et al., 2003) در حوضه آبخیز مهاباد با ضریب تبیین ۰/۸۵ و تفاضل حجمی ۳/۷۹٪- نیز قرابت دارد.

با توجه به مطالب ذکر شده مدل SRM توانایی مدل سازی رواناب حوضه های برفگیر را داراست. نظر به اینکه عمده حوضه های آبخیز شمال و غرب کشور برفگیر می باشد، در نظر گرفتن میزان رواناب حاصل از ذوب برف در مدیریت منابع آب از اهمیت خاص برخوردار است. لذا مدل سازی جریان با مدل هایی که قادر به مدل کردن هر دو نوع بارش بصورت باران و برف می باشند در اولویت قرار خواهد داشت. با توجه به نتایج تحقیق حاضر و نتایج سایر محققین در زمینه مدل SRM می توان اظهار داشت که در صورت موجود بودن داده های هیدرولوژیک از حوضه های آبخیز برفگیر کشور این مدل قادر به مدل سازی جریان و آورد رودخانه ها به صورت قابل قبول می باشد.

پی نوشتها

- 1-Snowmelt Runoff Model
- 2-Moderate Image Spectroradiometer
- 3-Normalized Difference Snow Index
- 4-Simulation
- 5-Calibration
- 6- Validation

۵- مراجع

پرهت، ج. (۱۳۸۱)، مدل توزیعی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده های سنجنش از دور، رساله دکتری، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد تهران

نجف زاده، ر، ابریشم چی، ا. و تجریشی م. (۱۳۸۳)، شبیه سازی جریان رواناب رودخانه با مدل SRM و با استفاده از داده های سنجنش از دور، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۵۲

- Mukkoth V.N., (2004), Snowmelt runoff modeling using MODIS in Elaho river basin British Colombia, *ISEIS Publication*, Vol. 2, pp. 526-530
- Malcher, P. and M. Heidinger, (2001), Processing and data assimilation scheme for satellite snow cover products in the hydrological model, 28.04. 2004, version 1, *Envisnow*, EVG1-CT-2001-00052
- Martinec, j. and A. Rango, (1996), Parameter value for snowmelt runoff modeling, *J. Hydrology*, Vol. 84, No. 3-4, pp. 197-219
- Maurer, E. P., J. D Rhoads, R. O. Dubayah, D. P. Lettenmaier, (2003), Evaluation of the snow covered area data product from MODIS, *Hydrological Processes journal*, Vol. 17, No. 1, pp.59-71
- Najafi A., B. Saghafian, A.M.J. Meijerink, (2003), Investigation of the snowmelt runoff in the Orumiyeh region using modeling with GIS and RS techniques, ITC Enschede, Netherlands, pp.53
- Nolin, A., & S. Liang, (2000), Progress in bidirectional reflectance modeling and applications for surface particulate media: Snow and soils, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 18, No. 2 & 4, pp. 307-342
- Rango, A. Martinec, J., (2003), The Snow Melt Runoff Model (SRM) User Manual Version 1.00.10, pp. 120
- Rango, A., J. Martinec, (1981), Accuracy of Snowmelt Runoff Simulation, *Nordic Hydrology*, Vol. 12, No. 4-5, pp. 256-274
- Schaper, J., J. Martinec and K.Seidel, (1999), Distributed Mapping of Snow and Glaciers for Improved Runoff Modeling, *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 2023-2031
- Swamy A. N. and P.A. Brivio, (1996), Hydrological modeling of snowmelt I the Italian alps using visible and infrared remote sensing, *J. Remote sensing*, Vol. 17, No. 16, pp. 3169-3188
- Amlien, J.,R. Solberg, (2003), A comparison of temperature retrieval algorithms for snow covered surfaces, *Proceedings of IGARSS (IEEE)*, pp.842-844
- Barry R. R. J. Charley, (1982), *Atmosphere weather and climate*, Mateo. and Co New York
- Emre tekeli A., Zuhul Akyu rek, A. Arda Sorman, Aynur Sensoy and A. Unal Sorman, (2005), Using MODIS Snow Cover Maps in Modeling Snowmelt Runoff Process in the Eastern Part of Turkey, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, No. 2, 216-230
- Fergousen, R.I., (1999), Snowmelt Runoff Models, *Progress in Physical Geography*, Vol. 23, No. 2, pp. 205-227
- Ghanbarpour, M. R., B. Saghafian, M. Mohseni Saravi, K. C. Abbaspour, (2007), Evaluation of spatial and temporal variability of snow cover in a large mountainous basin in Iran, *Nordic Hydrology*, Vol. 38, No. 1, pp. 45-58
- Gupta R.P., A.Ghosh, U.K. Haritashya, (2007), Empirical relationship between near-IR reflectance of melting seasonal snow and environmental temperature in a Himalayan basin, *Remote Sensing of Environment journal*, Vol. 107, No. 3, pp. 402-413
- Hall, D. K., G. A. Riggs, V. V. Salomonson, (1995), Development of the methods for mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54, No. 2, pp. 127-140
- Landesa, E., A. Rango and D.K. Hall, (2000), Improved snow cover remote sensing for snow melt runoff forecasting, *international association of hydrological science (IAHS)*, Vol.27, No. 267, pp. 61-65