



Snowmelt runoff estimation using snowmelt model and geographic information system in Ekbatan Dam basin, Hamedan

Azam Naderi¹ | Maryam Varavipour² | Mahmoud Mashal³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: azam.naderii62@gmail.com
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mvaravi@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 June 2026
Received in revised form
15 June 2026
Accepted 15 June 2026
Published online 22 June 2026

Keywords:

Snowmelt
Runoff
Geographic Information System
SRM
MODIS

ABSTRACT

In many regions, snow cover in mountainous areas are the main source of surface and ground water supply. Thus, it's very important to estimate the snow melt runoff in these areas. To achieve this objective, it's necessary to estimate the basin snow cover area and its variations for a complete water year. Considering that measuring of ground snow can't be done daily, Satellite images give a suitable information. In this study, the snow cover area as the most important hydrological variable can be extracted using TERRA- MODIS satellite images with a spatial resolution of 500 meters on daily basis. Thus, to calculate watershed snow melt runoff, the Snowmelt Runoff Model (SRM) was used. This model produces snow melt runoff using the data pertaining to meteorological parameters, hydrology and watershed characteristics. In this study, the necessary data for model application were extracted on daily basis for the years 2002-2003 and 2003-2004. Snowmelt runoff model has been calibrated using the data during 2002-2003 year. The results show that the square of correlation coefficient (R^2) between the simulated and observed daily runoff is 0.93 and the difference between the simulated and observed annual runoff volume is 4.74 percent. The SRM has been performed using the 2003-2004 data. The results show that the difference between the simulated and observed annual runoff volume is 2.15 percent and the square of correlation coefficient (R^2) between the simulated and observed daily runoff is 0.84. The above values show accuracy of used images in the estimation of snow melt runoff which is the sign of ability and quality of this model and MODIS images to use for other watershed regions. Estimating runoff from snowmelt in mountains is of great importance. To achieve this goal, it is necessary to accurately and reliably estimate the snow cover of the basin and its changes throughout the year. Given that ground-based snow measurements are not performed daily in our country, satellite images provide the necessary information with good accuracy. In this study, the level of snow cover in the basin, as the most important hydrological variable, was obtained daily using TERRA_ MODIS satellite images with a spatial resolution of 500 meters. Then, the snowmelt model (SRM) was used to calculate snow runoff in the basin. This model calculates snowmelt runoff using meteorological, hydrological, and basin characteristics parameters and presents it graphically and numerically along with observed runoff. In the present study, the necessary data for running the model daily and for the water years 2001-2002 and 2003-2004 were extracted. Data from 2001-02 were used to calibrate the SRM model. The model simulated annual runoff volume with a 4.47% difference and daily flow rate with a coefficient of determination of 0.93. Data from 2002-03 were used to evaluate the model. The model estimated annual runoff volume with a 2.15% difference and daily flow rate with a coefficient of determination of 0.84. The above values indicate the high accuracy of the images used and the model in estimating snowmelt runoff for the aforementioned basin, which indicates the capability and ability of the model and MODIS images to be applied to other basins in the region.

Cite this article: Naderi, A., Varavipour, M., & Mashal, M. (2026). Snowmelt runoff estimation using snowmelt model and geographic information system in Ekbatan Dam basin, Hamedan. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 97-108. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.416266.1309>





برآورد رواناب ذوب برف با استفاده از مدل ذوب برف و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه سد اکباتان همدان

اعظم نادری^۱ | مریم وراوی پور^۲ | محمود مشعل^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: azam.naderii62@gmail.com
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mvaravi@ut.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmashal@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در کوهستان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای نیل به این هدف برآورد درست و قابل قبول از پوشش برف حوضه و تغییرات آن در طول سال ضروری است. با توجه به این که در کشور ما اندازه‌گیری‌های زمینی برف به صورت روزانه انجام نمی‌شود، تصاویر ماهواره‌ای اطلاعات لازم را با دقت خوبی در اختیار قرار می‌دهند. در این مطالعه، سطح پوشش برف حوضه به‌عنوان مهم‌ترین متغیر هیدرولوژیکی لازم با استفاده از تصاویر ماهواره Terra سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر به صورت روزانه به دست آمد. سپس برای محاسبه رواناب برف در حوضه از مدل ذوب برف (SRM) استفاده گردید. این مدل رواناب ذوب برف را با استفاده از پارامترهای هواشناسی، هیدرولوژی و خصوصیات حوضه محاسبه و همراه با رواناب مشاهداتی به صورت نمودار و عددی ارائه می‌کند. در پژوهش حاضر، داده‌های لازم برای اجرای مدل به صورت روزانه و برای سال‌های آبی ۸۲-۱۳۸۱ و ۸۳-۱۳۸۲ استخراج گردید. از داده‌های سال ۸۲-۱۳۸۱ برای واسنجی مدل SRM استفاده شد. مدل حجم رواناب سالانه را با ۴/۷۴ درصد اختلاف و دبی جریان روزانه را با ضریب تبیین ۰/۹۳ شبیه‌سازی کرد. برای ارزیابی مدل از داده‌های سال ۸۳-۱۳۸۲ استفاده شد. مدل حجم رواناب سالانه را با ۲/۱۵ درصد اختلاف و دبی جریان روزانه را با ضریب تبیین ۰/۸۴ برآورد کرد. مقادیر فوق دقت بالای تصاویر مورد استفاده و مدل را در برآورد رواناب ذوب برف برای حوضه مذکور نشان می‌دهد که نشانگر قابلیت و توانایی کاربرد مدل و تصاویر MODIS برای حوضه‌های دیگر منطقه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها:

ذوب برف

رواناب

سیستم اطلاعات جغرافیایی

SRM

MODIS

استناد: نادری، اعظم؛ وراوی پور، مریم و مشعل، محمود (۱۴۰۵). برآورد رواناب ذوب برف با استفاده از مدل ذوب برف و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه سد اکباتان همدان. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۶ (۱)، ۹۷-۱۰۸. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.416266.1309>



۱. مقدمه

اگرچه بخش کوچکی از سطح کره زمین را مناطق کوهستانی دربرمی‌گیرد، اما همین مقدار اندک در چشم‌انداز هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز تأثیر شگرفی داشته و در بسیاری از مناطق، پوشش برف واقع در کوهستان‌ها منبع اصلی تأمین آب‌های سطحی و زیرزمینی محسوب می‌گردد. علاوه بر این یکی از عوامل مؤثر در فرایند تغییر اقلیم نیز تغییرات عمده در مقدار بارش باران و برف و نیز زمان ذوب برف‌ها بوده که بهره‌برداری از منابع آب را تحت‌الشعاع خود قرار داده است (Bales & Cline, 2003). برف مهم‌ترین منبع آبی مناطق کوهستانی است و با توجه به این که اطلاعات مشاهده‌ای زمینی برف اندک است و معمولاً به نواحی دارای ارتفاع کم محدود می‌شود، لذا تصاویر ماهواره‌ای ابزار ارزشمندی در بررسی سطح پوشش برف و تغییرات آن در طول زمان به‌شمار می‌آیند. تصاویر سنجنده MODIS از ماهواره ترا که اطلاعات روزانه را با قدرت تفکیک مکانی مناسب از زمین به‌دست می‌دهند، از مهم‌ترین ابزار در این زمینه است.

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان روزانه در حوضه‌های کوهستانی که ذوب برف عامل اصلی رواناب است مدل رواناب ذوب برف^۱ (SRM) طراحی شده است. این مدل اولین بار توسط مارتینک (۱۹۷۵) به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوچک کوهستانی اروپا ارائه گردید. به لطف پیشرفت سنجش از دور ماهواره‌ای پوشش برف، SRM در حوضه‌های بزرگ‌تر نیز اعمال شده است (Martinec *et al.*, 2008). مدل ذوب برف توسط سازمان جهانی هواشناسی (۱۹۶۸) برای شبیه‌سازی مورد آزمایش قرار گرفته است که در مقایسه با سایر مدل‌ها با داشتن حداقل خطا دقیق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی ذوب برف تشخیص داده شده است (WMO, 1986).

در پژوهشی Seidel & Martinec (2002)، شبیه‌سازی رواناب ذوب برف را در کوه‌های آلپ سوئیس با مدل SRM انجام دادند. آن‌ها در پژوهش خود از تصاویر اسپات، لندست و نوا^۲ برای ۱۳ زیرحوضه استفاده کردند و نتیجه گرفتند در تمام زیرحوضه‌ها مدل قابلیت بالایی را در شبیه‌سازی نشان داده است. همچنین، Landesa *et al.* (2000) برای پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف در ۴۲ حوضه در اسپانیا از مدل SRM استفاده کردند، و نتیجه گرفتند، مدل رواناب را با اختلاف حجم ۶/۹ تا ۲۵/۳ درصد پیش‌بینی می‌کند.

همچنین، Songweon *et al.* (2005) رواناب ناشی از ذوب برف را به‌وسیله مدل SRM برای دو حوضه ریوگران و ریو اوجو^۳ شبیه‌سازی کردند، و سپس سطح پوشش برف این دو حوضه را با استفاده از تصاویر ماهواره‌های MODIS و NOAA به‌دست آوردند. مدل SRM رواناب حوضه ریوگران را با استفاده از تصاویر ماهواره‌های NOAA و MODIS به‌ترتیب با اختلاف حجم ۱۲/۱- و ۱۰/۳ درصد و با ضریب تبیین ۰/۷ و ۰/۸۹ شبیه‌سازی کرد. مدل رواناب حوضه ریو اوجو را با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS و NOAA به‌ترتیب با اختلاف حجم ۴۶/۶- و ۳۸/۶- درصد و با ضریب تبیین ۰/۲۲ و ۰/۶۳ شبیه‌سازی کرده است.

در پژوهشی Sorman *et al.* (2003) مدل SRM را در حوضه‌های دجله و فرات با استفاده از سنجش از دور برای برآورد سطح تحت پوشش برفی به‌کار بردند، و نتیجه‌گیری کردند که مدل با اختلاف حجم ۰/۲۵ تا ۲/۴۷ درصد و ضریب تبیین ۰/۹۳ تا ۰/۹۵ حجم و دبی را برآورد می‌نماید. در پژوهشی دیگر Malcher & Heidinger (2001)، با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS سطح پوشش برف چهار زیرحوضه از حوضه اترال در شرق اتریش را به‌دست آورده و با استفاده از مدل SRM رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کرد. مدل رواناب زیرحوضه‌های ونت-روفن، ابرگرگل، هوبن و تومپن^۴ را به‌ترتیب با اختلاف حجم ۲/۳۵-، ۵/۵۶-، ۰/۴۴ و ۰/۴۹ درصد و با ضریب تبیین ۰/۹۳، ۰/۹۲، ۰/۸۷ و ۰/۸۸ شبیه‌سازی کرده است.

نتایج پژوهش Naderi (2010) نشان داد، مدل SRM همراه با GIS و فن‌آوری سنجش از دور برای محاسبه رواناب در

حوضه‌هایی که فاقد داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی برف هستند مورد استفاده قرار گرفته و در همه موارد نتایج حاصل از مدل رضایت‌بخش بوده است.

طبق مطالعه انجام شده توسط Nourani *et al.* (2020) در حوضه آبی چای، استفاده از مدل SRM همراه با داده‌های سنجنده MODIS برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی بسیار مؤثر بود. نتایج پژوهش Bhagwat *et al.* (2025) نشان داد که افزودن اصلاح جریان به مدل SRM، دقت شبیه‌سازی رواناب را افزایش می‌دهد. در پژوهش توسط Entezami *et al.* (2022) در حوضه سقز، برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف از مدل SRM همراه با داده‌های سنجنش از دور سنجنده MODIS استفاده شد. مقایسه نتایج مدل با داده‌های زمینی رواناب، کارایی بالای مدل را نشان داد، به طوری که ضریب تبیین بین ۰/۹۰ تا ۰/۹۴، و تفاضل حجمی بین ۶/۸ تا ۷/۲ درصد به دست آمد. اهداف پژوهش حاضر، برآورد رواناب حاصل از ذوب برف حوضه سد اکباتان با استفاده از مدل SRM و بررسی قابلیت کاربرد مدل در برآورد رواناب ذوب برف منطقه مورد مطالعه و همچنین بررسی دقت تصاویر MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در برآورد سطح تحت پوشش برف می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره Terra-MODIS سطح پوشش برف به صورت روزانه استخراج شد و با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SRM، رواناب حاصل از ذوب برف برآورد گردید.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد اکباتان در فاصله ۴۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی همدان قرار گرفته است. این حوضه آبریز از نظر تقسیم‌بندی کل حوضه‌های آبخیز کشور به عنوان زیرحوضه‌ای از حوضه آبخیز مرکزی دریاچه نمک محسوب می‌گردد. مساحت حوضه آبخیز سد اکباتان تا محل ایستگاه هیدرومتری شاخه دوم سد ۲۲۱ کیلومترمربع و محیط حوضه ۵۰ کیلومتر می‌باشد. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه از سطح دریا به ترتیب ۳۶۵۰ متر در رشته کوه الوند و ۱۹۴۰ متر در ایستگاه هیدرومتری شاخه دوم سد می‌باشد. متوسط بارش سالیانه حوضه ۳۱۳ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه حوضه ۱۰/۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

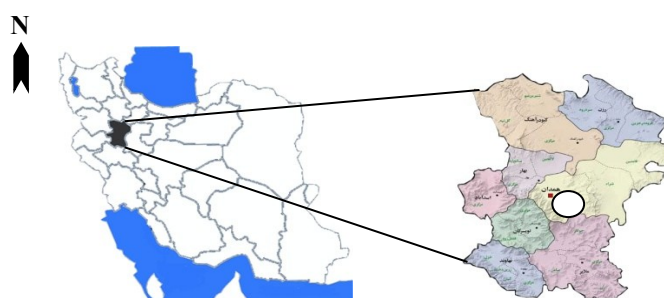


Figure 1. Location Map of the Ekbatan Dam Watershed

۲.۲. ساختار مدل SRM

مدل SRM براساس روش درجه-روز استوار است. در این مدل رواناب ناشی از ذوب برف و باران به طور روزانه محاسبه و با لحاظ فروکش جریان، دبی خروجی از حوضه برآورد می‌گردد. ساختار اصلی مدل به صورت رابطه ریاضی زیر بیان می‌شود:

$$Q_{n+1} = [C_{Sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) \cdot S_n + C_{Rn} \cdot P_n] \frac{4.10000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، Q دبی روزانه (مترمکعب بر ثانیه)، C_s ضریب رواناب برف، C_R ضریب رواناب باران، a فاکتور درجه-روز (سانتی متر بر درجه سانتی گراد بر روز)، T درجه حرارت ایستگاه مبنا (درجه سانتی گراد)، ΔT تفاضل درجه حرارت ایستگاه مبنا با درجه حرارت در محل متناظر متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوضه، S پوشش نسبی برف، P بارشی که در تولید رواناب شرکت می کند (سانتی متر)، A مساحت حوضه یا ناحیه انتخابی (کیلومترمربع)، n توالی روزها در طی دوره پیش بینی یا شبیه سازی، K ضریب فروکش جریان است. ضریب فروکش (K) نشان دهنده نرخ کاهش دبی در یک دوره زمانی بدون تأثیر ذوب برف و باران می باشد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$K = \frac{Q_{m+1}}{Q_m} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، m و $m+1$ نشانگر دو روز متوالی در دوره فروکش جریان است. مدل SRM قابلیت نمایش همزمان هیدروگراف رواناب محاسبه شده و مشاهده شده را دارا می باشد. برای ارزیابی مدل در شبیه سازی رواناب از دو معیار ضریب تبیین و درصد اختلاف حجمی استفاده می شود.

۳.۲. ورودی های مدل

داده های مورد نیاز برای اجرای مدل به سه دسته تقسیم می شوند که عبارتند از ۱- ویژگی های حوضه شامل مساحت حوضه یا ناحیه های ارتفاعی و منحنی ارتفاع-مساحت، ۲- متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژی شامل دما، بارندگی، پوشش برف و دبی، ۳- پارامترهای مدل شامل ضریب رواناب برف و باران، ضریب درجه-روز، درجه حرارت بحرانی، نرخ کاهش درجه حرارت با ارتفاع، ضریب فروکش و زمان تأخیر.

۳.۲.۱. ویژگی های حوضه

برای به دست آوردن ویژگی های حوضه ابتدا فایل های رقومی دوبعدی منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ از سازمان نقشه برداری تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم افزار ARC GIS اقدام به تهیه مدل ارتفاعی دیجیتال^۵ (DEM) یا سطح توپوگرافی زمین بدون پوشش با اندازه سلول ۲۰ متر گردید. در ادامه به وسیله DEM موجود و الحاقی از Arc hydro در نرم افزار ARC GIS مرز منطقه استخراج شد. آنگاه با داشتن مرز حوضه، DEM حوضه از DEM منطقه جدا گردید. با داشتن DEM حوضه پارامترهایی از حوضه از جمله منحنی ارتفاع-مساحت، شیب و جهت شیب حوضه تعیین گردید. شکل (۲)، منحنی هیپسومتری حوضه سد اکباتان را نشان می دهد. همچنین جدول (۱)، ارتفاع متوسط هیپسومتریک و مساحت نواحی ارتفاعی حوضه را نشان می دهد.

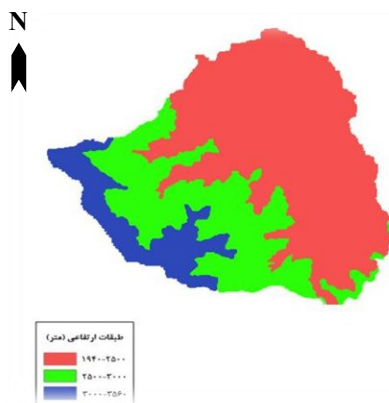


Figure 2. Hypsometric Map of the Ekbatan Dam Basin

Table 1. Elevation Zone Characteristics of the watershed

Elevation Class (m)	Average of class elevation (m)	Area (Km ²)	Area (%)
1940-2500	2220	130.311	58.86
2500-3000	2750	65.622	29.64
3000-3560	3280	25.445	11.5

۴.۲. متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژی

۴.۲.۱. سطح پوشش برف

مقادیر روزانه سطح پوشش برف از متغیرهای مهم ورودی به مدل SRM است. در این پژوهش برای محاسبه سطح پوشش برف از تصاویر روزانه سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شد. سطح پوشش برف در حوضه‌های بزرگ از طریق تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید. در اکثر الگوریتم‌های استخراج اتوماتیک تصاویر برف به صورت باینری طبقه‌بندی و براساس درصد برف موجود در هر پیکسل صورت می‌گیرد. در این روش اگر درصد برف موجود در یک پیکسل مساوی یا بیش‌تر از ۵۰ درصد باشد با کد یک و چنانچه کم‌تر از ۵۰ درصد باشد با کد صفر مشخص می‌شود. در این پژوهش از این طبقه‌بندی برای استخراج پوشش برف استفاده شده است.

۴.۲.۲. بارش

در این مطالعه جهت تعیین گرادیان بارندگی در منطقه مورد مطالعه از بارندگی متوسط سالانه و ارتفاع در شش ایستگاه باران‌سنجی استفاده شد و معادله گرادیان محاسبه شد.

$$P = 0.39H - 324.9 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، P بارندگی متوسط سالانه بر حسب میلی‌متر و H ارتفاع بر حسب متر است. برای انتقال بارندگی به متوسط ارتفاع هیپسومتریک نواحی ارتفاعی از گرادیان بارش استفاده شد.

۴.۲.۳. درجه حرارت

به منظور برآورد عمق ذوب برف روزانه، تعداد درجه-روزها باید تعیین گردد. درجه حرارت به صورت متوسط یا حداکثر و حداقل به کار می‌رود. درجه حرارت‌ها به وسیله گرادیان درجه حرارت به متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوضه یا ناحیه‌های ارتفاعی منتقل می‌شود.

۵.۲. پارامترهای مدل

۵.۲.۱. ضریب رواناب

این ضریب بیانگر تلفات بوده و عبارتست از نسبت جریان خروجی از حوضه به کل آب حاصل از ریزش باران و ذوب برف. جریان رودخانه یا به طور مستقیم از بارشی که به سطح زمین می‌رسد، یا از آب حاصل از ذوب برف ذخیره شده در حوضه و یا هر دو تأمین می‌شود. این ضریب به دلیل ناکافی بودن داده در ارتفاعات به راحتی به دست نمی‌آید. در ابتدای فصل ذوب برف تلفات خیلی کم بوده و زمانی که برفی در حوضه وجود ندارد، در اثر رشد گیاهان تلفات به علت تبخیر و تعرق و نفوذ بیش‌تر می‌باشد. در مدل SRM ضریب رواناب برف و باران از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

۲.۵.۲. فاکتور درجه-روز

این فاکتور به صورت مقدار عمق ذوب شده به تعداد درجه-روز تعریف می شود و به شکل زیر بیان می گردد.

$$M = T \cdot a \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه:

$$M = \text{مقدار ذوب (Cm)}$$

$$a = \text{فاکتور درجه-روز (Cm.C}^{-1}.d^{-1}\text{)}$$

$$T = \text{تعداد درجه روز (C.d)}$$

فاکتور درجه-روز را می توان با محاسبه نسبت کاهش آب معادل برف به درجه-روز اندازه گیری شده به دست آورد و این اندازه گیری می تواند به وسیله تشتک برفی یا لیسیمتر و اندازه گیری های رادیواکتیو برف به دست آید. این پارامتر در طول فصل ذوب برف تغییر می کند و به تدریج از اوایل فصل ذوب برف در طول فصل ذوب افزایش می یابد. در صورت نبودن داده در حوضه و در دسترس بودن چگالی برف، فاکتور درجه-روز از رابطه تجربی زیر (رابطه ۵) به دست می آید.

$$a = 1.1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه:

$$a = \text{فاکتور درجه-روز (cm.C}^{-1}.d^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = \text{چگالی برف}$$

$$\rho_w = \text{چگالی آب}$$

بعضی مواقع در اثر یک پیشامد مانند بارش برف جدید مقدار فاکتور درجه-روز باید به صورت دستی اصلاح و وارد مدل شود تا شرایط غیرعادی ذوب برف را نشان دهد. در این پژوهش به دلیل کمبود اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه فاکتور درجه-روز این فاکتور از طریق واسنجی مدل تعیین گردید.

۲.۵.۳. گرادیان درجه حرارت

اگر چند ایستگاه دماسنجی در ارتفاعات مختلف قرار گرفته باشد با استفاده از داده های ثبت شده در این ایستگاه ها می توان گرادیان درجه حرارت را به دست آورد. اگر ایستگاه دماسنجی در ارتفاعات مختلف وجود نداشته باشد با مقایسه سایر حوضه ها و یا با ملاحظه شرایط هواشناسی گرادیان درجه حرارت به دست می آید. در صورت نبودن آمار معمولاً یک گرادیان ۶/۵- درجه سانتی گراد به ازای هر یک کیلومتر توصیه شده است. گرادیان درجه حرارت برای انتقال درجه حرارت از ایستگاه مبنا به متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوضه و یا ناحیه های ارتفاعی به کار می رود.

۲.۵.۴. درجه حرارت بحرانی

درجه حرارت بحرانی برای تعیین بارش به صورت برف یا باران به کار می رود. مدل SRM به درجه حرارت بحرانی در دو فصل بارش و ذوب برف نیاز دارد. اگر درجه حرارت در متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوضه یا هر یک از ناحیه های ارتفاعی کمتر از دمای بحرانی باشد، مدل بارش را برف در نظر می گیرد و به برف قبلی اضافه می کند که تأثیر آن در رواناب به صورت تأخیری می باشد، اگر درجه حرارت بیش تر از درجه حرارت بحرانی باشد مدل بارش را باران در نظر می گیرد که تأثیر آن در رواناب فوری است. محدوده تغییرات درجه حرارت بحرانی در کوه های آلپ از ۳+ درجه سانتی گراد

در آوریل تا ۰/۷۵+ درجه سانتی‌گراد در جولای تغییر می‌کند. این محدوده را در سایر حوضه‌ها که اطلاعات کافی ندارد نیز می‌توان به کار برد.

۵.۵.۲. ضریب فروکش

همان‌طور که در معادله (۱) دیده می‌شود ضریب فروکش پارامتر بسیار مهمی در مدل SRM است، زیرا (K-1) قسمتی از ذوب روزانه است که بلافاصله به رواناب اضافه می‌شود. روش مناسب برای تعیین ضریب فروکش تحلیل سری زمانی دبی است. در این روش در زمان فروکش هیدروگراف جریان مقادیر دبی هر روز در مقابل دبی روز بعد رسم می‌گردد (شکل ۳). ضریب فروکش یک مقدار ثابت نیست و با کاهش دبی افزایش می‌یابد و از رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$K_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y} \quad \text{رابطه ۶}$$

در معادله فوق توان منفی نشانگر فروکش جریان می‌باشد و در نتیجه مقدار x و y باید مثبت باشد. x و y با حل معادلات زیر برای حوضه تعیین می‌شوند:

$$K_1 = x \cdot Q_1^{-y}$$

$$K_2 = x \cdot Q_2^{-y}$$

$$\ln K_1 = \ln x - y \ln Q_1 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\ln K_2 = \ln x - y \ln Q_2 \quad \text{رابطه ۸}$$

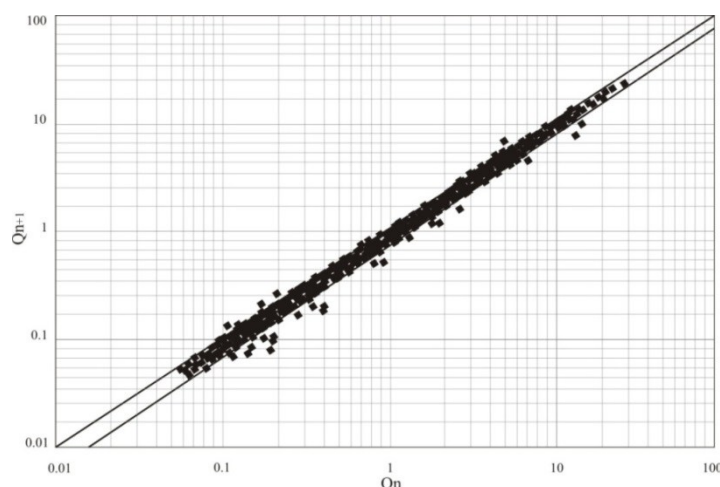


Figure 3. Streamflow Recession Curve

با کمک نمودار شکل (۳)، مقادیر x و y برای حوضه سد اکباتان به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۰۲۵ به دست آمدند.

۵.۵.۲. سطح شرکت‌کننده در بارش

این پارامتر در تبدیل بارش به رواناب مهم می‌باشد. زمانی که بارش به صورت باران باشد، دو نوع رفتار قابل بررسی است. در نوع اول، باران بر روی برف پشته می‌بارد و به دلیل رطوبت پایین و عمق زیاد برف، باران در آن نگهداری می‌شود. در این صورت رواناب ناشی از باران فقط در بخشی از حوضه که فاقد پوشش برف است شکل می‌گیرد. در نوع دوم باران به سطح پوشش برفی و پرآب رسیده است که در این حالت همان میزان بارش باران بر سطح برف، به صورت آب از آن

خارج می‌شود. بنابراین تمامی آب باران به آب حاصل از ذوب برف اضافه می‌گردد. از ذوب برف ناشی از تأثیر گرمای باران در این مدل صرف‌نظر می‌گردد، زیرا گرمایی که توسط باران به برف پشته انتقال می‌یابد بسیار کم است.

۲.۵.۷. زمان تأخیر

بر اساس خصوصیات نوسانات روزانه رواناب حاصل از ذوب برف می‌توان زمان تأخیر را به‌طور مستقیم از هیدروگراف جریان سال‌های گذشته تعیین نمود. به‌عنوان نمونه، اگر دبی هر روز در حوالی ظهر شروع به افزایش نماید، تأخیر دبی نسبت به درجه حرارت حدود شش ساعت می‌باشد. معمولاً دبی در دوره زمانی نیمه‌شب تا نیمه‌شب گزارش می‌شود و برای مقادیر شبیه‌سازی شده نیاز به تطبیق دارد. بنابراین، مقادیر شبیه‌سازی شده را می‌توان برای دوره زمانی نیمه‌شب تا نیمه‌شب منطبق نمود. در مدل SRM برای انطباق ذوب برف و دبی حاصل از آن تقسیم‌بندی زمانی شش ساعته‌ای در نظر گرفته شده است. بر این اساس، برای زمان تأخیر شش ساعته، ۵۰ درصد ورودی حاصل از بارش مازاد و درجه حرارت در هر روز با ۵۰ درصد آن‌ها در روز بعد برابر مقدار روانابی است که در روز دوم از حوضه خارج می‌شود.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

برخی از پارامترهای مدل از جمله ضریب رواناب برف و باران، درجه حرارت بحرانی، زمان تأخیر و نرخ کاهش درجه حرارت با ارتفاع به‌دلیل موجود نبودن داده‌های مشاهده‌ای کافی قابل محاسبه نیستند و در مرحله واسنجی تعیین شدند. پس از به‌دست‌آوردن مشخصات حوضه و تنظیم ورودی‌های مدل به‌صورت روزانه برای سال‌های آبی ۲۰۰۲-۲۰۰۳ و ۲۰۰۳-۲۰۰۴، از داده‌های سال آبی ۲۰۰۲-۲۰۰۳ جهت واسنجی مدل استفاده گردید. شکل (۴) تغییرات دبی روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را در سال آبی ۲۰۰۲-۲۰۰۳ نشان می‌دهد. ضریب تبیین دبی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده معادل ۰/۹۳ و اختلاف حجمی در کل سال آبی ۴/۷۴ درصد است. به‌منظور تحلیل حساسیت مدل SRM نسبت به پارامترها، پارامترهای درجه حرارت بحرانی، فاکتور درجه-روز و ضریب رواناب برف و باران را به اندازه ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش و کاهش داده و با استفاده از مدل SRM حجم رواناب سالانه در سال آبی ۲۰۰۲-۲۰۰۳ محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد مدل به پارامترهای ضریب رواناب برف و باران بیش‌تر از سایر پارامترها حساس بوده و به پارامتر درجه حرارت بحرانی حساسیت کم‌تری نشان می‌دهد. البته در فصل ذوب برف، مدل نسبت به فاکتور درجه-روز، ضریب رواناب برف و درجه حرارت بحرانی حساس‌تر است.

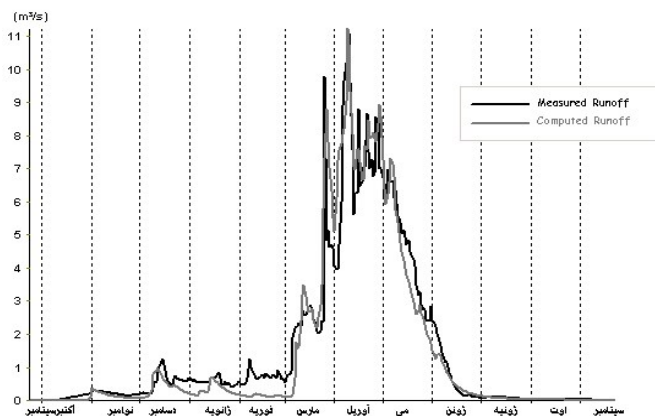


Figure 4. Comparison of Simulated and Observed Daily stream flow during the 2002-2003 water year

برای ارزیابی مدل SRM واسنجی شده، از داده‌های سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ استفاده شد. تغییرات دبی روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ در شکل (۵) نشان داده شده است. بررسی شکل انطباق خوب دبی روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. ضریب تبیین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ۰/۸۴ و اختلاف حجمی در کل سال آبی ۲/۱۵ می‌باشد.

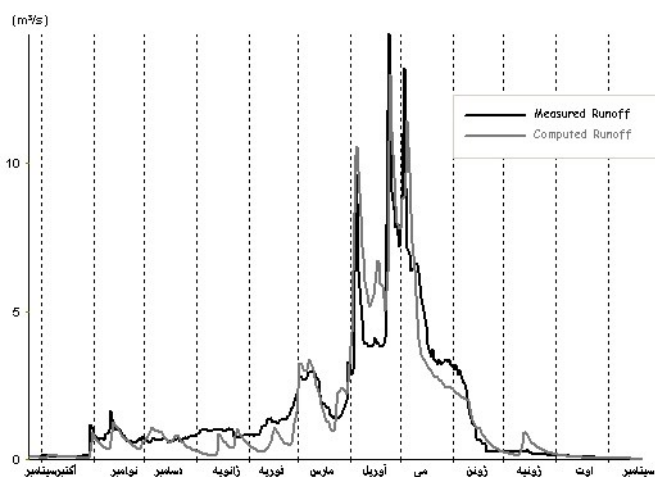


Figure 4. Comparison of Simulated and Observed daily stream flow during the 2003-2004 water year

نجفی ایگدیر و همکاران (۲۰۰۷)، در پژوهشی مشابه در حوضه شهر چائی ارومیه، ضریب تبیین و تفاضل حجمی را به ترتیب ۰/۸۱ و ۲/۷۵ به دست آوردند. نجفی و همکاران (۲۰۰۴)، در پژوهش خود برای برآورد رواناب به وسیله مدل SRM در حوضه آبخیز مهاباد به ضریب همبستگی ۰/۸۵ و درصد اختلاف حجمی ۳/۷۹- رسیدند. با مقایسه نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده در سایر حوضه‌های کشور با نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان دریافت که مدل SRM برای پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف در منطقه موردنظر از دقت خوبی برخوردار است. علاوه بر آن در اکثر مطالعات انجام شده در کشور ما بیش‌تر پارامترهای مدل از طریق واسنجی به دست آمده‌اند.

سورمن و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهش خود در حوضه‌های دجله و فرات به وسیله مدل SRM، اختلاف حجم ۰/۲۵ تا ۲/۴۷ درصد و ضریب تبیین ۰/۹۳ تا ۰/۹۵ را به دست آوردند. همچنین مالچر و هیدینگر (۲۰۰۱)، با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS برای چهار زیرحوضه در شرق اتریش پیش‌بینی رواناب را به وسیله مدل SRM انجام دادند و در آن، اختلاف حجم ۲/۳۵، -۵/۵۶، ۰/۴۴ و ۰/۴۹ درصد و ضریب تبیین ۰/۹۳، ۰/۹۲، ۰/۸۷ و ۰/۸۸ را به دست آوردند. این نتایج نیز مؤید دقت خوب شبیه‌سازی رواناب توسط مدل SRM در حوضه سد اکباتان است. با توجه به مطالب فوق و به منظور بررسی شناسایی کارکرد مدل SRM در حوضه‌های کوهستانی ایران، معیارهای ارزیابی دقت مدل (ضریب تبیین و درصد اختلاف حجمی) مورد بررسی قرار گرفته و سپس با نتایج حاصل از ارزیابی دقت مدل در حوضه‌های خارج از کشور مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشانگر تغییرپذیری بیش‌تر درصد اختلاف حجمی در مقایسه با ضریب تبیین در حوضه‌های جهان و تغییرات کم‌تر درصد اختلاف حجمی و تغییرات بیش‌تر ضریب تبیین در حوضه‌های ایران است. همچنین عدم وجود اختلاف بین ضریب تبیین در حوضه‌های ایران و سایر نقاط جهان بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در دقت شبیه‌سازی رواناب ذوب برف، در حوضه‌های کشور ما و سایر نقاط جهان است. این نتایج بیانگر دقت خوب و در نتیجه قابلیت کاربرد مدل SRM برای برآورد رواناب در حوضه‌های کوهستانی و برف‌گیر ایران است.

در این پژوهش، از تصاویر روزانه پوشش برف سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر که توسط سازمان فضایی ناسا تهیه شده است استفاده گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دقت خوب تصاویر MODIS در تعیین پوشش برف منطقه را نشان می‌دهد. با توجه به دقت این تصاویر در برآورد وسعت پوشش برف (دقت زمانی و مکانی) پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های بعدی از تصاویر این سنجنده استفاده شود. مطالعات انجام‌شده توسط سونگ‌وئون و همکاران (۲۰۰۵) نیز دقت بالاتر تصاویر MODIS در پیش‌بینی رواناب را نشان می‌دهد. نتایج پژوهش آن‌ها به این ترتیب بود که مدل رواناب حوضه ریواوجو^۱ را با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA و MODIS به ترتیب با اختلاف حجم ۴۶/۶- و ۳۸/۶- درصد و با مجذور ضریب همبستگی ۰/۲۲ و ۰/۶۳ شبیه‌سازی کرده است.

مدل SRM برای شبیه‌سازی رواناب ذوب برف، از متوسط درجه حرارت روزانه استفاده می‌کند و این امر باعث می‌شود در زمستان که درجه حرارت متوسط کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد است، مدل هیچ ذوب برفی برای این مدت را در نظر نگیرد، اما همانطور که از بررسی هیدروگراف جریان مشاهده‌ای برمی‌آید ذوب برف در زمستان به دلیل بالا رفتن دما در ساعاتی از روز وجود دارد. برای رفع این مشکل پیشنهاد می‌گردد دما در طول روز به صورت پیوسته اندازه‌گیری شود در این صورت می‌توان محاسبه کرد چند ساعت در روز مقدار دما بالاتر از درجه حرارت بحرانی است و بدین ترتیب مقدار درجه-روز را به دست آورد.

۴. نتیجه‌گیری

در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل SRM برای محاسبه رواناب در حوضه‌های کوهستانی که ذوب برف در آن‌ها بخش اصلی رواناب را تشکیل می‌دهد (مانند حوضه آبریز سد اکباتان) مناسب است. مدل SRM همراه با فناوری سنجنش از دور برای محاسبه رواناب در حوضه‌هایی که فاقد داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی برف هستند مورد استفاده قرار گرفته و در همه موارد نتایج حاصل از مدل رضایتبخش بوده است. نتایج حاصل از برآورد رواناب ذوب برف با مدل SRM در حوضه سد اکباتان بیانگر قابلیت کاربرد مدل برای حوضه‌های دیگر منطقه است. استفاده از محصول پوشش برف روزانه MODIS (هر روز یک تصویر) با قدرت تفکیک خوب (۵۰۰ متر) بر دقت شبیه‌سازی افزوده است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Streamflow Runoff Model (SRM)
2. Spot, Landsat, NOAA
3. Rio Grande & Rio Ojo
4. Otzal, Vent-Rofen, bergurgel, Huben & Tumpfen
5. Digital Elevation Model (DEM)

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Bales, R. C., & 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, pp.443-459.

- Bocchiola, D., & Rosso, R. (2007). The Distribution of Daily Snow Water Equivalent in the Central Italian Alps. *Advances in Water Resources*, 30, 135-147.
- Boudhar, A., Hanich, L., Boulet, G., Duchemin, B., Berjamy, B., & Chehbouni, A. (2009). Evaluation of the snowmelt runoff model in the Moroccan High Atlas Mountains using two snow-cover estimates. *Hydrological Sciences*, 54(6).
- Bhagwat, N., Zhou, X., Nagisetty, R. M., Jiang, L., Shaw, G., Apple, M., & Clotfelter, J. (2025). Snowmelt Runoff Model (SRM) for regulated watersheds with regulation-correction. *Applied Water Science*, 15, Article 178.
- DeBeer, C. M., & Pomeroy, J.W. (2010). Simulation of the snowmelt runoff contributing area in a small alpine basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7, 971-1003.
- Entazami, H., Alavipanah, S.K., Matinfar, H.K., Darvishi-Bolourani, A., & Chapi, K. (2022). Snowmelt Runoff Estimation Using Remote Sensing and SRM Model in Saqez Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 13 (4), 704-717. (In Persian).
- Gomes-landesa, E., Rango, A., & Hall, D. K. (2000). Improved snowcover remote sensing for snowmelt runoff forecasting. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*, 267, 61-65.
- Kazama, S., Izumi, H., Sarukkalige, P.R., Nasu, T., & Sawamoto, M. (2008). Estimating Snow Distribution over a Large Area and Its Application for Water Resources. *Hydrological Processes*, 22, 2315-2324.
- Malcher, P., & Heidinger, M. (2001). Processing and Data Assimilation Scheme for Satellite Snow Cover Products in the Hydrological Model. EnviSnow Project EVG1-CT-2001-00052, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria
- Martinec, J., Rango, A., & Roberts, R. (2008). Snowmelt runoff model user's manual. <https://pubs.nmsu.edu/water/SRMSpecRep100.pdf>
- Naderi, A. (2010). Estimation of snowmelt runoff in the Ekbatan Dam Watershed using the Snowmelt Runoff Model (SRM), And Geographic Information System (GIS). M.Sc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Najafi, M., Sheikhivand, J., & Porhemat, J. (2004). Estimation of Snowmelt Runoff in snow-covered watershed usin SRM (Case study: Mahabad Dam Basin). *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 11(3), 111-122.
- Najafi Ighdir, A., Ghodousi, J., Toghian, B., & Porhemat, J. (2007). Estimated of snowmelt runoff using RS & GIS in the chay watershed, Urmia. *Natural Resources*, 185, 76-177.
- Nourani, V., Afkhaminia, A., & Andaryani, S. (2020). Multi-station calibration of Snowmelt Runoff Model (SRM) using remotsensing tool in Aji-Chay Basin, Iran. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 10(2), 101-112
- Seidel, K., & Martinec, J. (2002). Hydrological application of satellite snow cover mapping in the Swiss Alps, Proceeding of EARSEL-LISSIG workshop, 79-87.
- Songweon, L., Klein, A.G., & Over, T.M. (2005). An assessment of the suitability of MODIS snow products for simulating stream flow in the upper Rio Grande river basin using the snowmelt runoff model. *Hydrological Processes*, 19, 2951-2972.
- Sorman, A., Tekeli, A. E., Sorman, A. A., & Sorman, A.Ü. (2003). Simulation of event-based snowmelt runoff hydrographs based on snow depletion curves and the degree-day method. *Journal of Remote Sensing*, 29 (6), 693-700.
- Tekeli, A.E., Akyurek, Z., Sorman, A., Sensoy, A., & Sorman, A.U. (2005). Using MODIS SnowCover Maps in Modeling Snowmelt Runoff Process in the Eastern Part of Turkey. *RemoteSensing of Environment*, 97, 216-230.
- WMO. (1986). Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology Report 23, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 1986. WMO -No.646.