



Modeling Snowmelt Runoff by SRM Model and the Estimation of Degree-Day Factor using Net Radiation Satellite Images (Case Study: Kardeh Basin)

Reza Shahraki Mojahed^a, Amin alizadeh^{b*}, Seyyed Hossein Sanaei Nezhad^c, Alireza Faridhosseini^d, Azar Zarrin^e

^a PhD Candidate in Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b Professor in Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^c Professor in Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^d Associate Professor in Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^e Associate Professor in Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 7 September 2022

Revised: 8 October 2022

Accepted: 16 October 2022

Abstract

Snow studies drastically influences on managing water resources and preventing the dangers caused by floods. Moreover, the modeling of snow melt runoff is faced with the lack of snow density data in the basin due to many changes in the distribution of snow masses, and creating snow measurement stations at high altitudes are difficult and expensive work. Considering the issues, this study attempted to invent a new equation and use remote sensing techniques in a simpler and more physical way to determine the degree-day factor (α) and then the simulation was performed by defining its calculated values using classical and new methods along with the annual and seasonal values of the recession coefficient (k) for the snow-melt runoff model (SRM). The outcomes were evaluated and compared. In order to evaluate the performance of the model and its parameters, simulations were performed for the calibration and validation periods for the water years 2011-2012 and 2012-2013, respectively, and the MODIS snow cover product (MOD10A1) was used to estimate the snow-covered area and to estimate the radiation values. NEO net radiation product (CERES-NETFLUX-E) was used. The results showed that the best method for simulating runoff in the calibration period (2011-2012) was the new degree-day factor calculation method and the two values of the seasonal recession coefficient with the coefficient of determination of 0.72 and the volume difference of 4.17. In the validation period (2012-2013), the runoff simulation method with the new degree-day factor method and an annual recession coefficient with a coefficient of determination of 0.51 and the volume difference of 4.38 provided the best results in terms of assessment of the model accuracy criteria.

Keywords: Snowmelt, Degree-day Factor, Remote Sensing, MODIS, Net Radiation

*.Corresponding author: Amin Alizadeh Email: alizadeh@um.ac.ir Tel:+989151154640

How to cite this Article: Shahraki Mojahed, R., Alizadeh, A., Sanaei-Nejad, S. H., Faridhosseini, A., & zarrin, A. (2024). Modeling Snowmelt Runoff by SRM Model and the Estimation of Degree-Day Factor using Net Radiation Satellite Images (Case Study: Kardeh Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1)1-21

DOI: 10.22067/geoh.2022.78658.1280



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024

<https://geoeh.um.ac.ir>



<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78658.1280>



جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شمارهٔ چهل و نهم، بهار ۱۴۰۳، صص ۱-۲۲

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل SRM و برآورد پارامتر فاکتور درجه-روز با استفاده از

تصاویر ماهواره‌ای تابش خالص (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارده)

رضا شهرکی مجاهد- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

امین علیزاده^۱ - استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سیدحسین ثنائی نژاد- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

علیرضا فریدحسینی- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

آذر زرین- دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۱۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۷/۲۴

چکیده

با توجه به تأثیر مطالعات برف در مدیریت منابع آب و جلوگیری از مخاطرات ناشی از بروز سیل و از آنجا که مدل‌سازی رواناب ذوب برف به دلیل تغییرات بسیار در پراکندگی توده‌های برف با کمبود یا فقدان داده چگالی برف در حوضه آبریز مواجه بوده و ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری برف در ارتفاعات کاری سخت و پرهزینه است، در این مطالعه تلاش شده با ابداع معادله‌ای جدید و با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور به روشی ساده‌تر و فیزیکی‌تر پارامتر فاکتور درجه-روز (α) را محاسبه کرده و سپس شبیه‌سازی با تعریف مقادیر محاسبه شده آن به روش‌های کلاسیک و جدید در کنار مقادیر سالانه و فصلی ضریب فروکش (k) برای مدل رواناب ذوب

Email: alizadeh@um.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۱۱۵۶۶۴۰

نحوه ارجاع به این مقاله:

شهرکی مجاهد، رضا؛ علیزاده، امین؛ ثنائی نژاد، سید حسین؛ فرید حسینی، علیرضا؛ زرین، آذر؛ ۱۴۰۳. مدل‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل SRM و برآورد پارامتر فاکتور درجه-روز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تابش خالص (مطالعه موردی: حوضه

آبریز کارده). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳(۱). صص ۱-۲۲

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78658.1280>

برف (SRM) انجام شده و نتایج حاصل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل و پارامترهای آن، شبیه‌سازی برای دوره‌های واسنجی و درستی‌سنجی به ترتیب برای سال‌های آبی ۲۰۱۱-۲۰۱۲ و ۲۰۱۲-۲۰۱۳ انجام شد و از محصول پوشش برف MODIS (MOD10A1) جهت برآورد سطح پوشش برف و برای برآورد مقادیر تابش خالص از محصول تابش خالص NEO (CERES- NETFLUX-E) استفاده گردید. نتایج نشان داد بهترین روش شبیه‌سازی رواناب در دوره واسنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۲) استفاده از روش محاسبه فاکتور درجه-روز جدید و کاربرد دو مقدار ضریب فروکش جریان فصلی با ضریب تبیین ۰/۷۲ و درصد اختلاف حجمی ۴/۱۷ است. در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۳) نیز شبیه‌سازی رواناب با روش محاسبه فاکتور درجه-روز جدید و یک ضریب فروکش سالانه با ضریب تبیین ۰/۵۱ و درصد اختلاف حجمی ۴/۳۸ بهترین نتیجه را از نظر ارزیابی معیارهای دقت مدل ارائه کرد.

کلیدواژه‌ها: ذوب برف، فاکتور درجه-روز، سنجش‌ازدور، MODIS، تابش خالص

۱- مقدمه

ایران سرزمین کم‌آبی است که در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین قرار گرفته است و لذا بارش برف مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در میزان ذخایر آب، به‌ویژه در فصول گرم سال محسوب می‌گردد (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۴). برف یک شکل از بارش است که به دلیل تأخیر در تبدیل آن به رواناب تفاوت ویژه‌ای با دیگر اجزاء دارد (عالی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۶). 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 بارش‌های بهاره منشأ بروز سیلاب‌های مخرب با حجم جریان بیش از ظرفیت رودخانه‌ها می‌شود (میریعیقوب‌زاده و قنبرپور، ۱۳۸۹). برآورد دقیق آب معادل برف و همچنین تغییرات سطح پوشش آن، در بخش‌های کشاورزی، انرژی، مدیریت مخزن و هشدار وقوع سیل مؤثر است (جهان‌بخش اصل و همکاران، ۱۳۹۵). شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در مناطق کوهستانی نه‌تنها برای ارزیابی مخاطرات سیل ناشی از ذوب برف در بهار و تابستان، بلکه برای توسعه و مدیریت منابع آب در حوضه اهمیت زیادی دارد (هاو و همکاران، ۲۰۱۹)؛ اما در کشورهای درحال‌توسعه و مناطق دورافتاده با کوه‌های مرتفع، برآورد برف روی سطح زمین به دلیل توپوگرافی پیچیده عدم دسترسی و محدودیت‌های مالی بسیار سخت و محدود است (ویوویچ و جاکوبز،

1 Hao et al.

2 Vuyovich et al.

(۲۰۱۱). با وجود تغییرات زیاد در توزیع زمانی و مکانی برف انباشته شده، اطلاعات مشاهده‌ای زمینی برف اندک و معمولاً به نواحی با ارتفاع کمتر محدود می‌شود که این موضوع کاربرد سنجش‌ازدور در تأمین بخشی از اطلاعات برف را اجتناب‌ناپذیر نموده است، بعلاوه مدل‌های پیش‌بینی رواناب حاصل از ذوب برف نیاز به اطلاعاتی دارند که این اطلاعات با فقر آمار در مناطق برف‌گیر حوضه‌های آبریز عمدتاً قابل‌دسترس و یا تأمین نیستند که با این توصیف تکنیک سنجش‌ازدور به‌عنوان ابزاری جدید و مفید برای به‌دست آوردن داده‌های برف مطرح می‌باشد (نجف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۳). اندازه‌گیری‌های میدانی که به‌ویژه در مناطق کوهستانی انجام می‌شود اغلب بدون استفاده از فناوری‌های جدید غیرممکن است (شهابی و همکاران، ۲۰۱۴). فناوری سنجش‌ازدور با آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی پیوسته و با دقتی بالاتر و هزینه کمتر می‌تواند خلأ آمارهای هیدرولوژیکی را پر کند (طالبی اسفندرانی و همکاران، ۱۳۹۰). به‌طور کلی، مدل‌سازی ذوب برف و رواناب حاصل از آن با استفاده از دو روش انجام می‌شود: روش تعادل انرژی و روش درجه-روز دما که روش دوم می‌تواند در غیاب داده‌های کافی مفیدتر باشد (سنزبا و همکاران^۱، ۲۰۱۵). پارامترهای برف نقش بسیار مهمی در چرخه هیدرولوژیکی، الگوی آب‌وهوای محلی و تغییر اقلیم ایفا می‌کنند و درنهایت بر کل رواناب، جریان رودخانه‌ها و آب در دسترس از طریق مقدار و زمان ذوب برف تأثیر می‌گذارند (نانچهانی و همکاران^۲، ۲۰۲۰).

در مرور پژوهش‌های مرتبط انجام شده در این حیطه، مارتینک (۱۹۸۹) در سایت آزمایشگاهی weissfluhjoch واقع در آلپ سوئیس میزان ذوب ساعتی برف را در سراسر یک فصل ذوب برف محاسبه کرد و بده پوشش برف به‌طور مداوم توسط یک لایسیمتر برف اندازه‌گیری شد. مقادیر α_r طی تمام دوره فرسایش بیشتر در محدوده ۰/۲ تا ۰/۲۵ به‌دست آمد و مقادیر محاسبه شده می‌تواند برای مطالعات حرکت آب در پوشش برف استفاده شود. کوستاس و رانگو (۱۹۹۴) یک مؤلفه تابش ساده را با روش درجه-روز در تلاش برای بهبود برآورد ذوب برف در مدل SRM^۳ ترکیب کردند. هدف از این مطالعه ایجاد فاکتور ذوب برف فیزیکی‌تر برای SRM توسط ترکیب روش بودجه تابش ساده شده با روش درجه-روز بوده است. برای روش درجه-روز محدود مقدار ثابت ۰/۲ برای α_r در طول فصل ذوب برف استفاده شد؛ در حالی که در روش درجه-روز اصلی مقادیر α به‌تدریج از ۰/۴۸ در ماه مه افزایش یافت و به ۰/۵ در ژوئن و ۰/۵۲ در ماه ژوئیه رسید. بروبکر و همکاران^۴ (۱۹۹۶) پژوهشی در حوضه آبریز اسلیپرز ریور انجام دادند. هدف از این مطالعه ترکیب ورودی تابش در مدل رواناب ذوب برف بود. مقدار فاکتور درجه-روز محدود شده (α_r) برای

1 Senzeba et al.

2 Nunchhani et al.

3 Snowmelt Runoff Model

4 Brubaker et al.

تمامی ماه‌های فصل ذوب در تمام سال‌های مورد مطالعه مقدار ۰/۲ برآورد شد. نتایج به دست آمده نشان داد که نسخه ترکیبی تابش عملکرد بهتری نسبت به نسخه درجه-روز متداول SRM داشته است. وفاخواه و همکاران (۲۰۱۴) مدل تابشی و درجه-روز SRM را مقایسه کردند. آن‌ها در مدل تابشی SRM از فاکتور درجه-روز محدود شده (α_r) استفاده کردند و در این مطالعه، تابش خالص با استفاده از تصاویر MODIS برآورد شد. در نتایج به دست آمده مشخص شد ضریب فروکش و ضریب رواناب ذوب برف حساس‌ترین پارامترها هستند و مدل تابشی SRM نتیجه بهتری با توجه به معیارهای دقت به دست آورد. استیلی و همکاران^۱ (۲۰۱۷) محصولات برفی MODIS برای مدل‌سازی رواناب ذوب برف را در حوضه آبریز رودخانه ریوگرانده مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به کاربران توصیه می‌کنند هنگام شبیه‌سازی ذوب برف با مدل SRM یکی از محصولات اصلاح شده با سایبان^۲ MODSCAG یا محصولات مخصوص به موقعیتشان را از مجموعه Collection 6 NDSI MOD10A1 انتخاب و استفاده کنند. شی و همکاران^۳ (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای الگوریتم‌های بهینه‌سازی را برای کالیبراسیون پارامترهای متغیر در زمان مدل رواناب برف (SRM) در شبیه‌سازی جریان آب ناشی از ذوب برف برای حوضه رودخانه ماناسی بررسی کردند و نشان دادند برای شبیه‌سازی یک فصل ذوب برف، طول زیردوره تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مدل دارد. نانچ‌های و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای برف در حوضه دیبانگ، آرونچال پرادش، هند را با استفاده از مدل رواناب ذوب برف توزیع شده فضایی (SDSRM^۴) همراه با سنجش‌ازدور و تکنیک‌های GIS را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که می‌توان آن را برای استفاده در حوضه‌های اندازه‌گیری نشده یا کمی اندازه‌گیری شده در منطقه هیمالیا توصیه کرد. زیمنس و همکارانش^۵ (۲۰۲۱) تخلیه رواناب در حوضه بالادست رودخانه آتاباسکای در غرب کانادا را با استفاده از مدل رواناب ذوب برف SRM و مشاهدات سنجش‌ازدور برف MODIS را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد گنجاندن تغییرات مکانی و زمانی در فاکتور درجه-روز و جداسازی آن برای مناطق یخ‌زده و بدون توده برف برای بهبود شبیه‌سازی شرایط مختلف برف در طول چند سال مهم بوده است. همچنین آن‌ها اظهار داشتند این مدل در شبیه‌سازی جریان‌ات تاریخی به خوبی عمل کرده است.

میریعقوب زاده و همکاران (۱۳۹۰) در حوضه آبخیز سد کرج نشان دادند که مدل SRM با ضریب تبیین ۰/۴۷ و ۰/۹۴ به خوبی قادر به مدل کردن فرآیند رواناب حاصل از ذوب برف می‌باشد. در پژوهشی دیگر، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از مدل SRM و تصاویر هشت روزه سنجنده MODIS رواناب روزانه

1 Steele et al.

2 the MODIS Snow Covered-Area and Grain size retrieval

3 Xie et al.

4 Spatially Distributed Snowmelt Runoff Model

5 Siemens et al.

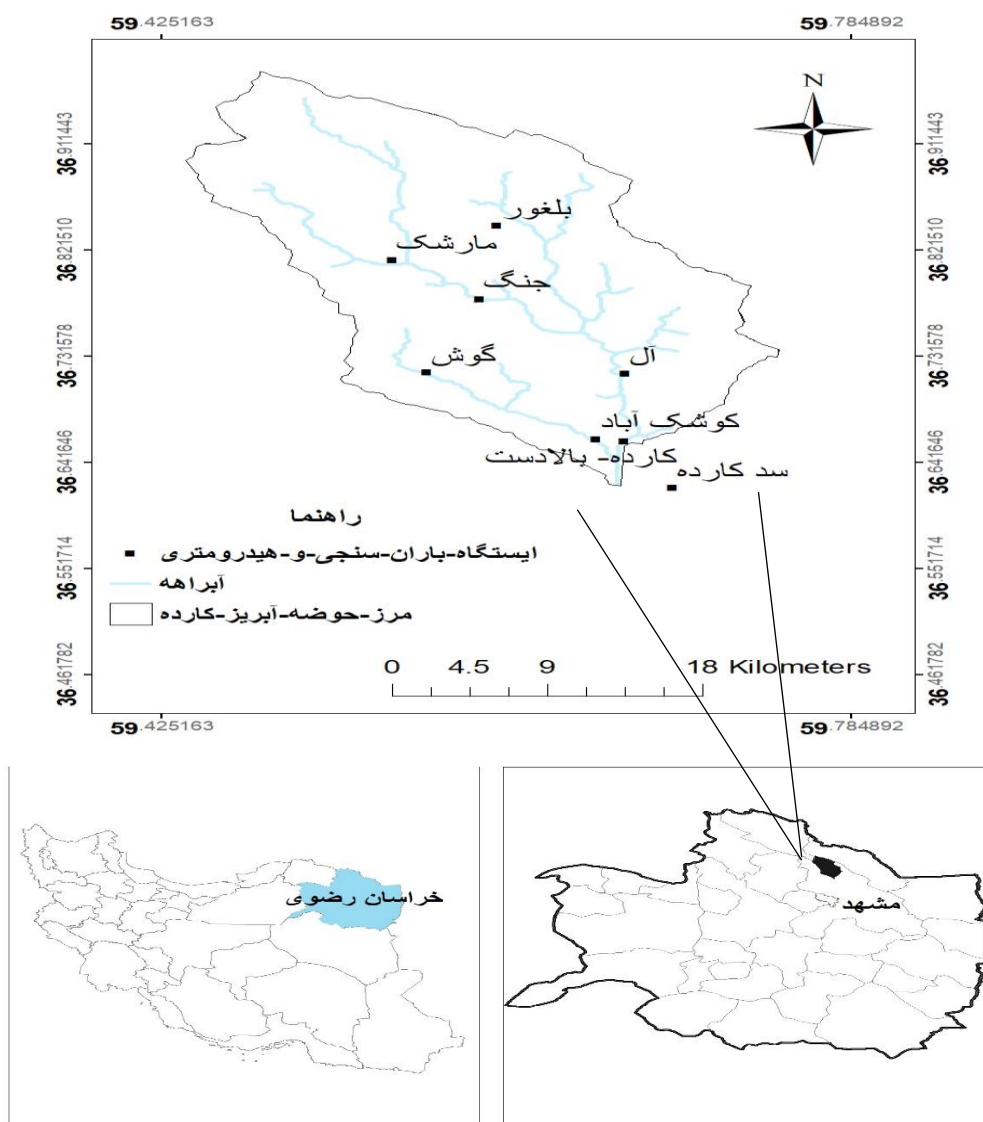
حاصل از ذوب برف را برای حوضه آبریز نهاوند، مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار دادند. بالاترین ضرایب همبستگی و تفاضل حجمی برای مدل در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۳/۶۲- و در دوره درستی‌سنجی برابر ۰/۷۹ و ۲۶/۶۷ به دست آمد. تحلیل حساسیت پارامترهای ضریب درجه-روز، ضریب رواناب برف و باران مدل انجام گردید که نشان دهنده حساسیت کمتر مدل به افزایش و کاهش ضریب رواناب باران در میان سایر پارامترها بود. اربابی سبزواری و نجاری (۱۳۹۶) به پژوهشی مشابه در ارتفاعات حوضه آبخیز طالقان پرداختند. مدل، آبدهی روزانه را با مجذور ضریب همبستگی ۰/۴۵٪ شبیه‌سازی کرد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهند که مدل شبیه‌ساز SRM ابزاری بسیار مناسب برای برآورد میزان رواناب حاصل از ذوب برف می‌باشد و از دقت بالایی برخوردار است و این مدل جهت مدیریت منابع آب کارآمد می‌باشد. در پژوهشی مشابه، **رشیدی و همکاران (۱۳۹۶)** با استفاده از مدل SRM رواناب روزانه حاصل از ذوب برف را با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS در حوضه آبریز دربند سملقان محاسبه کردند. نتایج کاربرد مدل شبیه‌سازی موفق و قابل قبولی را نشان داده است. نتایج برای تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای ضریب رواناب برف، فاکتور درجه-روز و افت محیطی دما نشان داد که سه پارامتر یاد شده در بالا بر ضریب تبیین و درصد تفاضل حجمی مؤثرند که البته مدل نسبت به تغییرات افت محیطی دما نسبت به دو پارامتر دیگر از حساسیت کمتری برخوردار است. در پژوهشی به منظور پایش زمانی و مکانی سطح پوشش برف، میزان ضریب تبیین (R^2) به دست آمده برای مدل‌های SRM و HBV¹ در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۱ و ۰/۶۱ و مقدار ۰/۷۲ و ۰/۶۹ برای مرحله اعتبارسنجی به دست آمد (**ارتیمانی و همکاران ۱۳۹۸**). مدل SRM به دلیل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نسبت به مدل HBV عملکرد قابل قبول‌تری در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف از خود نشان داد. **عالی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۰)** رواناب ناشی از ذوب برف را در حوضه‌ی قره‌سو با مدل SRM شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت بالای این مدل می‌باشد، به طوری که ضریب تبیین (R^2) برای سال‌های آبی ۹۵-۹۶ الی ۹۶-۹۷ به ترتیب معادل ۰/۹۳ و ۰/۹ و درصد خطای حجمی (D_v) آن نیز به ترتیب ۰/۳ و ۳/۳۳ به دست آمد.

فقر آمار و اطلاعات در حوضه‌های آبریز یکی از چالش‌های جدی پیش روی مدل‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف می‌باشد که کار تعیین و محاسبه پارامترهای ورودی به مدل را سخت و دشوار می‌سازد. یکی از پارامترهای ورودی مهم در مدل رواناب ذوب برف (SRM) فاکتور درجه-روز (α) است. مقادیر فاکتور درجه-روز (α) در حوضه‌های آبریز به صورت متداول و کلاسیک توسط داده‌های اندازه‌گیری شده چگالی برف محاسبه و تعیین می‌شود و سپس به مدل SRM وارد می‌گردد. این داده‌ها به دلیل توزیع مکانی و زمانی سطوح پوشیده از برف و کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری در ارتفاعات مختلف دارای کیفیت پایین، کمبود و

فقدان در زمان و مکان‌های مختلف در حوضه‌های آبریز است. از آنجاکه برف در مناطق صعب‌العبور تجمع می‌یابد، ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری و برف‌سنجی در ارتفاعات کاری سخت، زمان‌بر و پرهزینه است و با توجه به اینکه در مدل SRM عمق ذوب برف روزانه رابطه مستقیم با پارامتر فاکتور درجه-روز و دما دارد و از سوی دیگر مؤلفه تابش خالص در محاسبات فاکتور درجه-روز (α) به روش متداول و کلاسیک آن در نظر گرفته نمی‌شود و در نتیجه تأثیر آن در عمق ذوب برف منظور نمی‌گردد، هدف از این مطالعه آن است تا با استفاده از معادله‌ای جدید و برگرفته از معادلات گذشته تعیین عمق ذوب برف ارائه شده توسط کوستاس (۱۹۹۴) و برویکر (۱۹۹۶) همراه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تابش خالص و تکنیک‌ها سنجش‌ازدور به روشی ساده، کم‌هزینه، دقیق‌تر و فیزیکی‌تر فاکتور درجه-روز (α) را محاسبه کرده و سپس مقادیر به‌دست آمده را جهت شبیه‌سازی رواناب ذوب برف برای مدل SRM تعریف کرده و عملکرد روش جدید را در مقابل روش متداول و کلاسیک محاسبه فاکتور درجه-روز (α)، در کنار لحاظ کردن مقادیر متفاوت پارامتر ضریب فروکش (k) در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل را ارزیابی و بررسی کنیم. در این مطالعه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف رواناب ذوب برف توسط مدل SRM با تعریف مقادیر فاکتور درجه-روز (α) محاسبه شده با روش جدید و کلاسیک و تعریف مقادیر سالانه و فصلی برای پارامتر ضریب فروکش (k) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است و بهترین روش محاسبه فاکتور درجه-روز (α) و بهترین شیوه شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضه آبریز مورد مطالعه توسط مدل SRM تعیین گردیده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد کارده با مساحتی حدود ۵۴۴/۲۶۳ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و شمال استان خراسان رضوی و در شمال شهرستان مشهد قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی آن بین ۲۵' ۵۹° تا ۴۵' ۵۹° طول جغرافیایی و ۳۸' ۳۶° تا ۵۹' ۵۷" ۳۶° عرض جغرافیایی قرار گرفته و این حوضه از زیر حوضه-های اصلی حوضه آبریز کشف‌رود به‌شمار می‌رود. کم ارتفاع‌ترین نقطه حوضه در محل سد کارده با ارتفاع ۱۲۰۰ متر و بلندترین نقطه آن در ارتفاعات شمال حرکت با ارتفاع ۲۹۷۷ متر واقع شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد استفاده در حوضه آبریز کارده

۳- مواد و روش‌ها

مدل رواناب ذوب برف (SRM) که توسط مارتینک در سال ۱۹۷۵ توسعه داده شد، یک روش مفهومی نیمه‌توزیعی درجه-روز دما، برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب روزانه حاصل از ذوب برف و بارندگی در حوضه‌های کوهستانی است (مارتینک و همکاران، ۲۰۰۸). پارامترهای SRM شامل ضریب فروکش، فاکتور درجه-روز و ضرایب رواناب برای برف و باران می‌باشند که می‌توانند شبیه‌سازی رواناب را اصلاح و تعدیل

کرده و بر عملکرد مدل تأثیر بگذارند (پاندی و همکاران^۱، ۲۰۱۴). SRM در گام زمانی روزانه و شبیه‌سازی جریان مبتنی بر تغییرات دمای روزانه، بارش و پارامترهای مختلف به نمایندگی از شرایط فیزیکی حوضه عمل می‌کنند (الیاس و همکاران^۲، ۲۰۱۵). فراهم کردن داده‌های عمده برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی جریان در حوضه‌های کوهستانی و با توجه به نقش مهم رواناب ذوب برف و همچنین کمبود داده در این مکان‌ها یک چالش است (فیروزی و صادقیان، ۲۰۱۶). همچنین هرگونه تقویت در اساس فیزیکی روش درجه-روز، استفاده از آن را در پیش‌بینی رواناب ذوب برف و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بهبود خواهد بخشید (کوستاس و رانگو^۳، ۱۹۹۴).

مدل رواناب ذوب برف (SRM): رواناب حاصل از ذوب برف و باران را به‌طور روزانه محاسبه کرده و با لحاظ کردن فروکش جریان، دبی خروجی از حوضه را برآورد می‌کند. مساحت و محدوده حوضه و ناحیه-های ارتفاعی بوسیله نقشه DEM^۴ منطقه و توسط نرم افزار ARCGIS به‌دست آمد. منطقه به سه ناحیه ارتفاعی با فواصل ۶۰۰ متر تقسیم شد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات ناحیه‌های ارتفاعی تعیین شده در حوضه آبریز کارده

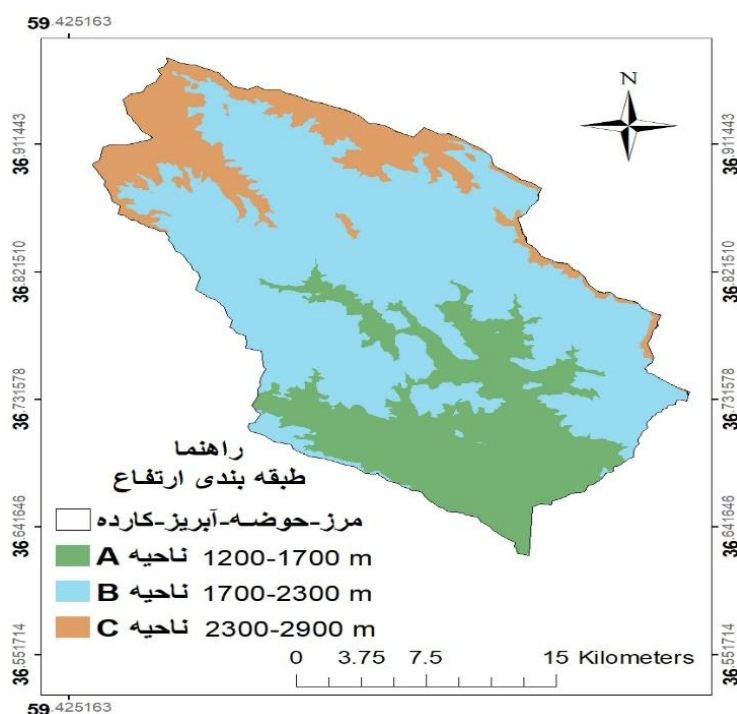
| ناحیه ارتفاعی | طبقات ارتفاعی (m) | مساحت | |
|---------------|----------------------|-----------------|-------|
| | | Km ² | % |
| A | ۱۷۰۰-۱۲۰۰ | ۱۴۴/۹۲ | ۲۶/۶۲ |
| B | ۲۳۰۰-۱۷۰۰ | ۳۲۰/۸۲ | ۵۸/۹۵ |
| C | ۲۹۰۰-۲۳۰۰ | ۷۸/۵۲ | ۱۴/۴۳ |

1 Panday et al.

2 Elias et al.

3 Kustas et al.

4 Digital Elevation Model



شکل ۲- نقشه طبقه‌بندی ارتفاعی حوضه آبریز کارده

متوسط بارش روزانه از ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی موجود در منطقه برای سال‌های ۲۰۱۱_۲۰۱۲ و ۲۰۱۲_۲۰۱۳ استفاده شد (جدول ۲) و توسط گرادیان بارش برای متوسط ارتفاع هیپسومتریک هر ناحیه به دست آمد. دما متغیر مهمی در محاسبه عمق ذوب برف روزانه است. با توجه به پیشنهاد توسعه دهندگان مدل مبنی بر اینکه یک ایستگاه دمایی خوب (حتی اگر در خارج از حوضه قرار داشته باشد) به چندین ایستگاه کمتر قابل اطمینان ترجیح داده می‌شود. به این منظور از داده‌های دمایی بیشینه و کمینه ایستگاه‌های سینوپتیک گل‌مکان و مشهد استفاده شد (جدول ۳) و توسط گرادیان دمایی برای متوسط ارتفاع هیپسومتریک هر یک از ناحیه‌های ارتفاعی استخراج شد.

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی مورد استفاده در حوضه آبریز کارده برای سال‌های

۲۰۱۲_۲۰۱۳ و ۲۰۱۱_۲۰۱۲

| ارتفاع از سطح دریا (m) | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | نوع ایستگاه | نام ایستگاه |
|---------------------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|
| ۱۳۲۲ | °۵۹ ۳۹" | °۳۶ ۳۹" | هیدرومتری | کارده بالادست |
| ۱۲۷۹ | °۵۹ ۴۱" | °۳۶ ۳۷" | باران‌سنجی | سد کارده |
| ۱۴۶۴ | °۵۹ ۳۹" | °۳۶ ۴۳" | باران‌سنجی | آل |
| ۲۳۱۳ | °۵۹ ۳۵" | °۳۶ ۴۶" | هیدرومتری و باران‌سنجی | جنگ |
| ۱۵۶۹ | °۵۹ ۳۳" | °۳۶ ۴۳" | باران‌سنجی | گوش‌بالا |
| ۱۸۳۰ | °۵۹ ۳۲" | °۳۶ ۴۸" | باران‌سنجی | مارشک |
| ۱۹۴۱ | °۵۹ ۳۵" | °۳۶ ۵۰" | باران‌سنجی | بلغور |

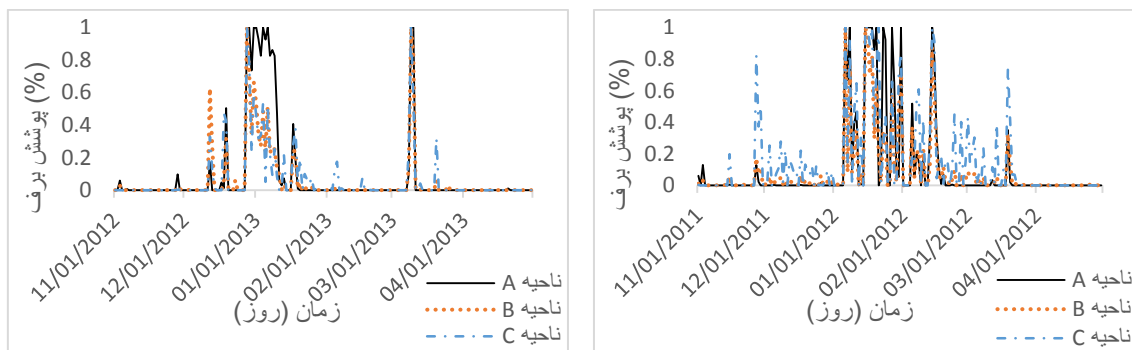
جدول ۳- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در حوضه آبریز کارده برای سال‌های ۲۰۱۱_۲۰۱۲ و

۲۰۱۲_۲۰۱۳

| ارتفاع از سطح دریا (m) | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | نوع ایستگاه | نام ایستگاه |
|------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| ۹۹۹ | °۵۹ ۳۸" | °۳۶ ۱۴" | سینوپتیک | مشهد |
| ۱۱۷۶ | °۵۹ ۱۷" | °۳۶ ۲۹" | سینوپتیک | گلمکان |

سطح پوشش برف یکی از متغیرهای اصلی ورودی به مدل SRM است که به صورت روزانه مورد نیاز مدل می‌باشد. برای استخراج سطح پوشیده از برف برای سال ۲۰۱۱_۲۰۱۲ جهت واسنجی مدل و سال ۲۰۱۲_۲۰۱۳ برای درستی‌سنجی مدل از محصول پوشش برف روزانه سنجنده MODIS از ماهواره Terra به نام MOD10A1 استفاده گردید. در این محصولات برای استخراج سطح پوشش برف از الگوریتم snow map استفاده شده که در این الگوریتم از شاخص تفاضل نرمال شده پوشش برف (NDSI^۱) استفاده شده است. تصاویر به منظور تبدیل سیستم مختصات، عملیات برش تصاویر برای هر یک از سه ناحیه ارتفاعی تعیین شده در حوضه آبریز کارده و محاسبه اطلاعات آماری به محیط نرم افزار ENVI فراخوانده شد و در نهایت نسبت پوشش برف روزانه برای هر ناحیه ارتفاعی محاسبه شد (شکل ۳ الف و ب).

1 Normalised Difference Snow Index



شکل ۳- (الف) تغییرات سطح پوشش برف در سال ۲۰۱۱_۲۰۱۲ و (ب) تغییرات سطح پوشش برف در سال ۲۰۱۲_۲۰۱۳ در حوضه آبریز کارده

ضریب رواناب برای کل حوضه آبریز محاسبه و در طی مرحله واسنجی مقادیر بهینه آن به دست آمد. دمای بحرانی (T_{CRIT}) نیز طبق توصیه توسعه‌دهندگان مدل، دمای $2/5$ درجه سلسیوس برای ماه‌های سرد سال و دمای $0/75$ درجه سلسیوس برای ماه‌های گرم سال در نظر گرفته شد. گرادیان دما (γ) مقدار پیش فرض مدل و مقدار $0/65$ درجه سلسیوس به ازای هر 100 متر ارتفاع و با توجه به روش انتخابی زمان تمرکز در مطالعات فیزیوگرافی که روش کریچ می‌باشد، زمان تأخیر (L) برابر $6/5$ محاسبه گردید.

فاکتور درجه-روز (α): فاکتور درجه-روز $\alpha [cm \ ^\circ C^{-1} \ d^{-1}]$ ، تعداد درجه-روز $T [^\circ C \cdot d]$ را به عمق ذوب برف روزانه $M [cm]$ تبدیل می‌کند. فاکتور درجه-روز (α) در خارج از مدل محاسبه شده و سپس مقادیر آن برای مدل SRM تعریف می‌گردد. فاکتور درجه-روز با در دسترس بودن مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی برف، به شیوه کلاسیک و متداول از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید.

$$\alpha = 1.1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1)$$

که در این رابطه ρ_s چگالی برف و ρ_w چگالی آب می‌باشد. فاکتور ذوب به صورت مقدار عمق ذوب شده به تعداد درجه-روز بوده و به شکل رابطه (۲) بیان می‌گردد. در تلاشی بروبکر و همکاران (۱۹۹۶) تابش را در مدل ترکیب کردند. در این روش معادله ذوب برف به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. در این پژوهش با قرار دادن معادلات شماره (۲) و (۳) در یک دستگاه معادله جدیدی جهت برآورد فاکتور درجه-روز (α) به دست آمده است. معادله فاکتور درجه-روز (α) جدید به صورت رابطه شماره (۴) می‌باشد:

$$\begin{cases} M = a \cdot T_a & (2) \\ M = m_Q \cdot R_a + a_r \cdot T_a & (3) \end{cases}$$

$$(4)$$

$$a = \frac{m_Q \cdot R_d}{T_d} + a_r$$

که در این معادله m_Q ثابت فیزیکی تبدیل انرژی به حجم یا عمق آب است ($0.26 \text{ cm m}^2/\text{W day}$)، a_r ضریب درجه-روز محدود شده است ($\text{cm}/^\circ\text{C day}$). T_d شاخص درجه حرارت است. R_d تابش خالص روزانه است. به دلیل اینکه تغییرات فاکتور درجه-روز (α) به صورت ۱۵ تا ۳۰ روزه توصیه می‌شود برای محاسبه تابش خالص از محصول تابش خالص ۸ روزه (CERES^۲-NETFLUX-E) (NEO^۱) با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده شد، جهت محاسبه تابش خالص تصاویر در نرم افزار ENVI فراخوانده شد و مقادیر آن استخراج گردید. با توجه به نتایج مطالعات مارتینک در سال ۱۹۸۹، کوستاس و رانگو (۱۹۹۴) و بروبکر و همکاران (۱۹۹۶) جهت برآورد مقدار ضریب درجه-روز محدود شده (α_r) در این مطالعه نیز مقدار ۰/۲۵ برای این ضریب در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴- مقادیر پارامتر فاکتور درجه-روز (α) محاسبه شده با معادلات کلاسیک و جدید در حوضه کارده

| مقدار واقعی | فرجه | محدوده نرمال | نماد | نام متغیر |
|-------------|------|--------------|---------------------------------------|---|
| ۰/۱۴ - ۰/۲۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۱ - ۱ | $\alpha \text{ (cm}/^\circ\text{Cd)}$ | محاسبه فاکتور (α) با معادله کلاسیک |
| ۰/۲۵ - ۰/۶۴ | | | | محاسبه فاکتور (α) با معادله جدید |

ضریب فروکش یک پارامتر بسیار مهم در مدل SRM است، تحلیل داده‌های سری زمانی دبی اندازه‌گیری شده روش خوبی برای تعیین K می‌باشد، باید توجه داشت که K ثابت نیست و با کاهش دبی مقدار آن افزایش می‌یابد. مدل SRM خود K را به‌عنوان ورودی نمی‌پذیرد و بایستی ضرایب x و y به مدل داده شود، به این منظور مقادیر دبی جریان در هر روز Q_{n+1} در مقابل دبی روز قبل Q_n در قالب محور لگاریتمی رسم شد و با استفاده از نمودار به‌دست آمده مقادیر ضرایب x و y محاسبه شد.

جدول ۵- مقادیر ضرایب X و Y به‌دست آمده برای معادله فروکش جریان (K)

| | X | Y |
|-------------|--------|-------|
| ماه‌های سرد | ۰/۸۹۶ | ۰/۰۷ |
| ماه‌های گرم | ۰/۷۸۵۲ | ۰/۰۹۷ |
| سالانه | ۰/۹۰۱ | ۰/۰۶ |

1 Nasa Earth Observations

2 The Clouds and the Earth's Radiant Energy System

مدل SRM هیدروگراف رواناب اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد، در عین حال برای ارزیابی عملی‌تر از چگونگی انجام شبیه‌سازی از دو معیار دقت، ضریب تبیین^۱ (R^2) و درصد تفاضل حجمی^۲ (D_v) استفاده می‌کند. مقادیر تعیین شده پارامترهای مورد نیاز مدل تا حد امکان براساس داده‌های موجود برآورد گردید و در صورت نبود اطلاعات و آمار کافی از مقادیر پیشنهادی توسعه‌دهندگان مدل و مطالعات مشابه استفاده و در مرحله واسنجی مقادیر بهینه آن‌ها تعیین شد. در این پژوهش مدل رواناب ذوب برف (SRM) برای مقادیر به دست آمده فاکتور درجه-روز (α) از دو روش کلاسیک (معادله شماره ۱) و روش جدید (معادله شماره ۴) در کنار مقادیر متفاوت ضریب فروکش جریان (k) به صورت یک مقدار ثابت برای تمام طول دوره شبیه‌سازی و استفاده از دو مقدار فصلی برای ماه‌های گرم و سرد اجرا شد و نتایج آن‌ها برای تعیین بهترین روش شبیه‌سازی و عملکرد بهینه مدل توسط معیارهای ارزیابی دقت مدل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

۴- نتایج و بحث

واسنجی مدل: مطابق آنچه شرح داده شد اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل رواناب ذوب برف WinSRM^۳ تعریف گردید و سپس مدل برای ماه‌هایی از سال که پوشش برف در سطح حوضه وجود دارد، برای سال آبی ۲۰۱۱-۲۰۱۲ جهت واسنجی اجرا شد. دلیل انتخاب سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲ برای واسنجی مدل، متوسط بارش برف ۴۱/۷ سانتی‌متر در این سال است که نسبت به دهه قبل و بعد از آن بیشتر بوده و باعث عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف می‌شود. شکل ۴، هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رواناب ذوب برف را در سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲ که توسط مدل SRM ترسیم شده را نشان می‌دهد، که برای ارزیابی و مقایسه بصری بهتر هیدروگراف‌های روش‌های مختلف در کنار یکدیگر آورده شده‌اند. براساس معیارهای ارزیابی دقت مدل (جدول ۶)، اجرای مدل رواناب ذوب برف با فاکتور درجه-روز جدید و استفاده از دو ضریب فروکش فصلی بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی رواناب در طول دوره شبیه‌سازی داشت. در این اجرا، ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۷۲ و درصد اختلاف حجمی (D_v) برابر با ۴/۱۷ بود. میزان حجم رواناب اندازه‌گیری شده ۷/۵۵۰ میلیون مترمکعب و متوسط رواناب اندازه‌گیری شده ۰/۴۸ مترمکعب در ثانیه بود. شبیه‌سازی مدل در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل از تطابق خوبی برخوردار بوده و جریان شبیه‌سازی شده به خوبی جریان مشاهده شده را دنبال می‌کند. مقدار حجم رواناب محاسبه شده ۷/۲۳۵ میلیون مترمکعب و متوسط رواناب محاسبه شده ۰/۴۶ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. مقادیر دبی و حجم

1 The coefficient of determination

2 Volume difference

3 Snowmelt Runoff Model for Windows

رواناب مشاهده شده و محاسبه شده بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. پس از آن اجرای مدل با فاکتور درجه-روز کلاسیک و باز هم استفاده از دو ضریب فروکش فصلی در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و دارای ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۶۲ و درصد اختلاف حجمی (D_v) برابر با ۱۶/۴۹ بود. این روش دارای کم‌برآورد در مقدار جریان شبیه‌سازی شده در ماه‌های نوامبر، دسامبر و فوریه و مارس بوده است. مدل SRM ضعیف‌ترین عملکرد را در اجرای مدل با استفاده از فاکتور درجه-روز کلاسیک و یک ضریب فروکش سالانه برای کل دوره شبیه‌سازی را از خود نشان داد در این اجرا ضریب تبیین (R^2) و درصد اختلاف حجمی (D_v) به ترتیب برابر با ۰/۴۳ و ۱۹/۲۲ بودند. در این روش مدل در ابتدای ماه نوامبر و ماه‌های پایانی دوره شبیه‌سازی دارای کم‌برآوردی می‌باشد و استفاده از این روش در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف توصیه نمی‌شود.



شکل ۴- رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM برای سال ۲۰۱۱_۲۰۱۲ در حوضه کارده

جدول ۶- مقادیر معیارهای ارزیابی دقت مدل SRM در اجرای مختلف در سال ۲۰۱۱_۲۰۱۲

| روش‌های اجرای مدل | درصد اختلاف | |
|--|------------------|------------|
| | ضریب تبیین R^2 | حجمی D_v |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α جدید و دو ضریب فروکش فصلی | ۰/۷۲ | ۴/۱۷ |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α کلاسیک و دو ضریب فروکش فصلی | ۰/۶۲ | ۱۶/۴۹ |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α جدید و یک ضریب فروکش سالانه | ۰/۵۱ | ۷/۷ |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α کلاسیک و یک ضریب فروکش سالانه | ۰/۴۳ | ۱۹/۲۲ |

درستی‌سنجی مدل: شکل ۵ هیدروگراف‌های رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM، در حوضه آبریز کارده در سال ۲۰۱۲_۲۰۱۳ که جهت صحت‌سنجی مدل اجرا شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در (شکل ۳ ب) مشاهده می‌شود در این سال شاهد کاهش محسوس سطح پوشش برف و در

نتیجه کاهش حجم آورد و نوسانات دبی مشاهده شده نسبت به دوره واسنجی هستیم که خود باعث کاهش دقت شبیه‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل می‌گردد. براساس مقادیر معیارهای ارزیابی دقت مدل در سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳ (جدول ۷)، ضریب تبیین (R^2) و درصد اختلاف حجمی (D_v) برای اجرای مدل با روش محاسبه رواناب با فاکتور درجه-روز جدید و استفاده از یک ضریب فروکش سالانه به ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۴/۳۸ بوده و دارای بهترین عملکرد در شبیه‌سازی رواناب توسط مدل SRM از میان روش‌های موردبررسی در این تحقیق است و نتایج حاصل از دوره واسنجی را تأیید می‌کند و تطابق خوبی را برای دبی‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در حوضه کارده نشان می‌دهد. مدل در ماه‌های ابتدایی شبیه‌سازی، نوامبر تا نیمه دسامبر و ماه‌های پایانی شبیه‌سازی مارس و آوریل دارای کم‌برآورد بوده است و مقدار حجم رواناب اندازه‌گیری شده ۵/۹۰۶ میلیون مترمکعب و متوسط رواناب اندازه‌گیری شده ۰/۳۷۸ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد و مقادیر حجم رواناب محاسبه شده و متوسط رواناب محاسبه شده به ترتیب ۵/۶۴۷ میلیون مترمکعب و ۰/۳۶۱ مترمکعب بر ثانیه است. پس از آن نیز اجرای مدل با فاکتور درجه-روز جدید و دو ضریب فروکش فصلی در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده است. این اجرا دارای بیش‌برآورد در ماه‌های ژانویه، فوریه و آوریل می‌باشد و ضریب تبیین (R^2) و درصد اختلاف حجمی آن (D_v) به ترتیب برابر با ۰/۴۷ و ۲/۶۷ است. اجرای مدل با استفاده از روش محاسبه فاکتور درجه-روز کلاسیک و به‌کارگیری دو ضریب فروکش فصلی در طول روند شبیه‌سازی ضعیف‌ترین عملکرد مدل را از میان روش‌های به‌کار برده شده در این تحقیق به نمایش می‌گذارد. در این اجرای مدل ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۳۳ و درصد اختلاف حجمی (D_v) برابر ۱۵/۳۳ می‌باشد. در این شبیه‌سازی مدل دارای کم‌برآورد در ماه‌های نوامبر و دسامبر می‌باشد و نتایج حاصل از دوره واسنجی را تأیید می‌نماید.



شکل ۵- رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM برای سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲ در حوضه کارده

جدول ۷- مقادیر معیارهای ارزیابی دقت مدل SRM در اجراهای مختلف در سال ۲۰۱۳_۲۰۱۲

| روش‌های اجرای مدل | ضریب تبیین R^2 | درصد اختلاف حجمی D_v |
|--|---------------------|---------------------------|
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α جدید و دو ضریب فروکش فصلی | ۰/۴۷ | ۲/۶۷ |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α کلاسیک و دو ضریب فروکش فصلی | ۰/۳۳ | ۱۵/۳۳ |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α جدید و یک ضریب فروکش سالانه | ۰/۵۱ | ۴/۳۸ |
| رواناب محاسبه شده با فاکتور α کلاسیک و یک ضریب فروکش سالانه | ۰/۳۷ | ۱۶/۶۲ |

کشور ایران در منطقه گرم و خشک قرار دارد و میزان حجم توده‌های برفی در حوضه‌های آبریز این گونه مناطق مانند حوضه آبریز کارده محدود می‌باشد و این یکی از دلایل کاهش دقت شبیه‌سازی توسط مدل است. میزان متوسط بارش برف در حوضه آبریز کارده در سال ۲۰۱۳_۲۰۱۲ برابر با ۳۰/۰۵ سانتی‌متر بوده و از دلایل کاهش دقت مدل در دوره درستی‌سنجی نسبت به دوره واسنجی می‌توان به کاهش ۲۷/۰۶ درصدی بارش برف و کاهش آورد سالانه اشاره کرد، همچنین خطای انسانی در اندازه‌گیری رواناب را از دلایل عمده آن دانست. چنانکه **قربانی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹)** نیز در مطالعه خود که بر روی رواناب حاصل از ذوب برف با کمک مدل SRM در حوضه آبریز کارون انجام دادند و دی و همکاران^۱ (۱۹۸۹) در شبیه‌سازی ذوب برف در پاکستان به عدم تطابق دبی‌های حداکثر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده اشاره کردند و بیان کردند که این ضعف ناشی از اشتباهات در داده‌های مشاهداتی و بی‌کیفیتی آن‌ها می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در این مطالعه با نتایج حاصل از تحقیقات میریعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۰)، اربابی سبزواری و نجاری (۱۳۹۶) و **آرتیمانی و همکاران (۱۳۹۸)** مطابقت دارد. همچنین مطالعه **قاسمی و همکاران (۱۳۹۲)** که نوسانات رواناب حاصل از ذوب برف تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در دهه‌های آینده را مورد بررسی قرار دادند و در واسنجی مدل ضریب تبیین و تفاضل حجمی را به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۴۵ درصد به‌دست آوردند نتایج به‌دست آمده را تأیید می‌کند. آن‌ها نتایج حاصل از شبیه‌سازی واسنجی مدل را قابل قبول ارزیابی کردند. نتایج مطالعه لی و ویلیامز^۲ (۲۰۰۸) بر روی رواناب حاصل از ذوب در حوضه بدون آمار تاریخیم در چین که مقدار ضریب تبیین را در دوره واسنجی ۰/۶۴ و برای دوره درستی‌سنجی ۰/۷۸ و ۰/۵۱ به‌دست آورده‌اند نیز با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. نتایج حاصل از محاسبه فاکتور درجه-روز با استفاده از روش جدید (معادله شماره ۴) و روش محاسبه کلاسیک (معادله شماره ۱) و مقایسه نتایج آنها نیز با مطالعات مارتینک (۱۹۸۹)، کوستاس و رانگو (۱۹۹۴) و بروبکر و همکاران (۱۹۹۶) و فاخواه و همکاران (۲۰۱۴)، زیمنس و همکاران (۲۰۲۱)، **دلاور و همکاران (۱۳۹۰)**، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)،

1 Dey et al.

2 Li and Williams

رشیدی و همکاران (۱۳۹۶)، مطابقت دارد. نتایج حاصل از اجرای مدل با روش‌های مختلف برآورد فاکتور درجه-روز در دوره‌های واسنجی و درستی‌سنجی حاکی از برتری روش جدید برآورد فاکتور درجه-روز (معادله شماره ۴) در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف نسبت به روش کلاسیک محاسبه آن (معادله شماره ۱) است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد با استفاده از روش جدید محاسبه فاکتور درجه-روز و محصول تابش خالص هشت روزه NEO (CERES-NETFLUX-E) می‌توان با روشی ساده‌تر و کم‌هزینه به مقادیر قابل قبولی از فاکتور درجه-روز (α) دست پیدا کرد. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد ضریب فروکش جریان (K) پارامتری حساس در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل SRM است و تأثیر به‌سزایی در تطابق جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده دارد و در نتیجه تعیین دقیق آن می‌تواند نتایج بهتری با توجه به سنج‌های کارایی مدل به‌دست آورد، نتایج حاصل از تحقیقات وفاخواه و همکاران (۲۰۱۴) نیز این مطلب را تأیید می‌کند. نتایج حاصل نشان می‌دهد با توجه به اینکه مقدار ضریب فروکش جریان متغیر بوده، در دوره‌هایی که نوسانات جریان و آورد رودخانه زیاد است مدل SRM می‌تواند با استفاده از دو مقدار ضریب فروکش فصلی در شبیه‌سازی نقاط اوج موفق‌تر عمل کند و در دوره‌های که جریان یکنواخت بوده و نوسانات آن کم است، استفاده از یک ضریب فروکش سالانه عملکرد بهتری دارد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه و اجرای مدل با روش‌های مختلف در دوره‌های واسنجی و درستی‌سنجی، بهترین روش مدل‌سازی جریان در دوره واسنجی، روش محاسبه فاکتور درجه-روز جدید (معادله شماره ۴) و کاربرد دو مقدار ضریب فروکش جریان فصلی با ضریب تبیین 0.72 و درصد اختلاف حجمی $17/4$ بود. در دوره درستی‌سنجی نیز روش شبیه‌سازی رواناب با فاکتور درجه-روز جدید (معادله شماره ۴) و یک ضریب فروکش سالانه بهترین نتایج را از نظر معیارهای ارزیابی دقت مدل ارائه داد. ضریب تبیین در آن 0.51 و درصد اختلاف حجمی $4/38$ بود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت محاسبه مقادیر فاکتور درجه-روز (α) با استفاده از معادله جدید ابداع شده در این مقاله (معادله شماره ۴) و تعریف مقادیر آن برای مدل SRM به مدل کمک می‌کند تا عملکرد بهتری نسبت به شیوه کلاسیک محاسبه فاکتور (α) با استفاده از داده‌های چگالی برف اندازه‌گیری شده در حوضه آبریز (معادله شماره ۱) ارائه دهد. ترکیب مؤلفه تابش در معادله محاسبه فاکتور (α) نیز نتایج مطالعات گذشته مانند کوستاس و رانگو (۱۹۹۴) و بروبکر و همکاران (۱۹۹۶) در ترکیب مؤلفه تابش در محاسبه عمق ذوب برف در مدل SRM را تأیید می‌کند. محصول تابش خالص استفاده شده در این مطالعه برای محاسبه فاکتور (α) به روش جدید NEO (CERES-NETFLUX-E) نیز از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده است و می‌تواند به نحو قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب

حاصل از ذوب برف در حوضه‌هایی که با کمبود داده مواجه هستند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج معیارهای ارزیابی دقت ارائه شده نشان می‌دهد ضریب فروکش جریان نقشی اساسی در تطابق جریان‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ایفا می‌کند و همانطور که در مطالعات گذشته مانند وفاخواه و همکاران (۲۰۱۴) آمده پارامتری حساس و مؤثر در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف توسط مدل SRM است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد این ضریب می‌تواند به صورت سالانه یا فصلی برای مدل SRM تعریف گردد و تعیین دقیق آن در بهبود عملکرد مدل کمک شایانی می‌کند. ضریب فروکش جریان مقداری ثابت نیست و با کاهش دبی مقدار آن افزایش می‌یابد و بالعکس. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه آبریز کارده نشان می‌دهد برف قسمت قابل توجهی از آورد رودخانه در فصل زمستان و بهار را تشکیل می‌دهد. ذوب برف از اواخر ماه فوریه در حوضه افزایش می‌یابد و می‌تواند در صورت همراه شدن با رواناب حاصل از بارش باران منجر به وقوع سیل به خصوص در اواخر ماه مارس و ماه آوریل گردد که نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمد در جلوگیری از خسارات ناشی از سیلاب‌ها و استفاده بهینه از این منابع آبی می‌باشد. با توجه به نتایج این پژوهش مطالعه بر روی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های آبریز امری ضروری است و می‌تواند در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی برای مقابله با مخاطرات و خسارت‌های حاصل از سیلاب‌های ناشی از ذوب برف در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار کمک به‌سزایی به مدیران و برنامه‌ریزان کرده و از بروز خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری به عمل آورد. این‌گونه مطالعات بر روی زمان‌بندی و میزان رواناب حاصل از ذوب برف به مدیران در برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمد برای تأمین و توزیع آب مورد نیاز بخش کشاورزی در فصل‌های گرم سال، جهت جلوگیری از مخاطرات ناشی از کمبود آب به خصوص در سال‌هایی که کم‌بارش بوده یا به علت گرمای زود هنگام هوا ذوب زود هنگام توده‌های برف اتفاق می‌افتد، کمک شایانی می‌نماید. با توجه به اینکه کشور ایران در منطقه خشک قرار گرفته مطالعات مستمر این‌گونه منابع برای مدیریت مؤثر و کارآمد و جلوگیری از هدررفت آب ضروری می‌باشد.

این مقاله از رساله دکتری با عنوان ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر توده‌های برف و رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارده) در دانشگاه فردوسی مشهد استخراج شده است.

کتابنامه

- اریتمانی، محمدمهدی؛ زینی‌وند، حسین؛ طهماسبی‌پور، ناصر؛ ناصر؛ ۱۳۹۸. ارزیابی کارایی مدل SRM و HBV در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوزه آبخیز بوجین. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۲)، ۲۲۸-۲۴۱.

<https://www.sid.ir/paper/100221/fa>

- ابراهیمی، راضیه؛ حمزه، سعید؛ معروفی، صفر؛ ۱۳۹۵. مدل‌سازی سطح پوشش و رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده تلفیقی از مدل هیدرولوژیکی SRM و تصاویر ماهواره‌ای. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۶ (۲۳)، ۶۶-۷۷.
<https://www.civilica.com/doc/1405890>
- اربابی سبزواری، آزاده؛ نجاری مهربان، فرنیاز؛ ۱۳۹۶. نقش مدیریت منابع آب در توسعه کالبدی با استفاده از مدل SRM مطالعه موردی حوضه آبخیز طالقان. *برنامه‌ریزی و توسعه کالبدی*، ۲ (۴ (پیاپی ۸))، ۷۸-۸۵.
<https://www.sid.ir/paper/264488/fa>
- جهانبخش اصل، سعید؛ دین‌پژوه، یعقوب؛ عالی‌نژاد، محمدحسین؛ ولی‌زاده کامران، خلیل؛ پرهیزکار، مرتضی؛ ۱۳۹۵. شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در حوضه شهرچای با استفاده از مدل SRM. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)*، ۲۷ (۳ (پیاپی ۶۳))، ۱-۱۴.
<https://www.sid.ir/paper/153211/fa>
- دلاور، مجید؛ مرید، سعید؛ نیکبخت، نجمه؛ ۱۳۹۰. شبیه‌سازی توزیعی ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی فاقد داده (مطالعه موردی: حوضه امامزده داوود). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۷ (۴ (مسلسل ۲۲))، ۴۱-۵۰.
<https://www.sid.ir/paper/100247/fa>
- رشیدی، محمد؛ حاجی بیگلو، محبوبه؛ سربازی، محبوبه؛ قادری، محمد؛ ۱۳۹۶. برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های آبریز استان خراسان شمالی با استفاده از مدل WinSRM (مطالعه موردی حوضه آبریز دربند سملقان). *علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)*، ۴۰ (۲)، ۱۵۹-۱۷۱.
<https://www.sid.ir/paper/217313/fa>
- طالبی اسفندرانی، سمیه؛ علوی‌پناه، کاظم؛ علی‌محمدی سراب، عباس؛ روستا، حسن؛ ۱۳۹۰. جداسازی ابر از برف در تصاویر MODIS با استفاده از الگوریتم Snow map و الگوریتم ماسک ابر. *مجله سنجش‌ازدور و GIS ایران*، ۳ (۱)، ۹۰-۷۱.
<https://www.magiran.com/paper/1049148>
- عالی‌نژاد، محمدحسین؛ جهانبخش، سعید؛ خورشیددوست، علی‌محمد؛ ۱۴۰۰. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف حوضه قره‌سو با مدل SRM. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵ (۷۶)، ۸۷-۹۷.
<https://www.civilica.com/doc/1253058>
- قربانی‌زاده خرازی، حسین؛ صدقی، حسین؛ ثقفیان، بهرام؛ پرهت، جهانگیر؛ ۱۳۸۹. پیش‌بینی توزیع زمانی جریان رواناب ناشی از ذوب برف در نیم قرن آینده تحت شرایط تغییر اقلیم. *مهندسی آب*، ۱ (۱)، ۴۳-۵۲.
<https://www.sid.ir/paper/201933/fa>
- قاسمی، الهه؛ فتاحی، ابراهیم؛ بابائی، ام‌السلمه؛ ۱۳۹۲. بررسی نوسانات رواناب حاصل از ذوب برف تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در دهه‌های آینده. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۴ (۱۳)، ۱۲۲-۱۱۲.
https://www.clima.irimo.ir/article_14153.html
- قنبرپور، محمدرضا؛ محسنی ساروی، محسن؛ ثقفیان، بهرام؛ احمدی، حسن؛ عباسپور، کریم؛ ۱۳۸۴. تعیین مناطق مؤثر در انباشت و ماندگاری سطح پوشش برف و سهم ذوب برف در رواناب. *مجله منابع طبیعی ایران*، ۵۸ (۳)، ۵۱۲-۵۱۵.
<https://www.magiran.com/paper/307766>

- قنبرپور، میرحسن؛ قنبرپور، محمدرضا؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ ۱۳۹۰. مدل‌سازی جریان ناشی ذوب برف با استفاده از مدل هیدرولوژیکی رواناب حاصل از ذوب برف (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد کرج). تحقیقات منابع آب ایران، ۷(۳)، ۴۰-۵۲.

https://www.iwrr.ir/article_16219.html

- میریعقوب‌زاده، میرحسین؛ قنبرپور، محمدرضا؛ ۱۳۸۹. بررسی کاربرد نقشه‌های پوشش برفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مدل‌سازی رواناب ذوب برف (مطالعه موردی حوضه آبریز سد کرج). مجله علوم زمین، ۱۹(۷۶)، ۱۴۸-۱۴۱.

<https://doi.org/10.22071/gsj.2010.55672>

- نجف‌زاده، رضا؛ ابریشم‌چی، احمد؛ تجریشی، مسعود؛ طاهری شهرآئینی، حمید؛ ۱۳۸۳. شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف (SRM). مجله آب و فاضلاب، ۱۵(۴)، ۲-۱۱.

https://www.wjournal.ir/article_2487.html

- Alinejad, M. H., Dinpashoh, Y., & Jahanbakhsh ASL, S., 2016. Impact of climate change on runoff from snowmelt by taking into account the uncertainty of GCM models (case study: Shahrchay Basin in Urmia). European Online Journal of Natural and Social Sciences, 5(1), 200-211. <https://european-science.com/eojnss/article/view/3059>.
- Brubaker, K., Rango, A., & Kustas, W., 1996. Incorporating radiation inputs into the snowmelt runoff model. Hydrol Process, 10(10), 1329-1343. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199610\)10:10<1329::AID-HYP464>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199610)10:10<1329::AID-HYP464>3.0.CO;2-W).
- Dey, B., Sharma, V. K., & Rango, A., 1989. A test of snowmelt-runoff model for a major river basin in western Himalayas. Hydrology Research, 20(3), 167-178. <https://doi.org/10.2166/nh.1989.0013>.
- Elias, E. H., Rango, A., Steele, C. M., Mejia, J. F., & Smith, R., 2015. Assessing climate change impacts on water availability of snowmelt-dominated basins of the Upper Rio Grande basin. Journal of Hydrology, 3, 525-546. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.004>.
- Firouzi, Sh., & Sadeghian, MS., 2016. Application of snow melt runoff model in a mountainous basin of Iran. Journal of Geoscience and Environment Protection, 4(2), 74-81. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.42009>.
- Hao, G., Li, J., Li, K., Huang, K., Song, J., Li, H., 2019. Improvement and application research of the SRM in alpine regions. Environmental Science and Pollution Research, 26, 36798-36811. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06814-3>.
- Kustas, W. P., & Rango, A., 1994. A simple energy budget for the snowmelt runoff model. Water Resources Research, 30(5), 1515-1527. <https://doi.org/10.1029/94WR00152>.
- Li, X., & Williams, M. W., 2008. Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China. Hydrological processes, 22(19), 3931-3940. <https://doi.org/10.1002/hyp.7098>.
- Martinec, J., Rango, A., & Roberts, R., 2008. Snowmelt runoff model (SRM) user's manual. USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, USA. <https://pubs.nmsu.edu/water/SRMSpecRep100.pdf>.
- Martinec, J., 1989. Hour-to-hour snowmelt rates and lysimeter outflow during an entire ablation period. Snow cover and glacier variations, proceedings of the Baltimore Symposium, Maryland, May 1989, edited by A. Rango, IAHS Publ I83, 19-28. <https://pubs.nmsu.edu/water/SRMSpecRep100.pdf>.
- Nunchhani, V., Bandyopadhyay, A., & Bhadra, A., 2020. Spatiotemporal variability in snow parameters from MODIS data using spatially distributed snowmelt runoff model (SDSRM):

- a case study in Dibang basin, Arunachal Pradesh. *Journal of the Indian society of remote sensing*, 49, 325-340. <http://dx.doi.org/10.1007/s12524-020-01215-3>.
- Panday, P. K., Williams, C.A., Frey, K. E., Brown, M. E., 2014. Application and evaluation of a snowmelt runoff model in the Tamor River basin in the eastern Himalaya using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) data assimilation approach. *Hydrological Process*, 28(21), 5337-5353. <https://doi.org/10.1002/hyp.10005>.
 - Siemens, K., Dibike, Y., Shrestha, R. R., & Prowse, T., 2021. Runoff projection from an alpine watershed in western Canada: application of a snowmelt runoff model. *Water*, 13(9), 1199. <http://dx.doi.org/10.3390/w13091199>.
 - Senzeba, T., Bhadra, A., & Bandyopadhyay, A., 2015. Snowmelt runoff modelling in data scarce Nuranang catchment of eastern Himalayan region. *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, 1, 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.06.001>.
 - Steele, C. M., Dialesandro, J., James, D., Elias, E., Rango, A., & Bleiweiss, M., 2017. Evaluating MODIS snow products for modelling snowmelt runoff: case study of the Rio Grande headwaters. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 63, 234-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.007>.
 - Shahabi, H., akhezri, S., Ahmad, B. B., & Musa, T. A., 2014. Application of moderate resolution imaging spectroradiometer snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the central Zab basin, Iran. *Journal of Applied Remote sensing*, 8, 1-19. <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.8.084699>.
 - Vafakhah, M., Nouri, A., & Alavipanah, S. K., 2014. Snowmelt-runoff estimation using radiation SRM model in Taleghan watershed. *Environ Earth Sciences*, 73, 993-1003. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3449-5>.
 - Vuyovich, C., & Jacobs, J.M., 2011. Snowpack and runoff generation using AMSR-E passive microwave observations in the Upper Helmand Watershed, Afghanistan. *Remote Sens. Environ*, 115, 3313-3321. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.014>.
 - Xie, SH., Du, J., Zhou, X., Zhang, X., Feng, X., Zheng, W., Li, ZH., & Xu, CH., 2018. A progressive segmented optimization algorithm for calibrating time-variant parameters of the snowmelt runoff model (SRM). *Journal of Hydrology*, 566, 470-483. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.030>.

