



## Development of Energy Balance Utilization in Distributed Snowmelt Modeling for Improving Monthly Water Balance Model

Ali Shakeri<sup>1</sup> | Banafsheh Zahraie<sup>2</sup> | Mohsen Nasseri<sup>3</sup>

1. School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [alishakeri1375@gmail.com](mailto:alishakeri1375@gmail.com)
2. Corresponding Author, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [bzahraie@ut.ac.ir](mailto:bzahraie@ut.ac.ir)
3. School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [mnasseri@ut.ac.ir](mailto:mnasseri@ut.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 13 July 2023

Received in revised form

2 August 2023

Accepted 4 October 2023

Published online 12 October 2023

#### Keywords:

*Distributed Snow Model*

*Energy Balance*

*Monthly Water Balance*

*Remote Sensing*

*Snow Melt*

### ABSTRACT

This study compared three different snowmelt scenarios using a monthly water balance model in the Taleghan-Alamut Basin in north of Iran. Three scenarios were tested in this study: a temperature-based, a net radiation-based, and an energy balance-based. Remote sensing data were utilized to mitigate the challenges of modeling snowmelt in a basin with limited ground information. The calibration and validation processes were carried out in a two-stage method. First, snow modeling was conducted grid-based throughout the basin, and the model parameters were validated. Using snow cover observed by the MODIS sensor, the model discrepancy between computed and observed snow accumulation was calculated by comparing the percentage of to the calculated snow storage in each cell of the basin. In the second stage, the other model parameters were calibrated as a lumped hydrologic model across the basin. Ultimately, the net radiation-based and energy balance-based models showed superior performance compared to the temperature-based model. During the validation period, the Kling-Gupta efficiency metric for the temperature-based snowmelt model was 0.72, while for the net radiation-based and energy balance-based models were 0.78 and 0.86, respectively. Additionally, the correlation coefficient between MODIS snow cover data and snow storage calculated in the three models ranged from 0.62 for the energy balance-based model to 0.72 for the temperature-based model. According to the results, the proposed methodology is suitable for assessing snow budget and the snow hydrology in mountainous areas with limited data availability.

**Cite this article:** Shakeri, A., Zahraie, B., & Nasseri, M. (2023). Development of Energy Balance Utilization in Distributed Snowmelt Modeling for Improving Monthly Water Balance Model. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 837-854. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.362214.1089>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.362214.1089>

Publisher: University of Tehran Press.



## توسعه استفاده از بیلان انرژی در مدل سازی توزیعی ذوب برف به منظور ارتقای مدل بیلان آبی ماهانه

علی شاکری<sup>۱</sup> | بنفشه زهرایی<sup>۲</sup> | محسن ناصری<sup>۳</sup>

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [alishakeri1375@gmail.com](mailto:alishakeri1375@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [bzahraie@ut.ac.ir](mailto:bzahraie@ut.ac.ir)
۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [mnasseri@ut.ac.ir](mailto:mnasseri@ut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲  
 تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۱  
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲  
 تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

در این پژوهش با استفاده از یک مدل هیدرولوژی ماهانه، به مقایسه سه سناریوی ذوب برف مختلف شامل یک سناریوی دما-مینا، یک سناریوی مبتنی بر تشعشع خالص و سناریوی مبتنی بر بیلان انرژی در حوضه آبریز طالقان-الموت پرداخته شده و سعی شده با استفاده از داده‌های دورسنجی بخشی از چالش‌های مدل‌سازی ذوب برف در حوضه‌ای با داده‌های زمینی کم کاهش داده شود. فرایندهای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به روش دو مرحله‌ای انجام گرفته است. در یک مرحله به مدل‌سازی برف به صورت سلولی در سراسر حوضه پرداخته شده و پارامترهای مدل برف مورد واسنجی قرار گرفته‌اند. در این مرحله با مقایسه درصد پوشش برف مشاهده شده توسط سنجنده MODIS و مقدار ذخیره برف محاسبه شده در هر سلول توسط مدل، مقدار خطای مدل در شبیه‌سازی تجمع برف محاسبه شده است. در مرحله بعد با شبیه‌سازی فرایند هیدرولوژی به صورت یکپارچه در کل حوضه، بخش دیگری از متغیرهای تصمیم مورد واسنجی قرار گرفته و با استفاده از شاخص‌های خطای مختلف، مورد ارزیابی و اعتبارسنجی واقع شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل تشعشع خالص و بیلان انرژی نسبت به مدل دما-مینا است، به طوری که شاخص KGE در دوره اعتبارسنجی، برای مدل با ذوب برف دما-مینا، ۰/۷۲ و برای مدل‌های تشعشع خالص و بیلان انرژی به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۸۶ بوده است. هم‌چنین مربع ضریب همبستگی بین داده‌های پوشش برف سنجنده MODIS و داده‌های ذخیره برف محاسبه شده در سه مدل، بین ۰/۶۲ برای مدل بیلان انرژی تا ۰/۷۲ برای مدل دما-مینا بوده است. با توجه به نتایج، روش مدل تشعشع خالص و بیلان انرژی امکان برآورد و ارائه مناسبی از ذخیره برفی و هیدرولوژی وابسته به آن در مناطق کوهستانی با اطلاعات کم محیطی را فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها:  
 بیلان آب ماهانه  
 بیلان انرژی  
 ذوب برف  
 سنجش از دور  
 مدل‌سازی توزیعی برف

استناد: شاکری، علی؛ زهرایی، بنفشه؛ و ناصری، محسن (۱۴۰۲). توسعه استفاده از بیلان انرژی در مدل‌سازی توزیعی ذوب برف به منظور ارتقای مدل بیلان آبی ماهانه. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۳)، ۸۳۷-۸۵۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.362214.1089>



## ۱- مقدمه

برآورد میزان دقیق رواناب در مقیاس حوضه آبریز از منظر مدیریت منابع آب با اهمیت است. از آنجاکه رفتار برف می‌تواند تفاوت چشم‌گیری در تولید رواناب ایجاد کند، لذا جداسازی سهم باران و برف از مقدار کل بارش در افزایش دقت برآورد مدل‌های شبیه‌ساز و پیش‌بینی‌کننده رواناب خروجی حوضه آبریز (شامل مدل‌های توزیعی و غیرتوزیعی) نقش‌آفرین است. در سطح ملی نیز، اهمیت تخمین پوشش برف در مدل‌سازی حوضه‌های آبریز با ساختار توپوگرافی کوهستانی و تخمین مقدار ذوب و رواناب برف (برفاب)، برای مدیران اجرایی و سیاست‌گذار مدیریت منابع آب کشور مشخص شده و اقداماتی به‌منظور تدقیق تخمین ذخایر برفی آغاز شده است. اکثر این پژوهش‌ها در سال‌های اخیر با هدف محاسبه ذخیره و پوشش برف با استفاده از داده‌های بزرگ‌مقیاس (ماهواره‌ای و باز تحلیل شده) سامان یافته است (Fattahi *et al.*, 2011).

پژوهش‌گران به‌منظور محاسبه سهم برف از بارش و برفاب در دو دسته کلی دما-مینا و انرژی-مینا، روش‌های مختلفی پیشنهاد کرده‌اند (Kustas *et al.*, 1994). در ادبیات فنی، پژوهش‌هایی که تنها به اعتبارسنجی یک سناریوی واحد (بدون مقایسه با مدل‌های دیگر) می‌پردازند، بیش‌تر به‌دلیل عدم وجود یک سناریوی مرجع، دچار ضعف در ارائه تصویری کامل هستند. این پژوهش‌ها برای اعتبارسنجی کارایی مدل به بررسی متغیرهایی مانند درصد پوشش برف، تغییرات انرژی سطحی و غیره پرداخته‌اند (Cox *et al.*, 2006). از جمله پژوهش‌های متمرکز بر مقایسه تخمین‌های مدل‌های مختلف از ذخیره و ذوب برف می‌توان به مطالعه Karsten and Franz (2013) اشاره کرد که با استفاده از مدل توزیعی SACSMA و واسنجی آن با استفاده از محصول پوشش برف SNOW17 از سنجنده MODIS در طبقات مختلف ارتفاعی، اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه در کالیفرنیا نمودند. Magnusson *et al.* (2015) نیز با مقایسه چند مدل برف شامل دو مدل دما-مینا و مدل‌های موجود بیلان انرژی (موسوم به JIM)، اقدام به به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های هیدرولوژی نمودند. نتایج بررسی آن‌ها در دو حوضه آبریز مطالعاتی با تراکم شبکه بالا در کوه‌های آلپ بیانگر اهمیت بیش‌تر مشاهدات جرمی برف نسبت به عمق برف در اعتبارسنجی مدل بود و همچنین تأثیر بیش‌تر دقت مدل از خطاهای داده‌های ورودی در مقایسه با ساختار مدل بوده است. Chen *et al.* (2017) یک مدل ذوب برف و یخچال براساس مدل هیدرولوژی توزیعی CREST را در تبت توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از یک واسنجی دو مرحله‌ای، ابتدا فرایند ذوب برف را با استفاده از داده‌های پوشش برف MODIS و محصول آب معادل برف و مقایسه این دو با اندازه‌گیری‌های زمینی، شبیه‌سازی و واسنجی کرده و سپس فرایند تشکیل رواناب را با استفاده از محصول ذخیره کل محتوای رطوبتی سنجنده GRACE و رواناب مشاهداتی، بررسی و شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از عملکرد بهتر واسنجی دو مرحله‌ای نسبت به واسنجی رایج تک‌مرحله‌ای بوده است. Nemri and Kinnard (2020) به مقایسه روش‌های مختلف به‌منظور واسنجی یک مدل رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از رواناب خروجی حوضه و سپس با استفاده از مقایسه آب معادل برف محاسبه‌شده توسط مدل و آب معادل برف سنجنده‌شده توسط ایستگاه‌های برف‌سنجی زمینی در سراسر حوضه پرداختند. در این پژوهش نیز روش دو مرحله‌ای بهترین عملکرد را نشان داده است. از طرفی دیگر، با توجه به اهمیت اطلاعات زمینی در تخمین آب معادل برف و نقش آن در هیدرولوژی برف و عمومی حوضه‌های آبریز، LARGERON *et al.* (2020) به مرور پژوهش‌های مختلف در خصوص تخمین آب معادل برف (به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی هیدرولوژی برف) با استفاده از روش‌های داده‌گویی ۲ و اطلاعات زمینی پرداختند. در این مقاله، روش‌های موجود داده‌گویی اطلاعات و ترکیب بهینه اندازه‌گیری‌های زمینی با مدل‌های پوشش برفی به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها تخمین مقدار آب معادل برف بررسی شده است. در نهایت، مسائل و چالش‌های مرتبط با داده‌گویی اطلاعات پوشش برف در مناطق کوهستانی بررسی شده و توصیه‌هایی ارائه شده است.

در ایران نیز پژوهش‌های متنوعی با عنوان مدل‌سازی ذوب برف و اثر آن بر مدل‌سازی هیدرولوژی (و یا بیلان آب) انجام شده است. برخی از این مطالعات بر توسعه مدل‌های بیلان به‌منظور تفکیک باران و برف متمرکز بوده‌اند. به‌طور مثال، Tayefeh *et al.* (2017) از زیرمدل‌های متنوع دما محور برای توسعه مدل بیلان آبی ماهانه استفاده کرده و مدل‌های ترکیبی تولیدشده را در حوضه آبریز منتهی به سد امیرکبیر موردآزمون و مقایسه قرار دادند. نتیجه پژوهش ایشان نشان‌دهنده بیش‌ترین میزان ارتقای عملکرد مدل پایه Jazim از طریق ترکیب آن با زیر مدل شبیه‌سازی برف مدل McCabe-Markstrom بوده است. Taheri *et al.* (2022) با استفاده از دو سناریوهای مدل‌سازی توزیعی هیدرولوژی برف (با ساختار دما محور) و استفاده از تصاویر سطح برف و آب معادل برف، به تعیین سهم برف در یک مدل بیلان آبی ماهانه در حوضه بالادست سد قشلاق اقدام نمودند. در پژوهش فوق، سناریوهای مختلف از ترکیب محصولات بزرگ‌مقیاس برف با مدل مفهومی بیلان منابع آب و بهینه‌سازی تک و دو مرحله‌ای موردبررسی قرار گرفته و در نهایت بهبود ناشی از استفاده از پوشش برف را در مقیاسه با آب معادل برف نتیجه‌گیری نمودند. عمده پژوهش‌های انجام‌شده در ایران بر کاربرد مدل‌های دما- مبنا نظیر SRM به تنهایی و در ترکیب با داده‌های دورسنجی متمرکز است. نمونه‌های اخیر از کاربردهای این مدل توسط Ebrahimi *et al.* (2016) در ترکیب با تصاویر سنجنده MODIS در حوضه آبریز نهاوند و Shahraki Mojahed *et al.* (2022) در ترکیب با محصول پوشش برف MODIS و محصول تابش خالص NEO در حوضه آبریز کارده گزارش شده است. همچنین مطالعات متعددی را می‌توان نامبرد که در آن‌ها، مدل‌های هیدرولوژی (با زیر مدل برف) با محصولات بزرگ‌مقیاس هیدرولوژیکی ترکیب شده و منتج به واسنجی بهتر مدل نهایی شده است (Riboust Karimi *et al.*, 2017).

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثر روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدرولوژی برف (سناریوهای دما-مبنا، مدل‌سازی مبتنی بر تشعشع خالص به‌همراه دما و روش مبتنی بر بیلان انرژی) در یک مدل ماهانه بیلان آب انجام شده است. روش‌های موجود، به‌صورت معمول در کنار یک مدل روزانه موردبررسی قرار گرفته‌اند و سابقه استفاده از مدل‌های بیلان انرژی در شبیه‌سازی برف در مقیاس ماهانه بسیار محدود بوده و لذا مقیاس زمانی این بررسی به‌عنوان نوآوری پژوهش مورد تأکید است. ضمن این‌که ارزیابی هم‌زمان این سه شیوه در یک محدوده مطالعاتی از دیگر موضوعاتی است که به‌ندرت در پژوهش‌های گذشته گزارش شده و امکان یک ارزیابی جامع‌تر را فراهم نموده است. در این مطالعه، شیوه مناسب شبیه‌سازی فرایند تجمع و ذوب برف در مقیاس ماهانه در منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز طالقان- الموت) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج استفاده گسترده از محصولات اطلاعات بزرگ‌مقیاس دورسنجی که در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف در یک واسنجی دو مرحله‌ای مورد استفاده قرار گرفته، مهم‌ترین دستاورد این پژوهش است. لازم به ذکر است که این منطقه، به‌دلیل برف‌گیربودن ارتفاعات آن در پژوهش‌های سابق مورد توجه بوده است (Ezzati *et al.*, 2016; Nouri *et al.*, 2018). تفاوت دامنه زمانی و اختلاف در اجزای بیلانی که با استفاده از مدل معمول و معروف SRM که در بسیاری از مطالعات قبلی در ایران و منطقه طالقان به‌طور خاص مورد توجه بوده با اجزای بیلان که در این پژوهش محاسبه شده، باعث شده مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات قبلی ذکر شده میسر نباشد. در ادامه این مقاله، به بررسی روش مورد استفاده و توصیف منطقه مورد مطالعه و ارائه نتایج پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به تفکیک، به بررسی محدوده مطالعاتی، داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده شامل داده‌های زمینی و محصولات بزرگ‌مقیاس اطلاعاتی و شیوه‌های مدل‌های بیلان و هیدرولوژی برف در این پژوهش پرداخته شده است.

## ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی طالقان (شکل ۱) با مساحتی در حدود ۴۸۴۶ کیلومترمربع، یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز سفیدرود بزرگ است. این حوضه از شمال و شرق به رشته‌کوه‌های طالقان و از جنوب به حوضه آبریز رودخانه کرج و کردان محدود بوده که در دامنه جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵ دقیقه شمالی تا ۳۶ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. تغییرات ارتفاعی این حوضه بین ۳۴۵ تا ۴۱۰۰ متر از سطح آزاد دریا بوده و دارای دمای متوسط سالانه ۱۰/۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۶۰۰ میلی‌متر است. این حوضه در ماه‌های فصل زمستان برف‌گیر است. رودخانه شاهرود در بالادست این حوضه، از ارتفاعات شرقی حوضه سرچشمه گرفته و به سمت غرب سرازیر شده، پس از عبور از سد طالقان، به رودخانه سفیدرود می‌ریزد. خروجی این محدوده مطالعاتی در ایستگاه هیدرومتری لوشان اندازه‌گیری می‌شود. از میان ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوضه، ۱۰ ایستگاه در تمام یا بخشی از دوره مطالعه (سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ میلادی) دارای داده ثبت‌شده هستند.

## ۲-۲- اطلاعات زمینی و بزرگ‌مقیاس مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از ترکیب داده‌های ثبت‌شده زمینی و اطلاعات بزرگ‌مقیاس استفاده شده است. با توجه به مقیاس زمانی ماهانه مدل‌سازی هیدرولوژیکی در پژوهش حاضر، داده‌های ماهانه دمای هوا، بارش و تبخیر از تشت به‌عنوان ورودی مدل بیلان آب مورد استفاده قرار گرفته است. میدان اطلاعات اقلیمی مورد استفاده با درون‌یابی مکانی داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های زمینی با استفاده از مدل PRISM (Daly et al., 1994) پیاده‌سازی شده توسط Zandi et al. (2020) تولید شده است. این روش براساس رابطه خطی-محلی بین متغیرهای اقلیمی و ارتفاع توسعه داده شده است و سوابق کاربرد آن در تعدادی از محدوده‌های مطالعاتی کشور نشان داده است که توزیع مکانی متغیرهای درون‌یابی شده به استفاده از این مدل، از دقت بالاتری نسبت به روش‌های ساده‌ای مانند معکوس فاصله وزن‌دار ۵ و کریجینگ برخوردار هستند (Zandi et al., 2022). در این مطالعه از اطلاعات ایستگاه هیدرومتری لوشان واقع در پایین دست حوضه و همچنین داده‌های کنترل و بهره‌برداری سد طالقان شامل تغییرات ذخیره و مصارف شرب و کشاورزی ارائه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران استفاده شده است. داده‌های مذکور برای طبیعی‌سازی داده‌های ایستگاه هیدرومتری لوشان و حذف اثر سد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر بوده‌اند:

- پوشش برف: MOD10CM با تفکیک مکانی پنج کیلومتر

- رطوبت هوا: FLDAS با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه

- تابش ورودی خورشید، تشعشع خالص، آلبدوی برف، پوشش ابر و سرعت باد و تشعشع خالص حرارتی (بلند موج):

ERA5-LAND با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه

- LAI: MOD15A2H با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر

- دمای سطح زمین (LST): MOD11C3 با تفکیک مکانی پنج کیلومتر

داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده از سرویس GoogleEarthEngine تأمین شده که با ارائه داده‌ها به صورت فایل‌هایی با فرمت‌هایی مثل tiff و همچنین برش تصویرها با محدوده حوضه طالقان به‌طور خودکار، بار محاسباتی پژوهش را به شکل چشم‌گیری کاهش داده است (Gorelick et al., 2017). تفکیک زمانی تمامی داده‌های سنجش از دور استفاده شده ماهانه است، به‌جز داده شاخص سطح برگ (LAI) که با تفکیک هشت‌روزه در دسترس بوده و در نهایت به صورت ماهانه تجمیع شده است.

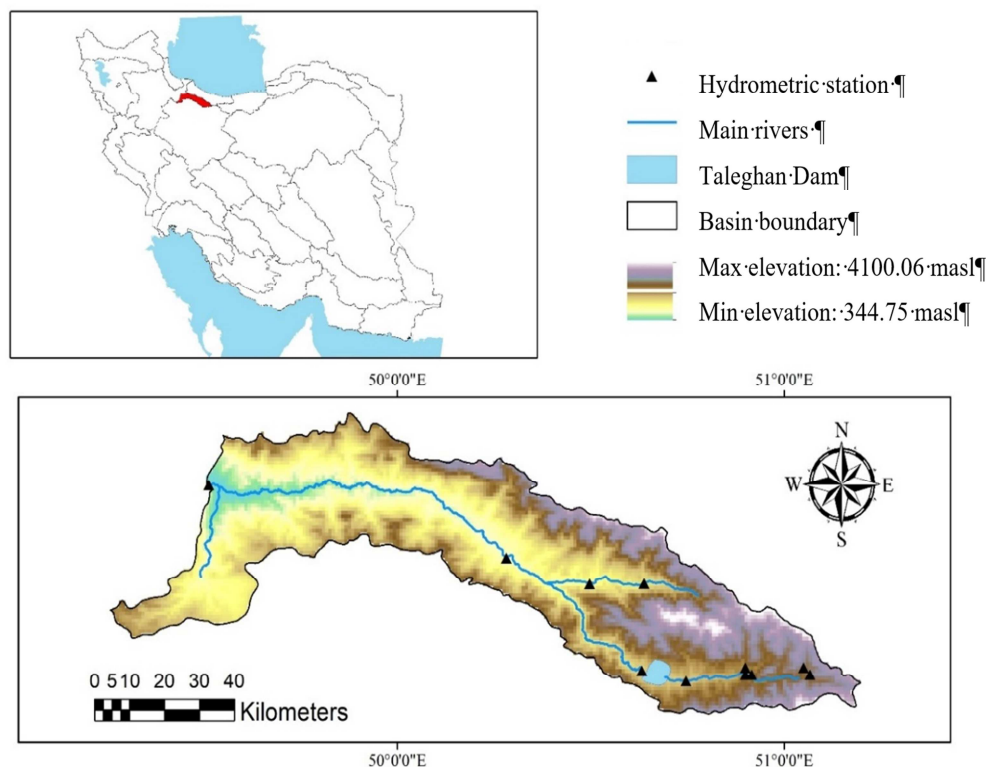


Figure 1. Digital Elevation Model (DEM), Rivers, and Hydrometric Stations in Taleghan-Alamut Basin

### ۲-۳- روش‌شناسی تحقیق

با وجود این که در اغلب پژوهش‌های پیشین از یک روش یک مرحله‌ای واسنجی برمبنای رواناب خروجی استفاده شده، در این پژوهش از فرایند مدل‌سازی و واسنجی دو مرحله‌ای در قالب سه گام استفاده شده است. شکل (۲) فرایند کلی روش‌شناسی این پژوهش را نشان می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، الگوریتم ژنتیک پیوسته است که در هر مدل‌سازی از همگرایی بهینه‌سازی اطمینان حاصل شده است. در روند اجرای مدل، سه روش بهینه‌سازی و شبیه‌سازی به شرح زیر مورد استفاده بوده است.

**روش a:** واسنجی تمام پارامترهای مدل مؤثر در فرایند ذخیره‌سازی و ذوب برف با تابع هدف کمینه‌سازی خطای تشخیص برف و سپس بهینه‌سازی پارامترهای اصلی مدل بیلان با تابع هدف کمینه‌سازی خطای تخمین جریان رودخانه در ایستگاه خروجی حوضه و حداکثرسازی شاخص KGE بین رواناب کل مشاهداتی و محاسباتی.

**روش b:** ترتیب دو مرحله واسنجی مانند روش a است و تنها تفاوت آن، محدود کردن دامنه پارامترهای مدل در مرحله اول است تا مقادیر بهینه انتخاب شده در مرحله اول، باعث بروز نتایج بهتری در مرحله دوم (واسنجی با رواناب) شوند.

**روش c:** در ابتدا مقدار بهینه تمامی متغیرهای هدف به غیر از دو آستانه مرتبط با تعیین خطای تشخیص برف ( $SP'$ ) و ( $SC'$ ) با تابع هدف کمینه‌سازی خطای جریان سطحی در خروجی حوضه تعیین می‌شود و سپس در مرحله بعد، دو آستانه مذکور به شکلی تعیین می‌شوند که خطای تشخیص برف کمینه شود. در ادامه، اجزای مدل‌سازی بیلان، هیدرولوژی برف و شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی تشریح شده است.

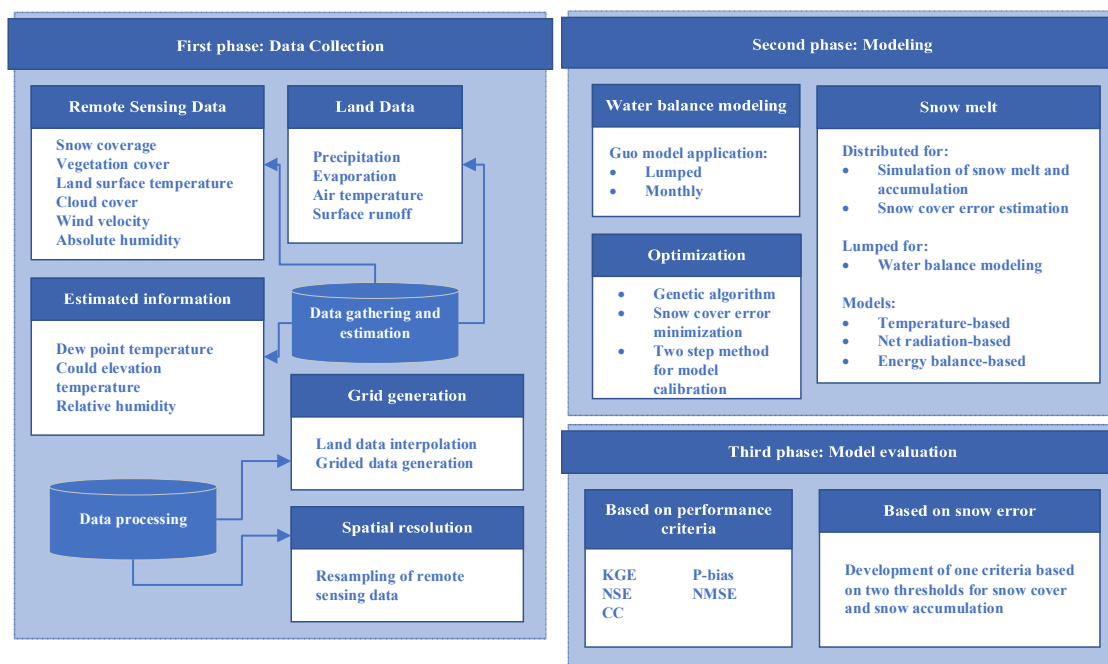


Figure 2. Research methodology

## ۲-۴- مدل مفهومی بیلان ماهانه آب

در این پژوهش از ساختار پیشنهادی توسط Guo *et al.* (2005) که یک مدل هیدرولوژی نیمه توزیعی ماهانه در مقیاس حوضه آبریز را با هدف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم توسعه دادند، استفاده شده است. رابطه تبخیر مورد استفاده در این مدل بر مبنای یک لایه خاک سطحی در نظر گرفته شده که در رابطه (۱) ارائه شده است. در این رابطه محاسبه تبخیر تعرق واقعی براساس رابطه تجربی و بر مبنای اطلاعات تبخیر از تشت صورت می گیرد:

$$E(t) = E_0 \times E_p(t) \times \tanh \frac{P(t)}{E_p(t)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق،  $E_p(t)$  نشان دهنده میزان تبخیر از تشت و  $P(t)$  مقدار کل بارش در ماه  $t$  ام است. پارامتر  $E_0$ ، ضریب مقیاس است که در مدل واسنجی می شود. همچنین در این مدل، بارش هر ماه بر مبنای دمای ماه و با استفاده از دو آستانه دمایی به برف و باران تقسیم می شود. ساختار کلان تعیین مقدار برف و باران از بارش، روابط حاکم بر ذخیره برف و فرایند ذوب آن در مدل منتخب به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$P_{sn}(t) = P(t) \times \left(1 - \exp\left\{\frac{T(t) - T_H}{T_H - T_L}\right\}\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R(t) = P(t) - P_{sn}(t) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$S_{sn}(t) = S_{sn}(t-1) + P_{sn}(t) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Q_{sn}(t) = K_{sn} \times S_{sn}(t) \times \exp\left\{\frac{T(t) - T_H}{T_H - T_L}\right\} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط بالا،  $P_{sn}(t)$  سهم برف از کل بارش،  $P(t)$  کل بارش،  $R(t)$  سهم باران از کل بارش،  $S_{sn}(t)$  مقدار

ذخیره برف و  $Q_{sn}(t)$  مقدار ذوب برف در ماه  $t$ ام بوده و واحد اندازه‌گیری آن‌ها "میلی‌متر در ماه" است. در مدل توسعه داده‌شده در مجموع ۱۴ پارامتر در نظر گرفته شده که به‌منظور مشاهده سایر اجزای بیلان و نحوه محاسبه آن‌ها مراجعه به مقاله Guo *et al.* (2005) توصیه می‌شود. جریان رودخانه شبیه‌سازی شده توسط این دارای سه جزء اصلی رواناب ذوب برف ( $q_{sn}$ )، سطحی ( $q_s$ ) و پایه ( $q_g$ ) است که در روابط مفهومی ارائه‌شده در مقاله اصلی موجود است. لازم به ذکر است که به‌منظور تدقیق میزان بارش ورودی به مدل، ضرایب اصلاحی در دامنه ۰/۵ الی ۱/۵ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۵- مدل‌سازی مفهومی هیدرولوژی برف

در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از سه الگوی مدل‌سازی ذوب برف در منطقه موردنظر به مدل‌سازی بیلان آب اقدام شود. اولین سناریوی مدل‌سازی (دما-مبنا)، استفاده از رابطه دما مبناست که در اغلب مدل‌سازی‌های بیلان ماهانه (از جمله مدل مورد استفاده) مرسوم است. سناریو دوم (دما-تشنع) ارتقای شیوه محاسبه ذوب برف در مدل Guo با استفاده از تشنع خالص است. برای این منظور با بهره‌گیری از ایده Kustas *et al.* (1996) در محاسبه ذوب برف از متغیرهای دما و تشنع خالص، رابطه مدل ذوب برف با توسعه ایده استفاده از تابع نمایی که در مدل Guo *et al.* (2005) به‌کاررفته تدوین شد:

$$M = K_{sn} * (a * e^{\left(\frac{T-T_h}{T_h-T_l}\right)} + b * e^{\left(\frac{Rn-Rn_h}{Rn_h-Rn_l}\right)}) \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه فوق،  $a$  و  $b$  به‌ترتیب پارامترهای تأثیر ترم دما و تشنع خالص،  $K_{sn}$  ضریب تبدیل برف به رواناب،  $T_h$  و  $T_l$  آستانه‌های دمایی بالا و پایین برای ذوب برف و  $Rn_h$  و  $Rn_l$  هم به‌ترتیب آستانه‌های تشنع بالا و پایین برای ذوب برف هستند. در این رابطه، فرض می‌شود اگر تشنع خالص بیش از مقدار آستانه بالا ( $Rn_h$ ) باشد، برف کاملاً ذوب می‌شود، اگر کم‌تر از آستانه پایین ( $Rn_l$ ) باشد، ذوب برف متوقف می‌شود و اگر بین این دو آستانه باشد، مقداری از برف ذوب می‌شود. بدیهی است که رابطه بالا نرخ ذوب قابل انجام در مدل را مشخص می‌کند و لزوماً این مقدار ذوب برف رخ نمی‌دهد. بنابراین با ضرب نرخ ذوب به‌دست‌آمده در ذخیره برف حوضه، مقدار ارتفاع ذوب برف در هر ماه محاسبه می‌شود:

$$Q_{sn} = K_{sn} * SP * (a * e^{\left(\frac{T-T_h}{T_h-T_l}\right)} + b * e^{\left(\frac{Rn-Rn_h}{Rn_h-Rn_l}\right)}) \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه،  $SP$  بیانگر ذخیره برف (میلی‌متر) است. لازم به ذکر است، محدوده مجاز متغیرهای این مدل در واسنجی، با اتکا به مقادیر واسنجی شده توسط Guo *et al.* (2005) و تجربیات قبلی پژوهش‌گران در استفاده از این مدل انتخاب شده است. سناریوی سوم مورد استفاده در این پژوهش (بیلان انرژی)، استفاده از رابطه بیلان انرژی در سطح و تعیین میزان ذوب برف براساس الگوی انرژی تابشی دریافتی براساس راهنمای ارائه‌شده توسط واحد مهندسی ارتش آمریکا (USACE-1998).

## ۲-۶- شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی

در پژوهش حاضر از روشی دو مرحله‌ای به‌منظور واسنجی مدل توسعه‌داده‌شده بهره گرفته می‌شود. این بخش از واسنجی مدل، صرفاً ارزیابی تشابه مقادیر رواناب محاسباتی و مشاهداتی براساس شاخص آماری KGE مدنظر است. این شاخص یک آماره چندمعیاره تشابه است که توسط Gupta *et al.* (2009) پیشنهاد شد. این شاخص تابعی از میانگین، واریانس و همبستگی بین نمونه محاسباتی و داده‌های مشاهداتی است. بنابراین، علاوه بر تشابه روند کلی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی، تشابه بین پراکندگی و میانگین دو دسته داده را نیز بررسی می‌کند. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:



$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - R_{sim}^{obs})^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{q}_{sim}}{\bar{q}_{obs}}\right)^2} \quad \text{رابطه ۸}$$

در رابطه فوق،  $R_{sim}^{obs}$  بیانگر ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی ( $obs$ ) و محاسباتی ( $sim$ )،  $\sigma$  بیانگر انحراف از معیار و  $\bar{q}$  نشان‌دهنده میانگین داده‌های رواناب است. بازه عددی این شاخص از منفی بی‌نهایت تا یک است و هرچه شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر عملکرد بهتر مدل و نزدیکی بیش‌تر نتایج به داده‌های مشاهداتی از نظر آماری است. در مرحله دیگر واسنجی، از آنجاکه علاوه بر خروجی نهایی رواناب، فرایند شبیه‌سازی تجمع (ذخیره) و ذوب برف نیز دارای اهمیت است، از پوشش برف هم به‌عنوان یک پارامتر در فرایند واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شده است (Taheri *et al.*, 2022). پارامترهای واسنجی شده در مدل، به دو دسته پارامترهای مدل هیدرولوژی (بدون وابستگی به فرایند شبیه‌سازی برف) و پارامترهای مدل ذوب برف تقسیم شده‌اند. در فرایند واسنجی، ابتدا پارامترهای مدل ذوب واسنجی شده و سپس مقادیر انتخاب شده برای این پارامترها به‌عنوان ورودی عدد ثابت در مرحله بعدی واسنجی برای تعیین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

واسنجی پارامترهای مدل ذوب برف بدین صورت انجام شده که خطای مدل در تشخیص سلول‌های پوشیده شده از برف کمینه شود. از آنجاکه داده ورودی متغیر پوشش برف به‌صورت درصد (%) و داده ورودی متغیر ذخیره برف با واحد اندازه‌گیری میلی‌متر (mm) در دسترس بود، مقایسه مستقیم آن‌ها امکان‌پذیر نبود. بنابراین برای هر یک از این دو متغیر، یک حد آستانه تعریف شد که خود این دو مقدار نیز در این مرحله واسنجی شدند. آستانه پوشش برف، 'SC' و آستانه ذخیره برف 'SP' نام گذاری شده است. حدود بالا و پایین استفاده شده برای این دو متغیر با اتکا به پژوهش‌های مشابه پیشین (Parajka and Blöschl, 2008; Nester *et al.*, 2012) و همچنین از یک روش جستجوی گسسته در مقادیر درصد خطای تشخیص برف بر مبنای دو پارامتر آستانه پوشش برف و آستانه ذخیره برف استفاده شده است. پس از تعیین این دو آستانه، ماجول ذوب برف در تشخیص هر یک از سلول‌ها از نظر پوشش برف به یکی از چهار تشخیص ارائه شده در جدول (۱) می‌رسد.

**Table 1.** Four behaviours in a cell with respect to snow presence detection

	> SP'	≤ SP'
> SC'	True	ERR1
≤ SC'	ERR2	True

براین اساس دو حالت صحیح بوده و دو حالت دارای خطا هستند. دو خطای به‌وجود آمده، خطای نوع اول (ERR1) و خطای نوع دوم (ERR2) نامیده می‌شوند. مقدار خطای نوع اول در یک ماه خاص از سال در فرایند مدل‌سازی، معادل تعداد سلول‌هایی است که در آن‌ها خطای نوع اول رخ داده تقسیم بر کل تعداد سلول‌ها. به‌عنوان مثال، ERR1 برابر درصد سلول‌هایی در حوضه است که مقدار پوشش برف در آن‌ها بیش از آستانه واسنجی شده ('SC') است، اما مقدار ذخیره برف محاسبه شده در آن‌ها کم‌تر از آستانه ('SP') است. تابع هدف بهینه‌سازی مرحله اول که براساس آن پارامترهای ماژول ذوب برف واسنجی شدند عبارت است از:

$$Fitness = 1 - (\sqrt{ERR1^2 + ERR2^2}) \quad \text{رابطه ۹}$$

به‌منظور اعتبارسنجی رواناب کل خروجی حوضه در این پژوهش از پنج شاخص خطا استفاده شده است. شاخص‌های استفاده شده، عبارت از  $CC$ ،  $KGE$ ،  $P_{-bias}$ ،  $NMSE$  و  $NSE$  است. شاخص همبستگی ( $CC$ ) که یکی از شاخص‌های معروف آماری برای بیان همبستگی بین دو دسته داده است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i} - \bar{q}_{obs})(q_{sim,i} - \bar{q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i} - \bar{q}_{obs})^2 (q_{sim,i} - \bar{q}_{sim})^2}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این رابطه،  $q_{obs}$ ،  $\bar{q}_{obs}$ ،  $q_{sim}$  و  $\bar{q}_{sim}$  به ترتیب دبی مشاهداتی و میانگین آن و همچنین دبی محاسباتی و مقدار میانگین آن هستند. شاخص  $P_{-bias}$ ، متوسط خطای کلی محاسبات نسبت به مشاهدات را بیان می‌کند و واحد اندازه‌گیری پارامتر موردنظر با تبدیل آن به ساختار کسری (و بیان درصدی آن) حذف شده است:

$$P_{-bias} = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i} - q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i})} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن،  $q_{obs}$  و  $q_{sim}$  به ترتیب بیانگر دبی مشاهداتی و محاسباتی خروجی از محدوده مطالعاتی هستند. شاخص خطای میانگین مربعات نرمال شده (NMSE) که یک شاخص عدم تشابه است بدین شکل تعریف می‌شود:

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i} - q_{sim,i})^2}{n * \sum_{i=1}^n (q_{obs,i})^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در این رابطه نیز،  $q_{obs}$  و  $q_{sim}$  به ترتیب بیانگر دبی خروجی مشاهداتی و مدل‌سازی هستند. هم‌چنین Nash and Sutcliffe (1970) شاخصی برای تشخیص تشابه رفتاری دو سری داده به یکدیگر پیشنهاد کردند که به نام خود آن‌ها معروف شد (NSE) و عبارت است از:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i} - q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{obs,i} - \bar{q}_{obs})^2} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن،  $q_{obs}$ ،  $q_{sim}$  و  $\bar{q}_{obs}$  به ترتیب دبی مشاهداتی، محاسباتی و متوسط دبی مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری واقع در نقطه خروجی محدوده مطالعاتی را بیان می‌کنند. در روابط فوق  $i$  معرف شماره ماه مدنظر است.

### ۳- نتایج و بحث

در اولین گام از پژوهش حاضر به تخمین مقادیر بارش، دما و تبخیر از تشت به صورت ماهانه در محدوده مطالعاتی مبادرت شده است. با هدف ارزیابی نقشه‌های تولیدشده برای سه متغیر ذکرشده از داده‌های ماهانه زمینی بارش، تبخیر و دمای هوا و روش ارزیابی متقاطع ۶ بهره گرفته شده است. نتایج این ارزیابی در به‌طور خلاصه در جدول (۲) ارائه شده که در مجموع با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه مناسب ارزیابی می‌شود. داده‌های بارش و دما با داشتن شاخص KGE و ضریب همبستگی نسبتاً بالا، عملکرد کلی خوبی دارند. هم‌چنین شاخص MAE محاسبه شده برای آن‌ها قابل قبول است. داده‌های تبخیر نیز KGE و ضریب همبستگی عملکرد قابل قبولی را نشان می‌دهد.

**Table 2.** Evaluation criteria for the land raster climatic data produced by PRISM

Climate variable	Evaluation criteria		
	MAE (mm)	R <sup>2</sup> (%)	KGE (%)
Precipitation	7.9	0.81	0.89
Air temperature	1.3	0.97	0.98
Evaporation	37.6	0.8	0.87

پس از بهینه‌یابی پارامترهای مدل‌های بیلان مدنظر، نتایج مقایسه هیدروگراف رواناب خروجی مشاهداتی و

محاسباتی براساس آماره های KGE, NMSE, CC, NSE و P-bias و همچنین دقت مدل در تخمین مکانی پوشش برف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول (۳) خصوصیات آماری سناریوهای مورد بررسی و الگوهای سه گانه بهینه یابی ارائه شده است. براساس این نتایج، با استفاده از روش a نتایج پارامترهای واسنجی شده در مرحله اول (که با هدف کمینه کردن خطای برف انجام شد) به نتایج مناسبی در مرحله دوم منجر نمی شود. از این رو، با محدود کردن دامنه متغیرهای تصمیم (روش b)، نتایج به مراتب مناسب تری بست به رویکرد اول حاصل شده است. منتهی در این روش، خطای تشخیص برف نسبت به رویکرد a افزایش یافته است. در ادامه به بررسی نتایج سناریوهای ذوب برف پرداخته شده است.

### ۳-۱- ارزیابی سناریوهای ذوب برف

در این پژوهش از داده های سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ برای واسنجی مدل استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی هر سه سناریوی پیاده سازی شده ذخیره و ذوب برف و مدل سازی های بیلان، از داده های سه سال انتهایی دوره مطالعه (۲۰۱۳-۲۰۱۵) بهره گرفته شده است.

نتایج سناریوی ذوب برف دما- مینا مطابق (جدول ۴) گویای عملکرد کلی قابل قبول این سناریو است. شاخص KGE برای دوره اعتبارسنجی این مدل ذوب برف (روش c)، ۰/۷۲ بوده که با توجه به پژوهش های مشابه، قابل پذیرش است. همچنین شاخص  $R^2$  با مقدار حدود ۰/۶۲ نشانگر ضریب همبستگی (CC)  $(\sqrt{R^2})$  حدود ۰/۸ بین داده های مشاهداتی رواناب و مقادیر محاسباتی در این سناریو است. براساس این نتایج، مقدار شاخص نش- ساتکلیف (۰/۳۷) زیر ۰/۵ است و تا حدی ضعف عملکرد این سناریو را می رساند. از طرفی خطای میانگین مربعات نرمال ۶۱ درصدی زیاد بوده و نشان از عدم هماهنگی لازم مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دارد.

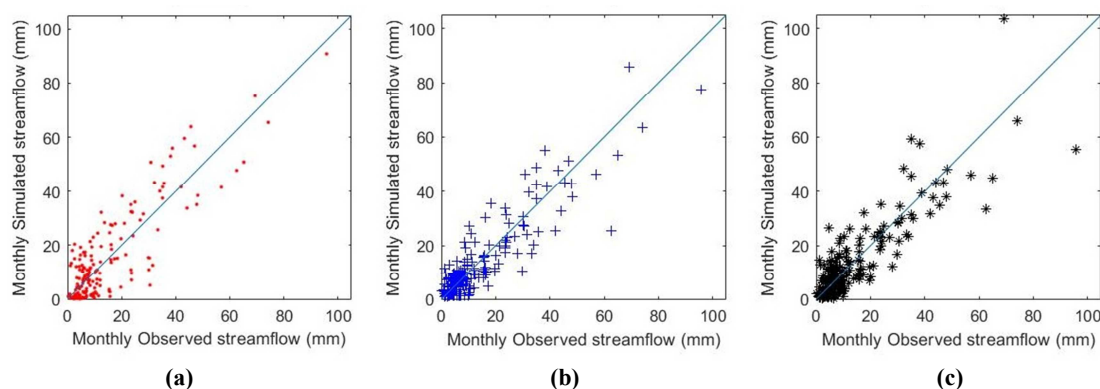
در میان پارامترهای مدل، ضریب اصلاح بارش نقشی اساسی دارد. از آنجاکه برآورد بارش براساس داده های ایستگاه های زمینی صورت گرفته، لذا نتایج این تخمین ها به نقاطی که ایستگاه ها در آنها واقع شده اند گرایش پیدا می کنند. نتایج واسنجی مدل نشان می دهد که در ماه های پر بارش تخمین ها منطقی تر بوده و منتج به نتایج بهتری در مدل می شوند. بنابراین ضریب اصلاح در این ماه ها عددی نزدیک به یک بوده و در ماه های کم بارش، نیاز به اصلاح بیشتری دارد. این اتفاق به این دلیل است که بارش های پراکنده در ماه های کم بارش رخ داده و نتایج بارش اندازه گیری شده در این ماه ها در مقایسه با ماه های پر بارش نماینده مناسبی از بارش کل حوضه نیست.

**Table 3.** Water balance model performance evaluation criteria and snow error in calibration and verification periods for different snow melt scenarios

Snowmelt scenario	Implementation method	Evaluation criteria											
		Verification							Calibration				
		snow error	R2	NSE	NMSE	P-bias	KGE	snow-error	R2	NSE	NMSE	P-bias	KGE
Temperature based	a	0.09	31.83	13.01	0.85	1.89	0.56	0.08	42.8	37.22	0.62	2.34	0.64
	b	0.11	60.87	57.11	0.42	3.58	0.78	0.13	73.26	67.11	0.29	0.42	0.8
	c	0.11	62.52	37.23	0.61	5.74	0.72	0.11	71.88	52.09	0.28	1.3	0.81
Radiation-based	a	0.08	26.31	10.79	1.08	6.51	0.4	0.08	31.71	24.49	0.75	2.48	0.53
	b	0.12	63.79	59.92	0.39	8.25	0.77	0.16	76.12	73.77	0.26	0.31	0.87
	c	0.11	67.4	63.25	0.36	8.31	0.79	0.14	81.23	80.92	0.19	2.57	0.9
Energy balance	a	0.11	54.23	52.39	0.46	7.49	0.7	0.14	59.07	50.03	0.49	10.04	0.75
	b	0.15	73.99	72.59	0.27	0.99	0.86	0.21	76.12	74.46	0.25	1.5	0.87
	c	0.11	76.03	75.53	0.24	3.34	0.86	0.16	75.78	72.65	0.27	0.33	0.88

در اجرای مدل با سناریوی ذوب برف مبتنی بر تشعشع خالص، شاهد نتایج کلی بهتری نسبت به سناریوی دما- مینا

هستیم. در این مدل، با وجود این که مقدار شاخص KGE در روش b افزایش چندانی نداشته، اما در روش c این شاخص از حدود ۰/۷۲ به ۰/۷۸ رسیده است. همچنین افزایش ضریب  $R^2$  از ۰/۶۰ به ۰/۶۳ در روش b و از ۰/۶۲ به ۰/۶۷ در روش c، بیانگر بیش‌تر شدن همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی رواناب خروجی از حوضه است. رشد قابل توجه شاخص نش-ساتکلیف و کاهش چشم‌گیر شاخص میانگین مربعات نرمال خطا در این سناریو نسبت به روش c در سناریوی دما-مبنا، نشانگر بهبود عملکرد مدل در تشخیص روند رواناب بوده است. روش a در اجراهای انجام‌شده، کم‌ترین شاخص‌های اعتبارسنجی و همبستگی را نشان داده و عملاً نیازهای مدل را ارضا نمی‌کنند. براساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۳)، سناریوی بیلان انرژی بالاترین شاخص عملکرد KGE را در تمام سناریوها به خود اختصاص داده است. به‌ویژه در روش c که نسبت به روش b نیز اکثر شاخص‌های عملکردی دارای رشد بوده‌اند. اگرچه مقدار KGE در دو روش b و c در حدود ۰/۸۶ بوده و تغییر چندانی نداشته اما مقادیر  $R^2$  شاخص NSE و میانگین مربعات خطای نرمال شده بهبود یافته‌اند. تنها شاخص خطایی که در روش c نسبت به b عملکرد ضعیف‌تری را نشان می‌دهد، شاخص  $P_{-bias}$  بوده که کاهش آن می‌تواند ناشی از کاهش عملکرد مدل در ماه‌های کم‌بارش باشد که جریان پایه در رودخانه مشاهده می‌شود. در شکل (۳)، مقایسه عملکرد مقادیر مشاهداتی و محاسباتی رواناب با سناریوهای ذوب برف دما-مبنا، تشعشع خالص و بیلان انرژی در کل دوره موردبررسی (۲۰۱۵-۲۰۰۱) ارائه شده است.



**Figure 3.** Comparison between observed and estimated streamflows in a) temperature-based, b) radiation-based and c) energy balance scenarios (2001-2015)

در شکل (۴) نحوه تغییرات مقادیر متغیرهای مختلف مؤثر در تشکیل پاسخ هیدرولوژی و مدل ذوب برف بیلان انرژی در سه سال انتهایی دوره مطالعه که مطابق با دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵) ارائه شده است. بر این اساس، ۵۶ درصد از مقدار کل رواناب ناشی از آب زیرزمینی، ۲۷ درصد ناشی از ذوب برف و در حدود ۱۷ درصد ناشی از آب تولیدشده در سطح حوضه است. همچنین تناسب ماه‌های دارای حداکثر نسبی بارش با تبخیرتقرق مشهود است.

### ۳-۲- ارزیابی برآورد پوشش برف

شاخص‌های عملکرد پوشش برف (خطای برف) را به‌طور کلی در جدول (۳) برای سناریوهای موردبررسی ارائه شد. اما در این بخش از پژوهش به بررسی خطای پوشش برف به‌صورت دقیق‌تر در مقیاس زمانی ماهانه و به‌صورت سلولی پرداخته شده‌است. شکل (۵-الف و ب) به‌ترتیب مقدار متوسط ماهانه خطای بیش‌برآورد و کم‌برآورد را در طول دوره مطالعه (سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵) به تفکیک سلولی نشان می‌دهد.

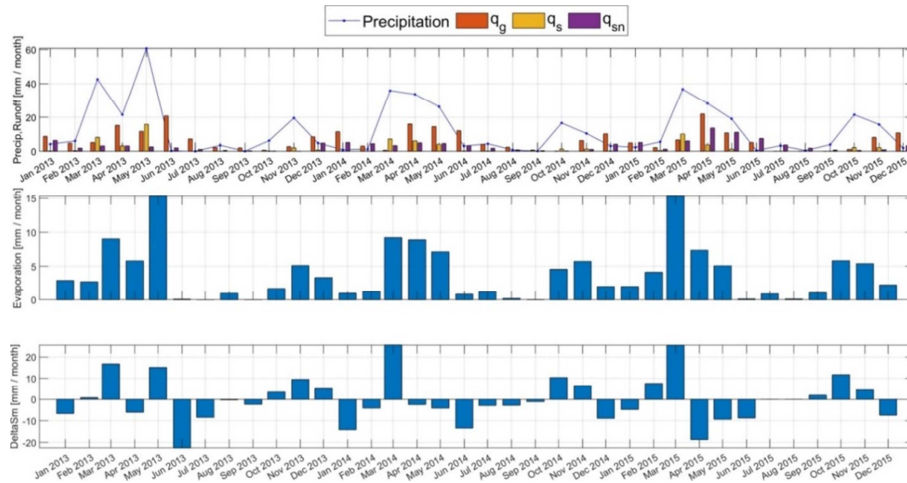


Figure 4. Variations of total streamflow components including snow melt runoff, surface runoff, base flow, actual evapotranspiration and soil moisture variations estimated by the energy balance-based model in the validation period (2013-2015)

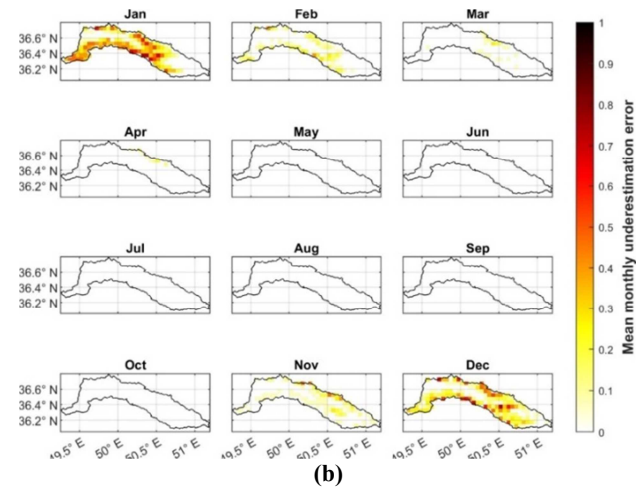
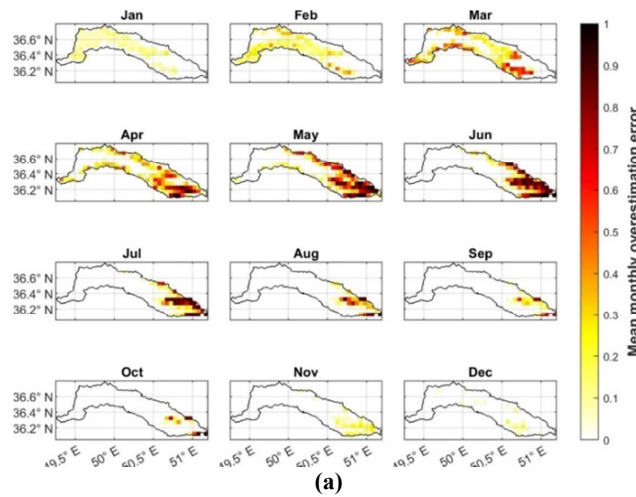
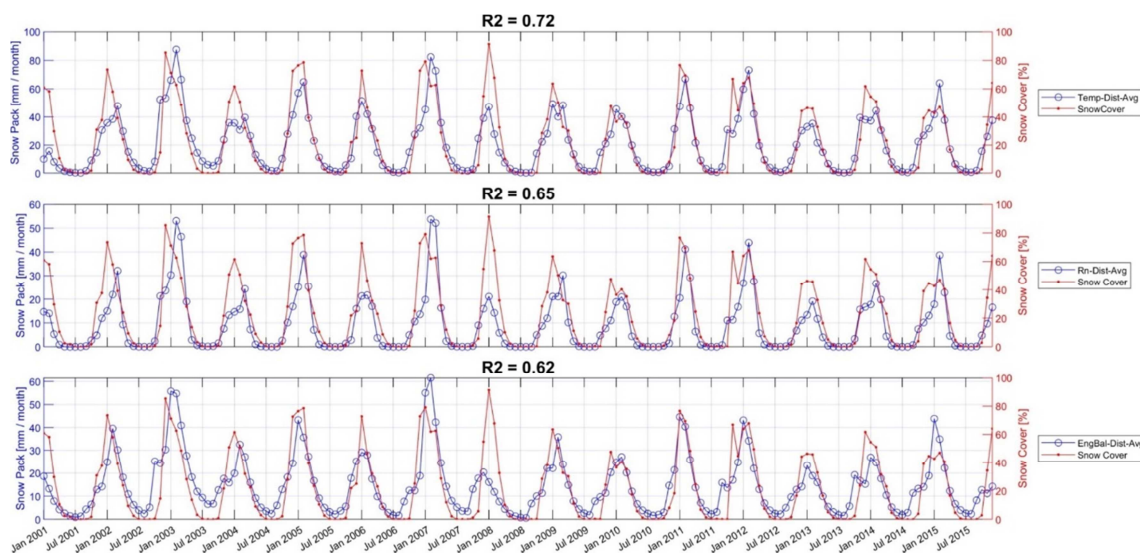


Figure 5. Mean monthly average error a) over estimation and b) under estimation of snow cover in Taleghan Basin during 2001 to 2015 for energy balance scenario (implementation method c)

نکته قابل ذکر این است که خطاهای مشاهده شده در جدول (۳) شامل میانگین خطای کل حوضه در دوره‌های دارای خطا بوده و اگر در یک دوره، خطایی در سلول رخ نداده باشد، به منظور عدم ایجاد اشتباه در برآورد خطای میانگین، آن ماه از تعداد ماه‌های دوره میانگین حذف شده است. وجود خطای بیش برآورد در ماه‌های بهار نشان‌دهنده آن است که مدل ذوب برف، مقدار برف را در سلول‌های بالادست حوضه بیش از آستانه ذخیره برف واسنجی شده (۱۳/۶ میلی‌متر) نشان می‌دهد، در صورتی که تصاویر ماهواره‌ای MODIS درصد پوشش برف را در آن سلول‌ها کمتر از آستانه پوشش برف واسنجی شده (۵۰ درصد) نشان می‌دهند. میزان خطای بیش برآورد در ماه‌های سرد سال، نقش مهمی در خطای تشخیص برف ایفا می‌کند؛ مقدار کم این خطا به‌ویژه در بالادست حوضه، نشانگر عملکرد مناسب مدل در تشخیص برف است. از طرفی شکل (۵) نشان‌دهنده مقدار متوسط ماهانه خطای کم برآورد برف به صورت سلولی در سطح حوضه آبریز است. بر این اساس، در ماه‌های گرم، میزان خطای کم برآورد ناچیز است. این بدین معناست که در این ماه‌ها، در اکثر سلول‌هایی که تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS، درصد پوشش برف سلول‌ها را زیر ۵۰ درصد نشان می‌داده‌اند، مقدار ذخیره برف محاسبه شده در مدل نیز کمتر از آستانه واسنجی شده است.

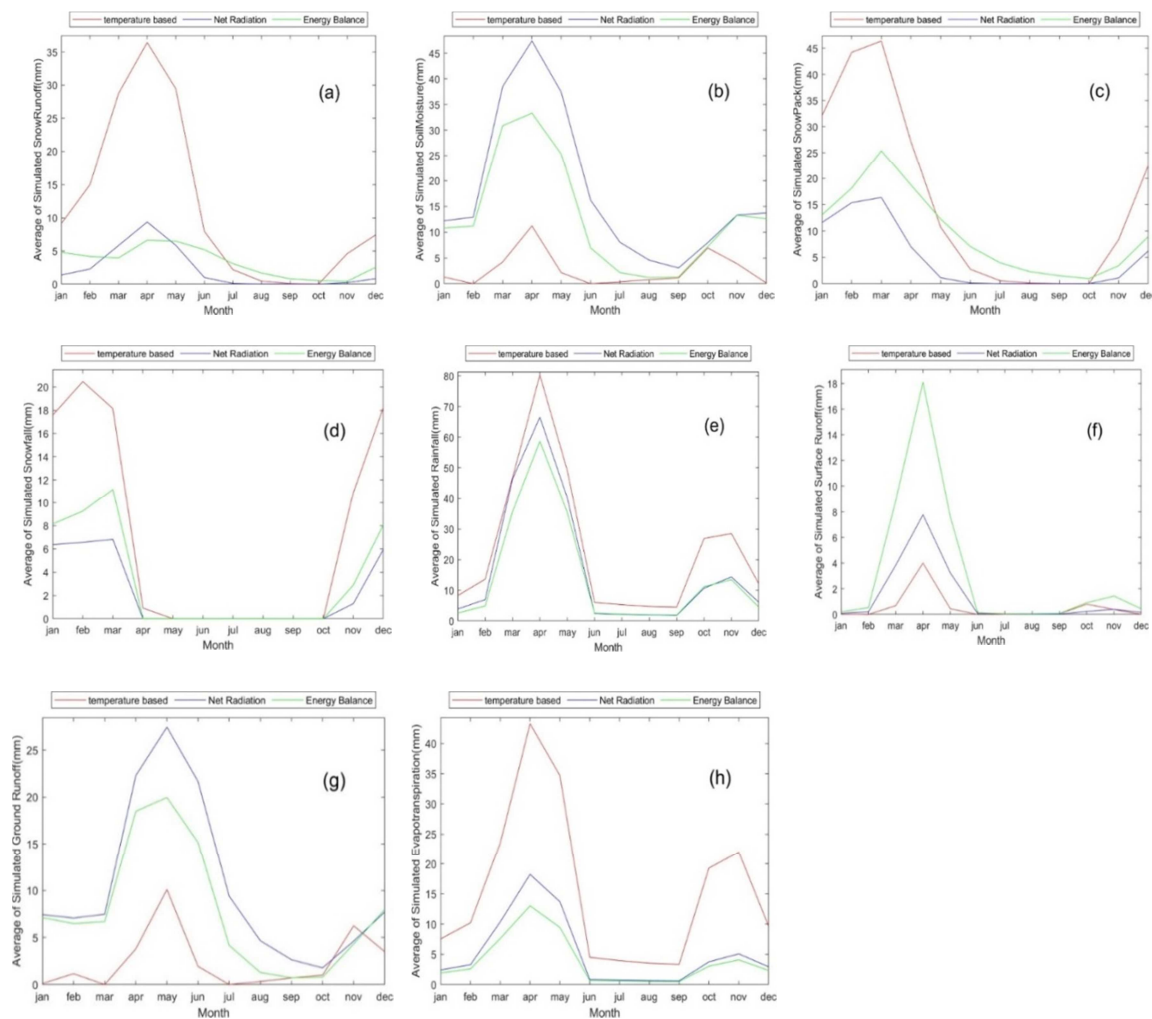
دلیل بروز خطای کم در این ماه‌ها، کم بودن پوشش برف در واقعیت است. از این رو و به دلیل میزان پوشش برف در محاسبات و در داده‌های سنجنش از دور، از آستانه انتخاب شده دور بوده و هر دو به صفر نزدیک هستند. همچنین وفق نتایج ارائه شده در این دو شکل، می‌توان نتیجه گرفت که مدل در تخمین پوشش برف در فصل‌های بهار و تابستان بیش‌تر دچار خطای بیش برآورد و در فصل‌های سرد، بیش‌تر دچار خطای کم برآورد بوده است. به منظور ارزیابی بهتر توانایی مدل در تشخیص و مدل‌سازی برف در شکل (۶) به مقایسه داده‌های میانگین ماهانه پوشش برف و میانگین ماهانه ذخیره برف در کل دوره مطالعه (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵) اقدام شده است. بر این اساس، شاخص همبستگی  $R^2$  برای سناریوهای ذوب برف دما-مینا، تشعشع خالص و بیلان انرژی، به ترتیب برابر با ۰/۷۲، ۰/۶۵ و ۰/۶۲ بوده که قابل قبول است. اما کاهش این شاخص از سناریوی دما-مینا تا سناریوی بیلان انرژی، بیانگر افزایش خطای تشخیص برف در سناریوی بیلان انرژی و تشعشع خالص نسبت به سناریوی دما-مینا است که دلیل آن را می‌توان تمرکز مدل بر روی بهینه‌سازی جریان سطحی خروجی حوضه دانست.



**Figure 6.** Comparison between snow accumulation (circle markers) and snow cover (line) during 2001 to 2015 estimated by temperature-based (top), net radiation (middle), and energy balance (down) models

### ۳-۳- ارزیابی اجزای مدل بیلان آب

به منظور ارزیابی اثرگذاری ماهوی سناریوهای مورد بررسی، در شکل (۷) اجزای اصلی مدل های بیلان توسعه یافته با یکدیگر مقایسه شده است. روند کلی هر سه سناریو در شبیه سازی اجزای مدل بیلان آب یکسان است و روند نسبی ماهانه نیز در همگی منطقی می نماید. این روند گویای عملکرد مناسب نتایج در هر سه مدل توسعه داده شده است. تنها نمودارهای رواناب ناشی از ذوب برف و ذخیره برف مقداری اختلاف رفتاری را نشان می دهند که دلیل آن تفاوت در روش مدل سازی برف در سه سناریوی مذکور است. از نظر مقادیر محاسباتی، مقادیر دو سناریوی تشعشع خالص و بیلان انرژی تشابه بیشتری به یکدیگر دارند. سناریوی دما-مبنا مقدار رطوبت خاک و جریان پایه را به شکل قابل توجهی کمتر از دو سناریوی تشعشع خالص و بیلان انرژی برآورد کرده و در مقابل مقدار تبخیرتقرق و رواناب ذوب برف را بیش تر از این دو سناریو لحاظ کرده است. همچنین سناریوی بیلان انرژی، مقدار رواناب سطحی را بیش تر از دو سناریوی دیگر برآورد نموده که به علت عدم وجود داده زمینی برای تبخیرتقرق واقعی و رطوبت خاک، امکان اعتبارسنجی منفرد این نتایج نیست.



**Figure 7.** Comparison between performances of temperature-based, net radiation, and energy balance scenarios (implementation method c): a) Surface runoff from snow melt, b) soil moisture, c) snow accumulation, d) snowfall, e) rainfall, f) surface runoff, g) base flow, h) actual evapotranspiration. Monthly mean values in 2001-2015 are presented

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با مقایسه سه سناریوی ذوب برف شامل یک سناریوی دما-مینا، یک سناریوی تشعشع خالص و یک سناریوی بیلان انرژی و وارد کردن این سه، به مدل بیلان ماهانه در مقیاس یک حوضه آبریز، سعی در بررسی دقت این سناریوها و اثرگذاری هر یک بر تخمین رواناب خروجی حوضه شده است. همچنین در فرایند اعتبارسنجی، علاوه بر مقایسه دبی مشاهداتی و محاسباتی رواناب کل حوضه، به بررسی پوشش برف نیز پرداخته شده است. با توجه به پژوهش‌های پیشین، سه روش مختلف ذوب برف به کار بسته شده و منجر به ایجاد سه نتیجه مختلف برای جزء برف و همچنین دیگر اجزای بیلان آب شده است. همچنین از آنجاکه بسیاری از داده‌های مورد نیاز برای استفاده از مدل‌های بیلان انرژی برای محاسبه ذوب برف به صورت اندازه‌گیری زمینی در دسترس نبوده‌اند، از داده‌های ماهواره‌ای و سنجش از دور استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل ذوب برف، علاوه بر استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده دبی جریان سطحی خروجی از حوضه، از داده‌های ماهواره‌ای پوشش برف و مقایسه با میزان تجمع برف محاسبه شده در سناریوها نیز بهره گرفته شده است.

نتایج نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول سناریوی دما-مینا و تشعشع خالص و عملکرد مناسب سناریوی بیلان انرژی در ذوب برف است. همچنین روش a به علت عدم توجه تابع هدف اولیه به جریان سطحی خروجی، نتایج مناسبی را تولید نمی‌کند. در مقابل، روش‌های b و c روش‌های قابل قبولی بوده و عموماً نتایج روش c کیفیت بالاتری را دارا بوده و شاخص‌های خطای مناسب‌تری دارد. نتایج در بخش خطای برف نشان از این دارد که خطای برف به ترتیب از سناریوی دما-مینا تا سناریوی بیلان انرژی، زیاد شده است. به عنوان جمع‌بندی نتایج می‌توان ذکر کرد که دقت کلی مدل بیلان در مدل‌های متکی بر بیلان انرژی بالاتر از روش دما-مینا بوده و همچنین در مقایسه بین دو سناریوی بیلان انرژی و تشعشع خالص شاهد عملکرد بهتر سناریوی بیلان انرژی هستیم. هرچند عملکرد مدل ذوب برف به تنهایی دچار خطاهایی شده است که ناشی از وجود تعارض بین دو تابع هدف استفاده شده در بهینه‌سازی پارامترهای مدل است. بنابراین سناریوی ذوب برف به روش بیلان انرژی عملکرد بیلان آب را ارتقا داده و عملکرد مدل تجمعی برف را تا حدی کاهش داده است.

محدودیت‌ها و فرض‌های پژوهش حاضر نیز باید مورد توجه قرار گیرد. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌ها که ارزیابی واقعی رژیم برفی منطقه مورد مطالعه را با چالش روبه‌رو می‌سازد، فقدان شبکه برف‌سنجی با تراکم مناسب در سطح حوضه آبریز است. همچنین فقدان اندازه‌گیری برخی از اطلاعات به صورت زمینی (مانند تشعشع دریافتی سطح زمین و رطوبت خاک)، عدم دسترسی به برخی از اطلاعات با گام زمانی مناسب و تعداد محدود ایستگاه‌های هواشناسی در سطح حوزه آبریز، از جمله محدودیت‌هایی است که باعث به کارگیری فرضیات ساده‌کننده در پژوهش حاضر شده است. این فرضیات شامل استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای پوشش برف ماهانه به جای مشاهدات زمینی و فرض آن‌ها به عنوان اطلاعات شاهد، استفاده از برخی داده‌های میانگین ماهانه و هفتگی و فرض آن‌ها به عنوان داده در گام زمانی کوچک‌تر، عدم لحاظ دقیق بیلان آب زیرزمینی و اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در مدل توسعه داده شده به دلیل مرتفع بودن بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه، فرض یکنواختی بارش باران (مقدار متوسط ماهانه) در طول یک ماه در هنگام محاسبه مقدار ذوب برف، و فرض برابری مقدار میانگین ماهانه و میانگین متوالی داده‌های هشت روزه پوشش گیاهی درخت (LAI) هستند.

همچنین در پژوهش حاضر بهبود هم‌زمان نتایج جریان سطحی خروجی و پوشش برف محقق نشده است. اگر مدل بهینه‌سازی به صورت دو هدفه به کار برده شود، می‌توان انتظار داشت تا بهبود هم‌زمان عملکرد این دو رخ دهد. پیشنهاد



می شود تا در مطالعات آتی استفاده از سناریوهای ذوب برف دما-مبنا با پهنه بندی ارتفاعی حوضه و بررسی تأثیر آن در تدقیق عملکرد مدل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از روش بیلان انرژی برای محاسبه ذوب برف و تبخیر تعرق به صورت هم زمان می تواند به تقویت ساختار فیزیکی مدل شود. لازم به ذکر است که هر یک از فرضیات فوق، می تواند محور توسعه و پژوهش آتی در این خصوص (با توجه به خصوصیات فیزیکی مناطق مختلف) باشد.

## ۵- پی نوشتها

1. JULES investigation model
2. Data Assimilation
3. Optical
4. Active & passive microwaves
5. Inverse Distance Wiegthing (IDW)
6. Cross validation

## ۶- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷- منابع

- Chen, X., Long, D., Hong, Y., Zeng, C., & Yan, D. (2017). Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two stage calibration strategy with GRACE and multisource data: How snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin. *Water Resources Research*, 53(3), 2431-2466.
- Cox, G. M., Gibbons, J. M., Wood, A. T. A., Craigon, J., Ramsden, S. J., & Crout, N. M. J. (2006). Towards the systematic simplification of mechanistic models. *Ecological Modelling*, 198 (1-2), 240-246.
- Daly, C., Neilson, R.P., & Phillips, D.L. (1994). A statistical topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 140-158.
- Ebrahimi, R., Hamzeh, S., & Marofi, S. (2016). Modeling the snow cover and snowmelt runoff using a combination of SRM hydrological model and satellite imagery. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 6(3), 23, 66-77 (In Persian).
- Ezzati, M., Shokoochi Langeroodi, A., Singh, V. P., & Noori, M. (2018). Investigating the Trend of Temperature and Rainfall and its Effects on the Taleghan Dam Water Resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(4), 705-716, doi: 10.22059/ijswr.2017.210883.667493, (In Persian).
- Fattahi, A., Delavar, M., & Ghasemi, A. (2011). Simulation of snowmelt runoff in mountainous basins using SRM Model-case study of Bazoft Basin. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 20(23), 129-141.
- Franz, K. J., & Karsten, L. R. (2013). Calibration of a distributed snow model using MODIS snow covered area data. *Journal of hydrology*, 494, 160-175.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Guo, Sh., Chen, H., Zhang, H., Xiong, L., Liu, P., Pang, B., Wang, G., & Wang, Y. (2005). A Semi-Distributed Monthly Water Balance Model and its Application in a Climate Change Impact Study in the Middle and Lower Yellow River Basin. *Water International*, 30(2), 250-260.

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Karimi, H., Zeinivand, H., Haghizadeh, A., Tahmasebipour, N., & Miryaghoubzadeh, M. (2017). Snow cover simulation and snow melt runoff in Haro-Dehno Basin in Lorestan Province. *Journal of Watershed Management Research*, 8(16), 77-89.
- Kustas, W. P., Rango, A., & Uijlenhoet, R. (1994). A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model. *Water Resources Research*, 30(5), 1515-1527.
- Largeron, C., Dumont, M., Morin, S., Boone, A., Lafaysse, M., Metref, S., Cosme, E., Jonas, T., Winstral, A., & Margulis, S.A. (2020). Toward Snow Cover Estimation in Mountainous Areas Using Modern Data Assimilation Methods: A Review. *Frontiers in Earth Science*, 8, 325. doi: 10.3389/feart.2020.00325 .
- Magnusson, J., Wever, N., Essery, R., Helbig, N., Winstral, A., & Jonas, T. (2015). Evaluating snow models with varying process representations for hydrological applications. *Water Resources Research*, 51(4), 2707-2723.
- McCabe, G.J., & Markstrom, S.L. (2007). A monthly water balance model driven by a graphical user interface. U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nemri, S., & Kinnard, Ch. (2020). Comparing calibration strategies of a conceptual snow hydrology model and their impact on model performance and parameter identifiability. *Journal of Hydrology*, 582, 124474.
- Nester, T., Kirnbauer, R., Parajka, J., & Blöschl, G. (2012). Evaluating the snow component of a flood forecasting model. *Hydrology Research*, 43(6), 762-779.
- Nouri, A., Vafakhah, M., & Alavipanah, S. K. (2016). Estimation of snowmelt-runoff using SRM model in Taleghan watershed. *Iranian Water Researches Journal*, 10(3), 163-167 (In Persian).
- Parajka, J., & Blöschl, G. (2008). The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. *Journal of hydrology*, 358(3-4), 240-258.
- Riboust, P., Thirel, G., Le Moine, N., & Ribstein, P. (2019). Revisiting a simple degree-day model for integrating satellite data: implementation of SWE-SCA hystereses. *Journal of hydrology and hydromechanics*, 67(1), 70-81.
- Shahraki Mojahed, R., Alizadeh, A., Sanaei-Nejad, S. H., Faridhosseini, A., Zarrin, A. (2022). Modeling snowmelt runoff by SRM model and estimation of degree-day factor parameter using net radiation satellite images (Case study: Kardeh Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. doi: 10.22067/geoeh.2022.78658.1280 (In Persian).
- Taheri M, Shamsi Anboohi, M., Mousavi, R., & Nasserli, M. (2022). Hybrid Global Gridded Snow Products and Conceptual Simulations of Distributed Snow Budget: Evaluation of Different Scenarios in a Mountainous Watershed. *Frontiers of Earth Science*, 14, 1-16.
- Tayefeh Neskili, N., Zahraie, B., & Saghafian, B. (2017). Coupling Snow Accumulation and Melt Rate Modules of Monthly Water Balance Models with Jazim Monthly Water Balance Model. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), 2348-2368.
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers). (1998). Engineering and Design-Runoff from Snowmelt. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-21406/toc.html>.
- Zandi, O., Zahraie, B., Nasserli, M., & Behrangi, A. (2022). Stacking machine learning models versus a locally weighted linear model to generate high-resolution monthly precipitation over a topographically complex area. *Atmospheric Research*, 272, 623-641.
- Zandi, O., Zahraie, B., & Nasserli, M. (2020). Spatial estimation of precipitation based on geographical information and PRISM model in Great Sefidrud Basin. *Iran Water Resources Research*, 16(4), 268-283.