



## Investigation of the Effect of Modified Snow Model on Parameters and the Snowmelt Improving Runoff Simulation by the SWAT Model in Zarrineh-rud River Basin

M. Atakhorami<sup>1</sup> and S. Sima<sup>2\*</sup>

### Abstract

Monitoring snow cover and estimating the resulting snowmelt runoff in mountain areas is highly important. There are mainly two approaches to improve the performance of snowmelt runoff in rainfall-runoff models; improving the snow parameters through observations and modifying the snowmelt module. This study investigates the impact of these approaches on the accuracy of snowmelt runoff using the SWAT model in the mountain basin of Zarrineh-rud River, northwest of Iran. Firstly, the snow parameters of SWAT were extracted through the MODIS daily snow cover products and the in-situ snow depth data and were replaced in the model. Secondly, the UBCWM energy balance model was substituted for the original SWAT snowmelt module, which was based on the degree-day method. Results showed that the baseline SWAT model underestimates the runoff at the upstream and downstream hydrometric stations. However, the performance of the model with the modified snow parameters improves at the two stations by 6% and 14% for Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and 35% and 14% for Kling-Gupta Efficiency (KGE), respectively. On the contrary, using UBCWM in SWAT gives weaker simulations for runoffs at the two stations due to underestimating the peaks and overestimating the snowmelt duration. This study's findings can help achieving more accurate runoff estimations in mountain basins, especially during peak runoffs.

**Keywords:** Rainfall-Runoff Model, Snow Cover Area, UBCWM Energy Balance Model, Snow Depletion Curve (SDC).

Received: May 10, 2023

Accepted: July 23, 2023

## ارزیابی اثر اصلاح پارامترهای برف و مدل ذوب برف در بهبود شبیه‌سازی رواناب مدل SWAT در حوضه زربینه‌رود

میثم عطاخرمی<sup>۱</sup> و سمیه سیما<sup>۲\*</sup>

### چکیده

پایش سطح برف و برآورد میزان رواناب حاصل از ذوب برف در مناطق مرتفع و کوهستانی حائز اهمیت است. رویکردهای موجود برای بهبود عملکرد مدل‌های بارش-رواناب با تمرکز بر مدل‌سازی رواناب ذوب برف، شامل بهبود پارامترهای برف از طریق داده‌های مشاهداتی و ارتقای مدل مفهومی ذوب برف هستند. در این تحقیق با هدف بهبود برآورد مقدار ذوب برف در مدل SWAT، در حوضه کوهستانی زربینه‌رود اثر این دو رویکرد در بهبود مدل بررسی می‌شود. در بخش اول دو پارامتر برف، به کمک محصولات روزانه سطح برف سنجنده MODIS و همچنین مقادیر عمق برف اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های برف‌سنجی، برآورد و در مدل پایه جایگزین شد. در بخش دوم نیز مدل بیان انرژی UBCWM جایگزین مدل درجه روز شده و اثر آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مدل پایه در شبیه‌سازی رواناب حوضه در دو ایستگاه صفاخانه و نظام‌آباد نشان داد که به‌طور کلی میزان رواناب دست پایین برآورد شده است. نتایج همچنین نشان داد که مدل با مقادیر اصلاح شده پارامترهای برف منجر به بهبود عملکرد مدل پایه در دو ایستگاه مذکور به ترتیب به میزان ۶ و ۱۴ درصد از نظر شاخص نش-ساتکلیف و به میزان ۳۵ و ۱۴ درصد در مقدار KGE، شده است. درحالی‌که مدل UBCWM در شبیه‌سازی ضعیف عمل کرده و مقادیر اوج سیلاب را کمتر از مقدار واقعی و طول بازه ذوب برف را بیشتر پیش‌بینی نموده است. استفاده از نتایج این تحقیق می‌تواند به برآورد دقیق‌تر رواناب به‌ویژه در مواقع سیلابی در حوضه‌های کوهستانی منجر شود.

**کلمات کلیدی:** مدل بارش-رواناب، سطح پوشش برف، مدل بیان انرژی UBCWM، منحنی کاهش برف (SDC).

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۱

1- Ph.D. Student of Water Resource Engineering and Management, College of Civil Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Former Assistant Professor, Water Engineering Group, College of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: s.sima@modares.ac.ir

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2023.176080](https://doi.org/10.22034/IWRR.2023.176080)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار سابق گروه منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



(et al., 2005). مدل SWAT به طور گسترده در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و در اکثر حوضه‌ها با مقیاس‌های متفاوت نتایج خوبی ارائه نموده است؛ اما برخی مطالعات در حوضه‌های کوهستانی عملکرد مدل را ضعیف گزارش نموده‌اند (Arnold et al., 1999). از آنجایی که اصلی‌ترین منبع رواناب در حوضه‌های کوهستانی رواناب حاصل از ذوب برف است (Liu et al., 2020)، لذا بررسی شبیه‌سازی ذوب برف حائز اهمیت است.

از میان مطالعات انجام شده در خصوص عملکرد مدل بارش رواناب SWAT، در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است که عملکرد مدل در رواناب‌های اوج ضعیف است و این موضوع به دلیل عملکرد نامطلوب این مدل در برآورد ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی است که از جمله می‌توان به (Tolson and Sloemaker, 2004)، (Rostamian et al., 2008) و (Zare et al., 2022) اشاره کرد. از طرفی (Infante, 2014) در مطالعات خود نشان داد که مدل‌های هیدرولوژیکی همچون مدل SWAT که با استفاده از روش‌های ساده‌ای نظیر درجه-روز تجمع و ذوب برف را شبیه‌سازی می‌کنند به دلیل اینکه صرفاً از دمای هوا برای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند از عدم قطعیت بالاتری در برآورد ذوب برف در قیاس با سایر مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی برخوردارند. در همین راستا، (Liu et al., 2020) علت ضعف بخش ذوب برف مدل را SWAT استفاده از تابع خطی بر مبنای دمای هوا و صرف‌نظر از سایر عوامل تأثیرگذار دانستند، در حالی که در حوضه‌های مرتفع با اقلیم سرد و بارش‌های پراکنده، فرآیند ذوب برف، به‌جز دمای هوا تابع توپوگرافی، تغییرات اقلیمی و تغییرات تشعشع خورشید نیز است. جمع‌بندی این مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد مدل SWAT در برآورد رواناب‌های فصل بهار، در حوضه‌های کوهستانی و سرد به علت لحاظ نکردن اثر سایر متغیرها به‌جز دمای هوا و استفاده از روش ساده درجه-روز در فرآیند ذوب برف ضعیف است.

به همین جهت مطالعات متعددی با جایگزینی روش‌های بیلان انرژی به‌جای روش محاسبه ذوب برف مدل SWAT تلاش در جهت بهبود عملکرد مدل در برآورد رواناب حاصل از ذوب برف، داشته‌اند. Morid et al. (2004) در مطالعه خود دو مدل برآورد ذوب برف SRM و Snow17 که به ترتیب بر مبنای روش‌های دمای هوا-تشعشع خورشیدی و بیلان انرژی هستند و همچنین مدل ذوب برفی مبتنی بر فاکتور شاخص دما را به مدل SWAT version 97 اضافه کردند و نتایج آن‌ها را با هم مقایسه نمودند. نتایج این تحقیق نشان از برتری مدل بیلان انرژی Snow17 نسبت به سه روش دیگر داشت. همچنین،

یکی از مهم‌ترین منابع آب در دسترس در مناطق خشک و نیمه‌خشک کوهستانی در سراسر جهان برف است (Schulz and De Jong, 2004). در تمام فصول سال بیش از ۴۴ درصد از سطح کره زمین زیر پوشش برف قرار دارد (Schmugge et al., 2002). همچنین، در مناطق مرتفع و کوهستانی، ذوب برف بیشترین سهم را در حجم رواناب سالانه دارد (Wang and Xie, 2009). مطالعه برف و رواناب حاصل از ذوب برف در برآورد حجم آب ذخیره سدها، آب‌های زیرزمینی و تأمین آب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت زیادی برخوردار است. از این جهت پایش و اندازه‌گیری پوشش برف و پیش‌بینی مقدار رواناب حاصل از ذوب برف به کمک مدل‌های ذوب برف در برنامه‌ریزی منابع آب حوضه ضروری است.

به‌طور کلی مدل‌های متعددی برای برآورد رواناب حاصل از ذوب برف وجود دارد (Essery et al., 2013)، این مدل‌ها یا به‌طور مستقل میزان رواناب حاصل از ذوب برف را محاسبه می‌نمایند و یا در قالب یک زیر مدل در یک مدل بارش-رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های مستقل ذوب برف مدل‌هایی هستند که به کمک اطلاعات از قبیل دمای هوا، دمای آستانه ذوب برف و غیره مقدار رواناب حاصل از ذوب برف را به‌طور مستقل برآورد می‌کنند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل SRM<sup>۱</sup>، UEB<sup>۲</sup> و غیره اشاره نمود. در مقابل مدل‌های ذوب برف وابسته به مدل‌های بارش-رواناب معمولاً به کمک روابطی با سایر متغیرهای هیدرولوژیکی، مقدار ذوب برف را محاسبه می‌کنند.

مدل‌های بارش-رواناب مدل‌هایی هستند که می‌توانند درک بهتری از پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبریز در اثر تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی و پوشش سطح برف که به صورت تدریجی و طی زمان رخ می‌دهند، ارائه کنند. در انتخاب مدل مناسب، توجه به قابلیت‌ها و ساختار مدل در لحاظ کردن جزئیات فیزیکی، سطح نیازمندی به داده و مقیاس مکانی و زمانی حائز اهمیت است. محققان مختلف مدل SWAT را به عنوان ابزاری قوی برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز به‌ویژه در مناطق خشک برای ارزیابی تأثیر جنبه‌های مدیریتی بالادستی در مورد مدیریت فرسایش، آب و زمین، معرفی نمودند که البته به سطح دانش و تجربه بالا برای اجرا نیاز دارد که از جمله آنها می‌توان به (Goodarzi et al., 2012)، (Gayathri et al., 2015) و (Pandi et al., 2021) اشاره کرد.

مدل SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی و فیزیکی است که چرخه هیدرولوژیکی حوضه را به‌طور پیوسته شبیه‌سازی می‌کند (Neitsch

و استخراج نقشه عمق برف از مقادیر ایستگاه‌های برف‌سنجی با استفاده از روش‌های درون‌یابی، پارامترهای حساس زیر مدل برف SWAT از جمله SNO50COV را برای حوضه‌ای در کشور کره جنوبی برآورد نمودند و نشان دادند که این روش در مقایسه با کالیبراسیون اتوماتیک پارامترهای برف در مدل، سبب بهبود قابل توجه عملکرد مدل می‌شود. (Liu et al. (2020) پس از شبیه‌سازی حوضه‌ای در شمال کشور چین با مدل SWAT، تغییراتی در مازول برف کد اصلی مدل، در خصوص محاسبه دو پارامتر SMFMX و SMFMN ایجاد نمودند این دو شاخص به ترتیب حداکثر و حداقل میزان ذوب ماکسیمم در ۲۱ ژوئن و ۲۱ دسامبر را در مدل SWAT بیان می‌کنند ایشان بازه زمانی محاسبه این دو پارامتر را تغییر دادند که نتایج نشان از بهبود عملکرد مدل در پیش‌بینی سالانه مقدار رواناب حاصل از ذوب برف با افزایش میزان نش-ساتکلیف به بیش از ۰/۸ را داشته است. (Zhao et al. (2022) نیز با تمرکز بر این دو پارامتر، رابطه محاسبه این دو فاکتور را با تحلیل اطلاعات برف‌سنجی منطقه مطالعاتی (حوضه‌ای در چین)، به ۸ مارس برای SMFMX و ۱۶ آوریل برای SMFMN تغییر دادند و رابطه جدیدی توسعه دادند. علاوه بر این ایشان با فرض تخمین صحیح مدل از پوشش سطح برف، متغیر تابش خورشیدی را به روش شاخص دما مدل SWAT اضافه نمودند تا پس از برآورد مدل از پوشش سطح برف مقدار ذوب برف بیشتری برآورد شود. نتایج این تحقیق نشان از بهبود عملکرد مدل در تمام شاخص‌های عملکردی در هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی داشته است.

(Grusson et al. (2015) پس از مدل‌سازی روزانه دبی جریان با دسته‌بندی ارتفاعی حوضه‌ای در فرانسه، به اعمال حد آستانه ۱۵ میلی‌متر برای آب معادل برف در زیرحوضه‌های مدل کالیبره شده، تصویری متشکل از نقاط کمتر از ۱۵ میلی‌متر و نقاط بیشتر از این مقدار استخراج نمود که شباهت قابل قبولی با تصاویر پوشش سطح برف MODIS داشته و از مقایسه این تصاویر در برخی از روزهای شبیه‌سازی نشان داد که احتمالاً آب معادل برف در برخی از زیرحوضه‌های بالادست بیش برآورد و در پایین‌دست، کم برآورد شده است. در پژوهشی در ترکیه برای بهبود مدل‌سازی رواناب، با توجه به مقادیر آب معادل ذوب برف که مدل برای خروجی هر HRU ارائه می‌دهد و مقادیر سطح پوشش برف روزانه سنجنده MODIS و برقراری رابطه بین این دو، مقادیر پارامترهای برف را برای حوضه محاسبه نمودند و در مدل لحاظ کردند و سپس مدل را با استفاده از سایر پارامترهای هیدرولوژیکی کالیبره نمودند که منجر به افزایش دقت شبیه‌سازی شد (Peker and Sorman, 2021). همچنین،

(Fontaine et al. (2002) در تحقیق خود در شبیه‌سازی حوضه وایومینگ در امریکا به کمک مدل SWAT، با اصلاح بخش ذوب برف پایه مدل و اضافه کردن یکسری پارامترها از جمله نرخ تغییرات دما و بارش با ارتفاع به مدل ذوب برف SWAT، عملکرد مدل را بهبود دادند. از جمله (Debele et al. (2009) با اضافه نمودن روش بیلان انرژی به مدل SWAT، نتایج رواناب حاصله را با مدل اصلی برای سه حوضه آبریز متفاوت، در دو قاره آمریکای شمالی و آسیا مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که عملکرد روش شاخص دما علیرغم سادگی (با شاخص نش-ساتکلیف<sup>۳</sup> بین ۰/۴۹ تا ۰/۷۳) از روش بیلان انرژی (با شاخص نش-ساتکلیف بین ۰/۳۳ تا ۰/۵۹) کمی بهتر بوده است. نتایج مشابهی در خصوص مقایسه روش‌های ذوب برف بر پایه بیلان انرژی در مقایسه با روش موجود در مدل اصلی SWAT مبنی بر کاهش جزئی ضریب NSE برای مدل بیلان انرژی نسبت به روش شاخص دما گزارش شده است که از جمله می‌توان به Meng et al. (2015) اشاره کرد. (Fuka et al. (2012) نیز عملکرد مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب با تمرکز بر مقایسه دو مدل بیلان انرژی و شاخص دما برای حوضه کوچکی در ایالت آیداهوی امریکا مورد ارزیابی قرار دادند. در این بررسی بیان شد که با وجود برتری مدل شاخص دما در مقایسه با مدل بیلان انرژی از نظر شاخص نش-ساتکلیف، عملکرد مدل بیلان انرژی با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده آب معادل برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی بهتر بوده است. تلفیق مدل بیلان انرژی و SN<sup>۴</sup>THERM با مدل SWAT در مطالعه (Infante (2014) بر روی حوضه‌ای در ایالات متحده نشان داد که مدل جدید SWAT-SNT، مقدار RMSE را ۲۴/۵٪ کاهش داده و مقادیر R<sup>2</sup> و NSE را به ترتیب ۱۴٪ و ۲۱٪ درصد افزایش داده است. (Zare et al. (2022) با هدف بهبود عملکرد ذوب برف مدل SWAT، مدل بیلان انرژی<sup>۵</sup> SSRB که دمای سطح خاک در نظر می‌گیرد را به این مدل اضافه نمودند و بهبود عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب خروجی حوضه را (افزایش معیار ضریب نش-ساتکلیف بیش از ۰/۷) گزارش نمودند.

برخی محققین برای بهبود برآورد ذوب برف با ایجاد تغییراتی در مدل به صورت محلی، نتایج شبیه‌سازی را بهبود داده‌اند. (Tobin et al. (2020) حوضه‌ای در ایالت متحده توسط SWAT مدل‌سازی نمود و پس از شناسایی پارامترهای حساس، مقدار واقعی برخی از پارامترها از جمله CANMAX را با توجه به محصول LAI سنجنده MODIS و یک رابطه تجربی به دست آورد و در مدل جایگزین نمود که سبب بهبود نتایج مدل شده است. (Kim et al. (2015) به دنبال ارتقا عملکرد روش فعلی مدل SWAT، در مدل‌سازی ذوب برف به کمک تصاویر ماهواره‌ای پوشش سطح برف

MODIS و با استفاده از سه روش ۱- شاخص NDSI، ۲- طبقه‌بندی نظارت‌نشده و ۳- طبقه‌بندی نظارت‌شده، مقایسه شد که نتایج، برتری روش طبقه‌بندی نظارت‌شده را نسبت به دو روش دیگر نشان داد. همچنین نتایج این تحقیق اهمیت ارتباط بین میانگین دمای فصل سرد و پوشش سطح برف را نشان داد؛ به این صورت که در سال‌هایی که میانگین دمای فصل سرد کمتر بوده است پوشش سطح برف در بهار همان سال بیشتر از سال‌های دیگر گزارش شده است (Mirmousavi et al., 2014).

رودخانه زرینه‌رود به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آب ورودی به دریاچه ارومیه (Yazdandoost et al., 2020)، در مطالعات متعددی با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شده است که عموماً در این مطالعات مدل در شبیه‌سازی حوضه زرینه‌رود در دوره‌های مختلف زمانی، دقت قابل قبول یا مناسبی داشته است (Golzari et al., 2020; Ghasemfalaki et al., 2020; Mahmudi et al., 2021; Rahvareh et al., 2023). با این حال عدم قطعیت‌هایی در این مدل در خصوص داده‌های ورودی و پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی وجود دارد که سبب شده مدل در شبیه‌سازی اوج سیلاب بهار عملکرد ضعیفی داشته باشد (Rahvareh et al., 2023). بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی اصلی‌ترین دلایل کم برآورد رواناب در زمان‌های اوج، ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه، بخصوص در ایستگاه‌های بالادستی است (Golzari et al., 2020).

با توجه به موارد بیان شده در خصوص ضعف مدل در تخمین آب معادل برف در برخی حوضه‌ها، در پژوهش حاضر بهبود عملکرد مدل بارش رواناب SWAT، با استفاده از رویکرد برآورد پارامترهای زیر مدل برف بر مبنای داده‌های واقعی در حوضه آبریز مورد بررسی قرار گرفت و برای برآورد پارامترهای برف از تصاویر پوشش سطح برف MODIS و داده‌های اندازه‌گیری شده عمق برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی استفاده شد همچنین برای بهبود روش محاسبه ذوب برف مدل، تغییراتی در کد اصلی مدل صورت گرفته و مدل بیلان انرژی UBCWMy، به دلیل اینکه در فرآیند محاسبه ذوب برف، تبادل انرژی سطح و اتمسفر را لحاظ می‌کند که نسبت به زیرمدل ذوب برف مدل SWAT که با روش درجه روز کار می‌کند کامل‌تر است، مورد استفاده قرار گرفت و اثر آن روی شبیه‌سازی رواناب حوضه تحلیل شد.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زرینه‌رود در شمال غربی ایران و در جنوب شرقی دریاچه ارومیه واقع شده است (شکل ۱). رودخانه زرینه‌رود به عنوان رودخانه

(Taia et al., 2023) با مدل‌سازی حوضه‌ای در مراکش به صورت روزانه در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵، پارامترهای برف مدل SWAT را یکبار به صورت یکسان در تمام زیرحوضه‌ها (مانند مدل‌های یکپارچه<sup>۴</sup>) و یکبار به مانند مدل‌های توزیعی، با مقادیر متفاوت هر پارامتر در هر زیر حوضه، کالیبره کرده و نتایج به‌دست آمده از برآورد آب معادل برف در هر دو روش را با تصاویر پوشش سطح برف MODIS در چند روز مقایسه نمود. در نهایت نتایج به دست آمده از کالیبراسیون با پارامترهای برف توزیعی در زیر حوضه‌ها تطبیق بیشتری با تصاویر ماهواره‌ای نشان دادند. این در حالی است که در برخی زیر حوضه‌ها به‌کلی برآورد سطح پوشش برف در هر دو روش کالیبراسیون با تصاویر پوشش برف واقعی تفاوت زیادی داشته و مقدار NSE در این زیر حوضه‌ها منفی گزارش شده است.

جمع‌بندی مرور مطالعات نشان می‌دهد که به طور کلی دو رویکرد (۱) ارتقای زیر مدل شبیه‌سازی رواناب برف SWAT و (۲) بهبود پارامترهای برف در زیر مدل مذکور با استفاده از داده‌های سنجش از دور و یا زمینی مدنظر محققین قرار گرفته است. در رویکرد اول تمرکز روی کاهش عدم قطعیت مفهومی مدل ذوب برف با بهبود آن از طریق اضافه کردن بخشی (مثل تابش خورشیدی) یا کل شارهای معادله بیلان انرژی بوده، در حالیکه در رویکرد دوم روی کاهش عدم قطعیت پارامترهای مدل با تدقیق پارامترهای ذوب برف از روش‌های مکمل متمرکز بوده است. علاوه بر این در حوضه‌های مختلف به کارگیری هریک از این رویکردها نتایج متفاوتی به دنبال داشته است. اگرچه در عمده مطالعات ذکر شده بهبود نتایج شبیه‌سازی رواناب گزارش شده است، در برخی حوضه‌های کوهستانی نیز علیرغم انتظار نتایج مطلوب نبوده است.

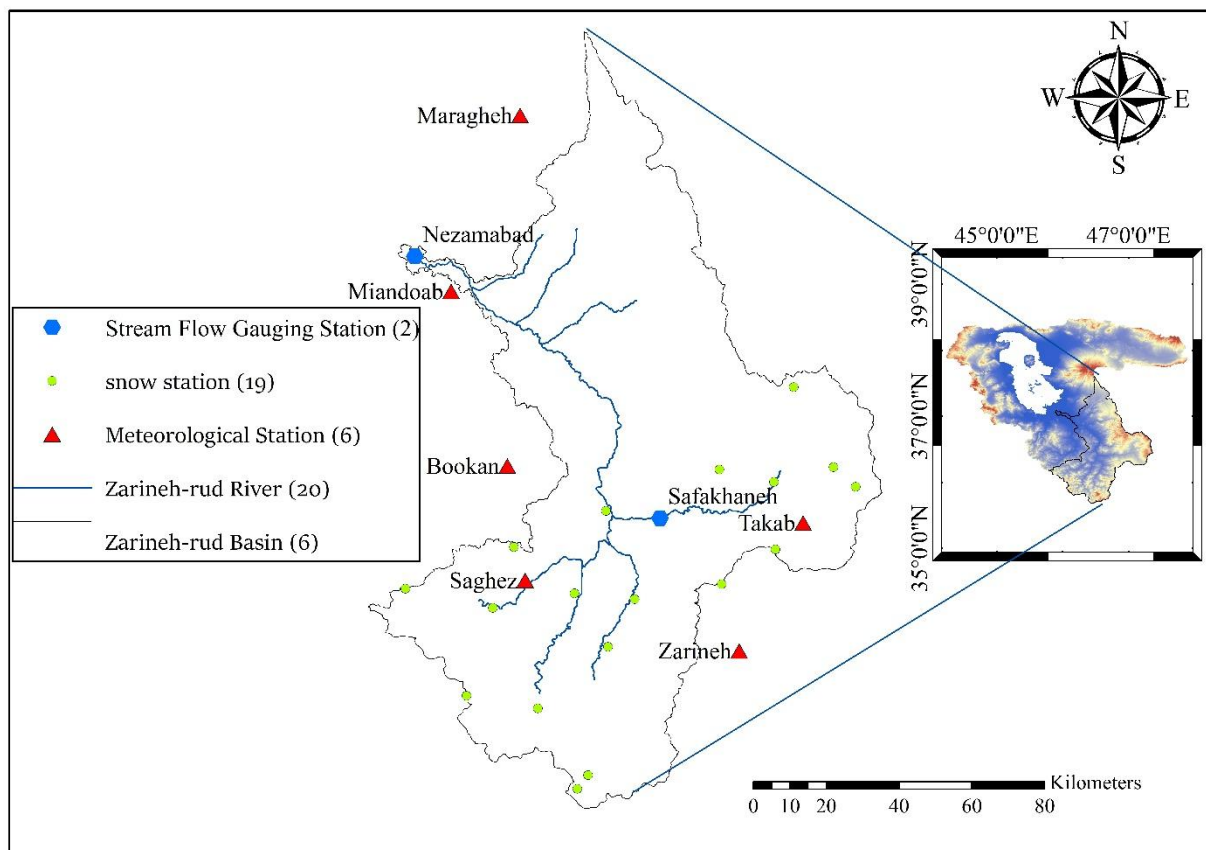
در حوضه‌های آبریز بزرگ و کوهستانی کشور نظیر حوضه آبریز دریاچه ارومیه که رواناب‌ها، عمدتاً وابسته به ذوب برف در بهار هستند، مطالعه بر روی برف و رواناب حاصل از آن، چه از دیدگاه مدیریت منابع آب و چه از دیدگاه کنترل سیلاب، حائز اهمیت است (Rahmani and Dansh-Yazdi, 2022). در همین راستا مطالعات مختلفی در مورد پایش تغییرات پوشش برف در این نواحی انجام شده است. از جمله در پژوهشی در شمال غرب ایران، برای بررسی پوشش سطح برف از تصاویر سنجنده NOAA-AVHRR برای دوره سرد سال (نوامبر- مارس) طی دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۸۸ با فواصل زمانی ۱۵ روزه استفاده کردند و نشان دادند که روند معنی‌داری در سطح برف دیده نمی‌شود (Fattahi et al., 2014). در بررسی دیگری تغییرات پوشش سطح برف شمال غرب ایران، به کمک تصاویر سنجنده

### ۳- روش تحقیق

گام‌های اصلی در این پژوهش عبارت‌اند از:

- تنظیم، اجرا، تحلیل حساسیت، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل پایه؛
  - استخراج عمق برف حوضه با داده‌های عمق برف؛
  - پایش سطح برف حوضه با داده‌های ماهواره‌ای و اعتبارسنجی آن؛
  - استخراج پارامترهای برف مدل بر مبنای داده‌های ماهواره‌ای و مشاهداتی؛
  - بررسی عملکرد مدل با اعمال پارامترهای برف اصلاح شده؛
  - توسعه و جایگزینی مدل بیلان انرژی UBCWM در مدل؛
  - بررسی عملکرد مدل با اعمال پارامترهای برف و مدل ذوب برف اصلاح شده
- در ادامه گام‌های مذکور تشریح می‌گردد.

اصلی حوضه، بیش از ۴۰ درصد آب ورودی به دریاچه ارومیه را تأمین می‌کند (Ebrahime et al., 2012) و از این نظر حوضه آبریز زرينه‌رود از مهم‌ترین زیر حوضه‌های حوضه ارومیه به شمار می‌رود. این حوضه آبریز بین عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ} 30'$  تا  $37^{\circ} 35'$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $45^{\circ} 45'$  تا  $47^{\circ} 15'$  شرقی قرار دارد و مساحت آن حدود  $12025$  کیلومترمربع است. حوضه زرينه‌رود دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد و کوهستانی است میزان بارندگی متوسط سالانه  $390$  میلی‌متر است و همچنین از لحاظ وضعیت بارش برف، سهم زیادی از بارش‌های سالانه، در فصل‌های پاییز و زمستان، بخصوص بین ماه‌های میلادی نوامبر تا آوریل به صورت برف ریزش می‌کند (Ebrahime et al., 2012). سد بوکان (شهید کاظمی) تنها سد این حوضه است که گنجایش مخزن آن  $760$  میلیون مترمکعب است که حجم قابل برداشت این سد  $654$  میلیون مترمکعب است و این سد حجمی معادل  $110$  میلیون مترمکعب بر سال برای مصارف شرب و کشاورزی تأمین می‌نماید (Ahmadzadeh et al., 2016).



**Fig. 1- Location of the Zarrineh-rud River Basin and the meteorological, snow, and hydrometric stations**  
 شکل ۱- حوضه زرينه‌رود به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، برف‌سنجی و هیدرومتری

### ۳-۱- مدل SWAT

در معادله فوق  $sno_{cov}$  قسمتی از سطح پوشیده شده از برف در هر HRU، SNO مقدار عمق حداقل برف در یک روز معین،  $sno_{100}$  عمق حداقل برف در زمان پوشش ۱۰۰ درصدی حوضه،  $COV_1$  و  $COV_2$  ضرایبی برای تعیین شکل منحنی می‌باشند. با حل معادله فوق به کمک ۲ نقطه معلوم: ۱- پوشش ۹۵ درصدی در مقابل ۰/۹۵ مقدار  $sno_{100}$  ۲- پوشش ۵۰ درصدی (پارامتر  $sno_{50COV}$ ) در مقابل کسری معین از  $sno_{100}$ ، ضرایب  $COV_1$  و  $COV_2$  محاسبه می‌گردد (Neitsch et al., 2005).

### ۳-۲- مدل‌سازی حوضه با مدل SWAT

در این تحقیق مدل‌سازی رواناب حوضه آبریز زرینه‌رود با گام زمانی ماهانه طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار ArcSWAT 2012 صورت گرفت. داده‌های هواشناسی و فیزیوگرافی حوضه به شرح جدول ۱ از منابع مربوطه اخذ و در مدل استفاده شد. ابتدا با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی، حوضه زرینه‌رود به ۱۸ زیر حوضه تقسیم شد. سپس از روی نقشه کلاسه‌بندی شیب حوضه و نقشه کاربری اراضی و جنس خاک و همچنین شکستن کاربری تحت آبیاری به کاربری‌های گندم و یونجه و همچنین کشت باغی که قالب محصولات منطقه را تشکیل می‌دهند، تعداد ۲۱۱ (HRU) برای کل حوضه به دست آمد. همچنین از روش منحنی SCS برای محاسبه رواناب و از روش پرسیلی-تیلور برای محاسبه تبخیر-تعرق استفاده شد و اقدامات مدیریتی از قبیل رهاسازی سد، تخصیص آب برای کشت و برداشت محصولات، مشخص نمودن منبع آبیاری و همچنین تقسیم‌بندی ارتفاعی حوضه به ۵ دسته ارتفاعی، برای محاسبه بهتر فرآیند برف، در مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

### ۳-۳- کالیبراسیون و حساسیت‌سنجی مدل

پس از تنظیم و آماده‌سازی مدل، صحت‌سنجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده صورت گرفت. سپس حساسیت‌سنجی مدل به ۲۴ پارامتر مختلف در محدوده مقادیر پیش‌فرض با رویکرد Global Sensitivity و به کمک نرم‌افزار SWAT-CUP<sup>۱۰</sup> و روش Sufi-2<sup>۱۱</sup> (Abbaspour, 2011) انجام شد. با لحاظ کردن دو سال ابتدایی مدل‌سازی به عنوان Warm up، در مرحله بعد کالیبراسیون پارامترهای حساس مدل، طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ در ایستگاه‌های هیدرومتری صفاخانه در بالادست و نظام‌آباد در خروجی حوضه صورت گرفت و در نهایت نیز اعتبار مدل کالیبره شده برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ مورد سنجش قرار گرفت.

مدل SWAT یک مدل پایه فیزیکی است که چرخه هیدرولوژیکی در یک حوضه را به‌طور پیوسته و به صورت نیمه‌توزیعی شبیه‌سازی می‌کند. مدل نیمه‌توزیعی SWAT، به کمک نقشه ارتفاع رقومی حوضه، حوضه آبریز را به زیر حوضه‌هایی تقسیم می‌کند و زیر حوضه‌ها نیز به واحدهای کوچک‌تری بر اساس کلاس شیب، مشخصات خاک و کاربری اراضی، تحت عنوان واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی<sup>۸</sup> (HRU) تقسیم‌بندی می‌شوند (Neitsch et al., 2005). در مدل SWAT مقدار آب ذخیره شده در توده برف به صورت آب معادل برف گزارش می‌شود، توده برف با بارش برف افزایش و با ذوب و تصعید برف کاهش می‌یابد. معادله تعادل جرم توده برف به صورت زیر است:

$$SNO = SNO + R_{day} - E_{sub} - SNO_{mIt} \quad (1)$$

در رابطه فوق SNO مقدار آب داخل توده برف در یک روز معین شده،  $R_{day}$  مقدار بارش رخ داده شده در یک روز تعیین شده است که در صورت کمتر بودن دمای متوسط روزانه از دمای حد آستانه به توده برف اضافه می‌گردد،  $E_{sub}$  مقدار تصعید اتفاق افتاده در یک روز معین و  $SNO_{mIt}$  مقدار ذوب برف در یک روز معین است. مقادیر متغیرهای مذکور بر حسب  $mm H_2O$  هستند.

عواملی که در متغیرهای پوشش برف شرکت داده می‌شوند معمولاً به صورت سال‌به‌سال دارای شباهتی است که این امر را ممکن ساخته است که همبستگی بین پوشش سطح برف با مقدار برف موجود در حوضه در یک زمان معین برقرار گردد که این همبستگی به صورت یک منحنی کاهش سطح<sup>۹</sup> (مشابه شکل ۲) بیان می‌شود. منحنی مذکور برای توصیف فصل افزایش و کاهش توده برف به صورت تابعی از مقدار برف موجود در حوضه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

محاسبه منحنی کاهش سطح، به یک عمق آستانه برف نیاز دارد که این عمق را  $sno_{100}$  (پارامتر  $sno_{COVMX}$ ) می‌نامند که حداقل عمق برف و یا آب معادل برف در زمان پوشش ۱۰۰ درصدی حوضه از برف است و در حوضه‌هایی که امکان پوشش ۱۰۰ درصدی برف وجود ندارد حداقل عمق برف در حالت حداکثر میزان پوشش برف به عنوان  $sno_{100}$  در نظر گرفته می‌شود (Fassnacht et al., 2015). این عمق به عواملی از قبیل نحوه توزیع پوشش گیاهی، شدت باد و جهت شیب بستگی دارد که در هر حوضه متفاوت خواهد بود. پس از تعیین  $sno_{100}$ ، منحنی کاهش سطح با استفاده از معادله زیر که بر پایه معادله لگاریتمی طبیعی است، قابل ترسیم است:

$$sno_{cov} = \frac{sno}{sno_{100}} * \left( \frac{sno}{sno_{100}} + \exp\left(cov_1 - cov_2 \frac{sno}{sno_{100}}\right) \right)^{-1} \quad (2)$$

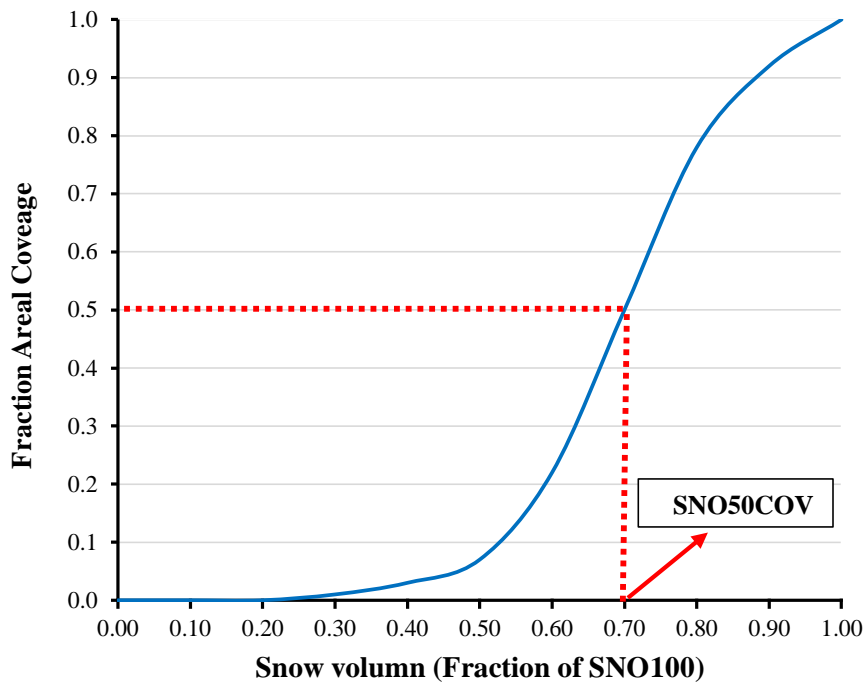


Fig. 2- Schematic of a snow depletion curve in the SWAT model (Neitsch et al., 2005)  
 شکل ۲- شکل کلی منحنی کاهش پوشش برف مدل SWAT (Neitsch et al., 2005)

Table 1- Data used to setup the SWAT model to simulate runoff in the Zarrineh-rud River Basin  
 جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز زرینه‌رود

Data	Description	Source
Digital elevation model <sup>12</sup>	ASTER digital elevation model (DEM) with a resolution of 30 m.	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
Land Use map 2007	with a resolution of 1000 m.	The Iranian Ministry of Jahade-Agriculture (MOJA)
Soil map	FAO's global soil map st 1 km spatial resolution.	<a href="http://www.fao.org/soils-portal/en/">http://www.fao.org/soils-portal/en/</a>
Meteorological data	daily precipitation, maximum and minimum temperature for six synoptic stations that are located in the study area	Iranian Meteorological organization
Streamflow gauging data	at Safakhaneh and Nezamabad hydrometric stations	Iran water resources management company
Snow depth data	at MOE snow stations	Iran water resources management company
Irrigation schedule	Monthly irrigation demands based on crop pattern	Ahmadzadeh et al. (2016)
Dam operation data	Daily releases	Iran water resources management company

### ۳-۴- پیش سطح برف حوضه آبریز با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و اعتبارسنجی آن

سنجنده MODIS یکی از تجهیزات کلیدی مستقر روی ماهواره‌های قطب گرد Terra و Aqua است که به ترتیب در دسامبر ۱۹۹۹ و می ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شدند (Hall et al., 2007). سنجنده MODIS دارای باند در بین طول موج‌های  $0.4-1.4 \mu m$  است. از جمله محصولات پیش زمین این سنجنده داده‌های سطح برف با قدرت تفکیک مکانی و زمانی ۵۰۰ متر و روزانه است (Ramage et al., 2003).

در این تحقیق از بین محصولات پوشش سطح برف این سنجنده، از دو محصول MOD10A1 و MYD10A1 به منظور برآورد سطح برف حوضه زرينه‌رود استفاده شد. پس از اصلاحات هندسی و رادیومتریک صورت گرفته در نرم‌افزار ENVI 5.3 بر روی تصاویر و جداسازی مرز حوضه زرينه‌رود استخراج مساحت پوشیده از برف در هر تصویر صورت گرفته و درصد پوشش برف منطقه به دست آمد. با توجه به اطلاعات ایستگاه‌های برف‌سنجی در دسترس (شکل ۱)، پوشش سطح برف طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار گرفت و پس از بررسی تصاویر پوشش برف در روزهای دارای اطلاعات برف‌سنجی (معادل ۲۸۷ داده برف‌سنجی)، ۱۶۰ داده در موقعیتی قرار گرفته‌اند که پوشش ابر مانع از برداشت تصاویر شده بود. از این رو اطلاعات از ۲۸۷ مورد به ۱۲۷ مورد کاهش یافت. سپس صحت پیش پوشش سطح برف تصاویر ماهواره‌ای MODIS با داده‌های زمینی در ایستگاه‌های برف‌سنجی طی روزهایی که عمق برف اندازه‌گیری شده بود، از حیث حضور و عدم حضور برف (عمق برف صفر) بررسی شد. بر همین مبنا برای محاسبه میزان دقت تصاویر از دو شاخص FAR<sup>۱۳</sup> و CSI<sup>۱۴</sup> استفاده شد که مقادیر آن‌ها با توجه به جدول ۲ و روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شود (Norbiato et al., 2008).

$$FAR = \frac{z}{x+z} \quad (5)$$

$$CSI = \frac{x}{x+y+z} \quad (6)$$

این دو شاخص مقادیر بین ۰ تا ۱ را پوشش می‌دهند و مقدار یک برای پارامتر، CSI نشان‌دهنده حداکثر موفقیت در پیش پدیده است اما شاخص FAR، نیز میزان خطا در تشخیص سطوح برفی را نشان

می‌دهد و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد دقت بالای پیش را نشان می‌دهد (Norbiato et al., 2008).

### ۳-۵- محاسبه پارامترهای برف مدل SWAT

پارامتر SNOCOV<sub>MX</sub> که میزان حداقل عمق برف متناظر با پوشش برف ۱۰۰ درصدی حوضه و همچنین پارامتر SNO50COV به عنوان درصدی از SNOCOV<sub>MX</sub> در هنگام پوشش ۵۰ درصدی حوضه، از جمله هفت پارامتر برف مدل SWAT هستند که مقادیر آن‌ها بر روی میزان رواناب تأثیرگذار است. این دو پارامتر را می‌توان از روی منحنی کاهش پوشش برف نسبت به عمق برف تعیین نمود. از این رو برای رسم این منحنی (به صورت شکل ۲) و محاسبه پارامترهای مذکور نیاز است تا حداکثر عمق حداقل برف در زمان پوشش ۱۰۰ درصدی منطقه از برف به دست آید.

با توجه به مطالعه صورت گرفته توسط (Fassnacht et al., 2015)، در حوضه‌هایی که امکان پوشش صددرصدی برف وجود ندارد حداقل عمق برف در حالت حداکثر میزان پوشش برف را می‌توان به عنوان SNO100 (SNOCOV<sub>MX</sub>) در نظر گرفت. با درون‌یابی مکانی مقادیر عمق اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های برف‌سنجی حوضه به روش IDW<sup>2</sup> (روش پیشنهادی در مطالعه (Kim et al., 2015))، نقشه عمق برف کل حوضه به دست آمد. به این منظور به کمک تصاویر پوشش برف روزانه MODIS، (MOD10A1)، مناطقی که پوشش برف در آنجا وجود نداشت از نقشه عمق برف، حذف گردید و مقدار عمق برف صفر برای این مناطق لحاظ شد. سپس با درون‌یابی به روش IDW<sup>2</sup>، در مرحله بعد مقدار حداقل عمق برف در زمان حداکثر پوشش سطح برف منطقه که طی آن اندازه‌گیری عمق برف صورت گرفته بود، به عنوان مقدار SNO100 (SNOCOV<sub>MX</sub>) به دست آمد. در نهایت نیز با تحلیل مقادیر حداقل عمق برف در مقابل پوشش سطح برف منطقه، طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ و رابطه (۲)، مقادیر ضرایب COV<sub>1</sub> و COV<sub>2</sub> تعیین شدند و بهترین منحنی کاهش پوشش سطح برف نسبت به عمق برف رسم شد و مقدار متناظر با پوشش برف ۵۰ درصدی حوضه، به عنوان SNO50COV به دست آمد.

Table 2- State matrix used for snow cover monitoring

جدول ۲- حالات مختلف رخداد و پیش‌بینی

Occurrence	Satellite-based monitoring	
	yes	no
	yes	x
no	z	w



### ۳-۶- مدل UBCWM

مدل UBCWM برای شبیه‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای حاکم در حوضه‌های آبریز کوهستانی از جمله ذوب برف و بارش باران طراحی و ارائه شده است. این مدل تجمع و ذوب برف، ذوب یخچال‌ها، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، ذخیره آب زیرزمینی، رواناب سطحی و زیرسطحی را در نظر می‌گیرد در مدل UBCWM حوضه به باندهای ارتفاعی تقسیم می‌شود تا اطلاعات و پارامترهای ورودی به صورت تابعی از ارتفاع قابل تغییر باشند. این مدل برای محاسبه ذوب برف از روش بیلان انرژی استفاده می‌کند که روابط آن در ذیل آمده است (Hopkinson et al., 2001):

$$M_{\text{melt}} = \frac{1}{\rho_w l_f} ((1 - \alpha) Q_{\text{in}} + Q_b + Q_c + Q_a + Q_r) \quad (7)$$

در رابطه فوق  $\alpha_s$  آلودگی برف،  $Q_{\text{in}}$  تشعشع موج کوتاه ورودی،  $Q_b$  تشعشع موج بلند،  $Q_c$  انرژی ذوب بر اثر جریان همرفتی،  $Q_a$  انرژی ذوب بر اثر چگالش و  $Q_r$  انرژی ذوب بر اثر بارش باران می‌باشند که همگی بر حسب mm/day هستند و روابط محاسبه هر کدام به صورت زیر بیان شده است.

$$Q_c = 0.113 p \cdot V \cdot T_a \cdot R_M \quad (8)$$

در رابطه فوق  $V$  سرعت باد (Km/hr)،  $T_a$  دمای هوا (کلوین)،  $p$  فشار هوا (کیلو پاسکال) و  $R_M$  هم فاکتور کاهش است:

$$Q_a = 0.44 T_{\text{min}} V R_M [(1 - f_c) p + f_c] \quad (9)$$

در رابطه فوق  $T_{\text{min}}$  دمای حداقل،  $f_c$  درصد پوشش جنگلی است.

$$R_M = 1 - 7.7 R_I \quad 0 \leq R_M \leq 1.6 \quad (10)$$

$$R_I = \frac{0.095 T_a}{V^2} \quad (11)$$

$R_I$  عدد ریچاردسون است که مطابق با رابطه فوق قابل محاسبه است.

$$Q_r = k T_a P \quad (12)$$

در رابطه فوق  $k$  مقدار گرمای باران بر حسب  $^{\circ}\text{C}^{-1} \text{mm}$  مقدار بارش بر حسب میلی‌متر در دوره زمانی است (Naeem et al., 2013).

برای تغییر روش محاسبه ذوب برف مدل SWAT از روش شاخص دما به روش بیلان انرژی UBCWM نیاز بود تا در کد اصلی مدل تغییراتی اعمال شود از این رو از Resource Code 664 مدل SWAT و همچنین کامپایلر Visual Studio 2013 برای اجرای کد استفاده شد.

### ۳-۷- ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل سازی رواناب حوضه در سه حالت (۱) مدل پایه، (۲) مدل با پارامترهای برف اصلاح شده و (۳) مدل با روش بیلان

انرژی UBCWM برای ذوب برف از معیارهای  $R^2$  و نش-ساتکلیف  $(NSE)^{\text{sd}}$  و کلینگ گوتتا  $(KGE)^{\text{e}}$  (روابط (۱۳) تا (۱۵)) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (14)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (15)$$

در روابط فوق  $Q$  متغیر مورد نظر (دبی) است و  $m$ ،  $s$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. همچنین  $i$  مقدار آ امین داده شبیه‌سازی و یا اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و  $cc$  ضریب همبستگی خطی بین  $m$ ،  $s$ ،  $\alpha$  نسبت انحراف معیار  $s$  و  $\beta$  نسبت میانگین  $s$  بر  $m$  است (Nourali et al., 2016).

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- محاسبه پارامترهای برف حوضه

پایش پوشش سطح برف حوضه با داده‌های ماهواره‌ای MODIS طی دوره ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ بررسی شده و صحت آن با داده‌های زمینی در ایستگاه‌های برف‌سنجی طی روزهایی که عمق برف اندازه‌گیری شده بود (در مجموع ۱۲۷ روز)، از حیث وجود و عدم برف (عمق برف صفر) بررسی شد. بر همین مبنا مقادیر دو شاخص درصد هشدار غلط FAR و موفقیت بحرانی CSI به ترتیب ۱ و ۸۲ درصد به دست آمدند که نشان می‌دهد، تصاویر پوشش برف MODIS، از دقت خوبی (خطای برآورد غلط کم و موفقیت کلی بالا) برای پایش سطح برف در منطقه برخوردارند. شکل ۳ نقشه عمق برف حاصل از درون‌یابی مقادیر عمق برف ایستگاه‌های برف‌سنجی و تطبیق با نقشه سطح پوشش برف را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳ حداکثر پوشش برفی که در روزهای اندازه‌گیری شده اتفاق افتاده است ۹۱ درصد پوشش سطح حوضه بوده که در ۱۲ ژانویه ۲۰۰۷ حادث شده است و مقدار حداقل عمق برفی که در این روز به دست آمده ۱۹ سانتی‌متر است که این مقدار معادل مقدار پارامتر SNO100 خواهد بود.

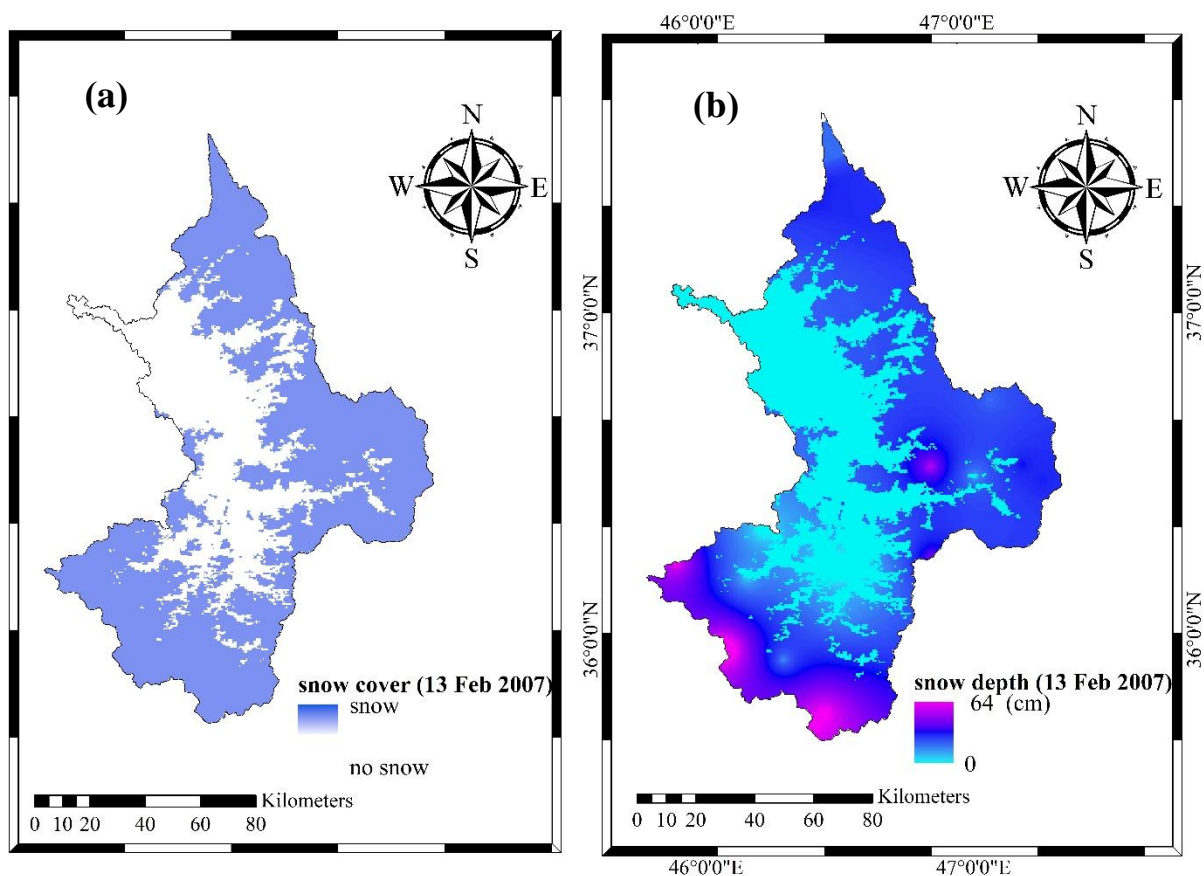
جدول ۳ مقادیر مختلف درصد پوشش برف و نسبت عمق به عمق حداکثر (SNO100)، در حوضه زیرنه‌رود طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ را نشان می‌دهد که به کمک این جدول و رابطه (۲)، منحنی کاهش پوشش برف منطقه نسبت به عمق برف مطابق شکل ۴ به دست آمد. بر اساس این منحنی مقادیر SNO50COV و SNOCOVMX به ترتیب ۰/۳۹ و ۱۹ به دست آمدند. همچنین، با حل معکوس معادله (۲)، مقادیر ضرایب  $COV_1$  و  $COV_2$  به ترتیب ۰/۰۶- و ۲/۲۴ محاسبه شدند.

**Table 3- Snow cover areas and corresponding minimum snow depths in the Zarrineh-rud River Basin**

جدول ۳- مقادیر پوشش سطح برف و حداقل عمق حوضه زرینه‌رود در روزهای اندازه‌گیری شده

Date	Snow cover area(km <sup>2</sup> )	Fraction areal coverage	Minimum snow depth content(cm)	Fraction of SNO100
12-Jan-2007	11317	0.91	19*	1.00
13-Feb-2007	8256	0.66	8.1	0.43
7-Mar-2007	3586	0.29	13.5	0.71
8-Jan-2008	3457	0.27	13.7	0.72
12-Mar-2008	201	0.01	15.2	0.8
18-Feb-2009	4031	0.32	3.7	0.19
7-Mar-2009	1874	0.15	6.2	0.33
16-Apr-2009	1415	0.11	0.3	0.02
19-Jan-2010	349	0.02	0.4	0.02
7-Feb-2010	7201	0.58	2.8	0.15
9-Mar-2010	288	0.02	5.8	0.31
9-Jan-2011	6266	0.50	15.6	0.82
9-Feb-2011	7590	0.61	5.7	0.30
10-Jan-2012	7662	0.62	5.5	0.29
5-Feb-2012	8503	0.68	11.5	0.61
15-Jan-2013	10107	0.81	17.7	0.93
4-Feb-2013	6050	0.48	8.4	0.44
8-Mar-2013	3038	0.24	3.1	0.16

\*SNO100: SNO100 is the threshold depth of snow at maximum coverage



**Fig. 3- Snow cover (a) and snow depth (b) maps of the Zarrineh-rud River Basin in 13 February of 2007**

شکل ۳- نقشه پوشش سطح (a) و عمق برف (b) حوضه زرینه‌رود در تاریخ ۲۴ بهمن ۱۳۸۵

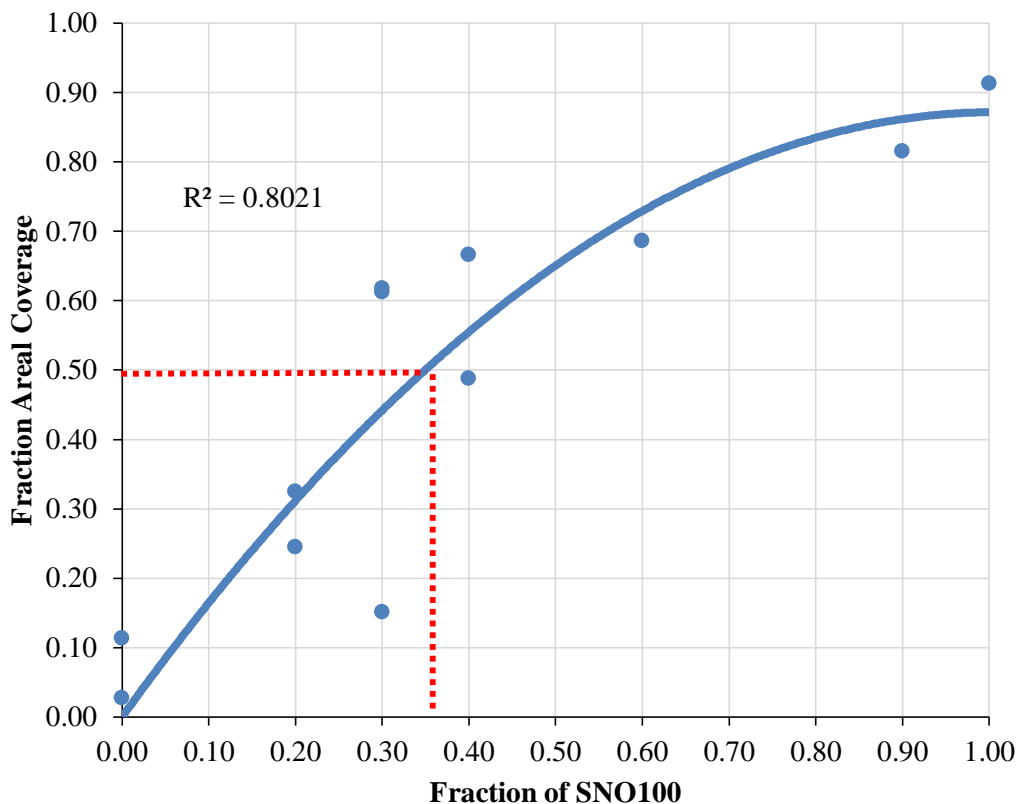


Fig. 4- Snow depletion curve of the Zarrineh-rud River Basin (2007-2013)  
 شکل ۴- منحنی کاهش پوشش برف نسبت به عمق برف در حوضه آبریز زرینه‌رود (۲۰۱۳-۲۰۰۷)

حساس به شمار می‌رود که این حساسیت می‌تواند متأثر از شرایط دمایی متفاوت در هنگام بارش برف در حوضه باشد. علاوه بر پارامترهای برف، پارامترهای مختلف آب زیرزمینی نیز از جمله پارامترهای حساس در شبیه‌سازی رواناب حوضه به شمار می‌روند که نشان‌دهنده اهمیت جریان‌های زیرزمینی بر جریان‌های سطحی حوضه است.

در نهایت فرآیند کالیبراسیون، با محدود نمودن بازه‌های پارامترهای مذکور و اضافه شدن ایستگاه بالادستی صفاخانه به عنوان نماینده شرایط بالادست سد بوکان به همراه ایستگاه پایین‌دستی نظام‌آباد صورت گرفت و مقادیر بهینه هر پارامتر مطابق جدول ۴ تعیین شد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب سری زمانی رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوضه را طی دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی ایستگاه‌های نظام‌آباد و صفاخانه را نشان می‌دهد. مقدار شاخص عملکردی NSE که در این مطالعه به عنوان تابع هدف در هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی در نظر گرفته شد در هر دو ایستگاه و برای هر دو دوره، بیش از ۰/۷ است که بسیار خوب ارزیابی می‌شود

#### ۲-۴- تحلیل حساسیت، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

پس از تنظیم و اجرای مدل ابتدا حساسیت مدل در ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد (خروجی حوضه) نسبت به ۲۴ پارامتر تعیین شد و مطابق جدول ۴ به ترتیب حساسیت مرتب و مقادیر بهینه برای هر پارامتر در طی فرآیند کالیبراسیون تعیین گردید. از بین پارامترهای حساس مدل، پارامتر شماره منحنی CN2 که تحت تأثیر نفوذپذیری خاک و کاربری اراضی است، حساس‌ترین پارامتر در مدل‌سازی حوضه زرینه‌رود است. این پارامتر ارتباط مستقیمی با میزان رواناب دارد و با افزایش آن، میزان رواناب نیز افزایش می‌یابد. میزان رواناب در حوضه‌های کوهستانی، عموماً بیشتر از نرخ نفوذ به سفره آب زیرزمینی است که این موضوع می‌تواند دلیل حساسیت بالای پارامتر CN2 در حوضه کوهستانی زرینه‌رود باشد. کوهستانی بودن منطقه سبب شده تا از بین ۵ پارامتری که تغییرات آن‌ها بیشترین تأثیر را بر رواناب حوضه دارند، ۲ پارامتر از پارامترهای برف باشند. وجود پارامتر SNO50COV به عنوان یکی از پارامترهای حساس مدل، می‌تواند به دلیل تغییرات این پارامتر در طی سال‌های شبیه‌سازی و نقش آن بر روی نقاط اوج رواناب باشد. همچنین دمای حد آستانه بارش برف در این حوضه از جمله پارامترهای

(Motovilor et al., 1999; Moriasi et al., 2007).

دیگر تغییر مدل از شاخص دما به مدل بیلان انرژی UBCWM به دلیل استفاده از سایر متغیرها برای شبیه‌سازی ذوب برف صورت گرفت.

مقادیر بهینه دو پارامتر از مدل‌سازی حوضه مطابق جدول ۴، ۰/۴۳ برای SNO50COV و ۲۱۲ میلی‌متر برای SNOCOV MX به دست آمد که این مقادیر، اختلاف کمی با مقادیر به دست آمده از ادغام داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های عمق برف، دارند. فرآیند کالیبراسیون با اعمال مقادیر دو پارامتر به دست آمده (SNO50COV و SNOCOV MX) در مدل SWAT به سبب کاهش درجه آزادی مدل، موجب تغییر در نتایج مدل شد. در ایستگاه نظام‌آباد شاخص‌های عملکردی نشان از برتری مدل پایه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ را دارند که این موضوع می‌تواند به دلیل تحت تأثیر بودن جریان این ایستگاه از برداشت‌های آب کشاورزی و رهاسازی سد باشد؛ اما در ایستگاه بالادستی صفاخانه که کمتر تحت تأثیر این مسائل است در اثر اعمال پارامترهای برف برآورده شده، بهبود در میزان شاخص‌های عملکردی مدل، مطابق جدول ۵ اتفاق افتاده است.

از بررسی مقادیر رواناب دو ایستگاه نظام‌آباد و صفاخانه می‌توان دریافت که بیشترین مقدار رواناب در فصل بهار و سه ماه مارس (فروردین)، آوریل (اردیبهشت) و می (خرداد) رخ داده است. مدل‌سازی صورت گرفته نشان می‌دهد که مدل در اکثر نقاط با دبی کم، بیشتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی نموده است و این موضوع بیشتر در ایستگاه پایین‌دستی نظام‌آباد دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل مصارف کشاورزی باشد که به نسبت، در پایین‌دست حوضه مقدار بیشتر و تأثیرگذاری بر روی جریان نسبت به بالادست حوضه دارد. در نتیجه، مدل جریان پایه را در ایستگاه نظام‌آباد بیش برآورد نموده است. همچنین، مدل در تخمین میزان رواناب اوج، ضعیف عمل کرده که با توجه به حساسیت بالای مدل به پارامترهای برف، می‌توان گفت که عملکرد مدل در شبیه‌سازی برف و رواناب حاصل از آن ضعیف بوده است. از این رو برای بهبود عملکرد مدل، در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف از مقادیر به دست آمده برای دو پارامتر SNO50COV و SNOCOV MX در کالیبراسیون مدل استفاده گردید و از سوی

**Table 4- Sensitivity analysis of the SWAT parameters for simulating the Zarrineh-rud River Basin**

**جدول ۴- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT برای شبیه‌سازی حوضه آبریز زربینه‌رود**

Parameter	Description	Initial range		Optimal value
		min	max	
R_CN2.mgt	Curve number for moisture condition II	-0.5	0.5	0.05
V_SNO50COV.bsn	Fraction of snow volume represented by SNOCOV MX that corresponds to 50% snow cover	0	1	0.43
A_GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0	5000	1502
V_SFTMP.bsn	Snowmelt temperature	-5	5	2.52
V_ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor	0	1	0.55
R_SOL_BD.sol	Soil bulk density	-0.8	0.8	0.54
A_GW_DELAY.gw	Groundwater delay time	1	500	196.39
V_SMFMX.bsn	Melt factor for snow on 21 June	0	10	4.28
R_HRU_SLP.hru	Average slope steepness	-0.8	0.8	-0.45
V_SLSUBBSN.hru	Average slope length	10	150	141.94
R_SOL_AWC.sol	Soil available water storage capacity	0	1	0.06
R_SOL_K.sol	Soil hydraulic conductivity	-0.25	0.25	0.20
V_SMFMN.bsn	Melt factor for snow on 21 December	0	10	0.91
V_SURLAG.bsn	Surface runoff lag coefficient	0.05	24	21.73
V_GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2	0.15
R_REVAPMN.gw	Threshold water in shallow aquifer	0	500	22.90
V_CH_K2.rte	Main channel conductivity	0	500	395.89
V_SNOCOVMX.bsn	Minimum snow water content that corresponds to 100% snow cover, SNO100	0	500	211.75
V_CH_N2.rte	Manning's n value for the main channel	0.01	0.3	0.23
V_CANMX.hru	Maximum canopy storage	0	100	5.26
V_SMTMP.bsn	Snowmelt base temperature	-5	5	4.60
V_TIMP.bsn	Snow pack temperature lag factor	0	1	0.37
V_OV_N.hru	Manning's n value for the main channel	0.01	300	21.76
V_ESCO.bsn	Soil evaporation compensation factor	0.01	1	0.97

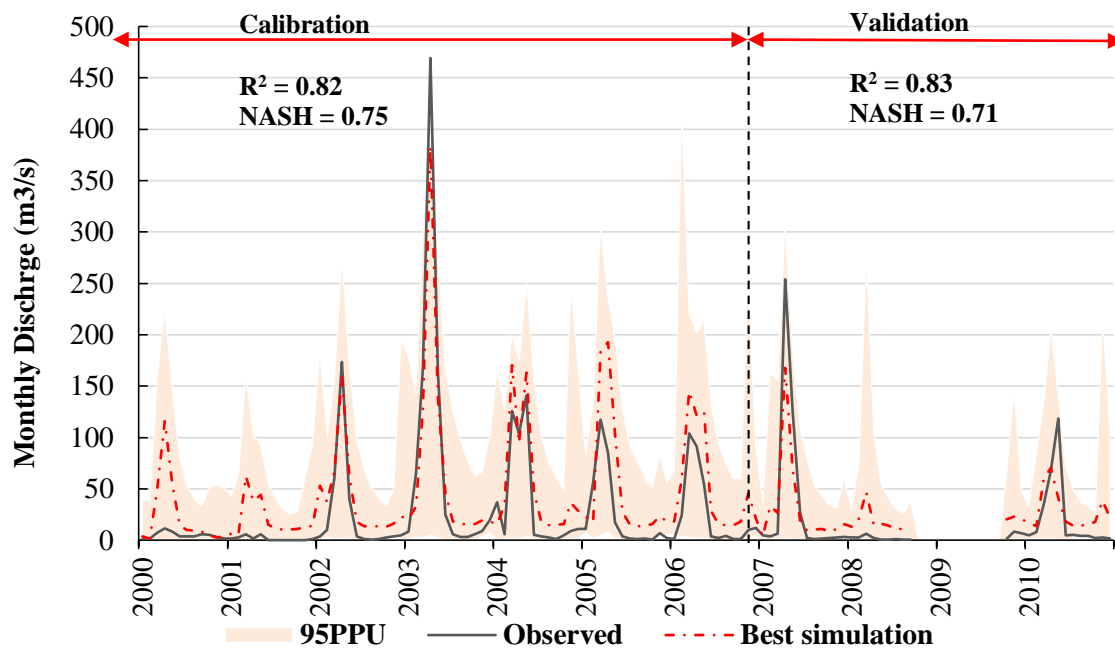


Fig. 5- Comparison of the simulated and observed runoff and uncertainty band at the Nezamabad station during calibration and validation period in the base SWAT model

شکل ۵- مقایسه مقادیر رواناب شبیه سازی شده، مشاهداتی و بازه عدم قطعیت رواناب در ایستگاه نظام آباد طی دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی در مدل پایه SWAT

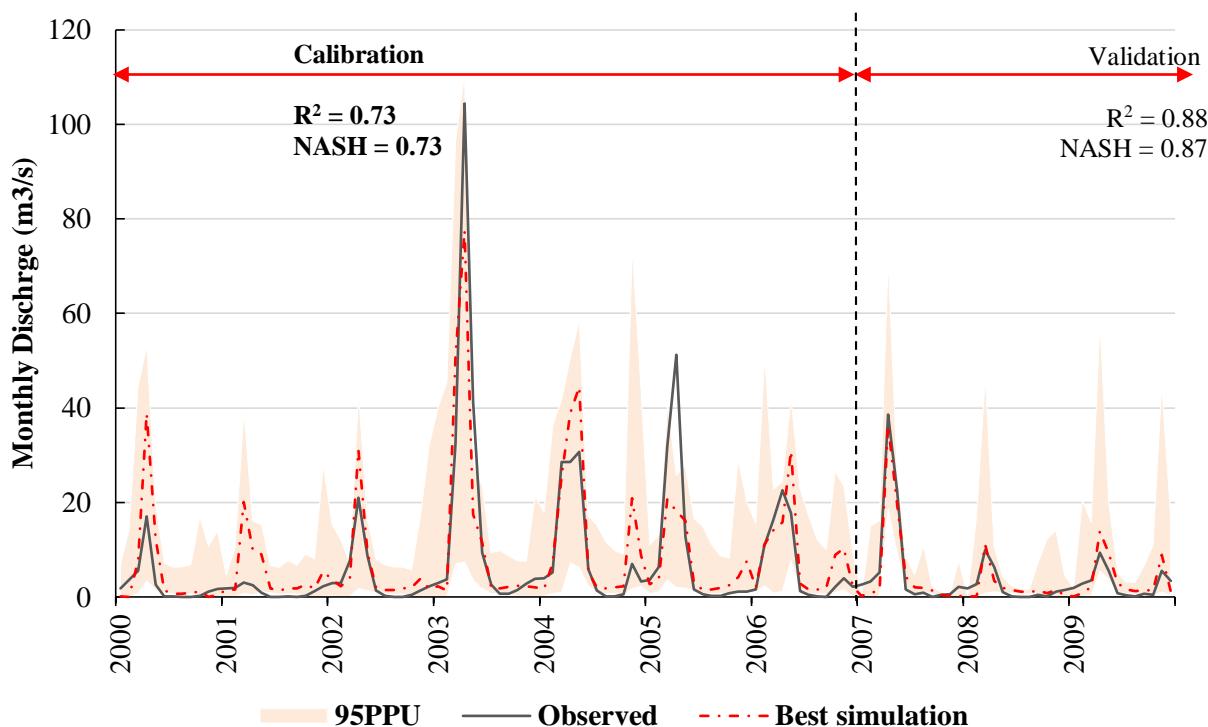


Fig. 6- Comparison of simulated and observed runoff values uncertainty band at the Safakhaneh station during calibration and validation period in the base SWAT model

شکل ۶- مقایسه مقادیر رواناب شبیه سازی شده، مشاهداتی و بازه عدم قطعیت رواناب در ایستگاه صفاخانه طی دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی در مدل پایه SWAT

از سوی دیگر در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ (دوره اعتبارسنجی) اعمال پارامترهای برف برآورد شده در مدل، سبب بهبود عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه نظام‌آباد بر اساس شاخص‌های عملکردی ( $R^2$ ) و NSE و KGE شده (جدول ۵) و نتایج شبیه‌سازی در ایستگاه بالادستی صفاخانه در این دوره نیز، در شرایط اعمال پارامترهای برآورد شده بهتر شده و سبب بهبود شاخص‌های عملکردی  $R^2$ ، NSE و KGE شده است.

در حالی که در خصوص مدل UBCWM، این مدل علیرغم بهبود مقدار KGE در مدل پایه در ایستگاه نظام‌آباد در دوره واسنجی، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مدل پایه در هر دو ایستگاه نظام‌آباد و صفاخانه داشته است و دوره ذوب برف در این مدل طولانی‌تر مدل شده است. با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی در حالت پایه و حالت اعمال پارامترهای برآورد شده و حالت اعمال مدل بیلان انرژی UBCWM با مقادیر مشاهداتی (شکل‌های ۷ و ۸)، می‌توان نتیجه گرفت که در رواناب‌های اوج مدل با اعمال دو پارامتر به دست آمده، مقادیر برآورد شده به مقدار واقعی نزدیک‌تر شده‌اند. در حالی که در مدل UBCWM مقادیر ذوب اوج در ایستگاه نظام‌آباد به لحاظ زمانی منطبق است اما در ایستگاه صفاخانه که یک ایستگاه بالادستی است ذوب‌های اوج به لحاظ زمانی زودتر اتفاق افتاده است و از طرفی مقدار اوج سیلاب معطوف به فصل بهار نبوده و بازه طولانی‌تری را شامل شده است. یکی از دلایل این امر این است که گرچه مدل بیلان انرژی به لحاظ مفهومی بر مدل درجه-روز ارجح است (عدم قطعیت مفهومی کمتر)، به علت نیاز به داده‌های ورودی بیشتر عدم قطعیت ناشی از داده‌های ورودی و پارامترهای مدل بیشتر است و استفاده از این زیرمدل نتوانسته است منجر به بهبود عملکرد شبیه‌سازی SWAT در این حوضه آبریز شود.

از آنجایی که عمق برف در مناطق مرتفع حوضه بیشتر است و ایستگاه‌های بالادستی بیشتر تحت تأثیر رواناب حاصل از ذوب برف هستند، اعمال پارامترهای برآورد شده بر اساس داده‌های مشاهداتی بجای مقادیر پیش فرض در مدل سبب بهبود برآورد رواناب در ایستگاه بالادستی صفاخانه شده است. در این ایستگاه مدل UBCWM ذوب پایه را بسیار بیشتر از مدل پایه و مدل اصلاح شده با پارامترهای برف برآورد نموده است و عدم برآورد صحیح از ذوب اوج که حاصل عدم دقت برآورد ذوب برف است، سبب بیشتر برآورد کردن ذوب پایه شده است.

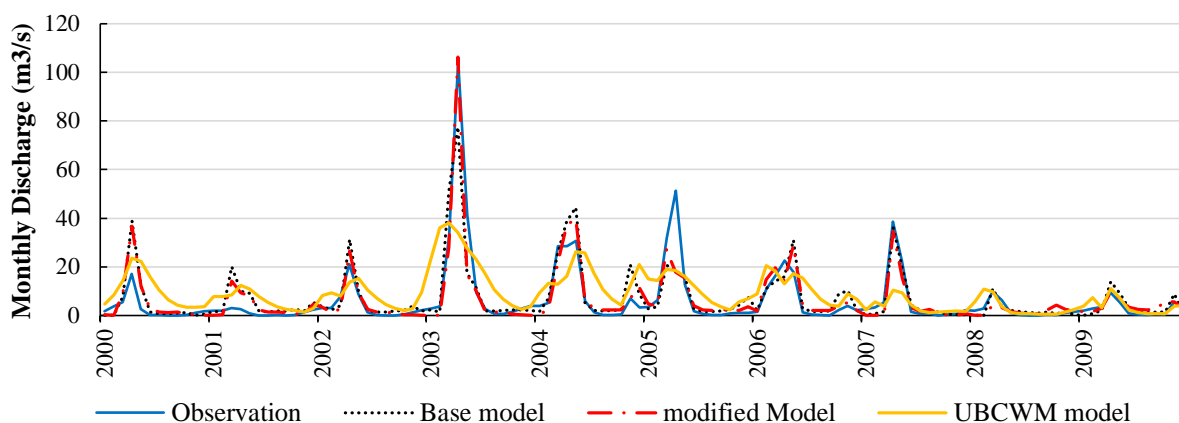
## ۵- خلاصه و جمع‌بندی

برف و محاسبه رواناب حاصل از ذوب آن نقش مهمی را در حوضه‌های کوهستانی، مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف در فرآیند شبیه‌سازی رواناب با روش‌های گوناگون برآورد میزان ذوب برف را انجام داده‌اند و محققین نیز درصدد بهبود عملکرد کلی این مدل‌ها از طریق اصلاح پارامترهای مربوط به ذوب برف در مدل پایه با داده‌های مشاهداتی (زمینی یا ماهواره‌ای) و یا بهبود زیر مدل ذوب برف بوده‌اند. در پژوهش حاضر نیز این دو رویکرد با هدف بهبود فرآیند برآورد رواناب معادل ذوب برف در مدل SWAT برای زیر حوضه کوهستانی زرینه‌رود به کار گرفته شد. نتایج مدل‌سازی رواناب حوضه زرینه‌رود با مدل پایه SWAT نشان از ضعف مدل در برآورد رواناب‌های اوج در حوضه داشت. همچنین مدل حساسیت بالایی نسبت به تغییرات پارامترهای برف نشان داد.

Table 5- Comparison of the performance of the base SWAT model with the two modified models based on the snow parameters at the Nezamabad station

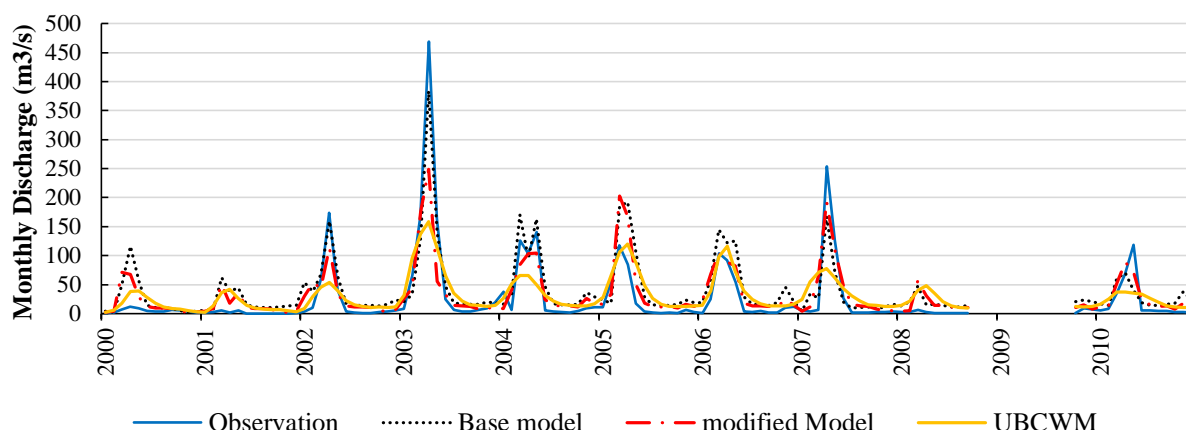
جدول ۵- مقایسه نتایج آماری مدل پایه SWAT با مدل‌های اصلاح شده بر اساس پارامترهای برف در ایستگاه نظام‌آباد

Statistical period	Station name	Models	Performance measures		
			KGE	$R^2$	NSE
Calibration (2000-2006)	Nezamabad	Base model	0.40	0.82	0.75
		Modified model	0.63	0.72	0.69
		Modified model (UBCWM)	0.46	0.62	0.54
	Safakhaneh	Base model	0.75	0.73	0.73
		Modified model	0.88	0.83	0.82
		Modified model (UBCWM)	0.18	0.37	0.29
Validation (2007-2010)	Nezamabad	Base model	0.48	0.83	0.71
		<b>Modified model</b>	<b>0.54</b>	<b>0.86</b>	<b>0.81</b>
		Modified model (UBCWM)	0.17	0.30	0.25
	Safakhaneh	Base model	0.82	0.88	0.87
		<b>Modified model</b>	<b>0.95</b>	<b>0.92</b>	<b>0.92</b>
		Modified model (UBCWM)	0.47	0.46	0.42



**Fig. 7- Comparison of the observed and simulated runoffs using the base and modified SWAT models at the Safakhaneh station**

شکل ۷- مقادیر رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی مدل SWAT پایه با مدل‌های اصلاح شده در ایستگاه صفاخانه



**Fig. 8- Comparison of the observed and simulated runoffs using the base and modified SWAT models at the Safakhaneh station**

شکل ۸- مقادیر رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی مدل SWAT پایه با مدل‌های اصلاح شده ایستگاه نظام‌آباد

امکان بهبود عملکرد مدل در بخش ذوب برف با اصلاح پارامترهای ذوب برف با استفاده از داده‌های مشاهداتی بجای مقادیر پایه پیش فرض را نشان می‌دهد؛ که این رویکرد می‌تواند نقش مؤثری در بهبود مدیریت منابع آب حوضه‌های آبریز کوهستانی و مدیریت سیلاب‌های بهاری داشته باشد. از این رو پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده در سایر حوضه‌های کوهستانی کشور، این روش مورد ارزیابی قرار گیرد و همچنین در تحقیقات آتی، امکان برآورد سایر پارامترهای حساس مدل در کنار پارامترهای ذوب برف با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سایر اطلاعات محلی در دسترس و نقش آن در بهبود عملکرد مدل ارزیابی شود.

از بین دو رویکرد اصلاح دو پارامتر SNO50COV و SNOCOV MX با استفاده از داده‌های روزانه پوشش سطح برف MODIS (پس از ارزیابی و اطمینان از دقت قابل قبول تصاویر) و مقادیر عمق برف ایستگاه‌های برف‌سنجی در قالب مدل درجه-روز سبب بهبود شاخص‌های عملکردی  $R^2$ ، NSE و KGE در مدل‌سازی رواناب به‌ویژه در ایستگاه بالادستی حوضه شد؛ اما تغییر روش پایه مدل‌سازی ذوب برف در مدل SWAT از درجه-روز به بیلان انرژی UBCWM منجر به بیش برآورد رواناب ذوب برف و افت عملکرد مدل در این حوضه شد و ذوب برف را در بازه زمانی بیشتری شبیه‌سازی نموده است که خلاف واقعیت است. از این رو، یافته‌های این پژوهش

## پی نوشتها

- 1- Snow Runoff Model
- 2- Utah Energy Balance Model
- 3- Nash-Sutcliffe Efficiency Criterion
- 4- Snow Temperature Model
- 5- South Saskatchewan River Basin
- 6- Lumped
- 7- University of British Columbia Watershed Model
- 8- Hydrologic Response Unit
- 9- Areal Depletion Curve
- 10- Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Programs
- 11- Sequential Uncertainty Fitting Version 2
- 12- DEM
- 13- False Alarm Rates
- 14- Critical Success Index
- 15- Nash-Sutcliffe
- 16- Kling-Gupta

## ۶- مراجع

- Abbaspour KC (2011) SWAT-CUP4: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag
- Ahmadzadeh H, Morid S, Delavar M, and Srinivasan R (2016) Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. *Agricultural Water Management* 175:15-28
- Debele B, Srinivasan R, and Gosain AK (2010) Comparison of process-based and temperature-index snowmelt modeling in SWAT. *Water Resources Management* 24(6):1065-1088
- Ebrahime H, Ghani A, Malakoti H (2012) Trend of snow cover detection using satellite data from MODIS over snow-rich areas in Iran. *Journal of Meteorological Organization* 36(79):3-10 (In Persian)
- Essery R, Morin S, Lejeune Y, and Menard CB (2013) A comparison of 1701 snow models using observations from an alpine site. *Advances in Water Resources* 55:131-148
- Fassnacht SR, Sexstone GA, Kashipazha AH, Lopez-Moreno JI, Jasinski MF, Kampf SK, and Von Thaden BC (2015) Deriving snow-cover depletion curves for different spatial scales from remote sensing and snow telemetry data. *Hydrological Processes* 30(11):1708-1717

Fattahi E, Moghimi S, khorshidi M (2014) Application of NOAA satellite image for determining the variation of snow cover trend in North-west of Iran. *Arid Regions Geographic Studies* 4(14):1-10 (In Persian)

Fontaine TA, Cruickshank TS, Arnold JG, and Hotchkiss RH (2002) Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology* 262(1):209-223

Gayathri KD, Ganasri BP, and Dwarakish GS (2015) A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia* 4(Icwrcoe):1001-1007

Ghasemfalaki G, Ahmadi H, and Hesari B (2020) Assessment of the impact of climate change and implementing policies on water supply vulnerabilities. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 14(3):881-893

Golzari S, Zareabyaneh H, Delavar M, and Mobargaei Dinan N (2020) Performance of SWAT model in quantitative and qualitative simulation of runoff and watershed protective measures in Zarrinehrood Basin. *Journal of Water and Environmental Management Research* 11(22):111-120 (In Persian)

Goodarzi MR, Zahabiyoun B, Massah Bavani AR, Kamal AR (2012) Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharehou basin. *Water and Irrigation Management* 2(1):25-40 (In Persian)

Grusson Y, Sun X, Gascoin S, Sauvage S, Raghavan S, Anctil F, and Sacherz-Perez JM (2015) Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology* 531:574-588

Hopkinson C, Lowe A, Zawadzki A, and English M (2001) Using oxygen isotope tracers to evaluate & optimise flow components generated by the UBC watershed model in a Mountainous Basin. In *Proceedings of the 58th Eastern Snow Conference* 14-18

Infante Corona JA (2015) Assimilating merged remote sensing and ground-based snowpack information for streamflow simulation. *Doctoral Dissertation, The City College of New York*

Kim SB, Shin HJ, Park M, and Kim SJ (2015) Assessment of future climate change impacts on snowmelt and stream water quality for a mountainous high-elevation watershed using SWAT. *Paddy and Water Environment* 13(4):557-569



- Liu Y, Cui G, and Li H (2020) Optimization and application of snow melting modules in SWAT model for the alpine regions of northern China. *Water* 12(3):636
- Mahmudi P, Motamedvaziri B, Hosseini M, Ahmadi H, and Amini A (2021) Study of climate change effects on hydrological processes in Siminehroud and Zarrinehroud watersheds northwest of Iran. *Earth Science Informatics* 14:965-974
- Meng XY, Yu DL, and Liu ZH (2015) Energy balance-based SWAT model to simulate the mountain snowmelt and runoff-taking the application in Juntanghu watershed (China) as an example. *Journal of Mountain Science* 12(2):368-381
- Mirmousavi H, Saboor L (2014) Monitoring the changes of snow cover by using MODIS sensing images at northwest of Iran. *Geography and Development Iranian Journal* 12(35):181-200 (In Persian)
- Morid S, Gosain AK, and Keshari AK (2004) Response of different snowmelt algorithms to synthesized climatic data for runoff simulation. *Journal of the Earth and Space Physics* 30(1):1-9
- Motovilov YG, Gottschalk L, Engeland K, and Rodhe A (1999) Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 98:257-277
- Naeem UA, Hashmi HN, and Shakir AS (2013) Flow trends in river Chitral due to different scenarios of glaciated extent. *KSCE Journal of Civil Engineering* 17:244-251
- Naserabadi F, Esmali Ouri A, Akbari H, Rostamian R (2016) River flow simulation using SWAT model (Case study: Ghareh Su River in Ardabil Province-Iran). *Journal of Watershed Management Research* 7(13):50-59 (In Persian)
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR, and King KW (2005) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Grassland Soil and Water Research Laboratory Agricultural Research Service Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station Texas: 494
- Norbiato D, Borga M, Degli Esposti S, Gaume E, and Anquetin S (2008) Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology* 362(3):274-290
- Nourali M, Ghahraman B, Pourreza Bilondi M, and Davary K (2016) Effect of likelihood function choice for estimating uncertainty of HEC-HMS flood simulation model using Markov Chain Monte Carlo Algorithm. *Iran-Water Resources Research* 12(3):80-98 (In Persian)
- Pandi D, Kothandaraman S, and Kuppusamy M (2021) Hydrological models: a review. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 12(3):223-242
- Peker IB and Sorman AA (2021) Application of SWAT using snow data and detecting climate change impacts in the mountainous eastern regions of Turkey. *Water* 13(14):1982
- Rahmani J and Danesh-Yazdi M (2022) Quantifying the impacts of agricultural alteration and climate change on the water cycle dynamics in a headwater catchment of Lake Urmia Basin. *Agricultural Water Management* 270:107749
- Rahvareh M, Motamedvaziri B, Moghaddamnia A, and Moridi A (2023) Modeling runoff management strategies under climate change scenarios using hydrological simulation in the Zarrineh River Basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change* 14(7):2205-2226
- Ramage JM and Isacks BL (2003) Interannual variations of snowmelt and refreeze timing on southeast-Alaskan icefields, USA. *Journal of Glaciology* 49(164):102-116
- Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, Mousavi SF, Heidarpour M, Jalalian A, and Abbaspour KC (2008) Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal* 53(5):977-988
- Schmugge TJ, Kustas WP, Ritchie JC, Jackson TJ, and Rango A (2002) Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources* 25(8):1367-1385
- Schulz O and De Jong C (2004) Snowmelt and sublimation: Field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8(6):1076-1089
- Taia S, Erraioui L, Arjdal Y, Chao J, El Mansouri B, and Scozzari A (2023) The application of SWAT Model and remotely sensed products to characterize the dynamic of streamflow and snow in a mountainous watershed in the high Atlas. *Sensors* 23(3):1246
- Tobin KJ and Bennett ME (2020) Improving SWAT model calibration using soil MERGE (SMERGE). *Water* 12(7):2039
- Tolson BA and Shoemaker CA (2004) Watershed modeling of the Cannonsville Basin using SWAT2000 Model. Cornell Library Technical Reports and Papers

- Tuo Y, Duan Z, Disse M, and Chiogna G (2016) Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige River Basin (Italy). *Science of The Total Environment* 573:66-82
- Wang X and Xie H (2009) New methods for studying the spatiotemporal variation of snow cover based on combination products of MODIS Terra and Aqua. *Journal of Hydrology* 371(1):192-200
- Yazdandoost F, Moradian S, and Izadi A (2020) Evaluation of water sustainability under a changing climate in Zarrineh River Basin, Iran. *Water Resources Management* 34:4831-4846
- Zare M, Azam S, and Sauchyn D (2022) A modified SWAT model to simulate soil water content and soil temperature in cold regions: A case study of the South Saskatchewan River Basin in Canada. *Sustainability* 14(17):10804
- Zhao H, Li H, Xuan Y, Li C, and Ni H (2022) Improvement of the SWAT Model for snowmelt runoff simulation in seasonal snowmelt area using remote sensing data. *Remote Sensing* 14(22):5823