



Improving the precision of Snowmelt runoff simulation and sensitivity analysis of parameters and climatic variables in the Tamar basin, Iran

Parva Mohammadi¹, Kumars Ebrahimi^{✉2}, Javad Bazrafshan³

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran parva.mohammadi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: EbrahimiK@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran jbazr@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 18, 2022

Revised: June. 28, 2022

Accepted: Aug. 29, 2022

Published online: Sep. 23, 2022

Keywords:

Climate variability,
Floods,
Hydrological model,
Mountain basin,
Water resources.

ABSTRACT

Global warming has changed rainfall patterns and reduced snow sources. The main objective of this research was to investigate the impact of temperature increase on snowmelt and river runoff in hot months of the year along with analysis of climate variables in Tamar basin, Iran. For this purpose, the snow cover area was extracted from the daily images of Modis Satellite, based on elevation. Then, the study area was divided into four districts. Discharge flow measured data of Tamar hydrometric station, precipitation of Qarnaq and average temperature of Gidagh stations were used from 2013 to 2016 for calibration and from 2017 to 2019 for verification, to simulate snowmelt runoff. Snow cover extent, in calibration stage and January, reached the highest values of 28% and 28.8% in the third and fourth districts, respectively. Furthermore, in the verification stage, the third and fourth districts in February had the highest percentages of 45.8 and 30.2, respectively. Comparison of simulated and measured runoff data revealed that the portion of runoff due to snowmelt is significant by passing from February to April. So that the highest increase (from 1.8% to 39.1%) in runoff amount was corresponded to the water year of 2018-2019. The highest and the lowest percentages of snowmelt in water years of 2014-2015 and 2017-2018 were 19 and 3.3 percent, respectively. The results of sensitivity analysis of model parameters including temperature decrease rate, critical temperature, delay time, degree-day factor, X and Y coefficients, precipitation runoff coefficient and snow runoff coefficient showed that the rainfall coefficient and X parameters are the most effective parameters. The effect of temperature and rainfall on runoff process was varied in different months.

Cite this article: Mohammadi, P., Ebrahimi, K., & Bazrafshan, J. (2022) Improving the precision of Snowmelt runoff simulation and sensitivity analysis of parameters and climatic variables in the Tamar basin, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (7), 1611-1624.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339312.669213>



تأثیر افزایش دما بر ذوب برف و رواناب رودخانه در ماه‌های گرم سال و تحلیل متغیرهای اقلیمی در حوضه تهر، ایران

پروا محمدی^۱، کیومرث ابراهیمی^۲، جواد بذرافشان^۳

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: parva.mohammadi@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: EbrahimiK@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: jbazr@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	گرم شدن زمین باعث تغییرات الگوی بارندگی و کاهش ذخایر برف شده است. هدف مقاله حاضر ارزیابی تأثیر افزایش دما بر ذوب برف و رواناب رودخانه در ماه‌های گرم سال و تحلیل متغیرهای اقلیمی در حوضه تهر می‌باشد. بدین منظور سطح پوشش برف از تصاویر روزانه ماهواره مودیس استخراج و براساس ارتفاع و با کاربرد نرم‌افزار GIS محدوده مطالعات به چهار ناحیه تقسیم شد. به منظور شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف از داده‌های مشاهداتی دبی ایستگاه هیدرومتری تهر، بارش ایستگاه قرناق و میانگین دمای ایستگاه گیداغ (سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۲) برای واسنجی و (سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۹۶) برای صحت‌سنجی استفاده شد. سطح پوشش برف در مرحله واسنجی در دی ماه به بیشترین مقادیر برابر ۲۸ درصد در ناحیه سوم و ۲۸/۸ درصد در ناحیه چهارم رسید. در مرحله صحت‌سنجی نیز نواحی سوم و چهارم در بهمن ماه بیشترین درصدها را به ترتیب برابر با ۴۵/۸ و ۳۰/۲ به خود اختصاص دادند. مقایسه نتایج رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان داد که سهم رواناب ناشی از ذوب برف در گذر از بهمن به فروردین ماه قابل توجه است. به‌طوری‌که بیشترین افزایش مقدار رواناب مربوط به سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ از ۱/۸ به ۳۹/۱ درصد برآورد شد. همچنین بیشترین و کمترین درصد ذوب برف در سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به ترتیب به مقدار ۱۹ و ۳/۳ درصد بوده است. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل شامل آهنگ کاهش دما، دمای بحرانی، زمان تأخیر، فاکتور درجه-روز، ضرایب X و Y، ضریب رواناب بارش و ضریب رواناب برف نشان داد که پارامترهای ضریب رواناب باران و X از تأثیرگذارترین پارامترها هستند. تأثیر دما و بارندگی بر فرآیند رواناب نیز در ماه‌های مختلف متفاوت ثبت شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۷/۱	
واژه‌های کلیدی: حوضه کوهستانی، سیلاب، مدل هیدرولوژیکی، منابع آب، نوسانات اقلیمی.	

استناد: محمدی، پروا؛ ابراهیمی، کیومرث؛ بذرافشان، جواد (۱۴۰۱). تأثیر افزایش دما بر ذوب برف و رواناب رودخانه در ماه‌های گرم سال و تحلیل متغیرهای اقلیمی در حوضه تهر، ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۷)، ۱۶۲۴-۱۶۱۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339312.669213>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

برف یکی از انواع مهم بارش در چرخه هیدرولوژیکی است و بخش قابل توجهی از بارش‌ها در ارتفاعات حوضه‌های آبریز به شکل برف می‌باشد. ذوب برف، رطوبت خاک و ذخیره آب زیرزمینی و منابع آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها را تامین کرده و نقش مهمی در ایجاد رواناب سطحی ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر گرم شدن کره زمین نیز باعث افزایش رواناب حاصل از ذوب برف شده است. بنابراین پایش رواناب ناشی از ذوب برف از اهمیت بسیار بالایی در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی، طراحی سازه‌های آبی و مخازن سدها برخوردار است (HassanPour Darvishi and Ebrahim, 2014). به نحوی که برآورد و ارزیابی صحیح رواناب ناشی از ذوب برف برای پیش‌بینی سیلاب و مدیریت مخازن امری ضروری است. از طرفی با توجه به اینکه در بیشتر حوضه‌ها آمار و اطلاعات برف‌سنجی در دسترس نیست و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در این مناطق متناسب با اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی نیست، بنابراین، ضرورت استفاده از روش‌های غیرمستقیم، مانند تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از مدل‌های بارش رواناب ذوب برف برای ارزیابی سهم میزان ذوب برف در مدیریت سیلاب حائز اهمیت است. در این میان یکی از کاربردی‌ترین مدل‌های بارش رواناب ذوب برف، مدل SRM (Snowmelt Runoff Model) است. SRM یک مدل هیدرولوژیکی، مفهومی و تجربی بر اساس روش درجه-روز است. در این مدل عواملی چون اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی و دقت اطلاعات اولیه مدل، دارای اهمیت می‌باشند (Fattahi et al., 2011). Tekeli et al. (2005) در تحقیقی به منظور مدل‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در بالادست حوضه آبریز فرات از منحنی‌های پوشش برف و تصاویر ۸ روزه مودیس استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب ناشی از برف منطقه دارد. (Birodian and Jandaghi, 2006) به برآورد رواناب ذوب برف با مدل SRM در حوضه آبریز زیارت در استان گلستان پرداختند. ایشان از داده‌های میدانی تعدادی از نقاط برای سطح پوشش برف (Snow Cover Area: SCA) استفاده و گزارش کردند که برآورد دبی و سیلاب‌های ناشی از ذوب برف با این مدل عملکرد خوبی داشته است. در تحقیق دیگری (Artimani et al., 2019) شبیه‌سازی ذوب برف را با استفاده از مدل‌های SRM و HBV انجام دادند. نتایج تحقیق ایشان داد مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف به دلیل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نسبت به مدل HBV عملکرد بهتری داشته است. (Raeisi et al., 2021) برای برآورد رواناب ناشی از ذوب برف از مدل SRM در حوضه بهشت‌آباد استفاده کردند. نتایج حاکی از این بود که مدل SRM با استفاده از داده‌های سطح پوشش برف MODIS می‌تواند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب برف در حوضه مورد مطالعه به کار رود. همچنین تحقیقات Dey et al., (1989)، (Chelamallu et al., 2014)، (Karandish et al., 2016)، (Hayat et al., 2019) و (Pangali Sharma et al., 2020) و (Aalinejad and Jahanbakhsh Asl, 2021) نیز عملکرد مناسب مدل SRM را در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف تایید کرد. علاوه بر موارد ذکر شده تعداد نسبتاً زیادی پارامتر وجود دارند که می‌توانند بر شبیه‌سازی مدل مؤثر باشند، میزان تأثیر هر یک از این عوامل متفاوت است که با درک صحیح و دقیق از مقدار تأثیر هر یک از آن‌ها بر مدل‌سازی می‌توان به شرایط قابل اعتمادی از شبیه‌سازی دست یافت تا بتوان تصمیم درست و منطقی اتخاذ کرد. تحلیل حساسیت عملکرد یک مدل هیدرولوژیکی را در زمینه‌های هیدرواقليمی و فیزیوگرافی مربوط به خود بررسی می‌کند و درانتخاب تأثیرگذارترین پارامترها و اهمیت تک آن‌ها برای خروجی مدل نهایی کمک می‌کند (Hamby, 1994). به تحقیقات انجام شده در مورد تحلیل حساسیت می‌توان به (Li and Williams, 2008)، (Golshan et al., 2015)، (Rashidi et al., 2017)، (Mohammadi Ghaleni and Ebrahimi, 2019)، (Jin et al., 2019) و (Almasi et al., 2020) و (Mousavi et al., 2020) و (Ouatiki et al, 2020) می‌توان اشاره کرد. (Goudarzi, 2015) تحلیل حساسیت چهار پارامتر ضریب درجه-روز، دمای بحرانی، ضریب رواناب برف و باران مدل SRM را بررسی کرد. نتایج نشان‌دهنده حساسیت کمتر دمای بحرانی به افزایش و کاهش در میان پارامترهای دیگر بوده است. (Mohammadi, 2013) در تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SRM، پارامترهای ضریب رواناب برف و باران، فاکتور درجه-روز و درجه حرارت بحرانی را به مقدار ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش و کاهش داد. نتایج نشان داد که مدل نسبت به تغییرات درجه حرارت بحرانی حساسیت کمتری دارد.

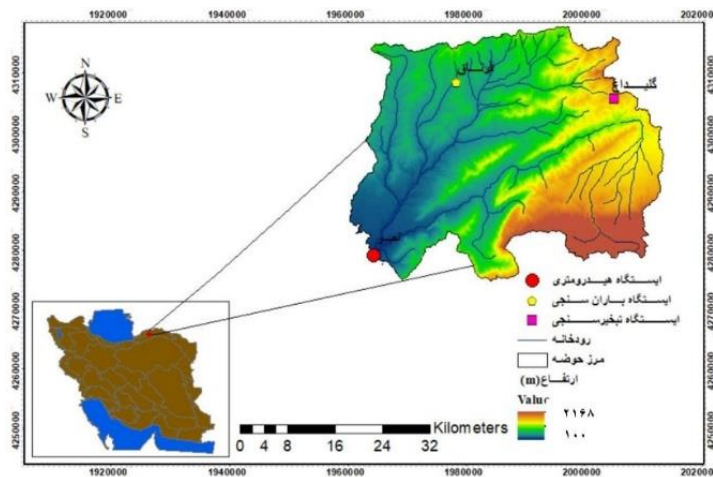
با توجه به اهمیت دما و سطح پوشش برف در دقت شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی ذوب برف، در تحقیقات ذکر شده‌ی بالا، بجز (Aalinejad and Jahanbakhsh Asl, 2021) در سایر تحقیقات برای محاسبه سطح پوشش برف، از تصاویر هشت روزه مودیس استفاده کرده‌اند. استفاده از تصاویر هشت روزه می‌تواند به نوبه خود احتمال خطا و کاهش دقت شبیه‌سازی مدل SRM را افزایش دهد. بنابراین در تحقیق حاضر جهت اجتناب از خطای ذکر شده از تصاویر روزانه سطح پوشش برف در سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) که دارای دقت بالایی می‌باشد استفاده شد. همچنین در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر سهم برف در افزایش رواناب حوضه تمر از استان

گلستان پرداخته شد. در بیشتر تحقیقات انجام شده، تحلیل حساسیت برخی از پارامترهای مدل مانند (ضریب درجه - روز، دمای بحرانی، ضریب رواناب برف و باران) انجام شده است. در این تحقیق علاوه بر پارامترهای مدل به بررسی حساسیت متغیرهای اقلیمی نیز پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز تمر یکی از زیرحوضه‌های، حوضه گرگانود است که دارای رخدادهای سیلابی شدید و فراوان بوده و در شمال کشور و در استان گلستان واقع شده است. حوضه آبریز تمر در بالا دست سد بوستان در شرق استان گلستان با مساحت ۱۵۵۸ کیلومتر مربع در سرشاخه‌های کوهستانی گرگانود قرار گرفته است. این حوضه بین طول‌های $55^{\circ}26'30''$ تا $56^{\circ}05'35''$ شرقی و عرض‌های $25^{\circ}37'5''$ تا $27^{\circ}47'33''$ شمالی قرار دارد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز تمر

روش انجام پژوهش

به منظور محاسبه رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از مدل SRM ابتدا داده‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه شامل بارش، دما و دبی از سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد. سپس برای تهیه داده‌های سطح پوشش برف روزانه به عنوان ورودی مدل SRM، با استفاده از نقشه DEM منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS، مرز، مساحت و مناطق ارتفاعی حوضه محاسبه و به سامانه گوگل ارث انجین وارد شد. در مرحله بعد تصاویر پوشش برف روزانه از سنجنده مودیس برای سال‌های آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ استخراج شد. سپس مساحت پوشش برف در مقیاس روزانه محاسبه و جهت شبیه‌سازی رواناب ذوب برف به مدل SRM معرفی شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، تحلیل حساسیت پارامترهای بهینه و متغیرهای اقلیمی انجام شد.

داده‌های مشاهداتی

به منظور تهیه داده‌های مورد نیاز از آمار ایستگاه هیدرومتری تمر واقع در خروجی حوضه و ایستگاه باران‌سنجی قرناق و تبخیرسنجی گلیداغ در سال‌های آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ استفاده شد (جدول ۱). در این حوضه متوسط بارندگی ۴۹۶ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۸ درصد، حداکثر ارتفاع ۲۱۶۸ متر و حداقل ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	ارتفاع از سطح دریا (m)	میانگین پارامتر
تمر	هیدرومتری	۳۶۷۵۸۴	۴۱۵۰۵۰۴	۱۳۲	$1/42 (m^3/s)$
قرناق	باران‌سنجی	۳۸۶۸۹۲	۴۱۷۵۱۵۴	۵۰۰	۴۱۴ (mm)
گلیداغ	تبخیرسنجی	۴۰۷۴۲۹	۴۱۶۵۳۴۱	۱۰۰۰	$14/20 (^{\circ}C)$

گوگل ارث انجین

گوگل ارث انجین به عنوان سامانه‌ای نوپا و بسیار کاربردی توانسته است بسیاری از فرآیندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر تسهیل کند. این سامانه به دلیل رایگان بودن، صرفه‌جویی در وقت و هزینه برای دانلود تصاویر ماهواره‌ای، تصحیحات لازم، پشتیبانی از فرمت اکثر تصاویر سنجنده‌های مختلف قادر است بیشترین حجم داده را در کمترین زمان در اختیار قرار دهد (Torabi Poodeh et al., 2021; Aalinejad and Jahanbakhsh Asl, 2021). همچنین در این سامانه امکان استخراج اطلاعات منابع آبی مانند مساحت پهنه‌های آبی، بارش باران، سطح پوشش برف، عمق برف، آب زیرزمینی و بسیاری از موضوعات دیگر وجود دارد (Torabi Poodeh et al., 2021). یکی از متغیرهای بسیار مهم در شبیه‌سازی ذوب برف با استفاده از مدل SRM، سطح پوشش برفی روزانه می‌باشد، بیشتر تحقیقات در این زمینه با استفاده از تصاویر هشت روزه پوشش برفی انجام شده است که یک منبع خطا در مدل مورد نظر است. در تحقیق حاضر سطح پوشش برف روزانه با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در گوگل ارث انجین استخراج شد.

مدل SRM

مدل SRM یک مدل درجه روز است، این مدل برای محاسبه جریان ناشی از ذوب برف و بارش باران استفاده می‌شود. محاسبه میزان رواناب تولید شده با استفاده از معادله شماره ۱ انجام می‌شود (Rango and Martince, 1998):

$$Q_{n+1} = \{[C_{Sn} a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] A(10000/86400)(1 - k_{n+1})\} + Q_n k_{n+1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Q: متوسط دبی روزانه بر حسب متر مکعب در ثانیه، C_S: ضریب رواناب برف، C_R: ضریب رواناب باران، a: فاکتور درجه روز بر حسب سانتی‌متر بر درجه سانتیگراد بر روز، T: تعداد درجه روز بر حسب سانتیگراد روز، ΔT: تعدیل دما با استفاده از گرایان دما به محل متناظر متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوضه بر حسب سانتیگراد روز، S: پوشش نسبی برف، P: بارش مولد رواناب بر حسب سانتی‌متر، A: مساحت ناحیه ارتفاعی مورد نظر بر حسب کیلومتر مربع و n: توالی روزها در طی دوره شبیه‌سازی و K: ضریب فروکش جریان که نشان‌دهنده نرخ کاهش دبی در یک دوره زمانی بدون تأثیر برف می‌باشد. پارامترهای مذکور می‌تواند با اندازه‌گیری یا بر اساس نظر کارشناسی و با استفاده از خصوصیات حوضه، روابط فیزیکی، تجربی و یا روابط همبستگی محاسبه شوند (McCuen, 1998). یک پارامتر بسیار مهم در مدل SRM، ضریب فروکش است زیرا (1-k) قسمتی از ذوب روزانه می‌باشد که بلافاصله به رواناب اضافه می‌گردد. معمولاً آنالیز داده‌های دبی اندازه‌گیری شده قبلی یک روش خوبی برای تعیین k است. در این روش مقادیر Q_n در مقابل Q_{n+1} (در مواقعی که هیدروگراف جریان حالت فروکش می‌باشد)، رسم می‌گردد. باید توجه داشت که k ثابت نیست و با کاهش k مقدار دبی افزایش می‌یابد (DeWalle et al., 2008).

$$K_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در رابطه بالا x و y ضرایب ثابت هستند و برای هر حوضه بر اساس داده‌های تاریخی تعیین می‌گردد. در معادله بالا توان منفی نشان‌دهنده فروکش جریان بوده و لذا مقادیر x و y باید مثبت باشند.

ارزیابی دقت مدل SRM

جهت ارزیابی دقت رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل از ضریب تبیین (R^۲) رابطه ۲ و تفاضل حجمی (D_V) رابطه ۳ استفاده شد (Zhang et al., 2018; Karimi et al., 2016).

$$R^2 = \frac{(\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}) \sum(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim}))^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$D_V[\%] = \frac{V_R - \hat{V}_R}{V_R} \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه (۲): Q_{obs} رواناب مشاهداتی، Q_{sim} رواناب شبیه‌سازی شده، Q̄_{obs} متوسط رواناب مشاهداتی و Q̄_{sim} متوسط رواناب شبیه‌سازی شده می‌باشد. در رابطه (۳) نیز V_R حجم رواناب مشاهداتی سالانه، V̂_R حجم رواناب شبیه‌سازی شده سالانه می‌باشد (Rango and Martince, 1998).

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت ابزار قدرتمندی است که به تدقیق مدل‌سازی کمک‌قابل توجهی می‌کند تا ارتقاء عملکرد یک مدل هیدرولوژیکی خاص

را با امکان شناسایی اهمیت هر یک از پارامترها فراهم کند. در تحقیق حاضر، تحلیل حساسیت مدل SRM با استفاده از رویکرد یک در یک زمان (ONE-AT-A-TIME: OAT) به عنوان معیار حساسیت که شامل تغییر مکرر یک پارامتر در یک زمان می‌باشد در حالی که بقیه پارامترها را روی مقادیر بهینه خود ثابت نگه می‌دارد انجام شد (Ouatiki et al., 2020; Hamby, 1994). بدین منظور ارزیابی تحلیل حساسیت با استفاده از پارامترهای مدل و متغیرهای اقلیمی در نظر گرفته شد. پارامترهای مدل شامل آهنگ کاهش دما (Laps rate)، دمای بحرانی (T_c)، زمان تأخیر (T_{Lag})، فاکتور درجه-روز (AN)، ضرایب X و Y ، ضریب رواناب بارش (C_r) و ضریب رواناب برف (C_s) انتخاب شدند که با افزایش و کاهش ۵۰ و ۱۰۰ درصدی پارامترها و مقایسه مقادیر رواناب خروجی مدل با حالت بهینه، تحلیل حساسیت هر پارامتر بررسی شد (Rashidi et al., 2017). جهت تحلیل حساسیت متغیرهای اقلیمی شامل، دما، بارش و سطح پوشش برف انتخاب شدند. با توجه به اینکه SCA به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش دما ۲ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین نمی‌توان تغییر دما و سطح پوشش برف (Snow Cover Area: SCA) را مستقل از یکدیگر دانست. لذا تحلیل حساسیت مدل بر اساس افزایش یک و دو درجه سانتیگراد دما و همچنین افزایش و کاهش ۱۰ درصدی بارش بررسی شد (Jin et al., 2019).

برای ارزیابی تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و متغیرهای هیدرولوژیکی، از معیار (Nash Sutcliff Efficiency: NSE) استفاده شد (رابطه ۴). این شاخص آماری به عنوان یکی از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای ارائه اطلاعات قابل اعتماد در مورد مناسب و قابل قبول بودن نتایج پیشنهاد شده است (Legates and McCabe, 1999) این پیشنهاد توسط مطالعات متعدد مرتبط با مدل‌سازی هیدرولوژیکی تأیید شده است (Moriassi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن Q_i^{obs} رواناب مشاهداتی، Q_i^{sim} رواناب شبیه‌سازی شده، \bar{Q}^{obs} رواناب متوسط مشاهداتی برای کل دوره و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

نتایج و بحث

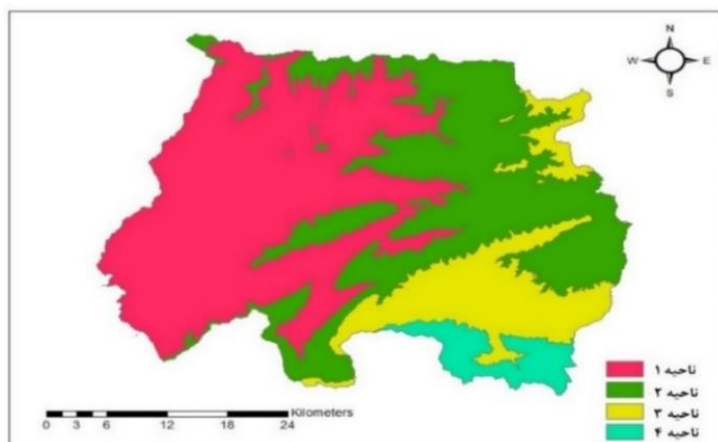
همانطور که پیش از این اشاره شد، منطقه مورد مطالعه به چهار ناحیه ارتفاعی تقسیم شد. در جدول ۲ نتایج محاسبات مناطق ارتفاعی ارائه شده است. مطابق جدول ۲ بیشترین مساحت حوضه متعلق به ناحیه اول به میزان ۴۶ درصد است که در تراز ۱۰۰ تا ۶۱۳ متری قرار گرفته است. کمترین مساحت نیز مربوط به ناحیه چهارم می‌باشد که ۵ درصد مساحت حوضه را شامل شده است. همچنین ۲۰ درصد از محدوده حوضه بالاتر از ارتفاع ۱۱۲۰ متری از سطح دریا قرار دارد که نشان می‌دهد این اراضی در منطقه کوهستانی با پستی و بلندی زیاد واقع شده‌اند. در شکل ۲ نقشه نواحی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج محاسبات هیپسومتریک منطقه مورد مطالعه

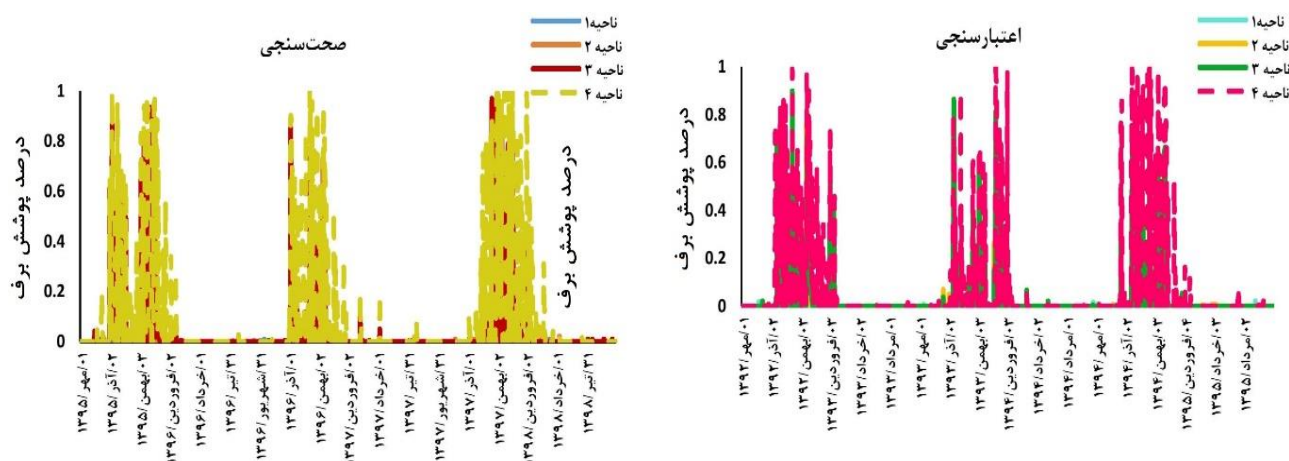
شماره ناحیه	ناحیه ارتفاعی (m)	مساحت (km^2)	درصد مساحت (%)	ارتفاع متوسط (m)
ناحیه ۱	۶۱۳-۱۰۰	۷۱۶/۰۷۳	۴۶	۴۰۴/۳۳
ناحیه ۲	۱۱۱۹-۶۱۴	۵۳۳/۸۹	۳۴	۸۳۵/۶۴
ناحیه ۳	۱۶۱۳-۱۱۲۰	۲۳۴/۵۷	۱۵	۱۲۶۱/۰۲
ناحیه ۴	۱۶۱۴-۲۱۶۸	۷۳/۳۵	۵	۱۷۸۴/۵۹

در شکل ۳، منحنی سطح پوشش برف برای چهار ناحیه ارتفاعی ذکر شده در سال‌های آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۳ جهت واسنجی و سال‌های آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ برای صحت‌سنجی ارائه شده است. در این شکل درصد پوشش برف برای تمامی روزها اعدادی بین صفر و یک است. این داده‌ها به صورت روزانه و با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در سامانه گوگل ارث انجین تهیه شد. مطابق شکل ۳ می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع حوضه، گستره سطح پوشش برف افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین مساحت پوشش برفی برای ناحیه سوم و چهارم در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با ۲۸ و ۲۸/۸ درصد و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۴۵/۸ و ۳۰/۲ درصد می‌باشد. همچنین سطح پوشش برف از اواخر آبان ماه با کاهش دما، روند افزایشی داشته و در مرحله واسنجی در دی ماه به بیشترین مقدار خود در ناحیه سوم (۲۸ درصد) و ناحیه چهارم (۲۸/۸ درصد) رسیده است. نتایج نشان داد در مرحله صحت‌سنجی

بهمن ماه بیشترین درصد را در ناحیه سوم (۴۵/۸ درصد) و در ناحیه چهارم (۳۰/۲ درصد) به خود اختصاص داده است (جدول ۳).



شکل ۲. نقشه نواحی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. منحنی پوشش برف در مناطق ارتفاعی

جدول ۳. درصد سطح پوشش برف ناحیه سوم و چهارم

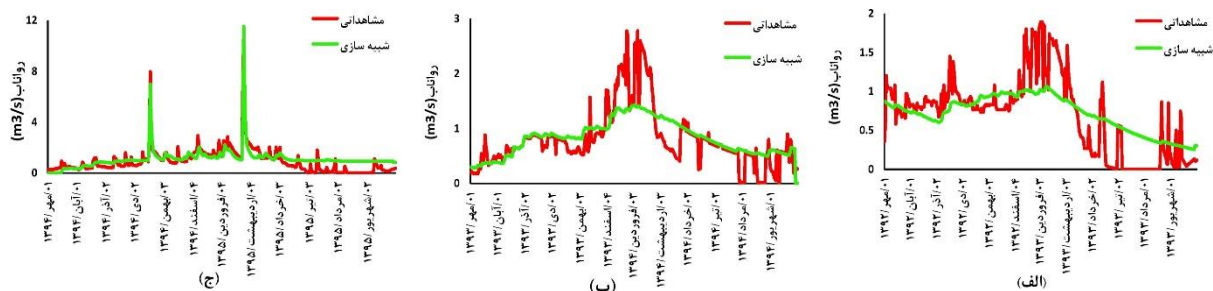
ماه	واسنجی		صحت سنجی	
	ناحیه سوم	ناحیه چهارم	ناحیه سوم	ناحیه چهارم
آبان	۱/۳	۲/۳	۰/۱	۰/۵
آذر	۲۷/۵	۲۱	۲۰/۷	۱۹/۴
دی	۲۸	۲۸/۸	۱۷/۳	۲۳/۶
بهمن	۲۵/۸	۲۸	۴۵/۸	۳۰/۲
اسفند	۱۳/۲	۱۴/۵	۱۲/۸	۱۹/۴
فروردین	۴	۵/۲	۲/۸	۵/۷

نتایج ارزیابی مدل SRM در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج بالاترین ضریب تبیین به میزان ۰/۷۲ مربوط به سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ با درصد خطای حجمی ۱۸/۲۵- می‌باشد. همچنین این ضریب از ۰/۵۱ تا ۰/۷۲ متغیر بوده که نشان می‌دهد مدل توانایی قابل قبولی را در شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در این حوضه داشته است. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج (Birodian and Jandaghi, 2006) که در حوضه زیارت به مطالعه پرداخته‌اند، همخوانی دارد. در شکل ۴ و ۵، شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضه تمر در دوره واسنجی و صحت‌سنجی با مدل SRM آورده شده است. در شکل‌های ۴ (ب و ج) و شکل ۵ (ر) افزایش قابل توجه میزان رواناب در گذر از بهمن ماه به فروردین ماه مشاهده شد که به ترتیب این افزایش در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ (شکل ۴-ب) از ۹/۷

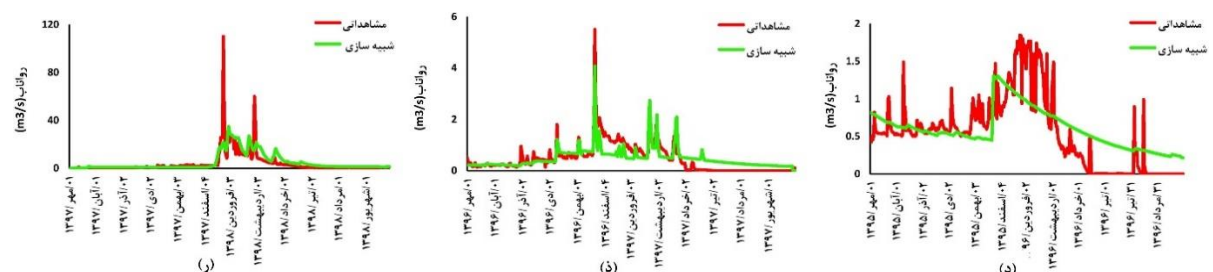
به ۱۳/۸ درصد، در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴ (شکل ۴-ج) از ۹/۱ درصد به ۱۶/۷ درصد و در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ (شکل ۵-ر) از ۱/۸ به ۳۹/۱ درصد رسیده است. در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ (شکل ۴-د) اوج ذوب برف مربوط به گذر از بهمن ماه به اسفند ماه به میزان ۹/۳ به ۱۵/۵ درصد بوده است که این نکته که با کاهش دما در اواخر پاییز و اوایل زمستان بیشتر بارش‌ها بصورت برف بوده و به دلیل کاهش دما ذوب برف اتفاق نمی‌افتد لذا رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل کمتر از رواناب واقعی برآورد می‌شود. این در حالی است که از اواخر فصل بهار رواناب شبیه‌سازی از رواناب مشاهداتی بیشتر برآورد شده است که این امر نیز به دلیل افزایش دما و کاهش سطح پوشش برف در کلیه نواحی ارتفاعی می‌باشد که باعث افزایش خطای محاسباتی در هیدروگراف شبیه‌سازی شده و منجر به افزایش اختلاف تفاضل حجم رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی شده است که با نتایج (Gholizadeh Atani (2014) تطابق دارد. از دلایل دیگر می‌توان به خطا در داده‌های مشاهداتی نیز اشاره کرد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیق (Goudarzi. (2015) و (Dey et al., (1989) که به عدم تطابق دبی‌های حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اشاره و بیان کردند این ضعف ناشی از اشتباهات در داده‌های مشاهداتی می‌باشد و نمی‌توان گفت که مدل در برآورد دبی‌های حداکثر ناتوان است همخوانی دارد.

جدول ۴. نتایج ارزیابی شبیه‌سازی رواناب ذوب برف حوضه تمر با مدل SRM

سال	حجم رواناب مشاهداتی (میلیون متر مکعب)	حجم رواناب محاسباتی (میلیون متر مکعب)	میانگین دبی مشاهداتی (متر مکعب بر ثانیه)	میانگین دبی محاسباتی (متر مکعب بر ثانیه)	درصد خطای حجمی (درصد)	ضریب تعیین دبی مشاهداتی و محاسباتی (بی‌بعد)
۱۳۹۲-۱۳۹۳	۲۱/۸۰	۲۲/۶۴	۰/۶۹	۰/۷۲	-۲/۸۵	۰/۵۲
۱۳۹۳-۱۳۹۴	۲۵/۳۰	۲۶	۰/۸۰	۰/۸۲	-۲/۷۸	۰/۵۶
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۲۹/۲۹	۳۴/۶۴	۰/۹۳	۱/۰۹۸	-۱۸/۲۵	۰/۷۲
۱۳۹۵-۱۳۹۶	۱۶/۶۳	۱۸/۱۴	۰/۵۳	۰/۵۸	-۹/۰۳	۰/۵۵
۱۳۹۶-۱۳۹۷	۱۴/۵۴	۱۵/۴۱	۰/۴۶	۰/۴۹	-۶	۰/۶۵
۱۳۹۸-۱۳۹۷	۱۱۹/۶۳	۱۴۵/۷۹	۳/۷۹	۴/۶۲	-۲۱/۸۷	۰/۵۱



شکل ۴. رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی با مدل SRM در دوره واسنجی



شکل ۵. رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی با مدل SRM در دوره صحت‌سنجی

مدل SRM این قابلیت را دارد که رواناب حاصل از ذوب برف و رواناب حاصل از بارش را از هم تفکیک کند. در حوضه‌های کوهستانی مرتفع ذوب برف سهم عمده‌ای از رواناب را شامل می‌شود و در مناطق کم ارتفاع‌تر بارندگی عامل اصلی ایجاد رواناب است. سهم رواناب حاصل از ذوب برف و رواناب ناشی از باران در حوضه تمر در جدول ۵ آورده شده است. مطابق جدول بیشترین درصد ذوب

برف به میزان ۱۹ درصد در سال ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و همچنین کمترین درصد ذوب برف به میزان ۳/۳ درصد مربوط به سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ می‌باشد. به دلیل ارتفاع کمتر حوضه تمر ذوب برف سهم کمتری نسبت به بارش در ایجاد رواناب در این حوضه داراست. براساس نتایج، ذوب برف سهم کمتری در ایجاد رواناب نسبت به بارش داشته است. این نتایج با نتایج (۲۰۱۶) Okhovat و (۲۰۱۴) Gholizadeh و Atani همسو نمی‌باشد که دلیل آن را می‌توان به تفاوت خصوصیات بارش، دما و ارتفاع کمتر منطقه مورد مطالعه نسبت داد.

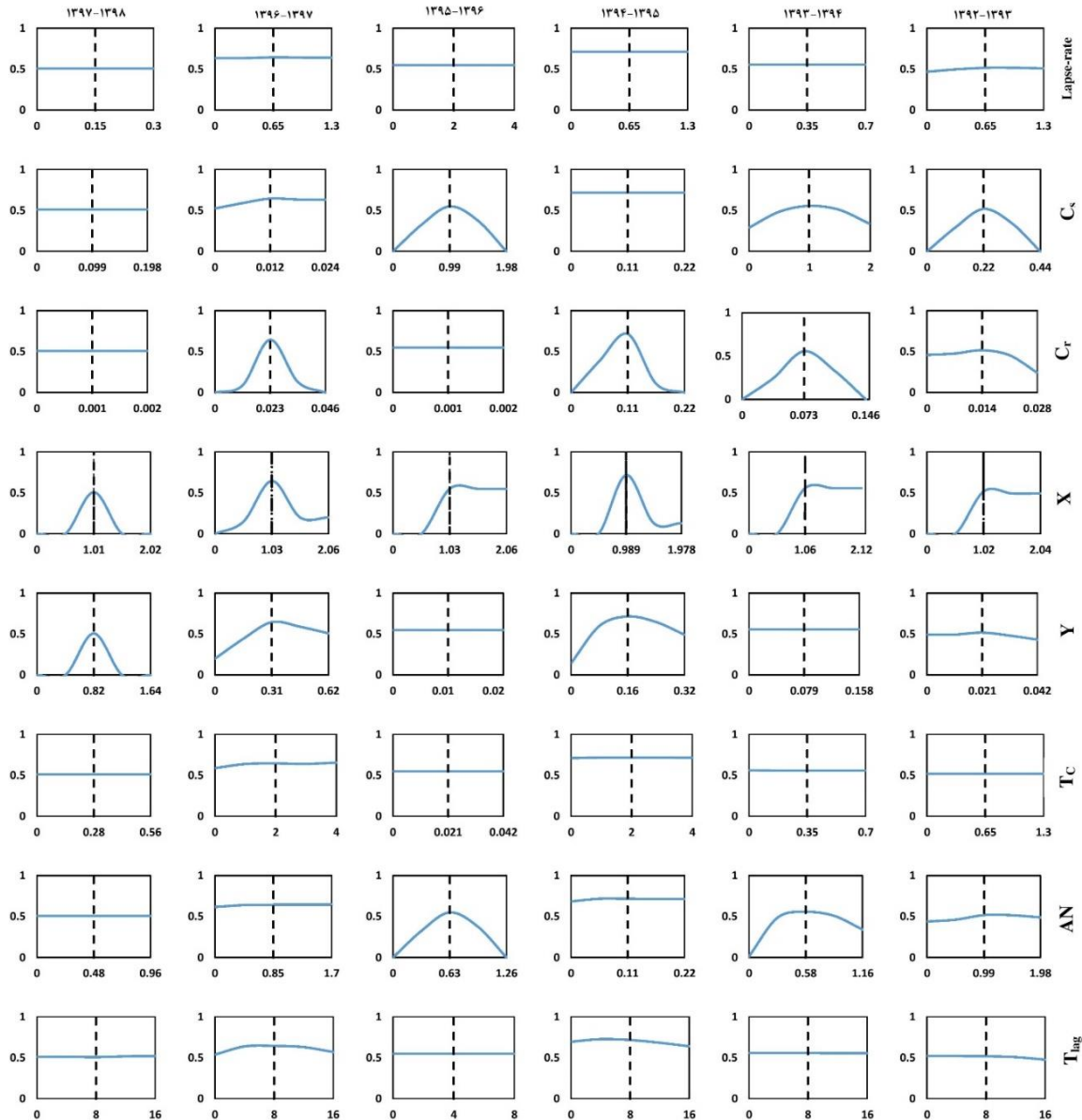
جدول ۵. درصد رواناب باران و برف از کل رواناب تولیدشده

سال	رواناب بارش (سانتی‌متر)	درصد رواناب بارش	رواناب برف (سانتی‌متر)	درصد رواناب برف
۱۳۹۳-۱۳۹۲	۳۳/۰۹	۹۴/۲	۲/۰۵	۵/۸
۱۳۹۴-۱۳۹۳	۳۱/۳۴	۸۱	۷/۳۵	۱۹
۱۳۹۵-۱۳۹۴	۴۹/۳	۹۲/۸	۳/۸۱	۷/۲
۱۳۹۶-۱۳۹۵	۲۹/۲۴	۸۲/۲	۶/۳۳	۱۷/۸
۱۳۹۷-۱۳۹۶	۳۲/۴۳	۸۸/۵	۴/۲	۱۱/۵
۱۳۹۸-۱۳۹۷	۳۳/۴	۹۶/۴	۱/۱۳	۳/۳

تحلیل حساسیت

تجزیه و تحلیل حساسیت برای تعیین کمیت اثر هر پارامتر بر روی عملکرد مدل SRM انجام شد. این تجزیه و تحلیل با تغییر یک پارامتر در یک زمان انجام و درجه تأثیر هر پارامتر با توجه به تغییرات در NSE ارزیابی شد. نتایج تحلیل حساسیت در شکل ۶ ارائه شده است که در آن تغییرات در مقادیر پارامتر در مقابل تغییرات در مقادیر NSE ترسیم شده است. از شکل ۶ مشخص است که یک تغییر سال به سال مهم در رفتار مدل بسته به تغییرات تک پارامتر وجود دارد. به طور کلی، اکثر پارامترها تا حدی بر شبیه‌سازی مدل تأثیر می‌گذارند و به پارامتر و سال هم بستگی دارد (به شکل ۶ رجوع شود). در نتایج تحلیل حساسیت، مشاهده شد که پارامترهای T_c و T_{lag} کنترل عمده‌ای بر عملکرد مدل در بیشتر سال‌ها نداشته‌اند. در سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ افزایش مقدار پارامتر T_{lag} منجر به کمترین مقدار NSE شد و در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ نیز با فاصله گرفتن از نقطه بهینه (هم کاهش و هم افزایش) مقدار NSE روندی کاهشی را از خود نشان داد. برای پارامتر T_c بجز سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ که افزایش مقادیر پارامتر T_c منجر به افزایش در مقدار NSE شد در دیگر سال‌های مطالعاتی تغییری مشاهده نشد. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه‌ای که توسط (Mohammadi 2013) و (Goudarzi 2015) با استفاده از مدل ذوب برف SRM انجام پذیرفت، همخوانی داشته که حساسیت مدل SRM به این پارامتر از پارامترهای دیگر کمتر می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای C_s ، Y و AN در برخی از سال‌ها تأثیری بر پاسخ مدل نداشته‌اند در حالی که در سال‌های دیگر تأثیر بیشتری نشان دادند. در بیشتر این سال‌ها، هر سه پارامتر با افزایش مقادیر پارامترها تمایلات کلی کاهش NSE را نشان دادند. پارامتر C_s در سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷ تا حدی بدون تأثیر بوده است. این پارامتر در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ با افزایش مقدار پارامتر مقدار NSE افزایش پیدا کرده است اما در ۱۳۹۲-۱۳۹۳، ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و ۱۳۹۵-۱۳۹۴ تغییر در مقدار پارامتر باعث کاهش مقدار NSE نسبت به مقدار بهینه شده است. در مورد پارامتر Y در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۳، ۱۳۹۵-۱۳۹۴ و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ با افزایش مقدار پارامتر NSE کاهشی بوده در مقابل با کاهش پارامتر نسبت به مقدار پارامتر در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ تغییری مشاهده نشده است. ولی برای سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۵ و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ با فاصله گرفتن از مقدار بهینه پارامتر مقدار NSE روندی کاهشی داشته است. در این خصوص در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بر اساس نمودار کاملاً مشخص است که با تغییر در مقدار پارامتر مقدار NSE به شدت کاهشی شده و به کمترین مقدار خود رسیده است. برای پارامتر AN در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ با افزایش مقدار پارامتر، افزایش اندکی در مقدار NSE مشاهده شده است ولی در سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۳، ۱۳۹۵-۱۳۹۶ این مقدار کاهشی بوده است تغییر در این پارامتر در مابقی سال‌های مورد مطالعه بدون تأثیر بوده است. در این میان تغییر در پارامترهای C_r و X بیشترین تأثیر را در میزان NSE داشته است. برای پارامتر C_r این مقدار در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷ بدون تأثیر بوده است ولی در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ با افزایش مقدار پارامتر مقدار NSE روندی کاهشی پیدا نموده است ولی در مابقی سال‌ها بیشترین مقدار NSE در مقدار بهینه بوده است ولی در تغییر در مقدار پارامتر (افزایشی یا کاهشی) این میزان به شدت روند کاهشی به خود گرفته است. در خصوص پارامتر X در طی سال‌های متوالی روند تغییرات یکسان نبوده به نحوی که برای سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۳، ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و ۱۳۹۵-۱۳۹۶ با کاهش مقدار پارامتر مقدار NSE به شدت کاهش یافته ولی با افزایش آن مقدار

NSE در مقایسه با حالت بهینه پارامتر تغییر محسوسی نداشته است. برای سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴، ۱۳۹۷-۱۳۹۶ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷ بیشترین مقدار NSE در نقطه بهینه پارامتر مشاهده شده است و با تغییر در مقدار پارامتر مقدار NSE بشدت روندی کاهشی داشته است. مطالعات متعددی نشان دادند که پارامترهای C_r و X یکی از تأثیرگذارترین پارامترها هستند (Mohammadi, 2013)



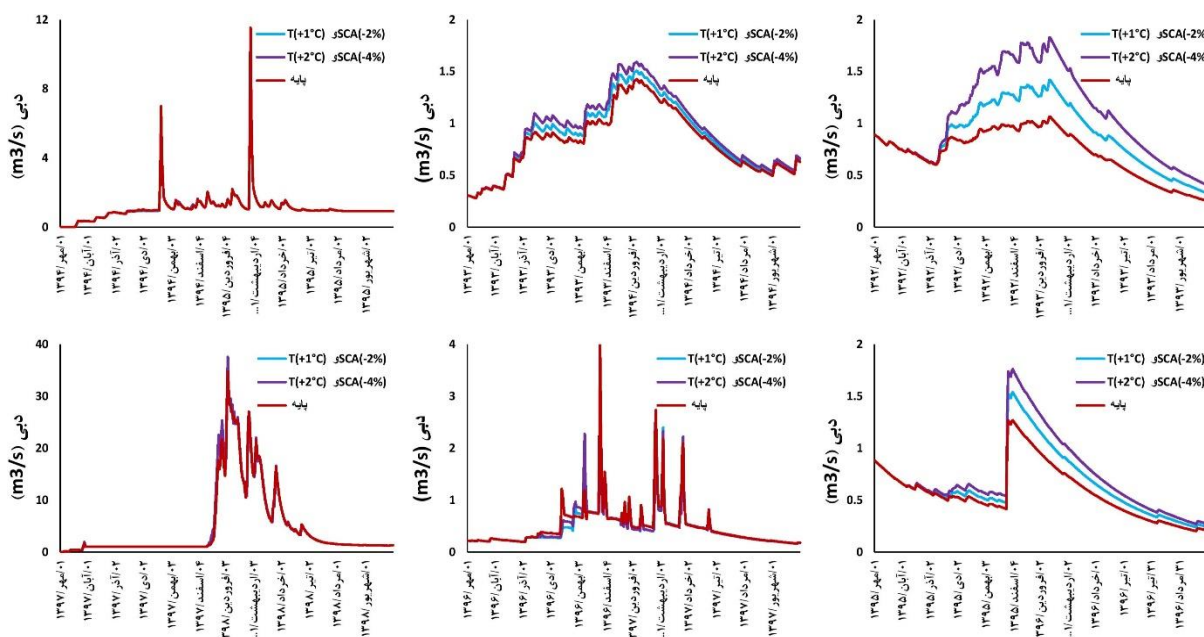
شکل ۶. حساسیت مدل به تغییرات مقادیر پارامتر طبق NSE (خط چین‌ها نشان‌دهنده مقادیر پارامتر بهینه به دست آمده پس از واسنجی)

عوامل اصلی موثر بر مکانیسم هیدرولوژیکی حوضه بارش، دما و برف است و دما تأثیر زیادی بر سطح پوشش برف دارد. سطح پوشش برف به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش دما ۲ درصد کاهش می‌یابد. (Jin et al., 2019). تحلیل حساسیت رواناب تحت سناریوهای تغییر دما- سطح پوشش برف در شکل ۷ آورده شده است. باتوجه به شکل ۷ میزان تغییرات رواناب در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۳، ۱۳۹۳-۱۳۹۴ و ۱۳۹۳-۱۳۹۵، با افزایش دما به میزان ۱ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۲ درصدی سطح پوشش برف و همچنین در حالت افزایش دما به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۴ درصدی سطح پوشش برف قابل توجه بوده است. همانطور که از شکل کاملاً مشخص است در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ میزان رواناب از دی ماه به بعد، به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش دما، ۳۰ درصد و به ازای هر ۲ درجه سانتیگراد افزایش دما، ۶۵ درصد افزایش داشته است. همچنین در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ میزان تغییرات رواناب به ترتیب ۶ درصد و ۱۲ درصد و در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ این افزایش به ترتیب به میزان ۱۹ و ۳۵ درصد بوده است. نتایج حساسیت مدل به تغییر در میزان دما- سطح پوشش برف و بارش در جدول ۶ آورده شده است. هنگامی که تأثیر دما و سطح پوشش برف به عنوان متغیر تغییر بر رواناب در نظر گرفته شد، با افزایش

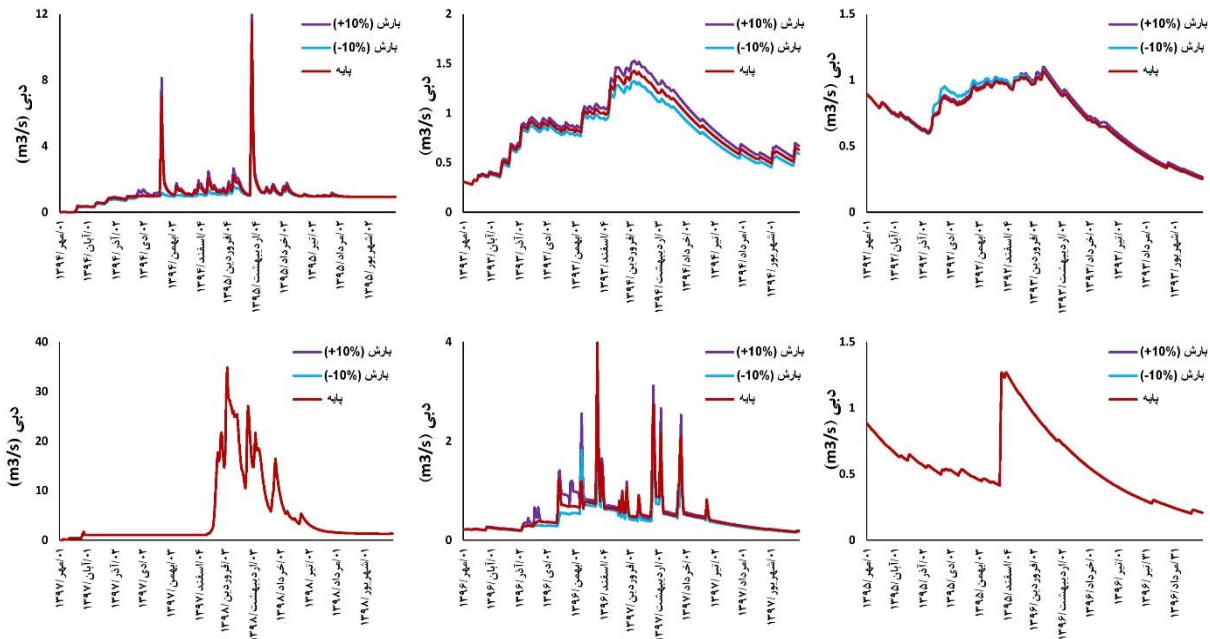
دما به میزان ۱ درجه سانتی گراد و کاهش ۲ درصدی سطح پوشش برف و همچنین در حالت افزایش دما به میزان ۲ درجه سانتی گراد و کاهش ۴ درصدی سطح پوشش برف مقدار رواناب در دو حالت فوق به ترتیب ۲۳ درصد و ۵۰ درصد در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۲ افزایش یافت. در حالی که بیشترین کاهش در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ به ترتیب به میزان ۷ درصد و ۵ درصد مشاهده شد. با این حال، افزایش رواناب عمدتاً در بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت ماه متمرکز شده است (به شکل ۷ رجوع شود). در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ میزان تغییرات رواناب در ماه‌های گرم با افزایش دما به میزان ۱ درجه سانتی گراد و کاهش ۲ درصدی سطح پوشش برف و همچنین در حالت افزایش دما به میزان ۲ درجه سانتی گراد و کاهش ۴ درصدی سطح پوشش برف به ترتیب ۳۲ و ۶۵ درصد افزایش داشته است. همچنین این افزایش میزان رواناب در ماه‌های گرم سال در سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۴ به ترتیب ۴ و ۹ درصد و در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ به ترتیب ۱۹ و ۳۶ درصد بوده است. در شکل ۸ تحلیل حساسیت رواناب تحت سناریوهای تغییر بارش ارائه شده است. در هنگامی که بارش به‌عنوان متغیر تغییر مدل در نظر گرفته شد، با افزایش ۱۰ درصدی بارش مشاهده شد، بیشترین درصد افزایش رواناب در مقایسه با رواناب پایه در سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۴ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ به میزان ۷ درصد بوده است. همچنین با کاهش ۱۰ درصدی بارش، مقدار رواناب در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ بیشترین کاهش را به میزان ۱۳ درصد داشته است. در این راستا بیشترین تأثیر بارش بر رواناب در سال ۱۳۹۴-۱۳۹۳ از اسفند ماه تا شهریور متمرکز و با افزایش و کاهش ۱۰ درصدی بارش تغییرات رواناب نیز، به میزان ۷ درصد افزایش و کاهش داشته است و تقریباً تغییر قابل توجهی در ماه‌های دیگر وجود نداشته است (شکل ۸). نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعه (Jin et al., 2019) همخوانی دارد.

جدول ۶. نتایج حساسیت مدل به تغییر در میزان دما - سطح پوشش برف و بارش

سال	T(+1°C) و SCA(-2%)	T(+2°C) و SCA(-4%)	بارش (+10%)	بارش (-10%)
۱۳۹۳-۱۳۹۲	۲۳	۵۰	۳	۲
۱۳۹۴-۱۳۹۳	۶	۱۲	۶	-۶
۱۳۹۵-۱۳۹۴	-۰/۱	۰/۱	۷	-۱۲
۱۳۹۶-۱۳۹۵	۱۴	۲۶	-۰/۱	-۰/۱
۱۳۹۷-۱۳۹۶	-۷	-۵	۷	-۱۳
۱۳۹۸-۱۳۹۷	۲	۲	۰	۰



شکل ۷. تحلیل حساسیت رواناب تحت سناریوهای تغییر دما - سطح پوشش برف



شکل ۸. تحلیل حساسیت رواناب تحت سناریوهای تغییر بارش

نتیجه گیری

این مطالعه به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از مدل SRM در مقیاس زمانی روزانه و بررسی سهم رواناب حاصل از ذوب برف انجام شد. برای دریافت تصاویر سنجنده مودیس از سامانه گوگل ارث انجین در مقیاس روزانه استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی رواناب محاسباتی و مشاهداتی، در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که با افزایش دما و ذوب برف میزان رواناب در گذر از بهمن ماه به فروردین ماه در سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۴، ۱۳۹۵-۱۳۹۴ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بیشتر بوده است. همچنین در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ اوج ذوب برف مربوط به گذر از بهمن ماه به اسفند ماه بوده است. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل شامل آهنگ کاهش دما (Laps rate)، دمای بحرانی (T_c)، زمان تأخیر (T_{Lag})، فاکتور درجه-روز (AN)، ضرایب X و Y، ضریب رواناب بارش (C_r) و ضریب رواناب برف (C_s) بررسی شد. نتایج نشان داد که هر یک از پارامترهای مدل بر رواناب شبیه‌سازی شده تأثیر داشته‌اند. پارامترهای T_{Lag} و T_c rate تأثیر عمده‌ای بر عملکرد مدل در بیشتر سال‌ها نداشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد مدل به پارامترهای C_r و X حساس‌تر است. از طرفی تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولوژیکی نشان داد اثرات تغییر دما و بارندگی بر رواناب متفاوت است. افزایش دما باعث ذوب شدن ذخایر برفی در ماه‌های بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت ماه شده است.

"هیچ گونه تعرض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Aalinejad, M. H., Jahanbakhsh ASL, S. (2021). Simulation of runoff from Gamasiab basin snowmelt with SRM model. *Isaeh*, 8 (1), 21-36 (In Farsi).
- Almasi, P., Moghaddam Nia, A., Khalighi Sigaroodi, S., Salajeghe, A., Soltani Koopaei, S. (2021). Performance Evaluation of WetSpa Hydrological Model for Runoff Simulation in Semi-arid Climatic Conditions (Case Study: Menderjan Basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 469-482 (In Farsi).
- Artimani, M., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N. (2019). Performance evaluation of SRM and HBV model in simulation of snowmelt runoff in Bujin Basin. *Iran-Water Resources Research*, 15(2), 228-241 (In Farsi).
- Birodian, N., and Jandaghi, N. (2006). Estimation of snowmelt runoff by SRM model and comparison with hydrographic data in Ziarat river basin. *Agricultural Sciences and Natural Resources*, 12 (6), 181-188 (In Farsi).
- Chelamallu, H. P., Venkataraman, G., Murti, M. V. R., Arora, M., & Singh, G. (2014, July). Comparison of SRM and SNOWMOD models using modis snow cover data for Bhagirathi river basin in the Himalayas. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4010-4013). IEEE.

- DeWalle, D. R., & Rango, A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press.
- Dey, B., Sharma, V. K., & Rango, A. (1989). A test of snowmelt-runoff model for a major river basin in western Himalayas. *Hydrology Research*, 20(3), 167-178.
- Fattahi, I., Delavar, M., & Ghasemi, E. (2011). Snow melt runoff simulation in mountainous areas using SRM model (Case study of Bazoft Watershed Area). *Geographic Applied Research Journal* 2(23) (In Farsi).
- Gholizadeh Atani, M. (2014). *Effect of snowmelt runoff in floods using remote sensing techniques in Alamoutrood basin*. Master dissertation, BU-Ali Sina University, Iran (In Farsi).
- Golshan, M., Kavian, A., Ruohani, H., Esmali Ouri, A. (2015). Effect of Scale on SWAT Model Performance in Simulation of Runoff (Case Study: Haraz Catchment in Mazandaran Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2), 293-303 (In Farsi).
- Goudarzi, Sh. (2015). *Snowmelt Runoff Simulation by SRM Snowmelt Model and Satellite Data of MODIS (Case study: Orumia Siminerood Basin)*. Master dissertation, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of mashhad, Iran (In Farsi).
- Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental monitoring and assessment*, 32(2), 135-154.
- HassanPour Darvishi, H., Ebrahimi, H. (2014). Investigation of Snow Impact on Runoff Simulation in Catchment (Case Study: Bar Catchment, Neyshabour). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(4), 857-864 (In Farsi).
- Hayat, H., Akbar, T. A., Tahir, A. A., Hassan, Q. K., Dewan, A., & Irshad, M. (2019). Simulating current and future river-flows in the Karakoram and Himalayan regions of Pakistan using snowmelt-runoff model and RCP scenarios. *Water*, 11(4), 761.
- Jin, H., Ju, Q., Yu, Z., Hao, J., Gu, H., Gu, H., & Li, W. (2019). Simulation of snowmelt runoff and sensitivity analysis in the Nyang River Basin, southeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Natural Hazards*, 99(2), 931-950.
- Karandish, F., Porhemat, J., & Ebrahimi, K. (2016). Determining the basic parameter in snow melt process for estimating flood hydrograph in Karoun basin, *Iranian Water Research Journal*, 10(21), 133. (In Farsi).
- Karimi, H., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., & Miryaghoubzadeh, M. (2016). Comparison of SRM and WetSpa models efficiency for snowmelt runoff simulation. *Environmental earth sciences*, 75(8), 664.
- Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.
- Li, X., & Williams, M. W. (2008). Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China. *Hydrological processes*, 22(19), 3931-3940.
- McCuen, R. H. (1998). Hydrologic analysis and design. Printice-Hall Pub. Inc. NJ, 548.
- Mohammadi Ghalehi, M., & Ebrahimi, K. (2019). Sensitivity analysis of Qual2kw model in the modeling of water quality parameters of Sefidrud. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(5), 1233-1245 (In Farsi).
- Mohammadi, A. (2013). *Assessment of Snowmelt Runoff Modeling (SRM) in Simulation and Forecasting Stream Flow Snowmelt Runoff by Satellite Imagery*. Master dissertation, Campus of Aboureihan Department of Irrigation and Drainage, University of Tehran, Iran (In Farsi).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mousavi, S., Sarmadian, F., Rahmani, A. (2020). Modelling and Prediction of Soil Classes Using Boosting Regression Tree and Random Forests Machine Learning Algorithms in Some Part of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2525-2538 (In Farsi).
- Okhovat, S. (2016). *Snowmelt runoff modeling with SRM and by GIS and RS (Case study of Lar Dam basin)*. Master dissertation, Shahrood University of Technology, Iran (In Farsi).
- Ouatiki, H., Boudhar, A., Ouhinou, A., Beljadid, A., Leblanc, M., & Chehbouni, A. (2020). Sensitivity and Interdependency Analysis of the HBV Conceptual Model Parameters in a Semi-Arid Mountainous Watershed. *Water*, 12(9), 2440.
- Pangali Sharma, T. P., Zhang, J., Khanal, N. R., Prodhan, F. A., Paudel, B., Shi, L., & Nepal, N. (2020). Assimilation of snowmelt runoff model (SRM) using satellite remote sensing data in Budhi Gandaki River Basin, Nepal. *Remote Sensing*, 12(12), 1951.
- Raeisi, M. B., Vafakhah, M., Moradi, H. R. (2021). Comparison of Degree-Day and Radiation base of Snowmelt Runoff Model (SRM) for Estimating Runoff from Snow Melting. *Journal of Watershed*



- Management Research; 12 (23), 1-11 (In Farsi).
- Rango, A., & Martinec, J. (1998). The snowmelt runoff model (SRM) user/s manual, version 4, URL: <http://hydrolab.arsusda.gov/pub/srm/srm4.pdf>.
- Rashidi, M., Haji biglo, M., Sarbazi, M., Ghaderi, M. (2017). Estimation of Snowmelt Runoff in Northern Khorasan Basin by using winSRM Model (Case Study: Darband Samalghan Basin). *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), 159-171 (In Farsi).
- Tekeli, A. E., Akyürek, Z., Şorman, A. A., Şensoy, A., & Şorman, A. Ü. (2005). Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment*, 97(2), 216-230.
- Torabi Poodeh, H., Yousefi, H., Samadi, A., Arshia, A., Shamsi, Z., & Yarahmadi, Y. (2021). Evaluation of snow cover changes trend using GEE and TFPW-MK test (Case Study: Marber Basin-Isfahan). *Iranian journal of Ecohydrology*, 8(1), 195-204 (In Farsi).
- Zhang, X., Qin, X., Xu, C., & Liu, Y. (2018). Simulation of runoff and glacier mass balance and sensitivity analysis in a glacierized basin, North-Eastern Qinhai-Tibetan Plateau, China. *Water*, 10(9), 1259.