



## Comparative study of the performance of two snow models at one of the highest synoptic stations in Iran

Younes Khoshkhoo<sup>1</sup>

1. Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: [y.khoshkho@uok.ac.ir](mailto:y.khoshkho@uok.ac.ir)

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** July. 6, 2024

**Revised:** Aug. 7, 2024

**Accepted:** Aug. 31, 2024

**Published online:** Dec. 2024

**Keywords:**

Snow modeling,  
GLUE technique,  
Snow depth,  
Zarneh Obatou station,  
CoupModel.

### ABSTRACT

In this study, the performance of two empirical and physical snow models at the Zarrineh Obatou synoptic station during the period 1989-2022 was evaluated. To calibrate these models, the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) method was employed by selecting 6 parameters and generating 8000 random vectors from the uncertainty domain of these parameters. The models were then run based on these parameters over the period 1989-2022, using RMSE, MBE, and Nash-Sutcliffe coefficient to identify the best simulations (1% of total simulations). This procedure was also used for model validation, with the models being calibrated based on odd years and validating on even years. The results indicated appropriate performance of both models in simulating snow depth at the Zarrineh station, with the physical model demonstrating better overall performance compared to the empirical model. The results also showed that the best performance of both models occurred during the simulation of moderate snow depths, with both models tending to overestimate light snow and underestimate heavy snow. Sensitivity analysis of models indicated that snow melting processes are key processes in both models. Given the limited measured data on snow in Iran and the necessity of using snow models for various purposes such as estimating past snow and projection of future snow in response to climate change, the overall results of this study suggest that the studied models in this research have a good potential for simulating various snow-related variables in Iran and employing them (especially the physical model) is strongly recommended.

---

Cite this article: Khoshkhoo, Y. (2024). Comparative study of the performance of two snow models at one of the highest synoptic stations in Iran, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (10), 1701-1717.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378978.669748>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378978.669748>

---

## EXTENDED ABSTRACT

### Background and purpose

Snow is one of the most influential components in the hydrological cycle and a determining factor in various climatic, hydrological, and environmental systems. It plays a fundamental role in the exchange of moisture and heat fluxes between the Earth's surface and the atmosphere. In the Earth's climate system, snow is considered as an important indicator in climate change studies due to energy exchanges between the snow surface and the atmosphere. Snow also plays a crucial role in the spatial distribution of water reserves on Earth. Monitoring and observing changes in snow depth and analyzing long-term trends are of great importance. In Iran, very few studies have been conducted on snow depth modeling, leading to a noticeable research gap in this area. To address this research gap in Iran, the present study aims to calibrate and validate two snow models at one of the highest-elevation synoptic stations in Iran.

### Materials and Methods

The Zarrineh-Obatou station in Kurdistan province, with an elevation of 2142m, was selected for this research. In this study, two snow models, both are the sub-models of the CoupModel, were selected. Although both models consider a one-dimensional vertical profile for snow, they differ in complexity. In one model (empirical model), which has a relatively simpler structure, empirical functions dependent on air temperature and solar radiation are used for simulating snowmelt. In the second model (physical model), which has a relatively more complex structure, an energy balance method on the snow surface and within the snowpack is used for snowmelt modeling. The calibration procedure of these models was performed using the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) method with the selection of six parameters. After generating 8000 random vectors from the uncertainty domain of these parameters and running the models based on them for the period 1989-2022, RMSE, MBE, and the Nash-Sutcliffe coefficient indices were used to identify the best simulations (1% of all simulations). The same procedure was also used for model validation, with the models being calibrated based on odd years and validating on even years. Sensitivity analysis of the models was also conducted by plotting the cumulative distribution function of the validated parameters and comparing it with the initial uniform distribution of the parameters.

### Findings

The results show that the GLUE method was able to effectively identify the best simulations among total simulations. Both models demonstrated proper performance in simulating snow depth at the Zarrineh-Obatou station during the period 1989-2022 based on all indices (RMSE, MBE, and Nash-Sutcliffe coefficient). However, the physical model, especially in terms of balancing underestimation and overestimation, exhibited better performance compared to the empirical model. Sensitivity analysis of the models indicated the varying importance of selected parameters, with the models showing higher sensitivity to specific parameters. Parameters related to snowmelt were of high importance in both snow models. Regarding the performance of the models in simulating snow depths ranging from low to high, the results indicated that both models performed best when simulating moderate snow. In simulating light snow, both models tended to overestimate, while in simulating heavy snow, they tended to underestimate.

To improve this issue, in addition to considering the entire study period, it is recommended to directly take the years with heavy and light snow into account as well in calibration process. Furthermore, it is suggested to use the hourly time scale for snow simulation instead of the daily time scale. The results also suggest it is possible to obtain better results from these snow models by measuring other variables like snow density in addition to measuring snow depth, which is the only available snow data in Iran.

### Conclusion

The overall results of this research indicate that the studied models have the potential to effectively simulate various snow-related variables, especially the physical snow model. Since general climate models that project future climatic conditions do not directly include snow in their outputs, it is possible to employ the main outputs of these models (air temperature, precipitation, solar radiation, etc.) and utilizing them as the input of the studied snow models in this research to project snow condition in future periods under different climate change scenarios. This will provide a realistic outlook on the variability of snow in future periods, aiding in optimal water resource management in the country. It is worth mentioning that by utilizing these snow models, it is also possible to estimate snow depths during past periods where snow data have not been accurately measured.

**Author Contributions**

The author contributed to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

**Data Availability Statement**

Data available on request from the author.

**Acknowledgements**

The author would like to thank the the vice chancellor for research affairs of university of Kurdistan for support of the present study.

**Ethical considerations**

The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

**Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

## مطالعه تطبیقی کارایی دو مدل برف در یکی از مرتفع‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک ایران

یونس خوشخو ✉

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: [y.khoshkho@uok.ac.ir](mailto:y.khoshkho@uok.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی	در پژوهش حاضر، کارایی دو مدل برف تجربی و فیزیکی در ایستگاه زرينه اوباتو طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۹ مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت واسنجی این دو مدل که با به‌کارگیری روش عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته (GLUE) انجام شد ۶ پارامتر انتخاب و پس از تولید ۸۰۰۰ بردار تصادفی از دامنه عدم قطعیت این پارامترها و اجرای مدل‌ها بر اساس آنها طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۹، از شاخص‌های RMSE، MBE و ضریب نش-ساتکلیف جهت شناسایی شبیه‌سازی‌های برتر (۱ درصد کل شبیه‌سازی‌ها) استفاده شد. رویکرد فوق جهت فرایند اعتبارسنجی مدل‌ها نیز انجام شد با این تفاوت که مدل‌ها بر اساس سال‌های فرد واسنجی و بر روی سال‌های زوج مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. نتایج حاکی از کارایی مناسب هر دو مدل در شبیه‌سازی عمق برف بود اما مدل فیزیکی در مجموع عملکرد بهتری از خود نشان داد. نتایج همچنین نشان داد بهترین عملکرد هر دو مدل به هنگام شبیه‌سازی عمق برف‌های متوسط رخ داد و در شبیه‌سازی برف‌های سبک، متمایل به بیش‌برآوردی و در شبیه‌سازی برف‌های سنگین متمایل به کم‌برآوردی بودند. تحلیل حساسیت مدل‌های برف نشان داد ذوب برف جزو فرایندهای کلیدی در هر دو مدل محسوب می‌شود. نظر به محدود بودن داده‌های اندازه‌گیری‌شده برف در ایران و همچنین لزوم به‌کارگیری مدل‌های برف جهت مقاصد مثل برآورد برف طی دوره‌های گذشته و پیش‌نگری آن طی دوره‌های آتی در واکنش به تغییرات اقلیمی، نتایج کلی این پژوهش مؤید آن است که مدل‌های مورد بررسی پتانسیل مناسبی جهت شبیه‌سازی متغیرهای مختلف مرتبط با برف دارند و استفاده از این مدل‌ها به ویژه مدل فیزیکی قویاً پیشنهاد می‌گردد.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۴/۱۶	
<b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۵/۱۷	
<b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۶/۱۰	
<b>تاریخ انتشار:</b> دیماه ۱۴۰۳	
<b>واژه‌های کلیدی:</b> مدلسازی برف، روش GLUE، عمق برف، ایستگاه زرينه اوباتو، مدل Coup.	

استناد: خوشخو، ی. (۱۴۰۳) مطالعه تطبیقی کارایی دو مدل برف در یکی از مرتفع‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۰)،

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378978.669748> .۱۷۰۱-۱۷۱۷

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378978.669748>

## مقدمه

برف یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های اثرگذار در سیکل هیدرولوژیکی و یک فاکتور تعیین‌کننده در سامانه‌ها و مدل‌های مختلف اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیطی محسوب می‌شود و در تبدلات مربوط به شارهای رطوبت و گرما بین سطح زمین و اتمسفر نقشی اساسی دارد. در سیستم اقلیمی کره زمین با توجه به مبادلات انرژی بین سطح برف و اتمسفر، برف به عنوان یک شاخص مؤثر در بررسی‌های مربوط به تغییرات اقلیمی مطرح است (Armstrong and Brun, 2008). برف همچنین نقش مهمی در توزیع مکانی ذخایر آب بر روی کره زمین دارد (Li et al., 2018; Wang et al., 2020). بنا بر مطالعات انجام شده، حدود ۱/۷۴ درصد از کل ذخایر آبی جهان و ۶۸/۷ درصد از ذخایر آب شیرین جهان به صورت برف ذخیره می‌شود (Seidel and Martinec, 2004). در بسیاری از مناطق دنیا بخش قابل توجهی از آب مورد نیاز بخش‌های کشاورزی و شرب از طریق ذوب برف تأمین می‌شود (Berg et al., 2024). به عنوان نمونه در غرب ایالات متحده، ۷۰ درصد از آبی که طی فصل‌های بهار و تابستان مورد نیاز است را ذوب تدریجی برف تأمین می‌نماید. چنین برآورد شده است که ارزش اقتصادی این آب بیش از ۳۴۸ میلیارد دلار در سال است (Carroll, 2007). در بسیاری از نقاط جهان، ذوب برف یک منبع اساسی تولید رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی محسوب می‌شود و جهت مدیریت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، عاملی بسیار کلیدی و تعیین‌کننده است (Deng et al., 2017; Pulliainen, 2020). به لحاظ مدیریت منابع آب، برف یک عامل مهم در کنترل سیلاب و فرسایش ناشی از آن، کاهش اثرات زیانبار خشکسالی و تأمین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف شرب، صنعت و کشاورزی به حساب می‌آید (Schilling et al., 2024). از آنجائی که برف یک منبع مهم ذخیره آب طی فصول سرد سال و ذوب و رهاسازی آن طی فصول گرم‌تر سال است اهمیت و برتری ویژه بارش به صورت برف در مقایسه با باران به ویژه در مناطق کوهستانی از آن جهت است که برخلاف باران که خاصیت ذخیره‌شوندگی پایینی دارد برف نقش یک منبع ذخیره آب را دارد و به تدریج طی فصل بهار که نیاز آبی بیشتر است شروع به ذوب شدن می‌کند. با این وجود، همین پدیده ذوب برف در بهار به ویژه در صورتی که با یک بارندگی نیز همراه شود وقوع همزمان این دو عامل می‌تواند سبب ایجاد رواناب شدید و بروز سیلاب گردد. بر این اساس، برآورد میزان برف هم به لحاظ تأمین آب مورد نیاز و هم به لحاظ پیش‌بینی سیلاب‌های بهاره بسیار حائز اهمیت است و یک فاکتور بسیار مهم در مدل‌های بارش - رواناب محسوب می‌شود (گله‌بان و همکاران، ۱۴۰۲؛ Bellinger et al., 2012).

در زمره ویژگی‌های ویژه برف می‌توان از بالا بودن آلبیدوی آن و پایین بودن ضریب هدایت گرمایی آن نام برد. آلبیدوی بالای برف، بیلان انرژی تابشی با طول موج‌های کوتاه و بلند در مقیاس جهانی را به طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهد (Li et al., 2021). برف همچنین به دلیل ضریب هدایت گرمایی بسیار پایین خود، نقش یک لایه عایق حرارتی بین اتمسفر و خاک را طی فصول سرد سال بازی کرده و نرخ نفوذ سرما و یخبندان به داخل خاک را به طور چشمگیری کم می‌کند (Khoshkhoo et al., 2015). این ویژگی برف بر روی رشد گیاهان زمستانه نیز دارای اثر است. از یک سو برف مانع نفوذ سرما به داخل خاک و گرم‌تر باقی ماندن آن در طی زمستان و در نتیجه جلوگیری از خسارت‌های ناشی از یخ زدن خاک بر گیاهان می‌گردد و از سوی دیگر در صورت ماندگار بودن برف به قدر کافی بر روی سطح خاک، مرطوب باقی ماندن خاک به طور پیوسته می‌تواند در افزایش رشد ریشه در گیاهان زمستانه دیم اثر مثبت و تعیین‌کننده‌ای داشته باشد (خوشخو، ۱۳۹۵). در حالت عدم وجود پوشش برف روی سطح خاک و به تبع آن فراهم شدن شرایط برای نفوذ سرما و یخبندان به داخل خاک در زمستان، یخ زدن آب موجود در منافذ ریز خاک در لایه‌های سطحی می‌تواند سبب محبوس شدن منطقه توسعه ریشه گیاه توسط این لایه یخ‌زده گردد و این محفظه یخی روی سطح خاک مانع از تبادل هوا بین اندام‌های داخل خاک گیاه با محیط اتمسفر بالای آن خواهد شد و در نتیجه این پدیده سبب تغییر یافتن مکانیسم تنفسی گیاه از حالت هوازی به حالت غیرهوازی و به تبع آن سمی شدن فرآورده‌های حاصل از تنفس گیاه به ویژه دی‌اکسید کربن خواهد گردید (Thorsen et al., 2010).

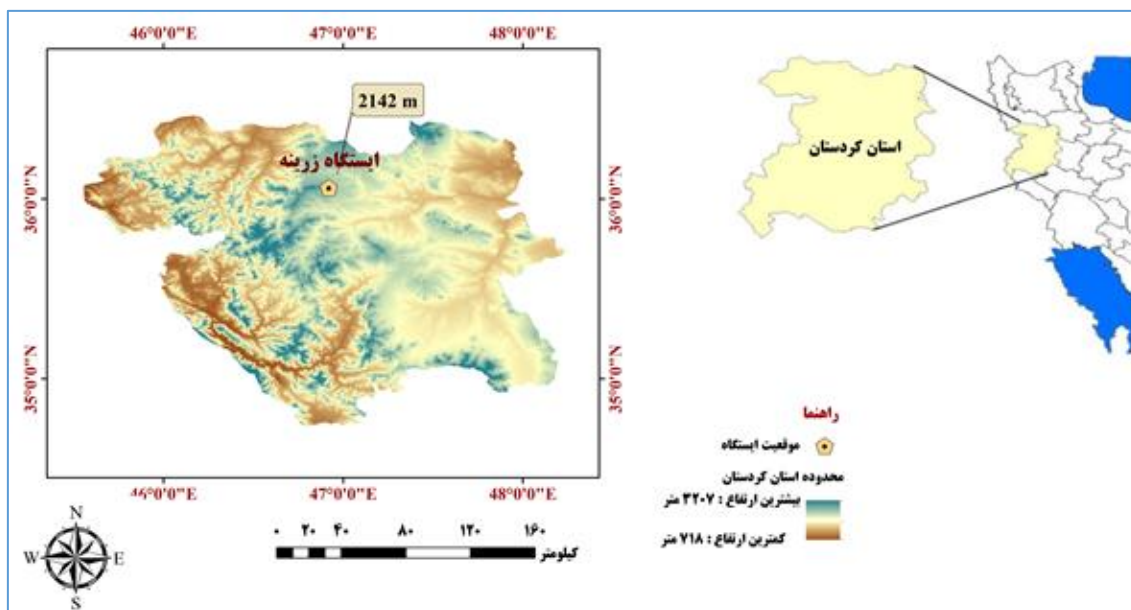
پایش و مطالعه برف یک ضرورت است زیرا خصوصیات کمی و کیفی برف سرمنشأ اثراتی مهم و تعیین‌کننده هم بر تغییرات روزانه و هم بر تغییرات بلندمدت اقلیمی در مقیاس‌های محلی و جهانی است (نوروز و لاشدی و بهرامی پیچاقمی، ۱۴۰۲؛ خوشخو، ۱۳۹۵). پایش و رصد کردن تغییرات عمق برف (ارتفاع قائم سطح برف تا سطح خاک) و تحلیل روند تغییرات زمانی درازمدت آن دارای اهمیت زیادی است. در این راستا، با توجه به ناکافی بودن داده‌های اندازه‌گیری شده برف در بسیاری از موارد، در برخی از مطالعات از شبکه‌های جهانی داده‌های برف جهت تحلیل روند تغییرات زمانی - مکانی برف استفاده شده است. به عنوان نمونه، Pulliainen et al. (2020) از داده‌های شبکه‌ای جهانی جهت بررسی الگوها و روند برف در کل نیمکره شمالی از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ استفاده کردند و کاهش برف در این نیمکره را طی این دوره گزارش کردند. با توجه به پیچیدگی نسبتاً درشت داده‌های شبکه‌ای که بیشتر برای مطالعات کلان جهانی مناسب هستند

محققان دیگر از ابزار مدل‌سازی جهت برآورد برف در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای استفاده کرده‌اند. ضرورت استفاده از مدل‌های برف از آن رو است که در بسیاری از موارد، داده‌های اندازه‌گیری شده برف به لحاظ زمانی - مکانی به قدر کافی وجود ندارند و از سویی دیگر، داده‌های مربوط به برخی متغیرهای مهم مرتبط با برف مثل چگالی برف، آلبیدوی برف، آب معادل ذوب برف به ندرت به صورت اندازه‌گیری شده وجود دارند. مدل‌های برف که در سطوح مختلفی به لحاظ درجه پیچیدگی ارائه شده‌اند قادرند با بهره‌گیری از برخی متغیرهای متعارف هواشناسی مثل بارش، دمای هوا و شدت تابش به عنوان داده‌های ورودی، متغیرهای مختلف مرتبط با برف مثل عمق برف، میزان ذوب برف در طی زمان، چگالی برف، آلبیدوی برف و آب معادل ذوب برف را با دقت مناسبی به دست دهند (Olefs et al., 2020; Leonardini et al., 2021). این مدل‌ها، از مدل‌های بسیار ساده مبتنی بر مفهوم درجه - روز تا مدل‌های دینامیکی مبتنی بر روابط پیچیده و همچنین تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای را شامل می‌شوند. در ایران، علی‌رغم تحقیقات نسبتاً زیاد انجام شده در ارتباط با شبیه‌سازی آب معادل ذوب برف (از جمله انصاری و معروفی، ۱۳۹۵؛ امینی و همکاران، ۱۳۹۶)، تحقیقات داخلی بسیار کمی در ارتباط با مدل‌سازی عمق برف انجام شده است و خلأ تحقیقاتی قابل توجهی در این زمینه احساس می‌شود. در زمره معدود کارهای انجام شده در خصوص شبیه‌سازی عمق برف در ایران می‌توان از شبیه‌سازی عمق برف با استفاده از مدل برف تک لایه در ایستگاه سقز در یک بازه زمانی ۱۸ ساله توسط خوشخو (۱۳۹۵)، مدل‌سازی و تحلیل فضایی عمق برف در پهنه شمالی ایران توسط ساری صراف و همکاران (۱۳۹۸)، برآورد تغییرات عمق برف در شهرستان اردبیل و سرعین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسط اصغری سراسکانرود و مدیرزاده (۱۳۹۹) و برآورد عمق برف با استفاده از رویکرد مدل ترکیبی حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک توسط آصفی و همکاران (۱۴۰۱) نام برد. در راستای خلأ پژوهشی مذکور، پژوهش حاضر اقدامی در راستای ارزیابی کارایی دو مدل شبیه‌سازی عمق برف و سایر متغیرهای مرتبط با آن در یکی از مرتفع‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک ایران است. قابل ذکر است که مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در پژوهش‌های بین‌المللی متعددی از جمله (Mellander et al., 2005), Xu et al. (2011), Khoshkhoo et al. (2015) و (Senapati et al., 2016) با دقتی مناسب مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

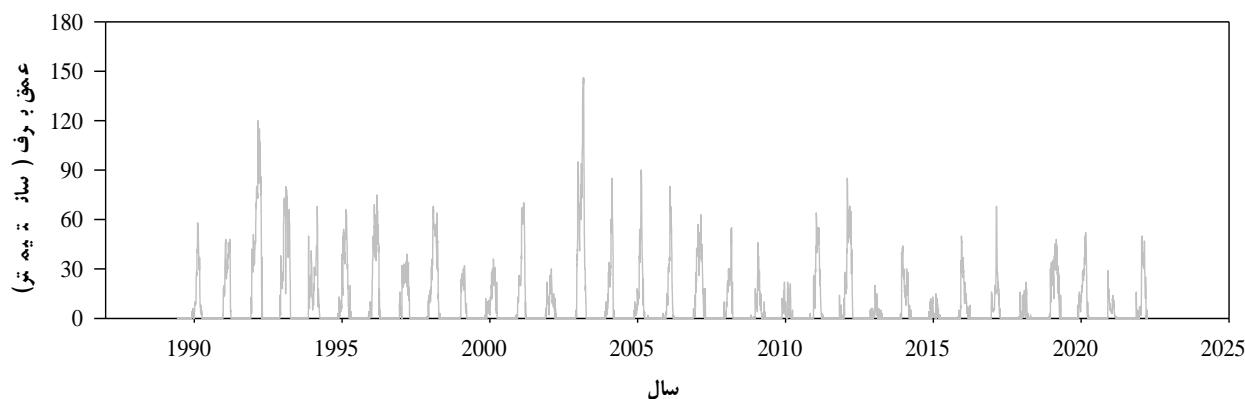
## مواد و روش‌ها

### ایستگاه مورد مطالعه و داده‌ها

ایستگاه زرینه اوباتو واقع در استان کردستان به طول جغرافیایی  $55^{\circ} 46'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 04'$  شمالی جهت انجام این پژوهش انتخاب شد. این ایستگاه در ارتفاع ۲۱۴۲/۶ متری از سطح دریا قرار گرفته است و جزو معدود ایستگاه‌های سینوپتیک کشور با ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر می‌باشد. برای این ایستگاه، داده‌های هواشناسی مورد نیاز جهت مدل‌سازی برف شامل دمای هوا، بارش، رطوبت نسبی، طول ساعات آفتابی، سرعت باد و شدت تابش و همچنین داده‌های عمق برف در مقیاس روزانه طی دوره زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۲ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند. با توجه به وجود خلأهای آماری زیاد در داده‌های شدت تابش، از مدل آنگستروم، که به عنوان بهترین مدل برآورد شدت تابش به هنگام به کارگیری آن در شبیه‌سازی برف شناسایی شده است (خوشخو، ۱۴۰۲)، جهت برآورد شدت تابش استفاده شد. طی دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۲ در ایستگاه زرینه اوباتو، میانگین سالانه دمای هوا و میانگین دمای هوا طی فصل زمستان به ترتیب برابر با  $8/5$  و  $-2/1$  درجه سانتی‌گراد و میانگین جمع سالانه بارش و جمع بارش در فصل زمستان نیز به ترتیب برابر با  $379$  و  $176$  میلی‌متر به دست آمد. همچنین به طور متوسط در ۱۱۴ روز سال، سطح زمین در این ایستگاه دارای پوشش برف است و میانگین عمق برف نیز طی روزهای برفی سال طی دوره فوق، ۲۴ سانتی‌متر بوده است که مقدار قابل توجهی است. با توجه به تعداد روزهای برفی بالا و ماندگاری برف تا فصل بهار و در مواردی هم تا فصل تابستان در این منطقه به ویژه در کوه‌های بلند اطراف، ذوب تدریجی برف در این منطقه بسیار حائز اهمیت است. به ویژه آن‌که عمده بارش در این منطقه طی ماه‌های سردتر سال رخ می‌دهد. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین تغییرات زمانی عمق برف در این ایستگاه طی دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۲ در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه



شکل ۲- تغییرات زمانی عمق برف روزانه طی دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۲ در ایستگاه زرینه اوباتو

### ساختار مدل های برف مورد بررسی

در این پژوهش، دو مدل شبیه سازی برف که هر دو جزو زیرمدل های مدل Coup (یانسن و کارلبرگ، ۲۰۰۱) هستند انتخاب شدند. هر دو مدل اگرچه یک پروفیل تک بعدی و قائم را برای شبیه سازی برف در نظر می گیرند اما به لحاظ درجه پیچیدگی با یکدیگر متفاوت هستند. در یکی از مدل ها، که به آن مدل تجربی گفته می شود و ساختار نسبتاً ساده تری دارد، از برخی توابع تجربی وابسته به دمای هوا و شدت تابش خورشید جهت شبیه سازی ذوب برف استفاده می شود. در این مدل لایه برف به صورت یک لایه همگن و یکپارچه و واحد و با جرم مخصوص یکنواخت در نظر گرفته می شود و از شارهای گرما، آب و بخار آب صرف نظر می شود. متغیرهای کلیدی در این مدل شامل دمای سطح برف، دمای سطح خاک و میزان جریان آب خروجی ذوب شده از برف هستند (Gustafsson et al., 2001). در مدل دوم، که به آن مدل فیزیکی اطلاق می شود و ساختار نسبتاً پیچیده تری دارد، از روش ترازمندی انرژی در سطح برف و داخل توده برف جهت مدل سازی ذوب برف بهره گرفته می شود. در این مدل، لایه برف موجود روی سطح خاک به چندین لایه و افق مجزا با جرم مخصوص های مختلف تقسیم می شود به گونه ای که در هر لایه مجزا بسته به سهم یخ، آب مایع، بخار آب و هوای موجود در آن لایه، جرم مخصوص آن لایه تعیین می شود. معادلات بیلان گرما و جرم در این مدل بر اساس قوانین بقای جرم، مومنتم و انرژی بنا نهاده شده اند. علی رغم وجود تفاوت هایی در ساختار این دو مدل به ویژه در نحوه محاسبه ذوب برف، تشابهات ساختاری زیادی نیز در این دو مدل وجود دارد و در بخش های مختلفی از هر دو مدل، از معادلات مشابهی استفاده شده است. به عنوان نمونه، در هر دو مدل شیوه اختصاص بارش به فرم باران یا برف، اگر میانگین شبانه روزی دمای هوا از یک آستانه مشخص کمتر باشد بارش به صورت برف و اگر از یک آستانه معینی بزرگتر باشد به صورت باران و اگر بین دو آستانه فوق باشد به صورت ترکیبی از باران و برف در نظر گرفته می شود. آلبیدوی برف در هر دو مدل بر حسب تابعی از سن (عمر) برف، دمای برف و برخی پارامترهای تجربی محاسبه می گردد. چگالی برف در هر دو مدل تابعی از آب معادل

ذوب برف و سن (عمر) برف می‌باشد. دمای سطح برف نیز در هر دو مدل بر اساس یک مدل بیلان انرژی در سطح برف محاسبه می‌گردد که وابسته به تسهیم مقدار تابش خالص رسیده به سطح برف به سه مؤلفه آن شامل گرمای محسوس، گرمای نهان و گرما به داخل برف است. برخی از مهم‌ترین معادلات حاکم بر این دو مدل در جدول ۱ ارائه شده است. جزئیات بیشتر نیز در فایل راهنمای مدل Coup (Jansson and Carlberg, 2001) قابل دستیابی است.

جدول ۱. برخی از مهم‌ترین معادلات حاکم بر دو مدل برف فیزیکی و تجربی (برگرفته از Jansson and Carlberg, 2001)

پدیده مورد مدل‌سازی	معادله	پارامترهای به کار گرفته شده در معادله
بیلان انرژی در سطح برف	$R_{n,snow} = H_{snow} + LE_{snow} + q_{h,snow}$	$R_{n,snow}$ : تابش خالص رسیده به سطح برف؛ $q_{h,snow}$ : شار گرما از سطح برف به داخل آن؛ $H_{snow}$ و $LE_{snow}$ به ترتیب شار گرمای محسوس و گرمای نهان از سطح برف به آتمسفر
شار گرما در سطح برف	$q_{h,snow} = k_{snow} \frac{T_{snows} - T_{soils}}{\Delta Z_{snow}}$	$k_{snow}$ : ضریب هدایت گرمایی برف؛ $\Delta Z_{snow}$ : عمق برف و $T_{snows}$ و $T_{soils}$ به ترتیب دمای سطح برف و دمای خاک
آلبیدوی برف	$\alpha_{snow} = \alpha_{min} + \alpha_1 e^{\alpha_2 S_{age} + \alpha_3 \Sigma T_{air}}$	$\alpha_{min}$ ، $\alpha_1$ ، $\alpha_2$ ، $\alpha_3$ : پارامترهای تجربی؛ $S_{age}$ : سن (عمر برف) و $T_{air}$ : دمای هوا
چگالی برف	$\rho_{snow} = \frac{\rho_{prec} \Delta Z_{prec} + \rho_{old} \Delta Z_{old}}{\Delta Z_{snow}}$	$\rho_{prec}$ و $\rho_{old}$ به ترتیب چگالی بارش و چگالی برف قدیمی؛ $\Delta Z_{old}$ و $\Delta Z_{prec}$ به ترتیب عمق برف جدید، عمق بارش و عمق برف قدیمی
توابع مربوط به نرخ ذوب برف در مدل تجربی	$M = M_T T_a + M_R R_{is} + \frac{f_{qh} q_h(0)}{L_f}$ $M_T = \begin{cases} m_T & T_a \geq 0 \\ \frac{m_T}{\Delta Z_{snow} m_f} & T_a < 0 \end{cases}$ $M_R = M_{Rmin} (1 + S_1 (1 - e^{-S_2 S_{age}}))$	$T_a$ : دمای هوا؛ $R_{is}$ : شدت تابش خورشید؛ $f_{qh}$ : یک ضریب تجربی؛ $q_h(0)$ : شار گرما در سطح خاک؛ $L_f$ : گرمای نهان انجماد؛ $M_T$ و $M_R$ به ترتیب پارامترهای تجربی مربوط به دمای هوا و شدت تابش؛ $\Delta Z_{snow}$ : عمق برف؛ $S_{age}$ : سن (عمر برف)؛ $M_{Rmin}$ ، $S_1$ و $S_2$ : پارامترهای تجربی
توابع مربوط به ذوب برف به روش بیلان انرژی	$-(q_{h,sensible} + q_{h,latent}) = q_{h,snow} - q_{h,soil} + q_{h,prec}$ $q_{h,sensible} = C_i \cdot S \cdot \Delta T_{snow}$ $q_{h,latent} = L_f \cdot \frac{\Delta S_{ice \rightarrow liq}}{\Delta T}$ $q_{h,snow} = \frac{2 \cdot k_{snow} (T_{snows} - T_{snow})}{Z_{snow}}$ $q_{h,soil} = \frac{2 \cdot k_{snow} k_{h,1}}{(k_{snow} \Delta Z_1 + k_{h,1} Z_{snow})} (T_{snow} - T_1)$ $q_{h,prec} = T_{prec} (C_i P_{snow} + C_w P_{rain})$	ترتیب شارهای مربوط به گرمای محسوس، گرمای نهان، گرما در سطح برف، گرما بین سطح برف و سطح خاک و میزان گرمای موجود در آب حاصل از بارش؛ $C_i$ گرمای ویژه یخ؛ $S$ آب معادل ذوب برف؛ $\Delta T_{snow}$ تغییرات دمای برف؛ $L_f$ گرمای نهان ذوب؛ $\Delta S_{ice \rightarrow liq}$ میزان ذوب برف؛ $T_{snow}$ دمای سطح برف؛ $T_{snows}$ دمای متوسط کل توده برف؛ $k_{snow}$ ضریب هدایت گرمایی برف؛ $Z_{snow}$ عمق برف؛ $k_{h,1}$ و $\Delta Z_1$ و $T_1$ به ترتیب ضریب هدایت گرمایی و ضخامت و دمای اولین لایه سطحی خاک؛ $T_{prec}$ دمای آب حاصل از بارش؛ $C_i$ و $C_w$ به ترتیب گرمای ویژه یخ و آب و $P_{snow}$ و $P_{rain}$ به ترتیب سهم بارش به صورت برف و باران

### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

جهت انجام واسنجی پارامترهای این دو مدل، از روش برآورد عدم قطعیت با تابع درست‌نمایی تعمیم‌یافته (GLUE<sup>۱</sup>) استفاده شد. مکانیسم اصلی این روش، نمونه‌گیری تصادفی به روش مونت کارلو از دامنه عدم قطعیت پارامترها و تولید تعداد زیادی بردار پارامترها و اجرای مدل بر اساس مقادیر پارامترهای تولیدشده است. این روش مبتنی بر مفهوم همپایانی<sup>۲</sup> است و بدان معنی است که با توجه به داد و ستدهای پیچیده‌ای که بین پارامترهای مختلف یک مدل وجود دارد مجموعه‌های ترکیبی مختلفی از مقادیر پارامترها می‌توانند منجر به حصول نتایج مشابهی توسط مدل گردند (خوشخو و همکاران، ۱۳۹۲). پس از اجرای مدل و سنجش عملکرد مدل برای کل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، در نهایت یک مجموعه از بهترین ترکیب مقادیر پارامترها انتخاب می‌شوند و مبنای واسنجی مدل قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر، تعداد ۶ پارامتر از مدل‌های برف مورد مطالعه مطابق با جدول ۲ انتخاب شدند. توصیف هر پارامتر و دامنه عدم قطعیت آن‌ها (شامل مقادیر حداقل و حداکثر هر پارامتر) در این جدول قید شده است. نظر به این که دو مدل مورد بررسی، در برخی از معادلات مثل چگالی برف،

<sup>۱</sup> Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

<sup>۲</sup> equifinality



آلبیدوی برف و سهم‌بندی بارش به صورت باران یا برف دارای وجه اشتراک هستند از بین ۶ پارامتر منتخب، تعداد ۴ پارامتر در هر دو مدل مشترک بوده و تعداد دو پارامتر اختصاصی نیز برای هر کدام از مدل‌ها لحاظ شده‌اند. با به کارگیری روش GLUE، تعداد ۸۰۰۰ بردار از مقادیر پارامترهای منتخب تولید شدند و جهت سنجش عملکرد مدل، از سه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین اریبی خطا (MBE) و ضریب نش - ساتکلیف استفاده شد. از بین ۸۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شده، ۸۰ شبیه‌سازی (۱ درصد کل شبیه‌سازی‌ها) که به لحاظ سه شاخص فوق بهترین عملکرد را داشتند استخراج و به عنوان شبیه‌سازی‌های برتر (حالت واسنجی شده مدل‌ها) در نظر گرفته شدند. شبیه‌سازی‌ها در مقیاس روزانه به انجام رسید. جهت سنجش کلی خطای دو مدل برف در شبیه‌سازی عمق برف روزانه، در وهله اول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۲ مبنای سنجش کلی عملکرد دو مدل قرار گرفت. در کنار تحلیل خطای مدل‌ها بر اساس سه شاخص فوق، میزان خطای حاصل از مدل‌ها از جنبه‌های دیگری از جمله خطای تجمیعی مدل‌ها طی کل دوره آماری فوق و عملکرد مدل‌ها در برآورد برف‌های سبک تا سنگین نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲. پارامترهای منتخب جهت واسنجی مدل‌های برف فیزیکی و تجربی (بر اساس مطالعات مشابه از جمله Khoshkhoo et al., 2015 و Senapati et al., 2016)

توصیف پارامتر	دامنه عدم قطعیت		واحد	پارامتر	
	حداکثر	حداقل			
مؤثر در برآورد چگالی برف	۲	۰/۱	m <sup>-1</sup>	DensityCoefMass	
مؤثر در برآورد سن (عمر) برف	۱۰	۰	kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	AgeUpdatePrec	
جداکننده نوع بارش به صورت باران یا برف	۲	-۲	°C	OnlySnowPrecTemp	پارامترهای مشترک بین دو مدل
تصحیح مربوط به بادبردگی به هنگام اندازه گیری بارش	۱/۱۴	۱	-	PrecAOCorr	
حداقل میزان آلبیدوی برف	۵۵	۲۵	%	AlbSnowMin	پارامترهای اختصاصی
طول زبری مومنتم در بالای سطح برف	۰/۰۵	۰/۰۰۰۱	m	RoughLMomSnow	مدل فیزیکی
ضریب دما در تابع ذوب برف تجربی	۵	۰	kg °C <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	MeltCoefAirTemp	پارامترهای اختصاصی
ضریب تابش در تابع ذوب برف تجربی	۵e-۶	۵e-۸	kg J <sup>-1</sup>	MeltCoefGlobRad	مدل تجربی

برای اعتبارسنجی مدل‌های مورد مطالعه، که به مفهوم ارزیابی دقت آن‌ها جهت مقاصد پیش‌بینی طی بازه‌های زمانی‌ای است که در فرایند واسنجی از داده‌های آن‌ها استفاده نشده است، کل دوره ۱۹۸۹-۲۰۲۲ به دو بازه زمانی مجزا شامل سال‌های فرد (۱۹۸۹، ۱۹۹۱، ...، ۲۰۲۱) و سال‌های زوج (۱۹۹۰، ۱۹۹۲، ...، ۲۰۲۲) تقسیم شد و مشابه با آنچه که ذکر شد تعداد ۸۰۰۰ شبیه‌سازی از دامنه عدم قطعیت پارامترهای منتخب هر دو مدل به صورت تصادفی انتخاب و بر روی هر دو بازه زمانی فوق اعمال گردیدند. در ادامه با معیار قرار دادن سال‌های فرد به عنوان دوره واسنجی و سال‌های زوج به عنوان دوره اعتبارسنجی، برای هر کدام از مدل‌های برف تعداد ۸۰ شبیه‌سازی برتر با مبنای قرار دادن سال‌های فرد استخراج شدند و میزان دقت این ۸۰ شبیه‌سازی در برآورد عمق برف طی سال‌های زوج بر اساس سه شاخص RMSE، MBE و ضریب نش - ساتکلیف مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### ارزیابی کارایی مدل‌های برف واسنجی شده

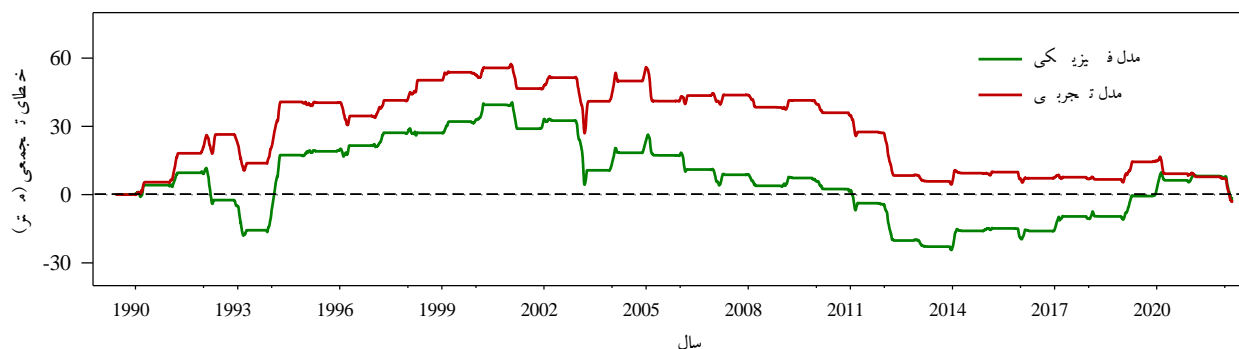
همان‌گونه که ذکر شد از بین کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی تولید و اجراء شده با به کارگیری روش GLUE، برای هر کدام از مدل‌ها، یک درصد از کل شبیه‌سازی‌ها (۸۰ شبیه‌سازی) به عنوان شبیه‌سازی‌های برتر انتخاب و به عنوان حالت واسنجی شده مدل‌ها در نظر گرفته شدند. جدول ۳ محدوده تغییرات و میانگین سه شاخص RMSE، MBE و ضریب نش - ساتکلیف را برای هر دو مدل برف در دو حالت قبل از واسنجی (کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی) و بعد از واسنجی (۸۰ شبیه‌سازی برتر) نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که برای هر دو مدل برف فیزیکی و تجربی، محدوده تغییرات هر سه شاخص فوق در حالت کل شبیه‌سازی‌ها یک محدوده بسیار وسیعی بوده است که در حالت شبیه‌سازی‌های برتر، به سمت یک دامنه محدودی از بهترین مقادیر هر شاخص سوق پیدا کرده است. به لحاظ مقایسه دو مدل برف فیزیکی و تجربی، بهترین حالت ممکن در شبیه‌سازی‌های برتر برای هر سه شاخص فوق، در مدل فیزیکی تا حدودی بهتر از مدل تجربی

بوده است. به عنوان نمونه، کمترین مقدار RMSE برای مدل فیزیکی و تجربی به ترتیب ۰/۰۷۵ و ۰/۰۷۸ و بالاترین مقدار ضریب نش - ساتکلیف به ترتیب ۰/۸۱۴ و ۰/۷۹۸ به دست آمده است و شاخص MBE نیز برای مدل فیزیکی در مقایسه با مدل تجربی به صفر نزدیک تر بوده است. به لحاظ میانگین شبیه‌سازی‌های برتر (ستون آخر جدول ۳) نیز به استثنای شاخص MBE که برای هر دو مدل برابر با ۰/۰۰۴- متر به دست آمده است برای دو شاخص RMSE و ضریب نش - ساتکلیف، برتری نسبی مدل فیزیکی نسبت به مدل تجربی نمایان است. با این وجود، تفاوت‌های فوق بین دو مدل فیزیکی و تجربی خیلی چشمگیر و معنی‌دار به نظر نمی‌رسد و در حالت کلی می‌توان چنین استنتاج کرد که هر دو مدل در حالت واسنجی شده خود کارآیی مناسبی در شبیه‌سازی عمق برف در ایستگاه زرینه طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۹ از خود نشان داده‌اند.

جدول ۳. محدوده تغییرات و میانگین سه شاخص سنجش عملکرد مدل‌های برف فیزیکی و تجربی در شبیه‌سازی عمق برف روزانه در ایستگاه زرینه اوباتو طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۹

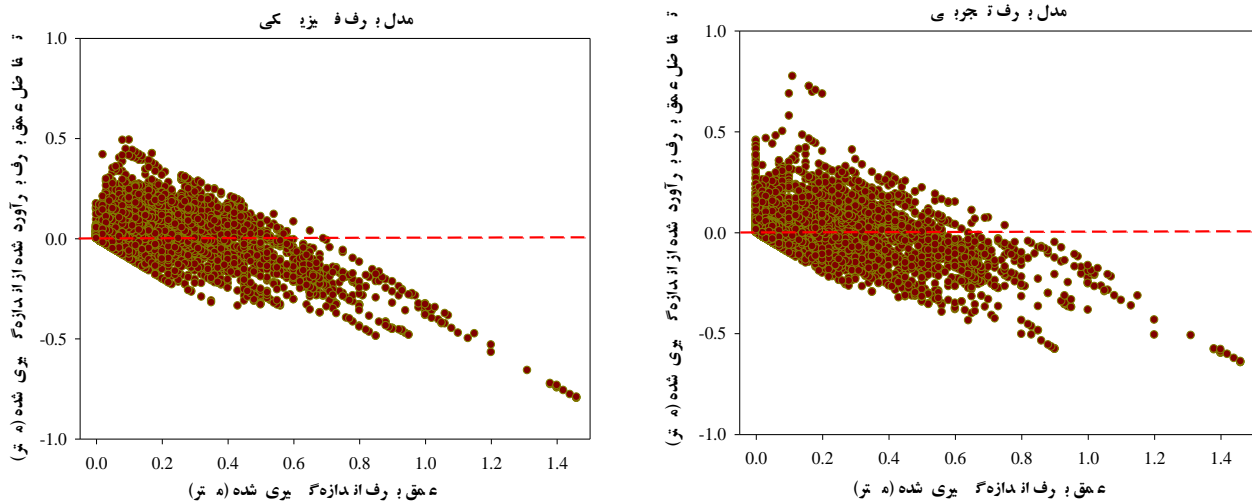
شاخص	مدل برف	محدوده تغییرات (کل شبیه‌سازی‌ها)	محدوده تغییرات (شبیه‌سازی‌های برتر)	میانگین (کل شبیه‌سازی‌ها)	میانگین (شبیه‌سازی‌های برتر)
RMSE (m)	فیزیکی	۰/۲۸ - ۰/۰۷۵	۰/۰۸۶- ۰/۰۷۵	۰/۰۹۹	۰/۰۸
	تجربی	۰/۱۹۱- ۰/۰۷۸	۰/۰۸۷- ۰/۰۷۸	۰/۱۰۸	۰/۰۸۲
MBE (m)	فیزیکی	۰/۱۱- ۰/۰۴۴	-۰/۰۰۱۷- ۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۱۸	-۰/۰۰۴
	تجربی	۰/۰۵۶- ۰/۰۷۹	۰/۰۰۲۲- ۰/۰۱	-۰/۰۲۸	-۰/۰۰۴
ضریب نش - ساتکلیف	فیزیکی	۰/۸۱۴- ۱/۵۹	۰/۸۱۴- ۰/۷۵۷	۰/۶۵	۰/۷۸۹
	تجربی	۰/۷۹۹- ۰/۲۰۳	۰/۷۹۸- ۰/۷۵۱	۰/۶۱	۰/۷۷۷

شکل ۳ خطای تجمعی حاصل از به‌کارگیری هر کدام از دو مدل برف در شبیه‌سازی عمق برف روزانه در ایستگاه زرینه اوباتو طی دوره ۱۹۸۹-۲۰۲۲ را نشان می‌دهد. این خطای تجمعی در وهله اول با محاسبه تفاضل مقادیر اندازه‌گیری شده عمق برف روزانه از مقادیر مدل‌سازی شده آن (بر اساس میانه ۸۰ شبیه‌سازی برتر) و سپس محاسبه حاصل جمع روز به روز آن طی کل دوره ۱۹۸۹-۲۰۲۲ حاصل آمده است. اهمیت ترسیم مقادیر خطای تجمعی نسبت به زمان از آن جهت است که اگر یک مدل، تمایل سیستماتیک به سمت بیش برآورد کردن یا کم برآورد کردن داشته باشد چنین خطایی به صورت روند تدریجی صعودی و یا نزولی ظاهر خواهد شد. مدل مناسب مدلی است که ضمن آنکه مقادیر تجمعی خطا در انتهای دوره باید به سمت صفر همگرا شود حالت‌های بیش یا کم برآوردی مدل نیز به صورت نسبتاً تصادفی توزیع شده باشد. بر اساس شکل ۱، مدل برف فیزیکی در مقایسه با مدل تجربی، مقادیر خطای تجمعی آن به خط صفر نزدیک تر بوده است که نشان از عملکرد بهتر آن می‌باشد. از یک جنبه دیگر، مدل تجربی اگرچه مقادیر خطای تجمعی آن در انتهای دوره به سمت صفر متمایل شده است اما دیده می‌شود که در طی کل دوره ۱۹۸۹-۲۰۲۲، منحنی مربوط به خطای تجمعی در بالای خط صفر قرار گرفته است. در خصوص مدل فیزیکی، منحنی مربوط به خطا در بخش‌هایی از کل دوره، در پایین خط صفر و در بخش‌هایی از دوره نیز در بالای خط صفر قرار گرفته است که حاکی از تصادفی‌تر بودن ماهیت خطا در این مدل است. بر این اساس، اگرچه در هیچ یک از دو مدل تجربی و فیزیکی یک روند کاملاً سیستماتیک صعودی یا نزولی مشاهده نمی‌شود اما به لحاظ میزان خطا و توزیع خطا در طی کل دوره، مدل فیزیکی عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل تجربی از خود نشان داده است.



شکل ۳. مقادیر خطای تجمعی (تفاضل مقادیر مشاهداتی از مقادیر مدل‌سازی شده عمق برف روزانه) حاصل از به‌کارگیری دو مدل برف فیزیکی و تجربی در ایستگاه زرینه اوباتو طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۹

در ادامه، به جهت ارزیابی تفصیلی تر دقت مدل های برف مورد بررسی، مقدار خطای حاصل از به کارگیری مدل های واسنجی شده فیزیکی و تجربی بر حسب عمق برف (از برف های سبک تا سنگین) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). اهمیت ترسیم این شکل از آن جهت است که مشخص می کند آیا دقت مدل های برف مورد مطالعه در برآورد مقادیر برف های سبک، متوسط و سنگین مشابه با هم است یا اینکه رفتارهای مختلفی از این مدل ها به هنگام برآورد مقادیرهای مختلف برف مشاهده می شود. شکل ۴ نشان می دهد که خطای هر دو مدل در برآورد برف های متوسط (عمق های برف مابین ۱۰ تا ۵۰ سانتی متر) ضمن آنکه به خط صفر تا حدودی نزدیک تر بوده است مقادیر خطا نیز در هر دو سمت پایین و بالای خط صفر توزیع شده اند. این بدان معناست که در این دامنه از مقادیر عمق برف، مدل های برف جهت گیری سیستماتیک خاصی به سمت بیش یا کم برآورد کردن از خود نشان نداده اند. در خصوص برف های سبک (عمق های برف کمتر از ۱۰ سانتی متر)، در هر دو مدل، غالب مقادیر خطا در بالای خط صفر قرار گرفته اند که نمایانگر آن است که هر دو مدل به هنگام شبیه سازی برف های سبک، به بیش برآورد کردن تمایل داشته اند. در خصوص برف های سنگین (عمق های برف بیش از ۵۰ سانتی متر) نیز غالب مقادیر خطا در زیر خط صفر قرار گرفته اند و بدان معناست که هر دو مدل به هنگام شبیه سازی های برف های سنگین، تمایل به کم برآورد کردن داشته اند. منشأ وقوع چنین تفاوت هایی در عملکرد مدل ها می تواند با عوامل زیر در ارتباط باشد. اولاً به لحاظ فرایند واسنجی مدل جهت استخراج شبیه سازی های برتر، در این پژوهش کل دوره آماری به صورت یکجا لحاظ گردید و شبیه سازی های برتر به گونه ای شناسایی شدند که عملکرد آن ها طی کل دوره ۱۹۸۹-۲۰۲۲ بهترین حالت ممکن باشد. در کنار این رویکرد که در این پژوهش و در اکثر پژوهش های پیشین نیز از آن استفاده شده است چنین به نظر می رسد که جهت رفع عدم توازن عملکرد مدل به هنگام شبیه سازی برف های سبک و سنگین بهتر است که در کنار در نظر گرفتن کل دوره به صورت یکجا جهت واسنجی، برخی سال های با برف های سنگین و برف های سبک نیز به صورت جداگانه در فرایند واسنجی لحاظ شوند و با در نظر گرفتن موارد فوق، بهترین شبیه سازی ها را به گونه ای استخراج کرد که نه تنها برای کل دوره دارای بهترین عملکرد باشند بلکه به تفکیک برای سال های پربرف و کم برف نیز عملکرد مناسبی داشته باشند. بر این اساس پیشنهاد می شود که جهت استفاده بهینه از پتانسیل مدل، در فرایند واسنجی به لحاظ کردن کل دوره آماری (در این پژوهش ۱۹۸۹-۲۰۲۲) به صورت یکجا به تنهایی اکتفاء نشود و در کنار آن، هم سال های با برف سبک و هم سال های با مقدار برف سنگین نیز به صورت کمکی در فرایند واسنجی دخالت داده شوند تا مدل واسنجی شده نهایی برای تمامی حالات فوق از دقت مناسبی برخوردار گردد. افزون بر این مورد که معطوف به فرایند واسنجی مدل بود یک اشکال ساختاری نیز در خود مدل ها به هنگام تشخیص و اختصاص نوع بارش به صورت برف یا باران وجود دارد. در هر دو مدل، تشخیص برف با اختصاص دادن یک آستانه مشخص به میانگین دمای شبانه روزی در قالب پارامتر OnluSnowPrecTemp صورت می گیرد و فقط در حالتی که میانگین شبانه روزی دمای هوا از آستانه مشخص برای این پارامتر (که بطور پیش فرض و در حالت عدم واسنجی مدل برابر با صفر درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود) کمتر شود بارش به صورت برف در نظر گرفته می شود. از آنجائی که میانگین شبانه روزی دمای هوا با میانگین گیری کردن از مقادیر دماهای حداقل و حداکثر شبانه روزی به دست می آید در بسیاری از موارد ممکن است دمای حداقل شبانه روزی یک مقدار منفی و دمای حداکثر شبانه روزی یک مقدار مثبت و میانگین آنها نیز یک عدد مثبت به دست آید. در چنین حالتی، اگر وقوع بارش در طی شب و تحت دماهای منفی و به صورت برف رخ داده باشد چون میانگین شبانه روزی دمای هوا یک عدد مثبت به دست آمده است لذا مدل، نوع بارش را به اشتباه به صورت باران لحاظ خواهد کرد. وجود ایراد فوق می تواند با حالت کم برآوردی مدل های برف به هنگام وقوع برف های سنگین در ارتباط باشد. جهت رفع این مشکل پیشنهاد می شود به جای در نظر گرفتن مقیاس روزانه، از مقیاس های ریزتر مثل ۳ ساعته استفاده شود تا تشخیص نوع بارش با دقت بهتری صورت گیرد. جنبه سومی که می توان برای منشأ خطاهای مذکور در نظر گرفت به محدود بودن داده های اندازه گیری شده برف در ایران مربوط می شود. توضیح این که در ایستگاه های سینوپتیک ایران، تنها داده اندازه گیری شده مرتبط با برف، عمق برف است و هیچ نوع داده ای در خصوص متغیرهای مهم دیگری مثل چگالی برف، برداشت و اندازه گیری نمی شود. این در حالی است که عمق برف قویاً وابسته به چگالی برف است و چون داده های چگالی برف در ایران اندازه گیری نمی شوند لذا هر گونه خطا در برآورد چگالی برف توسط مدل منجر به ایجاد خطا در برآورد عمق برف نیز خواهد شد. لذا پیشنهاد می شود که در کنار عمق برف، داده های دیگری مثل چگالی برف نیز به مقدار مناسبی اندازه گیری شوند تا فرایند واسنجی مدل ها با دقت مناسب تری صورت گیرد.



شکل ۴. مقادیر خطای حاصل از مدل‌های برف فیزیکی و تجربی بر حسب عمق برف در ایستگاه زربینه اوباتو

### اعتبارسنجی مدل‌ها

شکل ۵ توزیع فراوانی شاخص‌های مختلف سنجش خطا را برای هر دو مدل مورد بررسی در دو مرحله واسنجی (سال‌های فرد) و اعتبارسنجی (سال‌های زوج) نشان می‌دهد. در این شکل به جهت انجام مقایسات بهتر، توزیع فراوانی شاخص‌های خطا بر اساس کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی نیز ارائه شده است. در مرحله واسنجی دیده می‌شود که در هر دو مدل، از بین ۸۰۰۰ مقدار شاخص‌های سنجش خطا، بهترین مقادیر آن‌ها (بیشترین مقادیر ضریب نش-ساتکلیف، کمترین مقادیر RMSE و مقادیر نزدیک به صفر برای شاخص MBE) برای حالت ۸۰ شبیه‌سازی برتر استخراج شده‌اند. اعتبارسنجی موفق مدل زمانی رخ می‌دهد که اجرای ۸۰ شبیه‌سازی برتر استخراج‌شده طی دوره واسنجی (سال‌های فرد) منجر به حصول بهترین مقادیر شاخص‌های خطا طی دوره اعتبارسنجی (سال‌های زوج) نیز گردد. همان‌گونه که از شکل ۳ پیداست در هر دو مدل برف، توزیع مقادیر شاخص‌های سنجش خطا در حالت ۸۰ شبیه‌سازی برتر در حالت اعتبارسنجی بسیار نزدیک به حالت واسنجی بوده است که بدان معنی است هنگامی که از این مدل‌ها برای برآورد عمق برف روزانه طی دوره‌های جدید (جهت مقاصد پیش‌بینی) استفاده شود دقت آن‌ها حول و حوش همان دقتی خواهد بود که در مرحله واسنجی داشته‌اند. با نگاهی مقایسه‌ای به هر کدام از شاخص‌های خطا برای دو مدل برف تجربی و فیزیکی بر اساس ۸۰ شبیه‌سازی برتر چه در دوره واسنجی و چه در دوره اعتبارسنجی می‌توان دریافت که به لحاظ ضریب نش-ساتکلیف، هر دو مدل دقت بسیار مشابهی داشته‌اند اما به لحاظ دو شاخص MBE و RMSE، دقت مدل فیزیکی تا حدودی از دقت مدل تجربی بهتر بوده است به گونه‌ای که در مدل فیزیکی هم مقادیر MBE به صفر نزدیک‌تر بوده‌اند و هم مقادیر RMSE کوچکتری در مقایسه با مدل تجربی حاصل آمده‌اند. به ویژه در خصوص شاخص MBE، حتی برای کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی نیز دیده می‌شود که در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، توزیع مقادیر MBE در مدل فیزیکی برای مقادیر منفی و مثبت این شاخص به صورت نسبتاً متقارنی توزیع شده است اما در مدل تجربی، توزیع مقادیر MBE به سمت مقادیر منفی چولگی قابل توجهی داشته است و در مقادیر مثبت این شاخص، فراوانی کمتری مشاهده می‌شود. بر این اساس می‌توان چنین دریافت که مدل تجربی یک نوع تمایل ذاتی به سمت کم برآورد کردن مقادیر عمق برف روزانه از خود نشان داده است. قابل ذکر است که برتری مدل واسنجی‌شده فیزیکی نسبت به مدل واسنجی‌شده تجربی بر اساس دو شاخص MBE و RMSE خیلی چشمگیر و معنی‌دار نمی‌باشد و هر دو مدل در مجموع کارایی مناسبی در مرحله اعتبارسنجی نیز از خود نشان داده‌اند.

### تحلیل حساسیت پارامترها

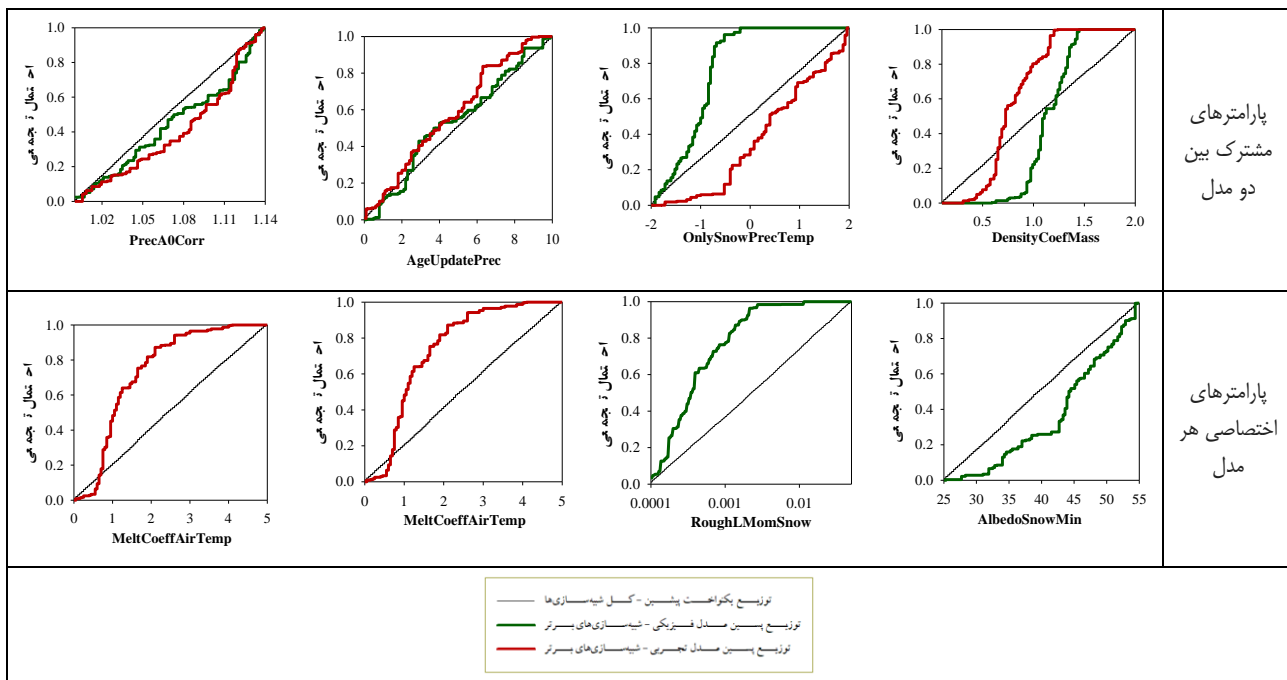
نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای مدل‌های برف در شکل ۶ ارائه شده است. در این شکل، خط نیمساز (به رنگ مشکی) تابع توزیع احتمال تجمعی (CDF) یکنواخت پیشین (مربوط به کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی) و دو منحنی دیگر (به رنگ‌های سبز و قرمز) تابع‌های توزیع احتمال پسین (مربوط به ۸۰ شبیه‌سازی برتر) را برای پارامترهای مختلف دو مدل برف فیزیکی و تجربی نشان می‌دهند.

مدل	شاخص	مرحله واسنجی - کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی	مرحله اعتبارسنجی - کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی	مرحله واسنجی - ۸۰ شبیه‌سازی برتر	مرحله اعتبارسنجی - ۸۰ شبیه‌سازی برتر
مدل برف فیزیکی	MBE (°C)				
	RMSE (°C)				
	شاخص نشی - ساتکلیف				
مدل برف تجربی	MBE (°C)				
	RMSE (°C)				
	شاخص نشی - ساتکلیف				

شکل ۵. هیستوگرام شاخص‌های مختلف سنسجی خطا در دو مدل برف فیزیکی و تجربی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاه زرنینه اوباتو

در خصوص ۴ پارامتر مشترک بین دو مدل برف فیزیکی و تجربی، دیده می‌شود که برای دو پارامتر PrecA0Corr و AgeUpdatePrec، توزیع‌های احتمال تجمعی پسین در هر دو مدل برف تفاوت چندانی با حالت پیشین نداشته‌اند که بیانگر آن است که هیچکدام از مدل‌ها نسبت به این دو پارامتر حساسیت قابل توجهی نداشته‌اند. در خصوص پارامتر DensityCoefMass، هر دو مدل با اندکی تفاوت، حساسیت نسبتاً مشابهی برای این پارامتر از خود نشان داده‌اند و نسبت به این پارامتر حساس بوده‌اند. بیشترین تفاوت رفتاری بین دو مدل، برای پارامتر OnlySnowPrecTemp رخ داده است و دیده می‌شود که به دو شیوه کاملاً متفاوت، این پارامتر برای دو مدل برف، مورد واسنجی قرار گرفته است. این تفاوت به نوعی برهمکنش‌های متفاوت و پیچیده بین این پارامتر با سایر پارامترهای هر کدام از این دو مدل را نمایان می‌سازد. لذا چنین نتیجه‌گیری می‌شود که علی‌رغم مشترک بودن برخی پارامترها در دو مدل فیزیکی و تجربی، رفتار این پارامترهای مشترک لزوماً مشابه هم نمی‌باشد و به هنگام وارد شدن آن‌ها در مدل و تعامل و داد و ستد آنها با سایر پارامترهای مدل، رفتارهای متفاوتی از آن‌ها می‌توان انتظار داشت. در خصوص پارامترهای اختصاصی مرتبط با فرایند ذوب برف برای هر کدام از دو مدل فیزیکی و تجربی نیز دیده می‌شود که هر دو مدل نسبتاً به پارامترهای مرتبط با ذوب برف (AlbedoSnowMin و RoughLMomSnow) در مدل فیزیکی و MeltCoeffAirTemp و MeltCoeffGlobRad در مدل تجربی) حساسیت بالایی داشته‌اند. بر این اساس، فرایندهای

مرتبط با ذوب برف را می‌توان جزو فرایندهای کلیدی در هر دو مدل برف به حساب آورد.



شکل ۶. تابع توزیع احتمال تجمعی (CDF) پارامترهای دو مدل برف در دو حالت کل ۸۰۰۰ شیب‌سازی (خط نیمساز مشکی) و ۸۰ شیب‌سازی برتر (منحنی‌های قرمز و سبز) در ایستگاه زرینه اوباتو

## نتیجه‌گیری کلی

نظر به محدود بودن داده‌های اندازه‌گیری شده عمق برف و لزوم استفاده از مدل‌های برف در ایران، در این پژوهش با مینا قرار دادن داده‌های عمق برف ایستگاه زرینه اوباتو، که در ارتفاعی بالاتر از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است و هر ساله مقدار قابل توجهی برف دریافت می‌کند، به بررسی مقایسه‌ای کارایی دو مدل برف با دو مبنای تجربی و فیزیکی پرداخته شد. روش به کار گرفته شده در این تحقیق جهت واسنجی این دو مدل (روش GLUE) به خوبی توانست بهترین شبیه‌سازی‌ها را از بین کل ۸۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شده شناسایی نماید. اعتبارسنجی مدل‌های برف مورد مطالعه حاکی از کارایی مناسب آن‌ها به هنگام به کارگیری آن‌ها جهت برآورد عمق طی دوره‌های زمانی جدید بود. با وجود اینکه هر دو مدل کارایی مناسبی به لحاظ هر سه شاخص سنجش خطا (RMSE، MBE و ضریب نش-ساتکلیف) از خود نشان دادند اما مدل فیزیکی به ویژه به لحاظ ایجاد موازنه بین کم‌برآورد کردن و بیش‌برآورد کردن، کارایی مناسب‌تری نسبت به مدل تجربی داشت. تحلیل حساسیت مدل‌ها هم حاکی از ناهمسان بودن درجه اهمیت پارامترهای منتخب و حساسیت بالاتر مدل به برخی از پارامترهای خاص بود. در این میان، پارامترهای مرتبط با ذوب برف اهمیت قابل توجهی در هر دو مدل برف داشتند. در خصوص کارایی مدل‌های مورد بررسی جهت شبیه‌سازی عمق برف‌های از کم تا زیاد، بهترین عملکرد هر دو مدل برای عمق برف‌های متوسط رخ داد و در عمق برف‌های کم، بیش‌برآوردی و در عمق برف‌های زیاد، کم‌برآوردی توسط هر دو مدل مشاهده شد. جهت بهبود این امر، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی اولاً در کنار در نظر گرفتن کل دوره آماری به صورت یکجا جهت واسنجی، برخی سال‌های با برف‌های سنگین و برف‌های سبک نیز مستقیماً در فرایند واسنجی لحاظ شوند و ثانیاً به جای در نظر گرفتن داده‌های روزانه، در صورت امکان از مقیاس‌های زمانی ریزتر مثلاً داده‌های ساعتی استفاده شود. نتایج کلی حاصل از این تحقیق همچنین بیانگر آن است که در کنار داده‌های عمق برف، که تنها داده‌های اندازه‌گیری شده در خصوص برف در ایران هستند، در صورت اندازه‌گیری برخی متغیرهای دیگر مثل چگالی برف، امکان مدل‌سازی برف با دقت بیشتر به ویژه به هنگام برآورد مقادیر حدی عمق برف وجود دارد. همچنین با توجه به اینکه در اکثر مدل‌های اقلیمی، که وضعیت اقلیم آبی را تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای پیش‌نگری می‌کنند، در خروجی‌های حاصل از آن‌ها به طور مستقیم برف وجود ندارد لذا به جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر برف در ایران، پیشنهاد می‌گردد که بر اساس پیش‌نگری‌های آبی مدل‌های اقلیمی برای متغیرهایی مثل دمای هوا، بارش و شدت تابش که متغیرهای ورودی جهت مدل‌سازی برف هستند از مدل‌های برف

مورد مطالعه در این تحقیق به ویژه مدل فیزیکی جهت مدل سازی برف و پیش نگرسی آن طی دوره های آبی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم استفاده گردد تا بتوان با داشتن چشم اندازی واقع بینانه از چگونگی تغییر پذیری برف در دوره های آبی، در خصوص مدیریت بهینه منابع آب در کشور گام برداشت. شایان ذکر است که با به کارگیری مدل های برف مورد مطالعه در این پژوهش، امکان برآورد طی دوره های تاریخی گذشته، که طی آن دوره ها داده های ورودی مدل های برف به صورت اندازه گیری شده وجود دارند اما داده های مربوط به برف به خوبی اندازه گیری نشده اند، نیز وجود دارد.

## سپاس گذاری

این تحقیق در قالب یک طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۴/۶۶۹۷۶ با معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کردستان به انجام رسیده است و بدین وسیله از مساعدت های مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کردستان تقدیر و تشکر به عمل می آید.

## "هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- اصغری سراسکانرود، صباد. و مدیرزاده، ریحانه. (۱۳۹۹). برآورد تغییرات عمق برف در سطح شهرستان اردبیل و سرعین با استفاده از داده های ماهواره Sentinel1 با روش تداخل سنجی راداری. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۱): ۳۹۴-۴۰۷.
- اصفی، مصطفی، فتح زاده، علی، تقی زاده مهرجردی، روح الله. و زارع چاهوکی، محمدعلی. (۱۴۰۱). برآورد عمق برف به عنوان یکی از پیامدهای تغییرات آب و هوایی با استفاده از رویکرد مدل ترکیبی حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک. *پژوهش های تغییرات آب و هوایی*، ۳(۱۲): ۲۱-۳۶.
- امینی، یاسر، علیپور، عباس، هاشمی، سیدمصطفی. و باقری سیدشکری، سجاد. (۱۳۹۶). برآورد آب معادل برف در استان کرمان جهت مدیریت منابع آب با استفاده از داده های سنجنش از دور مایکروویو غیرفعال به روش شبکه های عصبی مصنوعی و تکنیک های رگرسیون چندگانه. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۲۶(۱۰۲): ۶۷-۸۰.
- انصاری، هادی. و معروفی، صفر. (۱۳۹۵). تخمین آب معادل برف با استفاده از داده های هواشناسی و ارتفاع منطقه (مطالعه موردی: حوضه ساروق چای). *نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۱): ۱۰۱-۱۱۸.
- خوشخو، یونس. (۱۳۹۵). واسنجی و اعتبارسنجی مدل برف تک لایه (SLSM) برای شبیه سازی عمق برف در ایستگاه سینوپتیک سقز، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۷(۳): ۵۱۷-۵۲۷.
- خوشخو، یونس. (۱۴۰۲). بررسی توانمندی مدل های تجربی برآورد تابش کلی خورشید به عنوان ورودی سایر فرایندهای هیدروکلیمایی. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۱): ۱۳۷-۱۵۲.
- خوشخو، یونس، ایران نژاد، پرویز، خلیلی، علی، رحیمی، حسن. و لیاقت، عبدالمجید. (۱۳۹۲). ارزیابی مدل Coup برای شبیه سازی عمق نفوذ یخبندان خاک در ایستگاه سینوپتیک بیجار. *مجله هواشناسی کشاورزی*، ۱(۱): ۱۱-۲۰.
- ساری صراف، بهروز، نقی زاده، حبیبه، رسولی، علی اکبر، جهان بخش، سعید. و بابائیان، ایمان. (۱۳۹۸). مدل سازی و تحلیل فضایی عمق برف در پهنه شمالی ایران. *مجله پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۱(۴): ۶۵۱-۶۷۱.
- گله بان، اسلام، دوستی رضایی، مهرنگ. و نصیری، فرهاد. (۱۴۰۲). بررسی قطعیت داده های سنجنش از دور در مدل های برآورد منابع آب ناشی از ذوب برف. *مجله کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجنش از دور در برنامه ریزی*، ۱۴(۱): ۷-۲۴.
- نوروز ولاشیدی، رضا. و بهرامی پیچاقچی، حدیقه. (۱۴۰۲). آشکار سازی اثر تغییر اقلیم بر پهنه های برفی آبخیز البرز شمالی به روش CPA. *مجله مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۵(۳): ۳۸۶-۴۰۳.

## REFERENCES

- Amini, y., Alipour, a., Hashemi, S.M., & Bagheri-SeyeedShokri, S. (2017). Estimation of snow equivalent water for managing water resources in Kerman Province using passive microwave remote sensing data By the method of artificial neural networks and multiple regression techniques. *Sepehr*, 67-80. (In Persian)
- Ansari, H., & Marofi, S. (2016). Snow water equivalent estimation using meteorological data and land elevation (A case study: Sarug-chai basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(1), 101-118. (In Persian)



- Armstrong, R.L. & Brun, E. (2008). *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*, Cambridge University Press, 219 p.
- Asefi, M., Fathzadeh, A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Zare-Chahooki, M.A. (2022). Snow depth estimating as one of the consequences of climate change using the combined least squares model approach of support vector machine and genetic algorithm. *Journal of Climate Change Research*, 3(12), 21-36. (In Persian)
- Asghari Saraskanrood, S., & Modirzadeh, R. (2020). Estimation of changes in snow depth in Ardabil and Sarein city using Sentinel1 satellite data with Radar interferometry Method. *Iran-Water Resources Research*, 16(1), 394-407. (In Persian)
- Bellinger, J., S. Achleitner, J. Schöber, F. Schöberl, R. Kirnbauer, & K. Schneider. (2012). The impact of different elevation steps on simulation of snow covered area and the resulting runoff variance. *Advances in Geosciences*, 32, 69-76.
- Berg, J., Reynolds, D., Quéno, L., Jonas, T., Lehning, M., & Mott, R. (2024). A seasonal snowpack model forced with dynamically downscaled forcing data resolves hydrologically relevant accumulation patterns. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1393260.
- Carroll, T. R. (2007). *Snow Modeling and Observations at NOAA'S National Operational Hydrologic Remote Sensing Center. Management of Natural and Environmental Resources for Sustainable Agricultural Development*, 106p.
- Deng, H., Pepin, N. C., & Chen, Y. (2017). Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(14), 7323-7341.
- Galehban, E., Dosti Rezaei, M., & Nasiri, F. (2023). Examining the certainty of remote sensing data in models for estimating water resources derived from snowmelt runoff. *Application of GIS and RS in Planning Journal*, 14(1), 7-24. (In Persian)
- Gustafsson, D., M. Stahli, and P. E. Jansson. (2001). The surface energy balance of a snow cover: comparing measurements to two different simulation models. *Theor. Appl. Climatol.* 70: 81-96.
- Jansson, P. E., & Karlberg, L. (2001). *Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-plant-atmosphere System*. Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Department of Land and Water Resources Engineering, Stockholm, Sweden.
- Khoshkhou, Y. (2016). Simulation of the snow depth using Single Layer Snow Model (SLSM) at Saghez station. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 517-527. (In Persian)
- Khoshkhou, Y. (2023). The capability of some global solar radiation empirical models as the input of the other hydro-climatic processes. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(1), 137-152. (In Persian)
- Khoshkhou, Y., Irannejad, P., Khalili, A., Rahimi, H., & Liaghat, A. (2014). Evaluation of COUP Model for simulation of soil frost depth at Bijar synoptic station. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1(2), 11-20. (In Persian)
- Khoshkhou, Y., Jansson, P. E., Irannejad, P., Khalili, A., & Rahimi, H. (2015). Calibration of an energy balance model to simulate wintertime soil temperature, soil frost depth, and snow depth for a 14-year period in a highland area of Iran. *Cold Regions Science and Technology*, 119, 47-60.
- Leonardini, G., Anctil, F., Vionnet, V., Abrahamowicz, M., Nadeau, D. F., & Fortin, V. (2021). Evaluation of the snow cover in the Soil, Vegetation, and Snow (SVS) land surface model. *Journal of Hydrometeorology*, 22(6), 1663-1680.
- Li, G., Wang, Z.S., & Huang, N. (2018). A snow distribution model based on snowfall and snow drifting simulations in mountain area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(14), 7193-7203.
- Li, Q., Yang, T., & Li, L.H. (2021). Impact of forcing data and land surface properties on snow simulation in a regional climate model: a case study over the Tianshan Mountains, Central Asia. *Journal of Mountain Science*, 18(12), 3147-3164.
- Mellander, P.E., H. Laudon, & K. Bishop. (2005). Modelling variability of snow depth and soil temperatures in Scots pine stands. *J. Agric. For. Meteorol.*, 133, 109-118.
- NoroozValashedi, R., & BahramiPichaghchi, H. (2023). Detection of the effect of climate change on the snow areas of the Northern Alborz Watershed by CPA method. *Watershed Engineering and Management Journal*, 15(3), 386-403. (In Persian)
- Olefs, M., Koch, R., Schöner, W., & Marke, T. (2020). Changes in snow depth, snow cover duration, and potential snowmaking conditions in Austria, 1961–2020—a model-based approach. *Atmosphere*, 11(12), 1330. 1-21.
- Pulliainen, J., Luojus, K., & Derksen, C. (2020). Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, 581(7808), 294-298.



- Sari Sarraf, B., Naghizadeh H., Rasouly, A.A., Jahanbakhsh, S., & Babaeyan, I. (2020). Modeling and spatial analysis of snow depth in Northern Iran based on database from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). *Physical Geography Research*, 51(4), 651-671. (In Persian)
- Schilling, S., Dietz, A., & Kuenzer, C. (2024). Snow Water Equivalent Monitoring—A Review of Large-Scale Remote Sensing Applications. *Remote Sensing*, 16(6), 1085.
- Seidel, K., & Martinec, J. (2004). Remote sensing in snow hydrology: runoff modeling ,effect of cli25 mate change, Springer-Praxis books in geophysical sciences, Springer; Praxis Pub., Berlin; New York, Chichester, UK, 150 pp.
- Senapati, N., Jansson, P.E., Smith, P., & Chabbi, A. (2016). Modelling heat, water and carbon fluxes in mown grassland under multi-objective and multi-criteria constraints. *Environmental Modelling and Software*, 80, 201-224.
- Thorsen, S.M., Roer, A.G., & Oijen, M.V. (2010). Modelling the dynamics of snow cover, soil frost and surface ice in Norwegian grasslands. *Polar Research*. 29(1): 110-126.
- Wang, Y., Xie, Z., Jia, B., Wang, L., Li, R., Liu, B., & Qin, P. (2020). Sensitivity of snow simulations to different atmospheric forcing data sets in the land surface model CAS-LSM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2019JD032001.
- Xu, S. (2011). Impact of cold climate on boreal ecosystem processes-exploring data and model uncertainties. Doctoral Thesis in Land and Water Resources Engineering, KTH University, Stockholm, Sweden.