



Assessment of Reanalysis Derived Snow Depth Uncertainty in Northwestern Iran Using ERA5-Land and MERRA-2

Bromand Salahi^{1*}, Ali Shahi¹

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 19 July 2025

Revised: 16 September 2025

Accepted: 20 September 2025

Available Online:

26 September 2025

Keywords:

Snow Depth

Climatic Uncertainty

MERRA-2

ERA5-Land

Northwestern Iran

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the accuracy of snow depth estimation derived from two reanalysis datasets, ERA5-Land and MERRA-2, across northwestern Iran, using data from ten selected synoptic meteorological stations over a 20-year period (2004–2023). Ground-based observational data were obtained from the Iranian Meteorological Organization, while reanalysis data were acquired from the NASA repository for MERRA-2 and the Copernicus Climate Data Store for ERA5-Land. To downscale the outputs of both reanalysis datasets and reduce systematic bias, the Quantile Mapping (QM) method was employed. The performance of ERA5-Land and MERRA-2 was statistically evaluated by comparing their estimated snow depth values with in situ observations from the synoptic stations on a monthly time scale. Four statistical indicators Kling Gupta Efficiency (KGE), Taylor diagram metrics, Pearson correlation coefficient, and Root Mean Square Error (RMSE) were calculated using the R statistical environment. The results demonstrated that the Quantile Mapping bias-correction technique provides reliable adjustment for snow-related parameters and can effectively improve reanalysis accuracy. Overall, the ERA5-Land dataset showed a higher capability in detecting wintertime snow depth variations across northwestern Iran compared to MERRA-2. The best performance of ERA5-Land was observed at the Mahabad, Khoy, Tabriz, Ahar, Urmia, and Maragheh stations. Furthermore, the analysis revealed a spatial pattern of uncertainty, with an increase in ERA5-Land snow depth uncertainty from the western toward the eastern parts of northwestern Iran. These findings indicate that ERA5-Land provides robust and reliable estimates of snow depth in winter conditions, particularly over the complex topography of northwestern Iran, although its accuracy decreases slightly eastward due to localized climatic and terrain influences.

* Corresponding author: Bromand Salahi

E-mail address: salahi@uma.ac.ir

How to cite this article: Salahi, B., & Shahi, A. (2026). Assessment of Reanalysis Derived Snow Depth Uncertainty in Northwestern Iran Using ERA5-Land and MERRA-2. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 132-152. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.95012.1604>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Snow is an important phenomenon in mountainous areas and at high latitudes. Since snow causes transportation and agricultural problems due to temperature drops, it requires careful investigation. Snow evaluation without reliable data cannot produce effective and meaningful results. Due to the constraints of mountainous regions in the construction and maintenance of ground stations and the limited number of synoptic stations, data coverage is often insufficient. One suitable alternative is the use of reanalysis datasets, which can provide valuable information for researchers if they have appropriate spatial resolution and are compatible with the study area. Therefore, the accuracy and effectiveness of these datasets must be evaluated prior to their application.

Material and Methods

After obtaining monthly data from both reanalysis datasets, the snow depth parameter was converted from meters to centimeters to ensure consistency. The accuracy of the datasets was initially evaluated using a Taylor diagram and compared with observational data. For this purpose, 30% of the study stations (three stations) were selected based on their spatial distribution, climatic variability, distance between stations (km), and elevation differences. Due to the weak performance of raw snow depth data from both datasets in the Taylor diagram, the outputs of the two reanalysis datasets were downscaled using the Quantile Mapping method. In the next step, the downscaled results for the three selected stations were compared with the raw snow depth values for the same stations. The calculations indicated that the downscaled results performed better; therefore, subsequent analyses were conducted using downscaled data for all 10 stations. Considering the geographical location and mountainous topography of the study area, as well as favorable conditions for snowfall during winter, snow depth analyses were carried out for December, January, and February. Statistical indices including the Pearson correlation coefficient, Root Mean Square Error (RMSE), and Kling Gupta Efficiency (KGE) were calculated using the R software to evaluate the seasonal and spatial variability of snow depth based on ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis datasets. For each station, the Percentage Bias Index (PBIAS) was calculated separately for the outputs of the two reanalysis datasets for each winter month, and the difference between the two datasets was averaged for each station. The resulting bias differences were zoned and mapped in a GIS environment for each three-month period. Finally, to provide a clear visual comparison of snow depth estimates from the two reanalysis datasets across the 10 stations in northwestern Iran, box plots were generated using R software.

Results and Discussion

According to the Taylor diagram results, downscaling of snow depth data from both reanalysis datasets is necessary before application. In this study, the ERA5-Land reanalysis dataset performed better than MERRA-2 in both spatial (station-based) and temporal (seasonal) analyses. Based on the Taylor diagram, the downscaled outputs from both datasets were used for further snow depth evaluation.

Bar graphs were produced for each synoptic station to represent winter snow depth over the 20-year study period. Among the 10 synoptic stations, Tabriz, Khalkhal, Meshkin Shahr and Urmia stations representing different elevations, geographical locations, and climatic conditions were selected for detailed analysis of the winter season.

In January, the correlation coefficient, RMSE and KGE values indicated that snow depth estimates from the ERA5-Land reanalysis dataset were more accurate than those from MERRA-2. Compared with MERRA-2, ERA5-Land exhibited lower RMSE values and higher correlation and KGE values. The highest accuracy of the ERA5-Land dataset was observed at the Tabriz synoptic station. In December, the best performance of ERA5-Land was recorded at the Urmia station, with a KGE value of 0.9.

The seasonal spatial distribution based on bias differences between the two datasets showed that the maximum spatial differences in snow depth occurred in January at the Tabriz and Maragheh stations (central part of the study area) and in February and December at the Ahar station (northern part of the study area).

Conclusion

The results showed that the raw outputs of ERA5-Land and MERRA-2 are not suitable for direct snow depth estimation in northwestern Iran, making downscaling unavoidable prior to application. The findings confirmed the reliability of the Quantile Mapping (QM) bias-correction method for snow-related variables. Overall, ERA5-Land demonstrated a higher capability in detecting winter snow depth compared with MERRA-2, which showed limited reliability except at a few stations and months; therefore, caution is required when using MERRA-2 data in the study area. ERA5-Land exhibited its best performance at the Mahabad, Khoy, Ahar, Urmia and Maragheh stations, with KGE values close to unity, whereas the weakest performance of both datasets occurred at the Sarab station. Temporally, ERA5-Land performed best in December, while the poorest performance was observed for MERRA-2 in February. The maximum bias difference between the two reanalysis datasets over the 20-year period reached 542 cm in December, with the largest spatial bias differences occurring at the Ahar station (December and February) and at the Tabriz and Maragheh stations (January). The minimum spatial bias difference was detected at the Ardabil station in January.

In addition, the uncertainty of ERA5-Land snow depth estimates increased from west to east across northwestern Iran. The results are largely consistent with previous studies reporting the superior performance of ERA5 over MERRA-2 in mountainous regions, while partially differing from studies suggesting systematic underestimation or latitude-dependent uncertainty patterns. Overall, this study provides a robust seasonal-scale assessment of reanalysis-based snow depth over a long-term period (2004–2023) using a multi-metric evaluation framework.



ارزیابی عدم قطعیت عمق برف بازتحلیل شده در شمال غرب ایران با استفاده از MERRA-2 و ERA5-Land

برومند صلاحی^{۱*}، علی شاهی^۱

^۱گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹ کلمات کلیدی: عمق برف عدم قطعیت اقلیمی MERRA-2 ERA5-Land شمال غرب ایران	این مطالعه با هدف ارزیابی دقت تخمین عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل ERA5-Land و MERRA-2 در شمال غرب ایران (۱۰ ایستگاه همدیدی منتخب) طی یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳) انجام شده است. داده‌های ایستگاه زمینی از سازمان هواشناسی ایران و داده‌های مربوط به دو پایگاه بازتحلیل از سایت ناسا برای MERRA-2 و کوپرنیکس برای ERA5-Land دریافت شدند. برای مقیاس‌گذاری برون‌داد دو پایگاه داده مذکور از روش نگاشت چارکی (Quantile Mapping) استفاده شد. دقت دو پایگاه بازتحلیل برای ارزیابی عملکردشان با روش‌های آماری KGE، تیلور، ضریب همبستگی پیرسن و RMSE در نرم‌افزار R به صورت مقایسه عمق برف برآورد شده با ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی زمینی در مقیاس زمانی ماهانه انجام گرفت. محاسبات نشان داد که روش تصحیح اریبی نگاشت چارکی (QM) برای متغیر برف قابل اطمینان است. پایگاه بازتحلیل ERA5 Land توانایی تشخیص عمق برف در شمال غرب ایران را در فصل زمستان دارد و در مقایسه با داده‌های پایگاه بازتحلیل MERRA-2 دقت بالاتری دارد. نتایج نشان داد که پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در ایستگاه‌های مهاباد، خوی، تبریز، اهر، ارومیه و مراغه بهترین عملکرد را داشته‌اند. نتایج نشان داد با گذر از غرب منطقه شمال غرب ایران به سمت شرق آن بر میزان عدم قطعیت داده‌های عمق برف پایگاه بازتحلیل ERA5 Land افزوده می‌شود.

مقدمه

برف به دلیل ویژگی‌های عایق‌بندی و بازتاب بالای آن، به طور قابل توجهی بر چرخه هیدرولوژی و تعادل انرژی زمین تأثیر می‌گذارد (Muelchi, Rössler, Schwanbeck, Weingartner & Martius, 2021). تغییرات یخ‌های دریای قطب شمال نیز اثرات مستقیمی بر اقلیم، اکوسیستم‌ها و شیوه‌های سنتی زندگی دارد (Meier & Stroeve, 2022). ذوب برف یخچال‌های طبیعی و لایه‌های

یخ دائمی، تهدیدی جدی برای تأمین آب بسیاری از جوامع محسوب شده و احتمال وقوع سیلاب‌ها را افزایش می‌دهد (Shukla et al., 2022).

مشاهدات زمینی، شامل داده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های هواشناسی، برف‌سنجی و ایستگاه‌های هیدرولوژیکی، یکی از منابع معتبر برای ارزیابی عمق برف به شمار می‌رود. با این حال، به دلیل پراکندگی مکانی ایستگاه‌ها و فقدان پوشش زمانی پیوسته در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در نواحی کوهستانی و مرتفع، این داده‌ها به‌تنهایی پاسخ‌گوی نیاز به پایش منظم و دقیق ویژگی‌های فیزیکی برف نیستند (Li, Yang & Li, 2022). از این‌رو، بهره‌گیری از روش‌های جایگزین با قابلیت تخمین قابل‌قبول برای برآورد پارامترهای مرتبط با برف ضروری به نظر می‌رسد. در این میان، داده‌های بازتحلیل به‌عنوان ابزاری نوین و کارآمد نقش مهمی در پر کردن خلأ داده‌های زمینی ایفا می‌کنند و در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در مطالعات مشابه یافته‌اند (Xiao, Che & Dai, 2020).

بهرامی و همکاران (Bahrami, Fathzadeh, Zaree Chahooki & Taghizadeh Mehrjerdi, 2016) اثر مقیاس پارامترهای ژئومورفومتری بر پراکنش مکانی عمق برف را بررسی کردند. داده‌های نمونه شامل ۱۰۰ نقطه با روش‌های پیرکیوب و ۱۹۵ نقطه سیستماتیک بود. پارامترهای ژئومورفومتری از یک مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متری استخراج و در شبکه عصبی وارد شدند و تحلیل حساسیت، عوامل مهم تعیین‌کننده عمق برف را مشخص کرد. سپس ۹ مدل ارتفاعی با مقیاس‌های مختلف ساخته و روابط رگرسیونی با داده‌های نمونه برقرار شد. دقت مدل‌ها با RMSE و MAE سنجیده شد و مدل با وضوح ۱۵۰ متر بهترین عملکرد را نشان داد. یافته‌ها اهمیت انتخاب مقیاس مناسب برای بهبود دقت برآورد عمق برف و کاهش هزینه‌ها را نشان می‌دهد. دالوز و همکاران (Daloz et al., 2020) تخمین بارش برف در مناطق کوهستانی را در کوهستان‌های بلند چهار قاره اوراسیا، آمریکای شمالی، آمریکای جنوبی و آفریقا بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که تخمین بارش برف در مقیاس جهانی با استفاده از داده‌های ERA-Interim و MERRA-2¹ بسیار مشابه است، که این امر معتبر بودن این داده‌ها در مناطق کوهستانی را نشان می‌دهد.

بابا و همکاران (Baba et al., 2021) نیز به ارزیابی داده‌های MERRA2 و ERA5² برای مدل‌سازی آب معادل برف در ارتفاعات اطلس پرداختند. این پژوهش در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۹ (۳۷ سال آبی) انجام شد و خروجی‌های مدل با استفاده از مشاهدات جریان رودخانه، ارتفاع برف و مساحت پوشش برف MODIS ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که هر دو مدل MERRA-2 و ERA5 عملکرد مناسبی در بازتولید وضعیت پوشش برف برای اکثر سال‌های آبی دارند؛ به‌طور کلی، عملکرد ERA5 در مقایسه با MERRA2 در مناطق مرتفع اطلس در مراکش بهتر بوده است.

ژایو و همکاران (Zhao, Chen, Shahzad, Xia & Lin, 2024) با توسعه شبکه چندمقیاسی MFNet توانستند برآورد عمق برف با وضوح بالا را به‌طور دقیق انجام دهند؛ نتایج آن‌ها نشان داد این روش نسبت به رویکردهای پیشرفته موجود دقت بیشتری دارد.

($RMSE = 0/36$ و $MAE = 0/128$). هی و همکاران (He et al., 2024) با استفاده از داده‌های رادیومتر میکروویو غیرفعال، عمق برف روزانه بر روی یخ دریای قطب شمال را در طول زمستان تخمین زدند. الگوریتم بهبودیافته آن‌ها دقت مناسبی نشان داد (ضریب همبستگی $0/6$ تا $0/72$ و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) که بین $6/18$ تا $7/53$ سانتی‌متر متغیر است) و توانست تغییرات فصلی عمق برف را در کل فصل زمستان (اکتبر تا آوریل) با موفقیت ثبت کند.

1- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2

2- ECMWF Reanalysis version 5

نقی‌زاده و همکاران (Naghizadeh, Rasouly, Sari Sarraf, Jahanbakhsh & Babaian, 2019) روند عمق برف در شمال ایران را طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ با داده‌های ECMWF^۱ نسخه ERA Interim و آزمون‌های ناپارامتریک Mann-Kendall و Sen's slope بررسی کردند. تحلیل‌ها نشان داد که بیشتر مناطق، روند کاهشی معناداری دارند، به‌ویژه در استان‌های قزوین، زنجان، آذربایجان شرقی و تهران. افزایش عمق برف تنها در البرز مرکزی طی ماه‌های اکتبر و نوامبر معنی‌دار بود، درحالی‌که زمستان بیشترین کاهش را تجربه کرده و بیش از ۹۶ درصد پهنه‌های هم‌روند کاهش چشمگیر نشان دادند.

آصفی و فتح‌زاده (Asefi & Fathzadeh, 2022) با استفاده از داده‌های میدانی، تصاویر لندست ۸ و شاخص NDSI به شبیه‌سازی عمق برف در حوزه چلگرد پرداختند و نشان دادند شبکه عصبی مصنوعی بهترین عملکرد را داشت، هرچند کاهش ویژگی‌ها با PCA به بهبود مدل منجر نشد. در ادامه، آصفی و همکاران (Asefi, Fathzadeh, Taghizadeh-Mehrjardi & Zare Chahooki, 2023) با ترکیب ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک دقت برآورد عمق برف را به‌طور چشمگیری افزایش دادند ($R^2=0.95$, $RMSE \approx 3.97$ cm).

حاجی‌محمدی و حاجی‌وند (Haji Mohammadi & Hajivand, 2023) با استفاده از داده‌های ECMWF و مشاهدات ۱۳ ایستگاه در خوزستان (۲۰۰۰-۲۰۱۶)، الگوهای گردوغبار را بررسی کردند. نتایج نشان داد انتقال ذرات از عراق و سوریه و ناپایداری‌های جوی نقش اصلی در رخدادها داشتند. مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi, Sabetghadam & Gharaylou, 2024) تغییرات عمق برف در قله‌های دماوند، دنا، زردکوه و هزار را طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۰ با داده‌های MERRA-2 تحلیل کردند. یافته‌ها حاکی از تغییرپذیری سالانه بدون روند معنادار بود و نشان داد دما و عرض جغرافیایی در ماندگاری برف اثر بیشتری نسبت به ارتفاع دارند. خوش‌اخلاق و همکاران (Khoshakhlagh, Haji Mohammadi & Koshky, 2024) شرایط جوی فون در آتش‌سوزی جنگل‌های شمال ایران را بررسی کردند. داده‌های ایستگاهی و بازتحلیل نشان داد حضور هم‌زمان پرفشار جنوب و کم‌فشار پشت‌باد البرز، گرادیان شدید فشار و جریان جنوبی را به سمت شمال تقویت کرده است. میرموسوی و حیدری منفرد (Mirmousavi & Heidari Monfared, 2024) تغییرات مکانی-زمانی پوشش برف در شمال غرب ایران (۱۹۸۲-۲۰۲۲) را با داده‌های ERA5 و ۲۰ ایستگاه بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش برف در منطقه دارای خودهمبستگی فضایی و الگوی خوشه‌ای شدید است.

مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi, Gharaylou & Sabetghadam, 2024) عملکرد داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA-2 را در تخمین عمق برف شمال غرب ایران طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ با داده‌های ایستگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد ERA5 تمایل به فروتخمین و MERRA-2 اغلب به فراتخمین دارد. همچنین، عدم قطعیت ERA5 با افزایش عرض جغرافیایی و ارتفاع بیشتر می‌شود، در حالی‌که در MERRA-2 عمدتاً به عرض جغرافیایی وابسته است.

با توجه به اهمیت منابع آبی ناشی از برف در شمال غرب ایران، ارزیابی دقیق عمق برف در این منطقه از منظر اقلیمی و مدیریتی ضرورتی انکارناپذیر است. در سال‌های اخیر، داده‌های بازتحلیل نظیر ERA5-Land و MERRA-2 به‌عنوان جایگزینی برای داده‌های ایستگاهی مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ بااین‌حال، دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها در مناطق کوهستانی با توپوگرافی پیچیده همچنان نیازمند ارزیابی جامع است. از سوی دیگر، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های گذشته بر متغیرهایی همچون دما و بارش متمرکز بوده و مطالعات تطبیقی در زمینه عملکرد این داده‌ها برای برآورد عمق برف زمستانی در مقیاس فصلی کمتر انجام شده است. علاوه بر این، محدودیت پوشش مکانی ایستگاه‌های زمینی سبب می‌شود تحلیل عملکرد داده‌های بازتحلیل در پایش و مدل‌سازی مؤلفه‌های برف، به‌ویژه در نواحی برف‌گیر، از اولویت‌های اصلی پژوهشی محسوب گردد.

این پژوهش با تمرکز بر ارزیابی هم‌زمان داده‌های ERA5-Land و MERRA-2 در مقیاس فصلی زمستان طی دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ و با بهره‌گیری از داده‌های ۱۰ ایستگاه شمال غرب ایران، نوآوری‌های قابل توجهی ارائه می‌دهد. در این مطالعه، برای مقیاس‌کاهی و اصلاح داده‌ها، روش آماری Quantile Mapping به‌صورت ماهانه و ایستگاه‌محور به کار گرفته شد. همچنین، دقت داده‌های بازتحلیل با استفاده از شاخص KGE، نمودار تیلور و PBIAS در محیط R به‌طور ترکیبی و مقایسه‌ای ارزیابی گردید. علاوه بر این، ترسیم نمودارهای جعبه‌ای فصلی به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، از دیگر جنبه‌های نوآورانه این تحقیق به شمار می‌آید.

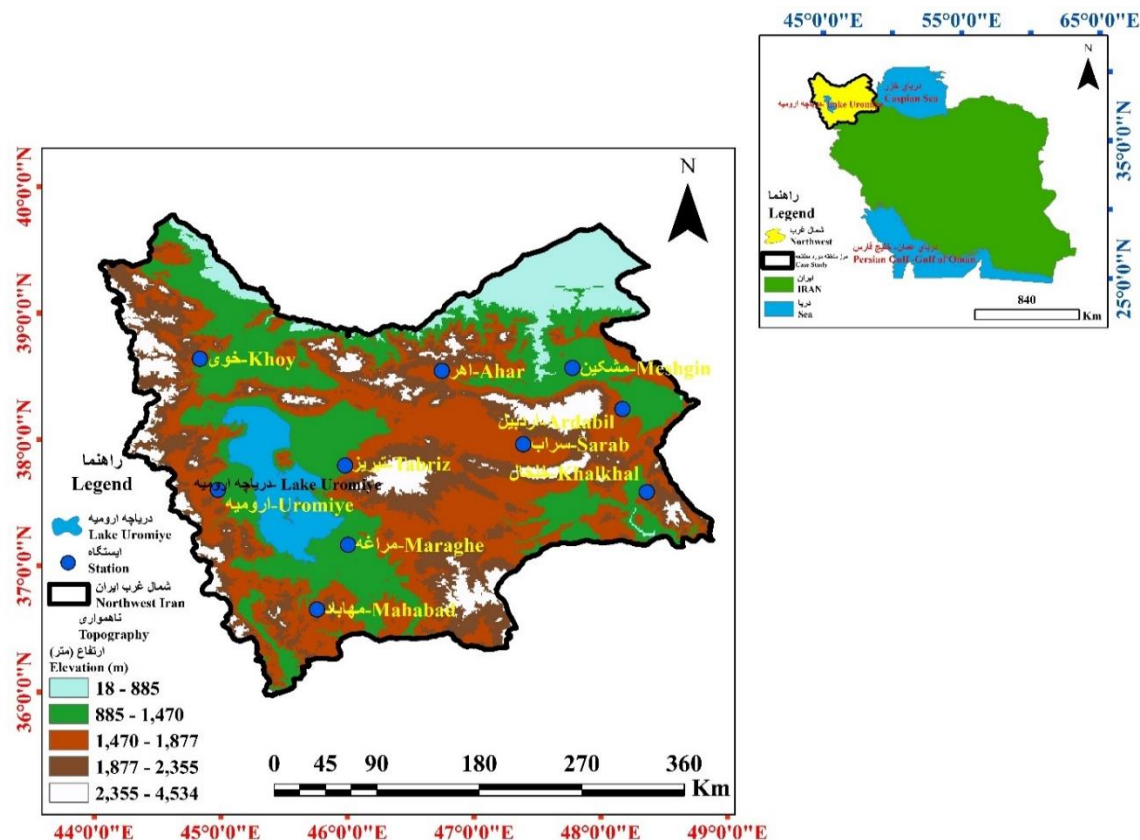
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شمال غرب ایران است که در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۴۹ درجه شرقی قرار گرفته است و شامل سه استان اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی می‌شود. در این مطالعه، از ۱۰ ایستگاه منتخب (جدول ۱) واقع در منطقه شمال غرب ایران استفاده شده است (شکل ۱).

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی همدید شمال غرب ایران

Table 1. Geographic locations of synoptic meteorological stations in northwestern Iran

ردیف Row	ایستگاه هواشناسی Meteorological Station	استان Province	ارتفاع (متر) Elevation (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
1	مشکین‌شهر Meshgin shahr	اردبیل Ardabil	1560.6	47.68	38.38
2	اردبیل Ardabil		1335.2	48.33	38.22
3	خلخال Khalkhal		1797.4	48.54	37.61
4	خوی Khoy	آذربایجان غربی West Azerbaijan	1103.4	45	38.56
5	ارومیه Uromiye		1328	45.06	37.66
6	مهاباد Mahabad		1351.8	45.72	36.75
7	اهر Ahar	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	1391	47.07	38.43
8	تبریز Tabriz		1361	46.24	38.12
9	سراب Sarab		1682	47.53	37.93
10	مراغه Maraghe		1344	46.15	37.35



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Geographical location of the study area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های عمق برف روزانه (برحسب سانتی‌متر) برای ۱۰ ایستگاه سینوپتیک منتخب واقع در شمال غرب ایران در دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۴-۲۰۲۳) از سازمان هواشناسی ایران (www.irimo.ir) اخذ گردید؛ با وجود تمایل به انتخاب دوره بلندمدت (۳۰ ساله)، به دلیل عدم وجود داده و ناقص بودن داده‌ها در برخی ایستگاه‌ها بازه ۲۰ ساله با داده‌های کامل برای افزایش دقت تحلیل استفاده شد. سپس به علت ارزیابی در مقیاس ماهانه (۳ ماه ژانویه، فوریه و دسامبر از فصل زمستان)، مقادیر میانگین ماهانه عمق برف برای هر ایستگاه (۱۰ ایستگاه همدیدی ذکر شده در جدول ۱) محاسبه گردید. در گام بعدی برای مقایسه و واکاوی عملکرد دو پایگاه بازتحلیل ERA5 Land و MERRA 2، داده‌های خام عمق برف در مقیاس زمانی ماهانه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، توسط دو پایگاه داده مذکور استخراج گردید (میانگین ماهانه). داده‌های مربوط به ERA5 Land از تارنمای کوپرنیکس^۱ و همچنین داده‌های عمق برف مورد نیاز از پایگاه MERRA 2 از سایت ناسا^۲ اخذ گردید در این پژوهش، از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land استفاده شد که وضوح مکانی بالاتری نسبت به ERA5 داشته و برای تحلیل‌های سطح خشکی از جمله برف، دقیق‌تر عمل می‌کند. مشخصات فنی دو پایگاه داده بازتحلیل در جدول (۲) ارائه شده است.

1- <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview>

2- <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=MERRA-2&page=1>

جدول ۲- مقایسه مشخصات فنی پایگاه‌های داده عمق برف

Table 2- Comparison of technical specifications of snow depth databases

ERA5-Land	MERRA-2	ویژگی Feature
بازتحلیل Reanalysis	بازتحلیل Reanalysis	نوع داده Data Type
ECMWF	NASA-GMAO	تولیدکننده Source
Snow Depth	Snow Depth	متغیر مربوط به برف Snow-Related Variable
متر (m) Meter (m)	متر (m) Meter (m)	واحد Unit
~0.1° (~9 km)	0.5°×0.625° (~50×66 km)	وضوح مکانی Spatial Resolution
ساعتی، روزانه، ماهانه hourly, daily, monthly	سه ساعته، روزانه، ماهانه 3-hourly, daily, monthly	وضوح زمانی Temporal Resolution
1981 تاکنون From 1981 to present	1980 تاکنون From 1980 to present	بازه زمانی Time Period
فقط خشکی Only land	دریا و خشکی land and sea	پوشش جغرافیایی Geographical Coverage
NetCDF	NetCDF / HDF	فرمت داده Data Format
CDS-Copernicus	NASA GES DISC	منبع دریافت Data Source

References: [NASA's Global Modeling and Assimilation Office \(GMAO\)](#), [European Centre for Medium-Range Weather Forecasts \(ECMWF\)](#)

در این مطالعه، داده‌های عمق برف از دو پایگاه بازتحلیل ERA5-Land و MERRA-2 برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی در شمال غرب ایران جمع‌آوری شد. نام ایستگاه‌ها شامل اردبیل، مشکین‌شهر، خلخال، ارومیه، خوی، مهاباد، تبریز، مراغه، سراب و اهر است و داده‌ها در بازه زمانی ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گرفت. تمامی داده‌ها به صورت ساعتی یا روزانه (تبدیل به ماهانه برای تحلیل فصلی) از پایگاه‌های رسمی هر بازتحلیل دریافت شد:

ERA5-Land از طریق پایگاه Copernicus Climate Data Store (CDS) و با فرمت NetCDF، سپس با استفاده از نرم‌افزار R پردازش و به داده‌های ماهانه ایستگاهی تبدیل گردید.

MERRA-2 از طریق پایگاه رسمی NASA GMAO و با فرمت NetCDF4 دریافت شد و مشابه ERA5-Land، پردازش و استخراج داده‌های ماهانه برای هر ایستگاه انجام شد. در این تحقیق، داده‌ها ماهانه و ایستگاه محور بوده و تمرکز بر داده‌های بازتحلیل سطح زمین (reanalysis) بوده است.

بعد از دریافت داده‌های دو پایگاه داده بازتحلیل در مقیاس زمانی ماهانه، به دلیل داشتن واحد متر برای پارامتر عمق برف، به واحد سانتی‌متر تبدیل شدند. برای ارزیابی دقت هر کدام از دو پایگاه داده، از طریق نمودار تیلور، مقایسه با داده‌های دیدبانی انجام گرفت. برای این منظور از ۳۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه (سه ایستگاه منتخب از ۱۰ ایستگاه) با توجه به پراکندگی مناسب در منطقه، اقلیم متفاوت، دوری از هم بر اساس کیلومتر و داشتن ارتفاع متفاوت انتخاب شدند و ارزیابی بر روی آن‌ها صورت گرفت.

به علت نتایج ضعیف داده‌های عمق برف دو پایگاه داده در نمودار تیلور، برونداد خام هر دو پایگاه بازتحلیل با استفاده از روش نگاشت چارکی (QM) مقیاس‌کاهی گردید. در گام بعدی نتایج مقیاس‌کاهی شده سه ایستگاه منتخب (خلخال، ارومیه و تبریز) با مقادیر خام سه ایستگاه برای عمق برف مقایسه شد. محاسبات نشان از برتری عملکرد نتایج مقیاس‌کاهی داشت و مراحل بعدی با داده‌های مقیاس‌کاهی شده ایستگاه‌ها (برای همه ۱۰ ایستگاه) اجرا شد. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و داشتن توپوگرافی کوهستانی با شرایط مساعد برای بارش برف در فصل زمستان (بارش برف قابل توجه در این فصل) واکاوی عمق برف در شمال غرب ایران و در فصل زمستان، ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر انجام گرفت. در مرحله بعد با استفاده از شاخص‌های آماری همبستگی پیرسن، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و کلینگ گوپتا، ارزیابی زمانی (سه ماه زمستان) و مکانی (۱۰ ایستگاه همدیدی) عمق برف بر اساس پایگاه‌های بازتحلیل ERA5 Land و MERRA 2 توسط نمودار میله‌ای در محیط نرم‌افزار R انجام شد. در گام بعدی برای هر ایستگاه در هر ماه از فصل زمستان مقدار شاخص درصد بایاس (PBIAS) به تفکیک برونداد هر دو پایگاه داده بازتحلیل محاسبه شد و سپس بایاس (مقدار اریبی‌های دو پایگاه داده) هر ایستگاه در هر ماه به دست آمد. بر اساس مقدار بایاس محاسبه شده برای هر سه ماه جداگانه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی پهنه‌بندی ترسیم شد. (درون‌یابی به روش معکوس فاصله وزنی انجام گرفت). در نهایت برای داشتن دید بصری مناسب و تفکیکی از عملکرد دو پایگاه بازتحلیل برای شناسایی عمق برف در شمال غرب ایران در ۱۰ ایستگاه و فصل زمستان از نمودار جعبه‌ای که در محیط R ترسیم شده استفاده گردید.

نگاشت چارکی (Quantile Mapping)

نگاشت چارکی (Quantile Mapping) یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های اصلاح سوگیری مدل‌های اقلیمی به شمار می‌رود که نخستین بار توسط پانوفسکی و بریر (Brier & Panofsky, 1968) در سال ۱۹۶۸ معرفی شد. این روش با بهره‌گیری از توابع توزیع تجمعی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، در بازه‌های زمانی مختلف، به کاهش خطاهای سیستماتیک کمک می‌کند. در اصل، این تکنیک مقدار مدل را با مقدار متناظر آن در توزیع مشاهداتی جایگزین می‌نماید؛ به گونه‌ای که مقدار مدل به چارکی خاص در توزیع تاریخی مدل نسبت داده شده و سپس مقدار مشاهده‌شده متناظر با همان چارک به عنوان مقدار اصلاح‌شده در نظر گرفته می‌شود (Hamidianpour & Shoja, 2022). از نظر ریاضی رابطه تصحیح اریبی نگاشت چارک به صورت زیر است (رابطه ۱) (Lanzante, Adams-Smith, Dixon, Nath & Whitlock, 2020).

$$F_{DF}(X) = F_{Oh}[F^{-1}_{Mh}(X)] \quad (1)$$

در رابطه فوق، F نشان دهنده تابع توزیع تجمعی و F^{-1} معکوس آن است. در فرآیند ریزمقیاس‌سازی با استفاده از روش نگاشت چارک، ابتدا موقعیت نسبی مقدار موردنظر در تابع توزیع تجمعی مدل (Mh) تعیین می‌شود. سپس، مقدار متناظر با همین موقعیت نسبی از تابع توزیع مشاهداتی (Oh) استخراج و به عنوان مقدار ریزمقیاس‌شده تخصیص می‌یابد. از آنجا که این روش صرفاً بر اساس ویژگی‌های توزیعی داده‌های مدل و مشاهدات عمل می‌کند، در چارچوب روش‌های اصلاح سوگیری جای می‌گیرد (Hamidianpour & Shoja, 2022).

نمودار تیلور

نمودار تیلور ابزاری گرافیکی است که برای نمایش هم‌زمان سه شاخص آماری مهم در مقایسه بین داده‌های مدل‌سازی و مشاهداتی به کار می‌رود. این سه شاخص عبارت‌اند از:

(۱) ضریب همبستگی (R)، (۲) انحراف معیار (SD) و (۳) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

این نمودار در چارچوب مختصات قطبی طراحی شده است، به گونه‌ای که موقعیت هر مدل نسبت به نقطه مرجع (که نماینده داده‌های مشاهده شده است) تعیین‌کننده دقت آن مدل است؛ هرچه فاصله نقطه مدل از مرجع کمتر باشد، عملکرد مدل بهتر ارزیابی می‌شود. در این نمودار، محور شعاعی معرف انحراف معیار بوده و زاویه نسبت به محور افقی گویای میزان همبستگی است. همچنین، خطوط

منحنی متحدالمرکز پیرامون نقطه مرجع نشان‌دهنده سطوح مختلف $RMSE$ هستند. این ابزار کاربرد گسترده‌ای در سنجش دقت مدل‌های اقلیمی، هیدرولوژی و داده‌های بازتحلیل دارد (Taylor, 2001).

شاخص KGE

شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) یکی از معیارهای ترکیبی برای سنجش میزان تطابق بین داده‌های مدل‌سازی (اعم از مدل عددی یا بازتحلیل) و داده‌های مشاهده‌شده است. این شاخص توسط گوپتا و همکاران (Gupta, Kling, Yilmaz & Martinez, 2009) به‌عنوان نسخه‌ای بهبودیافته از شاخص Nash-Sutcliffe توسعه داده شد. رابطه ریاضی KGE (رابطه ۲) به‌گونه‌ای تعریف شده است که سه مؤلفه کلیدی ارزیابی تطابق یعنی ضریب همبستگی، میزان بایاس و نسبت پراکندگی را به‌صورت مستقل و با وزن برابر در نظر می‌گیرد. این ویژگی باعث شده که KGE نسبت به NSE مزیت روش‌شناختی مهمی داشته باشد. مقدار KGE برابر با ۱ نشانگر انطباق کامل مدل با داده‌های واقعی است (Knoben et al., 2019).

$$KGE = 1 - \sqrt{((r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2)} \quad (2)$$

که در آن:

$$R \text{ (ضریب همبستگی پیرسون بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها)}; \beta = \mu_s / \mu_o \text{ (نسبت میانگین شبیه‌سازی به مشاهدات)};$$

$$\gamma = CV_s / CV_o \text{ (نسبت ضریب تغییرات شبیه‌سازی به مشاهدات)}$$

شاخص PBIAS

شاخص PBIAS (درصد بایاس) یکی از شاخص‌های کاربرد برای ارزیابی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی و بازتحلیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است. این شاخص میزان تمایل سیستم مدل‌سازی به بیش برآورد یا کم برآورد داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. فرمول PBIAS (۳) به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Moriasi et al., 2007).

$$PBIAS = 100 \times (\sum (S_i - O_i) / \sum O_i) \quad (3)$$

که در آن: S_i مقدار شبیه‌سازی‌شده در زمان i ، O_i مقدار مشاهده‌شده در زمان i و $\sum$ علامت جمع برای تمام i هاست. تفسیر علامت‌ها: $PBIAS > 0$ مدل تمایل به بیش برآورد دارد. $PBIAS < 0$ مدل تمایل به کم برآورد دارد. اختلاف بایاس بین دو پایگاه داده بازتحلیل از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\Delta BIAS = BIAS(ERA5 Land) - BIAS(MERRA 2) \quad (4)$$

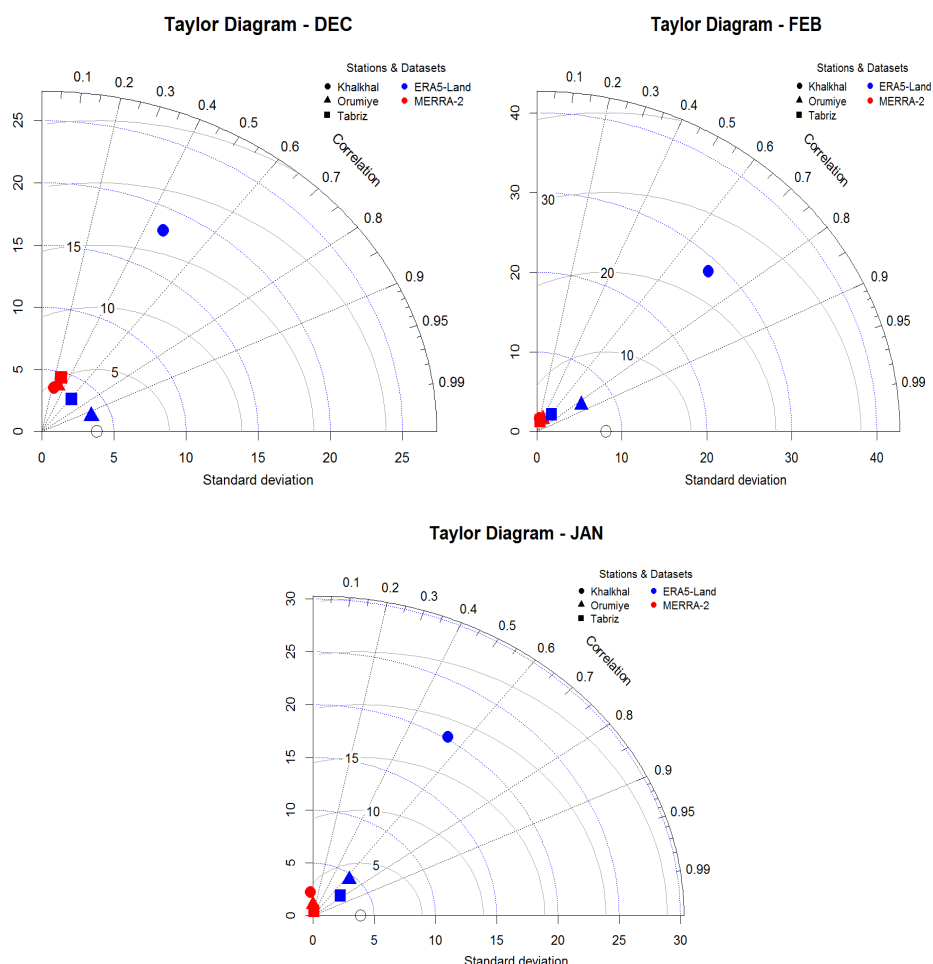
تفسیر علامت‌ها: هر کدام دارای مقدار بایاس کم‌تری بودند، تخمین دقیق‌تر داشته‌اند.

اندازه $\Delta BIAS$ نشان‌دهنده دوری یا نزدیکی عملکرد دو پایگاه داده نسبت به هم می‌باشد.

در این پژوهش، نگاشت چارکی (Quantile Mapping) برای تصحیح بایاس داده‌های بازتحلیل، نمودار تیلور برای ارزیابی تطابق فضایی، شاخص KGE برای سنجش عملکرد کلی مدل و شاخص PBIAS برای بررسی انحراف سیستماتیک استفاده شد. این شاخص‌ها امکان ارزیابی دقیق و مقایسه‌ای داده‌ها در سطح ایستگاه و پهنه‌ای را فراهم کردند. تمامی پردازش‌ها و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای R و GIS انجام شد.

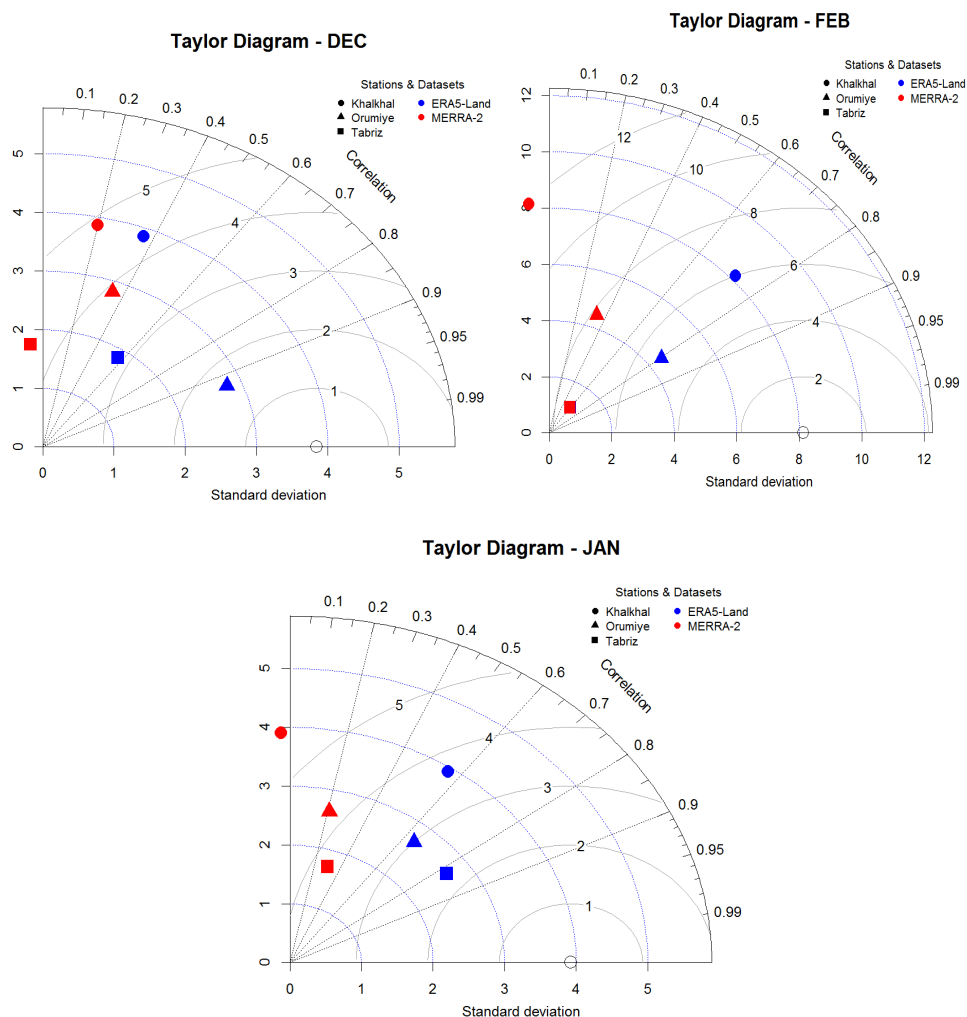
نتایج و بحث

مطابق شکل ۲ برون داد خام دو پایگاه داده در سه ایستگاه منتخب (خلخال، ارومیه و تبریز) در منطقه مورد مطالعه توسط نمودار تیلور صحت سنجی شدند و شکل ۳ راستی آزمایی برون داد مقیاس کاهی شده داده های عمق برف برای سه ایستگاه مذکور در فصل زمستان توسط نمودار تیلور را نشان می دهد. بر اساس مقایسه شکل های ۲ (قبل مقیاس کاهی) و ۳ (بعد مقیاس کاهی) که در دو وضعیت قبل و بعد از مقیاس کاهی را نشان می دهند، از سه پارامتر مربوط به نمودار تیلور، در ضریب همبستگی پیرسن تغییری دیده نشد، ولی در دو پارامتر دیگر تغییرات محسوس است به طوری که قبل از مقیاس کاهی، نوسانات و پراکندگی در داده های هر دو پایگاه نسبت به مرجع زیاد بوده و همچنین خطای RMSE عدد بزرگ تری دارد؛ اما بعد مقیاس کاهی، کاهش خطا و انحراف استاندارد در مقیاس های زمانی و مکانی مشهود است. در مجموع با توجه به سنجه آماری تیلور، انجام مقیاس کاهی قبل از استفاده از داده های عمق برف برای هر دو پایگاه الزامی است و کارایی پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در این مطالعه، از لحاظ مکانی (ایستگاه) و زمانی (فصلی) بر پایگاه داده MERRA 2 برتری دارد.



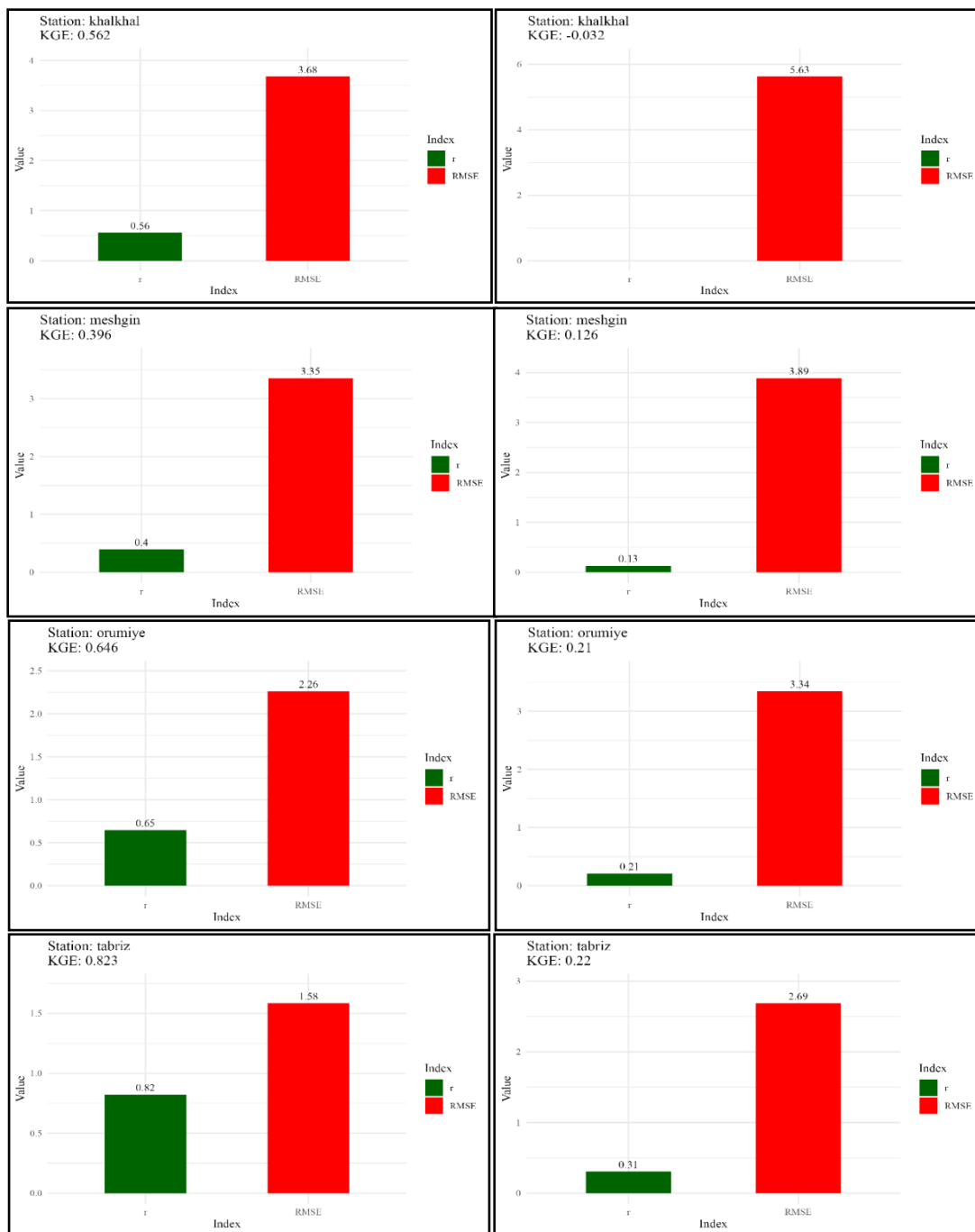
شکل ۲- نمودار تیلور ایستگاه های نماینده شمال غرب ایران جهت صحت سنجی برون داد خام عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل

Fig. 2. Taylor diagram of representative stations in northwestern Iran for validating raw snow depth outputs from two reanalysis datasets



شکل ۳- نمودار تیلور ایستگاه‌های نماینده شمال غرب ایران جهت صحت سنجی برون‌داد مقیاس‌کاهی شده عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل
Fig. 3. Taylor diagram of representative stations in northwestern Iran for validating downscaled snow depth outputs from two reanalysis datasets

مطابق نتایج نمودار تیلور، از داده‌های مقیاس‌کاهی شده هر دو پایگاه داده بازتحلیل برای ارزیابی عمق برف استفاده شد. برای واکاوی دقیق داده‌های عمق برف دو پایگاه داده از ترسیم نمودار میله‌ای در محیط R بر اساس سنج‌های ضریب همبستگی پیرسن، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و کلینگ گوپتا استفاده شد. برای این منظور برای هر ایستگاه همدیدی در هر سه ماه از فصل زمستان در دوره ۲۰ ساله نمودار میله‌ای به دست آمد (شکل ۴). با توجه به محدودیت صفحات مقاله، از میان بررسی‌های انجام‌شده برای ۱۰ ایستگاه همدیدی، شکل ۴ به‌عنوان نمونه ارائه شد. نتایج مربوط به تمام ایستگاه‌ها برای هر سه ماه و به تفکیک دو پایگاه بازتحلیل نیز در قالب جدول ارائه خواهد شد. بر اساس شکل ۴ در ماه ژانویه، در چهار ایستگاه مذکور، مطابق نمودار گرافیکی، محاسبات سنج‌های همبستگی، RMSE و KGE نشان داد که دقت برآورد عمق برف توسط پایگاه بازتحلیل ERA5 Land بالاتر از پایگاه بازتحلیل MERRA 2 است. در مقایسه صورت گرفته در برون‌داد ERA5 Land خطای ریشه دوم میانگین مربعات کمتر، کلینگ گوپتا و ضریب همبستگی بیشتر از مقادیر مشابه در MERRA 2 بود. بیشینه دقت پایگاه ERA5 Land در ایستگاه همدیدی تبریز مشاهده شد.



شکل ۴- نمودار ایستگاه‌های مشکین‌شهر، تبریز، خلخال و ارومیه جهت صحت سنجی برون‌داد عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل در ماه ژانویه (نمودارهای سمت چپ era5 Land و سمت راست MERRA 2)

Fig. 4. Bar charts of Meshkin-Shahr, Tabriz, Khalkhal, and Orumiye stations for validating snow depth outputs from two reanalysis datasets in January (left charts: ERA5-Land; right charts: MERRA-2)

مطابق جدول ۳ خروجی نمودار میله‌ای ترسیم شده در محیط نرم‌افزاری R، برای همه ایستگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های آماری و ۲ پایگاه بازتحلیل در فصل زمستان ارائه شد. با توجه به مقادیر سنجه‌های ضریب همبستگی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و کلینگ گوپتا در همه ماه‌ها و در همه ایستگاه‌ها پایگاه ERA5 Land با دقت بهتر عمق برف در شمال غرب ایران را در مقایسه با داده‌های MERRA 2 تخمین زده است. مقادیر کلینگ گوپتا مربوط به پایگاه ERA5 Land مثبت و با بزرگی نزدیک به عدد ۱ و در چند ایستگاه دقیقاً ۱ را نشان دادند در صورتی که مقدار سنجه فوق برای پایگاه MERRA 2 مقادیر کوچک و نزدیک به صفر و در چند ایستگاه منفی نیز بوده است. بر اساس شاخص آماری RMSE بیشینه و کمینه خطا در ایستگاه‌های (سراب و خلخال) و (خوی، مراغه و مهاباد) مشاهده شد. با توجه به سنجه‌های R و KGE بهترین و بدترین کارایی پایگاه‌ها به ترتیب در ایستگاه‌های همدیدی (ارومیه، خوی، مراغه، مهاباد و اهر) و (سراب، اردبیل، خلخال و تبریز) رؤیت شد.

جدول ۳- مقایسه دقت داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و MERRA-2 در ۱۰ ایستگاه شمال غرب ایران بر اساس شاخص KGE و

RMSE برای سه ماه زمستانی

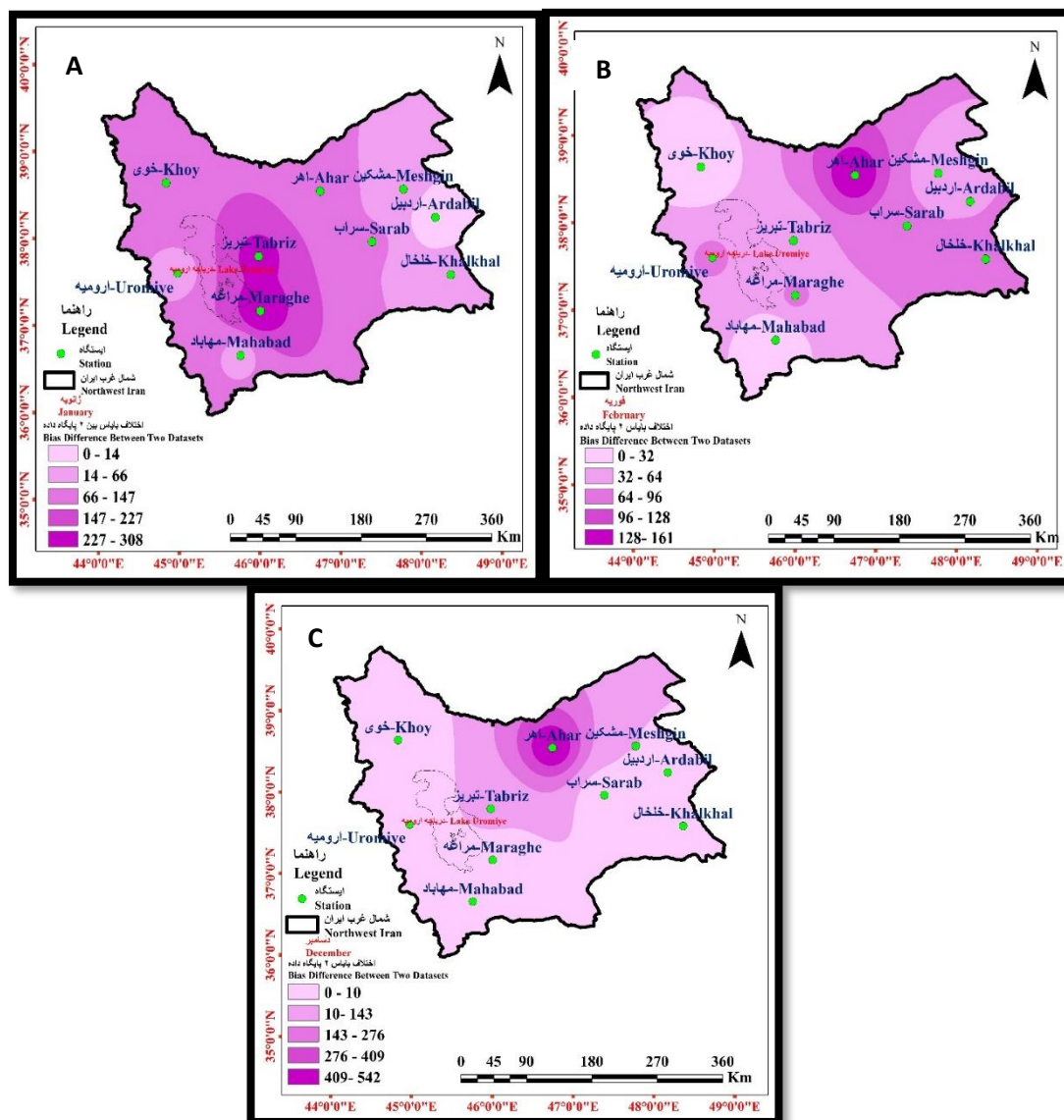
Table 3- Accuracy comparison of ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis data at 10 meteorological stations in Northwest Iran based on KGE and RMSE for three winter months

شاخص Index ایستگاه Station	R ژانویه Jan.	R فوریه Feb.	R دسامبر Dec.	KGE ژانویه Jan.	KGE فوریه Feb.	KGE دسامبر Dec.	RMSE ژانویه Jan.	RMSE فوریه Feb.	RMSE دسامبر Dec.
پایگاه داده Data base	ERA5-Land	MERRA-2	ERA5-Land	MERRA-2	ERA5-Land	MERRA-2	ERA5-Land	MERRA-2	ERA5-Land
اردبیل Ardabil	.5	.53	.5	0	.4	.33	.46	.5	.47
مشکین Meshgin	.4	.13	.21	.41	.7	.45	.39	.12	.4
خلخال Khalkhal	.6	0	.73	0	.4	.2	.56	-.03	.7
تبریز Tabriz	.82	.31	.6	.6	.6	0	.8	.22	.59
اهر Ahar	.8	.44	.8	.22	.62	.11	.8	.33	.8
سراب Sarab	0	.1	.33	.04	.5	.21	-.1	.09	.3
ارومیه Uromiye	.65	.21	.8	.34	.93	.35	.64	.2	.8
خوی Khoy	.61	.37	.8	.02	.84	.3	.6	.35	.8
مراغه Maraghe	.3	.19	.8	.4	.01	.27	.1	.74	.34
مهاباد Mahabad	.5	.2	.9	.23	.5	.48	.17	.84	.2

با توجه به شکل ۵، پهنه‌بندی فصلی (به تفکیک هر ماه زمستان) عملکرد دو پایگاه داده بر اساس مقدار بایاس (رابطه ۴) ترسیم شد. در نقشه (الف) برای ماه ژانویه حداکثر اختلاف مقدار تخمین عمق برف در منطقه مورد مطالعه ۳۰۸ سانتی‌متر بوده است. کمینه اختلاف از لحاظ مکانی در بخش شرقی به‌ویژه در ایستگاه اردبیل رؤیت شد و بیشینه اختلاف مکانی در ارزیابی عمق برف در بخش مرکزی در ایستگاه‌های تبریز و مراغه مشاهده گردید. در نقشه (ب) برای ماه فوریه، بیشینه اختلاف بین دو پایگاه داده در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه به‌خصوص در ایستگاه اهر بوده است. کمینه اختلاف دو پایگاه بازتحلیل در بخش غربی منطقه شمال غرب ایران به‌ویژه در ایستگاه‌های مهاباد و خوی مشاهده شد. حداکثر اختلاف ارزیابی عمق برف توسط دو پایگاه ۱۶۱ سانتی‌متر بوده است. در نقشه (ج) برای ماه دسامبر بیشینه اختلاف بین دو پایگاه داده به ۵۴۲ سانتی‌متر رسیده است. بیش‌ترین اختلاف در بخش شمالی در ایستگاه اهر مشاهده شد. در بخش‌های جنوبی، غربی و شرقی منطقه مورد مطالعه اختلاف چشمگیری در تخمین عمق برف نداشته‌اند. بر اساس رابطه (۳) طبق محاسبات انجام شده، در ماه ژانویه در اکثر ایستگاه‌ها، پایگاه ERA5 Land دارای بیش برآوردی و پایگاه MERRA 2 دارای کم برآوردی بوده است. در ماه فوریه در اکثر ایستگاه‌ها، پایگاه MERRA 2 فرا تخمین داشته و پایگاه ERA5 Land دارای الگوی خاص نبوده است. در ماه دسامبر در اکثر ایستگاه‌ها، هر دو پایگاه بازتحلیل در ارزیابی عمق برف در مقایسه با داده‌های مشاهداتی دارای فرا تخمین بوده‌اند.

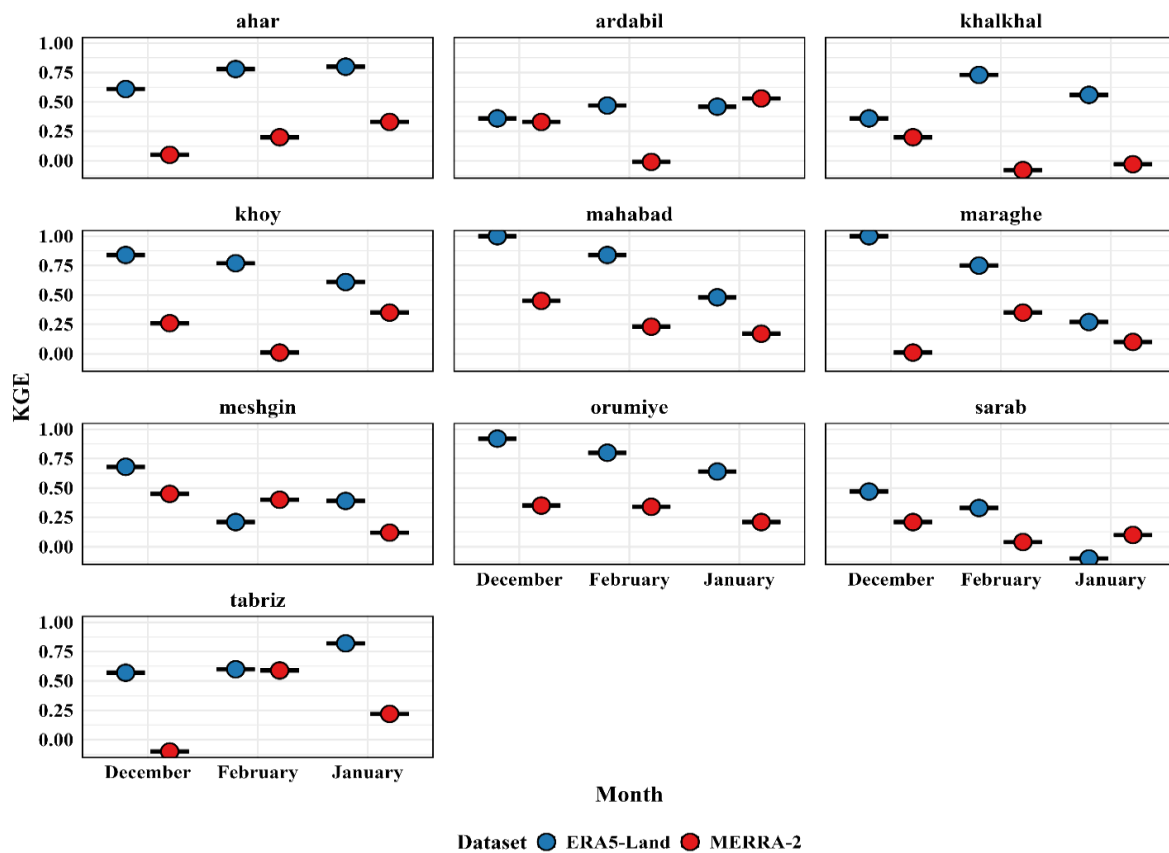
با توجه به نمودار ۶ برای هر ایستگاه در هر ماه از فصل زمستان، با در نظر گرفتن برون‌داد دو پایگاه بازتحلیل مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس سنجه ترکیبی و قابل‌اعتماد کلینگ گوپتا مقایسه صورت گرفت. یافته‌ها در مجموع نشان از برتری پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در ارزیابی عمق برف شمال غرب ایران نسبت به داده‌های MERRA 2 داشتند. طبق نمودار فوق در ماه ژانویه، به‌جز دو ایستگاه اردبیل و سراب در بقیه ایستگاه‌ها پایگاه ERA5 Land برتری محسوسی بر MERRA 2 دارد. در ماه فوریه، به‌جز در ایستگاه مشکین‌شهر در بقیه ایستگاه‌ها پایگاه ERA5 Land با مقادیر بالای شاخص کلینگ گوپتا غلبه دارد. در ماه دسامبر، در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال غرب در این تحقیق با اختلاف، پایگاه ERA5 Land نسبت به پایگاه MERRA 2 عملکرد مناسبی دارد. مقادیر مربوط به شاخص KGE در فصل زمستان در ارزیابی عمق برف، توسط پایگاه MERRA 2 حداکثر به مقدار ۰/۵ رسیده است، در صورتی‌که این سنجه در ارزیابی شناسایی عمق برف توسط پایگاه ERA5 Land تا نزدیکی عدد ۱ نیز در چند ایستگاه رسیده است که نشان از دقت بالای برآورد این پایگاه در ارزیابی عمق برف و همچنین برتری نسبت به داده‌های پایگاه MERRA 2 است.

متغیر جوی برف در مناطق کوهستانی و عرض‌های بالاتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تغییرات آن به‌طور مستقیم با وقوع مخاطرات طبیعی و تغییرات هیدرولوژیکی پیوند دارد. در تاریخ ۲۴ دی‌ماه ۱۴۰۲، بارش سنگین برف در استان اردبیل، به‌ویژه در شهر اردبیل، مشکلات جدی برای شهروندان ایجاد کرد؛ ارتفاع برف در برخی مناطق به حدود نیم متر رسید و دمای هوا تا منفی ۱۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. این شرایط منجر به مسدود شدن معابر شهری و جاده‌ها، از جمله گردنه حیران و مسیر اردبیل به آستارا شد و صدها خودرو در برف و کولاک گرفتار شدند و پروازهای هوایی لغو گردید. با توجه به مشکلاتی که برای حمل‌ونقل، کشاورزی و افت دما ایجاد می‌کند لازم است مورد بررسی قرار گیرد. ارزیابی بدون داده قابل‌اعتماد نمی‌تواند نتیجه مطلوب و مؤثری به دنبال داشته باشد. به دلیل محدودیت در مناطق کوهستانی در احداث و نگهداری ایستگاه‌های زمینی و کمبود ایستگاه‌های همدیدی، خلأ داده نیز محسوس خواهد شد. یکی از جایگزین‌های مناسب استفاده از داده‌های پایگاه‌های بازتحلیل است که در صورت داشتن تفکیک افقی مناسب و سازگاری با مکان مورد مطالعه می‌تواند پاسخگوی نیاز محققان باشد. نکته مهم ارزیابی دقت و کارایی این داده‌ها است که قبل از استفاده اجتناب‌ناپذیر است.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی اختلاف بایاس دو پایگاه داده بازتحلیل در ارزیابی عمق برف در منطقه مورد مطالعه بر اساس مقیاس فصلی در دوره (۲۰۰۴-۲۰۲۳): A: ژانویه- B: فوریه- C: دسامبر

Fig. 5. Spatial distribution map of bias differences between two reanalysis datasets in evaluating snow depth over the study area on a seasonal scale during the period 2004–2023: (a) January, (b) February, (c) December



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای عملکرد پایگاه‌های بازتحلیل در فصل زمستان، بر اساس شاخص KGE، برای ایستگاه‌های شمال غرب ایران در دوره ۲۰۲۳-۲۰۰۴

Fig. 6. Boxplot of the performance of reanalysis datasets in winter based on the KGE metric for stations in northwestern Iran during the period 2004–2023

نتیجه‌گیری

نتایج نشان دادند که داده‌های خام دو پایگاه بازتحلیل مورد ارزیابی در این تحقیق قابلیت شناسایی عمق برف در شمال غرب ایران را ندارند، به عبارتی انجام مقیاس‌کاهی برای برون‌داد داده‌های بازتحلیل قبل از استفاده اجتناب‌ناپذیر است. همچنین نتایج، نشان داد که روش تصحیح اریبی نگاشت چارکی (QM) برای متغیر برف قابل اطمینان است. بر اساس مطالعه صورت گرفته پایگاه بازتحلیل ERA5 Land توانایی تشخیص عمق برف در شمال غرب ایران را در فصل زمستان دارد و در مقایسه با داده‌های پایگاه بازتحلیل 2 MERRA دقت بالایی دارد. با توجه به مطالعه انجام شده، پایگاه بازتحلیل 2 MERRA به‌جز در برخی ماه‌ها و ایستگاه‌ها توان تشخیص مناسبی را نشان نداد و در صورت استفاده از داده‌های عمق برف در منطقه شمال غرب ایران باید احتیاط کرد. مطالعه حاکی از آن است که پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در ایستگاه‌های مه‌آباد، خوی، اهر، ارومیه و مراغه، بهترین عملکرد را داشته است، به‌طوری‌که مقدار شاخص KGE به عدد ۱ بسیار نزدیک گردید و ضعیف‌ترین عملکرد هر ۲ پایگاه در ایستگاه سراب بوده است. بهترین کارایی از لحاظ زمانی در ماه دسامبر توسط پایگاه بازتحلیل ERA5 Land مشاهده شد و ضعیف‌ترین عملکرد زمانی در ماه فوریه توسط پایگاه بازتحلیل 2 MERRA انجام گرفت. بر اساس مطالعه حاضر، بیشینه مقدار اختلاف بایاس بین دو پایگاه داده بازتحلیل در ارزیابی عمق برف در دوره ۲۰ ساله، در ماه دسامبر ۵۴۲ سانتی‌متر بوده است، بیشینه اختلاف بایاس مکانی دو پایگاه در ماه‌های

دسامبر و فوریه در ایستگاه اهر و در ماه ژانویه در ایستگاه‌های تبریز و مراغه مشاهده شد. کمینه اختلاف بایاس مکانی بین دو پایگاه داده بازتحلیل در ماه ژانویه در ایستگاه اردبیل رؤیت شد. مطالعه حاضر نشان داد که هرچه از غرب منطقه شمال غرب ایران به سمت شرق آن حرکت کنیم از میزان دقت داده‌های عمق برف پایگاه بازتحلیل ERA5 Land کاسته می‌شود (افزایش عدم قطعیت). نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های کیاو و همکاران (Qiao et al., 2023) و تاسزارک و همکاران (Taszarek et al., 2021) از لحاظ تأیید عملکرد مناسب ERA5 در مقایسه با MERRA2 در مناطق مرتفع همسو است. نتایج این مطالعه با یافته‌های تحقیق مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi et al., 2024) از بابت، با افزایش ارتفاع در شمال غرب ایران میزان عدم قطعیت در برآورد میزان عمق برف میانگین حاصل از داده‌های ERA5 افزایش می‌یابد هم‌راستا است. نتایج این پژوهش در زمینه این که داده‌های ERA5 در تخمین میزان عمق برف در شمال غرب ایران نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای فروتخمین هستند و میزان عدم قطعیت در برآورد میزان عمق برف میانگین حاصل از داده‌های ERA5 با افزایش عرض جغرافیایی بیش‌تر می‌گردد؛ با نتایج مطالعه مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi et al., 2024) همسو نیست. نتایج این پژوهش علاوه بر ارائه تصویری روشن از قابلیت داده‌های ERA5- Land و MERRA-2 در برآورد عمق برف زمستانی شمال غرب ایران، نوآوری‌های قابل توجهی را نیز به همراه داشت. نخست آن که ارزیابی داده‌ها به صورت هم‌زمان و در مقیاس فصلی زمستان برای یک بازه زمانی نسبتاً طولانی (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳) انجام گرفت که در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته و معمولاً تعداد ایستگاه‌های مورد بررسی در آن‌ها کمتر است. دوم، استفاده از روش آماری Quantile Mapping به صورت ماهانه و ایستگاه‌محور برای مقیاس‌کاهی و تصحیح داده‌های بازتحلیل، دقت نتایج را به طور چشمگیری افزایش داد. سوم، بهره‌گیری ترکیبی از شاخص‌های KGE، PBIAS و نمودار تیلور امکان ارزیابی جامع‌تری نسبت به رویکردهای تک‌معیار فراهم نمود. در نهایت، به کارگیری نمودارهای جعبه‌ای فصلی برای مقایسه عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، دیدگاه تازه‌ای نسبت به ناهمگنی مکانی داده‌های بازتحلیل در مناطق کوهستانی ایران ارائه کرد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۴/۵/۳۱۶۰ استخراج گردیده است لذا نویسندگان، از پشتیبانی معاونت محترم پژوهشی و دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه محقق اردبیلی، کمال تشکر را دارند. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نکته‌نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Asefi, M., & Fathzadeh, A. (2022). Simulating spatial distribution of snow depth using artificial intelligence and linear regression based on feature reduction (Case study: Chalgerd watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4), 29-43. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11560.1141>
- Asefi, M., Fathzadeh, A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Zare Chahooki, M. A. (2023). 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. *Climate Change Research*, 3(12), 21-36. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.369343.1105>
- Baba, M. W., Boudhar, A., Gascoin, S., Hanich, L., Marchane, A., & Chehbouni, A. (2021). Assessment of MERRA-2 and ERA5 to model the snow water equivalent in the high atlas (1981–2019). *Water*, 13(7), 890. <https://doi.org/10.3390/w13070890>
- Bahrami, M., Fathzadeh, A., Zaree Chahooki, M. A., & Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2016). Scale Effect Geomorphometric Parameters of Spatial Pattern of Snow Depth. *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(6), 95-113. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1395.3.6.6.0>

- Daloz, A. S., Mateling, M., L'Ecuyer, T., Kulie, M., Wood, N. B., Durand, M., ... & Dimri, A. P. (2020). How much snow falls in the world's mountains? A first look at mountain snowfall estimates in A-train observations and reanalyses. *The Cryosphere*, 14(9), 3195–3207. <https://doi.org/10.5194/tc-14-3195-2020>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Haji Mohammadi, H., & Hajivand Paydari, S. (2023). Evaluation of ECMWF Center Data in Monitoring and Forecasting Dust Storms in Southwestern Iran (Case Study: Khuzestan Plain). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 155-170. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75342.1178>
- Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *An introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling* (1st ed.). University of Sistan and Baluchestan Press. [In Persian]
- He, L., Xue, B., Hui, F., Xu, S., Chen, Z., & Cheng, X. (2024). Toward daily snow depth estimation on arctic sea ice during the whole winter season from passive microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1-15. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3358340>
- Khoshakhlagh, F., Haji Mohammadi, H., & Koshky, H. (2024). Investigating the Atmospheric Structure of the Von Phenomenon at the Time of Forest Fires in Northern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 195-216. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.76403.1219>
- Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Lanzante, J. R., Adams-Smith, D., Dixon, K. W., Nath, M., & Whitlock, C. E. (2020). Evaluation of some distributional downscaling methods as applied to daily maximum temperature with emphasis on extremes. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1571-1585. <https://doi.org/10.1002/joc.6288>
- Li, Q., Yang, T., & Li, L. (2022). Evaluation of snow depth and snow cover represented by multiple datasets over the Tianshan Mountains: Remote sensing, reanalysis, and simulation. *International Journal of Climatology*, 42(8), 4223-4239. <https://doi.org/10.1002/joc.7459>
- Majidi Karhroudi, F. S., Gharaylou, M., & Sabetghadam, S. S. (2024). Evaluation of the performance of the ERA5 and MERRA2 reanalysis datasets in estimating snow depth over Northwestern Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 251-263. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.358474.1007521>
- Majidi Karhroudi, F., Sabetghadam, S., & Gharaylou, M. (2024). Application of MERRA-2 to investigate changes in snow depth in high mountains of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 17(5), 79-90. [In Persian] <https://doi.org/10.30499/ijg.2023.387662.1502>
- Meier, W. N., & Stroeve, J. (2022). An updated assessment of the changing Arctic sea ice cover. *Oceanography*, 35(3/4), 10-19. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2022.114>
- Mirmousavi, S. H., & Heidari Monfared, Z. (2024). Analysis of Spatio-Temporal Variations of the Average Snow Cover During the Cold Seasons in the Northwest of Iran. *Nivar*, 48(124-125), 84-104. [In Persian] <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.437745.1279>
- 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. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., & Martius, O. (2021). River runoff in Switzerland in a changing climate—runoff regime changes and their time of emergence. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3071-3086. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3071-2021>
- Naghizadeh, H., Rasouly, A. A., Sari Sarraf, B., Jahanbakhsh, S., & Babaian, I. (2019). The Variability of the Snow Depth in the Northern Zone of Iran is based on the ECMWF Database of the ERA Interim Edition. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(2), 211-229. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.78609>

- Panofsky, H. A., & Brier, G. W. (1968). *Some applications of statistics to meteorology*. Mineral Industries Extension Services, College of Mineral Industries, Pennsylvania State University. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1970304959946981407>
- Qiao, Y., Ji, D., Shang, H., Xu, J., Xu, R., & Shi, C. (2023). The Fusion of ERA5 and MERRA-2 Atmospheric Temperature Profiles with Enhanced Spatial Resolution and Accuracy. *Remote Sensing*, 15(14), 3592. <https://doi.org/10.3390/rs15143592>
- Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., Van Diemen, R., McCollum, D., ... & Malley, J. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. *Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 10, 9781009157926. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Taszarek, M., Pilgaj, N., Allen, J. T., Gensini, V., Brooks, H. E., & Szuster, P. (2021). Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with rawinsonde data over Europe and North America. *Journal of Climate*, 34(8), 3211-3237. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0484.1>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Xiao, L., Che, T., & Dai, L. (2020). Evaluation of remote sensing and reanalysis snow depth datasets over the northern hemisphere during 1980–2016. *Remote Sensing*, 12(19), 3253. <https://doi.org/10.3390/rs12193253>
- Zhao, L., Chen, J., Shahzad, M., Xia, M., & Lin, H. (2024). MFPANet: Multi-Scale Feature Perception and Aggregation Network for High-Resolution Snow Depth Estimation. *Remote Sensing*, 16(12), 2087. <https://doi.org/10.3390/rs16122087>