University of Tehran Press

Journal of the Earth and Space Physics

Homepage: https://jesphys.ut.ac.ir

Vol. 50, No. 1, Spring 2024, P. 251-263

(Research Article)

Evaluation of the performance of the ERA5 and MERRA2 reanalysis datasets in estimating snow depth over Northwestern Iran

Majidi Karhroudi, F. S.[1] | Gharaylou, M.[1] ✉ | Sabetghadam, S. S.[1]

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: gharaylo@ut.ac.ir

(Received: 1 May 2023, Revised: 18 June 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

Snow cover is the most widely distributed and most dynamic component of the cryosphere, and its significant seasonal and annual variability have notable influences on the global water circulation and surface energy balance. Ground observations represent the most direct and reliable snow depth data source. Direct measurements are generally not used to monitor snow depth at hemispheric scales due to the inadequate number of measurements and the sparse distribution of measurements in remote regions, mountains, and high elevation areas. Instead, the method examined in this study is the use of reanalysis data. The aim of the current study is to evaluate the performance of the ERA5 and MERRA2 reanalysis datasets in estimating snow depth in Northwestern Iran. The evaluation has been done using snow depth data from meteorological stations throughout the study area.

The area examined in this study includes the provinces of Ardabil, East Azerbaijan and West Azerbaijan, which are located in the range of 44 to 51 degrees in longitude and 35.7 to 40 degrees in latitude. This area was selected for two primary reasons: firstly, the mountainous terrain of the region that results in a higher amount of snowfall, and secondly, there is an abundance of observational data available for estimation purposes. To conduct this study, monthly mean snow depth data from the ERA5 and MERRA2 reanalysis databases for the period 1981 to 2020 were used. The spatial resolution of the ERA5 data is 0.25 x 0.25 degrees. The MERRA2 data, on the other hand, has a spatial resolution of 0.625 x 0.5. degrees Since the data from MERRA2 and ERA5 have different spatial resolutions, to compare these two databases, a regridding method is used to equalize their spatial resolutions. The ERA5 data is regridded to MERRA2 spatial resolution using nearest-neighbor interpolation.

The results of this study showed that by examining the spatial and temporal distribution, the ERA5 database underestimates the mean value of snow depth over the entire study area. On the other hand, the MERRA2 database overestimated the average snow depth at most stations and had more errors than the ERA5 database. According to the ERA5 reanalysis database, the highest snow depth over a 40-year period has occured in February, while for the MERRA2 database, it has occurred in January. In the ERA5 database, the estimated snow depth values were consistent with the observations only in February, while in other months there was a discrepancy between the snow depth estimated by ERA5 and the observations. As the station's height and latitude increase, the error increases and the underestimation of snow depth from ERA5 also increases, but in the MERRA2 dataset, there is no significant relationship between the height of the station and latitude with bias. The analysis of the results of the present study shows that the ERA5 database is more accurate than MERRA2 for studying the spatial and temporal distribution of snow depth in the northwestern region of Iran. Of course, in the areas with high snow cover, the MERRA2 data estimates values are closer to observations.

Keywords: ERA5, MERRA2, Reanalysis dataset, Snow depth.

Cite this article: 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. DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.358474.1007521

E-mail: (1) faeze.majidi@ut.ac.ir | ssabet@ut.ac.ir

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.358474.1007521

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

انتشارات دانشگاه تهران

فیزیک زمین و فضا

نشانی اینترنتی مجله: http://jesphys.ut.ac.ir

دوره ۵۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳، صفحهٔ ۲۵۱- ۲۶۳

(مقاله پژوهشی)

ارزیابی عملکرد بانک داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 در تخمین میزان عمق برف در شمال غرب ایران

فائزه سادات مجیدی کرهرودی[۱] | مریم قرایلو[۱] ✉ | سیده سمانه ثابت قدم[۱]

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: gharaylo@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۳/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

پوشش برف گسترده‌ترین جزء یخ‌کره است و تنوع فصلی و سالانه قابل‌توجه آن تأثیرات چشم‌گیری بر گردش آب جهانی و توازن انرژی سطحی دارد. مشاهدات زمینی قابل‌اعتمادترین منبع داده عمق برف است. از آنجایی‌که این داده‌ها در برخی از مناطق از جمله مناطق مرتفع و کوهستان‌ها در دسترس نیستند و تعداد این ایستگاه‌ها بسیار محدود است، در چنین نواحی، از بانک داده‌های بازتحلیل و سنجش از دور استفاده می‌شود. هدف از مطالعه حاضر، مقایسه عملکرد نتایج حاصل از بانک داده‌های MERRA2 و ERA5 در تعیین پارامتر عمق برف در منطقه شمال غرب ایران است. بدین‌منظور از داده‌های میانگین ماهانه عمق برف حاصل از ایستگاه‌های همدیدی در منطقه موردمطالعه استفاده شده است. این مقایسه برای دوره ۴۰ ساله در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ انجام می‌گیرد. نتایج بررسیِ توزیع مکانی و زمانی در سراسر محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های ERA5 در تخمین میزان عمق برف نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای فروتخمین هستند؛ در حالی‌که داده‌های MERRA2 در بیشتر ایستگاه‌ها در تخمین میزان عمق برف میانگین با فراتخمین همراه هستند. همچنین بر اساس نتایج، میزان عدم‌قطعیت در برآورد میزان عمق برف میانگین حاصل از داده‌های ERA5 با افزایش عرض جغرافیایی و ارتفاع منطقه موردمطالعه بیشتر می‌شود، ولی عدم‌قطعیت در تخمین میزان عمق برف در بانک داده MERRA2 فقط به عرض جغرافیایی بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: ERA5، MERRA2، بانک داده بازتحلیل، عمق برف.

۱. مقدمه

برف بخش عمده بارش‌های جوی مناطق کوهستانی و عرض‌های جغرافیایی بالا را تشکیل می‌دهد و در چرخه آب‌شناسی و ترازینه انرژی به‌ویژه در مناطق با اقلیم سرد اهمیت به‌سزایی دارد (کینگ و فلچر، ۲۰۲۰). از این‌رو، تعیین پارامترهای مرتبط با برف شامل میزان بارش تجمعی برف، عمق برف، آب معادل برف و سطح پوشیده از برف با تفکیک مکانی و زمانی مناسب در کاربردهای آب‌شناسی، اقلیمی و مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (تدسکو و همکاران، ۲۰۱۵). اندازه‌گیری پارامترهای مرتبط با برف عموماً با استفاده از مشاهدات میدانی در ایستگاه‌های هواشناسی انجام می‌شود. ایستگاه‌های برف‌سنجی عمدتاً از توزیع مکانی مناسبی برخوردار نیستند. به‌ویژه در ارتفاعات که تراکم برف و روزهای همراه‌با برف بیشتر است، تعداد این ایستگاه‌ها بسیار محدود است و از کارایی لازم برای پایش متناوب مشخصات فیزیکی برف برخوردار نیستند (خیا و همکاران، ۲۰۲۰). از این‌رو، برای تعیین این پارامترها، می‌توان از روش‌هایی استفاده کرد که برای اندازه‌گیری نیاز به تماس مستقیم با برف نبوده و به‌صورت غیرمستقیم تخمین قابل‌قبولی از این پارامترها را در اختیار ما قرار می‌دهند. استفاده از بانک داده‌های سنجش از دور و بازتحلیل یکی از روش‌هایی است که برای انجام چنین مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (خیا و همکاران، ۲۰۲۰). داده‌های بازتحلیل جوی شامل سیستم‌های

استناد: مجیدی کرهرودی، فائزه سادات؛ قرایلو، مریم و ثابت قدم، سیده سمانه (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد بانک داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 در تخمین میزان عمق برف در شمال غرب ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵۰(۱)، ۲۵۱-۲۶۳. DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.358474.1007521

رایانامه: (۱) faeze.majidi@ut.ac.ir | ssabet@ut.ac.ir

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.358474.1007521

همسان‌سازی داده‌های جوی جهانی است و پارامترهای گوناگون سطح زمین و جو را در زمان واقعی ارائه می‌کنند. بانک داده‌های بازتحلیل معمولاً شامل پارامترهای مرتبط با برف مانند آب معادل برف و عمق برف هستند (پارکر، ۲۰۱۶).

اسنافر و همکاران (۲۰۱۶) مقادیر آب معادل برف حاصل از چند بانک داده شامل MERRA و ERA-Interim و GLDAS را در مناطق کوهستانی در استان بریتیش کلمبیا در کانادا ارزیابی کردند و نشان دادند که به‌طور کلی MERRA عملکرد بهتری در تخمین پارامترهای مرتبط با برف نسبت به موارد دیگر را دارد. گلارو و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای با هدف مروری بر سیستم MERRA2 و معیارهای مختلف بر عملکرد آن را انجام دادند. از جمله پیشرفت‌های MERRA2 نسبت به نسخه قبلی آن، جذب مشاهدات هواویز، پیشرفت در نمایش پوشن‌سپهر از جمله اُزون و نمایش‌های بهبود یافته فرایندهای یخ‌کره است. سپس، لیو و مارگولیس (۲۰۱۹) با استفاده از روش جدید و توسعه‌یافته بازتحلیل برف، عدم‌قطعیت بانک داده MERRA2 را بر فراز هیمالیا بررسی کردند و نتایج این پژوهش نشان داد که بانک داده مذکور مقادیر عمق برف را فروتخمین می‌کند. مورتیمر و همکاران (۲۰۲۰) مجموعه‌ای از داده‌ها را برای تعیین آب معادل برف در نیمکره شمالی ارزیابی کردند. این مجموعه شامل بانک داده‌های بازتحلیل، ترکیب بانک داده‌های سنجش از دور با مشاهدات عمق برف سطحی روزانه و آزمایش‌های جداگانه ریزموج بود. نتیجه آن مطالعه نشان داد که عملکرد بانک داده‌های ریزموج از سایر بانک داده‌ها ضعیف‌تر و عدم‌قطعیت آن نیز بیشتر است. در مقابل، ERA5 بهترین عملکرد را در میان بانک داده‌های مورد استفاده در مطالعه آنها داشت. خیا و همکاران (۲۰۲۰) نیز مطالعه‌ای در راستایِ مقایسه و ارزیابی یکپارچه بر روی پنج بانک داده عمقِ برف نیمکره‌ای/ جهانی انجام دادند. عدم‌قطعیت‌های مکانی و زمانی عملکرد این بانک داده‌ها در انواع پوشش زمین توسط ایستگاه‌های زمینی در طول سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفتند و با یکدیگر مقایسه شدند. داده‌های سنجش از دور شامل داده‌های سنجنده‌های AMSR-E، AMSR2 و GLOBSNOW در عمق برف کمتر از ۱۰ سانتی‌متر و MERRA2 در عمق برف بیش از ۵۰ سانتی‌متر عملکرد خوبی داشتند (خیا و همکاران، ۲۰۲۰). عملکرد دو بانک داده MERRA2 و ERA5 در تعیین میزان آب معادل برف توسط یک مدل برف در کوه‌های مرتفع اطلس در مراکش توسط بابا و همکاران (۲۰۲۱) ارزیابی شد. به‌طور کلی نتایج حاصل از مطالعه آنها نشان می‌دهد که عملکرد ERA5 در مقایسه با MERRA2 در مناطق مرتفع اطلس در مراکش بهتر است.

از بین مطالعاتی که در کشور ایران صورت گرفته نیز می‌توان به مطالعه انصاری و معروفی (۲۰۱۷) اشاره کرد که از داده‌های روزانه سنجنده AMSR-E برای بررسی یکی از پارامترهای مرتبط با برف (آب معادل برف) پرداختند و در نهایت نتایج حاصل از بررسی را با داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی حوضه‌های شمال غرب ایران مقایسه کردند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که داده‌های این بانک داده دارای همبستگی معنی‌دار با داده‌های مشاهداتی هستند. جوانشیر عزیزی و همکاران (۱۳۹۹) نیز به بررسی یکی از محصولات مهم بارشی ERA5 در سطح استان اردبیل پرداختند. ابتدا مشاهدات زمینی در طی دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ درون‌یابی شده و با داده‌های ERA5 در مقیاس زمانی مختلف مقایسه شدند. نتایج آنها نشان داد که به‌دلیل ضرایب همبستگی بالا و عدم‌قطعیت و خطای کم ERA5، می‌توان در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه از این بانک داده به‌عنوان جایگزین مناطقی که فاقد مشاهدات زمینی هستند استفاده کرد.

با توجه به نتایج مطالعات پیشین هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد دو بانک داده شامل پنجمین نسل داده‌های بازتحلیل جوی ECMWF (ERA5) و داده‌های MERRA2 در بازه سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ برای تخمین میانگین ماهانه عمق برف در سه استان واقع‌شده در ناحیه شمال غرب ایران است. برای انجام این ارزیابی از

داده‌های عمق برف اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های همدیدی در منطقه موردمطالعه، به‌عنوان داده‌های مرجع، استفاده شده است.

۲. داده‌ها و روش پژوهش

منطقه موردمطالعه در پژوهش حاضر شامل استان‌های اردبیل، آذربایجان‌شرقی و آذربایجان غربی است که در محدوده طول جغرافیایی ۴۴ تا ۵۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۷ تا ۴۰ درجه شمالی واقع شده است. دو دلیل اصلی برای انتخاب این محدوده وجود دارد: ابتدا برخورداربودن این پهنه از بارش‌های سالانه برف به‌دلیل کوهستانی بودن محدوده و سپس وجود داده‌های دیدبانی با کیفیت که برای ارزیابی قابل استفاده هستند. استان آذربایجان غربی یکی از مناطق کوهستانی کشور است و توپوگرافی متنوع و گسترده‌ای دارد. در سراسر ناحیه هم‌مرز استان با ترکیه و عراق، کوه‌های مرتفع برف‌گیر از شمال به جنوب کشیده شده است، به‌همین دلیل ایستگاه‌های انتخاب‌شده در این استان که در مرز ترکیه و عراق واقع هستند در این ارزیابی به‌عنوان مشاهدات زمینی انتخاب شدند. در استان آذربایجان‌شرقی نیز تبریز به‌دلیل نزدیکی به مناطق کوهستانی به‌ویژه بلندترین نقطه استان (قله سهند با ارتفاع ۳۷۲۲ متر) انتخاب شد. استان اردبیل دارای دوسوم بافت کوهستانی با ارتفاع متوسط ۳۷۰۰ متر از سطح دریا است و سبلان با ارتفاع ۴۸۱۱ متر در این استان واقع شده است. وجود مناطق کوهستانی سبب شده این استان در شمار یکی از سردترین استان‌های کشور قرار گیرد و میزان بارندگی زیاد و دمای آن باعث شده تا حد زیادی تحت‌تأثیر ارتفاعات باشد که غالباً با برف پوشیده هستند. در این استان نیز ایستگاه‌های سرعین و اردبیل به‌عنوان مشاهدات زمینی انتخاب شده‌اند. موقعیت مکانی و مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی استفاده‌شده در مطالعه حاضر، در شکل ۱ و جدول ۲ نشان داده شده‌است.

برای انجام پژوهش حاضر از داده‌های میانگین ماهانه عمق برف حاصل از بانک داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 در بازه سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. مشخصات فنی این بانک داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های بازتحلیل ERA5 نسل پنجم از بانک داده‌های بازتحلیل جوی است که توسط مرکز اروپا برای پیش‌بینی میان‌مدت ایجاد شده است. تفکیک مکانی داده‌های ERA5 برابر با ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه است. این بانک‌داده از ترکیب نتایج شبیه‌سازی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های شبیه‌سازی عددی وضع هوا با اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی و مشاهدات ماهواره‌ای به‌دست می‌آید. از سوی دیگر، داده‌های MERRA2 توسط اداره ملی هوانوردی و فضایی NASA ارائه شده و اولین بانک داده بازتحلیل جهانی بلندمدت برای داده‌گواری مشاهدات مبتنی‌بر فضا از هواویزها و برهم‌کنش آنها با سایر فرایندهای فیزیکی در سامانه اقلیمی است. داده‌های MERRA2 دارای دقت مکانی ۰/۵×۰/۶۲۵ درجه هستند.

هر دو بانک داده ERA5 و MERRA2 از داده‌گواری استفاده می‌کنند (دی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ به این‌صورت که مشاهدات برگرفته از ماهواره‌ها، امواج رادیویی، ایستگاه‌های هواشناسی با پیش‌بینی‌های مدل ترکیب می‌شوند و از روش‌های آماری پیشرفته برای تولید بهترین تخمین از وضعیت جو در هر مکان و زمان استفاده می‌شود (هرسباچ و همکاران، ۲۰۲۰). این در حالی‌است که روش داده‌گواری هر بانک داده متفاوت است. در ERA5 از روشی به نام داده‌گواری وردشی چهار بعدی (4D-Var) برای همسان‌سازی مشاهدات در مدل عددی استفاده می‌شود (لتبچر و همکاران، ۲۰۱۷) ولی در بانک داده MERRA2 از یک رویکرد ترکیبی 3D و 4D برای شبیه‌سازی داده استفاده می‌شود که در آن تحلیل (3D-Var) به‌عنوان حدس اولیه برای تحلیل (4D-Var) در نظر گرفته می‌شود (گلارو و همکاران، ۲۰۱۷).

در این مطالعه، از آنجایی‌که داده‌های برگرفته از MERRA2 و ERA5 دارای توان تفکیک مکانی متفاوت هستند، به‌منظور مقایسه این دو بانک داده از روش شبکه‌بندی مجدد (درون‌یابی به روش نزدیک‌ترین

همسایگی) برای یکسان‌سازی تفکیک مکانی آنها استفاده شده است. با این روش، بانک داده ERA5 به توان تفکیک فضایی MERRA2 برده شده است. در بسیاری از پژوهش‌ها مانند مطالعه‌ای که توسط پناهی و بهرنگی (۲۰۲۰) انجام شده است به این امر اشاره شده است که در شبکه‌بندی مجدد می‌توان بانک داده‌ها را به توان تفکیک مکانی بزرگ‌تر برد.

برای ارزیابی عملکرد داده‌های ERA5 و MERRA2 در برآورد عمق برف در ناحیه شمال غرب ایران، این مقادیر با داده‌های ایستگاه‌های زمینی به‌عنوان مرجع قابل اطمینان مقایسه می‌شوند و درنهایت عدم‌قطعیت بانک داده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که در ایستگاه‌های زمینی عمق برف از مجموع مقدار بارش برف بر حسب ارتفاع به‌دست می‌آید. این مقدار بر حسب سانتی‌متر یا بر حسب اینچ اندازه‌گیری می‌شود.

از آنجاکه داده‌های بازتحلیل با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه می‌شوند؛ هر چند که این روش‌ها پیشرفته هستند، از لحاظ دقت همانند داده‌های ایستگاهی نخواهند بود. از این‌رو معمولاً بانک داده‌های بازتحلیل باید ارزیابی و اعتبارسنجی شوند تا میزان تطابق آنها با داده‌های ایستگاهی سنجیده شود. معیارهای ارزیابی شامل اُریبی و خطای جذر میانگین مربعات است (آن و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ خیا و همکاران، ۲۰۲۰).

جذر میانگین مربعات خطا یکی از سنجه‌های آماری است که معمولاً از آن برای ارزیابی دقت پیش‌بینی، شبیه‌سازی شده برابر داده‌های مشاهدات استفاده می‌شود. هرچه خروجی این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر خطای کمتر در داده‌های شبیه‌سازی شده است. این‌روش یکی از مرسوم‌ترین شاخص‌های برآورد خطاست که در پژوهش‌های زیادی از آن استفاده شده است. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\mathrm{Predicted}-\mathrm{Actual})^2}{N}} \qquad (۱)$$

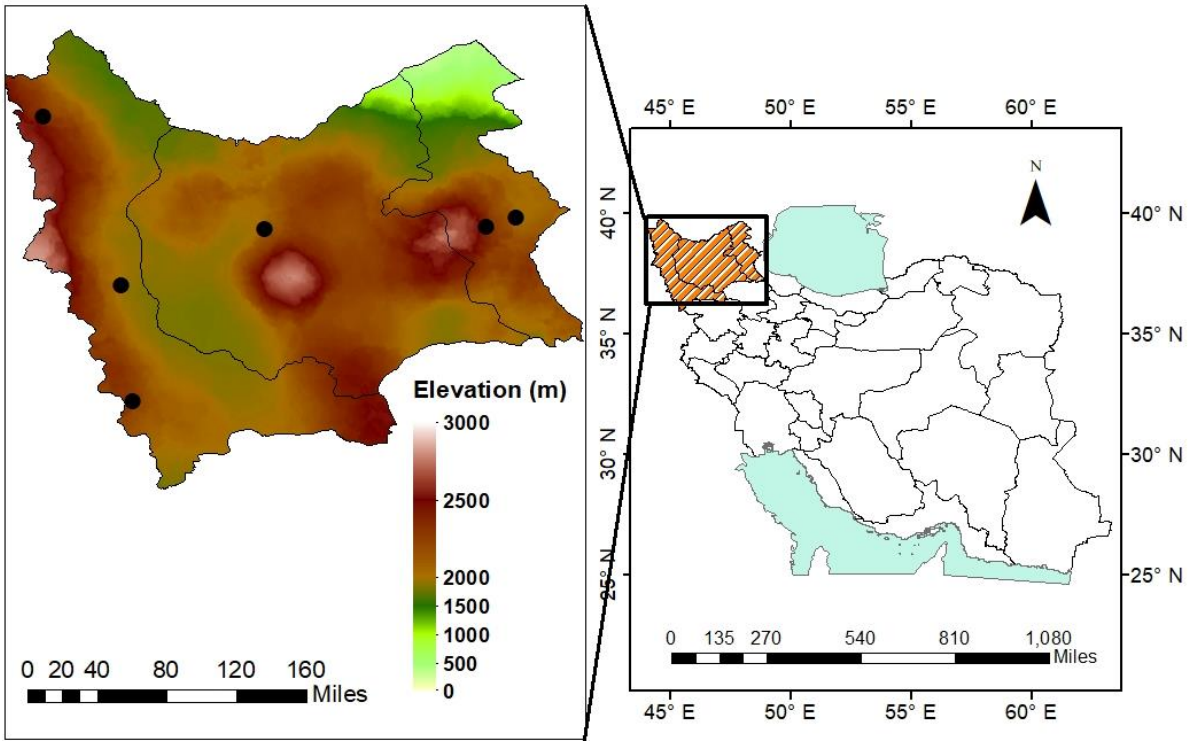
که در آن، N تعداد داده‌ها، Actual مقدار مشاهداتی و Predicted مقدار برآوردشده (داده بازتحلیل) می‌باشد.

عدم‌قطعیت در این پژوهش با استفاده از میزان اُریبی (Bias) تعیین می‌شود. در این روش با توجه به میزان داده مشاهداتی و بانک‌داده بازتحلیل و مقدار اختلاف آنها می‌توان میزان فراتخمین و فروتخمین بانک داده بازتحلیل را تعیین کرد. در تحلیل مقادیر اُریبی، اُریبی مثبت نشان‌دهنده برآوردی کمتر از مقدار واقعی و اُریبی منفی، برآوردی بیشتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد. رابطه (۲) برای تعیین میزان اُریبی داده‌های بازتحلیل نسبت به داده‌های مشاهداتی استفاده شده است (معظمی و همکاران، ۲۰۱۶):

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Actual-predicted)}{N}. \qquad (۲)$$

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورداستفاده.

بانک داده	سازمان ارائه‌کننده	روش	مدت‌زمان	توان تفکیک مکانی	پوشش مکانی
MERRA2	NASA	مدل سطح زمین Catchment	۱۹۷۹ تا کنون	۰/۵ × ۰/۶۲۵ درجه	۰ تا ۹۰ ^{o}N
ERA5	ECMWF	مدل سطح زمین HTESSEL	۱۹۷۹ تا کنون	۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه	۰ تا ۹۰ ^{o}N



شکل ۱. توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده برای ارزیابی عمق برف. ایستگاه‌های منتخب با نقاط مشکی نشان داده شده‌اند.

جدول۲. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه.

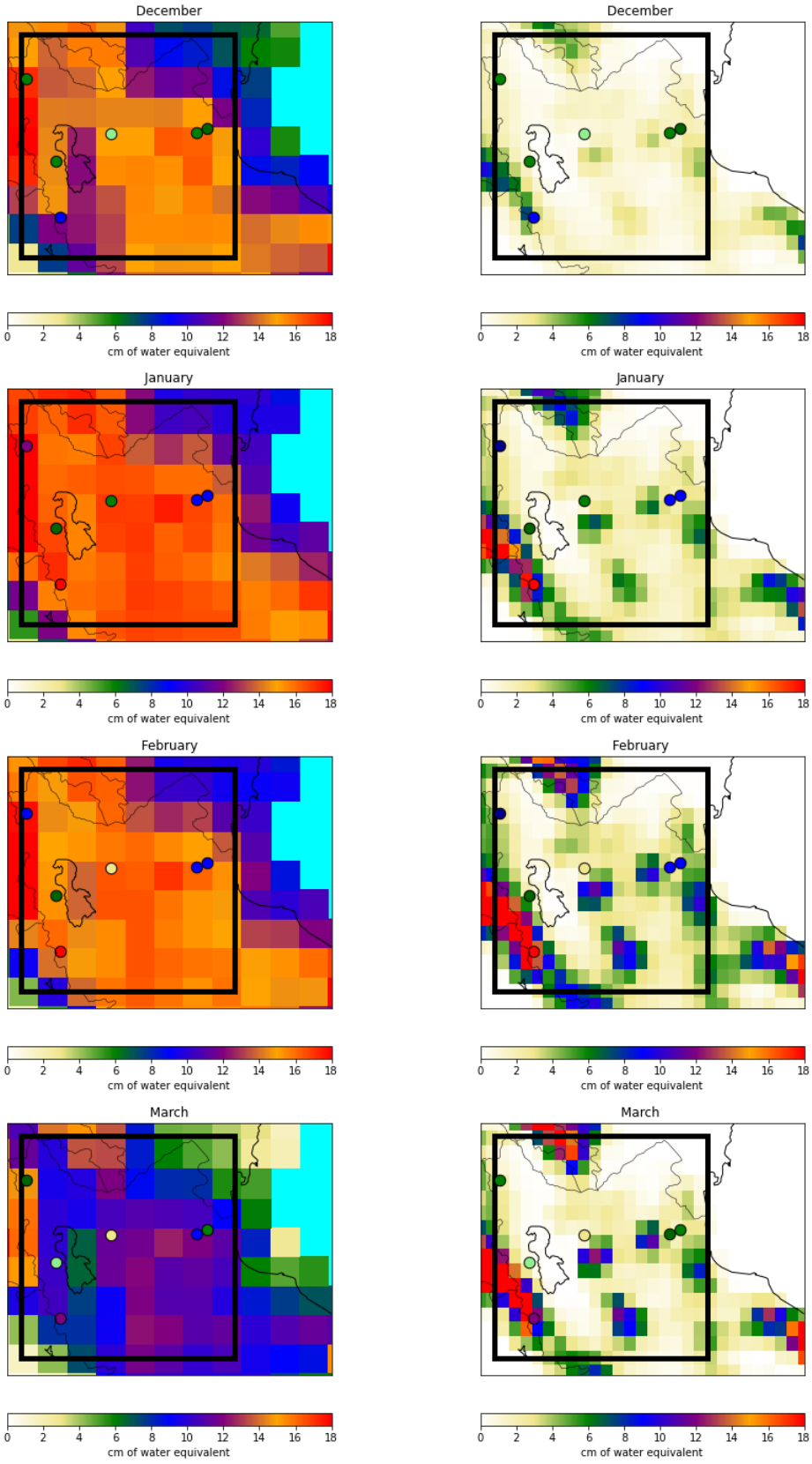
شماره	ایستگاه	ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	اردبیل	۱۳۳۵/۲	۴۸/۳۲۸۶۱	۳۸/۲۱۸۰۶
۲	چالدران	۱۸۸۸/۵	۴۴/۴۰۶۶۷	۳۹/۰۶۰۲۸
۳	ارومیه	۱۳۲۸	۴۵/۰۵۵۲۸	۳۷/۶۵۸۶۱
۴	پیرانشهر	۱۴۴۴/۵	۴۵/۱۴۶۶۷	۳۶/۶۹۷۷۸
۵	سرعین	۱۶۵۸/۳	۴۸/۰۸۰۵۶	۳۸/۱۴۶۹۴
۶	تبریز	۱۳۶۱	۴۶/۲۴۲۲	۳۸/۱۲۱۹

۳. نتایج

شکل ۲ توزیع مکانی میانگین ماهانه عمق برف در دوره ۴۰ ساله در بازه سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰، برای ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس حاصل از بانک‌داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 همراه‌با مقادیر میانگین ماهانه عمق برف اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های همدیدی در منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ (ستون سمت چپ) نشان داده شده است، در ماه دسامبر که کمترین میزان عمق برف میانگین توسط بانک‌داده بازتحلیل ERA5 را نشان می‌دهد، میان داده‌های بازتحلیل ERA5 با میزان عمق برف میانگین اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌ها مطابقتی وجود ندارد. میزان عمق برف حاصل از اندازه‌گیری ایستگاهی نسبت به داده‌های ERA5 مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. در ماه

ژانویه میزان عمق برف ERA5 و مشاهدات زمینی نسبت به دسامبر افزایش داشته ولی همچنان عدم‌تطابق در اندازه‌گیری بانک‌داده و مشاهدات زمینی وجود دارد. در ماه فوریه میزان عمق برف میانگین هم در بانک داده ERA5 و هم در مشاهدات زمینی در بازه زمانی ۴۰ ساله بیشینه مقدار را نشان می‌دهد. عمق برف در ماه مارس کمتر از فوریه است و مشاهدات زمینی نیز میزان عمق برف را کمتر نشان می‌دهند. در هر چهار ماه، ایستگاه پیرانشهر نسبت به بقیه ایستگاه‌ها با بانک‌داده ERA5 تطابق بیشتری در برآورد میزان عمق برف دارد. در شکل ۲ (ستون سمت راست) که مربوط به بانک داده MERRA2 است، در تمامی محدوده موردمطالعه میزان برف بیش از مقادیر ERA5 برآورد شده است. در ماه دسامبر، مقادیر عمق برف میانگین حاصل از این بانک داده بیشتر از مقادیر ثبت‌شده توسط مشاهدات زمینی است و فقط در ایستگاه پیرانشهر مقادیر عمق برف میانگین حاصل از بانک داده و ایستگاه به یکدیگر نزدیک هستند. در ماه ژانویه، بیشترین میزان عمق برف میانگین برای بانک داده به‌دست آمده است، ولی همچنان عدم‌تطابق در اندازه‌گیری بانک‌داده و مشاهدات زمینی وجود دارد. در ماه فوریه عمق برف به‌جز ایستگاه پیرانشهر سایر ایستگاه‌ها مقادیر کمتری نسبت به MERRA2 نشان می‌دهند. برخلاف ERA5 که دسامبر ماهی با کمترین میزان عمق برف میانگین محسوب می‌شد، در بانک داده MERRA2 ماه مارس ماهی با کمترین میزان عمق برف میانگین برای این بانک‌داده و همه مشاهدات زمینی به‌جز ایستگاه پیرانشهر ثبت شده است. اقلیم پیرانشهر برخلاف سایر ایستگاه‌ها که اقلیمی سرد دارند، معتدل و مرطوب است. همچنین از لحاظ پوشش زمین نیز این ایستگاه با سایر ایستگاه‌های موردمطالعه متفاوت است و بخشی از کوهستان‌های رشته کوه زاگرس در این ناحیه قرار دارد. میزان بارندگی در پیرانشهر از غرب به شرق کاهش می‌یابد. دلیل این امر وجود دیواره کوهستانی ناحیه است که از نفوذ جریان‌هایی که از غرب به فلات وارد می‌شود جلوگیری می‌کند، به‌همین علت سایر ایستگاه‌هایی که در سمت شرق پیرانشهر قرار گرفته‌اند میزان عمق برف کمتری را نشان می‌دهند. از این‌رو به نظر می‌رسد عملکرد بهتر بانک داده‌ها در برآورد میزان برف در این ایستگاه، به‌دلیل بیشتر بودن میزان برف در این منطقه باشد که با نتایج مطالعه خیا و همکاران (۲۰۲۰) در مناطق کوهستانی برف‌گیر مطابقت دارد.

جدول ۳، مقایسه سنجه‌های آماری در بین ایستگاه‌های موردمطالعه و بانک داده‌های ERA5 و MERRA2 را طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. در اکثر ایستگاه‌ها میزان متوسط عمق برف اندازه‌گیری‌شده توسط MERRA2 بیشتراز مقادیر ثبت‌شده توسط مشاهدات زمینی و ERA5 بوده است و به همین ترتیب میزان اُریبی و خطای جذر میانگین مربعات بانک داده مذکور بیشتر از ERA5 است و مقادیر متوسط عمق برف را در اکثر ایستگاه‌ها فراتخمین می‌کند، در صورتی که ERA5 میزان خطای کمتری را نشان می‌دهد و همبستگی بیشتری را نیز با مشاهدات زمینی نشان می‌دهد. اُریبی این بانک داده نیز نشان می‌دهد که در همه ایستگاه‌ها مقادیر متوسط عمق برف را فروتخمین می‌کند. برخلاف سایر ایستگاه‌ها متوسط عمق برف ثبت‌شده در ایستگاه پیرانشهر بیشتر از دو بانک داده ERA5 و MERRA2 است و مقادیر متوسط عمق برف هردو بانک داده تقریباً یکسان است به‌همین ترتیب میزان همبستگی و اُریبی و خطای جذر میانگین مربعات برای هر دو بانک داده تقریباً مشابه‌اند.



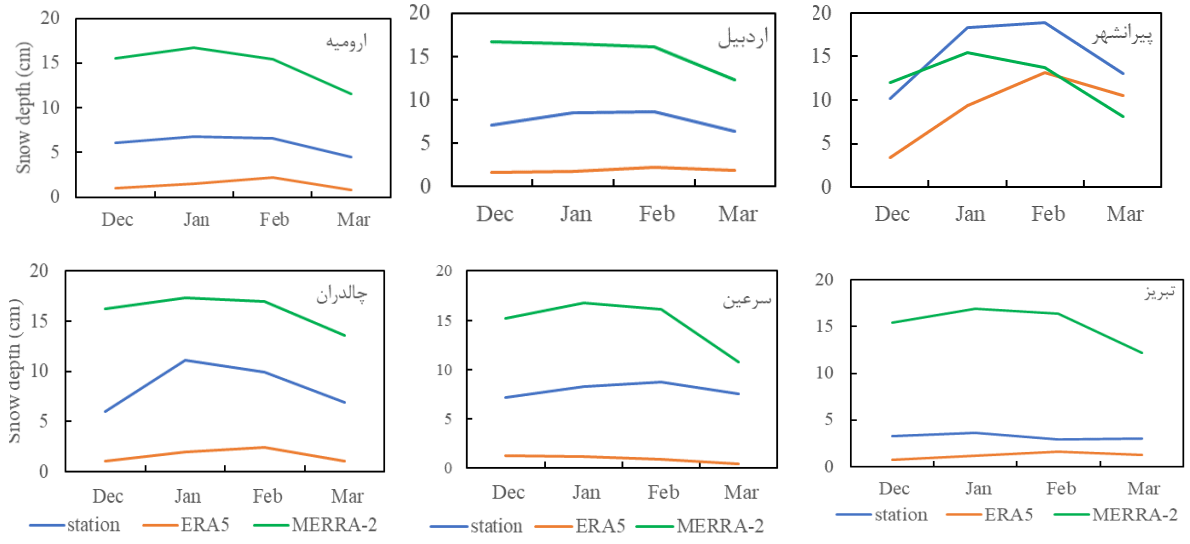
(ب) (الف)

شکل۲. توزیع مکانی میانگین ماهانه عمق برف طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ در منطقه موردمطالعه توسط بانک داده ERA5 (الف) و بانک داده MERRA2 (ب) در چهار ماه دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس. دایره‌ها محل هر ایستگاه و رنگ آنها عمق برف اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه را بر حسب سانتی‌متر را نشان می‌دهند.

جدول۳. مقایسه سنجه‌های آماری در میان ایستگاه‌های موردمطالعه و دو بانک داده ERA5 و MERRA2 برف طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰.

نام ایستگاه	متوسط عمق برف	متوسط عمق برف		میزان همبستگی ایستگاه و ERA5	میزان همبستگی ایستگاه و MERRA2	اُریبی		RMSE	
		ERA5	MERRA2			ERA5	MERRA2	ERA5	MERRA2
اردبیل	۷/٦٤	۲/۳٥	۱٥/۳٥	۰/٥	۰/۱۸	٥/۲۸	-۷/٦	۰/۰٥	۱/۰۹
چالدران	۸/٦۰	۱/۸٥	۱٦/۰۲	۰/٤٤	۰/۲۲	٦/۷٦	-۷/٤	۰/۷٤	۱/۲
ارومیه	٦/۰۸	۱/٤۲	۱٥/۰۳	۰/٤٥	۰/۱۱	٤/٦٦	-۸/۹٥	۰/۰۷	۱/۰٦
پیرانشهر	۱٥/۲۹	۱۲/۳٥	۱۲/٥٤	۰/۳۲	۰/۳٤	۲/۹٤	۲/۷٤	۰/۱۸	۰/۲۱
سرعین	۷/۹٥	٤/٦۷	۱٤/۷۷	۰/۱۷	-۰/۰۹	۳/۲۲	-٦/۸۲	۰/٥٥	۱/٥
تبریز	۳/۲	۱/٥	۱٥/۳۳	۰/۲٤	۰/۰٥	۱/٦	-۱۲/۱۳	۰/۰۳	۱/۳٦

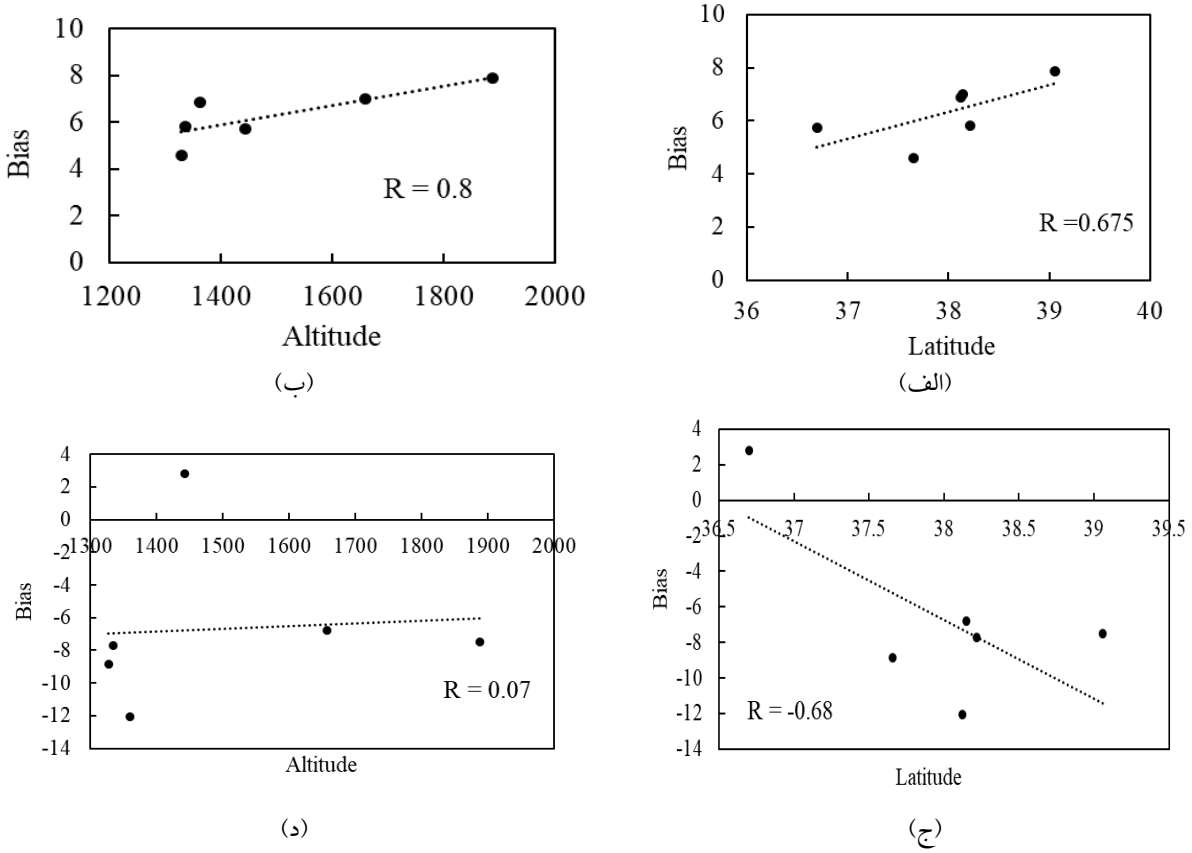
مقایسه توزیع زمانی میانگین ماهانه عمق برف حاصل از مشاهدات و داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 در بازه دسامبر تا مارس ۱۹۸۱-۲۰۲۰ در ایستگاه‌های موردمطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. محور قائم عمق برف برحسب سانتی‌متر و محور افقی میانگین ماه‌های میلادی یک دوره ۴۰ ساله است. به‌طور کلی در بیشتر موارد، بانک‌داده بازتحلیل ERA5 عمق برف را کمتر از مشاهدات و بانک داده بازتحلیل MERRA2 مقادیر عمق برف را بیش از مشاهدات زمینی نشان می‌دهد. نتایج مطالعات پیشین نیز نشان می‌داند که در مناطق کوهستانی بانک داده MERRA2 نسبت به داده‌های ایستگاهی دارای فراتخمین است (خیا و همکاران، ۲۰۲۰). اگرچه روند تغییرات داده‌ها تفاوت‌هایی دارند، ولی در بیشتر موارد ماه فوریه دارای بیشترین میزان عمق برف است. در میان ایستگاه‌های موردمطالعه، در ایستگاه پیرانشهر عمق برف میانگین ایستگاه از MERRA2 بیشتر است و الگوی تغییرات آن با مشاهدات زمینی و ERA5 تشابهی ندارد؛ برای این بانک-داده ماه ژانویه نیز در اکثر ایستگاه‌ها ماهی با بیشترین میزان عمق برف میانگین است.



شکل۳. تغییرات میانگین ماهانه عمق برف از دسامبر تا مارس در طول ۱۹۸۱-۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ERA5، MERRA2 و مقادیر حاصل از ایستگاه‌های موردمطالعه.

در شکل ۴، تغییرات میزان اُریبی داده‌های عمق برف از بانک داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 نسبت به عرض جغرافیایی (الف و ج) و ارتفاع (ب و د) نشان داده شده است. در شکل ۴-الف و ج، محور قائم میزان اُریبی برحسب سانتی‌متر و محور افقی ارتفاع ایستگاه برحسب متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، برای داده‌های ERA5 میزان اُریبی با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود و ضریب همبستگی آن ۰/۸ است که نشان می‌دهد به‌طور کلی با افزایش ارتفاع، بانک‌داده ERA5 فروتخمین بیشتری دارد. برای ایستگاه‌های با ارتفاع بالا، خطای بیشتر در اندازه‌گیری عمق برف رخ می‌دهد. به‌دلیل کوچک‌بودن توان تفکیک مکانی داده‌های بازتحلیل طبقه‌بندی بر اساس ارتفاع در توپوگرافی پیچیده یک رشته کوه، با خطای زیادی همراه است (لیونس و همکاران، ۲۰۱۹). وجود پوشش زمین متفاوت نیز می‌تواند بر عملکرد بانک‌داده‌های بازتحلیل تأثیر بگذارد. شکل ۴-د نشان می‌دهد که میزان عمق برف حاصل از بانک داده MERRA2 به تغییر ارتفاع حساسیت ندارد و میزان اُریبی با ارتفاع ایستگاه همبستگی معنی‌داری را نشان نمی‌دهد.

وابستگی میزان اُریبی و عرض جغرافیایی در شکل ۴-ب و ۴-د بررسی شده است. نتایج بررسی برای دو بانک داده کاملاً متفاوت است به‌طوری‌که در مورد ERA5، با افزایش عرض جغرافیایی میزان خطا بیشتر می‌شود و ضریب همبستگی آن ۰/۶۷۵ است. در حالی‌که، در بانک داده MERRA2 (شکل ۴-د) با افزایش عرض جغرافیایی میزان اُریبی کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی بین این دو پارامتر ۰/۶۸- است که ارتباط معکوس دو پارامتر نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد. با توجه به محدودبودن منطقه و تعداد ایستگاه‌های همدیدی، بنابراین می‌توان گفت ارتباط مشخصی میان عمق برف و عرض جغرافیایی در منطقه موردمطالعه وجود ندارد.



شکل٤. تغییرات اُریبی عمق برف از بانک داده ERA5 (ردیف بالا) و MERRA2 (ردیف پایین) از دسامبر تا مارس در بازه ۱۹۸۱-۲۰۲۰ نسبت به تغییر ارتفاع (الف و ج) و عرض‌جغرافیایی (ب و د).

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، عملکرد دو بانک داده ERA5 و MERRA2 در بازه سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ برای تخمین میانگین ماهانه عمق برف در سه استان واقع‌شده در ناحیه شمال غرب ایران ارزیابی شده است. برای انجام این ارزیابی از داده‌های عمق برف اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های همدیدی در منطقه موردمطالعه، به‌عنوان داده‌های مرجع، استفاده شده است. مرجع قراردادن مشاهدات زمینی موضوعی اجتناب‌ناپذیر در ارزیابی بانک داده‌ها است، حتی زمانی که تفاوت‌های قابل‌توجهی هنگام مقایسه مشاهدات زمینی با عمق برف شبکه‌ای رخ می‌دهد (بلسچل، ۱۹۹۹؛ لیونس و همکاران، ۲۰۱۹). این تفاوت‌ها زمانی که مشاهدات زمینی به‌صورت پراکنده توزیع شده‌اند و سطح زمین ناهمگن و پیچیده است (مناطق کوهستانی) رخ می‌دهند (دای و همکاران، ۲۰۱۸؛ گرونوالد و لهنینگ، ۲۰۱۵). با وجود این‌که مشاهدات زمینی برای ارزیابی بانک داده‌ها کافی نیستند ولی رایج‌ترین رویکرد در ارزیابی داده‌ها در نظر گرفته می‌شوند (آرمسترانگ و برودزیک، ۲۰۰۲).

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در بررسی توزیع زمانی و مکانی، بانک داده ERA5 در سراسر محدوده موردمطالعه مقادیر عمق برف میانگین را فروتخمین می‌کند و میزان عمق برف میانگین اندازه‌گیری‌شده توسط مشاهدات زمینی به مراتب بیشتر است که دلیل آن ممکن است مربوط به توپوگرافی پیچیده محدوده موردمطالعه باشد (کید و همکاران، ۲۰۱۷). در حالی‌که بانک داده MERRA2 در اکثر ایستگاه‌ها میانگین ماهانه عمق برف را فراتخمین می‌کند و نسبت به بانک داده ERA5 خطای بیشتری را نشان می‌دهد که با توجه توان تفکیک مکانی بیشترِ ERA5 این نتایج قابل انتظار است (بابا و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از عوامل دیگری که می‌تواند در تخمین بیشتر عمق برف در MERRA2 نقش داشته باشد، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تخمین عمق برف است و ممکن است به‌دلیل وجود اختلالاتی مانند مسائل ابری، انحرافات سطوح زمینی و یا تابندگی ماهواره، تخمین نادرستی از عمق برف ارائه دهند (گلارو و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین لازم به‌ذکر است که اگرچه داده‌گواری مورد استفاده در دو بانک داده ERA5 و MERRA2 می‌تواند دقت تخمین عمق برف را بهبود ببخشد ولی این دقت تخمین همچنان تحت‌تأثیر عوامل مختلفی مانند کیفیت و کمیت مشاهدات مورد استفاده در داده‌گواری، کیفیت پیش‌بینی مدل و فرایندهای فیزیکی حاکم بر انباشت و ذوب برف است (لارجرون و همکاران، ۲۰۲۰).

میزان عمق برف در بانک داده بازتحلیل ERA5 در دوره ۴۰ ساله مربوط به ماه فوریه و برای بانک داده MERRA2 مربوط به ماه ژانویه است. این مقادیر فقط در ماه فوریه ERA5 با مقادیر مشاهداتی تطابق دارد و در سایر ماه‌ها تفاوت‌هایی در میزان برآورد عمق برف توسط ERA5 وجود دارد. با افزایش ارتفاع و عرض جغرافیایی ایستگاه، میزان خطا افزایش می‌یابد و میزان فروتخمین عمق برف حاصل از ERA5 بیشتر می‌شود ولی در بانک داده MERRA2، ارتباط معنی‌داری میان ارتفاع ایستگاه و عرض جغرافیایی با میزان اُریبی مشاهده نمی‌شود. جمع‌بندی نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد بانک داده‌های ERA5 نسبت به MERRA2 برای مطالعه توزیع مکانی و زمانی عمق برف در ناحیه شمال‌غرب ایران از دقت بیشتری برخوردار است. البته در مناطقی که برف بیشتری دارند داده‌های MERRA2 در مقیاس زمانی مقادیر نزدیک‌تر به مشاهدات را برآورد می‌کنند. از آنجایی‌که توان تفکیک فضایی اولیه ERA5 بالاتر از MERRA2 است؛ بنابراین نمایش و توزیع بهتر داده‌های هواشناسی مورد انتظار است (بابا و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به مطالعات پیشین بانک داده MERRA2 در عرض‌های میانی عملکردی خوب و در عرض‌های جغرافیایی بالا در تخمین مقادیر عمق برف دارای فراتخمین است (ریچل و همکاران، ۲۰۱۷) که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. همچنین کاستی و عدم‌موفقیت درمدل‌های بازتحلیل امری

عادی و مورد انتظار است زیرا ثبت‌کردن رویدادهای محلی برای این قبیل بانک داده‌ها به‌دلیل توان تفکیک مکانی پایینی که دارند دشوار است و تا امروز تخمین پارامترهای مربوط به بارش برف در مناطق کوهستانی توسط مدل‌های عددی بسیار چالش برانگیز بوده است (گوتاردی و همکاران، ۲۰۱۲؛ ناپل و همکاران، ۲۰۱۴؛ الونسو گونزالس و همکاران، ۲۰۲۱). لازم به‌ذکر است که تخمین پارامتر عمق برف در ناهمواری‌های پیچیده (کوهستان سهند) که ارتفاع آن از ۲۹۰۰ متر تا ۳۶۰۰ متر در فاصله کمتر از شش کیلومتری است، صورت گرفته‌است. به‌علاوه در مناطق کوهستانی و ناهمواری‌های پیچیده، سطح زمین بر پراکندگی داده‌ها تأثیر می‌گذارند و باعث ایجاد اختلال در تخمین عمق برف می‌شوند (دای و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، نگارندگان بر این امر معتقد هستندکه بهتر است تمرکز کار آینده روی تصحیح بارش با استفاده از روش‌های داده‌گواری باشد (الونسو گونزالس و همکاران، ۲۰۲۱) و می‌توان برای کاهش عدم‌قطعیت بانک داده‌های عمق برف، منابع داده مختلف را برای ترکیب نقاط قوت آنها ادغام کرد.

شایان ذکر است، این پژوهش با محدودیت‌هایی اعم از کمبود تعداد ایستگاه‌های زمینی در منطقه موردمطالعه، کامل‌نبودن داده‌های ایستگاه‌های منتخب در بازه زمانی ۴۰ سال و به‌دلیل متفاوت بودن توان تفکیک فضایی دو بانک داده، استفاده از روش شبکه‌بندی مجدد برای یکسان‌سازی توان تفکیک مکانی آنها مواجه بود که سبب ایجاد خطا در برآورد میزان عمق برف شده است. برای بهبود این موانع در مطالعات پیش‌رو تعداد بیشتر مشاهدات زمینی و منطقه پهناورتری (منطقه ایران) در نظر گرفته خواهد شد تا ارزیابی عملکرد کامل‌تری را برای دو محصول بارش در مناطقی با اقلیم مختلف به‌همراه داشته باشد.

مراجع

جوانشیر عزیزی، م.؛ رسول‌زاده، ع.؛ رحمتی، ا.؛ شایقی، ا. و باختر، آ. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل‌شده Era-5 در تخمین بارش روزانه و ماهانه در استان اردبیل. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۱۱)، ۲۹۵۱-۲۹۳۷.

Alonso-González, E., Gutmann, E., Aalstad, K., Fayad, A., Bouchet, M., & Gascoin, S. (2021). Snowpack dynamics in the Lebanese mountains from quasi-dynamically downscaled ERA5 reanalysis updated by assimilating remotely sensed fractional snow-covered area. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(8), 4455-4471.

An, Y., Zhao, W., Li, C., & Liu, Y. (2020). Evaluation of six satellite and reanalysis precipitation products using gauge observations over the Yellow River Basin, China. *Atmosphere*, 11(11), 1223.

Ansari, H., & Marofi, S. (2017). Snow water equivalent estimation using AMSR-E and GLDAS model (case study: basins of northwestern Iran). *Journal of Water and Soil*, 31(5), 1497-1510.

Armstrong, R. L., & Brodzik, M. J. (2002). Hemispheric-scale comparison and evaluation of passive-microwave snow algorithms. *Annals of Glaciology*, *34*, 38-44.

Baba, M. W., Boudhar, A., Gascoin, S., Hanich, L., Marchane, A., & Chehbouni, A. (2021). Assessment of MERRA2 and ERA5 to Model the Snow Water Equivalent in the High Atlas (1981–2019). *Water*, 13(7), 890.

Blöschl, G. (1999). Scaling issues in snow hydrology. *Hydrological processes*, 13(14-15), 2149-2175.

Dai, L., Che, T., Xie, H., & Wu, X. (2018). Estimation of snow depth over the Qinghai-Tibetan plateau based on AMSR-E and MODIS data. *Remote Sensing*, *10*(12), 1989.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, D. P., & Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., & Zhao, B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA2). Journal of climate, 30(14), 5419-5454.

Gottardi, F., Obled, C., Gailhard, J., & Paquet, E. (2012). Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of hydrology*, 432, 154-167.

Grünewald, T., & Lehning, M. (2015). Are flat-field snow depth measurements representative? A comparison of selected index sites with areal snow depth measurements at the small catchment scale. *Hydrological Processes*, 29(7), 1717-1728.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78.

King, F., & Fletcher, C. G. (2020). Using CloudSat-CPR Retrievals to Estimate Snow Accumulation in the Canadian Arctic. *Earth and Space Science*, 7(2), e2019EA000776.

Largeron, C., Dumont, M., Morin, S., Boone, A., Lafaysse, M., Metref, S., Cosme, E., Jonas, T., Winstral, A., & Margulis, S.A. (2020). Toward snow cover estimation in mountainous areas using modern data assimilation methods: A review. *Frontiers in Earth Science*, 8, p.325.

Leutbecher, M., Lock, S. J., Ollinaho, P., Lang, S. T., Balsamo, G., Bechtold, P., Bonavita, M., Christensen, H. M., Diamantakis, M., Dutra, E., English, S., Fisher, M., Forbes, R. M., Goddard, J., Haiden, T., Hogan, R. J., Juricke, S. Lawrence, H. MacLeod, D., Magnusson, L. Malardel, S. Massart, S. Sandu, I., Smolarkiewicz, P. K., Subramanian, A., Vitart, F., Wedi, N. & Weisheimer, A. (2017). Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: State of the art and future vision. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(707), 2315-2339.

Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H. P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I., de Rosnay, P., Dumont, M., Girotto, M., Immerzeel, W. W., & Jonas, T. (2019). Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. *Nature communications*, 10(1), 1-12.

Liu, Y., & Margulis, S. A. (2019). Deriving Bias and uncertainty in MERRA2 snowfall precipitation over High Mountain Asia. *Frontiers in Earth Science*, 7, 280.

Moazami, S., Golian, S., Hong, Y., Sheng, C., & Kavianpour, M. R. (2016). Comprehensive evaluation of four high-resolution satellite precipitation products under diverse climate conditions in Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 420-440.

Mortimer, C., Mudryk, L., Derksen, C., Luojus, K., Brown, R., Kelly, R., & Tedesco, M. (2020). Evaluation of long-term Northern Hemisphere snow water equivalent products. *The Cryosphere*, 14(5), 1579-1594.

Nepal, S., Krause, P., Flügel, W. A., Fink, M., & Fischer, C. (2014). Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model. *Hydrological Processes*, 28(3), 1329-1344.

Panahi, M., & Behrangi, A. (2020). Comparative analysis of snowfall accumulation and gauge undercatch correction factors from diverse data sets: In situ, satellite, and reanalysis. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(4), 615-628.

Parker, W. S. (2016). Reanalyses and observations: What's the difference. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(9), 1565-1572.

Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Draper, C. S., Mahanama, S. P., & Partyka, G. S. (2017). Land surface precipitation in MERRA2. *Journal of Climate*, 30(5), 1643-1664.

Snauffer, A. M., Hsieh, W. W., & Cannon, A. J. (2016). Comparison of gridded snow water equivalent products with in situ measurements in British Columbia, Canada. *Journal of Hydrology*, 541, 714-726.

Tedesco, M., Derksen, C., Deems, J. S., & Foster, J. L. (2015). Remote sensing of snow depth and snow water equivalent. *Remote Sensing of the Cryosphere*, 73-98.

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.

Zhang, H., Zhang, F., Che, T., Yan, W., & Ye, M. (2021). Investigating the ability of multiple reanalysis datasets to simulate snow depth variability over mainland China from 1981 to 2018. *Journal of Climate*, 34(24), 9957-9972.