مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۷، شماره ۵، ۱۴۰۲، صفحه ۷۹-۹۰ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/ijg.2023.387662.1502

کاربست داده‌های بازتحلیل MERRA-2 در بررسی تغییرات عمق برف در کوهستان‌های بلند ایران

فائزه سادات مجیدی کرهرودی[۱]، سمانه ثابت قدم[۲*] و مریم قرایلو [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
[۲] دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸)

چکیده

برف نقش چشمگیری در چرخه آب‌شناختی دارد؛ ازاین‌رو تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با برف ضروری به‌نظرمی‌رسد. ازآنجاکه ایستگاه‌های برف‌سنجی توزیع مکانی مناسبی به‌ویژه در مناطق کوهستانی ندارند، کارایی لازم را برای پایش متناوب مشخصات فیزیکی برف ندارند؛ بنابراین برای بررسی پارامترهای مرتبط با برف در چنین مناطقی از روش‌های جایگزین شامل سنجش از دور و بانک داده‌های بازتحلیل استفاده می‌شود.

در مطالعه حاضر، توزیع زمانی میزان عمق برف در کوهستان‌های بلند ایران شامل چهار قله دماوند، دنا، زردکوه و هزار در یک دوره ۴۱ ساله از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 بررسی شده است. MERRA-2 اوّلین بانک داده بازتحلیل جهانی بلندمدت مبتنی بر مشاهدات فضاپایه با تفکیک ۰/۶۲۵×۰/۵ درجه است. در این مطالعه برای نخستین بار از این داده‌ها برای تعیین میزان عمق برف در مناطق کوهستانی ایران استفاده شده است. نتایج بیانگر تغییرپذیری سالانه و بدون روند معنی‌دار در میزان عمق برف در بازه ۴۱ ساله در هر چهار قله بررسی شده است. بیشینه میزان عمق برف در هر سال معمولاً مربوط به ماه ژانویه است. در محدوده مورد مطالعه، برف در مناطق کوهستانی البرز بیشترین و در کوهستان‌های شامل قله هزار کمترین ماندگاری را دارد که بیانگر غلبه نقش دما و عرض جغرافیایی بر ارتفاع در ماندگاری برف در مناطق کوهستانی است. به دلیل ناهمخوانی روند صعودی اندکی که در تغییرات عمق برف در مقایسه با روند گرمایش جهانی مشاهده می‌شود، به‌نظرمی‌رسد استفاده از داده‌های MERRA-2 برای مطالعه بلندمدت عدم قطعیت دارد که می‌تواند ناشی از خطا در واداشت‌ها و کاستی‌های مربوط به مدل استفاده‌شده در آن باشد. بررسی دما و بارش به‌عنوان اصلی‌ترین واداشت‌های خطا نشان می‌دهد خطای موجود در میزان عمق برف در بانک داده MERRA-2 ناشی از خطا در تخمین بارش برف است.

واژه‌های کلیدی: توزیع زمانی، عمق برف، مناطق کوهستانی، MERRA-2

* نگارنده رابط: ssabet@ut.ac.ir

۱ مقدمه

برف گسترده‌ترین جزء یخ‌کره است و تغییرات فصلی و سالانه درخور توجه آن تأثیرات چشمگیری بر چرخه آب‌شناختی و ترازینه انرژی دارد (لیستون و هیمسترا، ۲۰۱۱). ذوب برف تقریباً مصرف آب یک‌ششم جمعیت جهان را تأمین می‌کند و منبع آبی ارزشمندی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (بارنت و همکاران، ۲۰۰۵). تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با برف شامل میزان بارش تجمعی برف، عمق برف، آب معادل برف و سطح پوشیده از برف در کاربردهای آب‌شناختی، اقلیمی و مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ بنابراین وجود بانک مطمئنی از داده‌های پوشش و عمق برف برای مطالعه گردش آب و نظارت بر اقلیم جهانی ضروری است (براون و رابینسون، ۲۰۱۱). یکی از معتبرترین منابع داده برای عمق برف، مشاهدات زمینی است که شامل مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی، برف‌سنجی و آب‌شناسی است. به دلیل پراکندگی توزیع مکانی ایستگاه‌ها و در دسترس نبودن داده‌هایی با پوشش زمانی مناسب، در بیشتر موارد، مشاهدات زمینی به‌ویژه در مناطق کوهستانی و ارتفاعات کارایی لازم را برای پایش متناوب مشخصات فیزیکی برف ندارد (دزیر و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۰ و لی و همکاران، ۲۰۲۲)؛ ازاین‌رو برای تعیین پارامترهای مرتبط با برف می‌توان از روش‌هایی استفاده کرد که تخمینی پذیرفتنی دارند. یکی از روش‌هایی که امروزه برای انجام چنین مطالعاتی به‌کارمی‌رود، استفاده از بانک داده‌های بازتحلیل است که ابزاری جدید و مؤثر برای کاهش شکاف‌های اندازه‌گیری‌های زمینی است (ژائو و همکاران، ۲۰۲۰). داده‌های بازتحلیل جوّی که شامل سامانه‌های همسان‌سازی داده‌های جوّی جهانی است، پارامترهای مختلف سطح زمین و جوّ را در زمان واقعی ارائه می‌کنند. بانک داده‌های بازتحلیل معمولاً شامل پارامترهای مرتبط با برف مانند آب معادل برف و عمق برف است (پارکر، ۲۰۱۶). نمونه‌ای از بانک داده‌های بازتحلیل، بانک MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications and version2) است که در حال حاضر در مقیاس جهانی از سال ۱۹۸۰ در دسترس است.

بانک‌های داده‌های بازتحلیل در مطالعات بسیاری برای تخمین میزان برف به‌ویژه در مناطق جنگلی و کوهستانی به‌کارمی‌روند. برای نمونه اسانفر و همکاران (۲۰۱۶) داده‌های عمق برف را از منابع مختلفی مانند داده‌های بازتحلیل، مدل‌های عددی و شبکه مشاهداتی در کشور کانادا ارزیابی کردند و نشان دادند در نواحی کوهستانی در منطقه بریتیش کلمبیا، عملکرد داده‌های MERRA-2 در تخمین میزان عمق برف مناسب‌تر از دیگر منابع داده است. از سوی دیگر، در ارزیابی مشابه با مطالعه قبلی در منطقه رودخانه سنت‌موریس (کانادا، جنوب کبک) نشان داده شده است که داده‌های ERA-Interim در تخمین عمق برف بهتر از MERRA-2 عمل می‌کنند (براون و همکاران، ۲۰۱۸).

گلارو و همکاران (۲۰۱۷) با هدف مروری بر نسخه دوم بانک داده MERRA-2 و معیارهای مؤثر بر عملکرد آن، پیشرفت‌های آن را در مقایسه با نسخه اولیه (MERRA) معرفی کردند. این نسخه، از اطلاعات جدید ریزموج و تابندگی‌های اَبَرطیفی نوین استفاده کرده است و مزایایی نسبت به MERRA (رینکر و همکاران، ۲۰۱۱) دارد که شامل به‌روزرسانی‌های متعدد در شبیه‌سازی داده‌ها است. لیو و مارگولیس (۲۰۱۹) برای تخمین عدم قطعیت در بارش برف از داده‌های MERRA-2 بر فراز کوهستان‌های بلند آسیا استفاده کردند. نتایج آن مطالعه نشان می‌دهد در ارتفاعات بالا، که بیشتر از سایر نقاط تحت تأثیر بارش برف هستند، میزان بارش برف کمتر از میزان واقعی ایستگاهی آن تخمین زده می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، دالوز و

همکاران (۲۰۲۰) 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 تخمین بارش برف در مقیاس جهانی، بین بانک‌های MERRA، MERRA-2 و ERA-Interim بسیار مشابه است که بیانگر معتبر بودن این داده‌ها در مناطق کوهستانی است.

ژائو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی و ارزیابی پنج بانک داده عمق برف پرداختند که شامل سه بانک داده سنجش از دور GLOBSNOW، AMSR2 و AMSR-E و دو بانک داده بازتحلیل MERRA-2 و ERA-Interim بود. مطالعه آنها نشان داد GLOBSNOW و ERA-Interim با داده‌های ایستگاهی همخوانی بیشتری داشتند. AMSR2 وAMSR-E زمانی با داده‌های مشاهداتی و ایستگاهی همخوانی داشتند که عمق برف، کم و بین ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر بود، درحالی‌که MERRA-2 وقتی عملکرد رضایت‌بخشی داشت که عمق برف بیش از ۵۰ سانتی‌متر بود. پناهی و بهرنگی (۲۰۲۰) با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های مشاهداتی، داده‌های ماهواره‌ای و بانک‌های داده‌های بازتحلیل MERRA-2، ERA5 وERA-Interim به بررسی میزان انباشت برف در محدوده کانادا و امریکا (CONUS) پرداختند و از محصول آب معادل برف به‌عنوان معیاری برای سنجش درستی و صحت این بانک‌های داده و محصولات دیگر استفاده کردند. نتایج آن مطالعه نشان داد بانک‌های داده‌های بازتحلیل ذکرشده تا حدودی در این منطقه عملکرد مشابه دارند. ERA-Interim کمترین میزان انباشت برف و MERRA-2 بیشترین میزان انباشت برف و نزدیک‌ترین مقدار انباشت را نسبت به مقادیر ماهواره‌ای دارد.

مقایسه عملکرد مجموعه داده‌های بازتحلیل شامل MERRA-2، JRA55، GLDAS2 و ERA5 برای تخمین عمق برف در چین نشان داد داده‌های MERRA-2 از نظر تخمین میزان عمق برف خطای کمتری نسبت به بقیه داده‌ها دارد که این مسئله به دقت زیاد تخمین بارش و دما در MERRA-2 نسبت داده شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

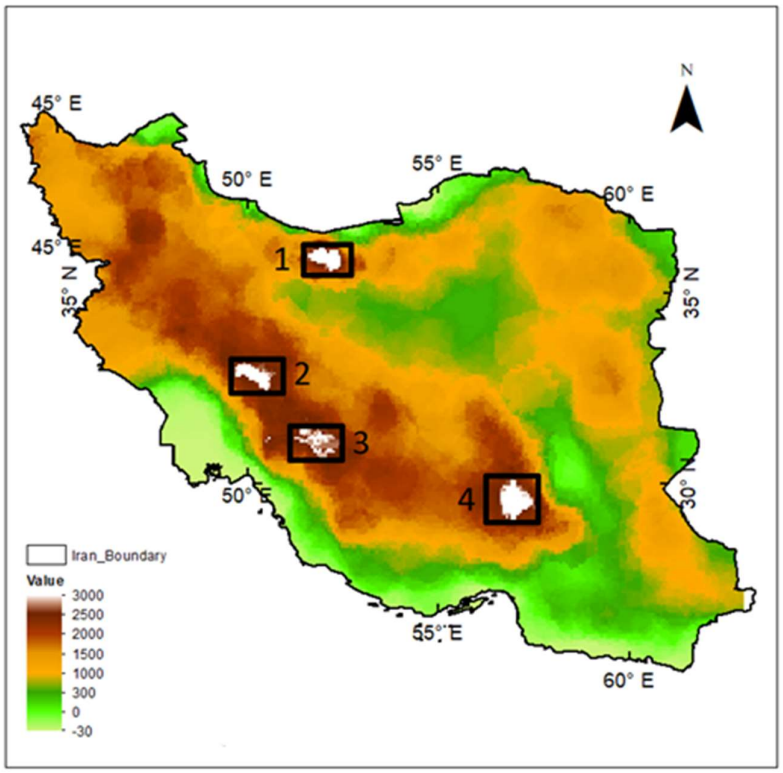
در ایران نیز در این زمینه مطالعاتی انجام شده است. برای نمونه می‌توان به مطالعه انصاری و معروفی (۲۰۱۷) اشاره کرد که از داده‌های روزانه سنجنده AMSR-E ماهواره Aqua و مدل جهانی سطح زمین (GLDAS) برای تخمین آب معادل برف روزانه در ایستگاه‌های برف‌سنجی حوضه‌های شمال غرب ایران استفاده کردند. با توجه به نتایج، داده‌های محاسباتی آب معادل برف همبستگی معنی‌داری با داده‌های مشاهداتی داشتند. در پژوهش عزیزی و همکاران (۱۳۹۹)، مقادیر بارش حاصل از ERA5 در سطح استان اردبیل با مشاهدات زمینی در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد محصول بارش ERA5 در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه می‌تواند بعد از اِعمال تصحیحات اُریبی جایگزین مناسبی برای نقاط فاقد ایستگاه اندازه‌گیری بارش باشد.

در پژوهش حاضر توزیع زمانی بلندمدت و ماهانه میزان عمق برف در کوهستان‌های بلند ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 در بازه سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ مطالعه و بررسی شده است.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش چهار منطقه کوهستانی بلند در ایران در رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس و مرکزی بررسی می‌شود. همان‌طورکه در شکل ۱ نشان داده شده است، منطقه مورد مطالعه در رشته‌کوه البرز مرکزی بین طول جغرافیایی ۵۱/۴ تا ۵۲/۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۶ تا ۳۶/۳ درجه شمالی واقع شده است که قله دماوند با ارتفاع ۵۶۷۱ متر را دربرمی‌گیرد (محدوده ۱ در شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در رشته‌کوه زاگرس نیز شامل دو محدوده است که

قله‌های زردکوه و دنا (به‌ترتیب محدوده ۲ و ۳ در شکل ۱) را شامل می‌شود. محدوده دربرگیرنده قله دنا با ارتفاع ۴۴۳۵ متر در طول جغرافیایی ۵۱/۰۱ تا ۵۲/۳ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰/۷۷ تا ۳۱/۶ درجه شمالی و محدوده دربرگیرنده قله زردکوه با ارتفاع ۴۴۳۵ متر در طول جغرافیایی ۴۹/۴۹ تا ۵۰/۸۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲/۴۳ تا ۳۳/۲ درجه شمالی قرار دارد. همچنین منطقه مطالعاتی در کوهستان مرکزی در کرمان، که شامل قله هزار با ارتفاع ۴۵۰۱ متر است، در طول جغرافیایی ۵۶/۲ تا ۵۷/۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹/۱۱ تا ۳۰/۲۲ درجه شمالی قرار دارد (محدوده ۴ در شکل ۱).



ردیف	کوهستان (قله)	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی قله	طول جغرافیایی قله	عرض جغرافیایی محدوده مطالعاتی	طول جغرافیایی محدوده مطالعاتی
۱	البرز (دماوند)	۵۶۷۱	۳۵/۹۵	۵۲/۱۱	۳۶/۳ - ۳۵/۶	۵۲/۶ - ۵۱/۴
۲	زاگرس (زردکوه)	۴۲۲۱	۳۲/۳۲	۵۰/۱۱	۳۳/۲ - ۳۲/۴۳	۵۰/۸۷ - ۴۹/۴۹
۳	زاگرس (دنا)	۴۴۳۵	۳۰/۹۵	۵۱/۴۳	۳۱/۶ - ۳۰/۷۷	۵۲/۳ - ۵۱/۰۱
۴	مرکزی (هزار)	۴۵۰۱	۲۹/۵۱	۵۷/۲۷	۳۰/۲۲ - ۲۹/۱۱	۵۷/۵ - ۵۶/۲

شکل ۱. توزیع مکانی و مشخصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در رشته‌کوه‌های البرز شامل قله دماوند (۱)، زاگرس شامل قله‌های زردکوه (۲) و دنا (۳) و مرکزی شامل قله هزار (۴).

محدوده ۱ که شامل قله دماوند در شمال ایران و استان مازندران است، در رشته‌کوه البرز واقع است. این منطقه اقلیم سرد کوهستانی دارد و اقلیم قسمت‌های شمالی آن مدیترانه‌ای است. محدوده ۲ که شامل رشته‌کوه زردکوه در جنوب غربی ایران است، در انتهایی‌ترین قسمت غربی استان چهارمحال و بختیاری واقع است. قسمت شرقی ناحیه مورد مطالعه در این منطقه اقلیم مدیترانه‌ای و سایر محدوده اقلیم سرد کوهستانی دارد. محدوده ۳ شامل قله دنا است که بلندترین و بزرگ‌ترین چین‌خوردگی رشته‌کوه بزرگ زاگرس محسوب می‌شود. این محدوده که در ناحیه سرد کوهستانی و پربارش استان کهگیلویه و بویراحمد واقع است، اقلیم سرد کوهستانی دارد (صالحی و همکاران، ۱۳۹۶). محدوده ۴ شامل کوه هزار است که بلندترین قله جنوب ایران محسوب می‌شود. این قله در استان کرمان، بخش راین شهرستان کرمان قرار دارد. ناحیه ۴ اقلیمی بسیار سرد و کوهستانی دارد (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹).

بانک داده MERRA-2 را که اداره ملی هوانوردی و فضایی آمریکا ارائه کرده است (https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2)، اولین بانک داده بازتحلیل جهانی بلندمدت برای داده‌گواری هواویزها مبتنی بر مشاهدات فضاپایه و نشان دادن برهم‌کنش آنها با سایر فرایندهای فیزیکی در سامانه اقلیمی است (گلارو و همکاران، ۲۰۱۷). به دلیل پیشرفت‌هایی که در سامانه همسان‌سازی انجام شده است، این بانک داده برای جایگزینی بانک داده اصلی MERRA معرفی شده است (ژائو و همکاران،۲۰۲۰). هدف فرایند همسان‌سازی داده‌ها، ادغام مجموعه داده‌ها با یک مدل عددی جهت شبیه‌سازی رفتار جوّ است. روش‌های شبیه‌سازی داده‌ها با ترکیب مشاهدات و شبیه‌سازی‌های مدل، محتمل‌ترین حالت جوّی و عدم قطعیت مرتبط با آن را تخمین می‌زنند (پارکر، ۲۰۱۶). توان تفکیک داده‌ها ۰/۵×۰/۶۲۵ درجه است. میزان عمق برف در مکان هر قله، در محدوده‌ای که قله را دربرمی‌گیرد (شکل ۱)، به صورت مکانی با درون‌یابی به روش نزدیک‌ترین همسایگی میانگین‌گیری شده است. پارامترهای هواشناسی در گام زمانی یک‌ساعته در دسترس هستند. مشخصات این بانک داده در جدول ۱ خلاصه شده است. با استفاده از این داده‌ها عمق برف در مناطق مورد مطالعه به صورت ماهانه، سالانه و بلندمدت از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ بررسی شده است.

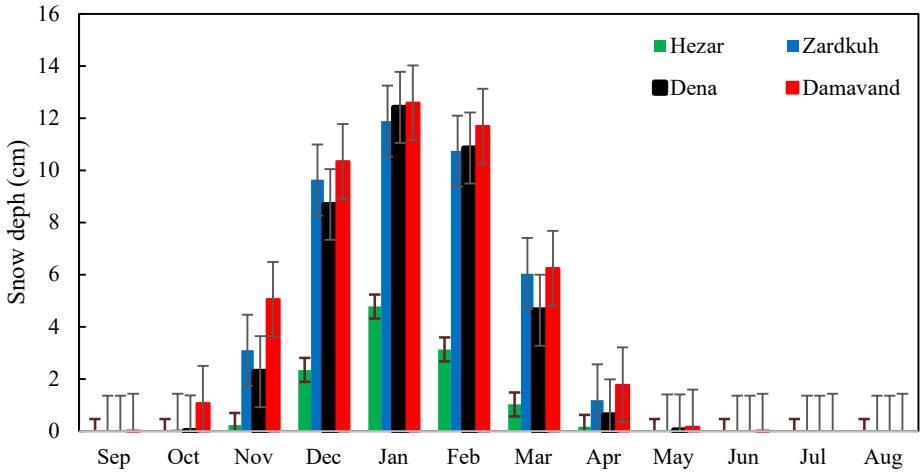
۳ تحلیل نتایج

میانگین ماهانه میزان عمق برف برای قله‌های مورد مطالعه در بازه سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ بر اساس داده‌های MERRA-2 در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل، به‌طورکلی بیشینه میزان عمق برف در هر سال معمولاً مربوط به ماه ژانویه است. محدوده هزار کمترین میزان میانگین عمق برف ماهانه را در همه ماه‌ها دارد. مقدار بیشینه متوسط ماهانه عمق برف MERRA-2 در بازه مطالعاتی ۴۱ ساله مربوط به ماه ژانویه در منطقه دماوند است و مقدار آن حدود ۱۲/۵۹ سانتی‌متر است. پس از دماوند، بیشینه متوسط ماهانه عمق برف در دنا، زردکوه و هزار به‌ترتیب برابر ۱۲/۴۱، ۱۱/۸۹ و ۴/۷۷ سانتی‌متر است.

جدول ۱. مشخصات داده استفاده‌شده

محصول داده	سازمان ارائه‌کننده	روش	مدت زمان	توان تفکیک مکانی	پوشش مکانی
MERRA-2	NASA	مدل سطح زمین Catchment	۱۹۷۹- تاکنون	۰/۶۲۵ × ۰/۵ درجه	جهانی

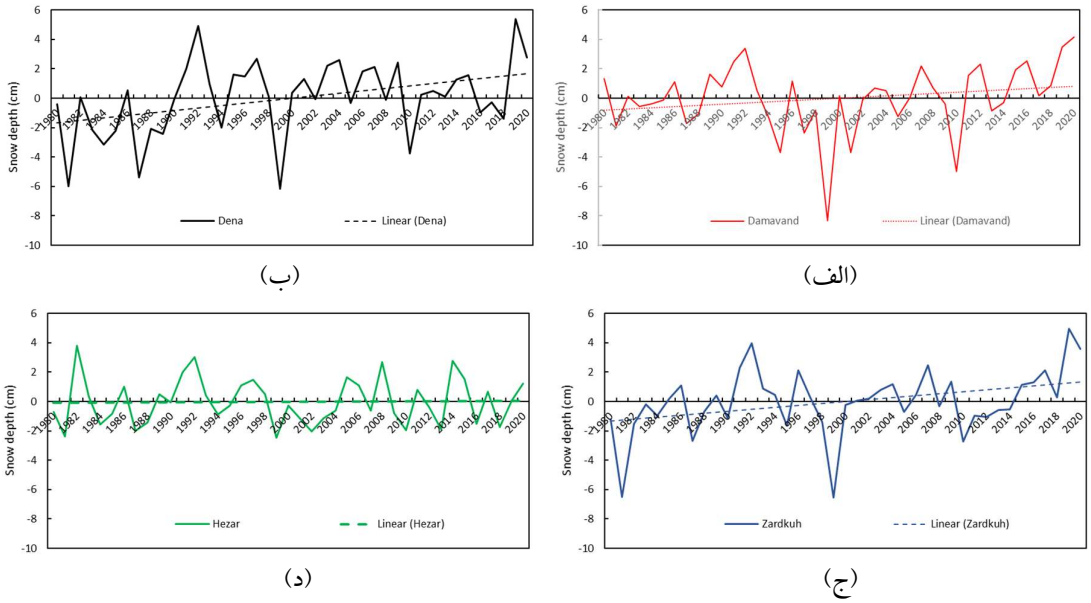
نتایج، بیانگر ماندگاری بیشتر برف در مناطق کوهستانی البرز است (شکل ۲)؛ تعداد ماه‌هایی که ماندگاری برف در آنها صفر است، در منطقه زاگرس و کوهستان مرکزی بیشتر از قله دماوند در ناحیه البرز است. ارتفاع بیشتر قله دماوند نسبت به سه قله دیگر و دمای پایین‌تر در این منطقه، دلیل ماندگاری بیشتر برف در منطقه البرز است. همچنین نتایج نشان‌دهنده ماندگاری کمتر برف در کوهستان مرکزی (قله هزار) نسبت به بقیه مناطق مورد مطالعه است که بیانگر غلبه نقش دما بر ارتفاع در مقوله ماندگاری برف در مناطق کوهستانی مورد مطالعه است که می‌تواند به علت اقلیم نیمه‌کویری این ناحیه و عرض جغرافیایی پایین‌تر آن در مقایسه با سایر مناطق باشد. علی‌رغم ارتفاع زیاد منطقه هزار نسبت به قله‌های مطالعه‌شده در زاگرس، ماندگاری برف در قله هزار کمتر است. همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تقریباً در پنج ماه از سال، از ماه مه تا سپتامبر، عمق برف در مناطق مورد مطالعه صفر است؛ ازاین‌رو در ادامه مقاله، تغییرات بلندمدت عمق برف داده‌های محدود به دوره هفت ماهه اکتبر تا آوریل بررسی می‌شود.



شکل ۲. میانگین ماهانه عمق برف بر اساس داده‌های MERRA-2 طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ در چهار منطقه مورد مطالعه. خطوط عمودی روی شکل بیانگر میزان انحراف معیار ماهانه عمق برف است.

شکل ۳ بی‌هنجاری تغییرات عمق برف را طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ برای چهار منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل مشخص است، در بازه ۴۱ ساله در هر چهار منطقه روند تغییرات عمق برف چشمگیر نیست. خط روند با شیب بسیار اندکی صعودی است که البته این روند در هیچ‌کدام از چهار قله معنی‌دار نیست. هر چهار ناحیه در بازه زمانی ۴۱ ساله الگوی نوسانی دارند. با توجه به اینکه میانگین عمق برف در منطقه هزار کمتر است، تغییرات آن نیز کمتر و شیب خط روند آن حدود صفر است. نتایج برخی از مطالعات اخیری که درباره گرمایش جهانی انجام شده است (برای نمونه، شی و همکاران، ۲۰۲۲ و شن و همکاران، ۲۰۲۱)، با روند صعودی هرچند اندک در سه قله دماوند، دنا و زردکوه همخوانی ندارد؛ بنابراین به‌نظرمی‌رسد به دلیل در دسترس نبودن داده‌های مشاهداتی در قله‌های مورد مطالعه و نبود امکان اعتبارسنجی داده‌ها، داده‌های MERRA-2 برای مطالعه بلندمدت عدم قطعیت دارد. در پژوهش‌های انجام‌شده در دیگر نقاط جهان نیز به مسئله عدم قطعیت در تعیین تغییرات روند بلندمدت عمق برف اشاره شده است (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۱) که می‌تواند ناشی از خطا در واداشت‌ها و کاستی‌های مربوط به

مدل استفاده‌شده در MERRA-2 باشد؛ ازاین‌رو در مطالعات آتی برای اطلاع دقیق از روند تغییرات بلندمدت، از دیگر منابع داده نیز برای مقایسه با مقادیر حاصل از مطالعه حاضر استفاده خواهد شد. بیشینه بی‌هنجاری منفی در قله‌های دماوند، دنا و زردکوه مربوط به سال ۲۰۰۸ است و در میان سه قله مذکور، دماوند بیشترین میزان بی‌هنجاری (۸/۳- سانتی‌متر) را دارد. بیشینه بی‌هنجاری مثبت نیز در بین این سه قله مربوط به سال ۲۰۱۹ در منطقه زردکوه است که حدود ۴/۹ سانتی‌متر است.



شکل ۳. بی‌هنجاری تغییرات عمق برف طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ برای (الف) دماوند (ب) دنا (ج) زردکوه (د) هزار. محور قائم نمودار بی‌هنجاری متوسط عمق برف برحسب سانتی‌متر است.

برای بررسی نقش دما و بارش برف به‌عنوان اصلی‌ترین واداشت‌های مؤثر در تغییرات بلندمدت عمق برف در مناطق مورد مطالعه، روند تغییرات بلندمدت میانگین سالانه این دو پارامتر در چهار منطقه کوهستانی بررسی شده است (شکل ۴). همان‌طورکه در شکل مشاهده می‌شود (ستون سمت راست) تغییرات دما در بازه بلندمدت روند صعودی مثبتی دارد، البته شیب مثبت این روند از نظر آماری معنی‌دار نیست. میزان دما در قله هزار نسبت به سه قله دیگر بیشتر است که به دلیل موقعیت مکانی آن و قرارگیری در منطقه کویری و عرض‌های پایین‌تر است. در محدوده دربرگیرنده قله دماوند، روند افزایش دما در بازه بلندمدت مشاهده می‌شود. افزایش دما (هرچند ناچیز) در بازه بلندمدت با مطالعات انجام‌شده در دیگر نقاط کشور مطابقت دارد (برای نمونه، منتظری و فنایی، ۱۳۹۷ و رضیی و همکاران، ۲۰۱۷). همان‌گونه‌که پیش از این اشاره شد، روند صعودی اندک عمق برف در سه قله دماوند، دنا و زردکوه با روند دما همخوانی ندارد؛ انتظار می‌رود افزایش دما سبب کاهش عمق برف شود، درصورتی‌که روند تغییرات عمق برف با شیب ملایم افزایشی همراه است، پس لازم است تغییرات بارش برف نیز بررسی شود تا تأثیر بارش برف بر تغییرات عمق برف مشخص شود. در شکل ۴ ستون سمت چپ، میانگین سالانه بارش برف در مناطق کوهستانی مورد

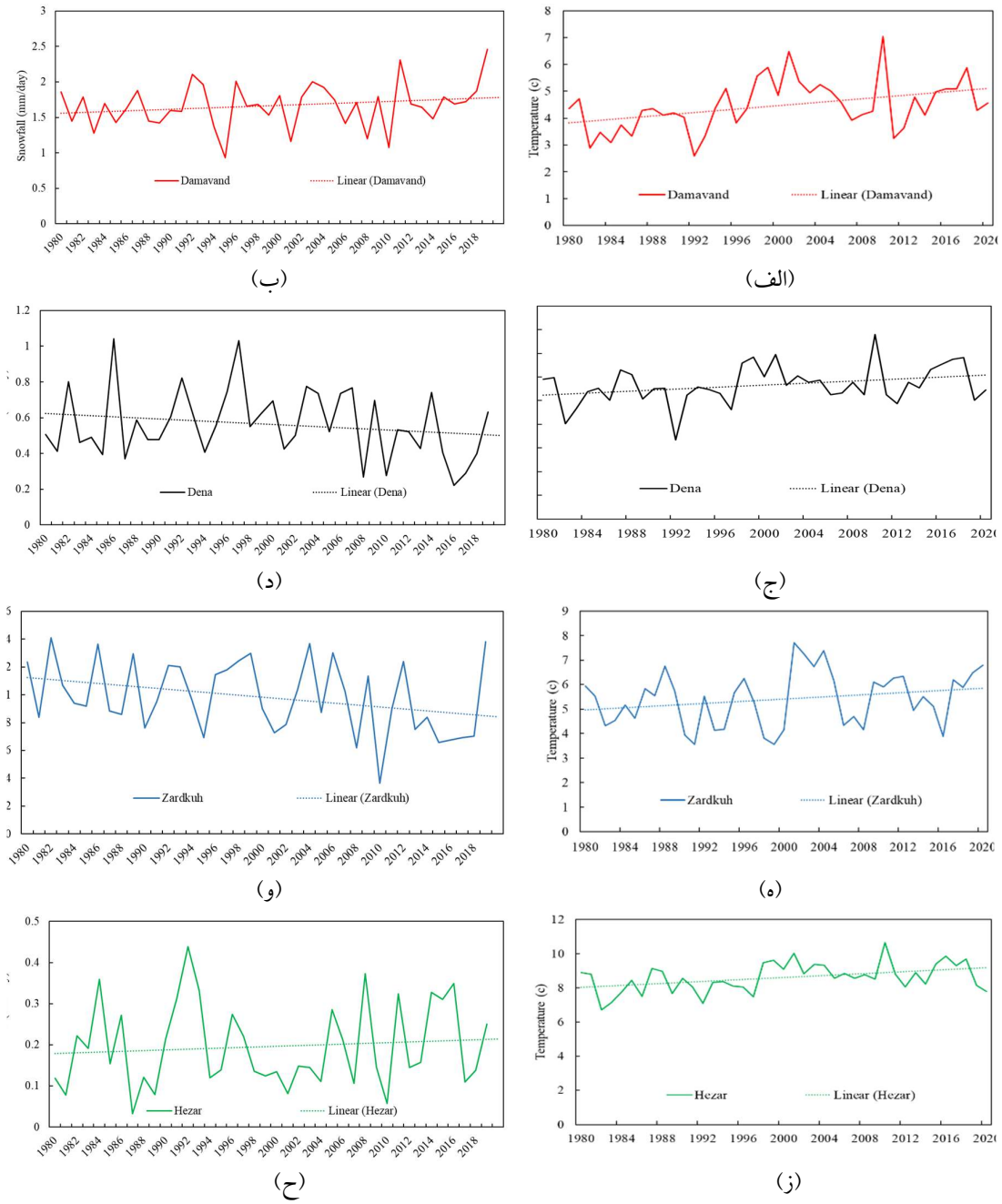
مطالعه محاسبه و تغییرات آن در بازه ۴۱ ساله تعیین شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در قله دماوند (شکل ۴- ب) مطابق با آنچه برای عمق برف به‌دست‌آمده‌بود، داده‌های MERRA-2 افزایش میزان بارش را نشان می‌دهند؛ ازاین‌رو به‌نظرمی‌رسد تغییرات عمق برف در این منطقه کوهستانی بیشتر ناشی از تغییرات میزان بارش برف باشد، تغییرات دما در تغییرات عمق برف نقش کمتری داشته باشد و عمق برف از روند بارش تبعیت کند. با توجه به این موضوع، خطای ناشی از واداشت بارش برف در داده‌های بارش در بانک داده MERRA-2 می‌تواند به خطا در عمق برف منجر شود. از سوی دیگر، در دو قله دنا و زردکوه که نسبت به دماوند میزان بارش کمتری دارند، روند نزولی اندکی در میانگین سالانه بارش برف مشاهده می‌شود که با روند صعودی عمق برف مطابقت ندارد؛ بنابراین احتمالاً خطا در میزان بارش و دما عامل اصلی روند افزایش عمق برف نیست و کاستی‌های مربوط به مدل به‌کاررفته در بانک داده‌های MERRA-2 موجب ناهماهنگی میان نتایج شده است. در منطقه هزار تغییر چشمگیری در بارش برف رخ نداده است. این موضوع با نبود روند در عمق برف در این منطقه سازگار است. البته شایان ذکر است برای اطمینان از درستی نتایج بانک داده‌های MERRA-2، لازم است این نتایج با دیگر منابع داده نیز مقایسه شود. همان‌گونه‌که در مقدمه ذکر شد، نتایج مطالعات ارزیابی در مناطقی که داده‌های مشاهداتی ندارند، نشان می‌دهد در مواقعی که عمق برف بیش از ۵۰ سانتی‌متر است، بانک داده MERRA-2 عملکرد رضایت‌بخشی دارد (ژائو و همکاران، ۲۰۲۰)، درحالی‌که در بیشتر مناطق کوهستانی ایران، میزان برف از ۵۰ سانتی‌متر کمتر است و ممکن است همین مسئله سبب عدم قطعیت در نتایج شده باشد.

جدول ۲ برخی آماره‌ها شامل میانگین، انحراف معیار، بیشینه و کمینه عمق برف (برحسب سانتی‌متر) و همچنین ماه‌ها و سال‌هایی را نشان می‌دهد که عمق برف در مناطق مورد مطالعه بیشترین است. در این جدول منطقه دنا با بیشینه عمق برف حدود ۱۷/۳۳ سانتی‌متر در ماه ژانویه سال ۱۹۹۸، بیشترین میزان عمق برف را در دوره مورد مطالعه دارد. در دماوند نیز بیشینه عمق برف در ماه فوریه در سال ۲۰۲۰ حدود ۱۷/۲۶ سانتی‌متر تخمین زده شده است. با توجه به اینکه تغییرات سالانه و ماهانه میانگین عمق برف در دماوند و دنا بیشتر است، انحراف معیار عمق برف نیز در این نواحی بیشتر است. کمینه عمق برف در هر چهار ناحیه مربوط به ماه‌های تابستانی و گرم سال است. در دوره ۴۱ ساله مورد مطالعه، در قله دماوند (رشته‌کوه البرز) به مدت ۱۷ سال، در قله دنا (زاگرس) به مدت ۲۶ سال، در قله هزار (رشته‌کوه مرکزی) به مدت ۲۸ سال و در زردکوه (زاگرس) نیز به مدت ۲۷ سال، ژانویه ماهی با بیشترین میزان عمق برف است.

همان‌طورکه در جدول ۲ نشان داده شده است، میزان بارش برف در همه موارد در ماه ژانویه بیشینه است؛ ازاین‌رو بی‌هنجاری بلندمدت عمق برف برای هر چهار منطقه برای این ماه در بازه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ در شکل ۵ نشان داده شده است تا روند تغییرات در ماهی که بیشینه عمق برف در آن رخ می‌دهد نیز بررسی شود. بر اساس شکل ۵، در تطابق با نتیجه‌ای که از شکل ۳ حاصل شده بود، در ماه ژانویه نیز در همه مناطق مورد مطالعه، عمق برف به‌ویژه در بلندمدت روند معنی‌داری ندارد و نوساناتی را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد.

۴ نتیجه‌گیری

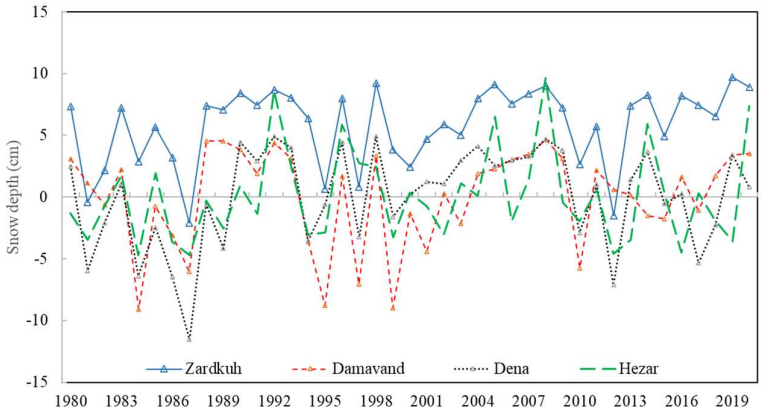
مطالعه حاضر به بررسی تغییرات میزان عمق برف در چهار منطقه کوهستانی بلند در ایران شامل دماوند، دنا، زردکوه و هزار می‌پردازد. در این مطالعه از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. نتایج این پژوهش بیانگر تغییرپذیری سالانه و



شکل ۴. تغییرات میانگین دما (ستون سمت راست) و بارش برف (ستون چپ) طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰در محدوده دماوند (الف، ب)، دنا (ج، د)، زردکوه (ه، و) و هزار (ز، ح).

جدول ۲. مشخصه‌های آماری میزان عمق برف در چهار منطقه مورد مطالعه در بازه سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۸۰ در بانک داده MERRA-2.

رشته‌کوه	قله	ارتفاع (متر)	سال‌هایی با بیشترین عمق برف	ماه‌هایی با بیشترین عمق برف	میانگین (سانتی‌متر)	انحراف معیار (سانتی‌متر)	کمینه (سانتی‌متر)	بیشینه (سانتی‌متر)
البرز	دماوند	۵۶۷۱	۲۰۲۰	ژانویه	۴/۰۸	۵/۳	۰	۱۷/۲۶
زاگرس	زردکوه	۴۲۲۱	۲۰۱۹	ژانویه	۳/۵	۵/۰۲	۰	۱۵/۸۰
زاگرس	دنا	۴۴۳۵	۱۹۹۸	ژانویه	۳/۲۹	۵/۱۴	۰	۱۷/۳۳
مرکزی	هزار	۴۵۰۱	۲۰۰۸	ژانویه	۰/۹۷	۲/۲	۰	۱۴/۳۸



شکل۵. بی‌هنجاری تغییرات عمق برف در ماه ژانویه طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰.

بدون روند معنی¬دار در میزان عمق برف در بازه ۴۱ ساله در هر چهار قله یادشده است. بیشینه میزان عمق برف در هر سال معمولاً مربوط به ماه ژانویه است. مقدار بیشینه و کمینه متوسط ماهانه عمق برف در داده‌های MERRA-2 در بازه مطالعاتی ۴۱ ساله به‌ترتیب مربوط به منطقه دماوند و هزار است. همچنین نتایج بیانگر ماندگاری بیشتر (کمتر) برف در مناطق کوهستانی البرز (کوهستان مرکزی) است که بیانگر غلبه نقش دما و عرض جغرافیایی بر ارتفاع در ماندگاری برف در مناطق کوهستانی است به‌گونه‌ای‌که علی‌رغم ارتفاع زیاد منطقه هزار نسبت به قله‌های مطالعه‌شده در زاگرس، ماندگاری برف در قله هزار کمتر است.

بی‌هنجاری تغییرات عمق برف طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ در چهار منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد در هر چهار منطقه روند تغییرات چشمگیری در عمق برف طی بازه ۴۱ ساله مشاهده نمی‌شود. خط روند با شیب بسیار اندکی روند صعودی دارد که البته این روند در هیچ‌کدام از چهار قله معنی‌دار نیست. به دلیل ناهمخوانی روند صعودی هرچند اندک در سه قله دماوند، دنا و زردکوه با نتایج مطالعات گرمایش جهانی، به‌نظرمی‌رسد استفاده از داده‌های MERRA-2، به دلیل در دسترس نبودن داده‌های مشاهداتی در قله‌های مورد مطالعه و نبود امکان اعتبارسنجی داده‌ها، برای مطالعه بلندمدت عدم قطعیت دارد که می‌تواند ناشی از خطا در واداشت‌ها و کاستی‌های مربوط به مدل استفاده‌شده در MERRA-2 باشد.

بررسی نقش دما و بارش برف به‌عنوان اصلی‌ترین واداشت‌های تغییرات بلندمدت عمق برف نشان می‌دهد تغییرات دما در بازه بلندمدت روند صعودی مثبتی دارد. روند صعودی اندک عمق برف در سه قله دماوند، دنا و زردکوه، با تغییرات دما همخوانی ندارد. تغییرات بارش برف در قله دماوند مطابق با تغییرات عمق برف است؛ بنابراین می‌توان گفت عمق برف از روند بارش پیروی می‌کند و اگر خطایی در میزان عمق برف در بانک داده MERRA-2 وجود داشته باشد، ناشی از خطا در تخمین بارش برف است. از سوی دیگر، در دو قله دنا و زردکوه که نسبت به دماوند میزان بارش کمتری دارند، روند نزولی اندکی در میانگین سالانه بارش برف مشاهده می‌شود که با روند صعودی عمق برف مطابقت ندارد؛ بنابراین خطا در میزان بارش و دما عامل اصلی روند افزایش عمق برف نیست و کاستی‌های مربوط به مدل به‌کاررفته در بانک داده‌های MERRA-2 موجب ناهماهنگی میان نتایج شده است. در منطقه کوهستانی هزار تغییر چشمگیری در بارش برف رخ نداده است. این موضوع با نبود روند در عمق برف در این منطقه سازگار است. البته گفتنی است برای اطمینان از درستی بی‌هنجاری بلندمدت عمق برف برای هر چهار منطقه مورد مطالعه، تغییرات بلندمدت عمق برف در ماهی که بیشینه عمق برف رخ می‌دهد (ماه ژانویه) نیز بررسی شده است. نتایج در این ماه با نتایج قبلی سازگار است، به‌گونه‌ای‌که در همه مناطق کوهستانی مورد مطالعه، عمق برف روند معناداری ندارد و نوسانات سالانه دارد.

منابع

صالحی، ح.، رضاپور، ذ.، نامجو, ک.، ۱۳۹۶، پهنه‌بندی اقلیمی استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از تحلیل عاملی- خوشه‌ای: پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، **۸**(۳۱-۳۲)، ۱۴۹-۱۳۷.

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

منتظری، م.، فنایی، ر.، ۱۳۹۷، شناسایی قلمروهای برفی ایران به روش تحلیل خوشه‌ای: مجله مخاطرات محیط طبیعی، **۷**(۱۶)، ۲۵۸-۲۴۱.

Ansari, H., and 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.

Barnett, T. P., Adam, J. C., and Lettenmaier, D. P., 2005, Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions: Nature, **438**(7066), 303-309.

Brown, R. D., and Robinson, D. A., 2011, Northern hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty: The Cryosphere, **5**(1), 219-229.

Brown, R., Tapsoba, D., and Derksen, C., 2018, Evaluation of snow water equivalent datasets over the Saint-Maurice river basin region of southern Québec: Hydrological Processes, **32**(17), 2748-2764.

Daloz, A. S., Mateling, M., L'Ecuyer, T., et al., 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.

Dozier, J., Bair, E. H., and Davis, R. E., 2016, Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in the world's mountains: Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, **3**(3), 461-474.

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

Li, Q., Yang, T., and 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.

Liston, G. E., and Hiemstra, C. A., 2011, The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979–2009): Journal of Climate, **24**(21),

elevation-dependent warming over the Tibetan Plateau: Atmospheric Science Letters, **22**(9), e1041.

Shi, M., Yuan, Z., Hong, X., and Liu, S., 2022, Spatiotemporal variation of snow cover and its response to climate change in the source region of the Yangtze River, China: Atmosphere, **13**(8), 1161.

Snauffer, A. M., Hsieh, W. W., and 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.

Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., et al., 2019, The future of extreme climate in Iran: Scientific Reports, **9**(1), 1464.

Xiao, L., Che, T., and 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., and 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.

5691-5712.

Liu, Y., and Margulis, S. A., 2019, Deriving bias and uncertainty in MERRA-2 snowfall precipitation over High Mountain Asia: Frontiers in Earth Science, **7**, 280.

Panahi, M., and 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.

Raziei, T., Bordi, I., and Pereira, L. S., 2017, A snow variability analysis in Iran in relation to global warming and climate change: European Water, **59**, 45-51.

Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., et al., 2011, MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications: Journal of Climate, **24**(14), 3624-3648.

Shen, L., Zhang, Y., Ullah, S., Pepin, N., and Ma, Q., 2021, Changes in snow depth under

Iranian Journal of Geophysics, Vol 17, No 5, 2024, P. 5 (Research article)
DOI: 10.30499/ijg.2023.387662.1502

Application of MERRA-2 to investigate changes in snow depth in high mountains of Iran

Faezehsadat Majidi Karhroudi [1], Samaneh Sabetghadam [2*] and Maryam Gharaylou [2]

[1] *M.Sc. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran*
[2] *Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran*

(Received: 27 February 2023, Accepted: 09 August 2023)

Summary
Snow plays a crucial role in the hydrological cycle, making it essential to measure various snow parameters especially in the mountainous regions that are characterized by high elevation. Understanding the spatio-temporal variability of snow parameters regionally is necessary to improve water resources management and risk assessment. Snow depth is an important property that is generally measured at meteorological stations. However, since snow gauge stations do not have a suitable spatial distribution and the number of these stations is very limited, traditional ground measurement methods do not have the efficiency for intermittent monitoring of snow physical characteristics. Hence, using the reanalysis data sets would be an alternative to study snow depth. This study investigates the temporal distribution of snow depth in four high mountainous regions in Iran for 41 years from 1980 to 2020, using the MERRA-2 reanalysis data. The study region includes the four highest mountain peaks over Iran, namely Damavand peak in the Alborz mountain range, Dena and Zardkooh peaks in the Zagros mountain range, and Hezar peak in Central mountain ranges in Kerman. Results show that the value of snow depth differs regionally and there is an annual variability. There is a slightly increasing trend in snow depth, however, the trend is not statistically significant during the 41-year period in all four studied regions. The maximum snow depth usually occurs in January. Alborz region (Hezar mountain) has the most (the lowest) snow duration, which indicates the role of temperature and latitude in the durability of snow in mountainous areas. Since the slight upward trend in snow depth is inconsistent with the global warming, it is likely that the applicability of MERRA-2 dataset for long-term studies has uncertainty. This can be caused by errors in forcing and shortcomings related to the model used in MERRA-2. Investigating the role of temperature and precipitation, as the main climatic drivers of error, shows that uncertainty in snow depth may be caused by the uncertain estimation of snowfall rather than temperature.

Keywords: Temporal distribution, snow depth, mountainous region, MERRA-2

*Corresponding author: ssabet@ut.ac.ir