

تخمین میزان بارش با استفاده از تولیدات ماهواره محور PERSIANN-CDR و CMC (مطالعه موردی: بالادست سد زاینده رود)

محمدعلی علیجانیان^۱، مینا مرادی زاده^۲، رامتین معینی^{۳*}

۱. استادیار، گروه عمران، دانشکده عمران حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲. استادیار، گروه نقشه برداری، دانشکده عمران حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۳. دانشیار، گروه عمران، دانشکده عمران حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۰۷؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۰۷)

چکیده

میزان بارش و اندازه گیری آن توسط ایستگاه های باران سنجی و برف سنجی از مهم ترین داده ها در مدیریت منابع آب است. با این وجود، اندازه گیری این داده ها با محدودیت هایی از هر دو منظر زمانی و مکانی همراه است. با توسعه داده های ماهواره محور مختلف تخمین بارش (Satellite based Rainfall Estimates) SRE، امکان بررسی، ارزیابی و مقایسه بین داده های تخمین بارش ماهواره محور و مقادیر ثبت شده در ایستگاه های زمینی در نقاط مختلف از جمله ایران و با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقلیمی کشور فراهم می شود. در این تحقیق، با انتخاب بالادست سد زاینده رود به عنوان محدوده مطالعاتی، از دو دسته داده تخمین بارش ماهواره محور (PERSIANN-Climate Data Record) PERSIANN-CDR و Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data به ترتیب برای بررسی دو متغیر بارندگی و آب معادل برف طی سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ استفاده می شود. هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی عملکرد این دو دسته داده ماهواره محور با استفاده از داده های ایستگاه های زمینی (در مجموع، ۱۶ ایستگاه باران سنجی و ۱۴ ایستگاه برف سنجی) در ناحیه بالادست سد زاینده رود در مقیاس زمانی ماهانه در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۸ (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹) است. به این منظور، از شاخص های ارزیابی ضریب همبستگی، جذر متوسط مربعات خطا و خطای نسبی استفاده می شود. علاوه بر آن، با استفاده از آماره های دسته بندی عملکرد داده های ماهواره محور در تشخیص بارش بررسی می شود. بر اساس نتایج به دست آمده، ضریب همبستگی ۰/۴۸ و خطای نسبی ۵۴/۵۵ درصد نشان دهنده آن است که در مقیاس کلی، با استفاده از داده های تخمین بارندگی ماهواره محور PERSIANN-CDR مقدار بارندگی بالادست سد زاینده رود به صورت تخمین رو به بالا برآورد می شود. همچنین، نتایج ارزیابی داده های تخمین آب معادل برف CMC نشان دهنده آن است که نتایج بهترین برآورد آب معادل برف توسط این داده ها با خطای ۴/۲۲ درصد و بیشترین همبستگی (CC) برابر با ۰/۳۴ است.

کلیدواژگان: تخمین بارش، تولیدات ماهواره محور، آب معادل برف، PERSIANN-CDR، CMC.

مقدمه

بارش (به مفهوم عام بارندگی و برف) یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه هیدرولوژی و اولین ورودی مدل‌های هیدرولوژی، به منظور توسعه استراتژی‌های مدیریتی است. بنابراین، تخمین دقیق از میزان بارش در شناخت پدیده‌های حدی^۱، توسعه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مؤثر است. به طور کلی، دو رویکرد برای به دست آوردن داده‌های بارش پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از: (۱) مشاهدات و اندازه‌گیری آن به وسیله ایستگاه‌های باران‌سنجی و برف‌سنجی زمینی (به ترتیب برای اندازه‌گیری باران و آب معادل برف)؛ (۲) استفاده از داده‌های تخمین بارندگی ماهواره‌محور. با وجود آنکه داده‌های زمینی (داده‌های مشاهداتی) صحت بیشتری دارند، راه‌اندازی ایستگاه‌های زمینی هزینه‌بر بوده و در برخی مناطق همانند نقاط کوهستانی با سختی همراه است. محدودیت‌های اندازه‌گیری‌های زمینی از جمله نقطه‌ای بودن مشاهدات از یک سو و توسعه و در دسترس بودن داده‌های ماهواره‌محور از سوی دیگر، مدیران و محققان منابع آب را به استفاده از آن‌ها تشویق کرده است. در این راستا، بررسی سوابق تحقیقاتی نشان‌دهنده آن است که داده‌های تخمین بارندگی ماهواره‌محور SRE^۲، در موارد مختلف به شکل مستقل و یا در مقایسه با داده‌های زمینی استفاده شده‌اند [۱]. امروزه، دو نوع داده ماهواره‌محور PERSIANN-CDR^۳ و MSWEP^۴ به دلیل آنکه توانایی تخمین بارندگی در دوره‌های درازمدت و حتی نزدیک به زمان حاضر را دارند، بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۲-۴]. تولیدات ماهواره‌ای عموماً براساس داده‌های مبتنی بر مشاهدات زمینی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی ارزیابی و صحت‌سنجی می‌شوند. به عنوان نمونه، Smith و همکاران (۲۰۰۶) بارندگی ماهانه حاصل از هشت نوع داده مختلف ماهواره‌محور استفاده‌شده در پروژه جهانی بارندگی و اقلیم‌شناسی (GPCP^۵)، را با داده‌های ایستگاه‌های زمینی مقایسه کردند [۵]. هدف از تحقیق آن‌ها، یافتن بهترین روش برای حذف خطای

سیستماتیک در نتایج بارندگی ماهواره‌محور بود. Dinku و همکاران (۲۰۰۷) دو نوع داده با درشت‌نمایی مکانی پایین (۲/۵ درجه) و درشت‌نمایی مکانی بالا (۰/۱ تا ۱ درجه) را با داده‌های زمینی برای شرق آفریقا مقایسه کردند [۱]. براساس نتایج پژوهش یادشده، از میان داده‌های با درشت‌نمایی پایین داده‌های TRMM-3B43^۶ و CMAP^۷ و داده‌های CMORPH^۸، TAMSAT^۹ و TRMM-3B42 از میان داده‌های با درشت‌نمایی بالا بهترین هماهنگی را با داده‌های زمینی داشته‌اند. همچنین، تیان و همکاران (۲۰۰۹) شش نوع داده تخمین بارندگی با درشت‌نمایی مکانی بالا را با مشاهدات زمینی مقایسه کرد [۶]. نتایج این پژوهش، دو موضوع مهم را نشان داد. نخست، به‌رغم وجود مقادیر متفاوت خطا، تمامی تولیدات دارای قابلیت بازیابی نسبتاً دقیق بارندگی‌های با مقادیر بیش از ۴۰ میلی‌متر در روز بود. دوم، مقادیر ماهواره‌محور در فصل تابستان با تخمین رو به بالا^{۱۰} و در فصل زمستان با تخمین رو به پایین^{۱۱} همراه بود. علاوه بر این، در بیش از ۴۰ درصد موارد، داده‌های ماهواره‌محور توانایی تخمین مقادیر کم بارندگی (کمتر از ۱۰ میلی‌متر در روز) را ندارند. Lockhoff و همکاران (۲۰۱۴) توانایی داده‌های ماهواره‌محور GPCP-1DD^{۱۲} در تخمین بارندگی روزانه در محدوده اروپا را از طریق مقایسه با داده‌های روزانه زمینی E-OBS^{۱۳} بررسی کردند [۷]. در تحقیق یادشده، بررسی پارامترهایی از جمله متوسط اقلیمی، تعداد روزهای بارانی (بارندگی بیش از ۱ میلی‌متر در روز) و شدت متوسط (متوسط شدت بارندگی روی همه روزهای تر) تطابق مناسب و قابل قبول بین داده‌های ماهواره‌محور و مشاهدات زمینی را نشان داد. Muse و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد سه دسته داده TRMM، PERSIANN-CDR و CHRIPS^{۱۴} در تخمین بارندگی در مناطق با داده‌های مشاهداتی محدود را بررسی کردند [۸]. نتایج پژوهش

6. Tropical Rainfall Measuring Mission
7. CPC Merged Analysis of Precipitation
8. CPC MORPHing
9. Tropical Applications of Meteorology using Satellite
10. Over Estimation
11. Under Estimation
12. Global Precipitation Climatology Project- 1Degree Daily
13. European Daily High-resolution Observational Gridded Dataset
14. Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data

1. Extreme Events
2. Satellite based Rainfall Estimates
3. PERSIANN-Climate Data Record
4. Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
5. Global Precipitation Climatology Project

تخمین رو به پایین در حاشیه دریای خزر با اقلیم سرد و معتدل وجود دارد. علیجانیان و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد داده‌های ماهواره محور TRMM-3B42RTV6، PERSIANN، CMORPH و PERSIANN-CDR را با توجه به تغییرات مکانی و اقلیمی ارزیابی کردند [۱۴]. نتایج نشان‌دهنده آن است که داده‌های جدید PERSIANN-CDR و MSWEP با مزیت اصلی طول بازه بیش از سی سال، توانایی قابل قبولی در تخمین بارندگی به خصوص در مناطق جنوب غرب ایران (اقلیم گرم و مرطوب) و دامنه‌های شرقی رشته‌کوه زاگرس (با اقلیم نسبتاً خشک) دارد. سعیدزاده و همکاران (۲۰۱۸) میزان تخمین بارندگی برای کشور ایران توسط داده‌های CHRIPS در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ را بررسی کردند. بر اساس نتایج، این نوع داده در سواحل جنوبی و شمالی ایران عملکرد بیشتری از خود نشان داد [۱۵]. جعفری و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد دو دسته داده ماهواره محور MERRA² و GLDAS² را برای نواحی جنوبی ایران بررسی کردند [۱۶]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد داده‌های MERRA توانایی بیشتری در تخمین بارندگی و نیز مطالعه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت دارد. عباسی و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد پنج داده ماهواره محور PERSIANN-، CMORPH، MSWEP، CDR، ERA5 و CHRIPS را برای نواحی مختلف حوضه آبریز زاینده‌رود با شرایط اقلیمی مختلف بررسی کردند [۱۷]. براساس نتایج تحقیق یادشده، پس از MSWEP به ترتیب PERSIANN-CDR و CHIRPS خطای کمتری در تخمین بارندگی برای نواحی مختلف این حوضه داشت. حسینی موغاری و Tang (۲۰۲۰) توانایی دو نسخه V5 و V6 از داده‌های GPM IMERG⁵ در تخمین بارندگی برای ایران را بررسی کردند [۱۸]. بر اساس نتایج این تحقیق، مقادیر تخمین بارندگی در نسخه ۵ تطابق بیشتری با بارندگی مشاهداتی در محدوده ایران دارد. در نهایت، کیخسروی کیانی و همکاران (۲۰۲۱) نیز عملکرد سه دسته داده ماهواره محور TRMM، GPM IMERG، CHRIPS و نیز داده اتمسفری ERA5 در مطالعه

یادشده بیانگر آن است که داده CHRIPS توانایی بهتری در تخمین بارندگی این مناطق دارد. Xiang و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد هشت نوع داده تخمین بارندگی GPCP، CMORPH، CHRIPS، MSWEP، TRMM، ERA5¹ و WFDEI را در مدل‌سازی هیدرولوژیکی ۱۳۸۲ حوضه آبریز در اروپا، چین و آمریکای شمالی در بازه زمانی ۱۹۹۸-۲۰۱۵ بررسی کردند [۹]. بر اساس نتایج این مطالعه MSWEP عملکرد بهتری در مقایسه با سایر تولیدات ماهواره محور از خود نشان داد. درنهایت، Noor و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد داده‌های GSMaP²، TRMM و PERSIANN-CDR در تخمین بارندگی و نیز تولید منحنی‌های شدت-مدت-مساحت را در ۸۰ نقطه از کشور مالزی بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد داده‌های GSMaP با خطایی کمتر از ۲۷ درصد بهترین توانایی در تخمین بارندگی و نیز تولید منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی را دارند [۱۰].

در ایران نیز مطالعاتی برای ارزیابی داده‌های ماهواره محور در ایران انجام شده است. از جمله، جوانمرد و همکاران (۲۰۱۰) عملکرد داده‌های TRMM-3B42 را در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی سینوپتیک در ایران و برای بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶ بررسی کردند [۱۱]. نتایج تحقیق نشان‌دهنده تخمین رو به پایین بارندگی توسط این داده‌ها در امتداد رشته‌کوه زاگرس و حاشیه خلیج فارس بود. معظمی و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد سه دسته داده ماهواره محور TRMM-3B42V7، TRMM-3B42RT و PERSIANN در تخمین ۴۷ مورد بارندگی حد بالا برای ایران ارزیابی کردند. بررسی نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر داده‌های TRMM نسبت به PERSIANN بود [۱۲]. همچنین، کتیرایی بروجردی و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد چهار دسته داده ماهواره محور adjusted-PERSIANN، CMORPH، TRMM-3B42 و PERSIANN را با داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی مقایسه کردند [۱۳]. این پژوهش با ۳۲ سلول با درشت‌نمایی یک چهارم درجه که حداقل شامل ۵ ایستگاه بود، انجام شد. بر اساس نتایج، همبستگی کم همراه با

3. Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
4. Global Land Data Assimilation System-2
5. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

1. European Center for Medium-range Weather Forecast Reanalysis 5
2. Global Satellite Mapping of Precipitation

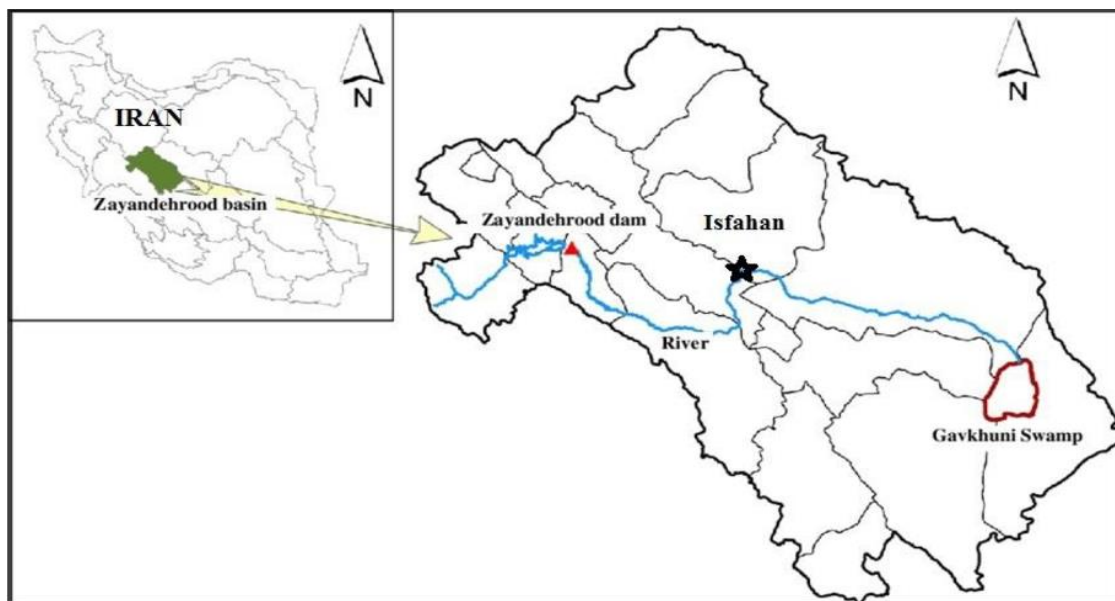
زاینده‌رود با طول ۴۰۰ کیلومتر از غرب تا شرق در جریان است، که از کوه‌های زاگرس در غرب سرچشمه می‌گیرد و به باتلاق گاوخونی می‌ریزد. در شکل ۱ موقعیت این حوضه نشان داده شده است. در بهترین شرایط جریان آب رودخانه زاینده‌رود ۱/۲ کیلومتر مکعب در سال یا ۳۸ متر مکعب در ثانیه برآورد می‌شود [۲۰]. در سال ۱۳۴۹ با احداث سد زاینده‌رود و شبکه آبیاری مدرن پایین‌دست سد زاینده‌رود سعی در مدیریت بهره‌برداری منابع آب سطحی و زیرزمینی این حوضه شد. بیشتر بارش‌های حوضه زاینده‌رود تا فرارسیدن ماه فروردین و افزایش دما، به صورت یخ و برف باقی می‌ماند. در بررسی بیشینه دبی‌های سالیانه، تأثیر برف‌آب بهاره کاملاً مشهود است. ذخیره این آب در مخزن سد زاینده‌رود برای استفاده در ماه‌های بعدی و به‌ویژه زمانی که بیشترین نیاز به آب در بخش کشاورزی وجود دارد، از دلایل اصلی احداث این سد است. متأسفانه، برداشت‌های حاشیه‌ای در ناحیه بالادست سد (برای انجام درختکاری در کوهستان‌ها) و نیز انتقال آب به استان‌های کویر مرکزی ایران (یزد و کرمان) به کاهش منابع آب حوضه منتهی شده است. به گونه‌ای که امروزه جریان آب رودخانه در پایین‌دست سد زاینده‌رود به معنای واقعی وجود ندارد و اساساً تأمین حداقل حق‌آبه زیست‌محیطی این ناحیه نیز با اما و اگرهای فراوان مواجه است. با این‌وجود، این حوضه در حال حاضر، آب مورد نیاز حدود ۲۰۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی، آب شرب میلیون‌ها نفر جمعیت در استان‌های اصفهان، چهارمحال و بختیاری، یزد و همچنین، آب مورد نیاز برخی صنایع ملی نظیر ذوب آهن، فولاد مبارکه، و ده‌ها صنعت بزرگ و کوچک در استان یزد را تأمین می‌کند. شناخت صحیح از مقدار واقعی جریان طبیعی ورودی به مخزن سد از چالش‌های اساسی مدیریت و حکمرانی منابع آب محدوده مطالعاتی است. از این‌رو، تخمین میزان بارش‌های جوی (بارندگی و برف) با استفاده از سایر منابع اطلاعاتی، صحت‌سنجی آن‌ها و استفاده از آن‌ها در فرایندهای مدل‌سازی می‌تواند راهگشای مطالعات آینده باشد. بر این اساس، در مطالعه حاضر ارزیابی عملکرد دو دسته داده ماهواره‌محور متفاوت برای تخمین بارندگی و آب معادل برف مورد توجه قرار گرفته است.

خشکسالی هواشناسی ایران را ارزیابی کردند [۱۹]. بر اساس نتایج این تحقیق، دو نوع داده TRMM و GPMIMERG عملکرد بهتری در مطالعه خشکسالی از خود نشان داده‌اند.

بررسی تحقیقات انجام‌شده در زمینه تحقیق حاضر نشان‌دهنده آن است که در بیشتر این تحقیقات تمرکز محققان بر تخمین میزان بارندگی بوده و تحقیق قابل توجهی در زمینه استفاده از داده‌های ماهواره‌محور به منظور تخمین آب معادل برف به‌ویژه در منطقه مورد مطالعه انجام نشده است. بنابراین، در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی داده‌های ماهواره‌محور در تخمین میزان بارندگی، عملکرد داده‌های تخمین آب معادل برف ماهواره‌محور CMC برای منطقه مطالعاتی نیز بررسی می‌شود. با توجه به چالش‌های پیش رو در فلات مرکزی ایران و به‌ویژه حوضه آبریز گاوخونی، در این تحقیق، بالادست سد زاینده‌رود به عنوان مطالعه موردی منظور شده است. به این‌منظور، از دو دسته داده تخمین بارش ماهواره‌محور PERSIANN-CDR و CMC به‌ترتیب برای بررسی دو متغیر بارندگی و برف برای بازه سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ استفاده می‌شود. عملکرد این دو دسته داده ماهواره‌محور با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی (در مجموع، ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی و ۱۴ ایستگاه برف‌سنجی) در ناحیه بالادست سد زاینده‌رود در مقیاس زمانی ماهانه در بازه زمانی بیست و یک ساله ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۸ (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹) ارزیابی می‌شود. در ادامه، ابتدا به‌اختصار در خصوص منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده توضیحاتی ارائه می‌شود. سپس، در بخش روش پیشنهادی توضیحاتی در زمینه آنالیزهای آماری حذف خطا و داده‌های پرت و مفقود از مشاهدات زمینی و سپس، آنالیزهای آماری و ارزیابی‌های انجام‌شده بین داده‌های ماهواره‌محور و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی ارائه می‌شود. در نهایت، نتایج ارائه و تجزیه و تحلیل می‌شود.

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز گاوخونی در قلب کشور ایران در استان‌های اصفهان (۹۳ درصد مساحت) و چهارمحال و بختیاری (۷ درصد مساحت) واقع شده است. در این حوضه رودخانه



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز گاوخونی در ایران [۲۱]

ارزیابی می‌شود. علاوه بر آن، با استفاده از آماره‌های دسته‌بندی عملکرد داده‌های ماهواره محور در تشخیص بارش نیز بررسی می‌شود. در این بخش توضیحاتی در خصوص داده‌ها و روش‌های مورد استفاده ارائه می‌شود.

داده تخمین بارندگی PERSIANN-CDR در مقیاس ماهانه

از آنجا که از مشاهدات داده‌های مایکروویو به عنوان مهم‌ترین ورودی‌ها در مدل‌های تخمین بارندگی استفاده می‌شود، استحصال داده‌های بارندگی در دوره زمانی قبل از مایکروویو، سال ۱۹۹۷، غیر ممکن خواهد بود. به منظور افزایش بازه تاریخی داده‌های تخمینی بارندگی، نسل جدیدی از داده‌ها به نام داده‌های اقلیمی پرشین PERSIANN-CDR در سال ۲۰۱۴ ارائه شد [۲]. در مقایسه با دیگر داده‌ها، امکان دسترسی در بازه زمانی طولانی‌تری، بیش از ۳۰ سال، در محدوده تقریباً سراسری (60° S- 60° N) به صورت روزانه و با درشت‌نمایی مکانی ۰/۲۵ درجه، از مزیت‌های اصلی این داده محسوب می‌شود. روش ساخت این نسل از داده‌های جدید به اختصار به صورت زیر است.

ابتدا، مدل با استفاده از داده‌های بارندگی ساعتی مرکز ملی پیش‌بینی‌های زیست‌محیطی NCEP به نام IVStage، پیش‌آموزش می‌یابد و پارامترهای آن محاسبه می‌شود. در ادامه، با ثابت بودن پارامترهای مدل، مدل با استفاده از داده‌های سراسری به‌دست‌آمده از تصویربرداری فرسرخ

روش استفاده‌شده در تخمین بارش ماهواره محور

در این تحقیق، از دو دسته داده تخمین بارش ماهواره محور PERSIANN-CDR و CMC به ترتیب برای بررسی دو متغیر بارندگی و آب معادل برف طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ استفاده می‌شود. عملکرد این دو دسته داده ماهواره محور با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی (در مجموع، ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی و ۱۴ ایستگاه برف‌سنجی) در ناحیه بالادست سد زاینده‌رود در مقیاس زمانی ماهانه در بازه زمانی بیست و یک ساله ۱۳۷۸-۱۳۹۸ (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹) ارزیابی می‌شود. به این منظور، تعداد ۱۲ سلول (با درشت‌نمایی مکانی یک چهارم درجه) برای ارزیابی عملکرد داده‌های تخمین بارندگی ماهواره محور PERSIANN-CDR به صورت سلول به سلول انتخاب می‌شود. سپس، میانگین بارندگی‌های ماهانه کلیه ایستگاه‌های درون هر سلول به عنوان مقدار بارندگی مشاهداتی سلول منظور و با مقادیر تخمینی از داده‌های ماهواره محور مقایسه می‌شود. مشابه با داده‌های بارندگی، در خصوص داده تخمین آب معادل برف CMC نیز تعداد ۸ سلول (با درشت‌نمایی یک چهارم درجه) انتخاب می‌شود. مقادیر آب معادل برف ایستگاه‌های مشاهداتی با مقادیر تخمینی مقایسه می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مختلف از جمله ضریب همبستگی، جذر متوسط مربعات خطا و خطای نسبی

اجرا می‌شود. برای کاهش خطا در مقدار بارندگی تخمینی توسط مدل PERSIANN، از داده‌های بارندگی ماهانه به‌دست‌آمده از ماهواره GPCP استفاده می‌شود. داده‌های تخمین‌زده‌شده نهایی برای بارندگی همان داده‌های

اجرا می‌شود. برای کاهش خطا در مقدار بارندگی تخمینی توسط مدل PERSIANN، از داده‌های بارندگی ماهانه به‌دست‌آمده از ماهواره GPCP استفاده می‌شود. داده‌های تخمین‌زده‌شده نهایی برای بارندگی همان داده‌های

جدول ۱. اطلاعات داده‌های ماهواره‌محور استفاده‌شده

تولید	نوع داده تخمینی	درشت‌نمایی زمانی	درشت‌نمایی مکانی	دوره	پوشش
PERSIANN-CDR	بارندگی	روزانه	۰/۲۵ درجه	۱۹۸۳ تا کنون	60S - 60N
CMC	آب معادل برف	روزانه	۰/۳۳ درجه	۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰	0-90 N

داده تخمین آب معادل برف CMC در مقیاس ماهانه این مجموعه داده که برای تخمین آب معادل برف در نیم‌کره شمالی تولید شده است، حاصل آنالیزهای عمق برف روزانه جهانی در مرکز هواشناسی کانادا (CMC) است. اصلی‌ترین محصولات این مجموعه داده، شامل عمق برف (SD)^۱ روزانه، میانگین عمق برف ماهیانه (در واحد سانتی‌متر) و آب معادل برف ماهیانه (در واحد میلی‌متر) از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ است. براساس رابطه ۱، میانگین SWE^۲ ماهانه برای دوره اکتبر تا ژوئن هر سال، با استفاده از میانگین ماهانه عمق برف برآوردشده، snow، و مقادیر میانگین ماهانه تراکم برف، density، تخمین زده می‌شود.

داده تخمین آب معادل برف CMC در مقیاس ماهانه این مجموعه داده که برای تخمین آب معادل برف در نیم‌کره شمالی تولید شده است، حاصل آنالیزهای عمق برف روزانه جهانی در مرکز هواشناسی کانادا (CMC) است. اصلی‌ترین محصولات این مجموعه داده، شامل عمق برف (SD)^۱ روزانه، میانگین عمق برف ماهیانه (در واحد سانتی‌متر) و آب معادل برف ماهیانه (در واحد میلی‌متر) از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ است. براساس رابطه ۱، میانگین SWE^۲ ماهانه برای دوره اکتبر تا ژوئن هر سال، با استفاده از میانگین ماهانه عمق برف برآوردشده، snow، و مقادیر میانگین ماهانه تراکم برف، density، تخمین زده می‌شود.

$$SWE = a.SD.(snow - density) \quad (1)$$

داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی در مقیاس ماهانه

در این تحقیق، مشاهدات زمینی شامل عمق برف حاصل از مشاهدات سینوپتیک سطحی و همچنین، گزارش‌های هوانوردی هواشناسی و گزارش‌های ویژه هوانوردی حاصل از سیستم اطلاعاتی سازمان هواشناسی جهانی (WMO)^۳ است. در جدول ۱ مشخصات محصولات این مجموعه داده، شامل درشت‌نمایی مکانی و زمانی و پوشش مکانی ارائه شده است. این داده‌های با فرمت فشرده ASCII از طریق پایگاه مرجع قابل دسترس است که آدرس آن در لیست مراجع ارائه شده است [۲۵].

داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی در مقیاس ماهانه

در این تحقیق، به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های تخمین بارش ماهواره‌محور این داده‌ها با داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و برف‌سنجی مستقر روی زمین مقایسه می‌شوند. داده‌های زمینی مشاهدات باران از اداره کل هواشناسی استان اصفهان برای ۳۴ ایستگاه باران‌سنجی مستقر در بالادست سد تهیه شده است. در ادامه، با مشاوره با کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان ۲۴ ایستگاه اصلی که بارش آن‌ها مؤثر در آورد آبی حوضه آبریز زاینده‌رود است، تعیین شده و ۱۰ ایستگاه تحت عنوان خارج از شبکه حذف شده است. در بین ۲۴ ایستگاه مورد مطالعه، پیش از انجام ارزیابی، آنالیزهای داده‌کاوی و صحت‌سنجی شامل مشخص کردن داده‌های پرت و داده‌های مفقود و نیز سازگاری ایستگاه‌ها با یکدیگر انجام شده است. در نهایت، با توجه به بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹) و نیز آنالیزهای آماری انجام‌شده مربوط به داده‌کاوی، از اطلاعات ۱۶ ایستگاه استفاده می‌شود که

در این رابطه، SD و snow-density به ترتیب، مقادیر میانگین ماهانه عمق برف برآوردشده و میانگین ماهانه تراکم برف هستند و a پارامتر ثابت است که بیشترشان مقدار ۱۰ منظور می‌شود.

همچنین، در تولید این نوع داده فرض می‌شود که مشاهدات تراکم برف کانادایی نماینده کلاس‌های آب‌وهوای برفی در مناطق دیگر نیم‌کره شمالی هستند. تجزیه و تحلیل عمق برف روزانه با استفاده از مشاهدات زمینی این پارامتر و یک روش درون‌یابی بهینه، حاصل از تجمع برف و مدل ذوب آن، انجام می‌شود. به این منظور، از دما و بارش پیش‌بینی‌شده شش‌ساعتی، به‌دست‌آمده از یک مدل کانادایی استفاده می‌شود [۲۳ و ۲۴]. در این مدل اگر دمای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد، بارش به صورت برف فرض می‌شود.

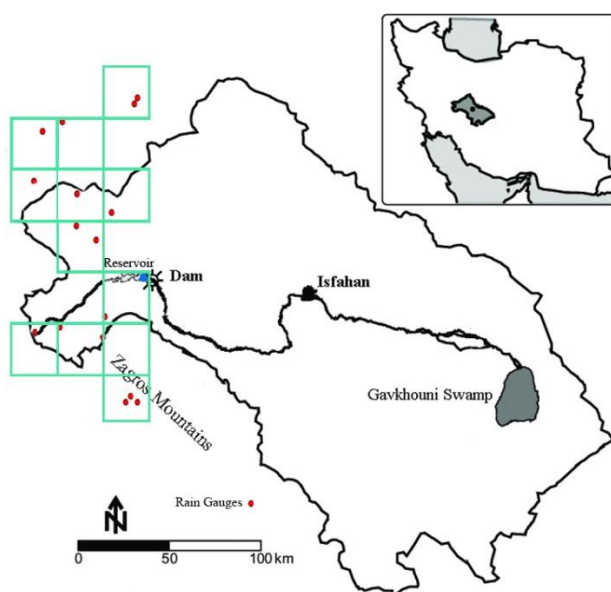
جمع‌آوری شده است. در ادامه، بررسی‌های لازم به منظور حذف خطا و داده‌های پرت انجام شده است. عملکرد داده‌های تخمین برف CMC در برآورد آب معادل برف ماهانه ناحیه بالادست سد زاینده‌رود نیز با دیدگاه مقایسه‌ی بارندگی هر سلول با میانگین بارندگی ایستگاه‌های مستقر در آن ارزیابی می‌شود. به طور کلی، داده‌های تخمین آب معادل برف CMC ناحیه بالادست سد زاینده‌رود در ۸ سلول (با درشت‌نمایی کمی بیشتر از یک چهارم درجه) برآورد می‌شود. شکل ۳ موقعیت سلول‌های انتخابی و ایستگاه‌های مستقر در آن‌ها و در جدول ۳ جزئیات آن‌ها ارائه شده است.

جزئیات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، با توجه به روش ارزیابی عملکرد داده‌ها (مقایسه سلول به سلول) و نیز بر اساس درشت‌نمایی مکانی داده‌های تخمین بارندگی PERSIANN-CDR (یک چهارم درجه) تعداد ۱۲ سلول برای ناحیه بالادست سد زاینده‌رود مشخص شد که ایستگاه‌های زمینی درون آن‌ها قرار دارد. محل این سلول‌ها در شکل ۲ و نیز جدول ۲ ارائه شده است.

در خصوص مشاهدات آب معادل برف نیز داده‌های شرکت آب منطقه‌ای اصفهان مربوط به ۱۴ ایستگاه برف‌سنجی بالادست سد زاینده‌رود در بازه زمانی مورد نظر

جدول ۲. مختصات مرکز سلول‌های انتخابی داده‌های تخمین بارندگی PERSIANN-CDR منطبق بر ایستگاه‌های باران‌سنجی بالادست سد زاینده‌رود

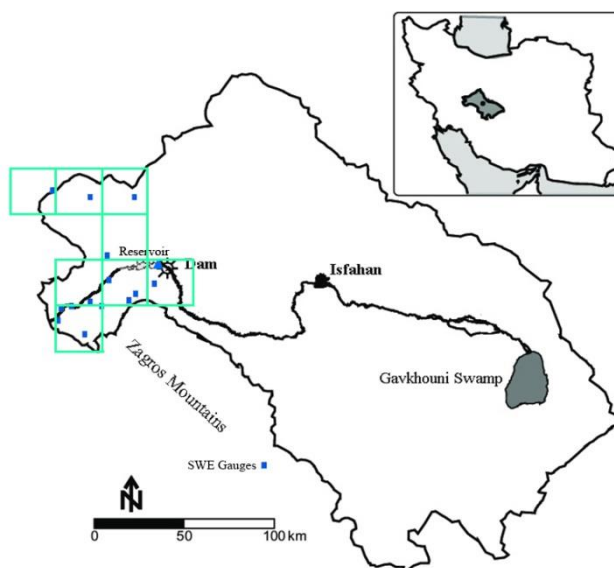
lon	lat	ایستگاه باران‌سنجی	شماره سلول
۵۰٫۱۲۵	۳۳٫۳۷۵	بوئین میان دشت	۱
۵۰٫۱۲۵	۳۳٫۱۲۵	ازناوله	۲
۵۰٫۱۲۵	۳۳٫۳۷۵	کوهرنگ	۳
۵۰٫۳۷۵	۳۳٫۳۷۵	گلپایگان	۴
۵۰٫۳۷۵	۳۳٫۱۲۵	سواران	۵
۵۰٫۳۷۵	۳۲٫۸۷۵	داران	۶
۵۰٫۳۷۵	۳۲٫۳۷۵	مرق ملک	۷
۵۰٫۳۷۵	۳۲٫۳۷۵	صالح آباد زری	۸
۵۰٫۶۲۵	۳۳٫۶۲۵	کلبعلی، کرد اولیا	۹
۵۰٫۶۲۵	۳۳٫۱۲۵	رزوه چادگان	۱۰
۵۰٫۶۲۵	۳۲٫۶۲۵	رستم آباد	۱۱
۵۰٫۶۲۵	۳۲٫۳۷۵	بارده	۱۱
۵۰٫۶۲۵	۳۲٫۱۲۵	جونقان، سورشجان، یانچشمه	۱۲



شکل ۲. آرایش سلول‌های مرتبط با داده‌های PERSIANN-CDR نسبت به موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده

جدول ۳. مختصات مرکز سلول‌های انتخابی داده‌های تخمین آب معادل برف CMC منطبق بر ایستگاه‌های برف‌سنجی بالادست سد زاینده‌رود

شماره سلول	ایستگاه برف‌سنجی	Lon	Lat
۱	گردنه بوئین	۵۰,۰۰۷۸۸	۳۳,۰۸۵۴۷
۲	باردیجان	۵۰,۲۷۶۴۶	۳۳,۰۸۵۴۷
۳	گردنه اوشن	۵۰,۵۴۵۰۵	۳۳,۰۸۸۵۹
۴	سینجرد	۵۰,۵۴۶۲۱	۳۲,۸۶۲۴۷
۵	قلعه شاهرخ، بارده، شیخ شبان	۵۰,۵۴۷۳۶	۳۲,۶۳۶۳۵
۶	اسلام آباد	۵۰,۸۱۴۶۱	۳۲,۶۳۷۰۳
۷	دره گاو	۵۰,۲۸۰۱۲	۳۲,۶۳۵۱
۸	نصیرآباد، چلگرد، محمدآباد، قلعه مرغ، سودجان	۵۰,۲۸۱۹۲	۳۲,۴۰۸۹۹



شکل ۳. آرایش سلول‌های مرتبط با داده‌های CMC نسبت به موقعیت ایستگاه‌های برف‌سنجی استفاده‌شده

روش آماره‌های دسته‌بندی

معمولاً از روش آماره‌های دسته‌بندی به‌منظور تعیین ظرفیت داده‌های ماهواره‌محور در شناسایی و تفکیک شرایط با/بدون بارندگی استفاده می‌شود [۲۶ و ۲۷ و ۱۲ و ۱۳]. به این‌منظور، با در نظر گرفتن شدت بارندگی ۱ میلی‌متر در روز به عنوان آستانه بارندگی، چهار حالت مختلف برای تخمین بارندگی توسط ماهواره و یا مشاهده آن توسط ایستگاه زمینی پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از:

الف) ضربه (A): بارندگی رخ داده است و داده‌های ماهواره نیز نشان‌دهنده تخمین رخداد داده است.

ب) اختطار اشتباه (B): بارندگی رخ نداده است، ولی داده‌های ماهواره نشان‌دهنده تخمین رخداد داده است.

ج) خطا (C): بارندگی رخ داده است، ولی داده‌های ماهواره نشان‌دهنده تخمین عدم رخداد داده است.

د) رخداد منفی (D): بارندگی رخ نداده است و داده‌های ماهواره نیز نشان‌دهنده تخمین عدم رخداد داده است. در این تعاریف، رخداد بارندگی مقادیر بیشتر از ۱ میلی‌متر بارندگی در نظر گرفته می‌شود و مقادیر کمتر از آن نشان‌دهنده حالت عدم رخداد بارندگی است. بر اساس حالت‌های یادشده آماره‌های دسته‌بندی به صورت زیر تعریف می‌شوند؛

- احتمال کشف (POD^1): نشان‌دهنده توانایی داده‌های ماهواره‌محور در تشخیص یا عدم تشخیص بارندگی در مقایسه با مشاهدات زمینی است. در این رابطه، هرچه مقدار خطا در تخمین بارندگی توسط ماهواره کمتر باشد، مقدار C کوچک‌تر بوده و شاخص به سمت یک نزدیک‌تر شده و توانایی بیشتر تولیدات ماهواره‌محور در شناسایی بارش (مستقل از مقدار بارش تخمینی) را نشان می‌دهد.

در این روابط S_i و G_i به ترتیب مقادیر داده‌های ماهواره محور و ایستگاه زمینی برای هر سلول و در هر گام زمانی ماهانه i و \bar{S} و \bar{G} به ترتیب میانگین مقادیر داده‌های ماهواره محور و ایستگاه زمینی و n تعداد کل داده‌ها در بازه زمانی ۲۱ ساله مورد بررسی است. شایان یادآوری است که در رابطه ۷ در صورتی که میزان خطای نسبی مثبت باشد یعنی مقادیر تخمین ماهواره محور بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای زمینی بوده و به عبارت دیگر، تخمین رو به بالا است. همچنین، در حالتی که مقدار خطای نسبی منفی باشد یعنی حالت عکس اتفاق افتاده و تخمین رو به پایین است.

تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج ارزیابی داده‌های ماهواره محور تخمین بارندگی PERSIANN-CDR و آب معادل برف CMC در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های زمینی در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از هر دو دسته روش آماره کیفی و دسته‌بندی برای بالادست سد زاینده‌رود به تفکیک ارائه می‌شود.

ابتدا، عملکرد داده‌های تخمین بارندگی PERSIANN-CDR در برآورد بارندگی ماهانه ناحیه بالادست سد زاینده‌رود با دو رویکرد الف) میانگین کل ناحیه (میانگین بارندگی ۱۶ ایستگاه بالادست سد و میانگین بارندگی ۱۲ سلول منطبق بر ایستگاه‌ها)؛ ب) مقایسه بارندگی هر سلول با میانگین بارندگی ایستگاه‌های مستقر در آن، ارزیابی و نتایج در جدول ۴ ارائه می‌شود. براساس نتایج جدول ۴، در رویکرد اول ضریب همبستگی ۰/۴۸ و خطای نسبی ۵۴/۵۵ درصد نشان‌دهنده آن است که در مقیاس کلی داده‌های تخمین بارندگی ماهواره محور PERSIANN-CDR مقدار بارندگی بالادست سد زاینده‌رود را به صورت تخمین رو به بالا برآورد می‌کند. این موضوع از بررسی منحنی‌های تابع توزیع احتمال ارائه‌شده در شکل ۴ برای دو دسته داده حاصل از مشاهدات ایستگاه‌های زمینی و تخمینی ماهواره محور نیز مشخص است. مسئله تخمین رو به بالای بارندگی در نواحی کوهستانی توسط این نوع داده ماهواره محور به ماهیت آن‌ها و استفاده از تصاویر میکروویو توانایی در تخمین بارندگی، ناشی می‌شود. به طور کلی، عدم توانایی داده‌های تخمین بارندگی ماهواره محور در تشخیص برف و اشتباه این سیستم‌ها در تشخیص برف و

$$POD = \frac{A+C}{A} \quad (2)$$

- نسبت اخطار اشتباه (FAR^1): نشان‌دهنده چگونگی تشخیص بارندگی توسط ماهواره است، در حالتی که روی زمین بارندگی مشاهده نشده است. در این رابطه هرچه مقدار B کوچک‌تر باشد، ماهواره در توانایی عدم بارش موفق‌تر است و شاخص FAR به صفر نزدیک‌تر می‌شود و نشان‌دهنده توانایی بیشتر ماهواره در شناسایی عدم بارش است.

$$FAR = \frac{B}{A+B} \quad (3)$$

- شاخص توفیق بحرانی (CSI^2): نشان‌دهنده نسبت بارندگی یک ایستگاه زمینی است که به شکل صحیح توسط ماهواره تشخیص داده شده است. در این رابطه، هر چه مقدار شاخص به یک نزدیک‌تر باشد (مقدار شاخص بزرگ‌تر باشد)، نشان‌دهنده کاهش مقدار هر نوع خطای تخمین بوده و توانایی بهتر ماهواره در شناسایی بارش از عدم بارش را نشان می‌دهد.

$$CSI = \frac{A}{A+B+C} \quad (4)$$

در این تحقیق، از این روش به منظور ارزیابی داده‌های ماهواره محور در تخمین بارش استفاده شده است.

روش آماره‌های کیفی

در این تحقیق، به منظور بررسی کیفی تطابق بین داده‌های تخمین بارندگی ماهواره محور و مشاهدات ایستگاه‌های باران‌سنجی، از آماره‌های ضریب همبستگی CC^3 ، جذر متوسط مربعات خطا $RMSE^4$ و خطای نسبی RE^5 استفاده می‌شود که روابط آن‌ها به شرح زیر است.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2 (S_i - \bar{S})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S_i - G_i}{G_i} \times 100 \quad (7)$$

1. False Alarm Ratio
2. Critical Success Index
3. Correlation Coefficient
4. Root Mean Square Error
5. Relative Error

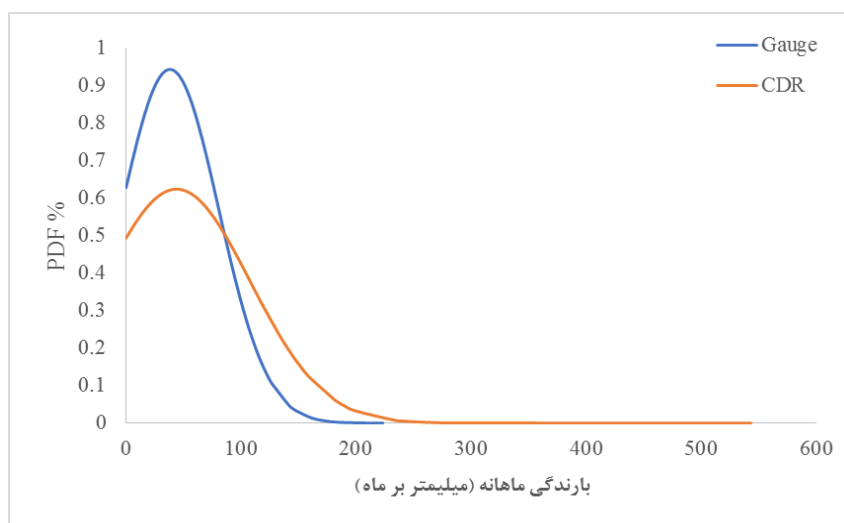
دستیابی دقت مناسب ارائه شده است. همچنین، بررسی نتایج جدول ۵ نشان‌دهنده آن است که بهترین برآورد با خطای ۱۶/۷۸ درصد و بیشترین همبستگی (CC) برابر با ۰/۴۹ در سلول ۱۲ (Lat: 32.125, Lon: 50.625) رخ داده است، با وجود آنکه این بخش در نواحی کوهستانی استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است (شکل ۲). استقرار ۳ ایستگاه در این سلول مؤید پیشنهاد به‌کارگیری سلول‌های با حداقل ۳ ایستگاه در مطالعات اقلیم‌شناسی است. علاوه بر این، این موضوع نشان‌دهنده آن است که هر چه تعداد ایستگاه‌های مشاهداتی مستقر در یک سلول بیشتر باشد، متوسط مقدار مشاهداتی به مقدار تخمینی نزدیک‌تر خواهد بود. همچنین، سلول‌هایی که در نواحی با ارتفاع کمتر و برف زمستان کمتری هستند، مانند سلول ششم (Lat: 32.875, Lon: 50.375) با ۲ ایستگاه و سلول چهارم (Lat: 33.375, Lon: 50.375) دارای خطای کمتری، به ترتیب با مقادیر ۱۸/۲۸ و ۱۸/۹۸ درصد، نسبت به سایر سلول‌ها هستند.

پوشش یخ از حجم ابر به عنوان مهم‌ترین دلیل عملکرد ضعیف این داده‌ها در تخمین بارندگی در نواحی کوهستانی است [۱ و ۱۴ و ۲۳ و ۲۸ و ۲۹].

نتایج ارزیابی عملکرد داده‌های تخمین بارندگی PERSIANN-CDR در برآورد بارندگی ماهانه ناحیه بالادست سد زاینده‌رود با رویکرد سلول به سلول (رویکرد ب) نیز در جدول ۵ ارائه شده است. در یک بررسی اجمالی، میزان بارندگی در تمامی سلول‌ها رو به بالا تخمین زده شده است که نشان‌دهنده محدودیت اشاره‌شده در تفکیک برف از ابر است. همچنین، بررسی نتایج جدول ۵ نشان‌دهنده آن است که در سلول‌هایی که شامل تعداد بیشتری ایستگاه می‌شود، مقدار خطای تخمین کمتر است. به طور کلی، در سایر مطالعات نیز این موضوع بیان شده و پیشنهادهای مختلفی مبنی بر استفاده از سلول‌هایی با آستانه تعداد ۳ ایستگاه [۳۰ و ۴] و یا مطالعه روی سلول‌هایی با آستانه حداقل ۵ ایستگاه کتیرایی بروجردی و همکاران (۲۰۱۳) [۳۱ و ۳۲] برای

جدول ۴. عملکرد داده‌های PERSIAN-CDR در تخمین بارندگی متوسط درازمدت ماهانه بالادست سد زاینده‌رود

میانگین بارش ماهانه (mm/Month) ۱۹۹۹-۲۰۱۹						
ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ایستگاه	۷۳,۲۹	۶۶,۷۴	۷۵,۰۳	۶۸,۹۰	۱۸,۶۶	۱,۵۱
CDR	۱۰۷,۹۹	۶۱,۸۲	۸۰,۸۹	۶۳,۰۲	۳۳,۷۷	۷,۷۲
ماه	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
ایستگاه	۱,۵۲	۲,۲۰	۲,۴۷	۱۶,۰۴	۵۲,۰۳	۷۹,۲۵
CDR	۵,۰۳	۳,۷۱	۴,۴۰	۱۸,۹۰	۵۸,۸۰	۸۰,۰۸
شاخص‌های آماری	میان	انحراف معیار	حداکثر	CC	RMSE	RE %
ایستگاه	۳۸,۱۴	۴۵,۲۶	۲۲۳,۱۵	۰,۴۸	۵۸,۳۰	۵۴,۵۵
CDR	۴۳,۸۴	۶۳,۹۰	۵۴۳,۱۷			



شکل ۴. توزیع احتمال بارندگی ماهانه بالادست زاینده‌رود در برابر مقدار تخمینی توسط PERSIANN-CDR

جدول ۵. عملکرد داده‌های PERSIAN-CDR در تخمین بارندگی ماهانه سلول به سلول بالادست سد زاینده‌رود

ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR
سلول	۱۵۹۱	۱۵۸۸	۱۵۸۷	۱۶۴۹	۱۶۴۷	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸
Lon	۵۰,۱۲۵	۵۰,۱۲۵	۵۰,۱۲۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵
Lat	۳۲,۳۷۵	۳۳,۱۲۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۸۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵
میانگین (mm)	۱۰۴,۴۹	۴۸,۹۵	۲۶,۲۹	۴۶,۳۲	۳۰,۵۸	۳۷,۹۰	۲۷,۴۴	۳۷,۹۰	۳۷,۹۰	۳۷,۹۰	۳۷,۹۰
حداکثر (mm)	۶۱۲,۰۱	۵۱۹,۵۴	۱۷۰,۰۰	۶۴۷,۷۷	۱۶۱,۷۱	۴۵۹,۰۸	۱۹۱,۹۰	۴۵۹,۰۸	۴۵۹,۰۸	۴۵۹,۰۸	۴۵۹,۰۸
CC	۰,۵۲	۰,۴۳	۰,۴۰	۰,۴۶	۰,۴۹	۰,۳۶	۰,۳۶	۰,۳۶	۰,۳۶	۰,۳۶	۰,۳۶
RMSE	۱۲۱,۱۲	۶۱,۵۹	۶۶,۶۹	۵۹,۳۶	۶۰,۹۰	۵۵,۶۰	۵۹,۳۶	۵۵,۶۰	۵۵,۶۰	۵۵,۶۰	۵۵,۶۰
RE %	۲۴,۲۲	۵۴,۵۶	۶۹,۹۳	۱۸,۲۸	۱۶,۷۸	۲۸,۱۷	۱۸,۲۸	۲۸,۱۷	۲۸,۱۷	۲۸,۱۷	۲۸,۱۷
ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR	ایستگاه	CDR
سلول	۱۷۱۱	۱۷۱۰	۱۷۰۸	۱۶۵۱	۱۶۴۷	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸	۱۶۴۸
Lon	۵۰,۶۲۵	۵۰,۶۲۵	۵۰,۶۲۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵	۵۰,۳۷۵
Lat	۳۲,۳۷۵	۳۲,۶۲۵	۳۲,۱۲۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵	۳۲,۳۷۵
میانگین (mm)	۲۴,۷۴	۴۳,۳۶	۲۸,۲۸	۴۰,۴۳	۲۰,۱۹	۴۳,۱۷	۳۱,۳۷	۴۳,۱۷	۴۳,۱۷	۴۳,۱۷	۴۳,۱۷
حداکثر (mm)	۲۶۷,۰۰	۵۸۱,۷۱	۱۸۷,۰۰	۴۸۴,۰۳	۵۸۸,۴۶	۵۳۱,۳۴	۱۹۶,۰۰	۵۳۱,۳۴	۵۳۱,۳۴	۵۳۱,۳۴	۵۳۱,۳۴
CC	۰,۳۸	۰,۴۶	۰,۳۹	۰,۴۸	۰,۳۸	۰,۳۷	۰,۳۷	۰,۳۷	۰,۳۷	۰,۳۷	۰,۳۷
RMSE	۶۴,۶۰	۶۸,۰۷	۵۹,۲۹	۸۳,۸۸	۶۳,۸۰	۶۳,۰۱	۸۳,۸۸	۶۳,۰۱	۶۳,۰۱	۶۳,۰۱	۶۳,۰۱
RE %	۴۴,۴۶	۲۹,۵۱	۳۵,۲۹	۲۴,۹۵	۱۸,۹۸	۴۶,۶۰	۲۴,۹۵	۴۶,۶۰	۴۶,۶۰	۴۶,۶۰	۴۶,۶۰

در ادامه، از روش آماره‌های دسته‌بندی به منظور ارزیابی میزان توانایی داده‌های ماهواره محور تخمین بارندگی PERSIANN-CDR در تشخیص وقوع بارندگی استفاده شده است. براساس روابط ۲ تا ۴، نتایج سه آماره دسته‌بندی POD، FAR و CSI برای میانگین بارندگی ناحیه بالادست سد زاینده‌رود و نیز سلول با کمترین خطای تخمین مقدار بارندگی (سلول ۱۲ با خطای تخمین ۱۶/۷۸ درصد) و سلول با بیشترین خطای تخمین بارندگی (سلول ۱ با خطای تخمین ۶۹/۹۳ درصد) در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج جدول ۶ نشان‌دهنده آن است که در صورت استفاده از شاخص رده صحیح (POD) در هر سه حالت متوسط بارندگی حوضه و سلول دوازدهم و سلول اول، قدرت تفکیک صحیح به مقدار یک نزدیک بوده و اختلاف قابل ملاحظه و مؤثری وجود ندارد. علاوه بر آن، کمترین میزان آماره FAR (تخمین در رده اشتباه) مربوط به سلول دوازدهم (سلول با بیشترین تعداد ایستگاه مستقر) و سپس داده‌های متوسط بارندگی بالادست سد است که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۱۶ و ۰/۱۷ است. علاوه بر این، در سلول با بیشترین خطای تخمین، مقدار معیاره ۰/۳۲ برآورد شده است. این موضوع نشان‌دهنده آن

است که در دیدگاه متوسط بارندگی و نیز سلول با بهترین خطای تخمین بارندگی عدم رخداد بارندگی با دقت بیشتری شناسایی شده و ماهواره در شناسایی عدم بارش موفق‌تر عمل کرده است. همچنین، بررسی آماره CSI نیز نشان‌دهنده این نکته است که بیشترین نسبت تشخیص درست در دو حالت اخیر رخ خواهد داد. به طور کلی، نتایج نشان‌دهنده آن است که داده ماهواره محور تخمین بارندگی PERSIANN-CDR توانایی مناسبی در تمیز بین دو حالت بارش و عدم بارش را دارد.

در ادامه، عملکرد داده‌های تخمین برف CMC در برآورد آب معادل برف ماهانه ناحیه بالادست سد زاینده‌رود نیز با دو رویکرد الف) میانگین کل ناحیه (میانگین بارندگی ۱۴ ایستگاه بالادست سد و میانگین بارندگی ۸ سلول منطبق بر ایستگاه‌ها) و ب) مقایسه بارندگی هر سلول با میانگین بارندگی ایستگاه‌های مستقر در آن، ارزیابی می‌شود. جزئیات نتایج در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. براساس نتایج جدول ۷، در رویکرد اول ضریب همبستگی ۰/۱۶ و خطای نسبی ۴۹/۵۸- درصد بیانگر آن است که در مقیاس کلی داده‌های تخمین آب معادل برف CMC مقدار آب معادل برف بالادست سد

به پایین تخمین زده شده است. همچنین، نتایج جدول ۷ نشان دهنده آن است که بهترین برآورد آب معادل برف با خطای ۴/۲۲ درصد و بیشترین همبستگی (CC) برابر با مقدار ۰/۳۴ در سلول چهارم (Lat: 32.86, Lon: 50.55) رخ داده است. با این وجود، در مهم‌ترین سلول منطقه مطالعاتی (سلول هشتم) که در آن تعداد پنج ایستگاه برف‌سنجی نیز قرار دارد، خطای رو به پایین و به مقدار حدود ۴۲ درصد در تخمین آب معادل برف گزارش شده است. از سوی دیگر، در بیشتر سلول‌های بررسی شده، خطای تخمین آب معادل برف از نوع تخمین رو به پایین است. این موضوع نشان دهنده آن است که داده یادشده توانایی مناسبی در تخمین مقدار آب معادل برف را ندارد.

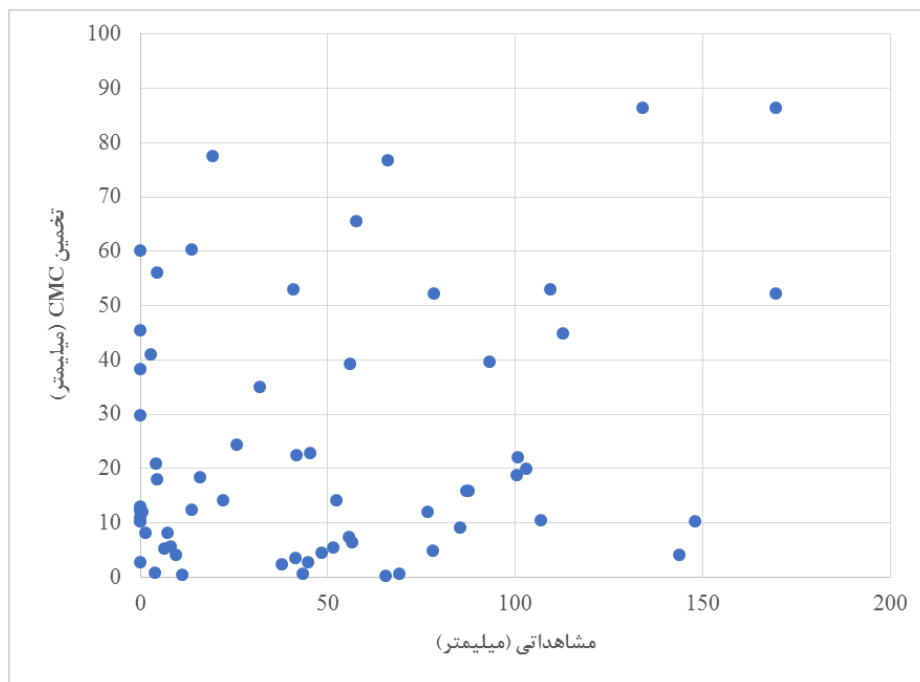
زاینده‌رود را به صورت تخمین رو به پایین برآورد می‌کند. همان‌گونه که در نمودار پراکنش آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است، دلیل همبستگی کم این داده‌ها نیز تخمین رو به پایین و در محدوده صفر است. همچنین، منحنی‌های تابع توزیع احتمال مربوط به دو دسته داده حاصل از مشاهدات ایستگاه‌های زمینی و تخمینی در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج شکل ۶ نیز نشان دهنده تخمین رو به پایین داده‌های آب معادل برف CMC است. علاوه بر این، بررسی نتایج جدول ۸ نشان دهنده آن است که همچنان میزان آب معادل برف تخمینی توسط داده CMC در بیشتر سلول‌ها (به غیر از دو سلول مربوط به ایستگاه‌های اسلام‌آباد و سینگرد) رو

جدول ۶. ارزیابی عملکرد داده‌های PERSIAN-CDR در تخمین بارندگی با استفاده از آماره‌های دسته‌بندی

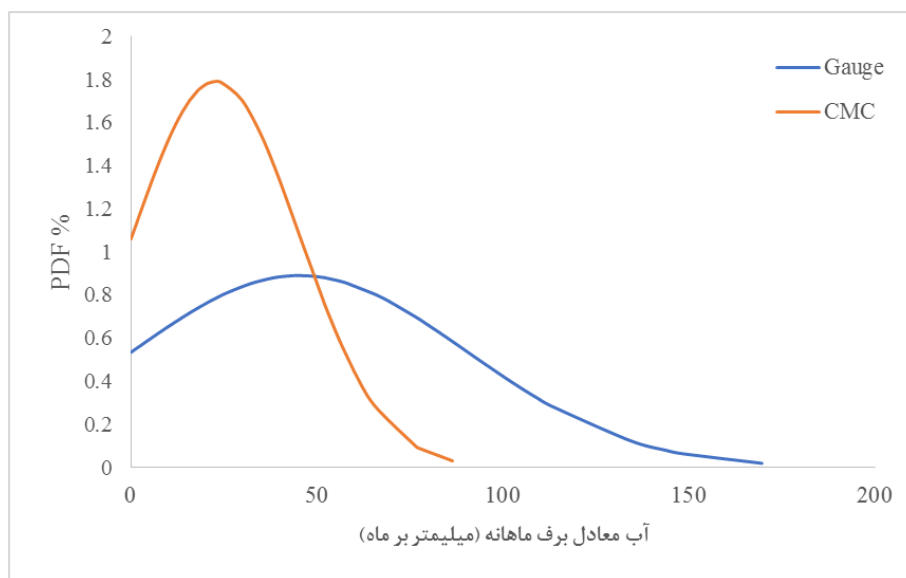
پارامتر	A	B	C
متوسط بارندگی بالادست	۱۷۹	۳۷	۴
سلول ۱۷۱۲	۱۶۲	۳۱	۹
سلول ۱۵۸۷	۱۴۷	۶۸	۴
معیار	POD	FAR	CSI
متوسط بارندگی بالادست	۱،۰۲	۰،۱۷	۰،۸۱
سلول ۱۷۱۲	۱،۰۶	۰،۱۶	۰،۸۰
سلول ۱۵۸۷	۱،۰۳	۰،۳۲	۰،۶۷

جدول ۷. عملکرد داده‌های CMC در تخمین مقدار ماهانه آب معادل برف در بالادست سد زاینده‌رود

RE %	RMSE	CC	۱۶۹،۵۷	حداکثر مشاهداتی (mm)	۴۵،۳۲	مشاهداتی (mm)	متوسط آب معادل برف بالادست سد
ایستگاه	CMC	ایستگاه	۸۶،۴۲	حداکثر تخمینی (mm) CMC	۲۲،۸۵	تخمینی (mm) CMC	
۲	۳۳،۰۹	۰،۱۶	۳۳،۰۹	ایستگاه	۵	ایستگاه	۸
بادیجان	۵۰،۲۸	۳۳،۰۹	۵۰،۰۱	قلعه شاهرخ، بارده، شیخ شبان	۳	نصیرآباد، چلگرد، محمدآباد، قلعه مرغ، سودجان	سلول Lat Lon
۳۳،۱۲	۳۱،۰۵	۴۱،۸۶	۲۳،۵۸	۳۲،۹۵	۲۵،۸۵	۷۳،۸۴	میانگین (mm)
۱۳۲،۰۰	۱۲۲،۸۰	۱۴۲،۰۰	۱۰۸،۹۰	۱۴۳،۳۳	۱۰۸،۹۰	۲۶۸،۸۰	حداکثر (mm)
۰،۱۸	۴۶،۸۳	۰،۰۳	۰،۰۳	۰،۱۳	-۰،۰۲	۰،۰۲	CC
۴۶،۸۳	۴۶،۸۳	۵۴،۰۲	۵۴،۰۲	۴۵،۰۸	۸۸،۷۵	۸۸،۷۵	RMSE
-۶،۲۷	-۶،۲۷	-۴۳،۶۷	-۴۳،۶۷	-۲۱،۵۵	-۴۲،۴۲	-۴۲،۴۲	RE %
ایستگاه	CMC	ایستگاه	CMC	ایستگاه	CMC	ایستگاه	CMC
۷	۳۲،۶۴	اسلام‌آباد	۳۲،۶۴	سینگرد	۳۲،۸۶	گردنه اوشن	۳
دره گاو	۵۰،۲۸	۵۰،۸۱	۵۰،۸۱	۵۰،۵۵	۵۰،۵۵	۵۰،۵۵	Lon Lat
۳۲،۵۵	۱،۲۹	۱۸،۷۸	۲۱،۸۷	۲۷،۷۳	۲۸،۹۰	۱۸،۸۶	میانگین (mm)
۱۶۲،۰۰	۴۲،۲۰	۱۰۵،۰۰	۹۴،۹۰	۱۴۳،۰۰	۱۱۳،۴۰	۱۰۰،۰۰	حداکثر (mm)
-۰،۰۷	۵۳،۱۶	۳۰،۰۵	۰،۳۶	۰،۳۴	۰،۲۷	۰،۲۷	CC
۵۳،۱۶	۵۳،۱۶	۳۰،۰۵	۴۱،۵۶	۴۱،۵۶	۲۹،۱۱	۲۹،۱۱	RMSE



شکل ۵. پراکنش مقادیر مشاهداتی آب معادل برف ماهانه بالادست زاینده رود در برابر مقدار تخمینی توسط CMC



شکل ۶. توزیع احتمال میزان آب معادل برف ماهانه بالادست زاینده رود در برابر مقدار تخمینی توسط CMC

داده ماهواره محور PERSIANN-CDR با مقدار POD برابر ۱/۰۳ است که جزئیات آن در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده آن است که این داده در تشخیص وقوع رخداد برف (مستقل از مقدار تخمینی) توانایی کمتری در مقایسه با PERSIANN-CDR دارد. همچنین، مقادیر شاخص CSI نیز نشان دهنده آن است که به طور کلی، تشخیص رخداد وقوع برف در ۷۳ درصد مواقع به طور صحیح توسط داده CMC امکان پذیر است.

از سوی دیگر، از آماره‌های دسته بندی به منظور تعیین میزان توانایی داده های تخمین آب معادل برف CMC نیز استفاده شده است. بر این اساس، مقادیر سه آماره دسته بندی POD، FAR و CSI برای کل ناحیه بالادست سد زاینده رود در جدول ۸ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان دهنده آن است که قدرت تشخیص برف با استفاده از متوسط آب معادل برف بالادست با مقدار POD برابر با ۱/۱۱ بیشتر از همین مقدار در تخمین بارندگی توسط

جدول ۸. ارزیابی عملکرد داده‌های CMC در تخمین آب معادل برف با استفاده از آماره‌های دسته‌بندی

C	B	A	پارامتر
۵	۱۲	۴۶	میانگین بالادست
CSI	FAR	POD	شاخص
۰٫۷۳	۰٫۲۱	۱٫۱۱	میانگین بالادست

جمع‌بندی

در این تحقیق، عملکرد دو دسته داده ماهواره‌محور PERSIANN-CDR و CMC در تخمین دو نوع بارش متفاوت (بارندگی و آب معادل برف) در ناحیه بالادست سد زاینده‌رود ارزیابی شد. برای ارزیابی عملکرد داده‌ها دو رویکرد الف) میانگین کل ناحیه (میانگین بارندگی ۱۶ ایستگاه بالادست سد و میانگین بارندگی ۱۲ سلول منطبق بر ایستگاه‌ها، و ب) مقایسه بارندگی هر سلول با میانگین بارندگی ایستگاه‌های مستقر در آن، پیشنهاد شد. نتایج رویکردهای مختلف برای ناحیه بالادست سد زاینده‌رود ارائه و تجزیه و تحلیل شد. بررسی داده‌های تخمین بارندگی PERSIANN-CDR بیانگر تخمین رو به بالا این نوع داده با ضریب همبستگی ۰/۴۸ بود. شایان یادآوری است که تخمین رو به بالای این نوع داده در نواحی کوهستانی زاگرس به دلیل استفاده از تصاویر مایکروویو در تولید داده است. به بیان دیگر، به دلیل استفاده از تصاویر مایکروویو در تولید این نوع داده‌ها قدرت تمایز و تفکیک بین ابر و برف محدود بوده و به همین دلیل، مقدار بارندگی تخمینی در نواحی کوهستانی با تخمین رو به بالا همراه است. این موضوع با بررسی سلول به سلول بارندگی تخمینی نیز تأیید می‌شود. به بیان دیگر، در سلول‌های با مقدار برف کمتر (به دلیل قرارگیری در تراز ارتفاعی کمتر) مقدار خطای تخمین بارندگی کمتر بود. با این وجود، به کارگیری و استفاده از سلول‌های با استقرار حداقل ۳ ایستگاه (حتی در مناطق مرتفع با حجم برف بالا) در این پژوهش پیشنهاد شد. بررسی نتایج نشان‌دهنده آن بود که در سلولی که حداقل ۳ ایستگاه را شامل می‌شود، با وجود قرارگیری در منطقه مرتفع و پربرف چهارمحال و بختیاری کمترین مقدار خطا (حدود ۱۶ درصد) گزارش می‌شود. این موضوع در استفاده از معیاره‌های دسته‌بندی نیز مشاهده شد و سلول یادشده دارای بیشترین دقت در تخمین وقوع بارش از عدم وقوع بارش مربوط به این سلول بود. در دیدگاه کلی داده‌های PERSIANN-CDR توانایی قابل قبولی در

شناسایی رخداد بارش از خود نشان دادند. همچنین، ارزیابی عملکرد داده تخمین آب معادل برف CMC با تخمین رو به پایین بسیار زیادی همراه بود. به طوری که، در مهم‌ترین سلول برفگیر منطقه، با وجود استقرار ۵ ایستگاه در درون خود، خطای رو به پایین حدود ۴۲ درصد گزارش شده است. با این وجود در سلول‌های با مقدار برف کمتر، مقدار این خطا قابل قبول بوده و مقدار خطا برابر ۴/۲۲ درصد و بیشترین همبستگی (CC) برابر ۰/۳۴ بود. از سوی دیگر، بررسی معیاره‌های دسته‌بندی نشان داد این نوع داده مستقل از مقدار تخمین آب معادل برف، توانایی قابل قبولی در تشخیص وقوع و یا عدم وقوع برف را دارد. با این وجود، عدم توانایی مناسب داده CMC در برآورد میزان آب معادل برف در نواحی بالادست سد زاینده‌رود منجر به تشکیک استفاده از آن‌ها در مطالعات هیدرولوژیکی است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی عملکرد سایر داده‌ها از جمله AMSR-E برای ایران بررسی شود.

قدردانی

این مقاله خروجی طرح تحقیقاتی مصوب با شماره ۹۸۰۲۰۰۰۱ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور بوده و بنابراین، نویسندگان از حمایت مالی آن صندوق در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

- [1]. Dinku T, Ceccato P, Grover KE, Lemma M, Connor SJ, Ropelewski CF. *Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography*. International Journal of Remote Sensing. 2007; 28(7):1503-1526.
- [2]. Ashouri H, Hsu KL, Sorooshian S, Braithwaite DK, Knapp KR, Cecil LD, Nelson BR, Prat OP. *PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multi-satellite observations for hydrological and climate studies*. Bulletin of the American Meteorological Society. 2014; 96(1): 69-84.

- [3]. Beck HE, van Dijk HA, Levizzani V, Schellekens J, Miralles DG, Martens B, Roo A. *MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data*. Hydrology and Earth System Science. 2017; 21: 589-615.
- [4]. Alijanian M, Rakhshandehroo GR, Mishra AK, Dehghani M. *Evaluation of remotely sensed precipitation estimates using PERSIANN-CDR and MSWEP for spatio-temporal drought assessment over Iran*. Journal of Hydrology. 2019; 579: 124189.
- [5]. Smith T, Arkin P, Bates J, Huffman J. *Estimating Bias of Satellite-Based Precipitation Estimates*. Journal of Hydrometeorology. 2006; 7(5): 841-856.
- [6]. Tian Y., et al., *Component analysis of errors in satellite-based precipitation estimates*. Journal of Geophysical Research. 2009. 114: D24101.
- [7]. Lockhoff M, Zolina O, Simmer C, Schulz J. *Evaluation of Satellite-Retrieved Extreme Precipitation over Europe using Gauge Observations*. Journal of Climate. 2014; 27: 607-623.
- [8]. Musie M, Sen S, Srivasatva P. *Comparison and evaluation of gridded precipitation datasets for streamflow simulation in data scarce watersheds of Ethiopia*. Journal of Hydrology. 2019; 579:124168
- [9]. Xiang Y, Chen J, Li L, Peng T; Yin Z, *Evaluation of Eight Global Precipitation Datasets in Hydrological Modeling*. Remote Sensing. 2021; 13(14): 2831.
- [10]. Noor M, Ismail T, Shahid S, Asaduzzaman M, Dewan A. *Evaluating intensity-duration-frequency (IDF) curves of satellite-based precipitation datasets in Peninsular Malaysia*. Atmospheric Research. 2021; 248:105203
- [11]. Javanmard S, Yatagail A, Nodzu MI, BodaghJamali J, Kawamoto H. *Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM 3B42 over Iran*. Advances in Geosciences. 2010. 25: 119–12.
- [12]. Moazami S, Golian S, Kavianpour MR, Hong Y. *Comparison of PERSIANN and V7 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran*. International Journal of Remote Sensing. 2013. 34:8156-8171.
- [13]. Katiraie-Boroujerdy PS, Nasrollahi N, Hsu KL, Sorooshian S. *Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran*. Journal of Arid Environments. 2013; 97: 205-219.
- [14]. Alijanian M, Rakhshandehroo GR, Mishra AK, Dehghani M. *Evaluation of Satellite Rainfall Climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran*. International Journal of Climatology. 2017; 37: 4896-4914.
- [15]. Saeidizand R, Sabetghadam S, Tarnavsky E, Pierleoni A. *Evaluation of CHIRPS rainfall estimates over Iran*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2018; 144: 282-291
- [16]. Jafari SM, Nikoo MR, Dehghani M, Alijanian, M. *Evaluation of two satellite-based products against ground-based observation for drought analysis in the southern part of Iran*. Natural Hazards. 2020; 102: 1249-1267.
- [17]. Abbasi N, Opp C, Ribbe L, Baez-Villanueva OM, Besalatpour A. *Evaluation of Five Rainfall Estimate Products Over Different Climatic Zones in The Zayandehrud River Basin*. Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS), Tunis, Tunisia, 2020; 265-268.
- [18]. Hosseini-Moghari SM, Tang Q. *Validation of GPM IMERG V05 and V06 Precipitation Products over Iran*. Journal of Hydrometeorology. 2020; 21(5): 1011-1037.
- [19]. Keikhosravi Kiany MS, Massodian SA, Balling RC, Darand M. *Evaluation of TRMM 3B43, GPM IMERG, CHIRPS, and ERA5 Data in Estimating Precipitation and Capturing Meteorological Droughts over Iran*. International Journal of Climatology. 2021.[In press].
- [20]. Beaumont P. (1974). *Water resource development in Iran*. Geographical Journal. 1974; 140 (3): 418-431.
- [21]. Tabaei M, Ayoubi S, Aghaei A. *Early Holocene Paleoenvironmental changes in North of Gavkhouni Swamp- East of Isfahan-Iran: a review of evidence from palynology*. Geopersia. 2019; 9(1): 81-87
- [22]. <ftp://data.ncdc.noaa.gov/cdr/persiann/files/>
- [23]. Beck HE, et al., *Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling*, satellite precipitation measurement, 2020; 69: 625–653.
- [24]. Sturm M, Holmgren J, Liston G.E. *A Seasonal Snow Cover Classification System for Local to Global Applications*. Journal of Climate. 1995; 8: 1261–1283.
- [25]. https://daacdata.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/nsidc0447_CMC_snow_depth_v01/

- [26]. Tan ML, Ibrahim AL, Duan Z, Cracknell AP, Chaplot V. *Evaluation of Six High-Resolution Satellite and Ground-Based Precipitation Products over Malaysia*. Remote Sensing. 2015; 7: 1504-1528.
- [27]. Mashingia F, Mtalo F, Bruen M. *Validation of remotely sensed rainfall over major climatic regions in Northeast Tanzania*. Physics and Chemistry of the Earth. 2014; 67-69: 55-63.
- [28]. Levizzani V, Laviola S, Cattani E. Detection and measurement of snowfall from space. Remote Sensing. 2011; 3: 145-166.
- [29]. Yong B, et al., The first evaluation of the climatological calibration algorithm in the real-time TMPA precipitation estimates over two basins at high and low latitudes. Water Resources Research. 2013; 49: 2461-2472.
- [30]. Habib E, Henschke A, Adler R. *Evaluation of TMPA satellite-based research and real-time rainfall estimates during six tropical related heavy rainfall events over Louisiana, USA*. Atmospheric Research. 2009; 94 (3): 373-388.
- [31]. Sorooshian S, Hsu KL, Gao X, Gupta HV, Imam B, Braithwaite D. *Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall*. Bulletin of the American Meteorological Society. 2000; 81: 2035-2046.
- [32]. Katiraie-Boroujerdy PS, Nasrollahi N, Hsu KL, Sorooshian S. *Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran*. Journal of Arid Environments. 2013; 97: 205-219.