

ارزیابی مکانی - زمانی محصولات بارش ماهواره‌ای جهت برآورد رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران در دوره ۲۰ ساله

۱- علی شاهی، دانشجوی دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
eali.shahi@yahoo.com

*۲- برومند صلاحی، استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
salahi@uma.ac.ir (نویسنده رابط)

چکیده

با توجه به وضعیت جوی مناطق کوهستانی و ناهموار این مناطق، احداث ایستگاه‌های هواشناسی برای رصد متغیرهای جوی دشوار است و از لحاظ اقتصادی هم مقرون به صرفه نیست. با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های همدیدی که متغیرهای جوی محاسبه شده در آن‌ها به صورت نقطه‌ای قابل اعتماد است نیاز به ابزاری است تا مناطق مختلف را پوشش دهند. بارش سنگین یکی از مخاطرات شایع در منطقه شمال غرب ایران محسوب می‌شود و مسبب پدیده ویرانگر سیل نیز به شمار می‌رود. این مطالعه با هدف ارزیابی محصولات بارش ماهواره در زمینه شناسایی بارش سنگین در منطقه شمال غرب ایران در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ انجام شد. در پژوهش حاضر از ۲۳ ایستگاه همدیدی منتخب واقع در ۵ استان از شمال غرب ایران استفاده شده است. برای این منظور، دقت سه محصول ماهواره‌های GPM-IMERG، TRMM و AQUA-AIRS به صورت مقایسه بارش‌های برآورد شده ماهواره‌ای با ایستگاه‌های زمینی با استفاده از نمودار تیلور انجام گرفت. نتایج نشان داد که به طور کلی داده‌های بارش دو ماهواره GPM-IMERG و AQUA-AIRS در مقیاس زمانی روزانه تخمین مطلوبی از بارش سنگین در منطقه مطالعه را داشته‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده محصول GPM-IMERG نسبت به دو محصول دیگر عملکرد بهتری داشته است و محصول TRMM خطای بیشتری را نشان داد. در همه محصولات با حرکت به سمت شرق منطقه پژوهش، خطا افزایش یافته است و کمترین خطا مربوط به غرب منطقه مطالعه (استان آذربایجان غربی) بوده است.

واژگان ضروری: بارش سنگین، سنجش از دور، شمال غرب ایران، GPM-IMERG، TRMM و AQUA-AIRS.

۱. مقدمه

بارش به عنوان یک متغیر مهم در ورودی مدل‌های آب‌شناسی، جوی و اقلیمی است. از این رو، اندازه‌گیری داده‌های بارش با تفکیک مکانی و زمانی بالا می‌تواند در پیش‌بینی الگوهای جوی و آب‌شناسی اثرگذار باشد (رامادان و همکاران، ۲۰۲۲). بارش، مهم‌ترین و مؤثرترین منبع آب یک حوزه آبخیز است که از نظر زمانی و مکانی دارای تنوع قابل توجهی است و اغلب توزیع نامنظم و ناهمگن از خود نشان می‌دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). به طور کلی در تحلیل رویدادهای اقلیمی و آب‌شناسی، بارش به عنوان یک متغیر اصلی مطرح است. بارش به طور مستقیم یا غیرمستقیم در پدیده‌هایی مانند سیل و خشک‌سالی تأثیرگذار است (چن و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به اینکه ایستگاه‌های هواشناسی داده‌ها را به صورت نقطه‌ای در اختیار قرار می‌دهند و برای مکان‌هایی که ایستگاه وجود ندارد نمی‌توان برآوردی انجام داد؛ اما محصولات ماهواره‌ای برای تمام مناطق بر اساس متغیر جوی مورد پژوهش، داده دارند (پای فشرده و همکاران، ۱۳۹۹).

سامانه‌های تخمین بارش ماهواره‌ای، اغلب داده‌هایی با پوشش جهانی تولید می‌کنند. از مزایای اصلی محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره می‌توان به سهولت در دسترس بودن داده‌ها در زمان واقعی و قدرت تفکیک زمانی - مکانی بالا اشاره کرد (یدیتا و همکاران، ۲۰۲۰). ایستگاه‌های باران‌سنجی، از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری بارش در سطح زمین هستند؛ اما اندازه‌گیری توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی، فقط محدود به مکان‌های نصب شده است و در معرض خطاهایی نظیر کالیبره نبودن باران‌سنج و قرائت مقدار و ثبت داده قرار می‌گیرند (رامادان و همکاران، ۲۰۲۲؛ کید و همکاران، ۲۰۱۷). کمبود باران‌سنج‌ها در شبکه ایستگاهی می‌تواند باعث ایجاد خطاهای تصادفی یا سیستماتیک هنگام درون‌یابی در یک منطقه وسیع شود (رامادان و همکاران، ۲۰۲۲). به بیان ساده‌تر، اندازه‌گیری دقیق میزان بارش در سطح زمین به دلیل پراکندگی شبکه‌های باران‌سنجی، تنوع مکانی و زمانی زیاد، اثرات باد و ناهمواری بسیار چالش‌برانگیز است. به همین سبب، برآوردهای غیرمستقیم نظیر ایستگاه‌های راداری، مدل‌های عددی شبیه‌سازی جو و سامانه‌های سنجش‌ازدور، می‌تواند جایگزین مناسبی برای مواجهه با فقدان شبکه‌های باران‌سنجی باشد (رسول‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱).

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه بررسی و مقایسه داده‌های بارندگی ماهواره‌ای در ایران و سایر کشورهای جهان انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد. صفوی گردینی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی صحت داده‌های بارش ماهواره TRMM در ۴۰ ایستگاه باران‌سنجی و ۹ ایستگاه هم‌دیدی در استان هرمزگان، دوره آماری ۲۰۱۲ - ۱۹۹۸ در مقیاس ماهانه پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین دقت ماهواره TRMM در فصل‌های زمستان و بهار و کمترین آن، در تابستان اتفاق افتاده است. علی بخشی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی داده‌های بارش زمینی، ماهواره GPM و MERRA در حوضه آبریز کشف‌رود پرداختند، نتایج مطالعه نشان داد که به‌طور کلی داده بارش روزانه متعلق به ماهواره GPM دقت بالاتری از داده MERRA داشته است و مطابقت خوبی با داده‌های زمینی دارد. شیرمحمدی و همکاران (۱۳۹۸) داده‌های بارش ماهواره GPM با محصول IMERG و ماهواره TRMM با محصول 3B42- V7 را با داده‌های باران‌سنجی در استان خراسان رضوی از ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۶ را مقایسه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که در مقیاس سالانه داده‌های ماهواره TRMM به داده‌های ماهواره GPM نزدیک بودند. در پژوهشی که اکبری و کاظم‌زاده (۱۳۹۸) در زمینه ارزیابی دقت توزیع مکانی بارش ماهواره TRMM 3B43 در اقلیم مختلف کشور ایران انجام دادند، نتایج تحقیق نشان داد که داده‌های بارش ماهانه TRMM در اکثر نقاط کشور از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است.

تافته و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای از ابزار Google Earth Engine و محصولات بارش حاصل از تصاویر ماهواره‌های CHIRPS، TRMM و GPM به ترتیب در بازه‌های زمانی روزانه، ۱۰ روزه و ماهانه استفاده کردند و مقدار بارش در ایستگاه اهواز و ایذه را طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که از نظر آزمون F-Test تفاوت معنی‌داری بین داده‌های برآورد شده (ماهواره) و اندازه‌گیری شده (ایستگاه) مشاهده نشده است. اردونی و همکاران (۱۴۰۰) با هدف ارزیابی داده‌های بارش ماهواره، مقدار بارش IMERG - GPM و مقایسه آن با داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنج زمینی در استان گلستان - حوضه گرگان رود را صحت سنجی کردند. اعتبارسنجی با استفاده از معیارهای آماری RMSE، MBE و MAE نشان داد که مطابقت نسبی و خوبی بین داده‌های ایستگاه‌های زمینی و داده‌های ماهواره GPM وجود داشته است.

نجفی و اکبری مقدم ثانی (۱۴۰۱) به ارزیابی کارایی سه پایگاه داده در برآورد سری زمانی بارش‌های حدی در ایران پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که محصولات بارشی دو ماهواره GPM و TRMM تخمین مناسبی در برآورد بارش‌های روزانه دارند و می‌توان از برونداد آن‌ها برای برآورد بارش‌های حدی استفاده کرد. همچنین به‌طور کلی داده‌های GPM دارای بیشترین و TRMM کمترین کارایی در برآورد نمایه‌های حدی بارش در ایران را دارند. درخشنده و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه روند یابی بارش در ایران بر اساس داده‌های MERRA2 به این نتیجه رسیدند که سه شاخص بارشی شامل میزان بارش کل سالانه، تعداد روزهای بارانی، تعداد روزهای بارش با بارش ۱۰

میلی‌متر و بالاتر در مناطق غرب و شمال‌غرب روند کاهشی دارد. در مجموع داده‌های MERRA2 کم‌برآوردی را برای مناطق بیشینه بارش مانند شمال کشور و بیش‌برآوردی را برای مناطق کم‌بارش تر و خشک نشان داده است. مجیدی کره‌رودی و همکاران (۱۴۰۳) به ارزیابی عملکرد بانک داده‌های باز تحلیل ERA5 و MERRA2 در تخمین میزان عمق برف در شمال‌غرب ایران در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج نشان داد که داده‌های ERA5 در تخمین میزان عمق برف نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای فرو تخمین هستند؛ در حال که داده‌های MERRA2 در بیشتر ایستگاه‌ها در تخمین میزان عمق برف میانگین با فرا تخمین همراه هستند.

شریفی و همکاران (۲۰۱۸) به مقایسه ساعتی محصولات بارش ماهواره‌های GPM-IMERG-Final Run و IMERG-Real-Time از طریق یک شبکه مترکم در شمال شرقی اتریش پرداختند. بی‌همتا و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی محصولات بارش ماهواره‌ای GPM و TRMM-3B42 V7 در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ در شهر تهران پرداختند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی IMERG دقت بالاتری دارد. وو و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی محصولات بارش چندین ماهواره برای شبیه‌سازی جریان در حوضه رودخانه هان در شبه‌جزیره کره، آسیای شرقی پرداختند. آن‌ها صحت محصولات مختلف بارندگی ماهواره‌ای از قبیل TRMM، PERSIANN، PERSIANN-CDR و CMADS را با مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده بارش بررسی کرده و نشان دادند که بارش برآورد شده توسط TRMM و CMADS نسبت به PERSIANN و PERSIANN-CDR در مقایسه با داده‌های باران‌سنج، دقت بهتری دارند. میری و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی دقت برآورد بارش روزانه محصولات TRMM و GPM در مقابل داده‌های مشاهده‌ای در ایران طی دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که دقت محصول روزانه سنجنده GPM در سطح ایران نسبت به TRMM بیشتر است. مسعود و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی محصولات بارش چند ماهواره برای کشور پاکستان در دوره آماری ۲۰۱۷ الی ۲۰۱۹ برای مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد تصاویر ماهواره‌ای IMERG نسبت به سایر محصولات از دقت بالاتری برخوردار است.

السوماتی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به ارزیابی عملکرد دو مجموعه CMORPH و GPM IMERG V06 در امارات متحده عربی برای دوره آماری ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۸ و مقیاس‌های زمانی روزانه و سالانه پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که هر دو محصول عملکرد بسیار خوبی را در شناسایی بارش داشته‌اند. رجمی و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی بارش سنگین در نپال با محصولات بارشی ماهواره GPM در دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۷ پرداختند. آدانه و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای TRMM3B43v7 و PERSIANN-CDR پرداختند. نتایج بیانگر عملکرد مطلوب هر دو محصول در نواحی ارتفاعات غربی حوضه و عملکرد ضعیف‌تر در نواحی شرقی است. کورشی و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای را در سه منطقه مرطوب، نیمه‌خشک و خشک ایران با استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای GPM و TRMM در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۷ انجام دادند. نتایج نشان داد که هر دو محصول میزان بارندگی را بیش برآورد می‌کنند. تالچابادل و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد سه محصول مختلف بارش ماهواره‌ای CHIRPS، PERSIANN-CCS و IMERG را در حوزه آبخیزی در غرب نپال ارزیابی کردند. طبق یافته‌های آن‌ها، بهترین عملکرد مربوط به محصول IMERG است.

داسیلوا و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی بارش در کشور شیلی با محصولات بارشی ماهواره GPM در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۰ پرداختند، نتایج نشان داد که محصول IMERG Early بهترین عملکرد را داشته است. رودریگز و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای را در زمینه ارزیابی محصولات بارشی ماهواره IMERG در کشور کلمبیا در دوره ۲۰۰۱-۲۰۱۹ بر روی ۶۰ ایستگاه در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه انجام دادند، نتایج نشان داد که دقت مقیاس زمانی ماهانه بیشتر بوده است.

مناطق کوهستانی به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات آب و هوایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند (پانتی و همکاران، ۲۰۱۵). به‌واسطه شرایط خاص مناطق کوهستانی، از جمله شیب‌های تند، تغییرات سریع ارتفاعی در فواصل کوتاه و عدم امکان دسترسی مطلوب

و همچنین، محدودیت‌های فنی و اقتصادی، شرایط استقرار شبکه پایش مناسب بارش در این مناطق فراهم نیست (ران و همکاران، ۲۰۱۷). محدودیت دیگر، دقت برداشت داده‌ها در این مناطق است که به دلایل ذکر شده منجر به ایجاد خطاهای سیستماتیک در اندازه‌گیری بارش می‌شود (هان و همکاران، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر، روش‌های برآورد بارش با استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس جهانی و با وضوح زمانی و مکانی بالا به‌عنوان جایگزینی برای داده‌های زمینی توسعه‌یافته است (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۶). محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره که از تنوع بالایی نیز برخوردارند، قادرند به‌طور مؤثر برآورد بارش را به مناطقی که با کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری متداول یا توزیع ناهمگون و نامنظم آن‌ها مواجه هستند، گسترش دهند (کاتیرای - بروجردی و همکاران، ۲۰۱۷).

شمال‌غرب کشور ایران به دلیل قرارگیری در منطقه کوهستانی امکان احداث ایستگاه‌های هواشناسی متعدد در آن کم است، از طرفی تأسیس ایستگاه‌های هواشناسی محدودیت‌های اقتصادی را نیز دارد و با توجه به اینکه ایستگاه‌های هواشناسی به‌صورت نقطه‌ای عمل سنجش متغیرها را انجام می‌دهند استفاده از علم سنجش‌ازدور بسیار می‌تواند کمک‌کننده باشد. نکته مهم در استفاده از محصولات ماهواره‌ای، ارزیابی آن‌ها و شناسایی دقت مناسب قبل از استفاده است. مطالعه حاضر به دلیل صحت سنجی با نمودار ریاضی تیلور و همچنین استفاده از سنجنده AIRS در زمینه کارهای انجام‌گرفته باهدف ارزیابی محصولات ماهواره با داده‌های ایستگاه‌های زمینی دارای نوآوری است. تاکنون در هیچ مطالعه‌ای به بارش‌های حدی منطقه شمال‌غرب ایران بر اساس ۲۶ رخداد بارش سنگین و در دوره زمانی طولانی ۲۰ ساله از لحاظ مقایسه برونداد محصولات بارش ماهواره‌ای با ایستگاه‌های همدیدی پرداخته نشده است که نشان‌دهنده متمایز بودن این تحقیق با کارهای مشابه است. در مطالعه انجام‌گرفته منطقه شمال‌غرب ایران به‌صورت دقیق بر اساس ۲۳ ایستگاه همدیدی مورد ارزیابی قرار گرفته و مناطق دیگر که دارای ناهمواری متفاوت و همچنین اقلیم متمایز با شمال‌غرب ایران هستند بررسی نشده است. با توجه به ماهیت نوسانی و پیچیده متغیر بارش و منطقه مستعد بارش سنگین شمال‌غرب ایران که شرایط مکانیکی صعود را داراست و مکان فراوان‌ترین سیکلون در کشور ایران است، از طرفی سامانه‌های رطوبتی تأمین‌کننده بارش کشور در غرب و جنوب‌غرب ایران نظیر دریای مدیترانه، دریای سرخ و دریای سیاه به شمال‌غرب ایران نزدیک است؛ لازم است ارزیابی دقیق مکانی و زمانی انجام گیرد که در این مطالعه به‌صورت مجزا هر کدام از ۲۶ رخداد برای هر یک از ۲۳ ایستگاه همدیدی منطقه مورد مطالعه در مورد دقت ۳ محصول بارش ماهواره‌ای تجزیه و تحلیل شده‌اند. تحقیق حاضر نشان داد که در منطقه شمال‌غرب، برونداد ۲ محصول بارش ماهواره‌ای AIRS و GPM توان تخمین بارش سنگین را دارند ولی محصول بارش ماهواره TRMM در این منطقه نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های ایستگاه زمینی باشد.

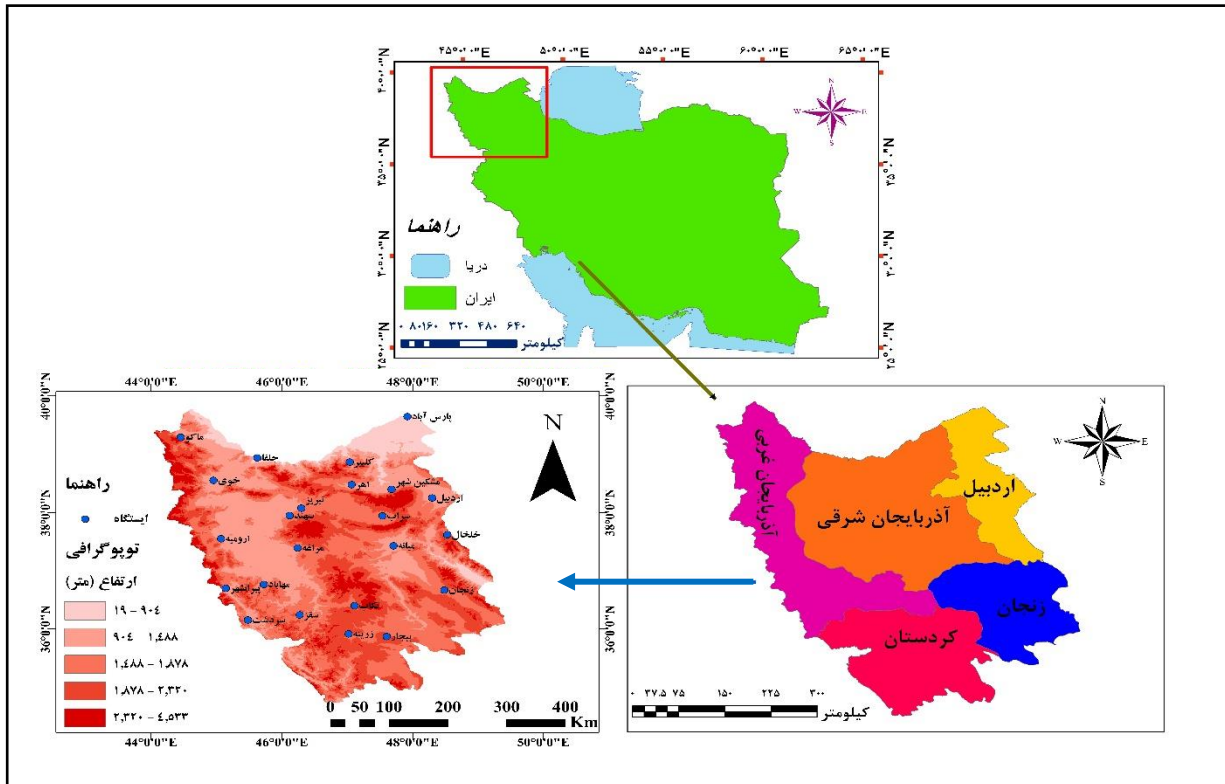
۲. روش پژوهش

۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شمال‌غرب ایران شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، شمال کردستان و غرب زنجان است؛ که در محدوده عرض جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۴۹ درجه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). به‌طور کلی، آب و هوای منطقه شمال‌غرب متأثر از دو فاکتور اصلی نظیر شرایط سینوپتیک و عوارض ناهمواری محلی است. اولین مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر شرایط آب و هوایی منطقه فرارسیدن سامانه‌های جوی است که در مقیاس سینوپتیک حاکمیت دارد و نقش اصلی را در تبیین آب و هوای منطقه در درازمدت به عهده دارد (مسعودیان، ۱۳۸۲ به نقل از رسولی و همکاران، ۱۳۹۳).

وقوع بارش‌های سنگین در شمال‌غرب ایران در دوره زمانی مورد مطالعه به ترتیب در فصل‌های بهار، پاییز، زمستان رخ داده است و تابستان فاقد بارش سنگین بوده است. بیشترین رخداد بارش سنگین در ماه فروردین رخ داده است. حداکثر بارش سنگین در قسمت‌های غربی و

جنوب غربی، شمال غرب اتفاق افتاده است و اوج بارش سنگین در ایستگاه سردشت با مقدار ۱۸۵ میلی‌متر ثبت شده است (شاهی و صلاحی، ۲۰۲۴).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲-۲. داده‌های پژوهش

در این پژوهش داده‌های بارش روزانه ۲۳ ایستگاه سینوپتیک منتخب واقع در شمال غرب ایران در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ از سازمان هواشناسی ایران www.irimo.ir اخذ گردید و داده‌های روزانه مربوط به ۳ محصول ماهواره‌های TRMM، IMERG و AIRS استفاده شده در این تحقیق از پایگاه اینترنتی <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> دریافت شد که به مشخصات آن‌ها در جدول (۱) اشاره شده است.

جدول ۱- اطلاعات کلی ماهواره‌های منتخب

ردیف	نام ماهواره	واحد	وضوح زمانی	وضوح مکانی (درجه)	دوره زمانی
------	-------------	------	------------	-------------------	------------

۲۰۱۹-۱۹۹۸	۰/۲۵	روزانه	میلی متر در روز	TRMM (3B42 V7)	۱
۲۰۲۱-۲۰۰۰	۰/۱	روزانه	میلی متر در روز	GPM-IMERG (F V6)	۲
۲۰۱۹-۲۰۰۰	۰/۵	روزانه	میلی متر در روز	AQUA-AIRS (V3.1)	۳

داده‌های بارش AIRS

سنجنده AIRS، با هدف کمک به تحقیقات در زمینه تغییر اقلیم و ارتقا پیش‌بینی هوا ساخته شده است. AIRS از سنجنده‌های ماهواره Aqua است که در سال ۲۰۰۲ به مدار زمین پرتاب شد. ماهواره آکوا (Aqua) یکی از ماهواره‌های علمی - تحقیقاتی چندملیتی ناسا است و دارای ۶ سنجنده که درباره چرخه‌های آب زمین، از جمله تبخیر از سطح اقیانوس‌ها، بخار آب در جو، ابرها، بارش، رطوبت خاک، یخ و برف و دیگر متغیرهای محیطی به تولید داده می‌پردازد. نام ماهواره از واژه لاتین آکوا به معنای آب گرفته شده است. AIRS دارای ۲۳۷۸ بازه طیفی است. قدرت تفکیک آن ۱۰۰ برابر بیشتر نسبت به ابزارهای مشابه قدیمی است که می‌تواند با دقت زیادی نمایه‌های قائم دما و رطوبت جوی را اندازه‌گیری کند. AIRS گازهای گلخانه‌ای همانند ازن، منواکسید کربن، دی‌اکسید کربن و متان را نیز اندازه‌گیری می‌کند (هاگان و همکاران، ۲۰۰۴).

داده‌های بارش TRMM

TRMM در سال ۱۹۹۷ از طریق یک مأموریت فضایی مشترک بین سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA) و آژانس کاوش‌های هوافضای ژاپن (JAXA) به فضا پرتاب شد و در مدار ۳۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار گرفت (هافمن و همکاران، ۲۰۱۰). پرونداد ماهواره TRMM، از عرض جغرافیایی ۵۰ درجه جنوبی تا ۵۰ درجه شمالی ارائه می‌گردد که قدرت تفکیک مکانی محصولات فوق در ثبت بارش حداقل 0.25×0.25 و حداکثر 5×5 درجه است (اکبری یانگاله و همکاران، ۲۰۱۷). ماهواره TRMM، دارای پنج ابزار است که شامل مجموع‌های از سه حسگر بارش رادار بارش (PR)، تصویرگر ماکروویو (TMI)، حسگر مرئی و مادون‌قرمز (VIRS) و دو ابزار مرتبط حسگر تصویربرداری رعدوبرق (LIS) و ابرها و سیستم انرژی تابشی زمین (CERES) هست (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). سطوح تولیدی ماهواره شامل؛ سطح یک: داده‌های پردازش نشده، سطح دو: زمین مرجع نمودن اطلاعات داده‌ها و متصل به سطح اجرایی صفر و پردازش وابسته به حسگر واحدهای فیزیکی و سطح سه: متغیرهای هواشناسی است (اکبری یانگاله و همکاران، ۲۰۱۷).

داده‌های بارش IMERG

در سال ۲۰۱۴، مجموعه ماهواره GPM از طریق یک مأموریت فضایی مشترک بین سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA) و آژانس کاوش‌های هوافضای ژاپن (JAXA) به فضا پرتاب شد. این ماهواره، دارای دو حسگر اصلی است: (۱) ابزار تصویربرداری ماکروویو (GMI) که شدت، نوع و اندازه بارش را اندازه‌گیری می‌کند؛ (۲) رادار بارش دو فرکانس (DPR) که ساختار داخلی طوفان‌ها را در درون و زیر ابرها مشاهده می‌کند. به‌طور کلی، GPM سه سطح مختلف پردازش داده را ارائه می‌کند: سطح (۱) محصول مدار است که به‌عنوان دمای درخشندگی کالیبره شده GMI (1C-GMI) شناخته می‌شود؛ سطح (۲) محصولات مداری است که به‌عنوان تخمین‌های بارندگی یا برآوردهای ترکیبی در نظر گرفته می‌شوند و سطح (۳) محصولات شبکه‌بندی شده است که میانگین بارش GMI و DPR (3-CMB) یا تخمین‌های بارشی از داده‌های ابزارهای ماکروویو فعال و غیرفعال در مدار GPM یعنی محصولات

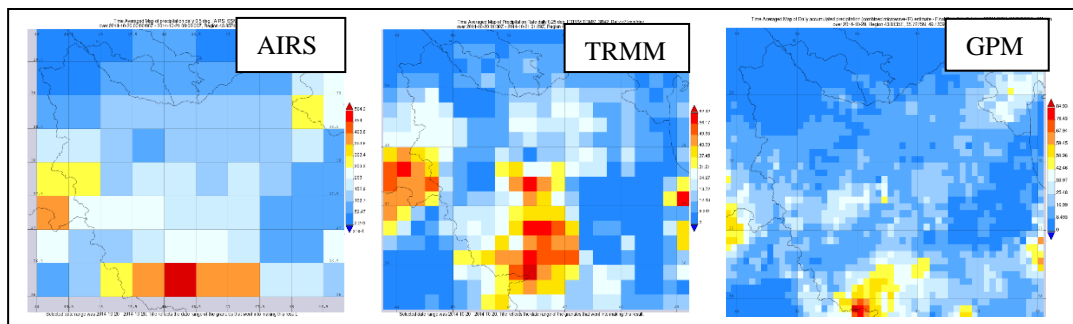
(IMERG) را ترکیب می‌کنند (هافمن و همکاران، ۲۰۱۰). محصولات سطح ۳ (IMERG)، شامل داده‌های باران و برف با تفکیک مکانی ۰/۱×۰/۱ درجه و تفکیک زمانی ۳۰ دقیقه در دسترس است. محصولات IMERG، با تأخیرهای ۵ ساعته قابل دریافت هست و بر اساس نیاز کاربر و متناسب با مدت تأخیر و دقت داده‌ها، پردازش‌های مختلفی روی داده‌ها انجام می‌شود. از این رو، اجرای IMERG اجزایی دارد که عبارت‌اند از: اجرای آنی (تقریباً شش ساعت پس از زمان مشاهده)، اجرای دیر (تقریباً ۱۸ ساعت پس از زمان مشاهده) و اجرای نهایی (تقریباً چهار ماه پس از زمان مشاهده). این اجراها به ترتیب با نمادهای IMERG-E، IMERG-L و IMERG-F نشان داده می‌شوند (تقی زاده و احمدی گیوی، ۲۰۱۸). در این پژوهش، از محصول GPM-IMERG-F استفاده گردیده است.

۲-۳. روش کار

وبسایت جیئو وانی ناسا دارای دو بخش: ۱- فیلتر متغیرها و سنجنده‌ها و ۲- بخش انتخاب تاریخ و تعیین چهارچوب محدوده مطالعاتی است. بعد از تعیین گزینه‌های مورد نظر با توجه به نوع سنجنده و در نهایت انتخاب پولی گون منطقه مورد مطالعه، محصول بارش ماهواره به شکل شطرنجی دریافت شد. برون داد هر ماهواره برای روزهای رخداد و ایستگاه‌های منتخب در محیط نرم افزار GIS با استفاده از روش فاصله معکوس درون یابی شد. نمونه‌ای از توزیع فضایی بارش روزانه مستخرج از هر ۳ ماهواره (بارش برحسب میلی‌متر) در شکل (۲) نشان داده شده است. برآوردهای حاصل از آزمون و خطا نشان داد که اگر صدک بالاتر از ۹۹ و مساحت تحت پوشش بارش سنگین بیش از ۳۰ درصد انتخاب شود، شرایط همدیدی توجه مناسبی برای بارش‌های سنگین ارائه خواهند داد (مفیدی و همکاران، ۱۳۸۶؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ستوده و علیجانی، ۱۳۹۴). در این مطالعه، بر اساس ۲ شرط ذکر شده در بالا (صدک ۹۹ و پوشش ایستگاهی بیش از ۳۰ درصد) روزهای دارای بارش سنگین شمال غرب ایران شناسایی شدند. با محاسبه صدک ۹۹ (رابطه ۱) برای بارش‌های دوره مطالعه در شمال غرب ایران، آستانه ۲۰ میلی‌متر به دست آمد. در نهایت با توجه به لحاظ کردن هم‌زمان ۲ شرط صدک و مساحت پوشش بارش، روزهایی که حداقل ۷ ایستگاه به‌طور هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه دارای بارش حداقل ۲۰ میلی‌متر بودند؛ به‌عنوان بارش سنگین انتخاب شدند.

$$P = \frac{aN}{100} + \frac{1}{2} \quad \text{رابطه (۱)} \quad N: \text{تعداد داده‌ها} \quad a = 99$$

بعد از تعیین رخدادهای حدی در منطقه مطالعاتی با استفاده از نمودار تیلور، برون داد ماهواره‌ها برای رخدادهای بارش سنگین مورد ارزیابی قرار گرفت تا میزان دقت ماهواره‌ها تعیین گردد. ارزیابی ۳ ماهواره از دو طریق انجام شد. در مرحله اول محصولات بارشی ماهواره‌ها در هر رخداد حدی برای ۲۳ ایستگاه بررسی شد. در مرحله دوم محصولات بارشی ماهواره‌ها بر اساس هر ایستگاه جداگانه در روزهای بارش سنگین صحت سنجی شد.



شکل ۲- نمونه‌ای از شبکه‌بندی هر محصول در منطقه مورد مطالعه برای یک رخداد

نمودار تیلور

نمودار تیلور به‌طور هم‌زمان نمایه‌های اریبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات را در نظر می‌گیرد (تیلور، ۲۰۰۱). در این نمودار داده مشاهده‌شده به‌عنوان یک نقطه مرجع روی محور افقی مشخص می‌شود و بعد زاویه‌ای نشان‌دهنده همبستگی مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی است، مقادیر انحراف استاندارد به شکل دوائر متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقادیر ریشه دوم میانگین مربعات خطا به شکل دوائر متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع رسم می‌شود. سه مشخصه آماری یادشده می‌توانند توسط رابطه (۱) به هم مرتبط باشند؛ که در آن R ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی، E' جذر خطای مربعات و $\sigma^2 f$ و $\sigma^2 r$ به ترتیب واریانس داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی را نشان می‌دهند. ساخت دیاگرام تیلور از طریق تشابه بین رابطه (۱) و رابطه مثلثاتی مربوط به کسینوس (۲)، حاصل شده است (بابایان و همکاران، ۱۴۰۰).

$$E'^2 = \sigma^2 f + \sigma^2 r - 2\sigma_f \sigma_r R \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \omega \quad \text{رابطه (۳)}$$

۳. نتایج و بحث

با توجه به معیارهای بارش سنگین در این مطالعه، ۲۷ رخداد حدی بارش در دوره مشاهداتی (۲۰۰۰-۲۰۱۹) در شمال غرب ایران شناسایی شدند. جدول (۲) روزهای دارای بارش سنگین در دوره ۲۰ ساله را بر اساس تعداد ایستگاه‌های همدیدی دارای بارش حدی در منطقه مطالعه نشان می‌دهد، در جدول فوق ایستگاه‌های که حداقل بارش سنگین و حداکثر بارش سنگین در هر رخداد را داشته‌اند نیز قابل مشاهده است. با توجه به جدول فوق، حداقل بارش سنگین در هر ایستگاه همدیدی ۲۰ میلی‌متر و حداقل تعداد ایستگاه‌های درگیر بارش حدی در روز رخداد بارش سنگین ۷ ایستگاه، قابل مشاهده است (به دلیل نداشتن داده ۳ ماهواره مذکور در یکی از تاریخ‌های رخداد حدی بارش منطقه مورد مطالعه آن روز در تحقیق کنار گذاشته شد و بجای ۲۷ رخداد از ۲۶ رخداد استفاده گردید).

جدول ۲- رخدادهای بارش سنگین در منطقه مطالعه

روز رخداد	تعداد ایستگاه‌های دارای بارش سنگین در روز رخداد	ایستگاه همدیدی دارای بارش سنگین کمینه در روز رخداد	مقدار بارش در ایستگاه دارای بارش سنگین کمینه بر حسب میلی‌متر	ایستگاه همدیدی دارای بارش سنگین بیشینه در روز رخداد	مقدار بارش در ایستگاه دارای بارش سنگین بیشینه بر حسب میلی‌متر
۲۰۰۱/۱۱/۱۸	۸	پارس آباد	۲۰	سردشت	۵۷
۲۰۰۲/۰۴/۰۲	۸	سهند	۲۰/۰۱	سقز	۳۴
۲۰۰۳/۰۳/۲۶	۸	مهاباد	۲۰/۱	سردشت	۵۰
۲۰۰۳/۰۴/۱۶	۱۵	سراب	۲۰	ارومیه	۴۴
۲۰۰۳/۰۴/۲۷	۷	بیجار	۲۰	سقز	۳۰/۶

۷۶	پیرانشهر	۲۱	مشکین شهر	۱۲	۲۰۰۴/۰۴/۲۳
۵۰	پیرانشهر	۲۰/۶	میانه	۹	۲۰۰۴/۰۵/۰۱
۴۶	سردشت	۲۰	مهاباد	۷	۲۰۰۴/۱۱/۲۳
۴۲	تکاب	۲۰	میانه	۷	۲۰۰۴/۱۱/۱۸
۱۸۵	سردشت	۲۰	سراب	۱۴	۲۰۰۶/۰۲/۰۳
۶۰/۲	سردشت	۲۰/۰۱	ارومیه	۷	۲۰۰۶/۰۲/۰۴
۴۰/۷	سردشت	۲۰	خلخال	۱۰	۲۰۰۷/۰۴/۱۱
۳۳	سردشت	۲۰	اردبیل	۷	۲۰۰۹/۱۱/۱۷
۳۰	ارومیه	۲۰/۸	پیرانشهر	۷	۲۰۰۹/۱۱/۱۸
۷۳	سردشت	۲۰	مراغه	۹	۲۰۱۰/۰۵/۰۲
۴۲	ارومیه	۲۲	مراغه	۷	۲۰۱۱/۰۴/۲۲
۴۹	خوی	۲۶	ماکو	۷	۲۰۱۲/۱۱/۱۲
۵۸	سردشت	۲۲	زنجان	۸	۲۰۱۳/۱۱/۰۹
۵۴	ارومیه	۲۰/۶	مهاباد	۹	۲۰۱۴/۱۰/۰۳
۵۲	سردشت	۲۵/۲	ارومیه	۷	۲۰۱۴/۰۳/۳۰
۸۰	پیرانشهر	۲۰	سقز	۱۱	۲۰۱۴/۱۰/۲۰
۴۶	سقز	۲۰/۰	سراب	۸	۲۰۱۶/۱۲/۰۲

طبق جدول (۳)، بر اساس نمودار تیلور، برآیند ۳ شاخص انحراف معیار، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی با توجه به مقادیر میانگین به دست آمده از ۳ متغیر مذکور در ۲۶ رخداد نشان داد که ماهواره GPM نسبت به دو ماهواره دیگر عملکرد بهتری داشته است و ماهواره TRMM نسبت به دو ماهواره دیگر برآورد ضعیف تری داشته است. مطابق جدول فوق، بیشترین ضریب همبستگی در بین ۳ محصول بارشی با مقدار ۰/۶۵ مربوط به ماهواره GPM است و کمترین همبستگی با مقدار ۰/۳۵ به ماهواره TRMM اختصاص دارد. همچنین انحراف معیار بیشینه (۰/۷) مربوط به ماهواره GPM است و کمینه این شاخص (۰/۶۵) به ماهواره AQUA-AIRS اختصاص دارد و ماکزیمم جذر میانگین مربعات خطا با مقدار ۱ مختص ماهواره TRMM هست و مینیموم آن با مقدار ۰/۷۸ مربوط به ماهواره GPM است.

جدول ۳- نتایج نمودار تیلور از عملکرد ۳ ماهواره در منطقه مطالعه در دوره ۲۰ ساله (میانگین ۲۶ رخداد)

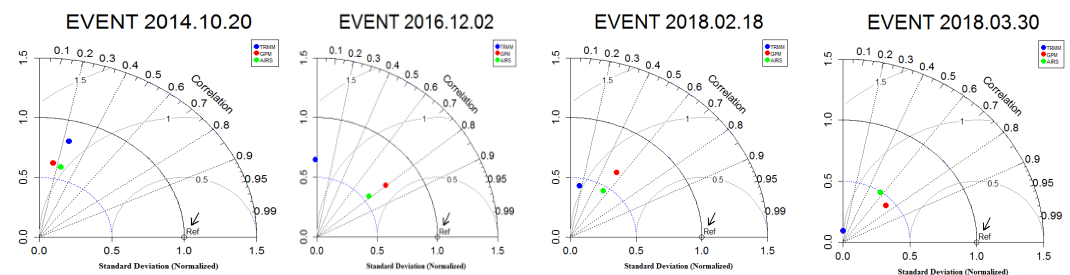
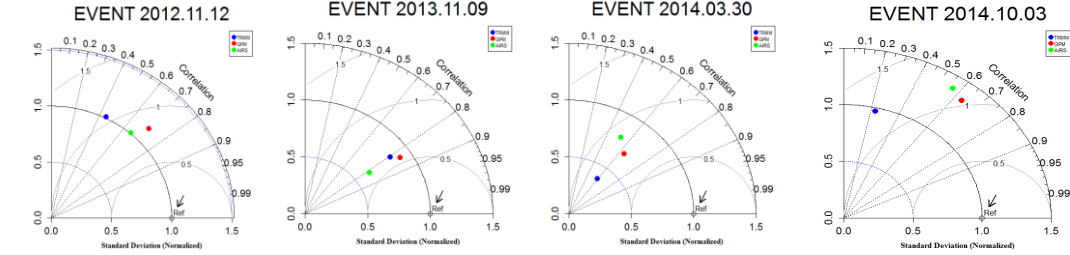
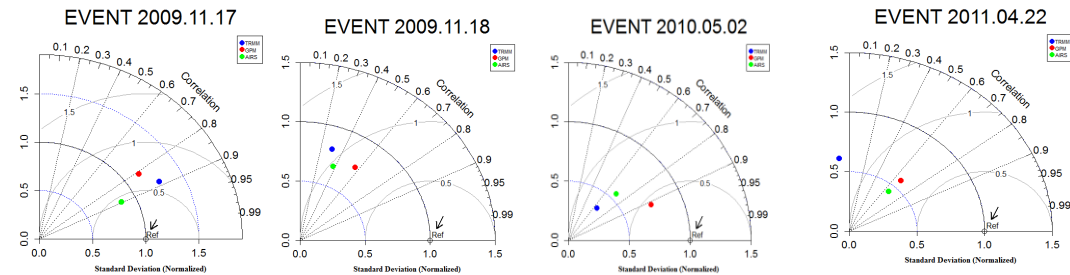
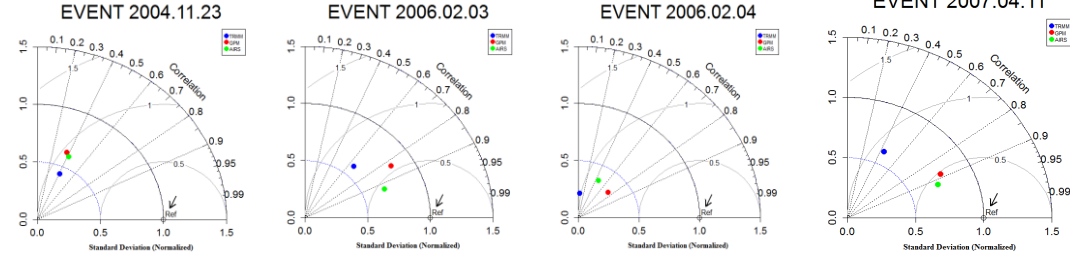
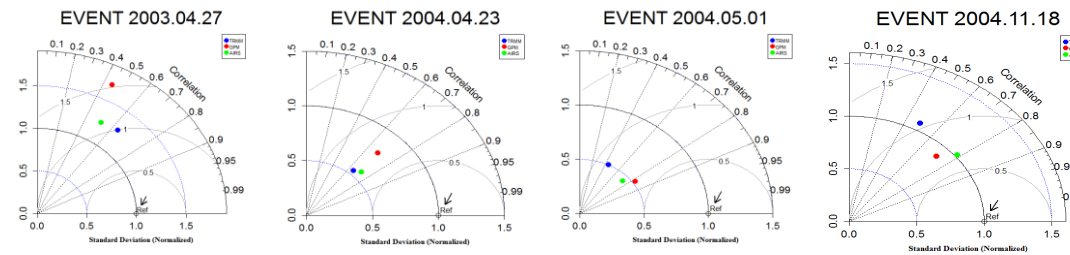
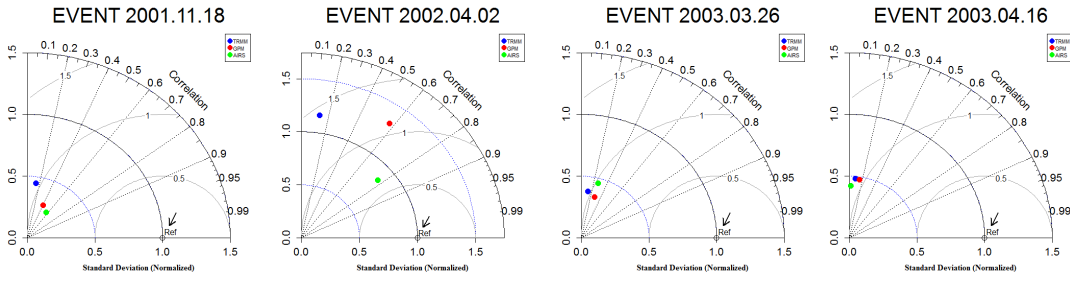
رتبه بندی بر اساس دقت	ریشه دوم میانگین مربعات خطا			انحراف معیار			ضریب همبستگی			متغیر ماهواره	ردیف
	بیشینه	میانگین	کمینه	بیشینه	میانگین	کمینه	بیشینه	میانگین	کمینه		
سوم	۱/۴	۱	۰/۶	۱/۲۵	۰/۶۶	۰/۲۵	۰/۸۹	۰/۳۵	۰	TRMM (3B42 V7)	۱
اول	۱/۵۱	۰/۷۸	۰/۴	۱/۷۵	۰/۷	۰/۲۵	۰/۹۱	۰/۶۵	۱/۹	GPM-IMERG (F V6)	۲

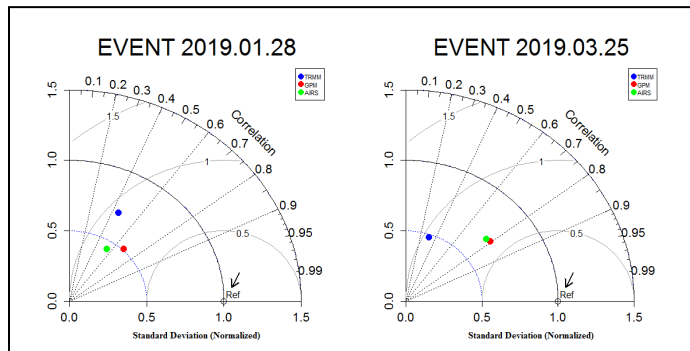
دوم	۱/۲۵	۰/۸	۰/۴	۱/۲۵	۰/۶۵	۰/۲	۰/۹۲	۰/۶	۰	AQUA-AIRS (V3.1)	۳
-----	------	-----	-----	------	------	-----	------	-----	---	------------------	---

نتایج راستی آزمایی با استفاده از نمودار تیلور برای مقایسه داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مطالعه با محصولات ماهواره‌ای برای شمال غرب ایران در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شدند. شکل (۳) نشان‌دهنده اعتبارسنجی بر اساس هر رخداد به‌طور جداگانه در منطقه مطالعه است (ارزیابی زمانی). شکل (۴) نشان‌دهنده اعتبارسنجی بر اساس هر ایستگاه از ۲۳ ایستگاه همدیدی منتخب منطقه تحقیق به‌طور جداگانه در ۲۶ رخداد بارشی هست (ارزیابی مکانی). بررسی‌ها نشان داد که ۲ ماهواره GPM و AQUA (با سنجنده AIRS) توانسته‌اند بارش سنگین منطقه مطالعه را شناسایی کنند به عبارتی محصولات بارشی آن‌ها مطابقت خوبی با داده‌های زمینی دارد و ماهواره TRMM عملکرد مطلوبی نداشته است. با توجه به شکل (۳) بهترین عملکرد هر ۳ محصول ماهواره‌ای (به‌طور مشترک) در رخداد‌های ۲۰۰۹/۱۱/۱۷ و ۲۰۱۳/۱۱/۰۹ بوده است، در این رخدادها ضریب همبستگی ۳ محصول ماهواره‌ای در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ قرار داشته و متغیرهای انحراف استاندارد و جذر خطای مربعات ۳ ماهواره مذکور در محدوده ۰/۵ بوده‌اند. همچنین بهترین عملکرد ۲ محصول GPM و AIRS در رخداد‌های ۲۰۰۷/۰۴/۱۱ و ۲۰۰۶/۰۲/۰۳ بوده است، در این رخدادها ضریب همبستگی ۲ محصول ماهواره‌ای مذکور در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ قرار داشته و انحراف استاندارد آن‌ها در محدوده ۰/۵ تا ۱ قرار داشته و جذر خطای مربعات ۲ ماهواره مذکور در محدوده ۰/۵ بوده است که نشان از دقت بالا و خطای کم توسط محصولات بارشی ماهواره‌های مورد استفاده در تخمین بارش سنگین هست.

با توجه به ارزیابی انجام‌شده، در ۷۷ درصد از رخداد‌های بارش سنگین (۲۶ رخداد) در منطقه مورد مطالعه، ضریب همبستگی محصولات دو ماهواره GPM و AIRS با داده‌های ایستگاهی بالاتر از ۰/۵ بوده است و در ۳۰ درصد از رخداد‌های منطقه مطالعه، ضریب همبستگی محصول ماهواره TRMM با داده‌های زمینی بالاتر از ۰/۵ به دست آمد. در ۸۰ درصد از رخداد‌های حدی بارش منطقه تحقیق، انحراف استاندارد محصولات دو ماهواره GPM و TRMM با داده‌های زمینی کمتر از ۱ بوده است و در ۸۴ درصد از رخداد‌های بارش سنگین منطقه پژوهش، انحراف استاندارد محصول ماهواره AIRS با داده‌های زمینی کمتر از ۱ به دست آمد. همچنین ریشه دوم میانگین مربعات خطای داده‌های ایستگاهی با محصولات GPM، AIRS و TRMM به ترتیب ۸۰ درصد، ۸۴ درصد و ۴۲ درصد از رخداد‌های بارش سنگین منطقه، مقادیر کمتر از ۱ به دست آمد (شکل ۳). محاسبات انجام‌شده نشان از برتری دو محصول GPM و AIRS نسبت به محصول TRMM در برآورد بارش سنگین منطقه شمال غرب ایران را دارد و نیز نشان داد که دو محصول فوق می‌توانند جایگزین مناسبی برای داده‌های بارش سنگین ایستگاه‌های زمینی در منطقه پژوهش باشند.

مقاله قبل از انتشار (ویر استاری نشده)

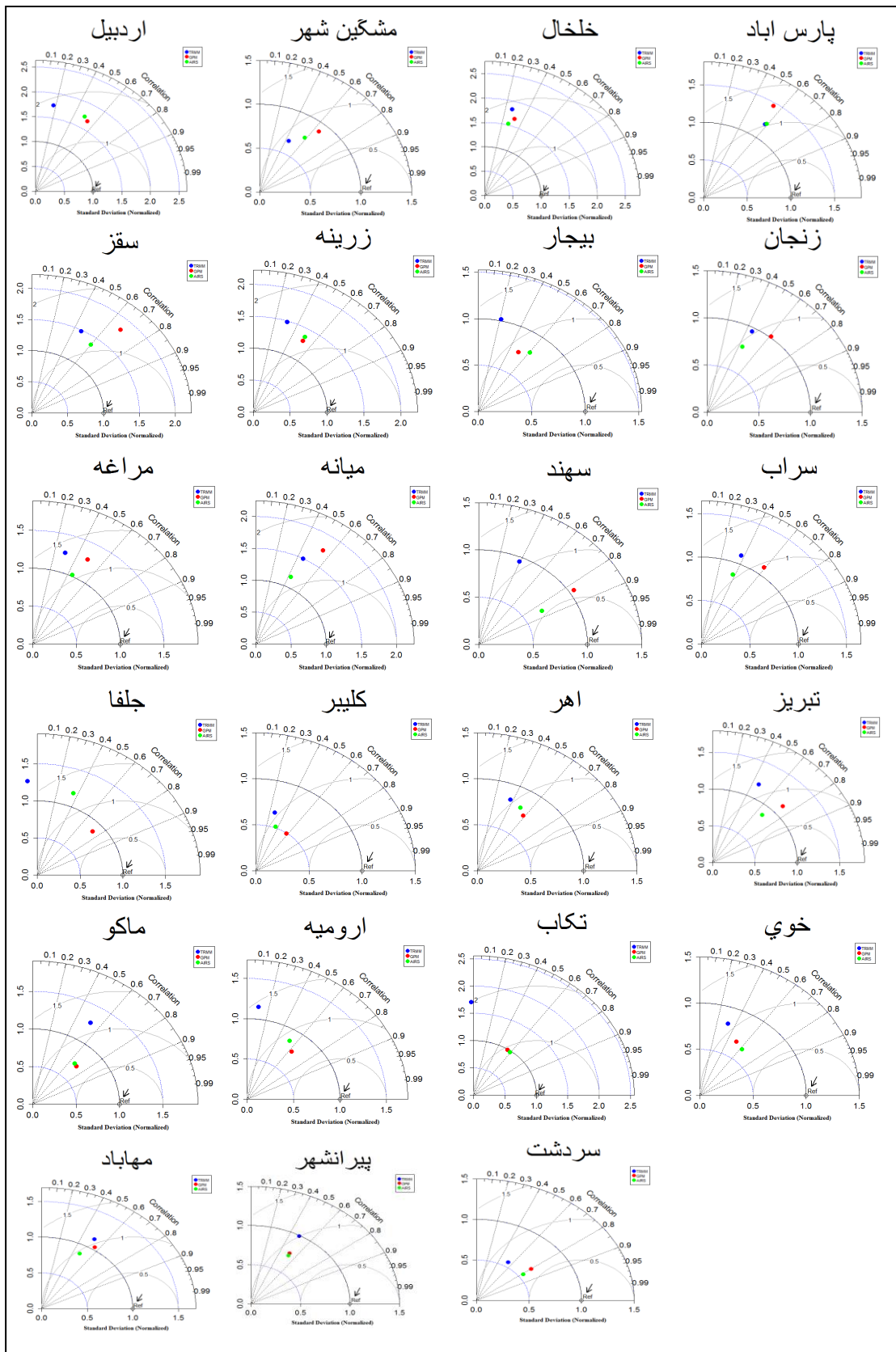




شکل ۳- نمودار تیلور در ۲۶ رخداد بارش سنگین منطقه شمال غرب ایران

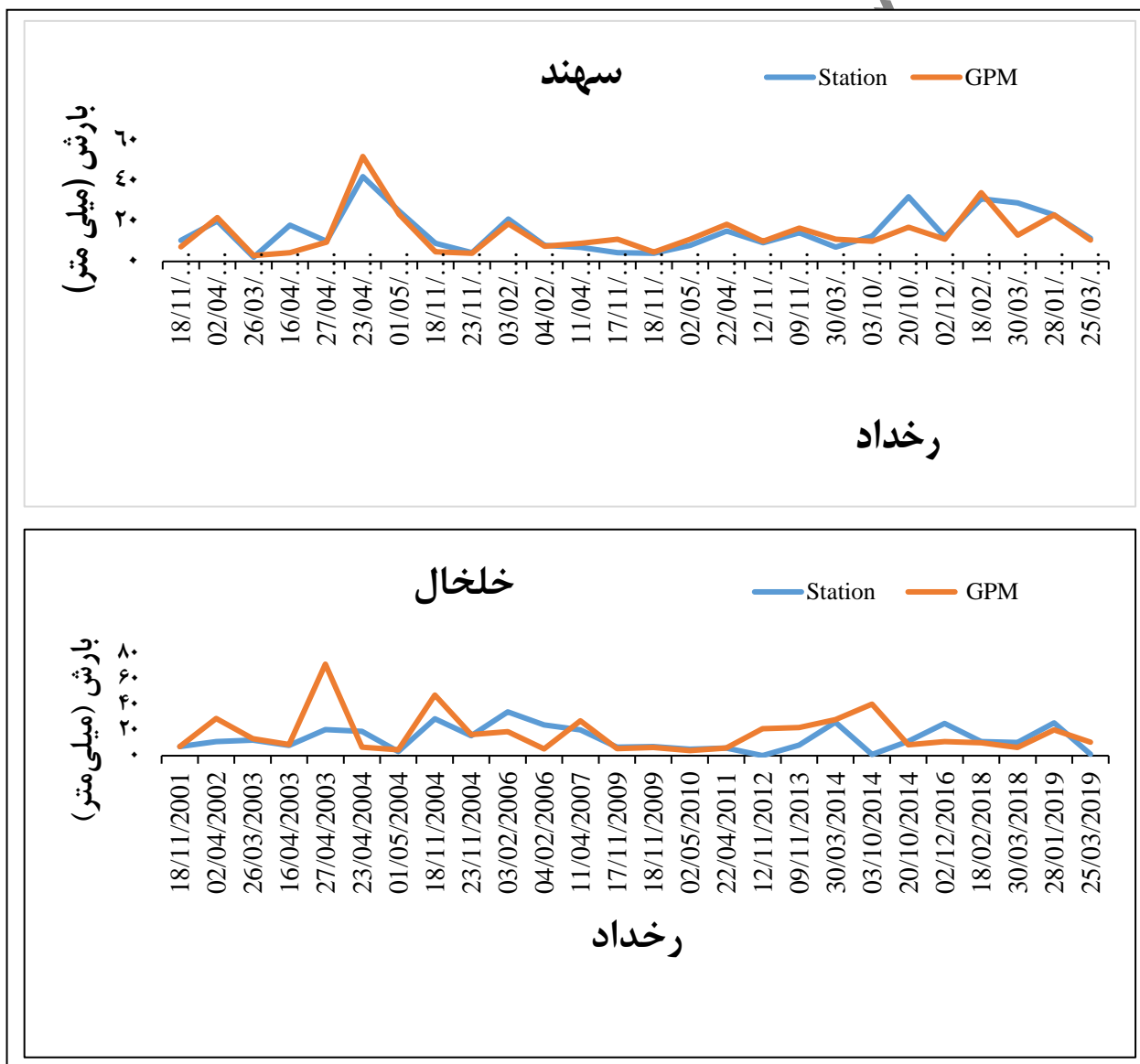
با توجه به شکل (۴) بهترین عملکرد هر ۳ محصول ماهواره‌ای (به طور مشترک) در برآورد بارش سنگین ایستگاه همدیدی سردشت واقع در استان آذربایجان غربی (غرب منطقه تحقیق) بوده است، به طوری که ضریب همبستگی در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ قرار داشته و مقادیر انحراف استاندارد و جذر میانگین مربع خطا در محدوده ۰/۵ تا ۱ بوده است. با توجه به شکل (۴) ضعیف‌ترین عملکرد هر ۳ محصول ماهواره‌ای (به طور مشترک) در برآورد بارش سنگین ایستگاه همدیدی خلخال واقع در استان اردبیل (شرق منطقه تحقیق) بوده است، به طوری که ضریب همبستگی در محدوده ۰/۳ قرار داشته، مقدار انحراف استاندارد در محدوده ۱/۵ تا ۲ و جذر میانگین مربع خطا در محدوده ۱ تا ۲ بوده است. ارزیابی‌ها نشان داد که ضریب همبستگی محصولات بارشی ماهواره‌ها با داده‌های ایستگاه‌های زمینی در ۲۳ ایستگاه همدیدی منتخب از منطقه مطالعه در ۲۶ رخداد در دوره بیست‌ساله، برای محصولات TRMM، GPM، و AIRS به ترتیب ۶۵ درصد، ۹۵ درصد و ۳۹ درصد از ایستگاه‌ها (۲۳ ایستگاه همدیدی) بالاتر از ۰/۵ بوده است. انحراف استاندارد محصولات بارشی ماهواره‌ها با داده‌های ایستگاه‌های زمینی، برای محصولات TRMM، GPM، و AIRS به ترتیب ۶۵ درصد، ۵۲ درصد و ۳۵ درصد از ایستگاه‌ها (۲۳ ایستگاه همدیدی) کمتر از ۱ بوده است. همچنین جذر میانگین مربعات خطای محصولات بارشی ماهواره‌ها با داده‌های ایستگاه‌های زمینی، برای محصولات TRMM، GPM، و AIRS به ترتیب ۶۰ درصد، ۶۹ درصد و ۱۳ درصد از ایستگاه‌ها (۲۳ ایستگاه همدیدی) کمتر از ۱ بوده است (شکل ۴). با توجه به محاسبات فوق می‌توان نتیجه گرفت که ۲ ماهواره GPM و AIRS بارش سنگین رخ داده در ایستگاه‌های منطقه شمال غرب ایران را به طور مناسب تخمین زده‌اند و برونداد آن‌ها مطابقت مطلوبی با داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک دارند و نیز عملکرد محصول TRMM در برآورد بارش سنگین منطقه پژوهش ضعیف بوده است.

به عبارتی محصولات بارشی ماهواره TRMM نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های بارش سنگین در منطقه شمال غرب ایران در دوره زمانی تحقیق باشد.



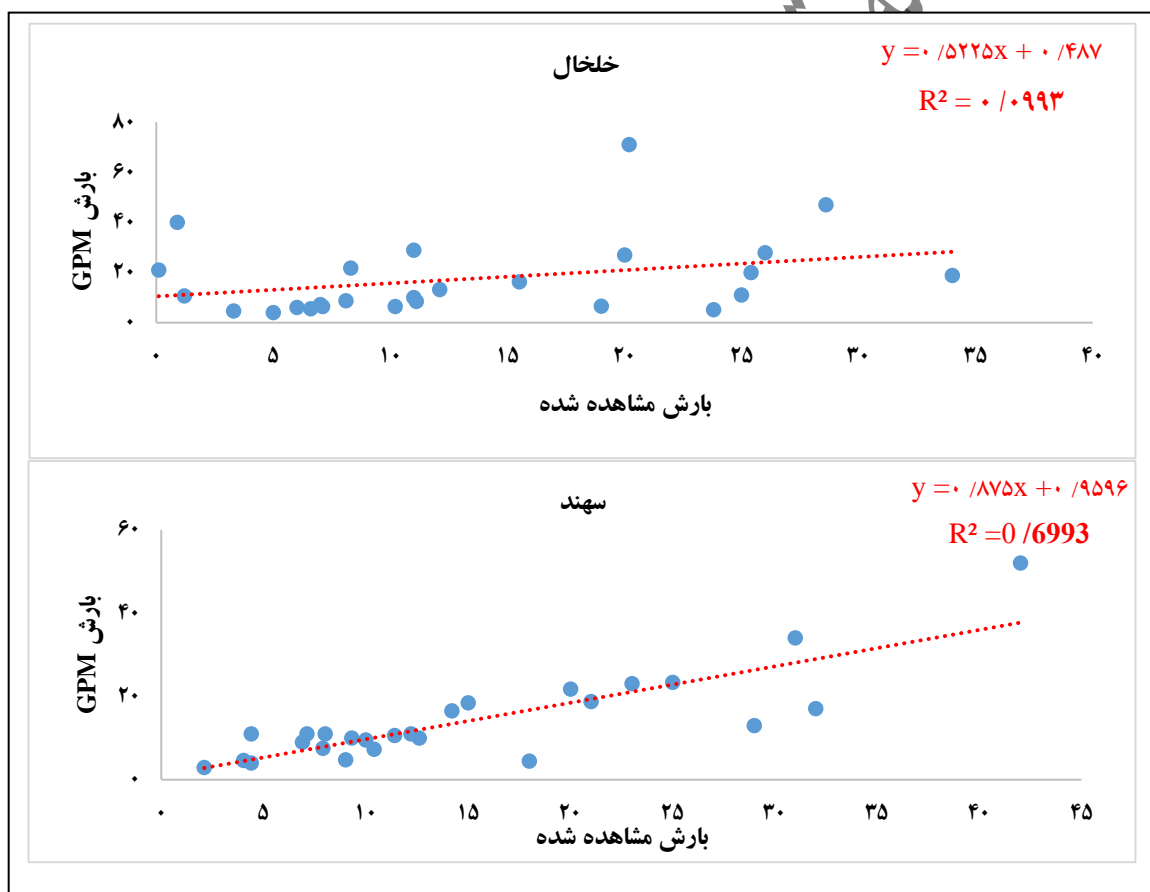
شکل ۴- نمودار تیلور برای ۲۳ ایستگاه همدیدی منطقه شمال غرب ایران در ۲۶ رخداد حدی بارش

بررسی‌ها نشان داد که برون‌داد ماهواره‌ها با حرکت به سمت شرق منطقه مطالعه با افزایش خطا همراه است، به عبارتی در همه محصولات کمترین خطا مربوط به غرب منطقه مورد مطالعه (استان آذربایجان غربی) است. برای نمونه در دو ایستگاه همدیدی از منطقه مطالعه، نمودار تغییرات زمانی بارش سنگین حاصل از داده‌های ایستگاه همدیدی و محصولات ماهواره GPM در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۹) ترسیم شد، به طوری که یکی از ایستگاه‌ها از شرق منطقه تحقیق و دیگری از غرب منطقه شمال غرب ایران انتخاب شدند. با توجه به نمودار تغییرات زمانی بارش سنگین مربوط به ایستگاه همدیدی خلخال (شرق منطقه مطالعه) تفاوت دو منحنی و عدم انطباق خطوط به طور واضح مشهود است. در نمودار تغییرات زمانی بارش سنگین ایستگاه همدیدی سهند (غرب منطقه مطالعه) انطباق دو منحنی مشهود و از طرفی اختلاف خطوط بسیار کم شده است (شکل ۵).



شکل ۵- نمودار تغییرات زمانی بارش سنگین، مقایسه بارندگی ایستگاه همدیدی نماینده شرق و غرب منطقه مورد مطالعه با محصول بارشی ماهواره GPM در دوره ۲۰ ساله

با توجه به شکل (۶) در نمودار پراکنش با پیشروی به سمت شرق منطقه مطالعه پراکندگی نقاط افزایش می‌یابد و فاصله نقاط از خط رگرسیون زیاد می‌گردد در نتیجه از دقت محاسبه بارش سنگین توسط ماهواره‌های مورد استفاده در تحقیق فوق کاسته می‌شود (نمودارهای تیلور در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه گواهی به این ادعاست). به طوری که در نمودار مربوط به ایستگاه همدیدی خلخال، پراکندگی نقاط زیاد و ضریب تعیین R^2 عدد کوچک‌تری را نشان می‌دهد (۰/۰۹). در صورتی که در نمودار مربوط به ایستگاه همدیدی سهند پراکندگی نقاط کم و ضریب تعیین R^2 عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد (۰/۶۹۹).



شکل ۶- نمودار پراکنش مقادیر بارش مشاهده شده زمینی و برآورد شده توسط ماهواره GPM در دوره ۲۰ ساله

با توجه به وضعیت جوی مناطق کوهستانی و ناهمواری این مناطق، احداث ایستگاه‌های هواشناسی برای رصد متغیرهای جوی دشوار است و از لحاظ اقتصادی هم مقرون به صرفه نیست. به نظر می‌رسد استفاده از محصولات ماهواره‌ای برای سنجش عناصر اقلیمی راه‌حل مناسبی در چنین شرایطی باشد البته به شرط اینکه قبل استفاده از محصولات ماهواره‌ها ارزیابی مناسبی در زمینه دقت انواع مختلف ماهواره‌ها صورت گیرد و بعد از راستی آزمایی بر اساس عنصر جوی و همچنین مکان مورد مطالعه بهترین گزینه انتخاب گردد.

۴. نتیجه گیری

بر اساس پژوهش انجام شده در منطقه شمال غرب ایران، در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ درزمینه ارزیابی توانایی محصولات ماهواره‌ای برای شناسایی بارش سنگین، با استفاده از ۳ محصول GPM-IMERG، TRMM و AQUA-AIRS در مقیاس زمانی روزانه، نتایج نشان دادند که ۲ ماهواره GPM و AQUA (با سنجنده AIRS) توانسته‌اند بارش سنگین منطقه مطالعه را بر اساس ۲۶ رخداد شناسایی شده در ۲۳ ایستگاه همدیدی منتخب، برآورد کنند. ماهواره GPM-IMERG نسبت به دو ماهواره دیگر بهتر عمل کرده و عملکرد ماهواره TRMM از دو ماهواره دیگر ضعیف‌تر بوده است. همچنین نتایج نشان داد که با حرکت به سمت شرق منطقه مطالعه خطای برآورد بارش سنگین در هر ۳ محصول افزایش یافته است و تخمین‌های بارش سنگین در غرب شمال غرب ایران در استان آذربایجان غربی با دقت بالایی صورت گرفته است. پژوهش حاضر از لحاظ تأیید عملکرد بهتر ماهواره GPM-IMERG نسبت به محصولات بارشی دیگر با مطالعات انجام شده توسط علی بخشی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبریز کشف رود، اردونی و همکاران (۱۴۰۰) در حوضه گرگان رود، نجفی و اکبری مقدم ثانی (۱۴۰۱) در ایران، بی‌هتا و همکاران (۲۰۱۸) در شهر تهران، تالچابادل و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه آبریزی در غرب نپال و داسیلوا و همکاران (۲۰۲۳) در کشور شیلی مطابقت دارد. از لحاظ تأیید دقت بیشتر محصول بارشی ماهواره GPM نسبت به محصول ماهواره TRMM با مطالعه انجام شده توسط میری و همکاران (۲۰۱۹) در ایران و نجفی و اکبری مقدم ثانی (۱۴۰۱) در ایران، همسو هست. همچنین به دلیل تأیید افزایش خطای تخمین بارش توسط محصولات ماهواره در حرکت به سمت شرق شمال غرب ایران و دقت بالای محاسبات محصولات بارش ماهواره در غرب شمال غرب ایران با پژوهش رسول‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) در شمال ایران همخوانی مطلوبی دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مساعدت‌های جناب آقای مهندس پیمان محمدی احمد محمودی کمال قدردانی را دارند.

منابع

- اردونی، معصومه، معاریان، هادی، اکبری، مرتضی، و پوررضایی‌لندی، محسن. (۱۴۰۰). ارزیابی و مقایسه داده‌های بارش ماهواره GPM با مقادیر بارندگی ایستگاه‌های زمینی با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف. سامانه‌های سطوح آبریز باران، ۲۹ (پیاپی ۲۹)، ۱۱-۲۴. [SID. https://sid.ir/paper/957522/fa](https://sid.ir/paper/957522/fa)
- اکبری، جواد، و کاظم‌زاده، مجید. (۱۳۹۸). ارزیابی دقت توزیع مکانی بارش ماهواره TRMM 3B43 در اقالیم مختلف کشور ایران. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳(۴۴)، ۷۳-۸۲.
- <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.44.9.1>
- بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، خزانه داری، لیلی، کوهی، منصوره، کوزه گران، سعیده، فلامرزی، یاشار، کریمیان، مریم، و ملبوسی، شراره. (۱۴۰۰). پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از مقیاس کاهی آماری برون‌داد مدل‌های CMIP6، پروژه داخلی پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد.
- پای فشرده، فروزان، حافظ پرست، مریم، و فاطمی، سید احسان. (۱۴۰۱). ارزیابی داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه گاماسیاب در مقایسه با داده‌های ماهواره. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۲(۳)، ۹۲-۱۱۳.

doi: 10.22126/atwe.2022.7915.1021

پای فشرده، فروزان، و حافظ پرست، مریم. (۱۳۹۹). ارزیابی داده‌های بارش منطقه‌ای و داده‌های ماهواره‌های TRMM و PERSIAN و CHIRPS در حوضه آبریز جامیشان. پنجمین کنفرانس ملی کاربرد فناوریهای نوین در علوم مهندسی، تربت حیدریه <https://civilica.com/doc/1202746>.

تافته، آرش، ملاح، سینا، و ابراهیمی پاک، نیازعلی. (۱۳۹۹). بررسی نتایج داده‌های روزانه ده روزه و ماهانه تصاویر ماهواره در تخمین مقدار بارش با استفاده از سامانه Google Earth Engine در استان خوزستان. حفاظت منابع آب و خاک، ۹(۳)، ۹۳-۱۰۴. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1399.9.3.6.8>

ثناپی نژاد، سید حسین، و سالاری، خسرو. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد محصولات PDIR-Now و PERSIANN CCS برای بارش‌های منجر به خسارت‌بارترین سیلاب‌های کشور ایران در سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۲(۱)، ۲۴۹-۲۲۹. doi: 10.22067/geoh.2022.74364.1147

درخشنده، علی، خورانی، اسداله، و رضازاده، مریم. (۱۴۰۲). روندیابی بارش در ایران بر اساس داده‌های MERRA2. فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۳)، ۶۶۹-۶۸۳. doi: 10.22059/jesphys.2023.350125.1007465

رسولی، علی اکبر، نصیری قلعه بین، سحر، و ولیزاده کامران، خلیل. (۱۳۹۳). مدل‌سازی توزیع مکانی بارش‌های رعد و برقی مناطق کوهستانی شمال غرب ایران، سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۴)، ۴۰۷-۴۱۷. doi: 10.22059/jphgr.2014.52993

رسول زاده، علی، محمودی بابلان، سجاد، و نسترنی عموقین، سعید. (۱۴۰۱). ارزیابی مکانی-زمانی محصولات بارش ماهواره‌ای در مناطق شمال غرب ایران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹)، ۲۱۴۱-۲۱۶۰. doi: 10.22059/ijswr.2022.345392.669311

سبحانی، بهروز، عالی جهان، مهدی، و زینالی، بتول. (۱۳۹۵). واکاوی همبند - ماهواره‌ای موج بارشی سنگین استان چهارمحال و بختیاری. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۵(۴)، ۱۰۹-۱۳۴. doi: 10.22067/geo.v5i4.56072

ستوده، فاطمه، و علیجانی، بهلول. (۱۳۹۴). رابطه پراکنندگی فضایی بارش‌های سنگین و الگوهای فشار در گیلان. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۱)، ۶۳-۷۳. SID. <https://sid.ir/paper/264773/fa>. doi: 10.22034/gahr.2024.449624.2077

شیرمحمدی علی اکبرخانی، زهرا، صابر علی، سید فرهاد، و نستری نصرآبادی، حسین. (۱۳۹۸). ارزیابی و پهنابندی داده‌های بارش ماهواره‌ای GPM و TRMM 3B42 V7 در شمال شرق ایران. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۲(۲)، ۱۷۹-۱۹۱. https://www.ims-jmas.net/article_126709.html

صفوی گردینی، مریم، دلبری، معصومه، امیری، میثم، و پیری، جمشید. (۱۳۹۸). واسنجی داده‌های باران سری B433 ماهواره TRMM در استان هرمزگان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۹(۳)، ۹۹-۱۱۲.

doi: 10.22125/iwe.2019.88673

علیجانی، بهلول، خسروی، محمود، و اسماعیل نژاد، مرتضی. (۱۳۸۹). تحلیل همبندی بارش سنگین ششم ژانویه ۲۰۰۸ در جنوب شرق ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱(۳-۴)، ۳-۱۴. SID. <https://sid.ir/paper/213093/fa>

مجیدی کرهرودی، فاتزه 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. فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۱)، ۲۵۱-۲۶۳.

doi: 10.22059/jesphys.2023.358474.1007521

محمودی بابلان، سجاده، نسترنی عموقین، سعید، و رسول زاده، علی. (۱۴۰۱). ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای جهت برآورد رخدادهای بارشی سنگین در نوار ساحلی دریای خزر. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۴)، ۱۰۷-۱۲۲.

doi: 10.22098/mmws.2022.11147.1102

مفیدی، عباس، زرین، آذر، و قبادی، غلامرضا جانباذ. (۱۳۸۶). تعیین الگوی هم‌دیدگی بارش‌های شدید و حدی پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر. فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۱-۱.

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.2538371.1386.33.3.10.7>

نجفی، محمدسعید، و اکبری مقدم ثانی، سجاده. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی سه پایگاه داده در برآورد سری زمانی بارش‌های حدی در ایران. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱)، ۷۹-۹۸.

doi: 10.30488/ccr.2022.363075.1096

- Akbari Yangehghaleh, M., sanaeinejad, S. H., Faridhosseini, A., & Akbari, M. (2017). The Study of Spatial - Temporal Distribution of Rainfall, using TRMM data (Case study: Khorasan Razavi province). *Journal of Climate Research*, 1396(29), 1-18. https://clima.irimo.ir/article_61317.html?lang=en
- Adane, G. B., Hirpa, B. A., Gebru, B. M., Song, C., & Lee, W. K. (2021). Integrating satellite rainfall estimates with hydrological water balance model: rainfall-runoff modeling in awash river basin, Ethiopia. *Water*, 13(6), 800. <https://doi.org/10.3390/w13060800>
- Alsumaiti, T. S., Hussein, K., Ghebreyesus, D. T., & Sharif, H. O. (2020). Performance of the CMORPH and GPM IMERG Products over the United Arab Emirates. *Remote Sensing*, 12(9), 1426. <https://doi.org/10.3390/rs12091426>
- bihanta, A., Goharnejad, H., & moazami, S. (2018). Study of Precipitation Data of GPM and TRMM Satellites in Daily, Monthly and Seasonal Scales at Tehran. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(2), 45-60. https://gisj.sbu.ac.ir/article_96520.html
- Chen, C., Chen, Q., Duan, Z., Zhang, J., Mo, K., Li, Z., & Tang, G. (2018). Multiscale comparative evaluation of the GPM IMERG v5 and TRMM 3B42 v7 precipitation products from 2015 to 2017 over a climate transition area of China. *Remote Sensing*, 10(6), 944. <https://doi.org/10.3390/rs10060944>
- da Silva, L. D. D. D. J., Mahmoud, M., González-Rodríguez, L., Mohammed, S., Rodríguez-López, L., & Arias, M. I. A. (2023). Assessment of the IMERG early-run precipitation estimates over South American country of Chile. *Remote Sensing*, 15(3), 573. <https://doi.org/10.3390/rs15030573>
- Hagan, D. E., Webster, C. R., Farmer, C. B., May, R. D., Herman, R. L., Weinstock, E. M., ... & Newman, P. A. (2004). Validating AIRS upper atmosphere water vapor retrievals using aircraft and balloon in situ measurements. *Geophysical research letters*, 31(21). <https://doi.org/10.1029/2004GL020302>
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2010). The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). *Satellite rainfall applications for surface hydrology*, 3-22. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., & Yoo, S. H. (2015). NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). Algorithm theoretical basis document (ATBD) version, 4(26), 30. https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG_ATBD_V06.3.pdf
- Han, P., Long, D., Han, Z., Du, M., Dai, L., & Hao, X. (2019). Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling. *Remote Sensing of Environment*, 224, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.041>
- Jiang, S., Ren, L., Yong, B., Hong, Y., Yang, X., & Yuan, F. (2016). Evaluation of latest TMPA and CMORPH precipitation products with independent rain gauge observation networks over high-latitude and low-latitude basins in China. *Chinese Geographical Science*, 26, 439-455. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11769-016-0818-x>

- Katiraie-Boroujerdy, P. S., Asanjan, A. A., Hsu, K. L., & Sorooshian, S. (2017). Intercomparison of PERSIANN-CDR and TRMM-3B42V7 precipitation estimates at monthly and daily time scales. *Atmospheric Research*, 193, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.005>
- 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. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>
- Miri, M., Rahimi, M., & Noroozi, A. (2019). Evaluation and comparison of GPM and TRMM daily precipitation with observed precipitation across Iran. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 972-983. doi: 10.22092/ijwmse.2018.121397.1469
- Panthi, J., Dahal, P., Shrestha, M. L., Aryal, S., Krakauer, N. Y., Pradhanang, S. M., ... & Karki, R. (2015). Spatial and temporal variability of rainfall in the Gandaki River Basin of Nepal Himalaya. *Climate*, 3(1), 210-226. <https://doi.org/10.3390/cli3010210>
- Qureshi, S., Koohpayma, J., Firozjaei, M. K., & Kakroodi, A. A. (2021). Evaluation of seasonal, drought, and wet condition effects on performance of satellite-based precipitation data over different climatic conditions in Iran. *Remote Sensing*, 14(1), 76. <https://doi.org/10.3390/rs14010076>
- Ramadhan, R., Yusnaini, H., Marzuki, M., Muharsyah, R., Suryanto, W., Sholihun, S., ... & Tokay, A. (2022). Evaluation of GPM IMERG performance using gauge data over Indonesian maritime continent at different time scales. *Remote Sensing*, 14(5), 1172. <https://doi.org/10.3390/rs14051172>
- Rodríguez-Sandoval, E. A., García-Echeverri, C., González-Ramírez, A. M., Sandoval-Barrera, J. A., Patarroyo-González, M. E., Agudelo, D. E., & Roldán, M. A. (2024). Evaluating the IMERG precipitation satellite product to derive intensity-duration-frequency curves in Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (110), 31-47. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20230212>
- Ruan, H., Zou, S., Yang, D., Wang, Y., Yin, Z., Lu, Z., ... & Xu, B. (2017). Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Water*, 9(11), 866. <https://doi.org/10.3390/w9110866>
- Regmi, N., Nepal, B., Sharma, S., Shrestha, D., & Jha, G. K. (2021). Assessment of Heavy Rainfall using GPM-IMERG Satellite Product over Nepal. *Jalawaayu*, 1(2), 79-95. <https://doi.org/10.3126/jalawaayu.v1i2.41015>
- Shahi, A., & Salahi, B. (2024). Patterning the Heavy, Erosive, and Widespread Rainfalls of the Northwest of Iran by the Factor Analysis Technique. *Geography and Human Relationships*, (), -. doi: 10.22034/gahr.2024.449624.2077
- Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2018). Multi time-scale evaluation of high-resolution satellite-based precipitation products over northeast of Austria. *Atmospheric Research*, 206, 46-63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.020>
- Taghizadeh, E., & Ahmadi-Givi, F. (2018). Evaluation of GPM precipitation products and mapping soil moisture using SMAP data in the northwest of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 12(3), 70-86. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20080336.1397.12.3.5.8>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Talchabhadel, R., Aryal, A., Kawaike, K., Yamanoi, K., Nakagawa, H., Bhatta, B., ... & Thapa, B. R. (2021). Evaluation of precipitation elasticity using precipitation data from ground and satellite-based estimates and watershed modeling in Western Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 33, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100768>
- Vu, T. T., Li, L., & Jun, K. S. (2018). Evaluation of multi-satellite precipitation products for streamflow simulations: a case study for the Han River Basin in the Korean Peninsula, East Asia. *Water*, 10(5), 642. <https://doi.org/10.3390/w10050642>
- Wang, X., Li, B., Chen, Y., Guo, H., Wang, Y., & Lian, L. (2020). Applicability evaluation of multisource satellite precipitation data for hydrological research in arid mountainous areas. *Remote Sensing*, 12(18), 2886. <https://doi.org/10.3390/rs12182886>
- Yang, X., Lu, Y., Tan, M. L., Li, X., Wang, G., & He, R. (2020). Nine-Year systematic evaluation of the GPM and TRMM precipitation products in the Shuaishui river basin in East-Central China. *Remote Sensing*, 12(6), 1042. <https://doi.org/10.3390/rs12061042>
- Yeditha, P. K., Kasi, V., Rathinasamy, M., & Agarwal, A. (2020). Forecasting of extreme flood events using different satellite precipitation products and wavelet-based machine learning methods. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30(6). <https://doi.org/10.1063/5.0008195>