

## EXTENDED ABSTRACT

# Comparison of Two Short-Term Satellite Precipitation Products GPMGSMAP and GPMIMERG In the West of Lake Urmia

Taghi Mahdavi\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

**Received:** 06 April 2024; **Reviewed:** 08 August 2025; **Accepted:** 25 August 2025

### Keywords:

GPM-GSMaP, GPM-IMERG, 6-Hour precipitation, West of Lake Urmia.

## 1. Introduction

Considering the environmental disaster caused by the drying up of a large part of Lake Urmia, the lack of a dense rain gauge network in the region, and the importance of precipitation information as a primary data in most water studies, it is necessary to move towards using satellite data to estimate precipitation in different regions. However, the accuracy of various satellite precipitation databases is not the same for different regions, and according to the results of past research, they perform differently in each region according to the characteristics of precipitation and the type of region; therefore, it is necessary to evaluate the accuracy and validity of these data in different regions. In this regard, in the present research, the accuracy of satellite precipitation data GPMGSMAP V04 (standard hourly product calibrated with the station data) and GPMIMERG V06 (final half-hourly product) in the west of Lake Urmia has been investigated. The results of our research will be valuable to the users of these products in the study area.

## 2. Methodology

To evaluate the accuracy of satellite data against data from synoptic rain gauge stations, six statistical indices R, MBias, RBias, Bias RMSE and six dichotomous indices POD, TSS, PC, FBI, HSS, FAR CSI were used in this study.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Analysis of limited precipitation data at the station scale with statistical indicators

The Bias and RBias indices in the GSMAP product are positive at all stations, while in the GPM-IMERG product they are negative at most stations, which indicates that the GSMAP product is overestimated and the GPM-IMERG product is often underestimated. The overestimation of the GSMAP product is much greater than the underestimation of the GPM-IMERG product, so the GPM-IMERG product is superior. A comparison of the two indices, mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE), also shows that the MAE and RMSE of the GSMAP product are 2.95 and 5.72mm, respectively, while the MAE and RMSE of the GPM-IMERG product are 1.33 and 2.47mm, respectively. As a result, the GPM-IMERG product is superior.

### *3.2. Analysis of comprehensive precipitation data at the station scale with statistical indicators*

The two indices Bias and RBias in the GSMAP product are negative in 3 out of 17 stations, while in the GPM-IMERG product it is negative in 14 stations, which indicates that the GSMAP product has retained the dominant overestimation format and the GPM-IMERG product has retained the dominant underestimation format. Comparing the two MAE, RMSE indices, for the GSMAP product are 3.5 and 4.95mm, respectively, while for the GPM-IMERG product they are 1.73 and 2.51mm, respectively. As a result, the GPM-IMERG product is still in the superior position.

### *3.3. Analysis of limited precipitation data at the station scale with dichotomous indicators*

The average false alarm ratio (FAR) across the 17 stations in both precipitation products combined is 0.42. The average probability of detection (POD) across the 17 stations in the IMERG product is 0.73 and in the GSMAP product is 0.66. Thus, the IMERG product provides a higher frequency of successful detection of precipitation events when precipitation actually occurs. The average value of the FBI index at 17 stations in the IMERG product is 1.36 and in the GSMAP product is 1.24, so the IMERG product detects rainy days better than the GSMAP product.

### *3.4. Analyzing precipitation data at the station scale with Taylor diagrams*

In all 17 stations, the point corresponding to the IMERG satellite is closer to the observed point than the point corresponding to the GSMAP satellite. Therefore, in terms of Taylor diagram analysis, the IMERG precipitation product is in a superior position compared to the GSMAP precipitation product.

### *3.5. Performance analysis of precipitation products at altitude*

The performance of the two precipitation products at altitude based on dichotomous indices and statistical indicators showed that in the altitude range of 1000 to 1500 meters, the two products do not differ much, but at altitudes above 1500 and below 100, the performance of the IMERG product is much better than the GSMAP product, which indicates that the combination of land topography factors in the product algorithm is more efficient in the study area.

### *3.6. Probability Density Function (PDF) of 6-hour rainfall intensity*

The IMERG product performs better than the GSMAP product in correctly reproducing the PDF of precipitation tracking events. The overestimation of precipitation events of 0.1-2mm and the underestimation of precipitation of 5-10mm in 6 hours from the two products should be brought to the attention of algorithm developers.

### *3.7. Investigating the performance of products in spatial distribution*

The spatial performance of the two products in terms of the spatial distribution of statistical and dichotomous indicators has relatively similar spatial patterns with high values in the south and north of the region.

## **4. Conclusions**

- 1) The IMERG\_F product performs better than the GSMaP\_G product at 6-hour time scales (less than daily) in the region. Compared to the station observations, the IMERG\_F product underestimates precipitation, while the GSMaP\_G product overestimates.
- 2) In the Taylor diagram analysis at all stations, the point corresponding to the IMERG\_F satellite was closer to the observed point than the point corresponding to the GSMaP\_G satellite, and as a result, the IMERG\_F product is better than the GSMaP\_G product.
- 3) The performance of both products has a relatively similar spatial variability in terms of statistical and binary indices.

- 4) The IMERG\_F product can reproduce the PDF of precipitation intensity at a sub-daily scale better than the GSMaP\_G product. In the region, the highest frequency of precipitation occurs in the range of 0-0.1 mm and 5-10mm in 6 hours, and the lowest frequency of precipitation appears at rainfall intensities greater than 20mm in 6 hours. The IMERG\_F product agrees well with station observations in terms of frequency, when the rainfall intensity is greater than 8mm and less than 1mm in 6 hours.
- 5) Both satellite precipitation products perform similarly at medium altitudes, but at very high and very low altitudes IMERG\_F performs better than GSMaP\_G.

## مقایسه دو محصول بارش ماهواره‌ای کوتاه‌مدت GPMIMERG و GPMGSMAP در غرب دریاچه ارومیه

تقی مهدوی<sup>1\*</sup><sup>1</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: 1403/1/18، بازنگری: 1404/5/17، پذیرش: 1404/6/3، نشر آنلاین: 1404/6/3

### چکیده

این مطالعه یک ارزیابی جامع از دو محصول بارش ماهواره‌ای تحقیقاتی GPM-IMERG\_F و GPM-GSMaP\_G در مقیاس شش ساعته (زیر روزانه) برای فصل بارندگی (از مارس تا ژوئن 2017) با استفاده از داده‌های بارش شش ساعته 17 ایستگاه سینوپتیک (Synoptic) در غرب دریاچه ارومیه ارائه می‌کند. روش تحقیق تکنیک‌های مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای و زمینی است. اگرچه محصول GPM-IMERG\_F به دلیل تصحیح با داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های زمینی مرکز جهانی بارش (GPCC) و اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) و محصول GPM-GSMaP\_G به دلیل تصحیح با داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های زمینی مرکز پیش‌بینی اقلیم (CPC) می‌توانند وضوح مکانی و زمانی دقیق‌تری را برای تخمین بارش ارائه دهند، ولی نتایج این مطالعه استنباط کرد که آن‌ها هنوز هم، سوگیری قابل توجهی را در برخی ایستگاه‌ها ارائه می‌دهند. در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل کمی دقت محصولات بارشی ماهواره‌ای از شش شاخص‌های آماری (MAE و MBias، RBias، Bias RMSE، R) و برای ارزیابی قابلیت تشخیص از 7 معیار دودویی طبقه‌بندی‌شده (POD، TSS، PC، FBI) در نتیجه محصول IMERG\_F بهتر از محصول GSMaP\_G می‌باشد. در تحلیل بارش‌های فراگیر 6 ساعته اختلاف دو محصول خود بیشتر نمایان شد. اگرچه هر دو محصول الگوهای مکانی نسبتاً مشابهی داشتند ولی محصول GPM-IMERG\_F دقت و قابلیت تشخیص بسیار بهتری نسبت به محصول GPM-GSMaP\_G داشت. به‌طوری‌که محصول GPM-IMERG\_F منحنی چگالی احتمالی تجمعی بسیار نزدیک به ایستگاه‌ها را از نظر شدت بارندگی بازتولید کرد و همین‌طور عملکرد محصول GPM-IMERG\_F از نظر توپوگرافی و ارتفاعی بهتر از محصول GPM-GSMaP\_G بود. این مطالعه برای کاربران این محصولات در منطقه مورد مطالعه با ارزش خواهد بود و می‌تواند در کاربردهایی مانند کاهش خطر بلایای طبیعی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، به‌ویژه در مناطقی با شبکه باران‌سنج پراکنده پشتیبانی کند.

**کلیدواژه‌ها:** GPM-IMERG، GPM-GSMaP، بارش شش ساعته، غرب دریاچه ارومیه.

### 1- مقدمه

مدیریت منابع آب و استراتژی سازگاری با تغییرات اقلیم ایفا می‌کند (Liu و همکاران، 2020).

در اثر گرم شدن کره زمین و افزایش شدید بارش، اندازه‌گیری دقیق بارش برای درک تغییر و تنوع آن در مکان و زمان بسیار مهم است؛ بنابراین، مجموعه داده‌های بارش شبکه‌ای با وضوح بالا به درک بهتر چرخه آب و هواشناسی کمک می‌کند (Biswas و Chandrasekar، 2018).

روش متداول اندازه‌گیری بارش، سنجش مستقیم آن توسط ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی به‌صورت نقطه‌ای است که مقدار بارش را در محل اندازه‌گیری به‌صورت

داده‌های دقیق بارش برای پیش‌بینی سیل، پایش خشک‌سالی و مدیریت ریسک بسیار مهم است؛ بنابراین، چگونگی به‌دست آوردن داده‌های بارش دقیق با وضوح مکانی و زمانی خوب یکی از چالش‌های بزرگ در جهان است (Guo و همکاران، 2016؛ Zhou و همکاران، 2020).

داده‌های بارش به دلیل ماهیت گسسته دارای توزیع مکانی و زمانی بسیار متغیر است. به‌عنوان محرک اصلی چرخه هیدرولوژیکی، اندازه‌گیری و تخمین‌های آن نقش مهمی در



زمینی برای کاهش سوگیری‌ها به این الگوریتم‌های بازیابی اضافه می‌شوند. با توجه به تفاوت‌های بین الگوریتم‌ها و فناوری تصحیح مربوطه، ممکن است به دقت متفاوتی منجر شوند (Sunilkumar و همکاران، 2015).

تخمین بارش مبتنی بر مشاهدات ماهواره‌ای دارای عدم قطعیت‌های قابل توجهی ناشی از عوامل مختلف از جمله شرایط جوی (بازتاب ابر، تابش حرارتی)، هندسه مدار، الگوریتم بازیابی و شرایط توپوگرافی هستند (Carr و همکاران، 2015؛ Vergara و همکاران، 2014؛ Hussain و همکاران، 2018؛ Kim و همکاران، 2016؛ Sunil Kumar و همکاران، 2015؛ Lakshmi، 2014).

با توجه به اهمیت بالقوه داده‌های ماهواره‌ای در کاربردهای هیدرولوژیکی، تلاش‌های عمیق جهت ارزیابی عدم قطعیت این داده‌ها ضروری است.

چندین مطالعه محدودیت‌های حسگرهای IR و PMW را در اندازه‌گیری بارش به‌ویژه در طول ابرهای باران‌زای چندلایه، رویدادهای بارشی مناطق کوهی گرم و مناطق برفی سطح زمین شناسایی و مورد بحث قرار داده‌اند (Dinku و همکاران، 2012؛ Tian و Peters-Lidard، 2010).

اگرچه GPM تنها دو ابزار اصلی در مقابل پنج ابزار TRMM دارد، اما این دو ابزار رادار بارش با فرکانس دوگانه (DPR) و رادیومتر به نام تصویرگر مایکروویو (GMI) از پیشرفته‌ترین ابزارهایی هستند که تاکنون برای اندازه‌گیری بارش از فضا ساخته شده‌اند. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که محصولات در دوره GPM عموماً برتر از محصولات در دوره TRMM هستند مانند: Kim و همکاران، 2017؛ Gebregiorgis و همکاران، 2018؛ Anjum و همکاران، 2018؛ Tan و Duan، 2017؛ Li و Chen، 2016؛ Tang و همکاران، 2016؛ Sharifi و همکاران، 2016؛ Kim و همکاران، 2017؛ He و همکاران، 2017؛ Beria و همکاران، 2017؛ Ma و همکاران، 2016؛ Anjum و همکاران، 2019؛ Wang و همکاران، 2019؛ Chen و همکاران، 2018؛ Wei و همکاران، 2017؛ Fang و همکاران، 2019؛ Li و همکاران، 2019؛ Tan و همکاران، 2017؛ Xu و همکاران، 2019؛ Yuan و همکاران، 2017؛ Zhang و همکاران، 2019؛ Huang و همکاران، 2020.

نتایج برخی تحقیقات نشان می‌دهد عوامل زیادی مانند توپوگرافی پیچیده منطقه (Yilmaz و همکاران، 2005؛ Derin و همکاران، 2014) شدت بارندگی و فصل خشک و مرطوب (Anjum و همکاران، 2018؛ Chen و همکاران، 2013؛ Guo و همکاران، 2015؛ Habib و همکاران، 2009) بر تخمین بارش ماهواره‌ای تأثیر می‌گذارد. غالب تحقیقات مقایسه کننده دو محصول GSMAP و IMERGE به مقایسه این دو محصول در مقیاس زمانی روزانه و بزرگ‌تر پرداخته‌اند و مطالعات نادری در مقیاس ساعتی وجود دارد.

دقیق نشان می‌دهد ولی در سایر سل‌ها باید با روش‌های درون‌بازی از داده‌های نقطه‌ای ایستگاهی تخمین زده شود؛ بنابراین جهت افزایش دقت در این روش باید تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری افزایش یابد که عملاً مقرون به صرفه نیست. همچنین این روش دارای مشکلاتی از قبیل هزینه‌بر بودن، کمبود ایستگاه، عدم استقرار دستگاه‌های ثبت کننده در مناطق صعب‌العبور و عدم توانایی ثبت بارندگی‌های رگباری و سنگین همرفتی است. ایستگاه‌های هم‌دید (سینوپتیک) و باران‌سنجی موجود به خوبی در مناطق مختلف توزیع نشده‌اند و فاصله آن‌ها بر اساس قوانین خاصی نیست، همچنین بر روی آب‌ها، دریاها و دریاچه‌ها شبکه هم‌دید و باران‌سنجی موجود نمی‌باشد به طوری که برای اندازه‌گیری باران در این مناطق که آب موجود است، از ترکیب داده‌های ساحلی و جزیره‌ای استفاده می‌شود و در نتیجه پایش بارش در این مناطق بر دقت اندازه‌گیری بر روی این منابع عظیم چرخه هیدرولوژی تأثیرگذار است (Turk و Miller، 2005).

یک راه عملی برای دستیابی به یک برآورد جامع از بارش که برای کلیه سل‌ها مقدار بارش متناظر را نشان دهد اندازه‌گیری غیرمستقیم بارش به صورت جهانی از طریق ماهواره‌های مشاهده زمین است. مزیت بررسی بارندگی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور، شناخت بهتر پدیده بارش و پارامترهای مؤثر در آن در یک گستره مکانی وسیع با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا و دقیق است (Hou و همکاران، 2014؛ Chang و Hong، 2012).

دو محصول بارش ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا و دقیق در عصر جدید عبارت‌اند از:

GPM-IMERGE به عنوان جانشین TMPA-TRMM که عمدتاً با تلاش NASA راه‌اندازه شده و با وضوح مکانی 0/1 درجه و وضوح زمانی 0/5 ساعت با دامنه‌ای که N60 تا S60 سه زیرمحصول زیر را ارائه می‌دهد:

- (1) IMERG\_E نسخه اجرای زودهنگام،
- (2) IMERG\_Late نسخه اجرای دیر هنگام،
- (3) IMERG\_Final نسخه اجرای نهایی،

GPM-GSMAP که عمدتاً با تلاش JAXA راه‌اندازه شده و با وضوح مکانی 0/1 درجه و وضوح زمانی یک ساعت با دامنه‌ای که N60 تا S60 را پوشش می‌دهد، سه زیر محصول را ارائه می‌دهد:

- (1) GSMaP\_NRT محصولات تقریباً بی‌درنگ،
- (2) GSMaP\_MVK بردار متحرک با فیلتر کالمن، مخفف GSMaP\_M
- (3) GSMaP\_Gauge محصولات استاندارد کالیبره شده با ایستگاه، GSMaP\_G

با وجود این که این محصولات بارشی داده‌های ورودی مشابهی دارند ولی الگوریتم‌های تخمین بارندگی متفاوت دارند علاوه بر این، روش‌های تصحیح مختلف نیز با ترکیب مشاهدات باران‌سنج

Hisam و همکاران (2023) در یک ارزیابی جامع از هشت محصول بارش مبتنی بر شبکه شامل TRMM 3B42 PERCIANN، CCS، CHIRPS، PERSIANN CDR، GSMaP MVK، PDIR-Now، ERA5 و GSMaP Gauge، IMERG v6 از سال 2017 تا 2021 در مقیاس‌های ماهانه و شبکه‌ای، با استفاده از داده‌های 193 ایستگاه هواشناسی زمینی به این نتیجه رسیدند که شش محصول IMERG، CHIRPS، PERSIANN CDR، GSMaP Gauge، ERA5 و TRMM 3B42 PERCIANN در تمام جنبه‌های ارزیابی عملکرد خوبی داشتند اکثر محصولات، رویدادهای بارش سنگین را کمتر از حد واقعی تخمین زدند همچنین عملکرد اکثر محصولات برای ارتفاعات بیش از 1000 متر کاهش داشت.

Nepal و همکاران (2021) در مقایسه دو محصول IMERG-V06 و GSMaP-V07 کالیبره شده با ایستگاه در مقیاس روزانه به این نتیجه رسیدند که بین این دو، محصول IMERG عملکرد سازگارتری نسبت به محصول GSMaP نشان می‌دهد. ارزیابی براساس شاخص‌های بارش شدید نشان داد که محصول IMERG می‌تواند جایگزین خوبی برای نظارت بر رخدادهای روزانه باشد. در همین حال، GSMaP می‌تواند گزینه بهتری برای رخدادهای مبتنی بر مدت‌زمان در منطقه کوهستانی باشد.

با توجه به فاجعه زیست‌محیطی ناشی از خشک شدن بخش وسیعی از دریاچه ارومیه، عدم وجود شبکه باران‌سنجی مترکم در منطقه و اهمیت اطلاعات بارش به‌عنوان یک داده اولیه در اکثر مطالعات آبی، حرکت به سمت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد بارش در مناطق مختلف ضروری است اما دقت اطلاعات پایگاه‌های داده بارشی ماهواره‌ای گوناگون برای مناطق مختلف یکسان نیست و با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، در هر منطقه با توجه به خصوصیات بارش و نوع منطقه، عملکرد متفاوتی دارند؛ بنابراین لازم است دقت و صحت این داده‌ها در مناطق مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا در مقاله حاضر دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای GPMGSMAP V04 (محصول یک‌ساعته استاندارد کالیبره شده با ایستگاه) و GPMIMERG V06 (محصول نیم‌ساعته اجرای نهایی) در غرب دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش ما به کاربران این محصولات در منطقه مورد مطالعه با ارزش خواهد بود.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- منطقه و داده‌های مطالعه

منطقه مورد مطالعه غرب دریاچه ارومیه است. شکل (1) توپوگرافی و تعداد ایستگاه‌های باران‌سنج را در منطقه نشان می‌دهد. ایستگاه‌های سیوپتیک عمدتاً در نواحی با ارتفاع پایین پراکنده هستند و ایستگاه‌های باران‌سنج کمی در کوهستانی با

Veerakachen و همکاران (2014) با مقایسه دو محصول GSMaP\_N، GSMaP\_M نشان دادند که در مقیاس روزانه، هر دو محصول در فصل بارانی عملکرد خوبی دارند GSMaP\_N تمایل به برآورد کمتر دارد درحالی‌که GSMaP\_M میزان بارندگی را کمی بیش‌ازحد تخمین می‌زند.

Yong و Lu (2018) دریافتند که محصولات بارشی ماهواره‌ای تصحیح شده با ایستگاه به‌خصوص محصول GSMaP\_G دقت بالاتری در فلات تبت دارد.

Prakash و همکاران (2018) با مقایسه محصولات بارشی GPM-IMERG، GPM-GSMaP و TMPA در هند به این نتیجه رسیدند که محصول IMERG میانگین بارندگی موسمی و تغییرپذیری آن را به‌طور واقعی‌تر از GSMaP تنظیم‌شده با ایستگاه نشان می‌دهد. بااین‌حال، GSMaP میانگین خطای ریشه مربع نسبتاً کوچک‌تری نسبت به IMERG و TMPA به‌ویژه در رژیم‌های کم بارش دارد. همچنین IMERG بهبود واضحی را در بایاس بارش از دست‌رفته و کاذب نشان می‌دهد.

Shi و همکاران (2020) با مقایسه هشت محصول بارشی ماهواره‌ای IMERG-E، IMERG-L، IMERG-F، GSMaP\_G، GSMaP-MVK، GSMaP-Gauge-NRT، GSMaP-NRT، NOW، در حوزه رودخانه زرد به این نتیجه رسیدند که در بین سه محصول IMERG، IMERG-F کمترین خطای سیستماتیک و بهترین کیفیت را نشان داد و پس‌از آن IMERG-E و IMERG-L قرار دارند و E و IMERG-L وقوع رویدادهای بارانی خفیف را دست‌کم گرفتند اما رویدادهای بارانی متوسط و شدید را بیش‌ازحد برآورد کردند. در بین چهار محصول GSMaP، GSMaP-Gauge بهترین عملکرد را از نظر معیارهای آماری مختلف ارائه کرد و به‌دنبال آن GSMaP-Gauge-NRT قرار گرفت و GSMaP-MVK و GSMaP-NRT به‌طور قابل ملاحظه‌ای کل بارش را بیش‌ازحد تخمین زدند و GSMaP-NOW کم برآوردی آشکار را نشان داد. با مقایسه عملکرد محصولات IMERG و GSMaP، GSMaP-Gauge-NRT بهترین تخمین‌های بارش را در بین تمام محصولات بارشی زمان واقعی و نزدیک به زمان واقعی ارائه کرد. در محصولات بارشی بلادرنگ، GSMaP-Gauge بالاترین قابلیت را در مقیاس روزانه ارائه کرد و IMERG-F کمی بهتر از سایر محصولات بارشی ماهواره‌ای در مقیاس ماهانه عمل کرد.

Tang و همکاران (2020) در یک ارزیابی جامع از 9 محصول بارش ماهواره‌ای شامل TRMM 3B42، CMORPH، PERSIANN-، ERA-Interim، ERA5، SM2RAIN، CHIRPS، GSMaP، CDR و MERRA2 در چین به این نتیجه رسیدند که IMERG از سایر محصولات بارشی به‌جز GSMaP\_G که از داده‌های ایستگاه در مقیاس روزانه برای تنظیم تخمین‌های بارش ماهواره‌ای استفاده می‌کند، بهتر عمل می‌کند.

از آنجایی که در ایران داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک در مقیاس شش ساعته در اختیار محققان قرار می‌گیرد، لذا در این تحقیق داده‌های IMERG نیم‌ساعته با تجمیع 12 بارش نیم‌ساعته و داده‌های GSMaP یک‌ساعته با تجمیع شش بارش یک‌ساعته به بارش شش ساعته تبدیل شدند تا با داده‌های بارندگی شش ساعته ایستگاه‌های سینوپتیک مستقیم مقایسه شوند. از آنجایی که واحد محصولات نیم ساعته IMERG برحسب میلی‌متر در ساعت است، برای به‌دست آوردن بارش شش ساعته انباشته IMERG با انباشتن مقادیر بارندگی از 12 محصول نیم‌ساعته IMERG تولید می‌شوند و سپس مقدار بارندگی انباشته‌شده در ضریب 0/5 ضرب می‌شود، به‌جهت این‌که واحد محصولات یک ساعته GSMaP برحسب میلی‌متر است ضریب برابر 1 است که تأثیری در محاسبات ندارد. جهت آشنایی بیشتر خوانندگان این مقاله با فرمت و مشخصات این دو محصول بارش ماهواره‌ای بر اساس راهنمای کارشناسان مراکز jaxa و NASA فایل "GPMIMG\_MAP\_1703021800\_H\_L3S\_MCH\_04C.h5" داده‌های حاوی مقدار انباشته بارندگی از ساعت 18:00:00 UTC تا ساعت 18:59:59 UTC در 2 مارس 2017 است و همین‌طور فایل 3B-HHR.MS.MRG.3IMERG.20170322-S0000000- E002959.0000.V06B.HDF5.SUB.nc4 داده‌های حاوی مقدار انباشته بارندگی نیم ساعت اول از تاریخی که در نام فایل نوشته شده است، یعنی 22 مارس 2017 را پوشش می‌دهد.

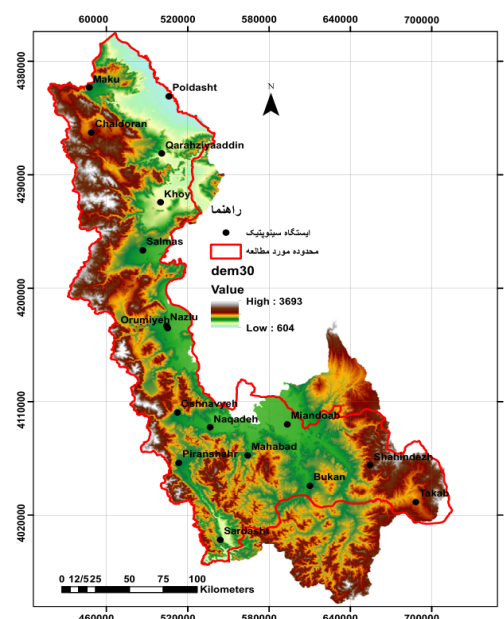
## 2-2- اعتبار سنجی

برای ارزیابی صحت داده‌های ماهواره‌ای در برابر داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی سینوپتیک، از شش شاخص‌های آماری R، Bias RMSE RBias، MBias، و به‌شرح روابط (1) تا (6) و شش شاخص مطابقت یا احتمالاتی دودویی ساده POD، TSS، FBI، PC، FAR CSI HSS به شرح روابط (7) تا (13) در این مطالعه استفاده شده است.

### 2-2-1- شاخص‌های آماری

میانگین خطای مطلق (MAE) نشان‌دهنده میانگین بزرگی خطا است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان‌دهنده بزرگی خطای کلی است بنابراین کم بودن این شاخص نشانه تخمین بهتر بارندگی توسط داده ماهواره‌ای است. Bias به‌عنوان میانگین تفاوت بین بارندگی مشاهده‌ای و داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند مثبت یا منفی باشد. بایاس منفی نشانگر دست‌کم برآورد کردن داده‌های بارندگی توسط ماهواره درحالی‌که بایاس مثبت بیانگر برآورد بیش‌ازحد است. MBias نسبت داده ماهواره‌ای به مقدار باران مشاهده‌ای است. اگر این مشخصه کمتر از 1 باشد نشانگر دست‌کم برآورد کردن میزان بارندگی توسط ماهواره است

ارتفاع بالاتر وجود دارد. تفاوت مکانی بارندگی در منطقه وجود دارد و خشک‌سالی و سیل به‌طور مکرر رخ می‌دهد.



شکل 1- منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک

بنابراین لازم است ارزیابی سیستماتیک عملکرد محصولات باشی ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گیرد. مرتفع‌ترین نقطه استان قله اورین به ارتفاع 3622 متر در خوی و کم‌ترین 620 متر در محل خروج رودخانه زاب به عراق در سردشت است. بر اساس میانگین آمار درازمدت بیشترین دما در داشنبند 44+ و کمترین 34- در خوی و متوسط بارندگی 30 ساله منتهی به سال آبی 2017-2018 استان 354 میلی‌متر است. به‌علت شرایط آب و هوایی و موقعیت خاص جغرافیایی اکثر مناطق آن دارای اقلیم نیمه‌خشک و خشک سرد می‌باشد.

مجموعه داده‌های مرجع مورد استفاده در این مطالعه میزان بارندگی 3 ساعته ثبت شده در 17 ایستگاه سینوپتیک فصل بارندگی (از مارس تا ژوئن 2017) است. اطلاعات بارندگی از سازمان هواشناسی گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده است، توزیع ایستگاه‌های سینوپتیک که تنها ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه برای اندازه‌گیری میزان بارش باران سه‌ساعته هستند، بسیار ناهمگن و ناکافی است، به‌همین خاطر این مطالعه مبتنی بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه انتخاب نشد تا با کمبود اطلاعات بارش ساعتی روبه‌رو نشود. بنابراین استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای با وضوح مکانی و زمانی زیاد جهت تخمین داده‌های بارشی ورودی به مدل‌های هیدرولوژیکی برای برآورد دقیق هیدرولوژیکی در منطقه ضروری است.

در این تحقیق دو محصول بارش ماهواره‌ای GPM-IMERG\_F نیم‌ساعته و GSMaP\_G یک‌ساعته مورد استفاده قرار گرفته است.

$$PC = \frac{(a+d)}{(a+b+c+d)} \quad (11)$$

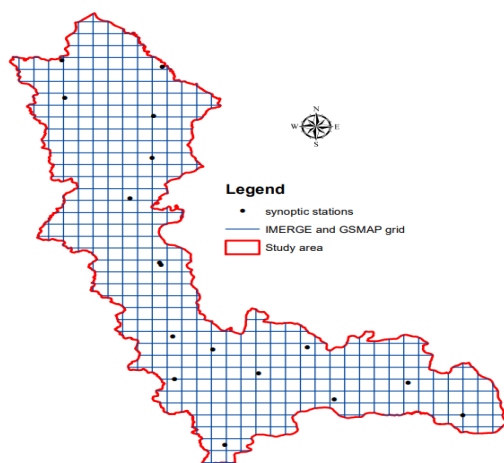
$$\text{Frequency of bias index (FBI)} = \frac{(a+b)}{(a+c)} \quad (12)$$

$$HSS = \frac{2*(a*d-b*c)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \quad (13)$$

مقدار نسبت هشدار اشتباه (FAR) کوچک‌تر، نشان‌دهنده برآورد بهتر بارش توسط ماهواره است. در بهترین حالت ممکن این شاخص می‌تواند صفر باشد که بیانگر پیش‌بینی کامل بارش توسط ماهواره است و در بدترین حالت می‌تواند حداکثر یک باشد که بیانگر هشدار اشتباه کامل است. مقدار احتمال تشخیص (POD) نیز بین 0 تا 1 است اگر این شاخص برابر 1 باشد بیانگر این است که ماهواره بارش را به‌خوبی تشخیص می‌دهد. شاخص موفقیت بحرانی (CSI) بیانگر نسبتی از وقوع بارش است که توسط ماهواره به‌درستی تشخیص داده شده است. اگر مقدار شاخص آماری مهارت واقعی (TSS) برابر یک باشد بیانگر مطابقت کامل مقادیر ماهواره‌ای و مشاهده‌ای است. نسبت صحیح (PC) نقاط تشخیص دقیق بارش و عدم بارش به‌کل نقاط اندازه‌گیری بارش است. این شاخص اگر نزدیک به یک باشد بهتر است. شاخص FBI برابر است با نسبت رویدادهای بارش ثبت شده توسط ماهواره به مشاهدات زمینی از بارش. اگر مقدار شاخص FBI بزرگ‌تر از یک باشد، نشان‌دهنده تخمین بیش‌ازحد توسط ماهواره است. اگر شاخص امتیاز مهارت هیک (HSS) برابر یک باشد، نشان‌دهنده تطابق کامل بین بارش تخمینی ماهواره و بارش زمینی مشاهده شده است.

### 3- نتایج

در شکل (2) شبکه سلولی 0/1×0/1 درجه دو ماهواره GSMAP و IMERG به‌همراه موقعیت ایستگاه‌های ثبت بارش زمینی را مشخص می‌دهد.



شکل 2- شبکه سلولی 0/1×0/1 درجه دو ماهواره GSMAP و IMERG به‌همراه موقعیت ایستگاه‌های ثبت بارش زمینی

و درحالتی که بزرگ‌تر از 1 باشد بیانگر برآورد بیش‌ازحد است. RBias نشان‌دهنده سوگیری منظم بارندگی مبتنی بر ماهواره و بارندگی مشاهده‌ای است. ضریب همبستگی (R) نشان‌دهنده میزان رابطه قوی و یا ضعیف به شکل مثبت و یا منفی بین بارندگی مبتنی بر ماهواره و مشاهده‌ای است. مقدار R برابر 1 نشانگر رابطه مثبت کامل درحالی که مقدار -1 نشانگر رابطه منفی کامل است. اگر هیچ همبستگی خطی یا همبستگی خطی ضعیف وجود داشته باشد، R نزدیک به 0 است.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_{Si} - P_{Oi}|}{N} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Si} - P_{Oi})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Si} - P_{Oi})}{N} \quad (3)$$

$$MBias = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Si}}{\sum_{i=1}^N P_{Oi}} \quad (4)$$

$$RBias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Si} - P_{Oi})}{\sum_{i=1}^N P_{Oi}} * 100 \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Oi} - \bar{P}_O) * \sum_{i=1}^N (P_{Si} - \bar{P}_S)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{Oi} - \bar{P}_O)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{Si} - \bar{P}_S)^2}} \quad (6)$$

### 2-2-2- شاخص‌های مطابقت

این شاخص‌ها با استفاده از جدول توافقی 2×2 مانند جدول (1) تعریف می‌شوند. در این جدول a نشان‌دهنده تعداد حالاتی است که هم ایستگاه زمینی و هم ماهواره بارش ثبت کرده است، d تعداد حالاتی است که نه ایستگاه زمینی و نه ماهواره بارش ثبت نکرده است b تعداد حالاتی است که ایستگاه زمینی بارش ثبت نکرده ولی ماهواره بارش ثبت کرده است c تعداد حالاتی است که ایستگاه زمینی بارش ثبت کرده ولی ماهواره بارش ثبت نکرده است (Jolliffe و Stephenson, 2012).

جدول 1- جدول توافقی (Jolliffe و Stephenson, 2012)

| ثبت بارش توسط ایستگاه زمینی |           |      |           |
|-----------------------------|-----------|------|-----------|
|                             |           | بارش | بدون بارش |
| تخمین بارش                  | بارش      | a    | b         |
| توسط ماهواره                | بدون بارش | c    | d         |

$$FAR = \frac{b}{b+a} \quad (7)$$

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (8)$$

$$CSI = \frac{a}{(a+b+c)} \quad (9)$$

$$TSS = \frac{(a*d-b*c)}{(b+d)*(a+c)} \quad (10)$$

### 3-2- تحلیل داده‌های بارشی فراگیر در مقیاس ایستگاهی با شاخص‌های آماری

در این تحقیق داده‌ای بارشی شش ساعته فراگیر به داده‌های بارشی شش ساعته گفته می‌شود که حداقل 70 درصد ایستگاه‌های سنوپتیک در محدوده مورد مطالعه بارش بیشتر از 0/1 میلی‌متر در شش ساعت ثبت کرده باشند. نتایج تحلیل داده‌های بارشی فراگیر ایستگاهی با شاخص‌های آماری در جدول (3) نشان داده شده است. در تحلیل بارش‌های فراگیر دو شاخص Bias و RBias در محصول GSMAP در 3 ایستگاه از 17 ایستگاه منفی است در حالی که در محصول GPM-IMERG در 14 ایستگاه منفی است که نشان می‌دهد محصول GSMAP فرمت غالب بیش برآوردی و محصول GPM-IMERG فرمت غالب کم برآوردی را حفظ کرده است. اما متوسط Bias در 17 ایستگاه برای محصول GSMAP برابر 1/64 میلی‌متر در حالی که برای محصول GPM-IMERG برابر 1/05- میلی‌متر است به عبارت دیگر در بارش‌های فراگیر اختلاف دو محصول اندکی بیشتر می‌شود.

متوسط شاخص نسبت داده ماهواره‌ای به مقدار باران مشاهده‌ای (Mbias) در 17 ایستگاه در محصول GSMAP حدود 3/46 برابر محصول GPM-IMERG است به عبارت دیگر در بارش‌های فراگیر اختلاف دو محصول اندکی بیشتر می‌شود. مقایسه دو شاخص میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای محصول GSMAP به ترتیب 3/5 و 4/95 میلی‌متر بوده در حالی که برای محصول GPM-IMERG به ترتیب 1/73 و 2/51 میلی‌متر است در نتیجه محصول GPM-IMERG بازم در موقعیت برتر قرار دارد. در بارش‌های فراگیر از نظر ضریب همبستگی (R) دو محصول بارشی اختلاف چندانی ندارند.

### 3-3- تحلیل داده‌های بارشی محدود در مقیاس ایستگاهی با شاخص‌های دودویی

نتایج تحلیل داده‌های بارشی محدود ایستگاهی با شاخص‌های دودویی در جدول (4) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید مقدار متوسط نسبت هشدار اشتباه (FAR) در 17 ایستگاه در هر دو محصول بارشی باهم برابر 0/42 هست. مقدار احتمال تشخیص (POD) متوسط در 17 ایستگاه در محصول IMERG برابر 0/73 و در محصول GSMAP برابر 0/66 است. بنابراین محصول IMERG فرکانس بالاتری از شناسایی موفق از رویدادهای بارش را در زمانی که بارش واقعاً اتفاق می‌افتد، ارائه می‌کند. مقادیر متوسط شاخص موفقیت بحرانی CSI، مقدار شاخص آماری مهارت واقعی (TSS)، شاخص امتیاز مهارت هیک (HSS) و نسبت صحیح (PC) در 17 ایستگاه در هر دو محصول بارشی ماهواره‌ای نزدیک به هم

در این بخش، با توجه به مقدار بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌ها به مقایسه آن‌ها با داده‌های دو ماهواره در سلول مرتبط با آن ایستگاه بر اساس شاخص‌های آماری و شاخص‌های دودویی پرداخته شده است.

### 3-1- تحلیل داده‌های بارشی محدود در مقیاس ایستگاهی با شاخص‌های آماری

در این تحقیق، داده‌ای بارشی شش ساعته محدود به داده‌های بارشی شش ساعته گفته می‌شود که حداقل 30 درصد ایستگاه‌های سنوپتیک در محدوده مورد مطالعه بارش بیشتر از 0/1 میلی‌متر در شش ساعت ثبت کرده باشند. نتایج تحلیل داده‌های بارشی محدود ایستگاهی با شاخص‌های آماری در جدول (2) نشان داده شده است.

همان‌طوری که ملاحظه می‌کنید شاخص Bias و RBias در محصول GSMAP در کلیه ایستگاه‌ها مثبت است در حالی که در محصول GPM-IMERG در غالب ایستگاه‌ها منفی است که نشان می‌دهد محصول GSMAP دارای بیش برآوردی و محصول GPM-IMERG غالباً دارای کم برآوردی است. اما نکته قابل توجه این است که متوسط Bias در 17 ایستگاه برای محصول GSMAP برابر 1/8 میلی‌متر در حالی که برای محصول GPM-IMERG برابر 0/16- میلی‌متر است و همین‌طور متوسط RBias در 17 ایستگاه برای محصول GSMAP برابر 188 درصد در حالی که برای محصول GPM-IMERG برابر 2/7 در صد است. بنابراین بیش برآوردی محصول GSMAP به مراتب بسیار بیشتر از مقدار کم برآوردی محصول GPM-IMERG است. در نتیجه محصول GPM-IMERG برتر است. متوسط شاخص نسبت داده ماهواره‌ای به مقدار باران مشاهده‌ای (Mbias) در 17 ایستگاه در محصول GSMAP به مقدار 2/8 برابر محصول GPM-IMERG است که نشان‌دهنده بیش برآوردی زیاد محصول GSMAP است.

مقایسه دو شاخص میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) هم نشان می‌دهد میانگین بزرگی خطا و بزرگی خطای کلی محصول GSMAP به ترتیب 2/95 و 5/72 میلی‌متر بوده در حالی که میانگین بزرگی خطا و بزرگی خطای کلی محصول GPM-IMERG به ترتیب 1/33 و 2/47 میلی‌متر است در نتیجه محصول GPM-IMERG برتر است.

ضریب همبستگی (R) محصول GSMAP در دو ایستگاه منفی است اما در محصول GPM-IMERG فقط در یک ایستگاه منفی است و ضریب همبستگی (R) در محصول GPM-IMERG در 9 ایستگاه از 17 ایستگاه بیش از 60 است در حالی که در محصول GSMAP در 4 ایستگاه از 17 ایستگاه بیش از 60 است.

**4-3- تحلیل داده‌های بارشی فراگیر در مقیاس ایستگاهی با شاخص‌های دودویی**  
نتایج تحلیل داده‌های بارشی فراگیر ایستگاهی با شاخص‌های دودویی در جدول (5) نشان داده شده است.

هستند. مقدار متوسط شاخص FBI در 17 ایستگاه در محصولIMERG برابر 1/36 و در محصول GSMAP برابر 1/24 است بنابراین محصولIMERG روزهای بارش را قدری بیشتر از محصول GSMAP تشخیص می‌دهد.

**جدول 2- نتایج تحلیل داده‌های بارشی محدود ایستگاهی با شاخص‌های آماری**

| نام ایستگاه   | Bias  |       | MBias |       | RBias  |        | MAE   |       | RMSE  |       | r     |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG  | GSMAP  | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP |
| ارومیه        | -0.02 | 2.23  | 0.98  | 3.19  | -2.37  | 219    | 0.95  | 2.78  | 1.75  | 6.50  | 0.71  | 0.50  |
| بوکان         | 0.14  | 2.29  | 1.13  | 3.02  | 12.72  | 202.06 | 1.63  | 3.51  | 2.63  | 5.81  | 0.30  | 0.46  |
| نازلو         | -0.41 | 1.84  | 0.71  | 2.31  | -29.17 | 131.42 | 1.30  | 2.88  | 2.63  | 6.83  | 0.66  | 0.36  |
| خوی           | 0.13  | 2.80  | 1.12  | 3.56  | 12.10  | 255.98 | 1.250 | 3.13  | 2.42  | 5.54  | 0.40  | 0.68  |
| مهاباد        | -0.52 | 1.16  | 0.66  | 1.75  | -33.67 | 75.49  | 1.31  | 2.98  | 2.25  | 4.70  | 0.50  | 0.24  |
| ماکو          | 0.10  | 1.66  | 1.15  | 3.49  | 15.37  | 248.94 | 0.56  | 1.84  | 1.12  | 4.36  | 0.71  | 0.74  |
| میاندوآب      | -0.11 | 1.13  | 0.91  | 1.89  | -8.93  | 89.41  | 2.02  | 3.05  | 3.65  | 5.13  | 0.13  | -0.11 |
| نقده          | -0.41 | 0.50  | 0.68  | 1.39  | -32.05 | 38.53  | 1.35  | 2.17  | 2.48  | 3.92  | 0.53  | 0.23  |
| اشنویه        | -0.92 | 0.21  | 0.40  | 1.06  | -59.51 | 6.46   | 2.82  | 4.16  | 5.73  | 7.39  | 0.66  | 0.33  |
| پیرانشهر      | -0.06 | 0.90  | 0.96  | 1.59  | -3.62  | 58.82  | 1.17  | 2.42  | 2.26  | 4.43  | 0.65  | 0.34  |
| پلدشت         | 0.69  | 2.66  | 2.82  | 8.04  | 182.3  | 704.05 | 0.96  | 2.95  | 2.17  | 6.73  | 0.32  | 0.06  |
| قره ضیالالدین | -0.22 | 3.26  | 0.82  | 3.66  | -18.04 | 265.54 | 1.20  | 4     | 2.11  | 8.03  | 0.44  | 0.21  |
| سلماس         | -0.14 | 1.71  | 0.90  | 2.22  | -9.67  | 121.97 | 2.05  | 2.05  | 2.42  | 3.97  | 0.73  | 0.70  |
| سردشت         | -0.50 | 1.32  | 0.73  | 1.72  | -27.16 | 72.47  | 0.91  | 2.35  | 1.37  | 4.92  | 0.95  | 0.88  |
| شاهیندژ       | 0.22  | 1.92  | 1.20  | 2.69  | 19.76  | 168.75 | 1.19  | 2.59  | 1.91  | 5.16  | 0.61  | 0.59  |
| تکاب          | 0.20  | 2.69  | 1.25  | 4.42  | 25.17  | 341.56 | 0.85  | 3.12  | 1.49  | 6.10  | 0.63  | 0.77  |
| چالدران       | -0.90 | 2.39  | 0.92  | 3.11  | -8.36  | 210.63 | 1.98  | 4.17  | 3.54  | 7.73  | -0.13 | -0.13 |
| میانگین       | -0/16 | 1/80  | 1/02  | 2/89  | 2/70   | 188/89 | 2/95  | 1/33  | 5/72  | 2/47  |       |       |

**جدول 3- نتایج تحلیل داده‌های بارشی فراگیر ایستگاهی با شاخص‌های آماری**

| نام ایستگاه   | Bias  |       | MBias |       | RBias  |        | MAE   |       | RMSE  |       | r     |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG  | GSMAP  | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP |
| ارومیه        | -0.25 | 0.61  | 0.84  | 1.40  | -16.10 | 39.50  | 1.04  | 1.43  | 1.34  | 2.04  | 0.64  | 0.80  |
| بوکان         | -1.11 | 4.87  | 0.59  | 2.79  | -41.03 | 179.40 | 2.05  | 6.28  | 2.92  | 8.33  | 0.58  | 0.73  |
| نازلو         | -3.21 | -2.36 | 0.29  | 0.48  | -71.41 | -52.47 | 3.19  | 3.19  | 4.78  | 4.41  | 0.06  | 0.27  |
| خوی           | 0.49  | 2.93  | 2.19  | 8.03  | 118    | 702    | 0.83  | 3.26  | 1.03  | 4.30  | 0.25  | 0.11  |
| مهاباد        | -0.81 | 1.10  | 0.32  | 1.93  | -68.48 | 93.13  | 1.48  | 2.64  | 2.07  | 3.49  | -0.49 | -0.37 |
| ماکو          | 0.52  | 1.19  | 2.54  | 4.56  | 154    | 355    | 1.19  | 1.19  | 0.68  | 2.18  | 0.87  | 0.99  |
| میاندوآب      | -1.96 | 0.15  | 0.23  | 1.06  | -76.62 | 6.04   | 2.55  | 3.36  | 3.36  | 4.33  | -0.05 | -0.17 |
| نقده          | -1.91 | 0.40  | 0.19  | 1.17  | -81.29 | 16.98  | 3.12  | 3.12  | 2.88  | 3.70  | 0.32  | 0.17  |
| اشنویه        | -4.59 | -0.63 | 0.17  | 0.89  | -82.76 | -11.27 | 5.08  | 5.08  | 7.63  | 6.71  | 0.02  | 0.25  |
| پیرانشهر      | 0.17  | 1.70  | 1.20  | 3.04  | 20.19  | 203.83 | 0.69  | 2.03  | 1.05  | 2.97  | 0.36  | 0.16  |
| پلدشت         | -0.09 | 1.53  | 0.77  | 4.82  | -23.21 | 382.13 | 2.16  | 2.16  | 0.45  | 5.54  | 0.31  | -0.41 |
| قره ضیالالدین | -1.88 | 0.02  | 0.18  | 1.01  | -82.16 | 0.92   | 2.99  | 2.99  | 3.42  | 4.20  | -0.11 | -0.21 |
| سلماس         | -0.16 | 2.15  | 0.88  | 2.64  | -12.30 | 163.5  | 0.68  | 2.82  | 0.85  | 4.78  | 0.90  | 0.86  |
| سردشت         | -0.82 | 1.46  | 0.53  | 1.83  | -47.06 | 83.29  | 2.79  | 2.79  | 1.18  | 4     | 0.81  | 0.73  |
| شاهیندژ       | 0.29  | 5.61  | 1.11  | 3.20  | 11.18  | 219.9  | 1.95  | 6.28  | 2.29  | 7.50  | 0.86  | 0.80  |
| تکاب          | -0.17 | 7.40  | 0.89  | 5.93  | -11.40 | 493    | 1.63  | 7.40  | 2.46  | 11.17 | 0.81  | 0.93  |
| چالدران       | -2.30 | -0.22 | 0.15  | 0.55  | -84.56 | -44.95 | 3.44  | 3.44  | 4.23  | 4.52  | -0.38 | -0.37 |
| میانگین       | -1/05 | 1/64  | 0/77  | 2/67  | -23/24 | 166/47 | 3/50  | 1/73  | 4/95  | 2/51  |       |       |

جدول 4- نتایج تحلیل داده‌های بارشی محدود ایستگاهی با شاخص‌های دودویی

| نام ایستگاه    | POD   |       | FAR   |       | CSI   |       | TSS   |       | PC    |       | FBI   |       | HSS   |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP |
| ارومیه         | 0.73  | 0.73  | 0.73  | 0.39  | 0.52  | 0.50  | 0.41  | 0.38  | 0.13  | 0.69  | 0.54  | 1.20  | 0.37  | 0.13  |
| بوکان          | 0.60  | 0.60  | 0.70  | 0.65  | 0.65  | 0.29  | 0.30  | 0.16  | 0.18  | 0.57  | 0.54  | 1.70  | 0.13  | 0.14  |
| نازلو          | 0.64  | 0.82  | 0.61  | 0.61  | 0.32  | 0.36  | 0.18  | 0.23  | 0.57  | 0.54  | 1.64  | 2.09  | 0.15  | 0.18  |
| خوی            | 0.94  | 0.82  | 0.16  | 0.18  | 0.80  | 0.70  | 0.77  | 0.66  | 0.89  | 0.83  | 1.12  | 1     | 0.77  | 0.66  |
| مهاباد         | 0.54  | 0.77  | 0.63  | 0.47  | 0.28  | 0.45  | -0.01 | 0.36  | 0.49  | 0.66  | 1.46  | 1.46  | -0.01 | 0.33  |
| ماکو           | 0.83  | 0.92  | 0.44  | 0.39  | 0.50  | 0.58  | 0.49  | 0.61  | 0.71  | 0.77  | 1.50  | 1.50  | 0.43  | 0.55  |
| میاندوآب       | 0.55  | 0.45  | 0.68  | 0.71  | 0.22  | 0.25  | 0     | -0.05 | 0.49  | 0.49  | 1.73  | 1.55  | 0     | -0.04 |
| نقده           | 0.50  | 0.38  | 0.50  | 0.57  | 0.33  | 0.25  | 0.08  | -0.05 | 0.54  | 0.49  | 1     | 0.88  | 0.08  | -0.05 |
| اشنویه         | 0.57  | 0.81  | 0.33  | 0.15  | 0.44  | 0.71  | 0.14  | 0.60  | 0.57  | 0.80  | 0.86  | 0.95  | 0.14  | 0.59  |
| پیرانشهر       | 0.62  | 0.67  | 0.28  | 0.30  | 0.52  | 0.26  | 0.24  | 0.63  | 0.63  | 0.86  | 0.95  | 0.25  | 0.25  | 0.24  |
| پلدشت          | 0.67  | 0.75  | 0.50  | 0.47  | 0.40  | 0.45  | 0.32  | 0.40  | 0.66  | 0.69  | 1.33  | 1.42  | 0.30  | 0.37  |
| قره ضیال‌الدین | 0.83  | 0.67  | 0.44  | 0.50  | 0.50  | 0.40  | 0.49  | 0.32  | 0.71  | 0.66  | 1.50  | 1.33  | 0.43  | 0.30  |
| سلماس          | 0.79  | 0.68  | 0.06  | 0.07  | 0.75  | 0.65  | 0.73  | 0.62  | 0.86  | 0.80  | 0.84  | 0.74  | 0.72  | 0.61  |
| سردشت          | 0.78  | 0.94  | 0.18  | 0.23  | 0.67  | 0.74  | 0.60  | 0.65  | 0.80  | 0.83  | 0.94  | 1.20  | 0.60  | 0.65  |
| شاهیندژ        | 0.55  | 0.85  | 0.21  | 0.19  | 0.48  | 0.71  | 0.35  | 0.58  | 0.80  | 0.70  | 1.05  | 0.33  | 0.59  | 0.38  |
| تکاب           | 0.71  | 0.79  | 0.33  | 0.42  | 0.50  | 0.53  | 0.48  | 0.40  | 0.74  | 0.69  | 1.07  | 1.36  | 0.47  | 0.38  |
| چالدران        | 0.40  | 0.60  | 0.75  | 0.71  | 0.18  | 0.24  | -0.08 | 0     | 0.49  | 0.46  | 1.60  | 2.10  | -0.07 | 0     |
| میانگین        | 0/66  | 0/73  | 0/42  | 0/42  | 0/45  | 0/48  | 0/31  | 0/35  | 0/65  | 0/66  | 1/24  | 1/36  | 0/30  | 0/33  |

جدول 5- نتایج تحلیل داده‌های بارشی فراگیر ایستگاهی با شاخص‌های دودویی

| نام ایستگاه    | POD   |       | FAR   |       | CSI   |       | TSS   |       | PC    |       | FBI   |       | HSS   |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP | IMERG | GSMAP |
| ارومیه         | 0.8   | 0.80  | 0     | 0.20  | 0.80  | 0.67  | 0.80  | -0.20 | 0.83  | 0.67  | 0.80  | 1     | 0.57  | -0.20 |
| بوکان          | 1     | 0.75  | 0.20  | 0     | 0.80  | 0.75  | 0.50  | 0.75  | 0.83  | 0.83  | 1.25  | 0.75  | 0.57  | 0.67  |
| نازلو          | 0.67  | 0.83  | 0     | 0     | 0.67  | 0.83  | *     | *     | 0.67  | 0.83  | 0.67  | 0.83  | 0     | 0     |
| خوی            | 0.75  | 0.75  | 0.25  | 0     | 0.6   | 0.75  | 0.25  | 0.75  | 0.67  | 0.83  | 1     | 0.75  | 0.25  | 0.67  |
| مهاباد         | 0.67  | 0.67  | 0.6   | 0.50  | 0.33  | 0.40  | -0.33 | 0     | 0.33  | 0.50  | 1.67  | 1.33  | -0.33 | 0     |
| ماکو           | 1     | 1     | 0.75  | 0.80  | 0.25  | 0.20  | 0.40  | 0.20  | 0.50  | 0.33  | 4     | 5     | 0.18  | 0.08  |
| میاندوآب       | 0.80  | 0.60  | 0.20  | 0.25  | 0.67  | 0.50  | -0.2  | -0.40 | 0.67  | 0.50  | 1     | 0.80  | -0.20 | -0.29 |
| نقده           | 0.50  | 0.50  | 0     | 0     | 0.50  | 0.50  | *     | *     | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0     | 0     |
| اشنویه         | 0.80  | 0.80  | 0     | 0     | 0.80  | 0.80  | 0.80  | 0.80  | 0.83  | 0.83  | 0.80  | 0.80  | 0.57  | 0.57  |
| پیرانشهر       | 0.80  | 0.80  | 0     | 0     | 0.80  | 0.80  | 0.80  | 0.80  | 0.83  | 0.83  | 0.80  | 0.80  | 0.57  | 0.57  |
| پلدشت          | 0.33  | 0.67  | 0.50  | 0.33  | 0.25  | 0.50  | 0     | 0.33  | 0.5   | 0.67  | 0.67  | 1     | 0     | 0.33  |
| قره ضیال‌الدین | 0.75  | 0.75  | 0     | 0     | 0.75  | 0.75  | 0.75  | 0.75  | 0.83  | 0.83  | 0.75  | 0.75  | 0.67  | 0.67  |
| سلماس          | 0.80  | 0.60  | 0.25  | 0.50  | 0.80  | 0.50  | 0.80  | -0.40 | 0.83  | 0.50  | 0.80  | 0.80  | 0.57  | -0.29 |
| سردشت          | 0.6   | 1     | 0     | 0     | 0.60  | 1     | 0.60  | 1     | 0.67  | 1     | 0.60  | 1     | 0.33  | 1     |
| شاهیندژ        | 0.75  | 0.75  | 0.25  | 0.40  | 0.60  | 0.50  | 0.25  | -0.25 | 0.67  | 0.50  | 1     | 1.25  | 0.25  | -0.29 |
| تکاب           | 1     | 1     | 0.75  | 0.75  | 0.25  | 0.25  | 0.40  | 0.40  | 0.50  | 0.50  | 4     | 4     | 0.18  | 0.18  |
| چالدران        | 0.5   | 1     | 0.33  | 0.20  | 0.40  | 0.80  | 0     | 0.50  | 0.83  | 0.75  | 0.75  | 1.25  | 0     | 0.57  |
| میانگین        | 0/74  | 0/78  | 0/23  | 0/22  | 0/58  | 0/62  | 0/39  | 0/34  | 0/66  | 0/68  | 1/24  | 1/33  | -1/68 | 0/25  |

0/78 و در محصول GSMAP برابر 0/74 است بنابراین محصولIMERG بارش را قدری بهتر از محصول GSMAP تشخیص می‌دهد. مقدار متوسط شاخص FBI در 17 ایستگاه در محصولIMERG برابر 1/33 و در محصول GSMAP برابر 1/24 است بنابراین محصولIMERG روزهای بارش را قدری بیشتر از محصول

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید مقادیر متوسط نسبت هشدار اشتباه (FAR)، شاخص موفقیت بحرانی CSI، مقدار شاخص آماری مهارت واقعی (TSS)، نسبت صحیح (PC) در 17 ایستگاه در هر دو محصول بارشی ماهواره‌ای نزدیک به هم هستند. مقدار احتمال تشخیص (POD) متوسط در 17 ایستگاه در محصولIMERG برابر

### 3-7- تابع چگالی احتمال (PDF) شدت بارندگی‌های شش ساعته

در شکل (6) منحنی احتمال تجمعی و تابع چگالی احتمال داده‌های سینوپتیک در مقایسه با دو محصول بارشی ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی بارش در رویدادهای بارشی (1-0/0 میلی‌متر در شش ساعت) رخ می‌دهد. محصول GSMAP نسبت به محصول IMERG در بازتولید صحیح PDF رویدادهای ردیابی بارش عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد و به اشتباه برخی رویدادهای بارانی را به عنوان رویدادهای غیربارانی شناسایی می‌کند. تخمین بیش‌ازحد رویدادهای بارش 1/2-0 میلی‌متر و کم تخمینی بارش‌های 5-10 میلی‌متر در شش ساعت از دو محصول در شکل (6) باید توجه توسعه‌دهندگان الگوریتم قرار گیرد. محصول IMERG نسبت به محصول GSMAP در بازتولید صحیح PDF رویدادهای ردیابی بارش عملکرد خوبی دارد.

### 3-8- بررسی عملکرد محصولات در توزیع مکانی

توزیع مکانی شاخص‌های آماری می‌تواند به پیش‌بینی انتشار خطا در کاربردهای هیدرولوژیکی کمک کند. توزیع مکانی شاخص‌های آماری برای دو محصول ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه در شکل (7) نشان داده شده است. عملکرد مکانی دو محصول الگوهای مکانی نسبتاً مشابهی با مقادیر بالا در جنوب و شمال منطقه دارند. به دلیل تصحیح محصول IMERG\_F با داده‌های بارش ماهانه ایستگاهی و همین‌طور تصحیح محصول GSMaP\_G با داده‌های بارش روزانه ایستگاهی همبستگی بالاتری در بیشتر مناطق مورد مطالعه وجود دارد به‌طوری‌که بیش از 40 ایستگاه‌ها ضریب R بیشتر از 60٪ دارند. از نظر RMSE، تعداد ایستگاه‌های با مقدار RMSE کمتر یا مساوی 3 میلی‌متر در محصول (IMERG\_F) برابر حدود 70٪ است اما در خصوص محصول GSMaP\_G حدود 20٪ از تعداد کل ایستگاه‌ها را تشکیل می‌دهد.

توزیع مکانی شاخص‌های دودویی بر روی منطقه مورد مطالعه در شکل (8) نشان داده شده است. هر دو محصول بارشی ماهواره‌ای شباهت‌های قابل‌توجهی در توزیع مکانی همه شاخص‌های دودویی دارند. به‌طور کلی هر دو محصول با داشتن POD بالاتر و مقادیر FAR پایین در ایستگاه‌های نازلو، اشنویه، پیرانشهر، قره ضیاءالدین، سردشت، ارومیه، خوی، سلماس، بوکان و میاندوآب قابلیت تشخیص بارش بهتری در آن ایستگاه‌ها را دارند.

GSMAP تشخیص می‌دهد. شاخص امتیاز مهارت هیک (HSS) در هر دو محصول به یک‌میزان از 1 فاصله دارد.

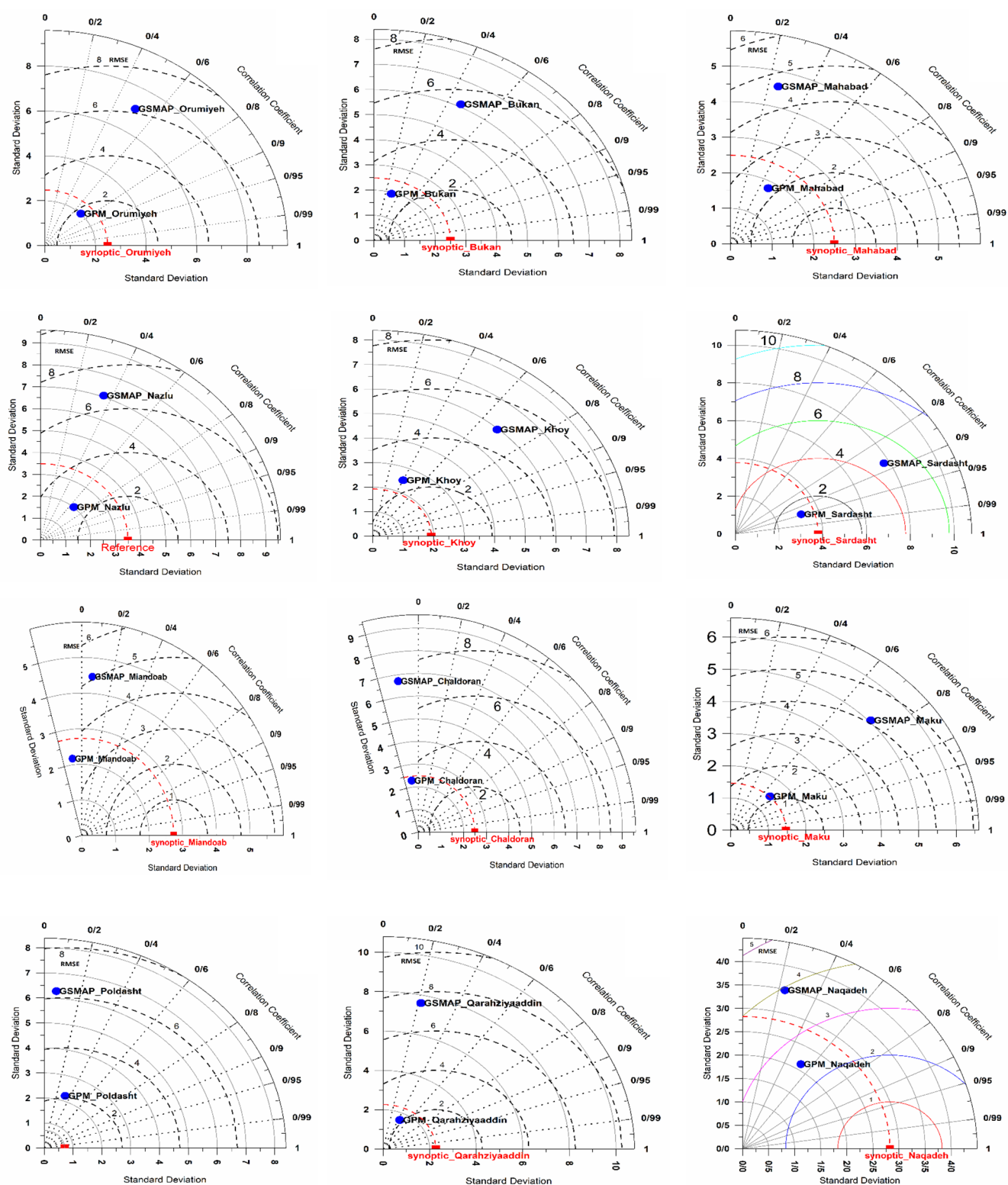
### 3-5- تحلیل داده‌های بارشی در مقیاس ایستگاهی با دیاگرام تیلور

دیاگرام تیلور تغییرات سه شاخص انحراف معیار استاندارد و ضریب همبستگی و کمترین مربعات خطا را در محصولات بارش ماهواره‌ای را با داده مشاهده‌ای می‌سنجد و هرچقدر مقادیر این سه شاخص در محصول بارش ماهواره‌ای به داده مشاهده‌ای رفرنس نزدیک باشد پیش‌بینی توسط ماهواره بهتر صورت گرفته است. اگر نقطه شبیه‌سازی به نقطه مشاهده‌شده نزدیک باشد، به این معنی است که از نظر انحراف معیار مشابه هستند، همبستگی آن‌ها زیاد است و RMSE آن‌ها نزدیک به صفر است. همچنین یک خط‌چین قرمز وجود دارد که نشان‌دهنده انحراف معیار سری زمانی مشاهده شده است. در شکل (3) موقعیت دو محصول بارشی ماهواره‌ای در مقایسه با داده مشاهده‌ای رفرنس برای هر 17 ایستگاه سینوپتیک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی 17 ایستگاه نقطه مربوط به ماهواره IMERG (که در شکل با GPM نمایش داده شده) نسبت به نقطه مربوط به ماهواره GSMAP به نقطه مشاهده شده نزدیک می‌باشد. بنابراین از نظر تحلیل نمودار تیلور محصول بارشی IMERG نسبت به محصول بارشی GSMAP در موقعیت برتری قرار دارد.

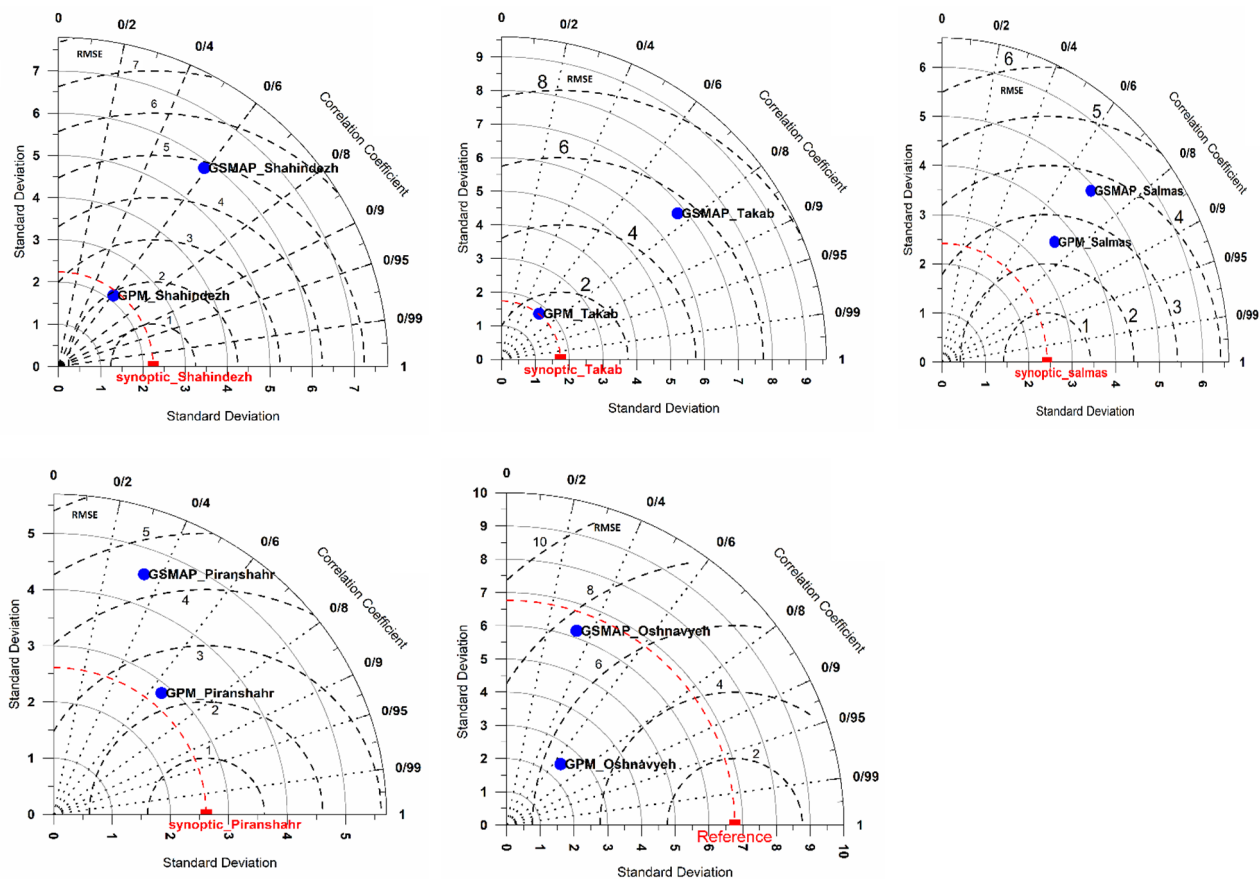
### 3-6- تحلیل عملکرد محصولات بارشی در ارتفاع

در شکل (4) عملکرد دو محصول بارشی در ارتفاع بر اساس شاخص‌های دودویی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در محدوده ارتفاعی 1000 تا 1500 متر دو محصول اختلاف زیادی ندارند اما در ارتفاع‌های بیش از 1500 و کمتر از 100 عملکرد محصول IMERG به مراتب بهتر از محصول GSMAP است که نشان می‌دهد ترکیب عوامل توپوگرافی زمین در الگوریتم محصول در منطقه مورد مطالعه کارا تر است.

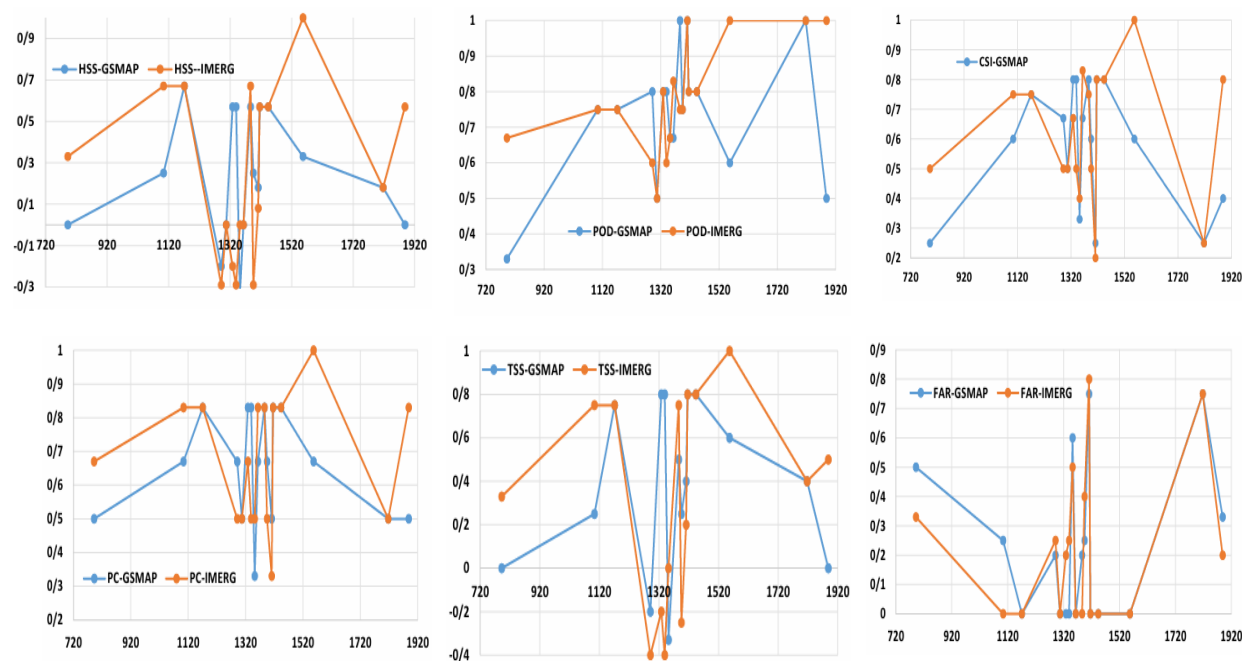
در شکل (5) عملکرد دو محصول بارشی در ارتفاع بر اساس شاخص‌های آماری نشان داده شده است. این شکل هم مجدداً تأیید می‌کند که در محدوده ارتفاعی 1000 تا 1500 متر دو محصول اختلاف زیادی ندارند اما در ارتفاع‌های بیش از 1500 و کمتر از 100 عملکرد محصول IMERG به مراتب بهتر از محصول GSMAP است که نشان می‌دهد ترکیب عوامل توپوگرافی زمین در الگوریتم محصول در منطقه مورد مطالعه کارا تر است.



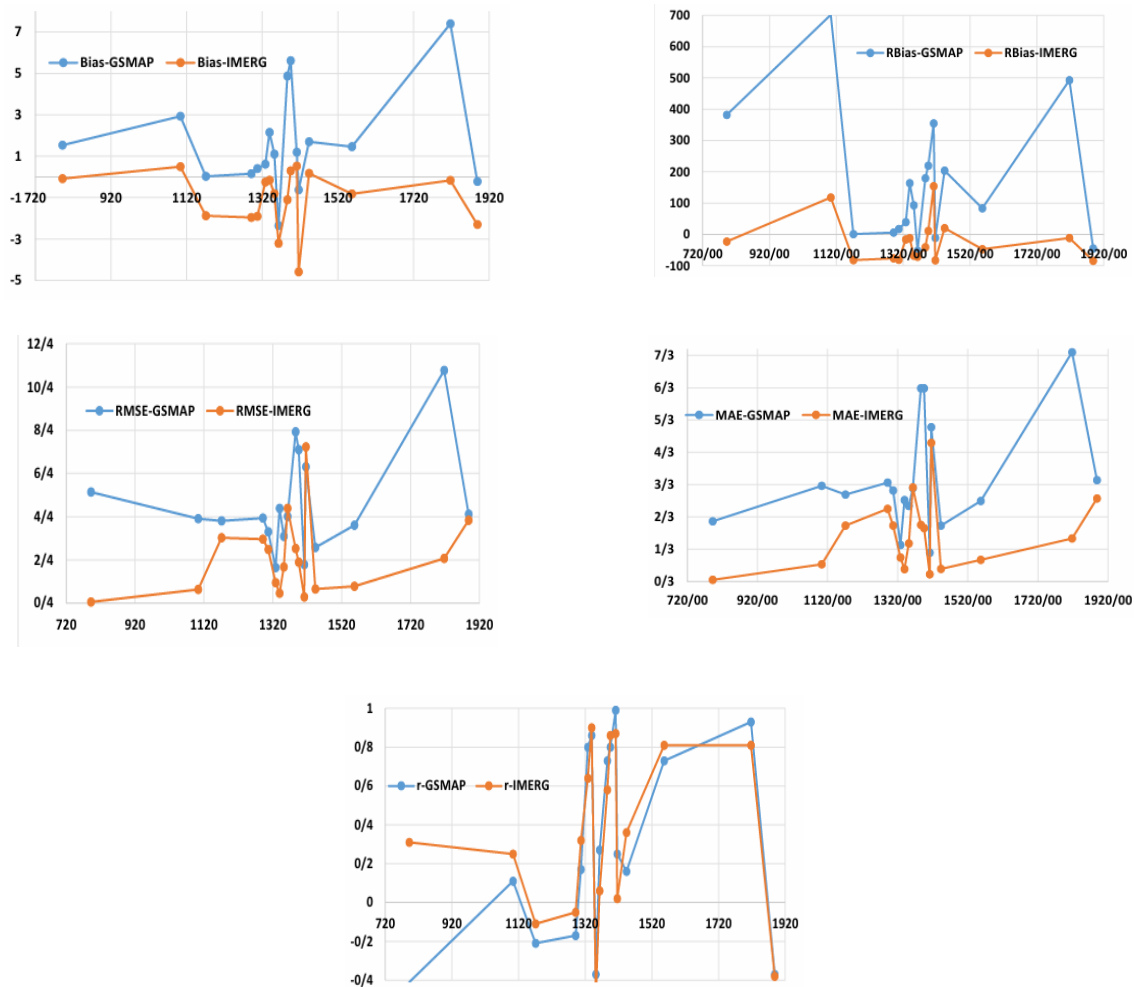
شکل 3- موقعیت دو محصول بارشی ماهواره‌ای شش ساعته در مقایسه با داده بارش شش ساعته مشاهده‌ای ایستگاه‌های سینوپتیک



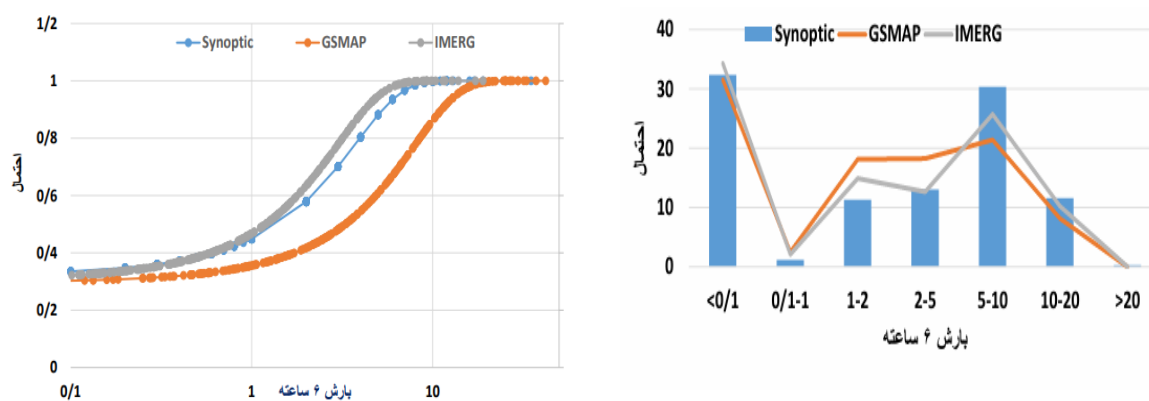
ادامه شکل 3- موقعیت دو محصول بارشی ماهواره‌ای شش ساعته در مقایسه با داده بارش شش ساعته مشاهده‌ای ایستگاه‌های سینوپتیک



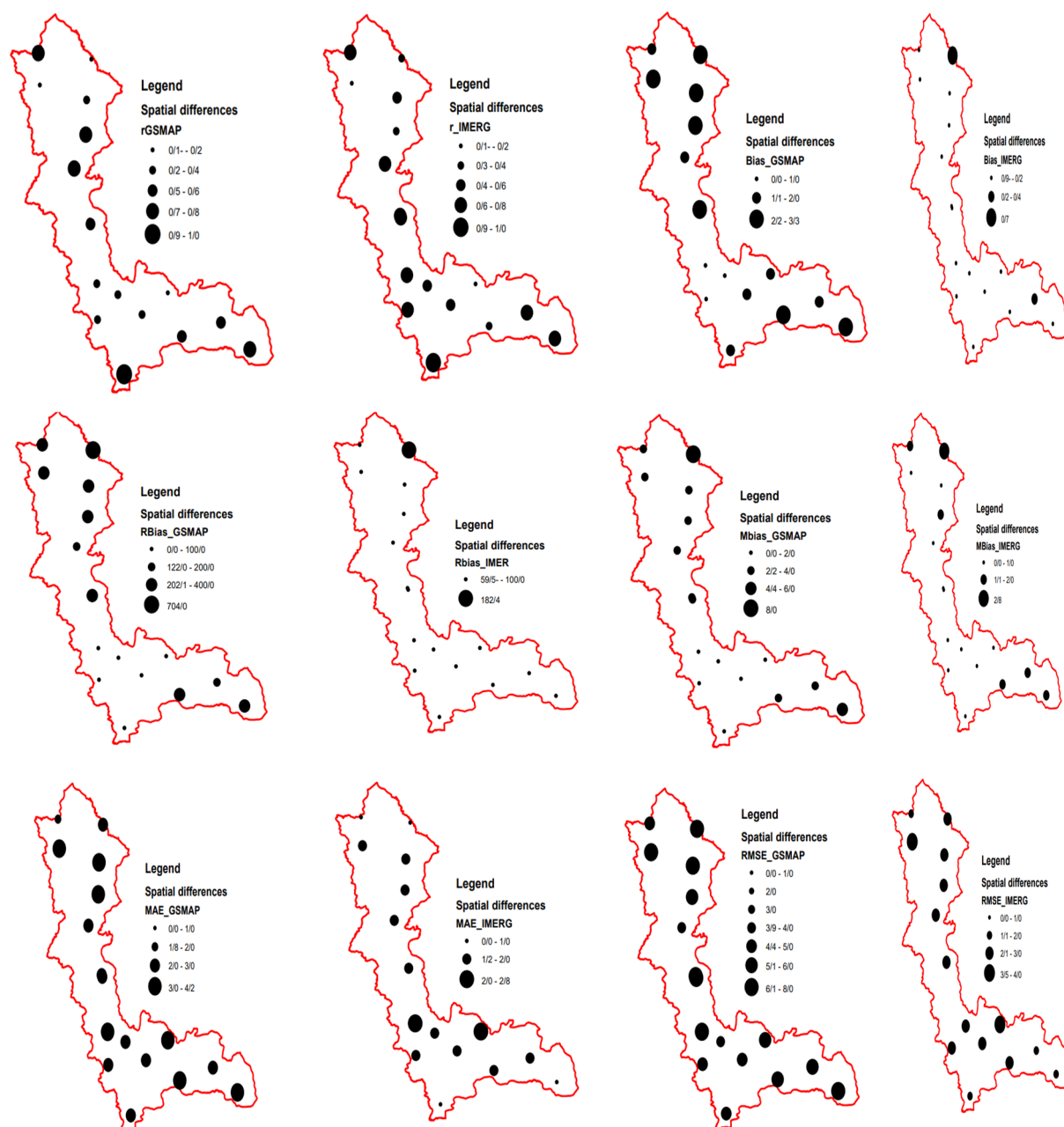
شکل 4- عملکرد دو محصول بارشی در ارتفاع بر اساس شاخص‌های دودویی



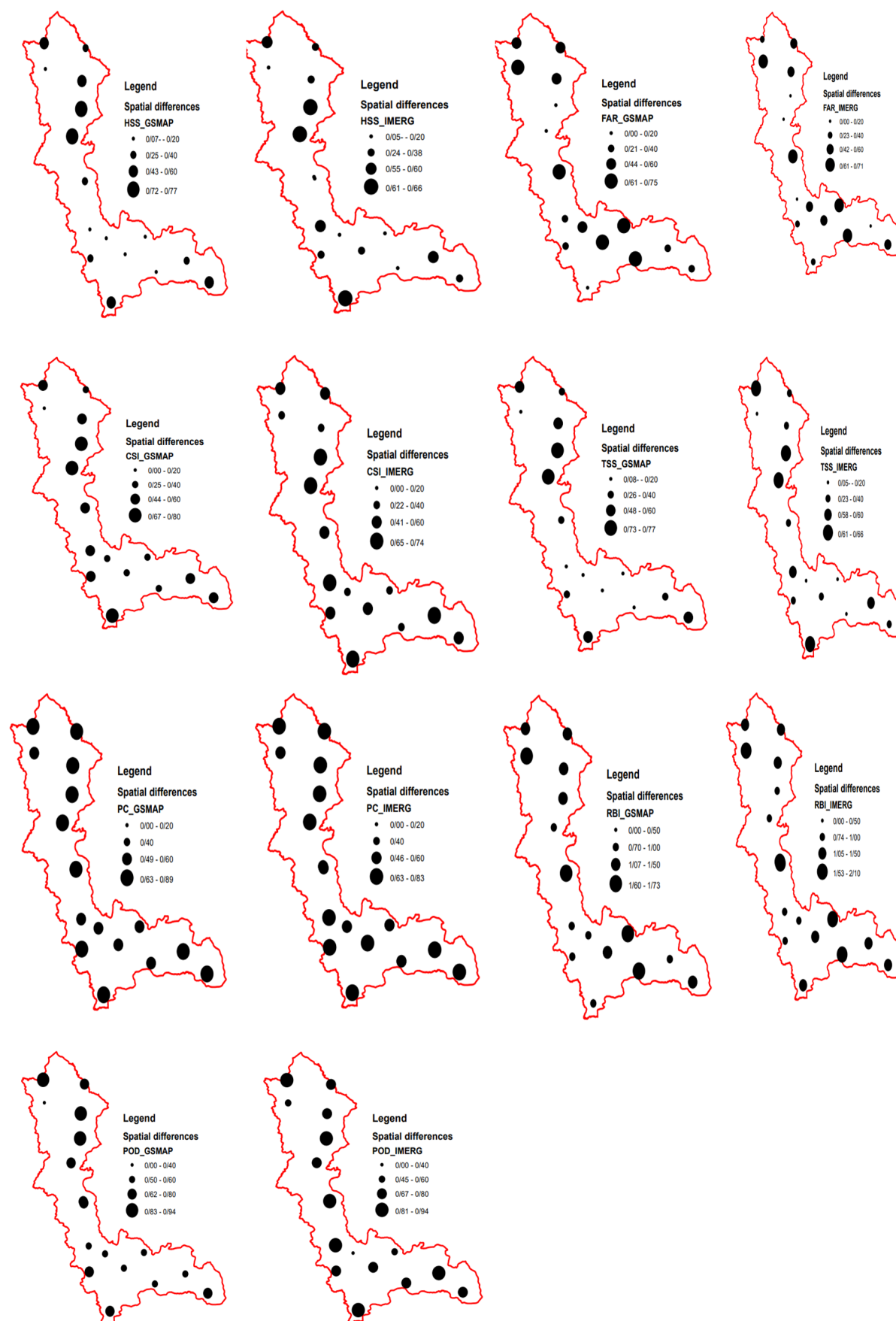
شکل 5- عملکرد دو محصول بارشی در ارتفاع بر اساس شاخص‌های آماری



شکل 6- منحنی احتمال تجمعی و تابع چگالی احتمال داده‌های سینوپتیک در مقایسه با دو محصول بارشی ماهواره‌ای



شکل 7- توزیع مکانی شاخص‌های آماری برای دو محصول ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه



شکل 8- توزیع مکانی شاخص‌های دودویی برای دو محصول ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه

## 4- بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه یک ارزیابی جامع از دو محصولIMERG\_F و GSMaP\_G با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا و دقیق در استان آذربایجان غربی در مقیاس 6 ساعته (زیر روزانه) از مارس تا ژوئن 2017 با داده‌های 17 ایستگاه مرجع ارائه می‌کند. از 6 معیار آماری R، MBias، RBias، Bias RMSE و MAE برای تجزیه و تحلیل کمی دقت محصولات باشی ماهواره‌ای استفاده شده و از 7 معیار دودویی طبقه‌بندی شده POD، TSS، PC، FBI، HSS، FAR CSI برای ارزیابی قابلیت تشخیص بارش در محصولات ماهواره‌ای در این مطالعه استفاده شده است. اگرچه محصول بارشی IMERG\_F توسط داده‌های ماهانه ایستگاه مرکز جهانی بارش (GPCC) و سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) و محصول بارشی GSMaP\_G توسط بارش‌های روزانه مرکز پیش‌بینی اقلیم (CPC) تصحیح شده‌اند؛ اما ضریب رگرسیون بالا بین داده‌های بارشی ماهواره‌ای و آن ایستگاه‌های سنوپتیکی که در آن‌ها داده‌های باران‌سنج GPCC و CPC قرار ندارند نشان‌دهنده اعتبار این پژوهش است. نتیجه‌گیری کلی پژوهش به شرح زیر است:

- 1) محصول IMERG\_F در مقایسه با محصول GSMaP\_G بهترین عملکرد را در مقیاس‌های زمانی شش ساعته (کمتر از روزانه) در منطقه دارد. در مقایسه با مشاهدات ایستگاه‌ها، محصول IMERG\_F میزان بارش را دست‌کم می‌گیرد، درحالی‌که محصول GSMaP\_G بیش‌ازحد تخمین زده می‌شوند.
- 2) در تحلیل با دیاگرام تیلور در همه ایستگاه‌ها نقطه مربوط به ماهواره IMERG\_F نسبت به نقطه مربوط به ماهواره GSMaP\_G به نقطه مشاهده‌شده نزدیک‌تر بود و در نتیجه محصول IMERG\_F بهتر از محصول GSMaP\_G می‌باشد.
- 3) عملکرد هر دو محصول دارای تنوع مکانی نسبتاً مشابهی از نظر شاخص‌های آماری و دودویی دارند.
- 4) محصول IMERG\_F در مقایسه با محصول GSMaP\_G می‌تواند PDF شدت بارش را در مقیاس کمتر از روزانه را بهتر بازتولید کند. در منطقه بیشترین فرکانس بارش در محدوده 0/0-1 میلی‌متر و 5-10 میلی‌متر در شش ساعت رخ می‌دهد و کمترین فراوانی بارندگی در شدت بارندگی بیش از 20 میلی‌متر در شش ساعت ظاهر می‌شود. محصول IMERG\_F از نظر فرکانس به‌خوبی با مشاهدات ایستگاهی، زمانی که شدت بارش بیشتر از 8 میلی‌متر و کمتر از 1 میلی‌متر در شش ساعت است، موافق هست.
- 5) هر دو محصول بارشی ماهواره‌ای در ارتفاعات متوسط شبیه به هم عمل می‌کنند اما در ارتفاعات خیلی بالا و خیلی پایین IMERG\_F عملکرد بهتری نسبت به GSMaP\_G دارد.

## 5- مراجع

- Anjum MN, Ahmad I, Ding Y, Shangguan D, Zaman M, Ijaz MW, Yang M, "Assessment of IMERG-V06 precipitation product over different hydro-climatic regimes in the Tianshan Mountains", North-Western China, Remote Sensing, 2019, 11 (19), 2314. <https://doi.org/10.3390/rs11192314>
- Anjum MN, Ding Y, Shangguan D, Ahmad I, Ijaz MW, Farid HU, Adnan M, "Performance evaluation of latest integrated multi-satellite retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the northern highlands of Pakistan", Atmospheric Research, 2018, 205, 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.010>
- Beria H, Nanda T, Singh Bisht D, Chatterjee C, "Does the GPM mission improve the systematic error component in satellite rainfall estimates over TRMM? An evaluation at a pan-India scale", Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21 (12), 6117-6134. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6117-2017>
- Biswas SK, Chandrasekar V, "Cross-validation of observations between the GPM dual-frequency precipitation radar and ground based dual-polarization radars", Remote Sensing, 2018, 10 (11), 1773. <https://doi.org/10.3390/rs10111773>
- Carr N, Kirstetter PE, Hong Y, Gourley JJ, Schwaller M, Petersen W, Xue X, "The influence of surface and precipitation characteristics on TRMM Microwave Imager rainfall retrieval uncertainty", Journal of Hydrometeorology, 2015, 16 (4), 1596-1614. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-14-0194.1>
- Chang NB, Hong Y, (Eds.), "Multiscale hydrologic remote sensing: Perspectives and applications", CRC Press.
- Chen F, Li X, "Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China", Remote Sensing, 2016, 8 (6), 472. <https://doi.org/10.3390/rs8060472>
- Chen G, Lan R, Zeng W, Pan H, Li W, "Diurnal variations of rainfall in surface and satellite observations at the monsoon coast (South China)", Journal of Climate, 2018, 31 (5), 1703-1724. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0373.1>
- Chen S, Hong Y, Gourley JJ, Huffman GJ, Tian Y, Cao Q, Xue X, Evaluation of the successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis over the Continental United States", Water Resources Research, 2013, 49 (12), 8174-8186. <https://doi.org/2012/10.1002/wr012795>
- Derin Y, Yilmaz KK, "Evaluation of multiple satellite-based precipitation products over complex topography", Journal of Hydrometeorology, 2014, 15 (4), 1498-1516. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-13-0191.1>
- Dinku T, Chidzambwa S, Ceccato P, Connor SJ, Ropelewski, CF, "Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain", International Journal of Remote Sensing, 2008, 29 (14), 4097-4110. <https://doi.org/10.1080/01431160701772526>
- Fang J, Yang W, Luan Y, Du J, Lin A, Zhao L, "Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for

- IMERG and TRMM 3B42 over Far-East Asia", Atmospheric Research, 2017, 187, 95-105.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.12.007>
- Lakshmi V, "Remote sensing of the terrestrial water cycle", (Vol. 206), John Wiley & Sons, 2014.
- Li R, Shi J, Ji D, Zhao T, Plermkamon V, Moukomla S, Kruasilp J, "Evaluation and hydrological application of TRMM and GPM precipitation products in a tropical monsoon basin of Thailand", Water, 2019, 11 (4), 818. <https://doi.org/10.3390/w11040818>
- Liu CY, Aryastana P, Liu GR, Huang WR, "Assessment of satellite precipitation product estimates over Bali Island", Atmospheric Research, 2020, 244, 105032. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105032>
- Liu J, Du J, Yang Y, Wang Y, "Evaluating extreme precipitation estimations based on the GPM IMERG products over the Yangtze River Basin, China", Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11 (1), 601-618.  
<https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1734103>
- Lu D, Yong B, "Evaluation and hydrological utility of the latest GPM IMERG V5 and GSMaP V7 precipitation products over the Tibetan Plateau", Remote Sensing, 2018, 10 (12), 2022.  
<https://doi.org/10.3390/rs10122022>
- Ma Y, Tang G, Long D, Yong B, Zhong L, Wan W, Hong Y, "Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau", Remote sensing, 2016, 8 (7), 569.  
<https://doi.org/10.3390/rs8070569>
- Nepal B, Shrestha D, Sharma S, Shrestha MS, Aryal D, Shrestha N, "Assessment of GPM-Era Satellite Products' (IMERG and GSMaP) ability to detect precipitation extremes over mountainous country Nepal", Atmosphere, 2021, 12 (2), 254.  
<https://doi.org/10.3390/atmos12020254>
- Prakash S, Mitra AK, AghaKouchak A, Liu Z, Norouzi H, Pai DS, "A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region", Journal of Hydrology, 2018, 556, 865-876.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.029>
- Sharifi E, Steinacker R, Saghaian B, "Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results", Remote Sensing, 2016, 8 (2), 135.  
<https://doi.org/10.3390/rs8020135>
- Shi J, Yuan F, Shi C, Zhao C, Zhang L, Ren L, Liu Y, "Statistical evaluation of the latest GPM-Era IMERG and GSMaP satellite precipitation products in the Yellow River source region", Water, 2020, 12 (4), 1006. <https://doi.org/10.3390/w12041006>
- Sunilkumar K, Narayana Rao T, Saikranthi K, Purnachandra Rao M, "Comprehensive evaluation of multisatellite precipitation estimates over India using gridded rainfall data", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120 (17), 8987-9005.  
<https://doi.org/10.1002/2015jd023437>
- Tan ML, Duan Z, "Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore", Remote Sensing, 2017, 9 (7), 720.
- extreme precipitation analysis over China", Atmospheric Research, 2019, 223, 24-38.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.001>
- Gebregiorgis AS, Kirstetter PE, Hong YE, Gourley JJ, Huffman GJ, Petersen WA, Schwaller MR, "To what extent is the day 1 GPM IMERG satellite precipitation estimate improved as compared to TRMM TMPA-RT?", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123 (3), 1694-1707.  
<https://doi.org/10.1002/2017jd027606>
- Guo H, Chen S, Bao A, Behrangi A, Hong Y, Ndayisaba F, Stepanian PM, "Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China", Atmospheric Research, 2016, 176, 121-133.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.020>
- Guo H, Chen S, Bao A, Hu J, Gebregiorgis AS, Xue X, Zhang X, "Inter-comparison of high-resolution satellite precipitation products over Central Asia", Remote Sensing, 2015, 7 (6), 7181-7211.  
<https://doi.org/10.3390/rs70607181>
- Habib E, Henschke A, Adler RF, "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.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.06.015>
- He Z, Yang L, Tian F, Ni G, Hou A, Lu H, "Intercomparisons of rainfall estimates from TRMM and GPM multisatellite products over the Upper Mekong River Basin", Journal of Hydrometeorology, 2017, 18 (2), 413-430.  
<https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0198.1>
- Hisam E, Mehr AD, Alganci U, Seker DZ, "Comprehensive evaluation of Satellite-Based and reanalysis precipitation products over the Mediterranean region in Turkey", Advances in Space Research, 2023, 71 (7), 3005-3021.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.007>
- Hou AY, Kakar RK, Neeck S, Azarbarzin AA, Kummerow CD, Kojima M, Iguchi T, "The global precipitation measurement mission", Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95 (5), 701-722.  
<https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00164.1>
- Huang WR, Liu PY, Chang YH, Liu CY, "Evaluation and application of satellite precipitation products in studying the summer precipitation variations over Taiwan", Remote Sensing, 2020, 12 (3), 347.  
<https://doi.org/10.3390/rs12030347>
- Hussain Y, Satgé F, Hussain MB, Martinez-Carvajal H, Bonnet MP, Cárdenas-Soto M, Akhter G, "Performance of CMORPH, TMPA, and PERSIANN rainfall datasets over plain, mountainous, and glacial regions of Pakistan", Theoretical and applied climatology, 2018, 131, 1119-1132.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-016-2027-z>
- Kim JP, Jung IW, Park KW, Yoon SK, Lee D, "Hydrological utility and uncertainty of multi-satellite precipitation products in the mountainous region of South Korea", Remote Sensing, 2016, 8 (7), 608.  
<https://doi.org/10.3390/rs8070608>
- Kim K, Park J, Baik J, Choi M, "Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM

- emphasis on hydrologic forecasting", *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6 (4), 497-517.  
<https://doi.org/10.1175/jhm431.1>
- Yuan F, Zhang L, Win KWW, Ren L, Zhao C, Zhu Y, Liu Y, "Assessment of GPM and TRMM multi-satellite precipitation products in streamflow simulations in a data-sparse mountainous watershed in Myanmar", *Remote Sensing*, 2017, 9 (3), 302.  
<https://doi.org/10.3390/rs9030302>
- Zhang Z, Tian J, Huang Y, Chen X, Chen S, Duan Z, "Hydrologic evaluation of TRMM and GPM IMERG satellite-based precipitation in a humid basin of China", *Remote Sensing*, 2019, 11 (4), 431.  
<https://doi.org/10.3390/rs11040431>
- Zhou Z, Guo B, Xing W, Zhou J, Xu F, Xu Y, "Comprehensive evaluation of latest GPM era IMERG and GSMaP precipitation products over mainland China", *Atmospheric Research*, 2020, 246, 105132.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105132>
- <https://doi.org/10.3390/rs9070720>
- Tan ML, Santo H, "Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia", *Atmospheric Research*, 202, 63-76.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006>
- Tang G, Clark MP, Papalexiou SM, Ma Z, Hong Y, "Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets", *Remote sensing of environment*, 2020, 240, 111697.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>
- Tang G, Ma Y, Long D, Zhong L, Hong Y, "Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales", *Journal of hydrology*, 2016, 533, 152-167.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.008>
- Tian Y, Peters-Lidard CD, "A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements", *Geophysical Research Letters*, 2010, 37 (24).  
<https://doi.org/10.1029/2010gl046008>
- Turk FJ, Miller SD, "Toward improved characterization of remotely sensed precipitation regimes with MODIS/AMSR-E blended data techniques", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43 (5), 1059-1069.  
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2004.841627>
- Veerakachen W, Raksapatcharawong M, Seto S, "Performance evaluation of global satellite mapping of precipitation (gsmap) products over the chaophraya river basin, Thailand", *Hydrological Research Letters*, 2014, 8 (1), 39-44.  
<https://doi.org/10.3178/hrl.8.39>
- Vergara H, Hong Y, Gourley JJ, Anagnostou EN, Maggioni V, Stampoulis D, Kirstetter PE, "Effects of resolution of satellite-based rainfall estimates on hydrologic modeling skill at different scales", *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15 (2), 593-613.  
<https://doi.org/10.1175/jhm-d-12-0113.1>
- Wang X, Ding Y, Zhao C, Wang J, "Similarities and improvements of GPM IMERG upon TRMM 3B42 precipitation product under complex topographic and climatic conditions over Hexi region, Northeastern Tibetan Plateau", *Atmospheric research*, 2019, 218, 347-363.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.011>
- Wei G, Lü H, T Crow W, Zhu Y, Wang J, Su J, "Evaluation of satellite-based precipitation products from IMERG V04A and V03D, CMORPH and TMPA with gauged rainfall in three climatologic zones in China", *Remote Sensing*, 2017, 10 (1), 30.  
<https://doi.org/10.3390/rs10010030>
- Xu F, Guo B, Ye B, Ye Q, Chen H, Ju X, Wang Z, "Systematical evaluation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 precipitation products in the Huang-Huai-Hai Plain, China", *Remote Sensing*, 2019, 11 (6), 697.  
<https://doi.org/10.3390/rs11060697>
- Yilmaz KK, Hogue TS, Hsu KL, Sorooshian S, Gupta HV, Wagener T, "Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with