Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 1-19

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Merging rainfall data of ground and satellite measurements in order to correct and improve the performance of data at the catchment area (Case study: Mond Basin)

A. Eskandari[1], H. Zarei[2]*, A. Hooshmand[3] and A. Akhondali[4]

1- Graduated with a PhD in water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (zareih@scu.ac.ir)*
3- professor, Department of Irrigation and Drainage, Facualty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran..

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 17 July 2019
Revised: 14 September 2019
Accepted: 16 September 2019

Keywords:
spatial distribution of precipitation, ground rain-gage, satellite precipitation, conditional merging method, Mond basin.

TO CITE THIS ARTICLE:

Eskandari, A., Zarei, H., Hooshmand, A., Akhondali, A. M. (2025). 'Merging rainfall data of ground and satellite measurements in order to correct and improve the performance of data at the catchment area (Case study: Mond Basin)', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 1-19. doi: 10.22055/jise.2020.30239.1863.

Introduction

Estimation of precipitation as one of the most important factors affecting human life and activities is one of the most important issues of interest among decision makers such as water resource managers, farmers, industry owners, and in general, water and climate researchers, especially in arid and semi-arid regions of the world. However, so far, access to real rainfall in the basins, especially the mountainous basins, is a vague and complicated issue. Precise measurements of precipitation in not usually possible in these basins due to environmental conditions and relatively moderate spatial changes in rainfall.

At present, there are various methods and tools for measuring rainfall or estimating it (Barrett, 1970, Rabiei et al., 2013), which includes: 1) Ground rain-gauge stations 2) Ground radars 3) Satellite estimates. But the most common method is to measure rainfall are meteorological radar Cremonini et al, (2015) and ground rain gauge stations (Acquaotta et al., 2016). The ground rain-gauge stations are usually used by sensors or rain measuring devices. They represent direct measurements of rainfall over the ground (precipitation depth), but they are not able to transmit the spatial pattern of precipitation (Huff, 1970). Meteorological radars and satellite data, on the other hand, are capable of recording and estimating rainfall data with high spatial and temporal resolution. However, considering the variable rainfall uncertainties in this type of data, they are not able to

accurately estimate rainfall (Jordan et al. 2000). To solve this inherent problem, there is a need for a methodology that uses all methods of rainfall measurement in the best way. The most commonly used method for reconstructing the precipitation rate with higher accuracy is based on comparison of satellite observations or meteorological radars with ground measurements recorded by rain gauge stations that are spatially dispersed appropriately. In this research, in order to combine and correct the rainfall data, appropriate methods for the integration and correction of rainfall data using rain gauge stations and satellite images at the basin level have been used.

Materials and methods

A variety of methods have been developed for creating a relationship between rainfall measurement methods at the basin level (Goudenhoofdt and Delobbe, 2009). Currently, Kriging with the correction of satellite-based error or simple Kriging and the conditional merging method Ehret (2002), Sinclair and Pegram (2005) is the most appropriate method for due to the high quality of the results and because of its simplicity and computational efficiency. In this research, the conditional merging method and the methods based on it have been used. In this method, ground rainfall data and satellite data are merged, then information on the expansion of combined data at the basin level are obtained by using Kriging geostatistical methods.

Conditional merging method

Conditional merging (CM) using a satellite network is in order to estimate ordinary kriging error at the rain gauge and attempt to correct it. First, the satellite values (S) at each station (G) are used to provide kriging KS(g). Then, this field decreases from the initial satellite precipitation to get the error map. Finally, the error value is added to the interpolated values of the rain gauge station by the Kriging KG(g) method (Goudenhoof and Delobbe, 2009). The final formula is expressed by relation (1):

$$CM = S - K_{S(g)} + K_{G(g)} \tag{1}$$

Bias field conditional merging method

This method is calculated by dividing the initial values of the satellite's precipitation, the interpolated satellite values using the Kriging method, and eventually multiplying it by the result of the Kriging interpolation in the ground station values, which is expressed in terms of relation (2):

$$BFCM = (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)} \tag{2}$$

This method introduces some of the partial problems associated with division by zero or even indefinite forms, but the approach taken in these cases simply assumed that the final value is zero.

Mean conditional merging

The second method, called the mean conditional merging method, is expressed in terms of relation (3), which represents the average between (CM) and (BFCM).

$$MCM = \frac{S - K_{S(g)} + K_{G(g)} + (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)}}{2} \tag{3}$$

Since all the methods presented here are based on spatial algorithms applying to a set of points, the presence of a compressed rain-gage network provides more accurate results.

Results and discussion

The validation process is carried out through the methods used to merge and modify rainfall at the catchment area with the help of rain gauge stations and satellite rainfall values, by comparing the values of images and maps derived from methods based on the conditional merging with observational values of the ground stations using criterion and statistical analysis, the results of which have been presented in Table (1).

According to the results presented in Table (1) and by comparing statistical analyzes based on the results of each method with observational data, all three methods used for merging and correcting rainfall in the catchment area have close and acceptable results and there is a significant correlation with ground data, however, in order to select and propose a suitable method for merging and correcting rainfall with both spatial distribution characteristics and preserving the precipitation rate, it can be said that the conditional merging method has better and more acceptable results and was determined as the appropriate method.

Table 1- Statistical analysis results of the comparison between estimates of each method and rain gauge observations

Rain event	Method	MAE	MBE	RMSE	bais	Pbais	SD	R^2
93/09/02-05	CM	15.11	-4.18	18.58	-0.07	-7.03	18.10	0.98
	BFCM	15.18	-4.07	18.68	-0.07	-6.84	18.22	0.97
	MCM	15.13	-4.12	18.62	-0.07	-6.93	18.16	0.98
93/12/26-27	CM	15.96	-11.31	19.99	-0.35	-35.21	16.39	0.98
	BFCM	15.93	-11.40	20.02	-0.35	-35.48	16.37	0.98
	MCM	15.94	-11.35	20.00	-0.35	-35.34	16.38	0.98
94/01/01-03	CM	23.40	-20.50	25.48	-0.91	-91.12	15.25	0.98
	BFCM	23.39	-20.43	25.41	-0.91	-90.81	15.22	0.98
	MCM	23.40	-20.46	25.44	-0.91	-90.96	15.23	0.98
94/07/19-20	CM	19.24	4.31	25.22	0.09	8.90	25.02	0.99
	BFCM	19.28	4.30	25.19	0.09	8.88	24.98	0.98
	MCM	19.24	4.30	25.20	0.09	8.88	25.00	0.99
94/10/03-05	CM	28.67	28.08	36.59	0.64	63.67	23.62	0.99
	BFCM	28.68	28.14	37.29	0.64	63.82	24.63	0.96
	MCM	28.67	28.11	36.91	0.64	63.75	24.08	0.98

Conclusion

The purpose of this study was to modify and improve the performance of rainfall data at the watershed area by using the combination of rainfall and satellite data using geostatistical analysis and merging methods. Accordingly, the statistical analysis criteria had been used for comparing the results of regional rainfall (distributed at the area) by the different merging methods used in the study with observational values of the network of ground stations at the catchment area. The results showed that the regional precipitation values estimated from the conditional merging method provided better results, so that the merged precipitation values retained the precipitation rates of the ground station and has improved the spatial distribution of rainfall on the watershed area relative to the satellite rainfall. In general, this study shows the validity of the conditional merging method for estimating and merging land and satellite data in order to modify regional rainfall in the Mond basin.

Acknowledgment

All the respected officials of regional water experts of Fars and Bushehr, thank you for your great cooperation in providing the required information and also Shahid Chamran University of Ahvaz.

Refrences

1- Acquaotta, F., Fratianni, S., and Venema, V., 2016. Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. International Journal of Climatology 36,pp. 3963-3974. DOI: 10.1002/joc.4606.

2- Barrett, E. C., 1970. The estimation of monthly rainfall from satellite data. Monthly weather review 98,pp 322-327. DOI: 10.1175/1520-0493(1970)098<0322:TEOMRF>2.3.CO;2.

3- Cremonini, R., Tiranti, D. and Barbero, S., 2015. The urban flooding early warning system of the greater Turin (North-Western Italy) based on weather-radar observations. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* (pp. 837-842). Springer International Publishing.

4- Ehret, U., 2002. Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. *University of Stuttgart, Germany*.

5- Goudenhoofdt, E. and Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(2), pp.195-203.

6- Huff, F.A., 1970. Sampling errors in measurement of mean precipitation. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, pp.35-44.

7- Jordan, P., Seed, A. and Austin, G., 2000. Sampling errors in radar estimates of rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *105*(D2), pp.2247-2257. DOI: 10.1029/1999JD900130.

8- Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M. and Fitzner, D., 2013. Rainfall estimation using moving cars as rain gauges–laboratory experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(11), pp.4701-4712..

9- Sinclair, S. and Pegram, G., 2005. Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, *6*(1), pp.19-22.DOI: 10.1002/asl.85.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۱۹-۱

ارزیابی روش‌های ترکیب داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی و ماهواره‌ای در تصحیح و بهبود عملکرد داده‌های بارش در سطح حوضه (مطالعه موردی: حوضه آبریز مند)

علی اسکندری[۱]، حیدر زارعی[۲*]، عبدالرحیم هوشمند[۳] و علی محمد آخوندعلی[۴]

۱- دانش آموخته‌ی دکتری منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران zareih@scu.ac.ir

۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

۴- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

چکیده

تخمین دقیق بارندگی در سطح به خصوص در مناطق کوهستانی، به علت تغییرات مکانی بارش، یک مساله مهم به‌شمار می‌آید. روش معمول اندازه‌گیری بارش، اندازه‌گیری مستقیم آن در ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی، تحت عنوان بارش نقطه‌ای است. امروزه برآورد توزیع مکانی بارندگی، با ترکیب اطلاعات حاصل از سنجنده‌های مختلف، مورد توجه قرار گرفته است. نظارت بر رویدادهای شدید بارندگی مستلزم اندازه گیری هر چه دقیق‌تر بارش با استفاده از ترکیب داده‌های راداری و ماهواره‌ای، با مقادیر زمینی است. در این پژوهش به منظور اصلاح داده‌های بارش نقطه‌ای و برآورد توزیع مکانی بارندگی از روش‌های ترکیب وضعیت و برخی از روابط تجربی که براساس آن اجرا می‌شوند در رگبارهای مختلف طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵، در حوضه آبریز مند، واقع در استان‌های فارس و بوشهر در جنوب ایران استفاده شد. براساس تجزیه و تحلیل‌های آماری صورت گرفته بین مقادیر بارش سطح به‌دست آمده از روش‌های ترکیب وضعیت شامل (CM، BFCM و MCM) و بارش مشاهده‌ای شبکه زمینی، روش‌های مورد استفاده به‌طور متوسط به‌ترتیب با میزان RMSE ۲۵/۱۷، ۲۵/۳۲ و ۲۵/۲۳ دقت قابل قبولی دارند. در مقایسه با مقادیر بارندگی به‌دست آمده از روش کریجینگ، نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی دارای تمایل به توزیع مکانی بارندگی شبیه داده‌های ماهواره ای با حفظ مقادیر پارامترهای آماری بارش زمینی می‌باشند به طوری که میانگین بارش مطلوب منطقه‌ای به‌دست آمده از روش ترکیب وضعیت (CM) بسیار شبیه به مقدار به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی است.

کلید واژه‌ها: توزیع مکانی بارش، بارانسنجی زمینی، بارش ماهواره‌ای، روش ترکیب وضعیت، حوضه مند.

مقدمه

تخمین باران به‌عنوان مهمترین عامل مؤثر بر حیات و فعالیت‌های بشر، یکی از مهمترین موضوعات مورد علاقه‌ی تصمیم سازان از قبیل مدیران منابع آب، کشاورزان، صاحبان صنایع و به‌طور کلی محققان حوضه‌ی آب و اقلیم شناسی به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک جهان بوده است. این در حالی است که تا کنون دسترسی به میزان بارندگی واقعی درسطح حوضه‌ها خصوصاً حوضه‌های کوهستانی به عنوان یک مساله مبهم و پیچیده مطرح است. اندازه‌گیری دقیق باران معمولاً در این گونه حوضه‌ها به‌دلیل شرایط محیطی و تغییرات مکانی نسبتاً شدید بارش، امکان‌پذیر نیست. به همین منظور تجزیه و تحلیل، نظارت و پیش‌بینی رویدادهای شدید مستلزم اندازه‌گیری دقیق میزان بارش است (Zandonadi et al. 2016).

در حال حاضر، روش‌ها و ابزار های مختلفی برای اندازه‌گیری بارش و یا تخمین آن وجود دارد Barrett (1970) ، Rabiei et al (2013) که شامل: ۱) ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی ۲) رادارهای زمینی ۳) برآورد های ماهواره‌های است. در این بین رایج‌ترین روش برای اندازه گیری بارش رادارهای هواشناسی Cremonini et al (2015) و ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی هستند (Acquaotta et al., 2016). در ایستگاه‌های بارانسنجی زمینی معمولا از سنسور یا دستگاه‌های اندازه‌گیری باران استفاده می‌شود. مقادیر به‌دست آمده از آن‌ها نشان دهنده اندازه‌گیری مستقیمی از ریزش باران بر روی زمین (ارتفاع بارش) هستند، اما آن‌ها قادر به انتقال الگوی مکانی بارش نیستند (Huff, 1970). از سوی دیگر رادارهای هواشناسی قابلیت ثبت و برآورد اطلاعات بارش با وضوح زمانی و مکانی بالا را دارند، با این وجود

DOI: 10.22055/jise.2020.30239.1863

ممکن است خطاهای عمده‌ای ناشی از ناحیه‌های انسداد و نیاز به کالیبراسیون پارامترهای مورد استفاده باشد (Marshall and Palmer. 1948).

در این زمینه مطالعه‌های انجام شده توسط Goudenhoofdt و Delobbe (2009) نشان می‌دهد رادار هواشناسی با مشکلاتی از قبیل عدم کالیبراسیون الکترونیکی و نیزعدم انعکاس سیگنال خالص بدلیل بازتابش غیر هواشناسی همچنین وجود محدودیت‌های طبیعی از قبیل ارتفاعات در منطقه که مانع بازتابش مناسب امواج خواهند شد، مواجه می باشد. در نهایت، تخمین‌های بارش ماهواره‌ای که عمدتا بر اساس تجزیه و تحلیل‌های خاص حرارتی ابر Scofield (1987)، که از ماهواره های ژئواستاستیکی دریافت شده صورت می‌گیرد و میزان بارش حاصل از ماهواره‌های مدار پایین را افزایش می‌دهد Hsu et al (1997) و Sorooshian et al (2000)، به‌طوری که تخمین‌های بارش در وضوح‌های مکانی و زمانی بالا را فراهم می‌کنند. این نوع از داده‌های سنجش از دوری به‌طور خاص در دست‌یابی به ساختار میدان بارندگی، با هر دو تفکیک مکانی و زمانی مناسب می‌باشند (Doviak et al., 1994). با این حال، با توجه به عدم قطعیت‌های متغیر بارش در این نوع داده‌ها، توانایی برآورد دقیق بارش را ندارند (Jordan et al. 2000:Vignal and Krajewski 2001). روش معمول برای بازسازی میدان بارندگی با دقت بیشتر، بر اساس مقایسه مشاهده‌های ماهواره‌ای یا رادارهای هواشناسی با اندازه گیری‌های زمینی ثبت شده توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی است که به طور مکانی دارای پراکندگی مناسب هستند. این ارتباط گامی اساسی در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی از قبیل پیش‌بینی هواشناسی Ehret (2002) و مدل‌سازی هیدرولوژیک می‌باشد. (Borup et al., 2016 ؛ Goormans and Willems, 2013)

Guenzi et al. (2017) در تحقیقی به مطالعه و پیاده‌سازی یک برنامه کامپیوتری از روش ترکیب وضعیت با استفاده از زبان R به‌منظور ترکیب داده‌های راداری و مشاهدات زمینی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که برآوردهای بارش در زمان‌های مختلف در منطقه Piedmant (شمال غربی ایتالیا) مورد آزمایش قرار گرفته باعث صحت بهبود مقادیر بارندگی در سطح منطقه شده است.

Sinclair و Pegram (2005) در تحقیقی به ارائه یک برنامه کاربردی برای شبیه‌سازی میدان بارش با استفاده از روش ترکیب وضعیت که از کریجینگ به‌منظور استخراج اطلاعات مطلوب از داده‌های مشاهداتی استفاده می‌کند پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک میدان متوسط بر اساس داده‌های بارانسنجی که با روش کریجینگ درون‌یابی شده است، به‌دست آمده در حالی که جزییات مکانی رادار را حفظ می‌کند و باعث کاهش مقادیر اریبی و حفظ تغییرات مکانی مشاهده‌ای رادار شده است. به‌طوری که واریانس مقادیر برآوردی در مجاورت بارانسنج ها کاهش می‌یابد بنابراین آن‌ها قادر به ارائه اطلاعات مناسبی در مورد مقادیر واقعی بارش در سطح هستند.

Kim et al. (2007) در مطالعه‌ای به‌منظور پیش‌بینی سیلاب در رودخانه Imjin-Ganwha از ترکیب بارش‌های راداری و اندازه گیری شده در ایستگاه‌های بارانسنجی با استفاده از روش ترکیب وضعیت به ارزیابی و تصحیح بارش پرداختند. به‌منظور ارزیابی این روش، آمار و هیتوگراف بارش‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه و استفاده از داده‌های راداری بارش ساعتی را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بارش برآوردی با روش ترکیب وضعیت نتایج بهتری را در آمار کمی و کیفی ارائه می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر توسط Pignone et al (2015) به‌منظور برآورد یک بارش زمینه با ترکیب کردن داده‌های سنجش از دوری و مشاهدات باران‌سنجی با استفاده از روش ترکیب وضعیت ساده شده یک روش جدید برای ترکیب داده‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها در این پژوهش به مطالعه بهبود یک الگوریتم برمبنای روش ترکیب وضعیت پرداختند که می‌تواند در یک زمان واقعی به منظور تولید نقشه‌های بهینه بارش استفاده شود. Fang et al (2019) در مطالعه‌ای عملکرد داده‌های اندازه‌گیری بارش ماهواره TRMM و GPM در برآورد بارش های شدید و حداکثر میزان بارندگی سالانه برای دوره های۲۰۱۷-۲۰۰۰ و ۲۰۱۷-۲۰۱۴ در سراسر چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو محصول تخمین خوبی از بارندگی‌های شدید ارائه داده و داده‌های GPM کمی بهتر عمل کرده است. در ضمن عملکرد ماهواره در جنوب و شرق چین با آب و هوای موسمی مرطوب، بهتر از غرب چین با ارتفاع زیاد و اقلیم خشک بوده و نشانگر تأثیر قابل توجهی از توپوگرافی و آب و هوا بر کیفیت داده های ماهواره‌ای می‌باشد. Mahmoud et al. (2019) در تحقیقی صحت سه محصول اولیه، بازنگری شده و نهایی GPM در امارات متحده عربی با استفاده از ارزیابی های مکانی و زمانی چندگانه در دوره ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که محصول نهایی بهترین تخمین نسبت به دو محصول دیگر را دارد. براساس این نتایج، محصول نهایی GPM نه تنها درک بهتری از تغییرپذیری و الگوی بارندگی در امارات متحده عربی ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک محصول مطمئن برای تکمیل و یا جایگزینی ایستگاه‌های اندازه گیری بارش های در مناطق فاقد ایستگاه باشد.

با توجه به اینکه تاکنون در سطح حوضه آبریز در کشور روش‌های مختلف ترکیب داده های بارش زمینی و ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار نگرفته است، در تحقیق حاضر به‌منظور ترکیب و تصحیح داده‌های بارش و افزایش عملکرد و دقت داده‌های بارش در سطح حوضه از روش‌های مناسب تلفیق و ت‌صحیح داده‌های بارش به کمک ایستگاه‌های باران‌سنجی و اطلاعات مستخرج از الگوریتم داده‌های سلولی ماهواره‌ای در سطح حوضه آبریز مند استفاده شده است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز مند در جنوب غرب کشور قرار دارد. وسعت این حوضه ۴۷۸۰۲ کیلومتر مربع می باشد.این حوضه بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان بوده که به لحاظ تقسیمات کشوری از این گستره در حدود ۸۳ درصد در استان فارس و ۱۷ درصد در استان بوشهر قرار گرفته است. مختصات این حوضه حد فاصل ۴۸

درجه و ۸ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۹ دقیقه عرض شرقی و از ۲۷ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت کل دشت‌های حوضه آبریز ۱۱۰۰۰ کیلومتر مربع با بارندگی متوسط ۲۶۰ میلی‌متر و مساحت کل ارتفاعات آن ۳۶۸۰۰ کیلومتر مربع با بارش متوسط ۳۲۰ میلیمتر می‌باشد. این حوضه آبریز در ناحیه اقلیمی گرم و خشک با متوسط درجه حرارت ۲۹ درجه سانتی‌گراد قراردارد. ارتفاع حوضه از پنج متر در ساحل خلیج فارس تا ۳۲۰۰ متر در ارتفاعات می‌باشد (شکل ۱). تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و خشک از مشخصات اصلی آب و هوایی حوضه است. بیشتر ریزش‌های جوی به‌صورت باران و در فصل پاییز از اوایل آذر ماه تا بهار وابتدای فروردین ماه می‌باشند. در شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز و ایستگاه‌های بارانسنجی در منطقه در استان و ایران نشان داده شده است.

داده‌های ایستگاه بارانسنجی زمینی

بارش مشاهده‌ای در سطح حوضه توسط شبکه ایستگاه‌های باران سنجی اندازه‌گیری می شود. در این تحقیق از تداوم داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های زمینی در طی سال‌های آماری ۹۵-۹۳ برای استفاده در روش‌های ترکیب و تصحیح اطلاعات ماهواره ای که توسط ۷۷ ایستگاه باران‌سنجی در سطح و مجاور حوضه مند شکل (۱) به‌دست آمده، استفاده شد. ایستگاه‌های موجود در حوضه شامل هفت ایستگاه سینوپتیک، متعلق به اداره کل هواشناسی استان‌های فارس و بوشهر که به جهت کنترل کیفی مورد اعتماد بیشتری هستند و ۷۰ ایستگاه بارانسنجی معمولی که تحت نظارت شرکت‌های آب منطقه‌ای فارس و بوشهرکه مسئول نگهداری و کنترل کیفیت داده ها می‌باشند، استفاده شد.

داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق براساس داده‌های تولید شده از ماهواره Global Precipitation Measurement می‌باشد که ماموریت اندازه‌گیری بارندگی جهانی را به عهده دارد و متشکل از شبکه‌ای بین المللی از ماهواره‌هاست که نسل بعدی مشاهدات باران و برف را فراهم می‌کند. این ماموریت که بر پایه موفقیت ماهواره‌ی Tropical Rainfall Measuring Mission بنا شده، با به کارگیری یک ماهواره‌ی اصلی و مرکزی که یک سیستم رادیومتر و رادار پیشرفته را حمل می‌کند به اندازه‌گیری بارندگی از فضا می‌پردازد و به‌عنوان یک استاندارد مرجع برای تلفیق اندازه‌گیری‌های بارندگی از مجموعه‌ای از ماهواره‌های تحقیقاتی عملیاتی، عمل می‌کند. GPM که به‌وسیله ناسا و آژانس هوا فضای ژاپن به‌عنوان جانشین جهانی TRMM آغاز شد، از کنسرسیومی از آژانس‌های فضایی بین المللی مانند سازمان اروپایی استفاده از ماهواره‌های هواشناسی، نووآ و سازمان فضایی هند تشکیل شده است. ماهواره اصلی GPM در ۲۷ فوریه‌ی سال ۲۰۱۴ از مرکز فضایی تانگاشیما ژاپن به فضا پرتاب شد. این ماهواره اولین رادار بارندگی دو فرکانسه (Ku/Ka) فضایی را حمل می‌کند. اطلاعات ارائه شده توسط GPM بر پایه الگوریتم تجمیع داده‌های چند ماهواره‌ای GPM یا (IMERG) تولید و منتشر می‌شود. این اطلاعات در وضوح زمانی نیم ساعته، با ابعاد مکانی ۰/۱ در ۰/۱ درجه و با پوشش تقریباً جهانی در سایت https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov به سهولت در دسترس قراردارد. (جدول ۱).

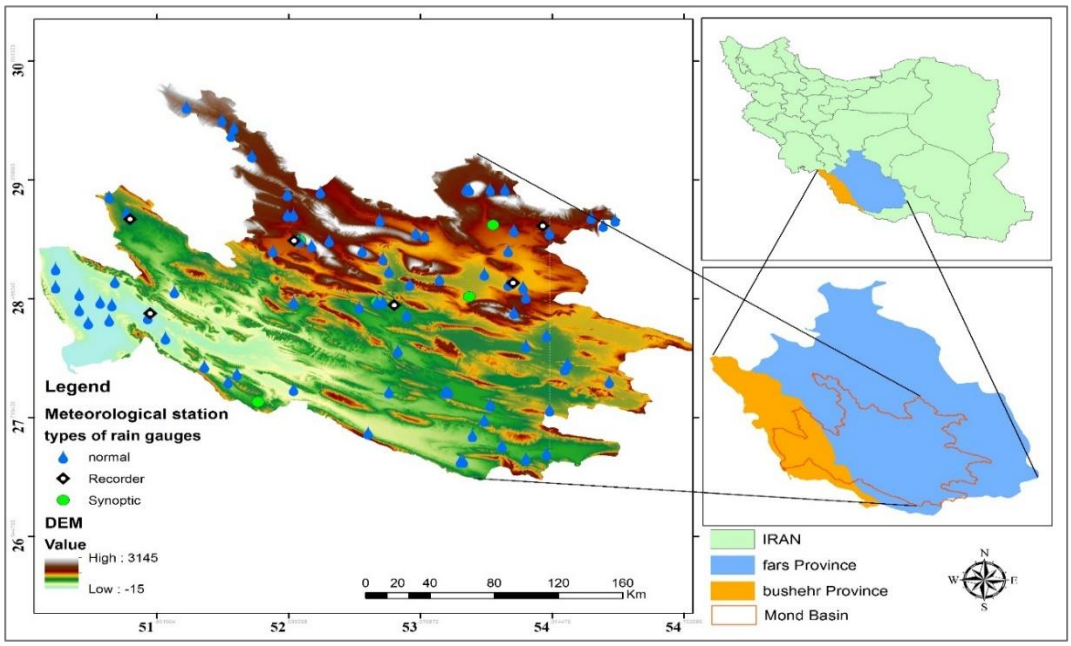


Fig. 1- Location of the study area and used meteorological stations

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

DOI: 10.22055/jise.2020.30239.1863

جدول ۱- خلاصه اطلاعات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق
Table1-Summary of satellite data used in the study

Variable	Temporal scale	Spatial Resolution	Spatial coverage	Time of data generation	Reference data generation
GPM-3IMERG	Daily	0.1°	60 ° North- 60 ° South	March 2014-now	NASA-JAXA

روش‌های ترکیب و تصحیح داده‌های بارش

به‌منظور ایجاد یک ارتباط بین روش‌های اندازه‌گیری بارش در سطح حوضه، از روش‌های متنوعی که به‌همین منظور توسعه داده شده است استفاده می‌شود (Goudenhoofdt and Delobbe, (2009. در حال حاضر با اصلاح خطای مبتنی بر ماهواره‌ها با کریجینگ ساده و روش ترکیب وضعیت(Conditional Merging) به‌دلیل کیفیت بالای نتایج و به دلیل سادگی و کارایی محاسباتی، مناسب‌ترین روش است (Ehret 2002، Sinclair and Pegram 2005). در این تحقیق از روش ترکیب وضعیت و روش‌های مبتنی بر آن که در ابتدا توسط Ehret (2002) و در ادامه توسط Sinclair و Pegram (2005) توسعه یافت، استفاده شده است. در این روش داده‌های بارش اندازه‌گیری شده زمینی و داده‌های ماهواره ترکیب شده سپس به کمک روش‌های زمین‌آماری کریجینگ اطلاعاتی از گسترش داده‌های ترکیب شده در سطح حوضه مورد مطالعه به‌دست می‌آید.

روش زمین آماری کریجینگ

کریجینگ یکی از تخمینگرهای رایج در روش زمین‌آماری در کنار سایر تخمینگرهای دیگر است که براساس آن می‌توان کمیت یک نقطه مجهول را با استفاده از کمیت نقاط معلوم تخمین زد. این روش توسط کریجینگ در سال ۱۹۶۶ مطرح و توسط ماترون در سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۱ بسط و گسترش یافته است .

کریجینگ یک روش تخمین است که بر اساس میانگین متحرک وزن‌دار (Weighted Moving Average) استوار است و در مورد آن می‌توان گفت که بهترین تخمین‌گر خطی نا اریب است. در واقع در این روش برای هر یک از نمونه‌ها وزن آماری مشخصی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که واریانس تخمین مبتنی بر آن‌ها حداقل باشد. در روش کریجینگ هر چقدر نمونه در فاصله دورتری قرار داشته باشد، به همان نسبت وزن آماری که به آن نسبت داده می‌شود، کمتر است. اما در عین حال موقعیت نمونه نیز مد نظر قرار می‌گیرد. از مهمترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمین، خطای مرتبط به آن را می‌توان محاسبه کرد. بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد، در حالی که در روش‌های کلاسیک معمولاً چنین امکانی وجود ندارد (Madani 1995). بر اساس آنچه در روش فاصله معکوس وزنی (IDW) که در آن نزدیکی به نقاط نمونه به‌عنوان وزن برآورد محسوب می‌شد، در کریجینگ نیز واریانس فضایی تابعی از فاصله شناخته می‌شود. برای برآورد مقادیر براساس کریجینگ روش‌های مختلفی وجود دارد، دراین تحقیق از روش کریجینگ معمولی استفاده شده است.

کریجینگ معمولی Isaaks و Srivastava (1989) ، Krige (1951)، Oliver و Webster (1990) یک روش رگرسیون خطی است که عمدتاً در تجزیه‌و تحلیل زمین آماری استفاده می‌شود و این امکان را می‌دهد که با درون‌یابی، مقادیر میانگین مربعات خطا را به حداقل رساند. ایده اصلی این است که اگر در بعضی نقاط معیار شناخته شده‌ای (مقادیر معلوم) وجود داشته باشد، می‌توان ارزش سایر نقاط همسایه را تعیین کرد که در آن هیچ گونه اطلاعاتی موجود نیست. این درون‌یابی مکانی براساس وابستگی خودکار (یا وابستگی مکانی) یک متغیر است، به این ترتیب که نزدیک‌ترین نقاط بیشتر از نقاطی که در فواصل دورتری از متغیر قرار می گیرند مشابه هستند. مقدار مجهول در یک نقطه خاص با یک میانگین وزنی از مقادیر معلوم محاسبه می‌شود. وزن‌ها به رابطه مکانی بین مقادیر اندازه‌گیری شده در محدوده نقطه مجهول بستگی دارد. برای محاسبه وزن‌ها، یک نیمه واریوگرام به‌کار می‌رود: یک گراف که فاصله بین دو نقطه و مقدار تقریبی واریانس را بین اندازه‌گیری های انجام شده در این دو نقطه مرتبط می‌کند. این نیمه واریوگرام در هر دو نقطه به روش کیفی و کمی، درجه خود همبستگی را نشان می‌دهد. روش عمومی محاسبه کریجینگ براساس رابطه (۱) می‌باشد.

$$z^*(x_0)=\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot z(x_i)$$
$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \qquad (۱)$$

در این رابطه $z^*(x_0)$ مقدار برآورد شده در نقطه x_0 ، w_i وزن و $z(x_i)$ مقادیر نمونه می‌باشد.

وزن‌ها به درجه همبستگی بین نقاط نمونه و نقاط برآورد شده بستگی دارد و همیشه جمع آن‌ها برابر با یک است. این نوع کریجینگ را خطی گویند زیرا ترکیب خطی از N داده است.

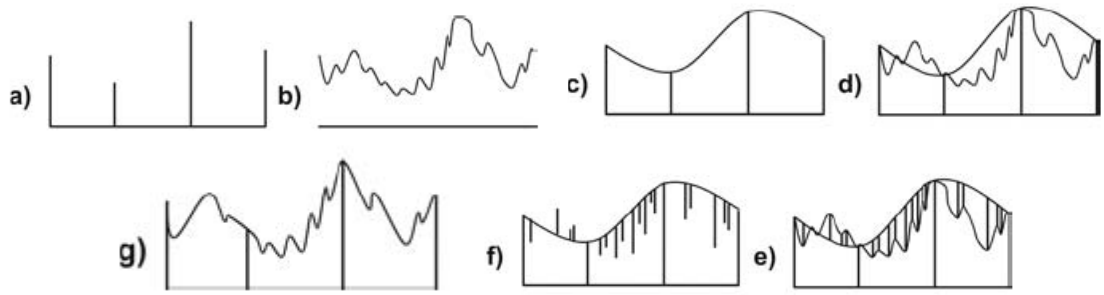


Fig. 2-Merging rain gauge and satellite data principal steps.
شکل ۲- گام‌های ترکیب داده‌های ایستگاه بارانسنجی و ماهواره‌ای

روش ترکیب وضعیت (CM)

این روش با هدف ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با اطلاعات باران‌سنجی، که براساس فرآیند کریجینگ معمولی است. می‌تواند به بسیاری از مهندسین و محققان در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی (هواشناسی، رادار، هیدرولوژی و بسیاری دیگر) کمک کند.

ترکیب وضعیت (CM) با استفاده از شبکه ماهواره‌ای برای برآورد خطای مربوط به کریجینگ معمولی در ایستگاه باران‌سنجی و تلاش برای اصلاح آن است. اولاً، مقادیر ماهواره‌ای (S) در هر ایستگاه (G) برای تهیه کریجینگ استفاده می‌شود $K_{R(g)}$. سپس، مقادیر برآوردی از بارش ماهواره اولیه کم می‌شود تا نقشه خطا را به‌دست آورد. در نهایت، مقدار خطا به مقادیر درون‌یابی شده ایستگاه باران‌سنجی با روش کریجینگ $K_{G(g)}$، افزوده می‌شود (Goudenhoof and Delobbe, 2009). از این نظر می‌تواند مهم باشد که ممکن است در یک سلول مقداری توسط ایستگاه باران‌سنجی از دست رفته باشد اما در برداشت‌های ماهواره‌ای دیده شود. فرمول نهایی با رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$CM = S - K_{S(g)} + K_{G(g)} \qquad (۲)$$

شکل (۲) گام‌های تجربی از روش فوق را نشان می‌دهد. در روابط (۳) تا (۹) فرآیند تعیین ساختار خطای تخمین از داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از روش ترکیب وضعیت ارائه شده است.

شکل (a-۲) :داده‌های اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی است که به‌صورت داده‌های نقطه‌ای بیان می‌شوند. شکل (b-۲) :داده‌های سلولی ماهواره‌ای که به صورت شبکه‌بندی شده و منظم در سطح حوضه استخراج و ارائه شده است. شکل (c-۲) :داده‌های نقطه‌ای زمینی شکل (a-۲) با به‌کارگیری روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری نظیر کریجینگ به‌منظور دست‌یابی به بهترین تطابق با داده‌های سلولی ماهواره‌ای، توسعه می‌یابند. شکل (d) :داده‌های سلولی ماهواره‌ای صرفاً در محل‌هایی که داده‌های نقطه‌ای زمینی وجود دارند، با به‌کارگیری روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری نظیر کریجینگ توسعه می‌یابند. شکل (e-۲) : در هر سلول از شبکه کلی، تفاوت بین مقدار داده سلولی (به‌دست آمده از روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری) و مقدار مشاهده شده آن (ماهواره‌ای) محاسبه می‌شود. شکل (f-۲) :مقادیر به‌دست آمده از (e) به مقادیر به‌دست آمده از (b) اعمال می‌شوند. شکل (g) :توزیع مکانی بارش با ترکیب داده‌های نقطه‌ای میان یابی شده به روش‌های زمین‌آماری و مقادیر خطای به‌دست آمده و نیز توجه به ساختار توزیع خطای داده‌های سلولی، تعیین می‌شوند.

$$Z(s) = G_K(s) + \varepsilon_G(s) \qquad (۳)$$

$$S(s) = S_K(s) + \varepsilon_S(s) \qquad (۴)$$

$$M(s) = G_K(s) + \varepsilon_S(s) \qquad (۵)$$

$$\varepsilon_G(s) = Z(s) - G_K(s) \qquad (۶)$$

$$\varepsilon_S(s) = S(s) - S_K(s) \qquad (۷)$$

$$E\left[Z(s) - M(s)\right] = E\left[\varepsilon_G(s) - \varepsilon_S(s)\right] \qquad (۸)$$

$$\begin{aligned} Var\left[Z(s) - M(s)\right] &= E\left\{\left[\varepsilon_G(s) - \varepsilon_S(s)\right]^2\right\} \\ &= \mathrm{var}\left[\varepsilon_G(s)\right] + \mathrm{var}\left[\varepsilon_S(s)\right] \\ &- 2\,\mathrm{cov}\left[(\varepsilon_G(s))(\varepsilon_S(s))\right] = \beta(1-\rho) \end{aligned} \qquad (۹)$$

در روابط بالا، $Z(s)$ مقدار باران واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی در مکان S ، $G_K(s)$ مقادیر میان‌یابی شده با روش‌های زمین‌آماری بر مبنای مقادیر باران واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی، $S(s)$ مقادیر باران سلولی مشاهده شده توسط ماهواره، $S_K(s)$ مقادیر میان‌یابی شده باران سلولی در مکان‌های که باران واقعی زمینی اندازه‌گیری شده وجود دارد و $M(s)$ تخمین تلفیقی از باران $Z(s)$ می‌باشند. پارامتر $\varepsilon_G(s)$ در معادله(۶) به‌دلیل نامعلوم بودن مقدار $Z(s)$ مجهول است در حالی که $\varepsilon_S(s)$ در معادله (۷) معلوم بوده و با کاربرد معادله (۵)

DOI: 10.22055/jise.2020.30239.1863

می‌توان مقدار $M(s)$ را که در واقع اندازه‌ای از مقدار $Z(s)$ می‌باشد را، محاسبه کرد. همچنین معادله (۸) نشان می‌دهد چنانچه مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده دارای توزیع گوسی باشند، چون در این حالت مقادیر میان‌یابی شده بدون بایاس می‌باشند، بنابراین امید ریاضی خطای تخمین(تفاوت مقادیر ترکیبی و واقعی) صفر خواهد بود. واریانس خطای تخمین نیز بر اساس معادله (۹) محاسبه شده و می‌تواند به اجزای آن مطابق روابط معادله (۶) و (۷) تجزیه شود. واریانس خطای تخمین تلفیقی در نقاط اندازه‌گیری زمینی(محل باران‌سنج‌ها) صفر است در حالی‌که در دیگر محل‌ها مقداری محدود به حداکثر یعنی مقدار β برای ضریب همبستگی‌های مثبت($\rho >$ ۰) بین $\varepsilon_G(s)$ و $\varepsilon_S(s)$ است. از طرفی چنانچه $\varepsilon_G(s)$ و$\varepsilon_S(s)$ دارای همبستگی قوی و مثبت هستند، این انتظار وجود دارد که مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی و مقادیر سلولی ماهواره‌ای یکسان و برابر $Z(s)$ باشند. در آن‌صورت مطابق معادله (۹) ،واریانس خطای تخمین تلفیقی به‌طور معنی داری کمتر از β خواهد بود.

با تکیه بر رابطه (۲)، دو روش تجربی نیز براساس آن اجرا می شود که از همان منطق استفاده می‌کنند اما در زمینه‌های خطا (تفریق) کار نمی‌کنند، بلکه در زمینه مقادیر تخمینی (تقسیم) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش ترکیب وضعیت مرتبط با اریبی (BFCM)

این روش با تقسیم مقادیر اولیه بارش ماهواره‌ای بر مقادیر درون یابی شده ماهواره‌ای با استفاده از روش کریجینگ و در نهایت ضرب نمودن آن به نتیجه حاصل از دورن‌یابی کریجینگ مقادیر ایستگاه زمینی محاسبه می‌گردد، که به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود:

$$BFCM = (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)} \qquad (۱۰)$$

این روش برخی از مشکلات جزئی مربوط به تقسیم را با اشکال صفر یا حتی نامعین معرفی می‌کند، اما رویکردی که در این مورد اتخاذ شده، صرفا فرض صفر بودن مقدار نهایی است.

روش ترکیب وضعیت متوسط (MCM)

روش سوم، روش ترکیب وضعیت متوسط MCM نامیده می‌شود براساس رابطه (۱۱) بیان می‌شود که نشان‌دهنده متوسط بین (CM) و (BFCM) است.

$$MCM = \frac{S - K_{S(g)} + K_{G(g)} + (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)}}{2} \qquad (۱۱)$$

از آنجای‌که تمام روش‌های ارائه شده در اینجا بر الگوریتم‌های مکانی که بر روی مجموعه‌ای از نقاط اعمال می‌شوند، تکیه می‌کنند، داشتن شبکه متراکم بارانسنجی نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد، هم چنین می‌تواند با حداقل تعداد ایستگاه بارانسنجی نیز مورد بررسی قرار گیرد. زیرا یک تنوع دقیق (و نیمه واریوگرام نسبی که به روش کریجینگ اعمال شده است) می‌تواند به‌صورت یک شبکه پراکنده اصلاح شود (Journel and Huijbregts 1978، Pannatier 2012).

معیارهای ارزیابی آماری مورد استفاده

به‌طور کلی خطای پیش‌بینی شامل دوجزء خطای سیستماتیک و خطای تصادفی می باشد. برای ارزیابی کارکرد مدل مورد نظر لازم است که خطای پیش‌بینی اندازه‌گیری گردد. خطای تخمین عبارت از تفاوت بین مقدار تخمینی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. لازم به یادآوری است چنین محاسباتی در واقع فقط میزان انحراف محاسباتی از مقدار مشاهداتی را نشان داده و خطای نهفته در سیستم محاسبه و مشاهده را نشان نمی‌دهد (AghaKouchak et al. 2012).

به‌منظور تعیین دقت، روش‌های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. در این تحقیق برای ارزیابی میزان دقت و انتخاب بهترین روش، از آنالیز و معیارهای آماری مختلفی مانند میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ونیز شاخص‌های دیگری نظیر شاخص درصد خطای اریبی (PBIAS)، واریانس و ضریب همبستگی استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این معیارها در روابط (۱۲) تا (۱۵) ارائه شده است.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Z^*(x_i) - Z(x_i)\right| \qquad (۱۲)$$

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Z^*(x_i) - Z(x_i)\right) \qquad (۱۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n}} \qquad (۱۴)$$

$$PBAIS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i) - Z(x_i))}{\sum_{i=1}^{n} Z(x_i)} \times 100 \qquad (۱۵)$$

که : $Z^*(x_i)$:مقدار برآورد شده x_i، $Z(x_i)$: مقدار مشاهده شده x_i و n: تعداد داده‌ها می‌باشد.

در این روابط میانگین خطای مطلق (MAE) معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست که هر چه به صفر نزدیکتر باشد، بهتر است. مقدار میانگین خطای انحراف (MBE) اریبی را نشان می دهد و نشان‌گر میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده‌ای است و در حالت ایده‌آل بایستی مساوی صفر باشد. مقادیر مثبت یا منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد بیشتر (Overestimate) یا کمتر

(Underestimate) از مقدار واقعی می‌باشد. در عمل هیچگاه مقدار این دو آماره صفر نخواهد شد. مقدار میانطای شاخص درصد خطای اریبی یا (PBIAS) نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده تا چه اندازه تمایل به بزرگتر یا کوچکتر بودن از مقادیر مشاهده شده دارند. این مقدار هرچه به سمت صفر میل کند نشانه دقت بهتر محاسبات بوده و مقدار برابر صفر نشان‌دهنده بهترین برازش می‌باشد. مثبت بودن این شاخص بیان‌گر برآورد بیشتر از واقعیت و منفی بودن آن بیان‌گر برآورد کمتر از واقعیت است. شاخص میزان همبستگی (R^2)، رابطه خطی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. نزدیک شدن شاخص به عدد یک بیانگر همبستگی بالا و در صورت همبستگی پایین بین دو دسته از اعداد، این شاخص به سمت صفر میل می‌کند.

نتایج و بحث

پس از بررسی مقادیر بارش اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه باران‌سنجی در سطح حوضه آبریز حوضه مند در طول سال‌های آماری مورد مطالعه تعداد سه واقعه بارش در سال آماری ۹۴-۹۳ و تعداد دو واقعه بارش در دوره آماری سال ۹۵-۹۴ به عنوان بارندگی های متداوم روزانه به‌منظور بررسی هدف مطالعه انتخاب شد. به‌صورتی که شاخص انتخاب بارش‌ها فراگیر بودن آن‌ها می‌باشد. با انتخاب تداوم بارش ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی مقادیر بارش ماهواره‌ای این تداوم‌ها در روزهای مورد نظر نیز از پایگاه مربوط دریافت شد. در جدول (۲) مشخصات آماری هریک از تداوم‌های بارش مورد بررسی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری دورن‌یابی شده و ماهواره‌ای در طی دوره آماری مورد بررسی نشان داده شده است.

باتوجه به مشخصات آماری ارائه شده از مقادیر بارش مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی و مقادیر بارش برآوردی ماهواره‌ای در جدول (۲)، نشان می‌دهد که در تداوم‌های مربوط به فصولی که ریزش‌های جوی عمدتا به‌صورت بارش اتفاق می‌افتد بارش مشاهداتی زمینی و ماهواره‌ای دارای مقادیر نزدیک بهم می‌باشند. اما در همه تداوم‌های مورد استفاده مقادیر بارش ماهواره کمتر از مقادیر بارش ایستگاه‌های زمینی بود.

به‌همین منظور نیز مقایسه توزیع مکانی بارش در اشکال (۳) تا (۷) برای مقادیر بارش ماهواره‌ای (GPM Rainfall)، کریجینگ ایستگاه‌های باران‌سنجی (Gauge Rainfall) و بارش ترکیب شده برای هریک از روش‌های ترکیب (CM، BFCM، MCM) در هریک از تداوم‌های مورد بررسی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها بر می‌آید، با مقایسه هریک از روش‌های ترکیب و تصحیح بارش با مقادیر بارش ماهواره‌ای و مقادیر بارش ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد که هر دو ویژگی مربوط به تغییرات مکانی توزیع بارش ماهواره‌ای و مقدار ارتفاع بارش ایستگاه‌های زمینی را دارند. به‌طوری که روش‌های ترکیب به‌منظور تصحیح داده‌های بارش ماهواره‌ای ارتفاع بارش را ثابت حفظ کرده و تغییرات مکانی بارش را بهبود بخشیده است. به‌طور خاص این نتیجه در شکل (۳) برای تداوم بارش آبان به چشم می‌خورد که روش ترکیب وضعیت مقادیر عمق بارش را ثابت نگه داشته و توزیع تغییرات مکانی را نسبت به بارش ماهواره‌ای در سطح حوضه را بهبود بخشیده است. به‌طور کلی برآورد بارش ماهواره‌ای کمتر از مقادیر بارش مشاهداتی ایستگاه‌های باران سنجی و مقادیر بارش اصلاح و ترکیب شده در سطح حوضه می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات آماری بارش ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای در تداوم‌های مورد بررسی در حوضه آبریز مند (میلیمتر)

Table 2- Statistical Characteristics of the gauge and satellite rainfall in Mond basin (mm)

Statistical Period	Rain event	Paramter	Max	Mean	Min	SD	CV
2014-2015	11/23/2014-11/26/2014	Gauge Rainfall	94.43	51.62	18.96	17.93	0.35
		GPM Rainfall	51.95	37.52	7.51	8.39	0.22
	03/17/2015-03/18/2015	Gauge Rainfall	59.27	38.56	10.19	11.81	0.31
		GPM Rainfall	58.89	35.95	15.45	10.22	0.28
	06/22/2015-06/24/2015	Gauge Rainfall	86.93	19.60	1.74	10.42	0.53
		GPM Rainfall	37.58	17.2	5.12	6.28	0.37
2015-2016	10/11/2015-10/12/2015	Gauge Rainfall	138.80	51.36	1.09	21.98	0.43
		GPM Rainfall	83.89	42.75	0.97	20.36	0.48
	12/31/2015-01/03/2016	Gauge Rainfall	132.59	35.52	4.80	17.64	0.50
		GPM Rainfall	51.49	24.4	2.75	7.47	0.31

DOI: 10.22055/jise.2020.30239.1863

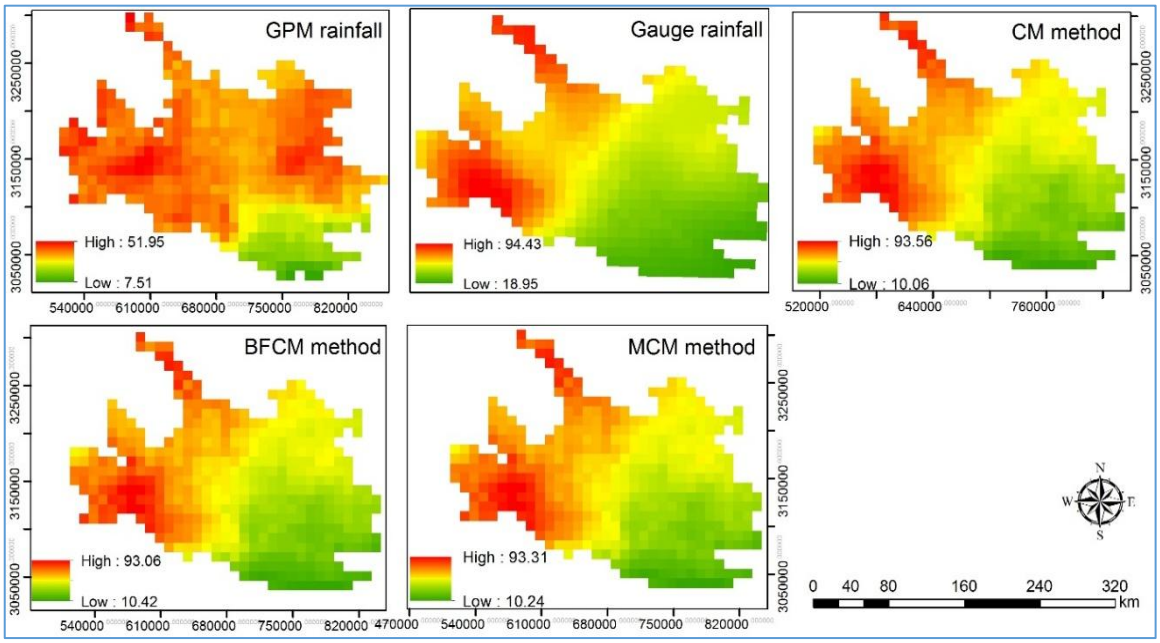


Fig. 3- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (11/23/2014-11/26/2014)

شکل ۳- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۳/۰۹/۰۲ تا ۹۳/۰۹/۰۵

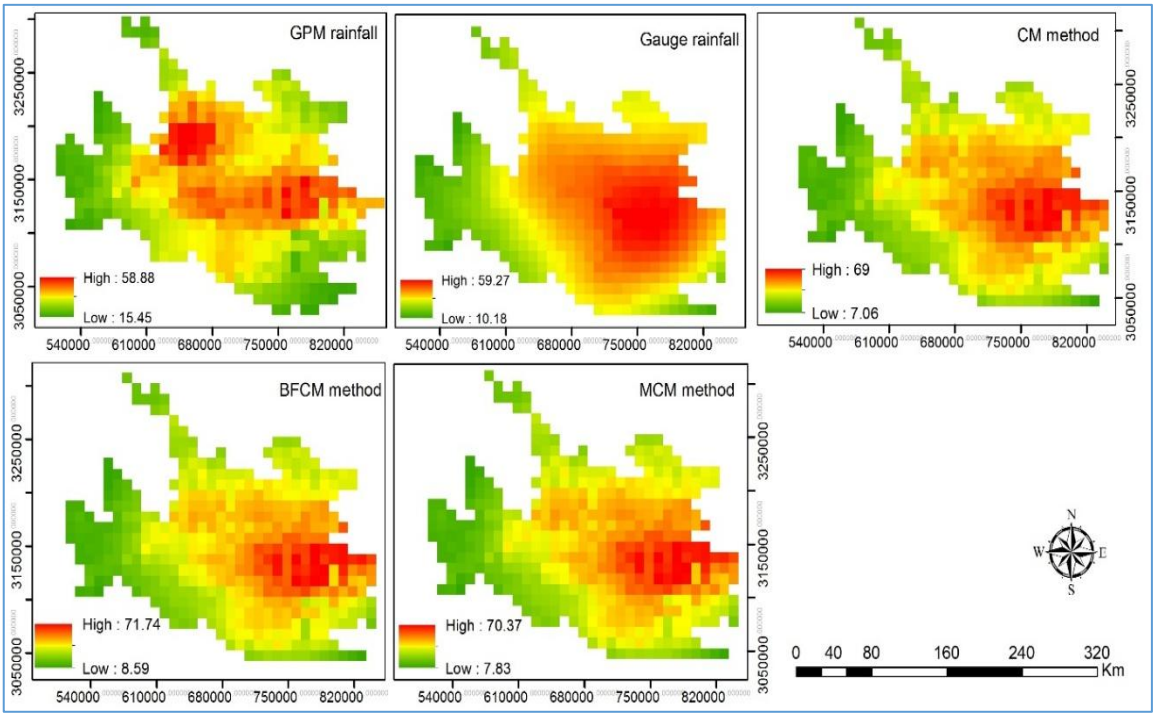


Fig. 4- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (3/17/2015-3/18/2015)

شکل ٤- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۳/۱۲/۲٦ تا ۹۳/۱۲/۲۷

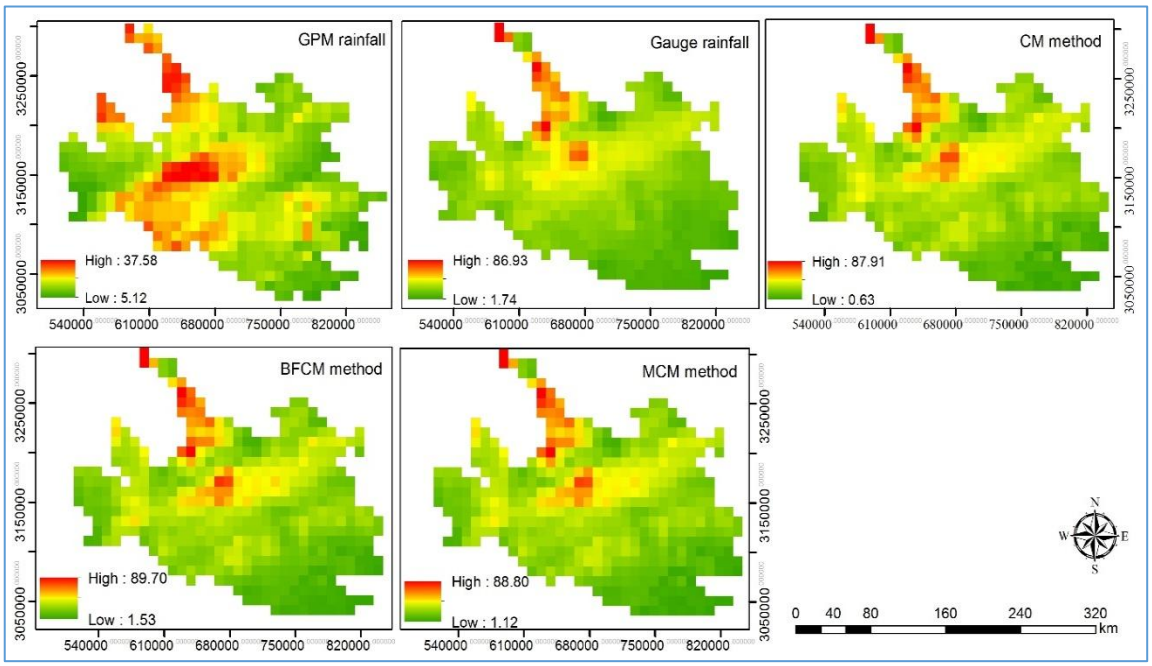


Fig. 5- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (6/22/2015-6/24/2015)

شکل ۵- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۴/۰۱/۰۱ تا ۹۴/۰۱/۰۳

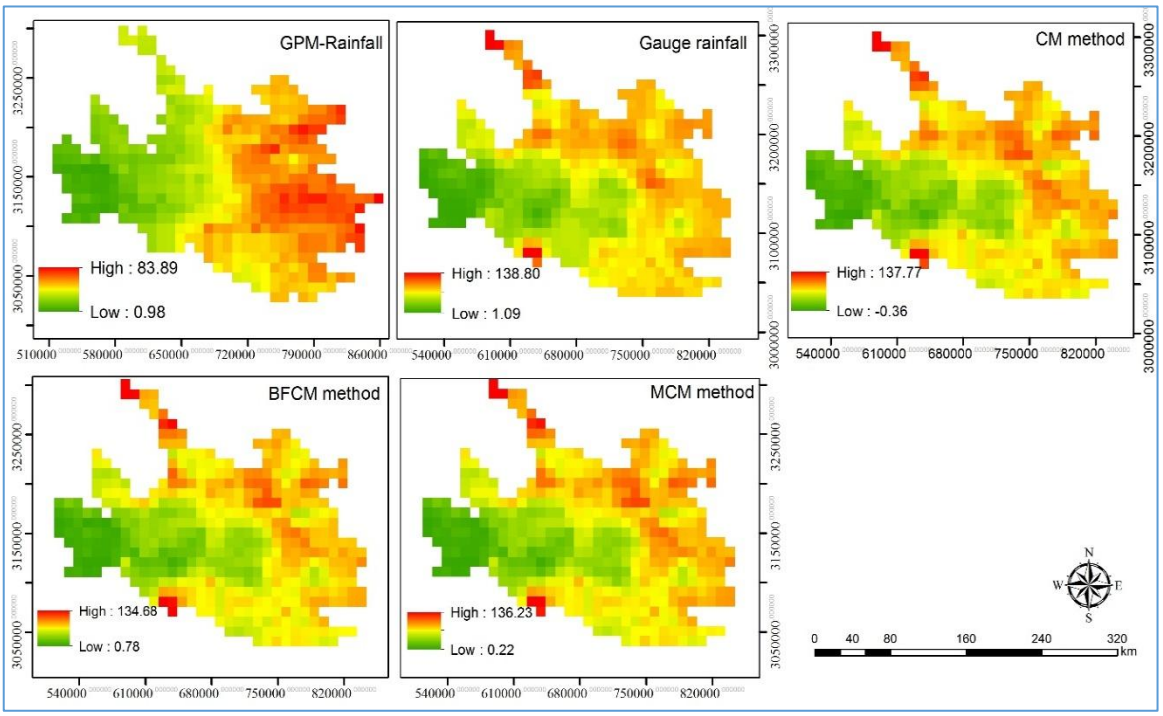


Fig. 6- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (10/11/2015-10/12/2015)

شکل٦- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۴/۰۸/۱۹ تا ۹۴/۰۸/۲۰

DOI: 10.22055/jise.2020.30239.1863

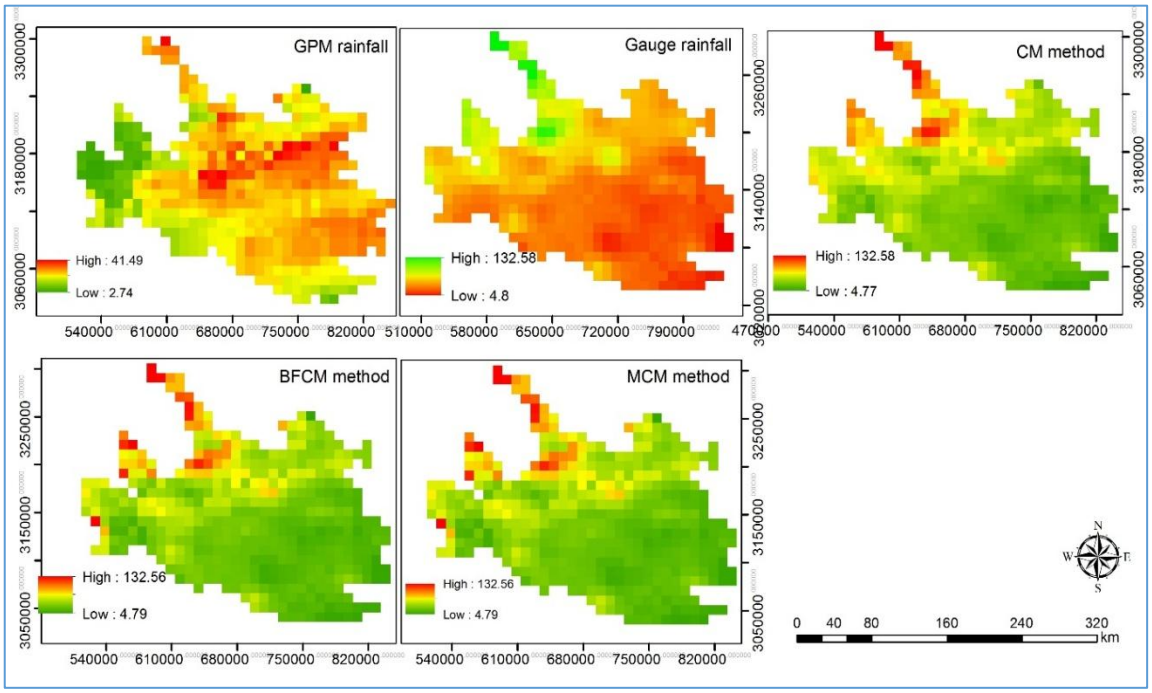


Fig. 7- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (12/31/2015-01/03/2016)

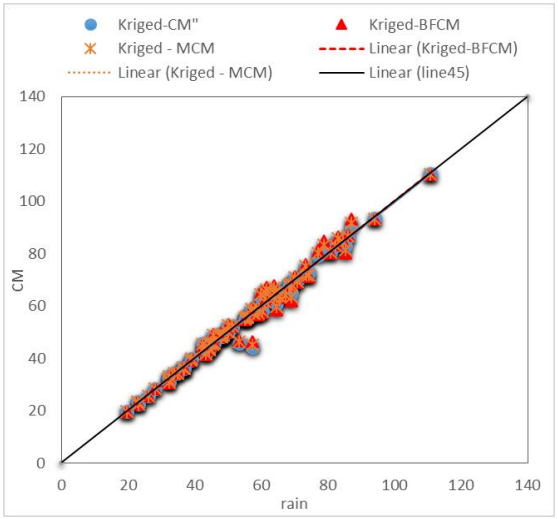
شکل۷- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹٤/۱۰/۱۰ تا ۹٤/۱۰/۱۳

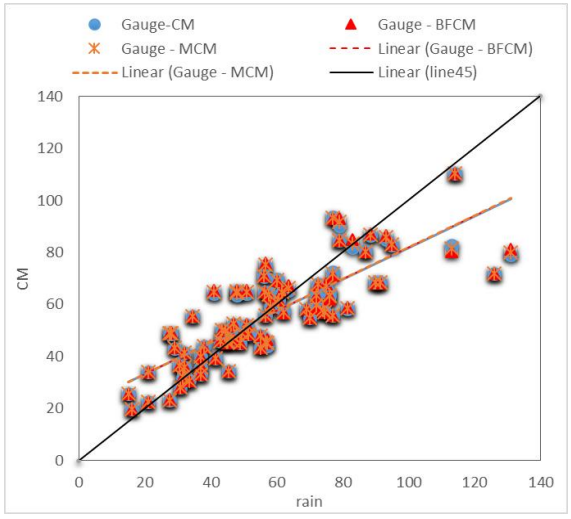
جدول۳- نتایج تجزیه و تحلیل آماری از مقایسه روش‌های مورد استفاده با داده‌های مشاهداتی

Table 3- Statistical analysis results of comparing the methods used with observed data.

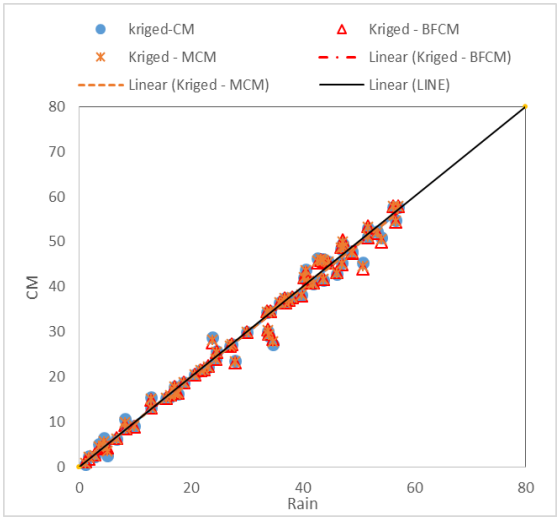
Rain Event	Method	MAE	MBE	RMSE	Bais	PBais	SD	R^2
11/23/2014-11/26/2014	CM	15.11	-4.18	18.58	-0.07	-7.03	18.10	0.98
	BFCM	15.18	-4.07	18.68	-0.07	-6.84	18.22	0.97
	MCM	15.13	-4.12	18.62	-0.07	-6.93	18.16	0.98
03/17/2015-03/18/2015	CM	15.96	-11.31	19.99	-0.35	-35.21	16.39	0.98
	BFCM	15.93	-11.40	20.02	-0.35	-35.48	16.37	0.98
	MCM	15.94	-11.35	20.00	-0.35	-35.34	16.38	0.98
06/22/2015-06/24/2015	CM	23.40	-20.50	25.48	-0.91	-91.12	15.25	0.98
	BFCM	23.39	-20.43	25.41	-0.91	-90.81	15.22	0.98
	MCM	23.40	-20.46	25.44	-0.91	-90.96	15.23	0.98
10/11/2015-10/12/2015	CM	19.24	4.31	25.22	0.09	8.90	25.02	0.99
	BFCM	19.28	4.30	25.19	0.09	8.88	24.98	0.98
	MCM	19.24	4.30	25.20	0.09	8.88	25.00	0.99
12/31/2015-01/03/2016	CM	28.67	28.08	36.59	0.64	63.67	23.62	0.99
	BFCM	28.68	28.14	37.29	0.64	63.82	24.63	0.96
	MCM	28.67	28.11	36.91	0.64	63.75	24.08	0.98

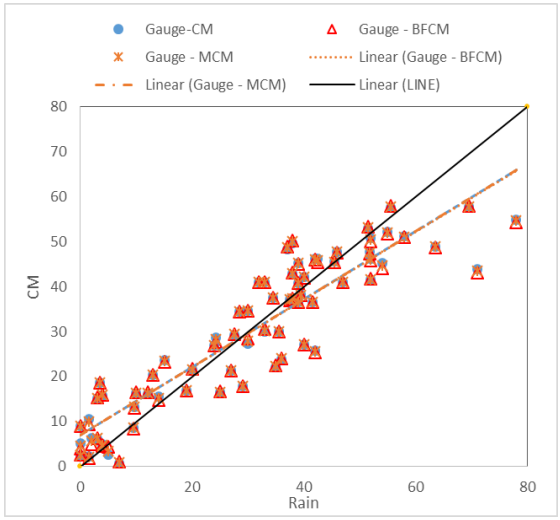
درفرآیند اعتبارسنجی روش‌های مورد استفاده به‌منظور ترکیب و اصلاح بارش در سطح حوضه به کمک ایستگاه‌های باران سنجی و مقادیر بارش ماهواره‌ای، با مقایسه مقادیر تصاویر و نقشه‌های به‌دست آمده از روش‌های مبنتی بر ترکیب وضعیت با مقادیر مشاهداتی از ایستگاه‌های زمینی با استفاده از معیار و آنالیزهای آماری صورت گرفت که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. هم چنین در شکل (۸) نمودار پراکندگی و میزان همبستگی مقادیر داده بارش ادغام شده با مقادیر ایستگاه‌های زمینی و مقادیر درون‌یابی شده ایستگاه‌ها با روش کریجینگ برای تدام‌های بارندگی مختلف در سطح حوضه نشان داده شده است. باتوجه به جدول (۳) و نمودار همبستگی ترسیم شده نتایج نشان می‌دهد که بین مقادیر هرسه روش ترکیب وضعیت با داده‌های زمینی همبستگی معنی داری وجود دارد.



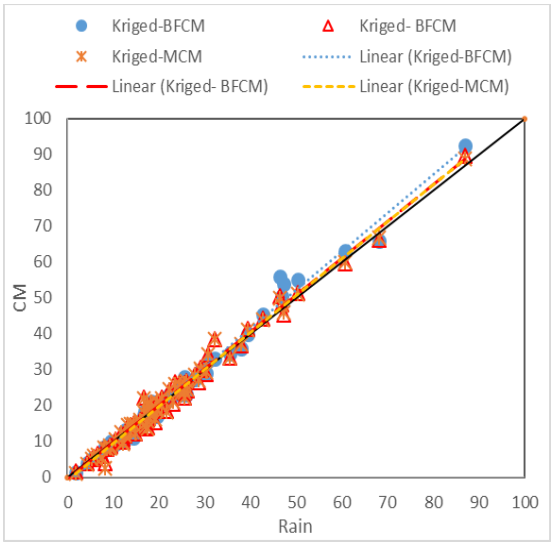


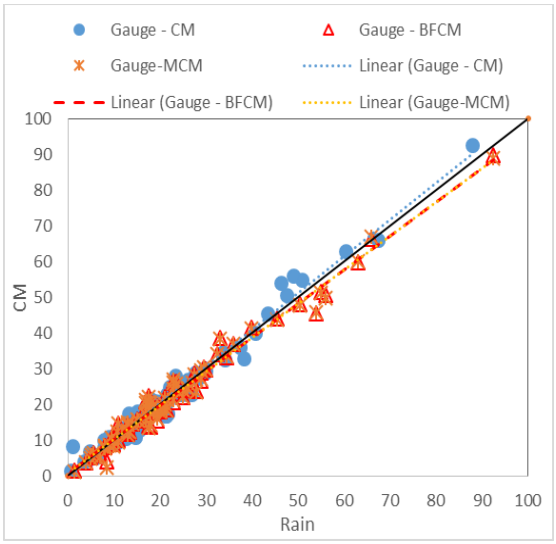
Rainfall events (11/23/2014-11/26/2014)





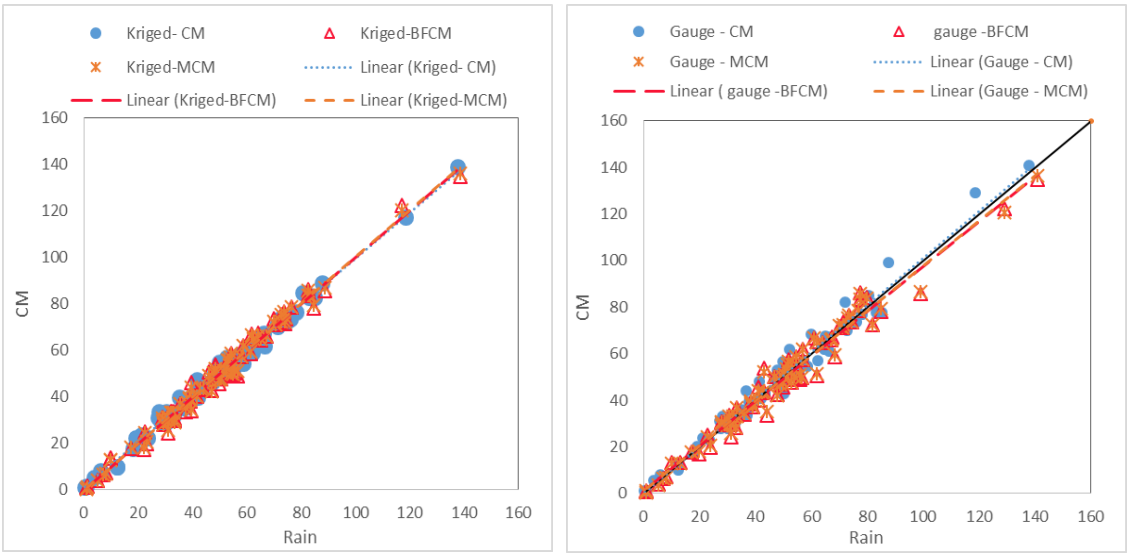
Rainfall events (03/17/2015-03/18/2015)



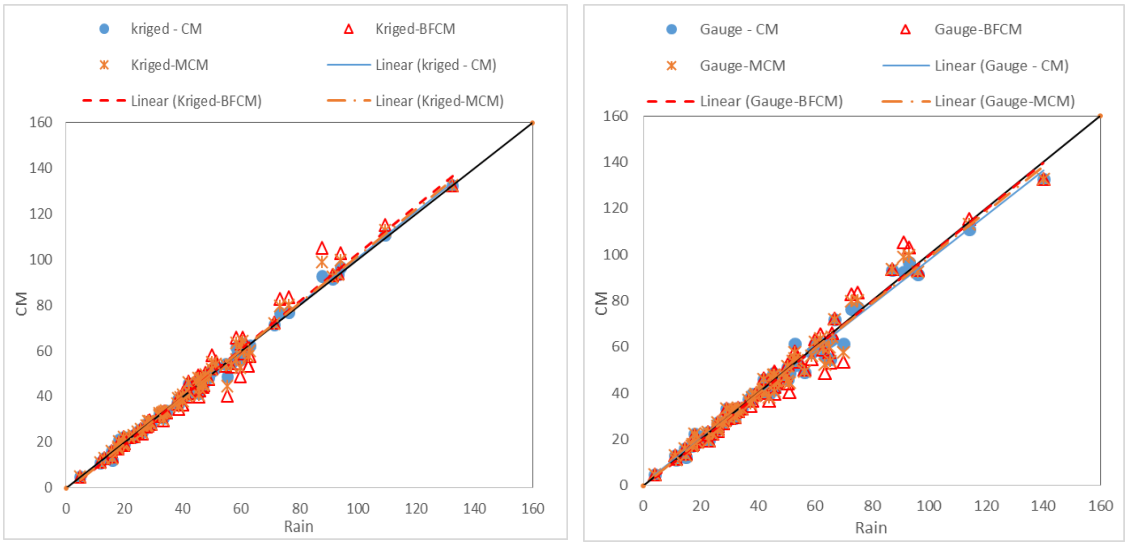


Rainfall events (06/22/2015-06/24/2015)

DOI: 10.22055/jise.2020.30239.1863



Rainfall events (10/11/2015-10/12/2015)



Rainfall events (12/31/2015-01/03/2016)

Fig. 8- Scatter plots and correlation coefficient of the comparison between estimate values of conditional merging methods and rain gauge observation data.

شکل ۸- نمودار پراکندگی و میزان همبستگی بین داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی و درون‌یابی شده با روش kriging با مقادیر بارش حاصل از روش‌های ترکیب

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) و با مقایسه آنالیزهای آماری صورت گرفته بر نتایج هریک از روش های CM، BFCM و MCMبا داده‌های مشاهداتی، نشان می‌دهد که هر سه روش مورد استفاده به‌منظور ترکیب و اصلاح بارش در سطح حوضه مورد مطالعه دارای نتایج نزدیک به هم و قابل‌قبولی بوده است، اما به‌منظور انتخاب و پیشنهاد روش مناسب در ترکیب و اصلاح بارش با هر دو ویژگی توزیع مکانی و حفظ مقادیر بارش، می‌توان گفت که روش ترکیب وضعیت (CM) دارای نتایج بهتر و مورد قبول‌تری می‌باشد و به‌عنوان روش مناسب تعیین شد.

هم چنین با مقایسه مقادیر مشخصات آماری و متوسط بارش منطقه‌ای هریک از روش‌های ترکیب به کاربرد شده در تصحیح و ترکیب بارش ماهواره‌ای و زمینی در جدول (۴) به طور کلی روش ترکیب وضعیت نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. هم چنین براساس جداول فوق ذکر و نتایج مطالعه‌های قبلی انجام شده (Sinclair and pegram, 2005) روند داده‌های بارش ماهواره‌ای دارای مقادیر کم برآورد و داده‌های درون‌یابی شده و ترکیب شده دارای یک روند صعودی و بیش برآوردی هستند.

جدول٤- مشخصات آماری روش‌های ترکیب بارش زمینی و ماهواره‌ای در سطح حوضه آبریز

Table 4- Statistical Characteristics of the satellite–rain gauge data merging technique in the basin.

Rain event	Method	Max	Mean	Min	SD	CV
11/23/2014-11/26/2014	CM	93.57	51.81	10.07	18.62	0.36
	BFCM	93.07	52.05	10.43	18.71	0.36
	MCM	93.32	51.93	10.25	18.66	0.36
03/17/2015-03/18/2015	CM	69.01	38.29	7.06	13.28	0.34
	BFCM	71.74	38.51	8.60	13.49	0.35
	MCM	70.38	38.4	7.83	13.37	0.34
06/22/2015-06/24/2015	CM	89.7	19.4	1.54	10.98	0.55
	BFCM	87.91	19.55	0.63	10.83	0.56
	MCM	88.81	19.48	1.12	10.88	0.56
10/11/2015-10/12/2015	CM	137.77	51.64	-0.36	22.9	0.44
	BFCM	134.66	51.85	0.78	23.49	0.45
	MCM	136.23	51.75	0.22	23.16	0.44
12/31/2015-01/03/2016	CM	132.58	35.27	4.77	18.48	0.52
	BFCM	132.57	35.62	4.8	20.17	0.56
	MCM	132.63	35.62	4.8	20.17	0.57

نتیجه گیری

هدف از این مطالعه اصلاح و بهبود عملکرد داده‌های بارش در سطح حوضه آبریز مند با استفاده از ترکیب داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای به کمک روش‌های زمین‌آماری و روش‌های ترکیب می‌باشد. به‌همین منظور از معیارهای آنالیز آماری برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از مقادیر بارش منطقه‌ای (توزیع شده در سطح) به‌وسیله روش‌های مختلف شامل روش ترکیب وضعیت (CM)، روش ترکیب وضعیت مرتبط با اریبی (BFCM) و روش ترکیب وضعیت متوسط (MCM) با مقادیر بارش مشاهداتی شبکه ایستگاه‌های زمینی در سطح حوضه آبریز استفاده شد. براساس تجزیه و تحلیل‌های آماری صورت گرفته هر سه روش CM، BFCM و MCM به‌طور متوسط به‌ترتیب با میزان RMSE ۲۵/۱۷، ۲۵/۳۲ و ۲۵/۲۳ دقت قابل قبولی دارند. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر بارش منطقه‌ای برآوردی از روش ترکیب وضعیت (CM) نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد به‌طوری که مقادیر بارش ترکیب شده مقادیر بارش ایستگاه زمینی را حفظ کرده و توزیع مکانی بارش را در سطح حوضه نسبت به بارش ماهواره‌ای بهبود بخشیده است. به‌طور کلی این مطالعه اعتبار روش ترکیب وضعیت را برای تخمین و ترکیب داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای به‌منظور اصلاح بارش منطقه‌ای در سطح حوضه آبریز مند را نشان می‌دهد.

تقدیر و تشکر

از کارشناسان محترم شرکت آب منطقه‌ای فارس و بوشهر به‌دلیل همکاری فراوان در تهیه اطلاعات مورد نیاز تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پایان‌نامه با کد GN: SCU.WH95.589 صورت گرفته است.

References

1- Acquaotta, F., Fratianni, S., and Venema, V., 2016. Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. International *Journal of Climatology* 36,pp. 3963-3974. DOI: 10.1002/joc.4606.

2- AghaKouchak, A., Mehran, A., Norouzi, H. and Behrangi, A., 2012. Systematic and random error components in satellite precipitation data sets. *Geophysical Research Letters*, *39*(9).pp. 1-4. DOI: 10.1029/2012GL051592.

3- Barrett, E. C., 1970. The estimation of monthly rainfall from satellite data. *Monthly weather review* 98,pp 322-327. DOI: 10.1175/1520-0493(1970)098<0322:TEOMRF>2.3.CO;2.

4- Borup, M., Grum, M., Linde, J.J. and Mikkelsen, P.S., 2016. Dynamic gauge adjustment of high-resolution X-band radar data for convective rain storms: Model-based evaluation against measured combined sewer overflow. *Journal of Hydrology*, *539*, pp.687-699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.002.

5- Cremonini, R., Tiranti, D. and Barbero, S., 2015. The urban flooding early warning system of the greater Turin (North-Western Italy) based on weather-radar observations. In *Engineering Geology for Society*

and Territory-Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation (pp. 837-842). Springer International Publishing.

6- Doviak, R.J., Zrnic, D.S. and Schotland, R.M., 1994. Doppler radar and weather observations. *Applied Optics*, *33*(21), p.4531.

7- Ehret, U., 2002. Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. *University of Stuttgart, Germany*.

8- Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A. and Zhao, L., 2019. Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric research*, *223*, pp.24-38.

9- Goormans, T. and Willems, P., 2013. Using local weather radar data for sewer system modeling: case study in Flanders, Belgium. *Journal of Hydrologic Engineering*, *18*(2), pp.269-278. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000589.

10- Goudenhoofdt, E. and Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(2), pp.195-203.

11- Guenzi, D., Fratianni, S., Boraso, R. and Cremonini, R., 2017. CondMerg: an open source implementation in R language of conditional merging for weather radars and rain gauges observations. *Earth Science Informatics*, *10*, pp.127-135.

12- Huff, F.A., 1970. Sampling errors in measurement of mean precipitation. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, pp.35-44.

13- Isaaks, E., Srivastava, R., 1989. Applied geostatistics. Oxford University Press.

14- Jordan, P., Seed, A. and Austin, G., 2000. Sampling errors in radar estimates of rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *105*(D2), pp.2247-2257. DOI: 10.1029/1999JD900130.

15- Journel, A. G., and Huijbregts, C. J., 1978. "Mining geostatistics," Academic press London.

16- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *52*(6), pp.119-139.

17- Kim, B.S., Hong, J.B., Kim, H.S. and Yoon, S.Y., 2007. Combining radar and rain gauge rainfall estimates for flood forecasting using conditional merging method. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat* (pp. 1-16). DOI: 10.1061/40927(243)414.

18- Hsu, K.L., Gupta, H.V. and Sorooshian, S., 1997. Application of a recurrent neural network to rainfall-runoff modeling. In *The 1997 24 th Annual Water Resources Planning and Management Conference, Houston, TX, USA, 04/06-09/97* (pp. 68-73).

19- Madani, H., (1995). Fundamentals of Statistics, Amir Kabir University of Technology, Tafresh Branch, 659 p (in Persian).

20- Mahmoud, M.T., Hamouda, M.A. and Mohamed, M.M., 2019. Spatiotemporal evaluation of the GPM satellite precipitation products over the United Arab Emirates. *Atmospheric Research*, *219*, pp.200-212. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.12.029.

21- Marshall, J.S. and Palmer, W.M.K., 1948. The distribution of raindrops with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, *5*(4), pp.165-166. DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2.

22- Oliver, M.A. and Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, *4*(3), pp.313-332. DOI: 10.1080/02693799008941549.

23- Pannatier, Y., 2012. *VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D*. Springer Science & Business Media.

24- Pignone, F., Rebora, N. and Silvestro, F., 2015, April. Modified Conditional Merging technique: a new method to estimate a rainfall field combining remote sensed data and raingauge observations. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 3013).

25- Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M. and Fitzner, D., 2013. Rainfall estimation using moving cars as rain gauges–laboratory experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(11), pp.4701-4712..

26- Scofield, R.A., 1987. The NESDIS operational convective precipitation-estimation technique. *Monthly Weather Review*, *115*(8), pp.1773-1793. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1773:TNOCPE>2.0.CO;2.

27- Sinclair, S. and Pegram, G., 2005. Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, *6*(1), pp.19-22.DOI: 10.1002/asl.85.

28- Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H.V., Imam, B. and Braithwaite, D., 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *81*(9), pp.2035-2046. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSSE>2.3.CO;2.

29- Vignal, B. and Krajewski, W.F., 2001. Large-sample evaluation of two methods to correct range-dependent error for WSR-88D rainfall estimates. *Journal of Hydrometeorology*, *2*(5), pp.490-504. DOI: 10.1175/1525-7541(2001)002<0490:LSEOTM>2.0.CO;2.

30- Zandonadi, L., Acquaotta, F., Fratianni, S. and Zavattini, J.A., 2016. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River basin). *Theoretical and applied climatology*, *123*, pp.741-756.