



Research Paper

## Modeling the Amount of Water in Soil using Satellite Image Information and Infiltration Flux to Estimate Precipitation and Irrigation Water Data

Mohammad Zarei<sup>1</sup> and Bahram Malekmohammadi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>PhD Scholar, Department of Environmental Engineering and Water Resources, Faculty of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Professor, Department of Environmental Planning and Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

### Article information

**Received:** August 25, 2023

**Revised:** November 28, 2023

**Accepted:** December 03, 2023

### Keywords:

AMSR2 Satellite

GLEAM Products

Irrigation

Precipitation Estimation

SM2RAIN-NWF

Water

\*Corresponding author:

[malekb@ut.ac.ir](mailto:malekb@ut.ac.ir)



### Abstract

Precipitation is one of the essential parameters of the water cycle, the estimation of which is effective in water and soil resources management. In this study, the SM2RAIN-NWF algorithm was used to estimate irrigation water consumption at the field scale based on satellite soil moisture data. Satellite soil moisture observations obtained from Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR2) along with GLEAM products and rainfall were used for the period of 2012-2020 as model inputs. Precipitation estimation was performed for three different sites including an agricultural land in Miandoab, a vegetated surface in Malekan, and a barren land in Bonab. Using this model, the coefficient of determination ( $R^2$ ) of precipitation estimation was between 0.53 and 0.70. A comparison of the results revealed that the model exerted much better results in regions with no vegetation. The results of irrigation estimation in Miandoab plain showed that although the model systematically over/under-estimated irrigation data in some seasons compared to the in-situ data, the average performance of the model in irrigated regions (NS = 0.55,  $R^2$  = 0.63, and PRMSE = 2.48%) proved that the proposed approach can provide a suitable prediction of irrigation pattern.

**How to cite this paper:** Zarei, M., & Malekmohammadi, B. (2024). Soil water modeling using satellite image information and infiltration flux to estimate rainfall and irrigation water. *Environ. Water Eng.*, 10(3), 379-391. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.413340.1887> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** Journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Using satellite information makes it possible to estimate precipitation data in various regions. Advances in satellite remote sensing have resulted in the emergence of numerous global precipitation products with high spatial and temporal resolutions. Change in soil moisture is one of the parameters that are highly influencing during rainfalls. Soil moisture increases remarkably during precipitation and gradually decreases afterward. Changes in soil moisture can be used as an indicator to estimate the amount of precipitation in a region. The present study aimed at developing the SM2RAIN algorithm to calculate precipitation and the amount of irrigation water consumed in the Miandoab plain. Accordingly, in addition to considering the effects of runoff in precipitation estimation and considering evapotranspiration in calculating the amount of irrigation water, an

analytical infiltration model with satellite images of soil moisture as the only input data is presented in the algorithm instead of a simple infiltration model. Therefore, providing an appropriate estimation of precipitation and irrigation water data based on satellite imaging tools is the main goal of this study.

### Material and Methods

Miandoab plain, 50° 36'-15' 37" N, 50° 45'-15' 46" E, is located in the southern part of Urmia Lake in West Azarbaijan province, Iran. Its overall topography is uniform and flat. The average height of the plain is 1292 m above sea level. The lowest and highest points of the plain are 1279 and 1400 m above sea level, respectively. The main surface water resources in the Miandoab plain are the Zarrineh-Roud and Simineh-Roud rivers, which flow into Urmia Lake. Figure 1 depicts the location of the study area.

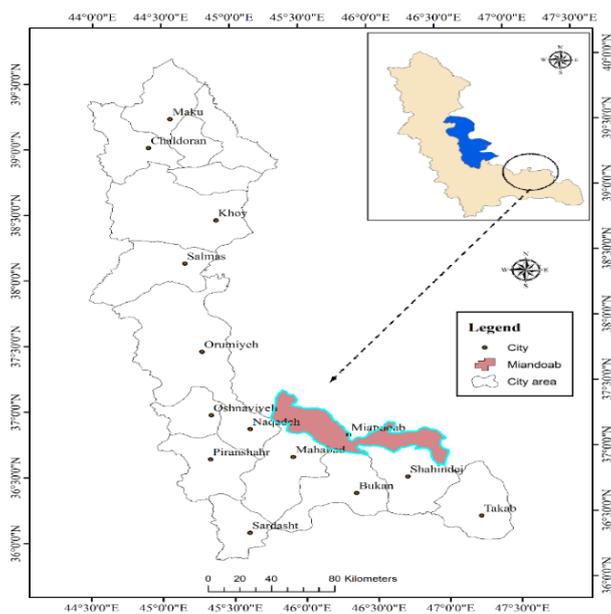


Fig.1 Location of the study area

Soil moisture data was used to simulate precipitation and irrigation patterns. Precipitation data was used to recalibrate the model, while the irrigation data was used to validate the precipitation estimation model. The daily precipitation data obtained from synoptic stations and irrigation data from Miandoab plain for the years between 2012 and 2020 were used in this study. The data received from the Regional Water Company of West Azarbaijan province. Missing data were estimated by the interpolation method to provide a reliable, complete dataset.

AMSR2 C1, AMSR2 C2 and AMSR2 X satellite products were used in this study. In order to validate the model, the remote sensing-based soil moisture products that performed well in the initial evaluation in the target basin in a range between 2012 and 2020 were used. The SM2RAIN paradigm was developed using the analytical model of the net flow flux on the soil surface presented by Sadeghi et al. (2019). The output of this model is the subtraction of the volume of evapotranspiration from the volume of infiltration. Richard's equation (Eq. 1) is used to calculate soil moisture changes.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} - K \right) \quad (1)$$

Where,  $\theta$  is the volumetric moisture content,  $D$  is the water diffusion coefficient in the soil,  $K$  is the hydraulic conductivity of the unsaturated soil, and  $z$  is the depth of the soil.

### Results

According to Table 1, all the three bands of the AMSR2 satellite products (X, C1 and C2)

provided very close results to the observational data for precipitation estimation, both in calibration and verification stages. As an example, in the Miandoab agricultural sector, values of NS, PRMSE and  $R^2$  in AMSR2 C1 were obtained as 0.51, 0.53, and 2.43%, respectively. These values were 0.59, 0.62, and 2.2%, respectively, for the calibration, showing the appropriate performance of the model.

Table 1 Evaluation of cumulative rainfall estimated with observed rainfall

Model	AMSR2								
	C1			C2			X		
Band	NS	$R^2$	PRMSE (%)	NS	$R^2$	PRMSE (%)	NS	$R^2$	PRMSE (%)
Calibration	0.59	0.62	2.20	0.61	0.64	2.15	0.67	0.68	2.11
Validation	0.51	0.53	2.43	0.52	0.53	2.44	0.53	0.57	2.38

Table 2 shows the performance of the model in estimating irrigation water consumption using the data of all AMSR2 satellite bands completed with the GLEAM satellite products.  $R^2$  and NS values equal to 0.70 and 0.51, respectively, obtained for the X band prove the acceptable

performance of the model in estimating the amount of irrigation water. Irrigation water estimation conducted using the AMSR2 C1 satellite data completed by GLEAM also showed efficient performance with  $R^2$  and NS of 0.63 and 0.51, respectively.

Table 2 Evaluation of the estimated amount of irrigation based on correlation coefficient indicators

Models	AMSR2								
	C1			C2			X		
Error evaluation criteria	NS	$R^2$	PRMSE (%)	NS	$R^2$	PRMSE (%)	NS	$R^2$	PRMSE (%)
Calibration	0.51	0.63	2.51	0.52	0.66	2.48	0.51	0.70	2.46
Validation	0.54	0.61	2.53	0.53	0.61	2.51	0.55	0.63	2.48

### Conclusions

In this study, the SM2RAIN-NWF algorithm was used to estimate precipitation and volume of irrigation water in the Miandoab plain. The results can be summarized as below:

1. The SM2RAIN-NWF model applied to the AMSR2 soil moisture data in the period of 2012-2020 can estimate temporal pattern of precipitation and irrigation water data. However, it systematically under/over-estimates irrigation amount compared to the in-situ data in some seasons.
2. The investigated sites in this study include agricultural surface cover, vegetation cover, and barren lands. The model showed much better results in areas with no vegetation cover.

3. The results of irrigation simulation obtained using the X band of AMSR2 and the GLEAM satellite products for the Miandoab station showed  $R^2$  and NS values equal to 0.70 and 0.51, respectively, indicating the acceptable performance of the model in estimating the amount of irrigation water.

### Data Availability

Data can be shared by the corresponding author via email ([malekb@ut.ac.ir](mailto:malekb@ut.ac.ir)) upon reasonable request.

### Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط‌زیست و مهندسی آب

Homepage: [www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

مقاله پژوهشی

## مدل‌سازی مقدار آب در خاک با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و شار نفوذ برای تخمین داده‌های بارش و آب آبیاری

محمد زارعی<sup>۱</sup> و بهرام ملک‌محمدی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط‌زیست و منابع آب، دانشکده مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشیار، گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

## اطلاعات مقاله

## چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۶/۰۳]  
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۹/۰۷]  
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۹/۱۲]

## واژه‌های کلیدی:

آب کشاورزی  
تخمین بارش  
ماهواره AMSR2  
تصاویر GLEAM  
SM2RAIN-NWF

## \*نویسنده مسئول:

[malekb@ut.ac.ir](mailto:malekb@ut.ac.ir)



بارش یکی از مهم‌ترین پارامترهای چرخه آب است که تخمین آن می‌تواند در مدیریت منابع آب‌و خاک بسیار مؤثر باشد. لذا در این پژوهش، از الگوریتم SM2RAIN-NWF برای برآورد مصرف آب آبیاری در مقیاس حوضه بر اساس داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای استفاده شد. مشاهدات رطوبت خاک ماهواره‌ای به‌دست‌آمده از راديو متر اسکن ماکروویو پیشرفته (AMSR2) همراه با تصاویر ماهواره GLEAM و بارندگی برای دوره ۲۰۱۲-۲۰۲۰ به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. تخمین میزان بارش برای سه بخش مختلف که شامل بخش کشاورزی در میان‌دوآب، پوشش گیاهی در ملکان و زمین بایر در بناب در حوضه مورد مطالعه انجام شد. ضریب تبیین  $R^2$  برای تخمین بارش توسط این مدل بین ۰/۵۳ تا ۰/۷۰ به دست آمد. مقایسه نتایج نشان داد که مدل در مناطق فاقد پوشش گیاهی نتایج به‌مراتب بهتری را نشان می‌دهد. نتایج تخمین داده‌های آب آبیاری نیز در دشت میان‌دوآب نشان داد که اگرچه مدل، به‌طور سامانمند آبیاری را در مقایسه با داده‌های زمینی در برخی فصول کم‌تر و در برخی فصول بیشتر برآورد می‌کند، میانگین عملکرد مدل در محدوده‌های آبیاری شده برحسب NS،  $R^2$  و PRMSE به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۶۳ و ۲/۴۸٪ بود که نشان می‌دهد رویکرد پیشنهادی می‌تواند بیانگر مناسبی برای الگوی آبیاری باشد.

## نحوه استناد به این مقاله:

زارعی، محمد. & ملک‌محمدی، بهرام. (۱۴۰۳). مدل‌سازی مقدار آب در خاک با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و شار نفوذ برای تخمین بارش و آب آبیاری. محیط‌زیست و مهندسی آب. 10(3): 379-391. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.413340.1887>



## ۱- مقدمه

است که از تأثیرپذیری بالایی در هنگام بارندگی برخوردار است. رطوبت خاک در زمان بارندگی به شدت افزایش یافته و بعد از بارش به تدریج از مقدار آن کاسته می‌شود. تغییرات موجود در رطوبت خاک می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت تخمین مقدار بارش در یک منطقه مورد استفاده قرار گیرد (Brocca et al. 2014; Ciabatta et al. 2018). ایده استفاده از رطوبت خاک به‌عنوان یک باران‌سنج طبیعی نخستین بار توسط Brocca و همکاران در سال ۲۰۱۴ مطرح شد (Brocca et al. 2014). رطوبت خاک با بارش ارتباط آشکار و نزدیک فیزیکی دارد و در واقع بارش باران عامل اصلی تغییرات رطوبت خاک در هر ناحیه در فصول غیر آبیاری هست (Brocca et al. 2014). روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد. دستگاه‌هایی مانند نوترون متر، بلوک گچی، تانسومتر، TDR<sup>۲</sup> و تتاپروب و یا با نمونه‌برداری جهت خشک‌کردن در آون (Fereydooni et al. 2016) استفاده می‌گردد. علاوه بر این‌ها می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک استفاده نمود. تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک بسیاری از جمله<sup>۳</sup> SMOS،<sup>۴</sup> ASCAT،<sup>۵</sup> CCI و<sup>۶</sup> AMSR وجود دارند. پس از بررسی دقت این تصاویر در مقایسه با داده‌های زمینی رطوبت خاک، می‌توان از تصویر مناسب برای منطقه استفاده نمود (Fereydooni 2015). الگوریتم SM2RAIN<sup>۷</sup> یکی از مهم‌ترین روش‌های برآورد بارش از روی تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک است که توسط Brocca et al. (2014) توسعه داده شده است. در این روش، محققین با حل معکوس معادله بیلان آب خاک، یک رابطه نسبتاً ساده بین بارش و رطوبت سطحی خاک توسعه دادند. الگوریتم SM2RIAN یکی از روش‌های مناسب تخمین بارش است که با نگاه از پایین به بالا مقادیر بارش را تخمین می‌زند. علاوه بر این اخیراً از این الگوریتم به‌منظور محاسبه‌ی عمق آب مصرفی در آبیاری نیز استفاده شده است (Saeedi et al. 2022). چراکه کشاورزی یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌های منابع آب شیرین است و داشتن اندازه‌گیری دقیق از عمق آبیاری در مناطق کشاورزی بسیار مهم است. اندازه‌گیری بهتر آبیاری می‌تواند به بهبود بهره‌وری و مدیریت

بارش یکی از مهم‌ترین متغیرهای ورودی برای کارهای هیدرولوژی، زمین‌شناسی، اقلیم‌شناسی و جنگلداری است (Brocca et al. 2015). تخمین میزان بارش برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی سیل و خشک‌سالی و همچنین رانش زمین از اهمیت بالایی برخوردار است (Azizian and Ramezani 2019). همچنین به‌منظور بررسی منابع آبی یک منطقه و به دست آوردن پارامترهای بیلان آب یک حوضه محاسبه دقیق مقدار بارش دارای اهمیت است (Taromi et al. 2020). بررسی سوابق بلندمدت بارندگی برای پیش‌خشک‌سالی (Forootan et al. 2019)، مدیریت منابع آب (Abera et al. 2017) و مطالعات آب و هوایی (Herold et al. 2016; Pendergrass and Knutti 2018) ضروری است. از آنجایی‌که وقوع بارش در مکان و زمان‌های مختلف، متفاوت است، نمی‌توان مدعی شد که اندازه‌گیری بارش در یک نقطه خاص از یک منطقه وسیع می‌تواند نماینده خوبی از آن منطقه باشد (Mekonnen 2009; Khoshkho 2018)؛ بنابراین جهت برآورد مقدار بارش بر اساس داده‌های ایستگاه‌های باران-سنجی، باید مقادیر ثبت‌شده در ایستگاه‌ها به کل ناحیه مورد مطالعه بسط داده شود، بنابراین باید در انتخاب محل و تعداد ایستگاه‌ها، نحوه اندازه‌گیری و تحلیل داده‌ها نهایت دقت را به عمل آورد. باین‌وجود تخمین‌های محاسبه‌شده با خطاهای نسبتاً زیادی همراه است (Ashouri et al. 2015). از آنجایی‌که ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش زمینی دارای پراکندگی زیادی هستند و دسترسی به آمار و داده‌های آن‌ها معمولاً با تأخیر همراه است، استفاده از روش‌های دیگر مانند استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند سودمند باشد (Taromi et al. 2020).

استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای امکان تخمین بارش را برای یک منطقه وسیع امکان‌پذیر می‌کند (Ghajarnia et al. 2019; Brocca et al. 2015). پیشرفت‌ها در سنجش‌ازدور ماهواره‌ای، محصولات بارشی متعددی را در سطح جهانی با وضوح‌های مکانی و زمانی بالا در دسترس قرار داده است (Guo et al. 2015). بارش مبتنی بر ماهواره منبعی ضروری برای تحقیقات در تمام مدل‌های سطح زمین مستقل<sup>۱</sup> (LSMs) بوده است (Hong et al. 2006; Mehrabi et al. 2019). در این بین تغییرات رطوبت خاک یکی از پارامترهایی

<sup>2</sup>Time-Domain Reflectometry<sup>3</sup>Soil Moisture and Ocean Salinity<sup>4</sup>Advanced Scatterometer<sup>5</sup>Communication-Centric Intelligence<sup>6</sup>Advanced Microwave Scanning Radiometer<sup>7</sup>Soil moisture to Rain<sup>1</sup>Land surface model

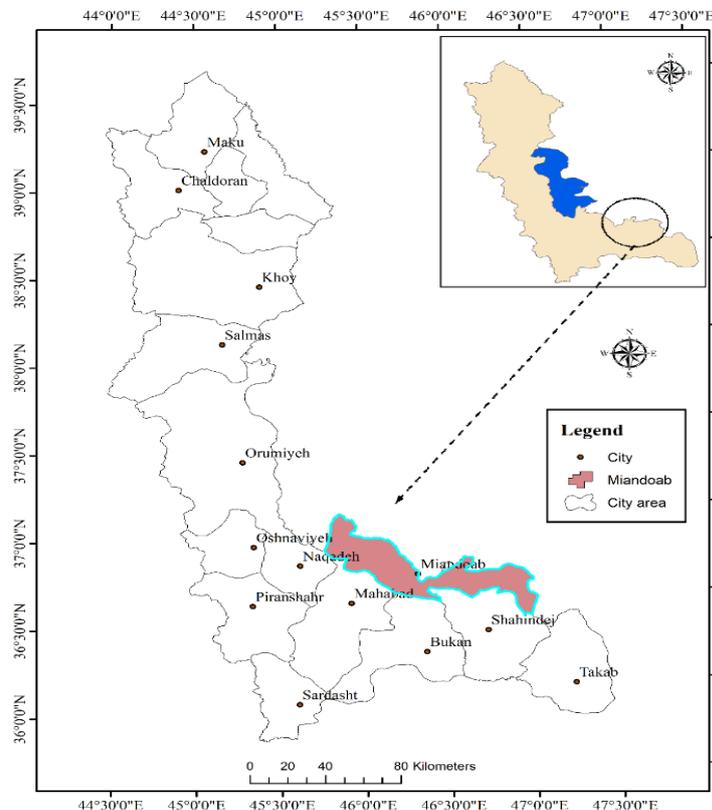
دشت بین  $36^{\circ} 50'$  تا  $37^{\circ} 15'$  عرض شمالی و  $45^{\circ} 45'$  تا  $46^{\circ} 46'$  عرض شرقی قرار دارد. متوسط ارتفاع دشت از سطح دریا برابر با ۱۲۹۲ m عنوان شده است. پست‌ترین نقطه دشت دارای ارتفاع ۱۲۷۹ m از سطح دریا و بلندترین ارتفاع در دشت میان‌دوآب معادل با ۱۴۰۰ m ثبت گردیده است. میزان نزولات متوسط سالیانه در دشت میان‌دوآب معادل mm ۲۹۶ بوده و حدود ۵۰ الی ۵۵٪ این نزولات در سه ماه اسفند، فروردین و اردیبهشت و ۳۰٪ در سه ماه آذر، دی و بهمن و تنها ۱۵٪ به ماه‌های تابستان اختصاص دارد (Anonymous 2020). دشت میان‌دوآب که از مراکز اصلی کشاورزی در منطقه است. به‌عنوان یکی از زیر حوضه‌های اصلی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه به‌تنهایی در حدود نیمی از جریانات سطحی ورودی به دریاچه را از خود عبور می‌دهد. همچنین در حدود ۲۰٪ از کل برداشت‌های آب زیرزمینی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه به این دشت اختصاص دارد. عمده‌ترین منابع آب‌های سطحی دشت میان‌دوآب رودخانه زرینه‌رود و سیمینه‌رود است که پس از مورداستفاده قرار گرفتن برای تأمین نیاز آبی اراضی دشت مزبور، به دریاچه ارومیه می‌ریزند. شکل (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

آبیاری کمک کند (Jalilvand et al. 2019; Zhang et al. 2022). لذا این پژوهش باهدف توسعه الگوریتم SM2RAIN به‌منظور محاسبه بارش و میزان آب آبیاری مصرفی در دشت میان‌دوآب انجام شد. برای این منظور علاوه بر در نظر گرفتن اثر رواناب در تخمین بارش و در نظر گرفتن تبخیر و تعرق در محاسبه مقدار آب آبیاری، از یک مدل نفوذ تحلیلی که تنها داده ورودی آن تصاویر رطوبت خاک است، به‌جای مدل نفوذ ساده در الگوریتم اولیه‌ی ارائه‌شده، استفاده شد. از این رو تخمین مناسب مقدار آب آبیاری و استفاده از ابزارهای تصاویر ماهواره‌ای در مدیریت آب‌و‌خاک از اهداف این تحقیق است. پس از توسعه الگوریتم، مقدار بارش و آبیاری با استفاده از مدل توسعه داده‌شده برای منطقه مورد مطالعه اجرا و با نتایج الگوریتم اولیه مقایسه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت میان‌دوآب در قسمت جنوبی دریاچه ارومیه و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. توپوگرافی کلی حاکم بر دشت مذکور یکنواخت و هموار است و فقط تعدادی تپه کوچک در مرکز آن قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی

Fig. 1 Location of the study area

می‌باشد. با فرض ثابت نگهداشتن  $D$  و  $K$  یک تابع خطی از  $\theta$  به دست می‌آید که با اعمال این تغییرات در نتیجه معادله ریچاردز به‌مانند رابطه (۲) نوشته می‌شود (Sadeghi et al. 2019):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - k \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2)$$

در ادامه مقدار نفوذ خالص جریان در خاک را می‌توان از معادله نفوذ که توسط (Sadeghi et al. 2019) ارائه شده است به دست آورد (رابطه ۳):

$$I_N = g(t) - e(t) \rightarrow g(t) = I_N + e(t) \quad (3)$$

که،  $g(t)$  میزان نفوذ،  $I_N$  شار جریان خالص در خاک و  $e(t)$  مقدار واقعی تبخیر و تعرق است. در ادامه رابطه (۴) معادله الگوریتم SM2RAIN که توسط (Brocca et al. 2015) ارائه شده است را نشان می‌دهد:

$$nZ \frac{ds(t)}{dt} = I(t) - g(t) - r(t) - e(t) \quad (4)$$

که در آن  $n$  تخلخل خاک،  $Z$  عمق لایه خاک برحسب (mm)،  $S(t)$  رطوبت نسبی خاک برحسب  $(m^3/m^3)$ ،  $t$  زمان بر حسب روز،  $I(t)$  کل آب ورودی به خاک  $(mm/day)$ ،  $g(t)$  میزان زهکشی (نفوذ به‌علاوه رواناب زیرسطحی) برحسب  $(mm/day)$ ،  $r(t)$  رواناب سطحی  $(mm/day)$  و  $e(t)$  تبخیر و تعرق واقعی برحسب  $(mm/day)$  است. مطالعات آزمایشگاهی (Song et al. 2020) نشان داد که سهم رواناب سطحی در شرایط آزمایشگاهی و استفاده از الگوریتم SM2RAIN در تخمین بارش برابر با ۱۲٪ و سهم تغییرات رطوبت تقریباً برابر با ۸۵٪ می‌باشد؛ بنابراین مقدار رطوبت نسبی خاک از رابطه (۵) به دست می‌آید (Song et al. 2020):

$$I(t) = \frac{z^* ds(t)/dt + I_N + 2 ET_{pot}(t) s(t)}{1 - S(t)^c} \quad (5)$$

که،  $Z^*$ ،  $a$  و  $b$  ضرایب واسنجی مدل،  $I(t)$  کل آب ورودی به خاک  $(mm/day)$ ،  $ET_{pot}(t)$  تبخیر و تعرق پتانسیل و  $I_N$  شار خالص آب در خاک (نفوذ منهای تبخیر تعرق) است. در روزهای غیر بارانی و فصل آبیاری برای زمین‌های کشاورزی  $I(t)$  برابر با مقدار آب آبیاری است و از رابطه (۶) به دست می‌آید (Song et al. 2020):

$$IR(t) = \frac{z^* ds(t)/dt + I_N + 2 ET_{pot}(t) s(t)}{1 - S(t)^c} \quad (6)$$

به‌منظور محاسبه بارش در فصول غیر آبیاری با استفاده از الگوریتم توسعه داده‌شده فوق و فرض ناچیز بودن مقدار

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش داده‌های اصلی شامل رطوبت خاک ماهواره-ای، بارش و مقدار آبیاری مشاهداتی است که از اطلاعات موجود در شرکت آب منطقه‌های محدوده مذکور اخذ شد (Anonymous 2020). از داده‌های رطوبت خاک جهت شبیه‌سازی بارش و آبیاری استفاده شد. از داده‌های بارش برای واسنجی مدل و از داده‌های آبیاری برای صحت‌سنجی مدل تخمین بارش استفاده شد. در این مطالعه داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و داده‌های آبیاری دشت میاندوآب برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. گام زمانی داده‌ها به‌صورت روزانه و اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی اخذ گردید. داده‌های دریافتی ابتدا مورد ارزیابی اولیه قرار گرفتند و داده‌های گم‌شده به‌وسیله روش‌های رگرسیونی و داده‌های تاریخی تکمیل شد. در نهایت داده‌های حاصل به‌وسیله مدل‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲-۱- داده‌های رطوبت خاک محاسبه‌شده

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای AMSR2، AMSR2 C1 و AMSR2 X و C2 استفاده شد. برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل از تصاویر رطوبت خاک سنجنش‌ازدور که در ارزیابی اولیه عملکرد مطلوبی در حوضه موردنظر داشته‌اند برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. تصاویر AMSR2 دارای وضوح بیش از ۱۰ km هستند. برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل از بهترین محصولات رطوبت خاک سنجنش‌ازدور که در ارزیابی اولیه عملکرد مطلوبی در حوضه موردنظر داشته‌اند استفاده شد. با استفاده از مدل تحلیلی شار خالص جریان در سطح خاک که به‌وسیله Sadeghi et al. (2019) ارائه شده است، الگوریتم SM2RAIN توسعه داده شد. خروجی مدل Sadeghi et al. (2019) مقدار نفوذ منهای مقدار تبخیر و تعرق است. معادله ریچاردز<sup>۱</sup> (رابطه ۱) برای تغییرات رطوبت خاک استفاده می‌شود (Sadeghi et al. 2019):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} - K \right) \quad (1)$$

که،  $\theta$  مقدار رطوبت حجمی و  $D$  ضریب پخش آب در خاک<sup>۲</sup> و  $K$  هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع<sup>۳</sup> و  $Z$  عمق خاک

<sup>1</sup>Richards' equation

<sup>2</sup>Soil Water Diffusivity

<sup>3</sup>Unsaturated Soil Hydraulic Conductivity

که،  $x_p$  و  $x_o$  به ترتیب مقادیر مشاهداتی و تخمین زده‌شده هستند.  $\bar{x}_o$  نیز بیانگر میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد. هرچقدر مقادیر معیارها به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر تخمین مناسب مدل‌های مورد استفاده می‌باشد.

### ۳- یافته‌ها و بحث

#### ۳-۱- تخمین بارش با استفاده از SM2RAIN و NWF

محدوده میاندوآب دارای پوشش سطح زمین کشاورزی بوده تا بتوان مقدار آب آبیاری را نیز در آن تخمین زد. با توجه به روابط استخراج‌شده در بخش روش تحقیق پارامترهای  $a$ ،  $z$  و  $b$  در این فرآیند مدل‌سازی کالیبره شده و پارامترهای  $D$ ،  $f_{max}$  و  $k$  به ترتیب  $۱۵۲/۷ \text{ cm}^2/\text{d}$ ،  $۸ \text{ cm}/\text{d}$  و  $۱ \text{ cm}/\text{d}$  تعریف شد. نتایج پارامترهای کالیبره شده مدل برای هر سه باند AMSR2 در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول مذکور مقدار پارامتر  $b$  در محدوده‌های مختلف مورد بررسی، برای تمامی باندهای AMSR2 مقدار  $۱۵/۹$  بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار رواناب در این حوضه با استفاده از رابطه (۱۱) مناسب می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر متغیرهای مدل به دست آمده از واسنجی در دوره‌ی ۲۰۱۲-۲۰۱۸

Table 1 Values of model parameters obtained from calibration in the period of 2012-2018

Station	Band	Z	a	b	$f_{max}$	D	k
Miandoab	C1	2.60	23.03	15.9	8.0	152.7	1.0
	C2	1.83	24.05	15.9	8.0	152.7	1.0
	X	34.4	16.25	15.9	8.0	152.7	1.0

مقدار بارش کمتر از مقدار واقعی بارش اندازه‌گیری شده تخمین زده شده است. لذا مانند مطالعه انجام شده توسط Brocca et al. (2013) مقدار تخمین بارش تمایل به دست کم گرفتن تخمین مقدار بارندگی را در شرایط بسیار مرطوب را دارد؛ اما به طور کلی مدل قادر به تخمین الگوی بارش در تمامی دوره‌های شبیه‌سازی می‌باشد. در ماهواره AMSR2 باند C1 و تکمیل شده با GLEAM (شکل ۲-ب) نیز با ضریب همبستگی  $R^2$  برابر  $۰/۶۲$  و NS برابر  $۰/۵۹$  دقت قابل قبول تخمین بارش توسط این مدل در محدوده مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تخمین بارش با داده‌های این باند مشاهده می‌شود در بیش‌تر ماه‌های سال مقدار بارش کم تر از مقدار واقعی بارش اندازه‌گیری شده تخمین زده شده است. با این حال در مقایسه با باند X مقادیر بارش در برخی ماه‌ها بیش‌تر تخمین زده شده است. در عین حال مقدار تخمین

تبخیر و تعرق در زمان بارندگی، مقدار بارش با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد (Song et al. 2020):

$$P(t) = \frac{z^* ds(t)/dt + I_N}{1 - S(t)^c} \quad (7)$$

عملکرد مدل‌های به مورد استفاده توسط برخی معیارهای ارزیابی خطا مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخت شد.

#### ۲-۲-۲- معیارهای ارزیابی خطا

برای بررسی عملکرد مقادیر تخمینی توسط مدل‌های مورد استفاده برای بارش و مقدار آب آبیاری از برخی معیارهای ارزیابی خطا مانند ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب نش - ساتکلیف (NS) و درصد مجذور میانگین مربعات خطا (PRMSE) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_o)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_p)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2} \quad (9)$$

$$PRMSE = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_p)^2}{n \sum_{i=1}^n x_o}} \quad (10)$$

$$R(t) = P(t) \cdot S(t)^{15.9} \quad (11)$$

نتایج کالیبره پارامترها نشان می‌دهد که مقادیر تغییرات پارامترهای  $a$ ،  $b$ ،  $z$  به دست آمده در محدوده پارامترهای تخمین زده شده در مطالعات گذشته می‌باشد (Brocca et al. 2019).

شکل (۲-الف) نتایج واسنجی و صحت‌سنجی تخمین بارش را در محدوده کشاورزی میاندوآب را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ماهواره AMSR2 باند X و تکمیل شده با GLEAM نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مدل در خارج از فصل آبیاری تطابق خوبی بین بارندگی تخمین زده و مشاهده شده برقرار کرده است. ضریب  $R^2$  برابر  $۰/۶۸$  و NS برابر  $۰/۶۷$  دقت تخمین بارش توسط این مدل بخش کشاورزی میاندوآب را نشان می‌دهد. در بیشتر ماه‌های سال

$R^2$  و PRMSE در CIAMSR2 به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۵۳ و ۲/۴۳ صحت‌سنجی به دست آمد. در این بخش مقادیر مذکور برای واسنجی نیز به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۶۲ و ۲/۲۰ برآورد شده است که عملکرد مناسب مدل مذکور را نشان می‌دهد. نتایج استخراج‌شده از جدول مذکور نشان می‌دهد که باند X مقادیر تخمین مناسب‌تری از بارش نسبت به دو باند دیگر داشته است.

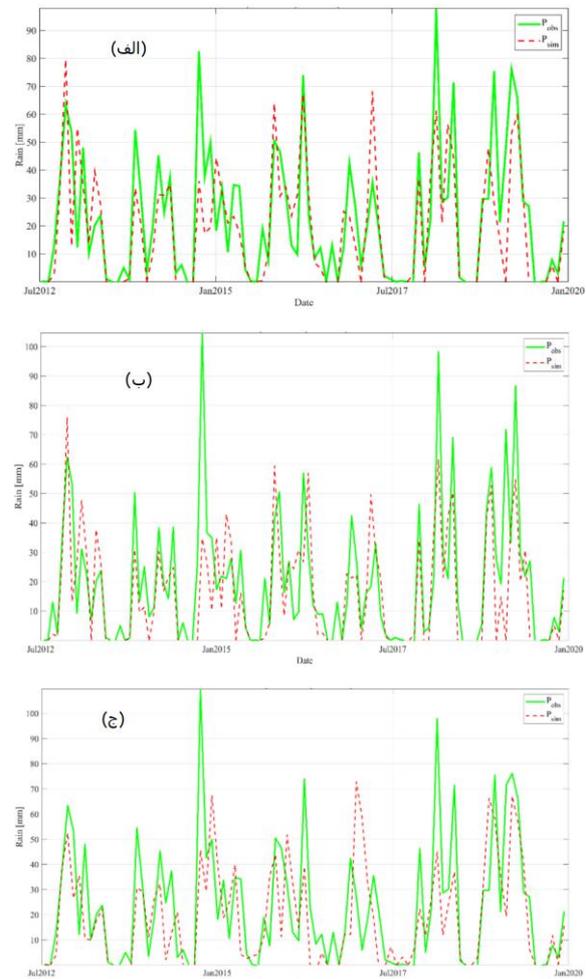
جدول ۲- ارزیابی مقدار بارش تجمعی تخمین زده‌شده با بارش مشاهداتی بر اساس معیارهای ارزیابی خطا

Table 2 Evaluation of cumulative rainfall estimated with observed rainfall based on error evaluation criteria

Band	C1		
Error Evaluation	NS	$R^2$	PRMSE (%)
Calibration	0.59	0.62	2.20
Validation	0.51	0.53	2.43
Band	C2		
Error Evaluation	NS	$R^2$	PRMSE (%)
Calibration	0.61	0.64	2.15
Validation	0.52	0.53	2.44
Band	X		
Error Evaluation	NS	$R^2$	PRMSE (%)
Calibration	0.67	0.68	2.11
Validation	0.53	0.57	2.38

در ادامه همچنین تخمین بارش برای دو منطقه مختلف دیگر در حوضه مورد مطالعه انجام شد. این دو منطقه دارای پوشش سطح مختلف نسبت به مناطق کشاورزی میان‌دوآب می‌باشند. محدوده‌های مورد بررسی دارای سطح پوشش گیاهی در شهرستان ملکان و زمین بایر در بناب می‌باشد. شکل (۳) نتایج تخمین بارش در محدوده بناب را بیان می‌کند که در آن مقادیر داده‌های مشاهداتی و تخمینی در باندهای مختلف مناسب ارزیابی می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بیشتر ماه‌های سال مقدار بارش کمتر از مقدار واقعی بارش اندازه‌گیری شده تخمین زده‌شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل در مناطق فاقد پوشش گیاهی نتایج به مراتب بهتری را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی همچنین بیانگر عدم تخمین مناسب باند C2 در مقادیر حداکثر بارش می‌باشد. در ادامه نتایج نیز به تعیین آب آبیاری با استفاده از مدل SM2RAIN و NWF پرداخته شده است.

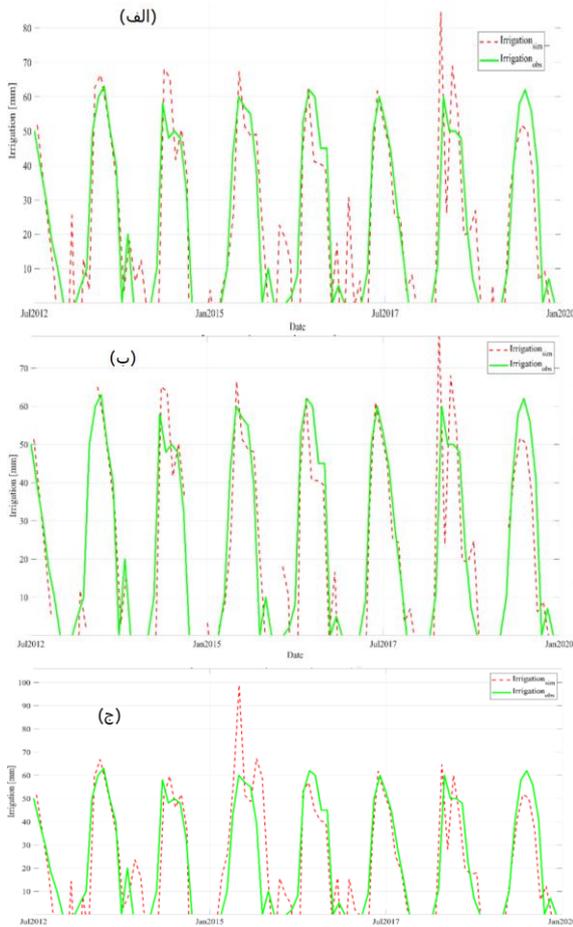
بارش همچنان تمایل به دست‌کم گرفتن تخمین مقدار بارندگی را در شرایط مرطوب دارد (شکل ۲).



شکل ۲- تخمین بارش در محدوده میان‌دوآب در روزهای بارانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای AMSR2 الف- باند X و تکمیل‌شده با GLEAM ب- باند C1 و تکمیل‌شده با GLEAM، ج- باند C2 و تکمیل‌شده با GLEAM

Fig. 2 Precipitation estimation at Miandoab site on rainy days using AMSR2 a) X- band satellite products and supplemented with GLEAM b) C1-band satellite products and supplemented with GLEAM c) C2-band satellite products and supplemented with GLEAM

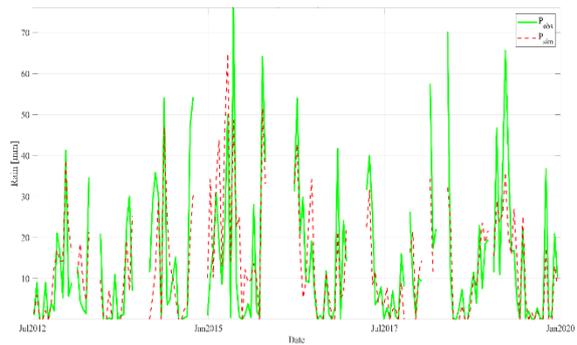
نتیجه بررسی دقت مدل در تخمین بارش با استفاده از سه محصول باند X، باند C1 و باند C2 ماهواره AMSR2 برای ایستگاه مذکور در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول (۲) نشان داده شده است. بر اساس جدول (۲)، هر سه باند مورد استفاده برای تخمین بارش، هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله صحت‌سنجی نتایج بسیار نزدیکی ارائه داده‌اند. به‌عنوان نمونه در بخش کشاورزی میان‌دوآب مقادیر NS،



شکل ۴- تخمین مقدار آبیاری در محدوده میان‌دوآب با استفاده از X و باندهای مختلف، الف- باند AMSR2 تصاویر ماهواره‌ای GLEAM و C2، ج- باند GLEAM و C2، ب- باند GLEAM و C1

Fig. 4 Estimation of the amount of irrigation in the Miandoab site using: a) band X and GLEAM, b) band C2 and GLEAM and c) band C1 and GLEAM

نتایج نشان داده‌شده در جدول (۳) ارزیابی دقت مدل در تخمین آب آبیاری را با استفاده از مجموعه داده‌های همه باندهای ماهواره AMSR2 نشان می‌دهد. از نتایج جدول (۳) مشخص است که تخمین صورت گرفته‌شده با استفاده از باندهای مدل AMSR2 مناسب بوده است. در بین باندها، باند X عملکرد نسبتاً مناسبی نسبت به دو باند دیگر داشته است. در این باند مقادیر  $NS$ ،  $R^2$  و  $PRMSE$  برای داده‌های صحت‌سنجی به ترتیب برابر  $0/55$ ،  $0/63$  و  $2/48\%$  به دست آمد. در همین باند و مقادیر معیارهای مذکور برای بخش واسنجی نیز به ترتیب برابر  $0/51$ ،  $0/70$  و  $2/46\%$  می‌باشد که نشان می‌دهد مقادیر دقت داده‌های تخمینی در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی نزدیک یکدیگر بودند.



شکل ۳- تخمین بارش در روزهای بارانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بناب، باند AMSR2 و GLEAM

Fig. 3 Precipitation estimation on rainy days using C1-band AMSR2 with GLEAM.

### ۳-۳- تعیین آب آبیاری با استفاده از مدل‌های NWF و SM2RAIN

برای تعیین میزان مصرف آب آبیاری، تفاوت بین آب شبیه‌سازی‌شده ماهانه ورودی به خاک (آبیاری به‌اضافه بارندگی) و بارندگی مشاهده‌شده ماهانه محاسبه می‌شود. شکل (۴-الف) مقدار آبیاری شبیه‌سازی‌شده را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای AMSR2 باند X و GLEAM برای ایستگاه موردبررسی نشان می‌دهد.  $R^2$  برابر  $0/70$  و  $NS$  برابر  $0/51$  نشان از دقت قابل‌قبول مدل در تخمین مقدار آبیاری دارد. تخمین آبیاری با داده‌های ماهواره AMSR2 باند C1 و تکمیل‌شده با GLEAM نیز با  $R^2$  برابر  $0/63$  و  $NS$  برابر  $0/51$  به خوبی روند آبیاری موجود در محدوده را نشان داده و مقدار آبیاری را تخمین زده است (شکل ۴-ب). همان‌طور که در شکل (۴-ب) قابل‌مشاهده است، استفاده از الگوریتم منجر به دست‌کم گرفتن آبیاری شده اما همچنان می‌تواند فصلی بودن آبیاری را مطابق با داده‌های درجا ثبت کند. تخمین حد پایین‌تر در مدل می‌تواند به در نظر نگرفتن منابع آب مکمل (آب‌های زیرزمینی یا استخراج مستقیم آب از رودخانه‌ها) در مجموعه داده آبیاری نسبت داد. همچنین  $R^2$  در تخمین آبیاری با داده‌های ماهواره AMSR2 باند C2 و تکمیل‌شده با GLEAM نیز  $0/66$  و  $NS$  برابر  $0/52$  بوده که نشان از دقت قابل‌قبول مدل در تخمین مقدار آبیاری دارد (شکل ۴-ج). با این حال نتایج سری زمانی نشان می‌دهد که تخمین مقدار آب آبیاری توسط مدل‌های NWF و SM2RAIN مناسب می‌باشد.

جدول ۳- ارزیابی مقدار آبیاری تخمین زده شده در محدوده کشاورزی میان‌دوآب

Table 3 Evaluation of the estimated amount of irrigation in the agricultural region of Miandoab

Models	AMSR2								
	C1			C2			X		
Error Evaluation	NS	R <sup>2</sup>	PRMSE (%)	NS	R <sup>2</sup>	PRMSE (%)	NS	R <sup>2</sup>	PRMSE (%)
Calibration	0.51	0.63	2.51	0.52	0.66	2.48	0.51	0.70	2.46
Validation	0.54	0.61	2.53	0.53	0.61	2.51	0.55	0.63	2.48

عدم وجود ایستگاه‌های باران‌سنجی و پراکندگی بارش موجب شده است در برخی ناحیه‌ها مقادیر بارش به‌درستی تخمین زده نشود. با این وجود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای یکی از مناسب‌ترین ابزارها جهت برآورد مقدار بارندگی و همچنین حجم رواناب ناشی از آبیاری می‌باشد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که مدل SM2RAIN عملکرد مناسب در تخمین بارش داشته است که نتایج آن همسو با نتایج تحقیقات (Fereydooni (2015) در استفاده از این مدل برای تخمین بارش در منطقه شبستر بود. همچنین در تحقیق دیگری که توسط Mehrabi et al. (2019) در خصوص استفاده از سنسور از دور برای تخمین رطوبت انجام شده بود، دقت این نوع ابزارها در مسائل زیست‌محیطی را نشان داد. با این وجود همواره باید توجه نمود که تخمین بارش توسط این مدل‌ها ممکن است کمی بیشتر یا کمتر از مقادیر واقعیت تخمین زده شود. همچنین نتایج حاصل دارای عدم قطعیت‌هایی است که بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. شبیه‌سازی آبیاری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای AMSR2 باند X و GLEAM در این محدوده نیز نشان داد که عملکرد این مدل‌ها می‌تواند در تخمین آبیاری برای مناطقی که اطلاعات کاملی در دسترس نباشد مفید باشد.

مدل SM2RAIN-NWF برای تخمین بارش و کمیت آب آبیاری در دشت میان‌دوآب استفاده شد. نتایج نشان داد:

۱- مدل SM2RAIN-NWF اعمال شده برای رطوبت خاک AMSR2 در دوره ۲۰۱۲-۲۰۲۰، می‌تواند الگوی زمانی بارش و آبیاری را برآورد کند، اما به‌طور سامانمند آبیاری را در مقایسه با داده‌های درجا در برخی فصول کم‌تر و در برخی فصول بیشتر برآورد می‌کند.

۲- محدوده‌های موردبررسی در این مطالعه دارای پوشش سطح کشاورزی، پوشش گیاهی و زمین بایر بود. مدل در مناطق فاقد پوشش گیاهی نتایج به‌مراتب بهتری را نشان داد.

۳- نتایج شبیه‌سازی آبیاری با استفاده از AMSR2 باند X و GLEAM برای ایستگاه میان‌دوآب نشان داد که (R<sup>2</sup> و NS به ترتیب برابر ۰/۷۰ و ۰/۵۱) از دقت قابل‌قبول در تخمین مقدار آبیاری برخوردار هستند.

#### دست‌رسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل ([malekb@ut.ac.ir](mailto:malekb@ut.ac.ir)) قابل‌ارسال است.

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری بهتر آبیاری می‌تواند به بهبود راندمان و مدیریت آبیاری کمک کند. لذا در این پژوهش از الگوریتم

## References

- Abera, W., Formetta, G., Brocca, L., & Rigon, R. (2017). Modeling the water budget of the Upper Blue Nile basin using the JGrass-NewAge model system and satellite data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(6), 3145-3165. DOI: [10.5194/hess-21-3145-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3145-2017)
- Ashouri, H., K. Hsu, S., Sorooshian, D. K., Braithwaite, K. R., Knapp, L. D., Cecil, B., Nelson, R., & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-

CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 69-83. DOI: [10.1175/BAMS-D-13-00068.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1)

Anonymous, (2020). Studies on Providing Balance Sheet for Water Resources of Great Basin Area, Volume VI, Iran Ministry of Energy

- Azizian, A. and Ramezani, H. (2019). Assessing the accuracy of European center for medium range weather forecasts (ECMWF) reanalysis datasets for estimation of daily and monthly precipitation. *Iran. J. Soil Water Res.*, 50(4), 777-791. [In Persian] DOI: [10.22059/IJSWR.2018.261613.667962](https://doi.org/10.22059/IJSWR.2018.261613.667962)
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Moramarco, T., Hahn, S., Hasenauer, S., Kidd, R., Dorigo, W., Wagner, W., & Levizzani, V. (2014). Soil as a natural rain gauge: estimating global rainfall from satellite soil moisture data. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 5128–5141. DOI: [10.1002/2014JD021489](https://doi.org/10.1002/2014JD021489)
- Brocca, L., Massari, C., Ciabatta, L., Moramarco, T., Penna, D., Zuecco, G., Pianezzola, L., Borga, M., Matgen, P., & Martínez-Fernández, J. (2015). Precipitation estimation from in situ soil moisture observations at several sites in Europe: an evaluation of the SM2RAIN algorithm. *J. Hydrol. Hydromech.*, 3, 201–209. DOI: [10.1515/johh-2015-0016](https://doi.org/10.1515/johh-2015-0016)
- Brocca, L., Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Wagner, W. (2019). SM2RAIN-ASCAT (2007–2018): Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations. *Earth Syst. Sci. Data*, 11(4), 1583-1601. DOI: [10.5194/essd-11-1583-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019)
- Ciabatta, L., Massari, C., Brocca, L., Gruber, A., Reimer, C., Hahn, S., Paulik, C., Dorigo, W., Kidd, R., & Wagner, W. (2018). SM2RAIN-CCI: a new global long-term rainfall data set derived from ESA CCI soil moisture. *Earth Syst. Sci. Data*, 10(1), 267-280 DOI: [10.5194/essd-10-267-2018](https://doi.org/10.5194/essd-10-267-2018)
- Fereydooni, M. (2015). Using soil moisture as a natural rain gauge to estimate the amount of rainfall using the SM2RAIN algorithm: a case study of Lake Urmia. Master's thesis. *Sharif University of Technology*. [In Persian]
- Forootan, E., Khaki, M., Schumacher, M., Wulfmeyer, V., Mehrnegar, N., van Dijk, A. I. J. M., Brocca, L., Farzaneh, S., Akinluyi, F., Ramillien, G., Shum, C. K., Awange, J., & Mostafaie, A. (2019). Understanding the global hydrological droughts of 2003–2016 and their relationships with teleconnections. *Sci. Total Environ.*, 650, 2587–2604. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.09.231](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.231)
- Fereydooni, M., Jalilvand, A., Tajrishy, M., & Brocca, L. (2016). Estimation of rainfall amount using satellite data of soil moisture and SM2RAIN model, (study case: Shabstar region). *10<sup>th</sup> National Congress of Civil Engineering*. Sharif University of Technology. Iran. [In Persian]
- Ghajarnia, N., Liaghat, A., & Arasteh, P. D. (2015). Comparison and evaluation of high resolution precipitation estimation products in Urmia Basin Iran. *Atmosph. Res.*, 158, 50-65. DOI: [10.1016/j.atmosres.2015.02.010](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.02.010)
- Guo, H., Chen, S., Bao, A., Hu, J., Yang, B., & Stepanian, P. M. (2015). Comprehensive evaluation of high-resolution satellite-based precipitation products over China. *Atmosphere*, 7(1), 6. DOI: [10.3390/atmos7010006](https://doi.org/10.3390/atmos7010006)
- Herold, N., Alexander, L. V., Donat, M. G., Contractor, S., & Becker, A. (2016). How much does it rain over land?, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 341–348. DOI: [10.1002/2015GL066615](https://doi.org/10.1002/2015GL066615)
- Hong, Y., Hsu, K.L., Moradkhani, H., & Sorooshian, S. (2006). Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and monte carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. *Water Resour. Res.*, 42, W08421. DOI: [10.1029/2005WR004398](https://doi.org/10.1029/2005WR004398)
- Jalilvand, E., Tajrishy, M., Hashemi, S. A. G. Z., & Brocca, L. (2019). Quantification of irrigation water using remote sensing of soil moisture in a semi-arid region. *Remote Sen. Environ.*, 231, 111226. DOI: [10.1016/j.rse.2019.111226](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111226)
- Khoshkho, Y. (2018). Evaluating soil surface energy balance model and satellite images to estimating mean daily soil surface temperature. *J. Water Soil Conserv.*, 25(3), 177-192. DOI: [10.22069/JWSC.2018.14846.2989](https://doi.org/10.22069/JWSC.2018.14846.2989)
- Mehrabi, M., Hamzeh, S., Alavipanah, S. K., Kiavarz, M., & Ziaee, R. (2019). Estimating soil moisture using remotely sensed data and surface energy balance system. *Watershed Eng. Manage.*, 11(3), 759-770. [In Persian] DOI: [10.22092/ijwmse.2018.115271.1354](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115271.1354)
- Mekonnen, D. F. (2009). Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia. Thesis in M. Sc.,

- International Institute for Geo-information Science and Earth Observation*, Netherland. <https://purl.utwente.nl/essays/93086>
- Pendergrass, A., G., & Knutti, R. (2018). The uneven nature of daily precipitation and its change. *Geophys. Res. Lett.* 45, 11980–11988. DOI: [10.1029/2018GL080298](https://doi.org/10.1029/2018GL080298)
- Sadeghi, M., Tuller, M., Warrick, A. W., Babaeian, E., Parajuli, K., Gohardoust, M. R., & Jones, S. B. (2019). An analytical model for estimation of land surface net water flux from near-surface soil moisture observations. *J. Hydrol.*, 570, 26-37. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2018.12.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.038)
- Saeedi, M., Sharafati, A., Brocca, L., & Tavakol, A. (2022). Estimating rainfall depth from satellite-based soil moisture data: A new algorithm by integrating SM2RAIN and the analytical net water flux models. *J. Hydrol.*, 610, 127868. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2022.127868](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127868)
- Song, S., Brocca, L., Wang, W., & Cui, W. (2020). Testing the potential of soil moisture observations to estimate rainfall in a soil tank experiment. *J. Hydrol.*, 581, 124368. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.124368](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124368)
- Taromi, M., Azizian, A., & Brocca, L. (2020). Estimation of Precipitation using satellite-based surface soil moisture (SSM) in semi-arid and humid climates of Iran. *Iran. J. Soil Water Res.*, 51(6), 1427-1440. [In Persian] DOI: [10.22059/ijswr.2020.294870.668446](https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.294870.668446)
- Warrick, A. W. (1975). Analytical solutions to the one-dimensional linearized moisture flow equation for arbitrary input. *Soil Sci.*, 120(2), 79-84.
- Zhang, Y., Hou, J., & Huang, C. (2022). Integration of satellite-derived and ground-based soil moisture observations for a precipitation product over the Upper Heihe River Basin, China. *Remote Sens.*, 14(21), 5355. DOI: [10.3390/rs14215355](https://doi.org/10.3390/rs14215355)