Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2020.294870.668446 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۶، شهریور ماه ۱۳۹۹ (ص ۱۴۴۰-۱۴۲۷)

Estimation of Precipitation Using Satellite-based Surface Soil Moisture (SSM) in Semi-Arid and Humid Climates of Iran

MARYAM TAROMI[1], ASGHAR AZIZIAN[1*], LUCA BROCCA[2]
1. Water Engineering Department, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.
2. Director of Research, Hydrology Group of the Research Institute for Geo-Hydrological Protection, Perugia, Italy.
(Received: Jan. 4, 2020- Revised: Feb. 25, 2020- Accepted: March. 3, 2020)

ABSTRACT

One of the new methods for estimation of rainfall is SM2Rain algorithm which calculates rainfall using soil moisture variations and inverse solution of soil water balance equation. This research addressed the efficiency of SM2Rain algorithm for rainfall estimation over the semi-arid (Khorasan-Razavi) and humid (Mazandaran) climate regions of Iran using ASCAT surface soil moisture dataset during 2006-2013. Findings indicate that the basin-averaged value of correlation coefficient (CC) between the estimated and observed datasets for Khorasan-Razavi and Mazandaran areas is 0.70 and 0.62, respectively. Results in the south and south-west regions of Khorasan-Razavi showed that the SM2Rain algorithm with the CC value of 0.84 and RMSE value of 3.9 mm/day (basin-averaged) performs very well, while in the north parts of the province with the CC value of 0.54 and RMSE value of 7.7 mm/day, the performance of this algorithm is relatively low. Also, the performance of SM2Rain algorithm in most parts of the Mazandaran province, especially in east and central parts, is acceptable and the basin-averaged values of CC and RMSE are 0.72 and 3.9 mm/day, respectively. The results also showed that by adding evapotranspiration term to SM2Rain algorithm, the efficiency of modified algorithm in estimation of rainfall increases about 10-18% in both regions. Furthermore, by using the modified SM2Rain algorithm over the Khorasan-Razavi, the basin-averaged value of relative bias (RBias) decreases from -21.9% to 9.3% and in Mazandaran region, the RBias decreases from -36.9 to 7.9%. The findings of this research indicate that the estimated rainfall with the SM2Rain algorithm can be considered as an alternative or supplementary dataset for ground-based observations, especially in ungauged catchments or data-limited areas.

Keywords: Rainfall, Remote Sensing, Soil Water Balance, Surface Soil Moisture.

* Corresponding Author's Email: Azizian@eng.ikiu.ac.ir
www.SID.ir

Archive of SID

تخمین بارش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک ASCAT در حوضه‌های نیمه‌خشک و مرطوب ایران

مریم طارمی[۱]، اصغر عزیزیان[۱*]، لوکا بروکا[۲]

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. مدیر تحقیقات، موسسه تحقیقات هیدرولوژی، مرکز ملی مطالعات ایتالیا، پروجیا، ایتالیا.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۶- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳)

چکیده

یکی از روش‌های نوین تخمین بارش استفاده از الگوریتم SM2Rain می‌باشد که با محوریت برآورد بارش با استفاده از تغییرات رطوبت خاک و حل معکوس معادله بیلان آب خاک توسعه داده شده است. در تحقیق حاضر به ارزیابی عملکرد این الگوریتم در تخمین بارش روزانه در سطح دو اقلیم خشک/نیمه‌خشک (خراسان رضوی) و مرطوب (مازندران) ایران و با استفاده از داده‌های منبع رطوبتی ASCAT در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳ پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده در دو استان خراسان رضوی و مازندران نشان داد که متوسط ضریب همبستگی (CC) بین بارش مشاهداتی و تخمین زده شده در سطح بازه‌های مذکور توسط الگوریتم SM2Rain به‌ترتیب معادل ۰/۷۰ و ۰/۶۲ می‌باشد. طبق محاسبات صورت گرفته در سطح استان خراسان رضوی، در بخش‌های جنوب و جنوب-غربی استان، الگوریتم SM2Rain با ضریب CC در حدود ۰/۸۴ و RMSE معادل ۳/۹ میلی‌متر در روز بهترین عملکرد و در بخش‌های شمالی استان نیز با ضریب CC در حدود ۰/۵۴ و RMSE معادل ۷/۷ میلی‌متر در روز عملکرد ضعیف داشته است. در بخش‌های عمده‌ای از استان مازندران نیز عملکرد الگوریتم مذکور، قابل قبول ارزیابی می‌شود به‌طوری که در مناطق شرقی تا بخش‌های مرکزی استان، ضریب همبستگی ۰/۷۲ و RMSE معادل ۳/۹ میلی‌متر در روز می‌باشد. نتایج حاصل از اصلاح الگوریتم SM2Rain نیز نشان داد که با افزودن ترم تبخیر-تعرق و تعرق عملکرد الگوریتم مذکور در شبیه‌سازی بارش در بازه‌های مطالعاتی بین ۱۰ تا ۱۸ درصد افزایش یافته است. با اصلاح الگوریتم مذکور میزان متوسط شاخص RBias در سطح استان خراسان رضوی از ۲۱/۹- به ۹/۳ درصد و در سطح استان مازندران از ۳۶/۹- به ۷/۹ درصد کاهش یافته است. خروجی حاصل از این تحقیق می‌تواند به عنوان یک داده بارشی جایگزین یا مکمل داده‌های زمینی به ویژه در حوضه‌هایی که دارای آمار کمی هستند، مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: باران، رطوبت سطحی خاک، سنجش از دور، بیلان آب خاک.

مقدمه

بارش مهم‌ترین عاملی است که به‌طور مستقیم در چرخه هیدرولوژی دخالت داشته و در برآورد مقدار بارش برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی مخاطرات طبیعی از قبیل سیل، خشکسالی و رانش زمین از اهمیت بالایی برخوردار است (Azizian and Ramezani, 2019). همچنین جهت بررسی منابع آبی یک منطقه و به‌دست آوردن پارامترهای بیلان آب یک حوضه، محاسبه میزان دقیق بارش حائز اهمیت می‌باشد. بارش در سطح کره زمین دارای تغییرات مکانی و زمانی است، به‌همین دلیل هیچگاه نمی‌توان ادعا کرد که اندازه‌گیری بارش در یک نقطه خاص از یک منطقه وسیع می‌تواند نماینده خوبی از آن منطقه باشد (Mekonnen, 2009). جهت برآورد نقشه بارش بر اساس داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی باید مقادیر ثبت شده در این ایستگاه‌ها به کل ناحیه تعمیم داده شود، لذا باید در انتخاب محل، تعداد ایستگاه‌ها، نحوه اندازه‌گیری، ثبت و تحلیل داده‌ها دقت کافی به‌عمل آید. با این وجود برآوردهای به‌دست آمده از این روش با خطاهای نسبتاً زیادی همراه می‌باشد (Ashouri *et al.*, 2015). از آنجایی که بررسی صحت داده‌های بارش یک بخش معمول و اجتناب‌ناپذیر در مطالعات هیدرولوژی و منابع آب است، بررسی‌های صورت گرفته توسط Ghajarnia *et al.* (2014) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که در حدود ۱۳ درصد از ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در محدوده مطالعاتی غیرقابل اعتماد می‌باشند.

با توجه به اینکه ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش زمینی پراکنده بوده و دسترسی به آمار آن‌ها معمولاً با تاخیر زمانی همراه است، وجود روش‌های دیگری برای برآورد بارش ضروری است. در این راستا اطلاعات ماهواره‌ای و سنجش از دور می‌تواند جایگزین

* نویسنده مسئول: Azizian@eng.ikiu.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

و یا مکمل مناسبی برای ایستگاه‌های زمینی در نظر گرفته شوند. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان برآورد بارش در محدوده وسیعی از سطح زمین، به‌خصوص برای مناطق صعب‌العبور را امکان‌پذیر ساخته است، که این موضوع سبب توجه محققان به داده‌های ماهواره‌ای شده است (Ghajarnia *et al*., 2015). البته ذکر این نکته ضروری است که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای هرچند دارای پوشش مکانی مناسب می‌باشند، ولی در مقایسه با داده‌های زمینی دارای معایبی هستند که از اصلی‌ترین آن‌ها می‌توان به توان تفکیک مکانی پایین آن‌ها اشاره نمود. با توجه به اهمیت اطلاعات بارش به عنوان یک داده اولیه در عمده مطالعات آبی و عدم وجود شبکه باران‌سنجی متراکم در اکثر مناطق کشور، حرکت به سمت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد بارش ضروری است. اما دقت اطلاعات پایگاه‌های گوناگون برای مناطق مختلف یکسان نیست و با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، در هر منطقه با توجه به خصوصیات بارش و نوع منطقه، عملکرد متفاوتی دارند. بنابراین لازم است دقت و صحت این داده‌ها در مناطق مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد (Brocca *et al*., 2014).

یکی از پارامترهایی که ازتاثیرپذیری بالایی در هنگام بارندگی برخوردار می‌باشد، تغییرات رطوبت خاک است که در زمان بارندگی به شدت افزایش یافته و پس از بارش به تدریج خاک رطوبت خود را از دست می‌دهد. تغییرات و نوسانات رخ داده در رطوبت خاک می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت تخمین مقدار بارش یک منطقه مورد استفاده قرار گیرد (Brocca *et al*., 2014). اخیرا چندین مطالعه در زمینه کاربرد داده‌های رطوبت خاک جهت اصلاح و برآورد مقدار بارش به انجام رسیده است که اساس آن‌ها استفاده از معادله بیلان آب در سطح خاک می‌باشد (Crow and Bolten, 2007; Pellarin *et al*. 2013; Brocca *et al*., 2014). یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که به برآورد بارش از روی تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک می‌پردازد، الگوریتمی به نام SM2Rain می‌باشد که توسط Brocca *et al*. (2014) توسعه داده شده است. این محققین با حل معکوس معادلان بیلان آب خاک، توانستند یک رابطه نسبتاً ساده بین بارش و رطوبت خاک را توسعه داده و از آن برای تخمین بارش بر اساس رطوبت سطحی خاک استفاده نمایند. یکی از فرضیات اساسی در این الگوریتم که مورد انتقاد بسیاری از محققین می‌باشد، عدم لحاظ نمودن رواناب سطحی و مقدار تبخیر-تعرق در معادله بیلان در حین بارش می‌باشد. تا کنون تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد الگوریتم مذکور در بخش‌های مختلف دنیا که عمدتاً در مناطق مرطوب و پربارش واقع شده‌اند، به انجام رسیده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها پرداخته شده است.

Brocca *et al*. (2014) جهت شبیه‌سازی مقدار بارش در چند حوضه مرطوب در کشور ایتالیا بر اساس مقدار تغییرات رطوبت سطحی خاک به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای ASCAT و الگوریتم SM2Rain استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده برای تخمین بارش در سه محدوده مطالعاتی نشان داد که ضریب همبستگی در هر سه مکان بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های بارش زمینی نزدیک به ۰/۹می‌باشد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم SM2Rain است. Brocca *et al*. (2014) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک به‌دست آمده از سه منبع رطوبتی ASCAT، AMSR-E[1] و SMOS[2] و الگوریتم مذکور، مقدار بارش را در سه محدوده مطالعاتی در کشورهای ایتالیا، اسپانیا و فرانسه برآورد نموده و با داده‌های پایگاه GPCC[3] مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در صورت استفاده از داده‌های رطوبتی ASCAT، AMSR-E و SMOS، ضریب همبستگی بین مقادیر بارش مشاهداتی و برآورد شده به‌ترتیب در حدود ۰/۵۴، ۰/۲۸ و ۰/۳۱ می‌باشد. همچنین یافته‌های این محققین نشان داده است که الگوریتم SM2Rain در مناطقی که اندازه‌گیری رطوبت خاک با دقت بالاتری انجام شده است، از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. Ciabatta *et al*. (2015) نیز الگوریتم SM2Rain را برای تخمین مقدار بارش در چند حوضه آبریز در کشور ایتالیا استفاده نمودند و سپس از آن برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب استفاده به‌عمل آوردند. نتایج نشان داد که در صورت ترکیب داده‌های بارش شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم مذکور و داده‌های زمینی، عملکرد مدل بارش-رواناب در شبیه‌سازی رواناب بهبود قابل توجهی (۲ تا ۴۰ درصد) را نشان می‌دهد.

همانطور که ملاحظه می‌گردد، عمده مطالعات صورت گرفته معطوف به حوضه‌های مرطوب بوده و تحقیقات چندان زیادی در زمینه کاربرد این الگوریتم در حوضه‌های خشک یا نیمه‌خشک صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت بالای ترم تبخیرتعرق در معادله بیلان آب خاک، به‌نظر می‌رسد در چنین حوضه‌های می‌توان الگوریتم SM2Rain را اصلاح و عملکرد آن را در تخمین بارش بهبود بخشید. لذا با توجه به توضیحات فوق، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی کارائی الگوریتم SM2Rain جهت تخمین بارش در دو حوضه نیمه‌خشک و مرطوب ایران می‌باشد. همچنین اصلاح الگوریتم مذکور با اضافه نمودن ترم

1. Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth (AMSRE)
2. Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)
3. Global Precipitation Climatology Centre

www.SID.ir

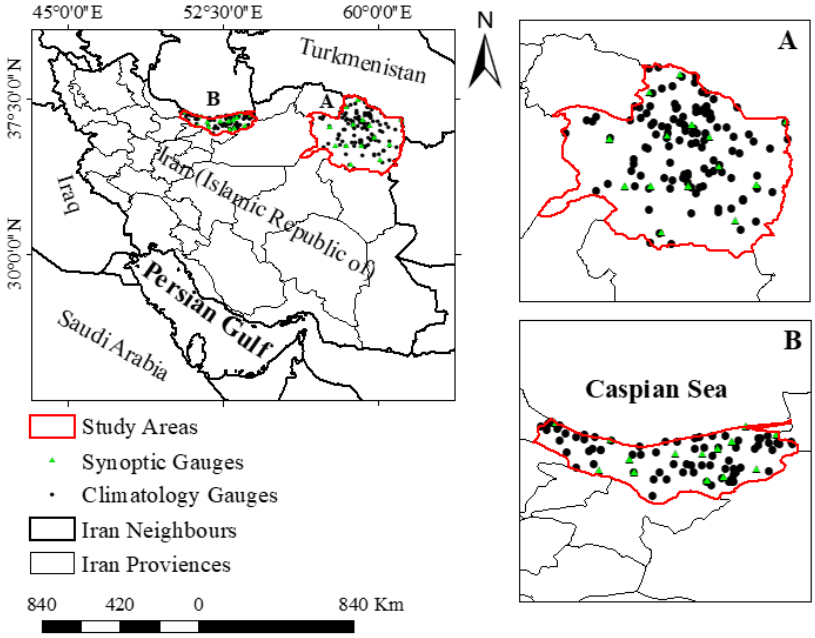
Archive of SID

مربوط به تبخیرتعرق در آن از دیگر اهداف پژوهش می‌باشد. خروجی حاصل از این پژوهش می‌تواند علاوه‌بر تخمین بارش به ویژه در حوضه‌های فاقد آمار و یا دارای آمار ناقص، برای مدل-سازی فرآیند بارش-رواناب در یک حوضه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

برای به چالش کشیدن الگوریتم SM2Rain در سطح ایران، دو منطقه مطالعاتی که از نظر اقلیمی و جغرافیایی با یکدیگر متفاوت هستند، انتخاب گردیدند. این دو منطقه عبارتنداز: استان مازندران و خراسان رضوی که بر اساس سیستم طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن اصلاح شده (Rahimi *et al.* 2013) به‌ترتیب در اقلیم‌های مرطوب/خیلی مرطوب و خشک/ نیمه‌خشک قرار دارند. از نظر وضعیت توپوگرافی نیز استان‌های مازندران و خراسان رضوی به‌ترتیب دارای تغییرات ارتفاعی در حدود ۵۶۷۰-۲۶- متر (متوسط ارتفاع=۱۳۸۳ متر) و ۳۶۱۵-۳۰۰ متر (متوسط ارتفاع=۱۱۵۰ متر) از سطح آزاد دریاها می‌باشند. در شکل (۱) موقعیت مکانی مناطق مذکور و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح هر کدام از آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه توزیع مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و موقعیت مناطق مورد مطالعه در پژوهش حاضر (A: استان خراسان رضوی و B: استان مازندران)

ساختار الگوریتم SM2Rain

یکی از جدیدترین و به‌روزترین تحقیقات در زمینه برآورد بارش، الگوریتم SM2Rain (Soil Moisture to Rain) می‌باشد که اولین بار توسط Brocca *et al* (۲۰۱۴) معرفی گردید. اساس این الگوریتم بر مبنای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک و حل معکوس معادله بیلان آب استوار می‌باشد. به‌عبارت بهتر هدف اصلی این الگوریتم حل معکوس معادله بیلان آب و تخمین بارش با استفاده از داده‌های رطوبتی خاک است. داده‌های رطوبتی موردنیاز این الگوریتم، رطوبت خاک در عمق ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری سطح زمین می‌باشد که در حال حاضر توسط بسیاری از سنجنده‌ها (مانند ASCAT، SMOS، AMSR-E) برداشت می‌شود. برای تخمین بارش توسط این الگوریتم، تمامی اجزای معادله بیلان بر اساس تغییرات رطوبت خاک بازنویسی می‌گردد و لذا فرض بر این است که خاک یک مخزن طبیعی برای اندازه‌گیری میزان بارش می‌باشد. معادله بیلان آب موجود در خاک برای عمق Z را می‌توان با توجه به رابطه (۱) به‌دست آورد:

$$\frac{Zds(t)}{dt} = P(t) - e(t) - r(t) - g(t) \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه فوق، Z عمق خاک (cm) s(t) رطوبت خاک (-)، t زمان (T) و e(t)، r(t)، p(t) و g(t) به ترتیب تبخیرتعرق، رواناب سطحی، بارش و میزان نفوذ آب به لایه‌های زیرین خاک سطحی می‌باشد. در هنگام بارش، نرخ تبخیر را می‌توان با اطمینان بالایی ناچیز شمرد (e(t)=0). به‌علاوه، با این فرض که بخش عمده‌ای از بارش در خاک نفوذ می‌کند، نرخ تولید رواناب در سطح حوضه را تقریباً می‌توان صفر در نظر گرفت (r(t)=0). برای محاسبه نرخ نفوذ، Brocca *et al.*, (2014) استفاده از رابطه Famiglietti and

www.SID.ir

Archive of SID

Wood (1994) را پیشنهاد داده‌اند.

$$g(t) = as(t)^b \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در رابطه فوق، a و b پارامترهای رابطه مذکور می‌باشند که به نوعی نشان‌دهنده غیرخطی بودن نرخ نفوذ و رطوبت خاک هستند.

با در نظر گرفتن فرضیات فوق، Brocca *et al.* (2014) رابطه مورد نیاز برای تخمین بارش بر اساس داده‌های رطوبت سطحی خاک را به صورت زیر ارائه نمودند:

$$p(t) = \frac{zds(t)}{dt} + as(t)^b \quad \text{(رابطه ۳)}$$

رابطه فوق یک معادله دیفرانسیل خطی می‌باشد که با یکی از روش‌های حل مانند روش اویلر اصلاح شده، قابل حل می‌باشد. با موجود بودن سری زمانی رطوبت خاک (که از تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج است) و واسنجی رابطه فوق با داده‌های بارش زمینی می‌توان پارامترهای رابطه (۳) را به‌دست آورد. با مشخص شدن پارامترهای مزبور، استخراج سری زمانی بارش بر اساس داده‌های رطوبتی به‌راحتی میسر خواهد گردید.

برای ارزیابی هرچه بهتر الگوریتم SM2Rain در پژوهش حاضر، مقدار ترم تبخیرتعرق بر خلاف فرضیات Brocca *et al* (2014) به مدل بیلان آب خاک اضافه گردید تا در روزهای آفتابی و به‌ویژه در روزهایی که مقدار بارش صفر است، بهتر بتوان مقدار بارش را تخمین زد. در حال حاضر معادلات متعددی برای برآورد میزان تبخیرتعرق وجود دارد که در این تحقیق از روش بلانی-کریدل (رابطه ۴) استفاده گردید. علت انتخاب این روش ساختار ساده آن، عملکرد قابل قبول آن در مطالعات مختلف و تعداد کم پارامترهای ورودی آن می‌باشد.

$$ET_o = k * p * (0.46T_a + 8.13) \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در رابطه فوق، ET: تبخیروتعرق از گیاه مرجع (w/m^2)، Ta: میانگین دمای هوا (درجه سانتیگراد)، p: درصد کل ساعت روز در دوره مدنظر (ماهانه یا روزانه) به کل ساعت روز در یک سال (۳۶۵×۱۲) و k: ضریب کاهشی ماهانه که به نوع گیاه، موقعیت و فصل رشد وابسته می‌باشد. با تنظیم مجدد معادله (۱) و ادغام معادلات مذکور، رابطه زیر حاصل می‌شود:

(رابطه ۵)

$$p(t) = \frac{zds(t)}{dt} + as(t)^b + k * p * (0.46T_a + 8.13)$$

با حل معادله دیفرانسیلی مذکور می‌توان تاثیر ترم تبخیرتعرق را بر عملکرد الگوریتم SM2Rain مطالعه نمود. در پژوهش حاضر از روش بهینه‌سازی GRG موجود در ابزار Solver محیط اکسل برای واسنجی پارامترهای الگوریتم مذکور استفاده به‌عمل آمده است. همچنین برای استخراج سری زمانی رطوبت سطحی خاک در محدوده هر کدام از ایستگاه‌های هواشناسی از منبع رطوبتی ASCAT (https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:M ETOP:SOMO25) استفاده به‌عمل آمده است. علت انتخاب این منبع رطوبتی، عملکرد قابل قبول آن در برآورد صحیح رطوبت سطحی خاک نسبت به دیگر منابع رطوبتی همچون SMOS و AMSRE می‌باشد (Ciabatta *et al.*, 2015). داده‌های این منبع رطوبتی به‌صورت رستری با ابعاد سلولی ۰/۲۵ درجه می‌باشند و لذا بارش تخمین زده شده توسط الگوریتم SM2Rain نیز به صورت شبکه‌بندی شده خواهد بود. در نتیجه برای اینکه بتوان مقایسه سلول به سلول بین داده‌های شبیه‌سازی شده و زمینی را انجام داد، بایستی داده‌های نقطه‌ای مربوط به ایستگاه‌های زمینی با استفاده از روش‌های درون‌یابی به‌صورت سلولی تبدیل شوند. با توجه به ساختار ساده و کاربردی روش IDW از این روش برای ساخت نقشه شبکه‌بندی شده بارش زمینی استفاده به‌عمل آمد.

شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی الگوریتم SM2RAIN

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم SM2RAIN از سه شاخص آماری CC[1]، RBias[2] و RMSE[3] استفاده به‌عمل آمده است. شاخص RBias یا مقایسه میانگین پیش‌بینی با میانگین مشاهدهاتی، معمولاً به‌عنوان یک نسبت برای تایید جداول احتمالاتی استفاده می‌شود. RBias در واقع نسبت اختلاف بین مجموع بارش‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به مجموع بارش‌های مشاهداتی می‌باشد. محدوده عددی این شاخص بین صفر تا مثبت بی‌نهایت است که در بهترین وضعیت مقدار صفر را به خود اختصاص می‌دهد. به‌عبارت دیگر اگر مقدار این شاخص کمتر از صفر باشد، کم‌برآوردی و اگر بیش‌تر از صفر باشد، بیش‌برآوردی به‌وقوع پیوسته است. شاخص RMSE مجذور میانگین مربعات خطای بین داده شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم SM2Rain و داده مشاهداتی بارش است و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک باشد یعنی مدل به خوبی داده‌های بارش را شبیه‌سازی کرده است. شاخص آماری CC نیز ضریبی است که نشان‌دهنده همبستگی بین داده‌های مشاهداتی بارش و داده‌های شبیه‌سازی شده است و هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیک باشد حاکی از ارتباط بسیار قوی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

$$RBias = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{si} - \sum_{i=1}^{n} p_o}{\sum_{i=1}^{n} p_o} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

1. Correlation Coefficient
2. Relative Bias
3. Root Mean Square Error

www.SID.ir

Archive of SID

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(p_{si} - p_o)^2}{N}} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{P}_o} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_{si} - \bar{P}_s)(P_{oi} - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(P_{si} - \bar{P}_s)^2}.\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(P_{oi} - \bar{P}_o)^2}} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در روابط فوق، P_{si} و P_o به‌ترتیب مقدار بارش پیش‌بینی شده و مقدار بارش مشاهداتی می‌باشند.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان خراسان رضوی

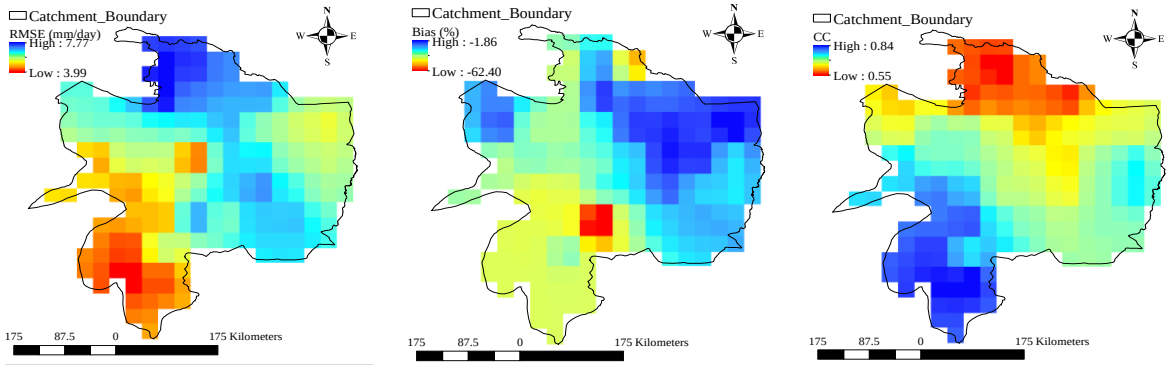
همان‌طور که عنوان شد، در این پژوهش از داده‌های رطوبتی منبع ASCAT استفاده گردید. پس از استخراج سری زمانی رطوبت برای هرکدام از سلول‌های واقع در سطح بازه مطالعاتی، مقدار بارش تخمین‌زده شده توسط الگوریتم SM2RAIN با داده‌های بارش روزانه به‌دست آمده از ایستگاه‌های زمینی مورد مقایسه قرار گرفت. برای نشان دادن عملکرد الگوریتم مذکور در سطح محدوده مطالعاتی از شاخص‌های آماری CC، RMSE و Bias در هر دو مرحله واسنجی (بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳) استفاده و توزیع مکانی آن‌ها محاسبه گردید. در شکل (۲) توزیع مکانی شاخص‌های آماری مذکور در سطح استان خراسان رضوی در مرحله واسنجی نشان داده شده است. همچنین توزیع مکانی پارامترهای بهینه الگوریتم SM2RAIN در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد. در جدول (۱) نیز مشخصات آماری معیارهای ارزیابی الگوریتم SM2RAIN در استان خراسان رضوی برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است. بررسی توزیع مکانی شاخص آماری CC در سطح استان خراسان رضوی حاکی از آن است که بارش شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم SM2RAIN در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ از همبستگی مناسبی با داده‌های زمینی برخوردار می‌باشند. با توجه به شکل (۲) عملکرد الگوریتم مذکور در مناطق جنوب و جنوب-غربی و تا حدی مرکزی استان خراسان قابل توجه بوده، به‌طوری که میزان شاخص CC برای این مناطق بین ۰/۵۵ تا ۰/۸۴ متغیر می‌باشد. همچنین مقدار شاخص‌های RMSE و NRMSE نیز به‌علت دارا بودن محدوده تغییرات به ترتیب ۳/۹۹ تا ۷/۷۷ میلی‌متر در روز و ۰/۳۳ تا ۲/۸۴ (در بخش‌های شمالی حوضه میزان انحراف داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی بسیار قابل توجه بوده ولی با حرکت به سمت جنوب استان از مقدار این انحراف کاسته می‌شود)، حاکی از عملکرد ضعیف مدل در بخش‌های شمالی استان است. با توجه به توضیحات فوق می‌توان چنین استنباط نمود که این مدل در مناطق جنوب و جنوب-غربی بهترین عملکرد را داشته است یعنی در این مناطق ضریب همبستگی بین داده‌های بارش شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی بالا بوده که علت اصلی آن را می‌توان به وضعیت پوشش گیاهی آن مرتبط نمود. درحالیکه نواحی شمالی استان دارای شرایط آب و هوای معتدل و سرد کوهستانی بوده و در برخی از فصول سال دارای پوشش برف می‌باشند. از آنجائی که در الگوریتم SM2Rain ترم مربوط به برف در معادله بیلان آب خاک در نظر گرفته نمی‌شود می‌توان چنین نتیجه گرفت که الگوریتم مذکور در این نواحی از عملکرد مطلوبی برخوردار نمی‌باشد (شکل۲). از آنجایی که استان خراسان جزء مناطق نیمه‌خشک است بنابراین سهم تبخیرتعرق در معادله بیلان قابل توجه و عدم لحاظ نمودن آن موجب افزایش خطا در برآورد بارش می‌گردد. لذا برای بهبود عملکرد الگوریتم مذکور در چنین بازه‌هایی می‌توان ترم مربوط به معادله تبخیرتعرق را نیز به الگوریتم SM2RAIN اضافه و عملکرد آن را افزایش داد. در بخش‌های بعدی اثر افزودن ترم تبخیرتعرق بر عملکرد الگوریتم مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج حاصل از صحت‌سنجی الگوریتم مذکور حاکی از عملکرد قابل قبول آن در بخش‌های عمده استان خراسان رضوی می‌باشد (جدول ۱). محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد که متوسط ضریب CC بین داده‌های بارش شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در حدود ۰/۶۸ می‌باشد. در شکل‌های (۴) و (۵) نیز سری زمانی شبیه‌سازی شده بارش در سطح محدوده مطالعاتی و در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری معیارهای ارزیابی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان خراسان رضوی (مرحله واسنجی و صحت‌سنجی)

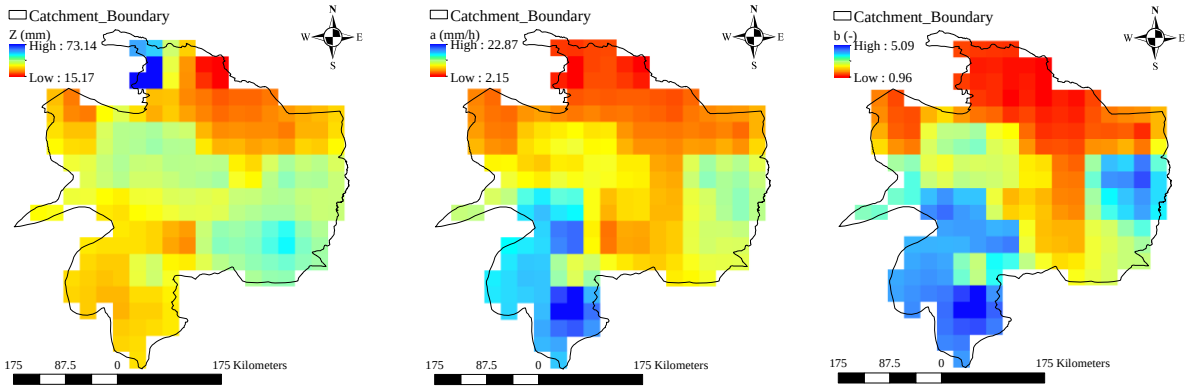
NRMSE [-]		RBias [%]		RMSE [mm/day]		CC [-]		شرح
Val	Cal	Val	Cal	Val	Cal	Val	Cal	
۰/۴۲	۰/۳۳	-۴۵/۵۵	-۶۲/۴	۵/۰۶	۳/۹۹	۰/۴۷	۰/۵۴	Min
۳/۰۱	۲/۸۴	۶۹/۰۹	-۱/۸۷	۹/۵۹	۷/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۳	Max
۱/۵۶	۱/۴۹	۱۸/۱۸	-۲۱/۹۲	۶/۷	۵/۹۶	۰/۶۸	۰/۶۹	Mean
۰/۶۳	۰/۵۸	۱۹/۲۹	۱۰/۷۵	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۰۸	۰/۰۷	St dev

www.SID.ir

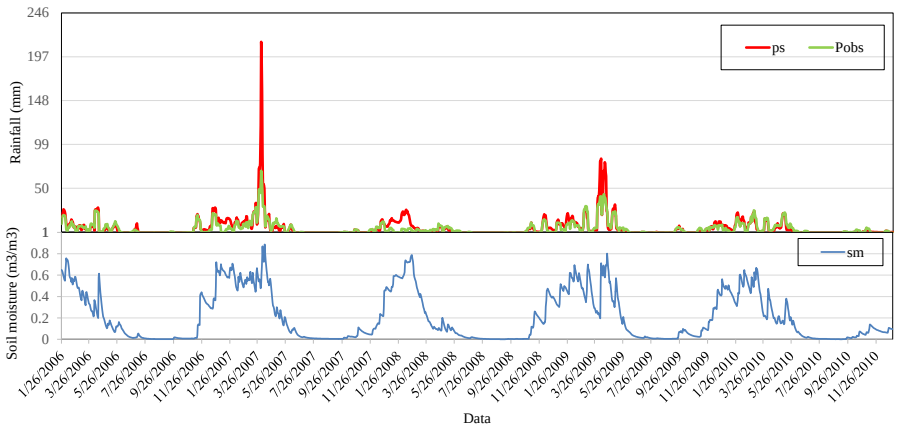
Archive of SID



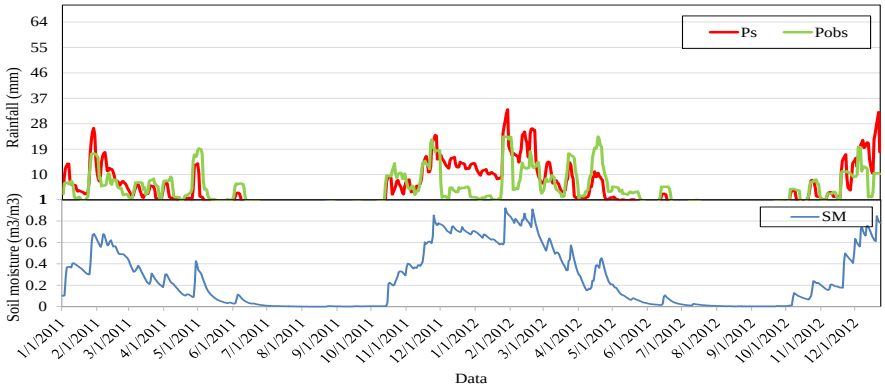
شکل ۲- تغییرات مکانی شاخص‌های CC، RMSE و Bias بارش شبیه‌سازی شده در سطح استان خراسان رضوی (مرحله واسنجی)



شکل ۳- توزیع مکانی پارامترهای بهینه الگوریتم SM2RAIN (a ، b و z) در سطح استان خراسان رضوی



شکل ۴- واسنجی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۱ (Pobs: بارش مشاهداتی، Ps: بارش شبیه‌سازی شده)



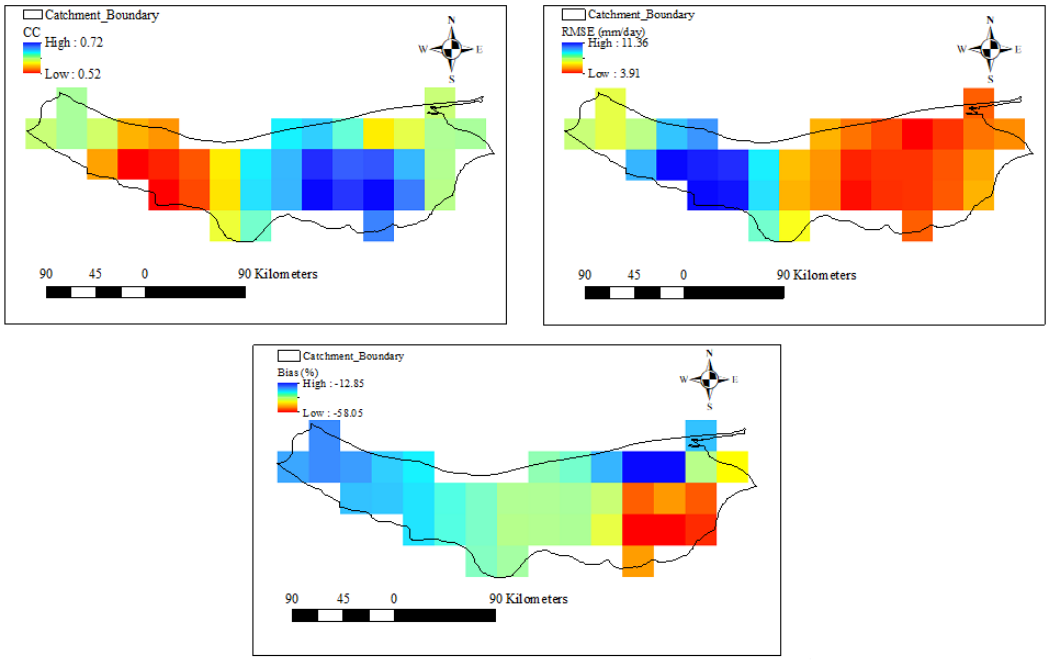
شکل ۵- صحت‌سنجی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۳ (Pobs: بارش مشاهداتی، Ps: بارش شبیه‌سازی شده)

www.SID.ir

Archive of SID

واسنجی الگوریتم SM2Rain در سطح استان مازندران

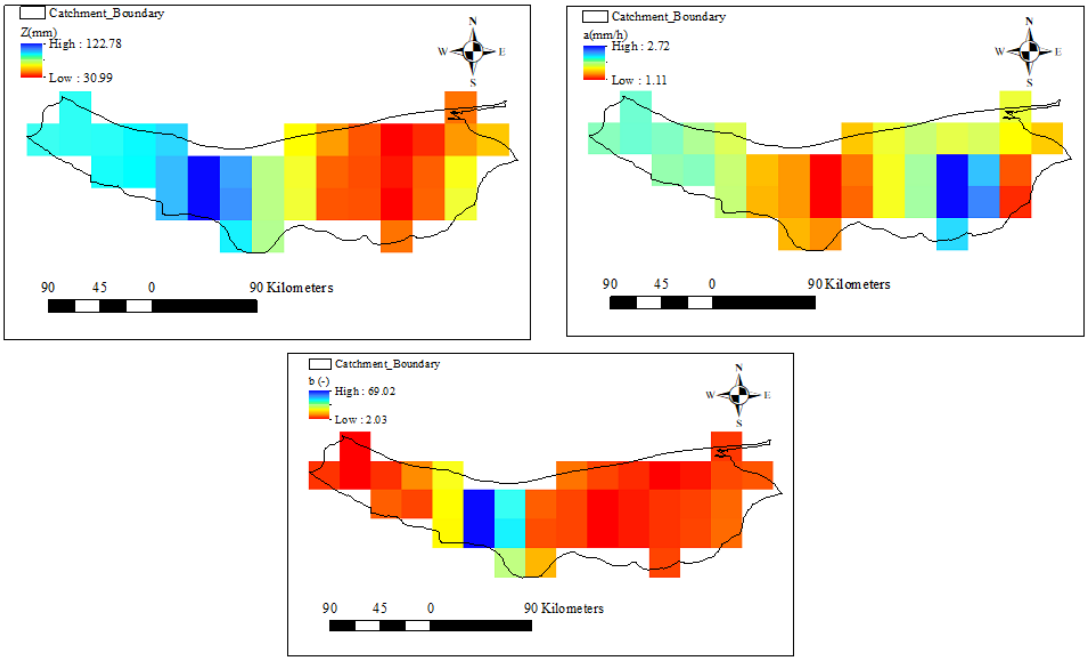
بررسی شاخص‌های آماری مربوط به مقادیر بارش تخمین زده شده در سطح استان مازندران و در مقیاس روزانه، حاکی از عملکرد بالای آن در بخش‌های عمده استان می‌باشد. نتایج نشان داد که در سطح استان مازندران ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم SM2Rain همواره بالاتر از ۰/۵ می‌باشد (شکل ۶). همچنین متوسط مقدار شاخص‌های RMSE و NRMSE که مبین میانگین خطاهای موجود بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم مذکور می‌باشند، در این استان به‌ترتیب در حدود ۶/۴۶ میلی‌متر در روز و ۱/۱۹ می‌باشد (شکل ۷). مقدار شاخص RMSE در مناطق شمالی، شرقی و جنوبی در حدود ۳/۹ میلی‌متر در روز برآورد شده است که خود گویای عملکرد بالای الگوریتم SM2Rain در بخش‌های عمده استان می‌باشد. علت عملکرد مناسب الگوریتم مذبور در مناطق فوق این است که محدوده‌های شرقی استان مازندران دارای شرایط آب و هوای معتدل کوهستانی بوده و این در حالیست که مناطق غربی استان از آب و هوای معتدل خزری برخوردار بوده و در فصل‌های زمستان و تابستان دارای رطوبت هستند و لذا این مساله خود می‌تواند عملکرد الگوریتم SM2Rain را با خطا مواجه کند. همچنین عدم لحاظ نمودن سهم ترم‌های موثری همچون برف، باران‌گیرش (Interception) و تبخیرتعرق منجر به کاهش عملکرد الگوریتم مذکور در مناطق غربی این استان می‌گردد. با توجه به وضعیت پوشش‌های جنگلی متراکم واقع در این نواحی به‌نظر می‌رسد با افزودن روابط مناسب برای محاسبه ترم‌های مذکور، به‌ویژه ترم باران‌گیرش که از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد می‌توان تا حد زیادی از خطای سیستماتیک الگوریتم مذکور کاست. مقدار پارامتر z نیز بین ۳۰/۹۹ تا ۱۲۲/۷۸ میلی‌متر متغیر بوده و بیش‌ترین مقدار این پارامتر به بخش‌هایی مربوط می‌شود که الگوریتم SM2Rain ضعیف عمل کرده است. داده‌های رطوبت سطحی خاک به‌دست آمده از تکنیک‌های سنجش از دور مانند منبع رطوبتی ASCAT برای عمق بین ۰ تا حداکثر ۱۰ سانتی متر صدق می‌کند و برای عمق‌های بالاتر از آن بایستی از محصولاتی که رطوبت را در محدوده ریشه (Root zone soil moisture) برآورد می‌کنند استفاده نمود. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، مقدار پارامتر Z برای بخش‌های غربی استان مازندران نسبتاً زیاد به‌دست آمده است که همین مساله حاکی از آن است که عدم لحاظ نمودن ترم‌های تاثیرگذار در معادله بیلان آب خاک منجر به محاسبه مقادیر غیرصحیحی برای پارامترهای الگوریتم خواهد گردید. به عبارت بهتر صرفاً واسنجی الگوریتم نمی‌تواند عملکرد واقعی آن را نشان دهند، بلکه ماهیت فیزیکی (Physical Nature) پارامترهای واسنجی نیز بایستی مدنظر قرار گیرد. آنالیز خروجی‌ها بر اساس شاخص آماری RBias نیز موید این مطلب است که عدم در نظر گرفتن ترم‌های مذکور در الگوریتم SM2Rain موجب کم‌برآوردی بارش در بخش‌های عمده‌ای از سطح استان مازندران می‌گردد. طبق محاسبات صورت گرفته متوسط شاخص RBias در سطح استان در حدود ۳۶/۹- درصد می‌باشد (جدول ۲).



شکل ۶- تغییرات مکانی شاخص‌های CC، RMSE و Bias بارش شبیه‌سازی شده در سطح استان مازندران (مرحله واسنجی)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷- توزیع مکانی پارامترهای بهینه الگوریتم SM2RAIN (a ، b و z) در سطح استان مازندران

جدول ۲- مشخصات آماری معیارهای ارزیابی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان مازندران (مرحله واسنجی و صحت‌سنجی)

NRMSE [-]		RBias [%]		RMSE [mm/day]		CC [-]		شرح
Val	Cal	Val	Cal	Val	Cal	Val	Cal	
۱/۱۲	۰/۹۷	-۵۱/۳۹	۵۸/۰۵	۳/۵۲	۳/۹	۰/۵۶	۰/۵۲	Min
۱/۶۱	۱/۴۴	-۶/۰۲	-۲۱/۵۸	۱۰/۰۸	۱۱/۳۶	۰/۷۵	۰/۷۱	Max
۱/۲۲	۱/۱۹	-۳۰/۱۲	-۳۶/۹	۶/۱۶	۶/۴۶	۰/۶۶	۰/۶۲	Mean
۰/۲۱	۰/۱۷	۱۲/۶۴	۹/۴۱	۱/۸۴	۲/۴۷	۰/۰۵	۰/۰۶	St dev

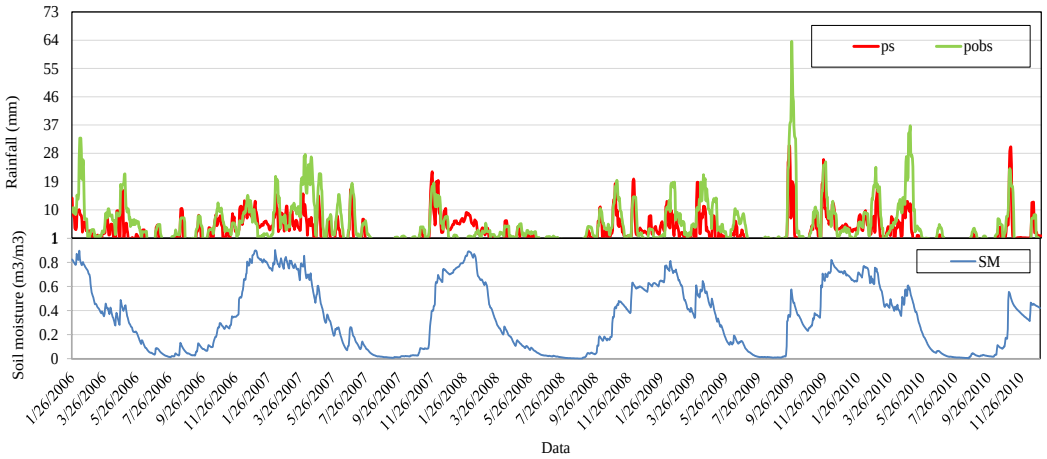
بررسی شاخص آماری CC در سطح استان مازندران و در مرحله صحت‌سنجی نیز حاکی از آن است که بارش شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم SM2Rain در مرحله صحت‌سنجی از همبستگی مناسبی با داده‌های زمینی برخوردار می‌باشند. طبق نتایج به‌دست آمده در مرحله صحت‌سنجی، عملکرد الگوریتم مذکور در مناطق شمالی و شرقی و تا حدی مرکزی استان مازندران قابل توجه بوده، به‌طوری که میزان شاخص CC برای این مناطق بین ۰/۵۷ تا ۰/۷۵ متغیر می‌باشد. همچنین مقدار متوسط شاخص‌های RMSE و NRMSE در سطح استان به‌ترتیب در حدود ۶/۱۶ میلی‌متر در روز و ۱/۲۲ (جدول ۲) است و این خود گویای انحراف کم داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی می‌باشد. همچنین در شکل‌های (۸) و (۹) سری زمانی بارش مشاهداتی، شبیه‌سازی شده (برای دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی) و رطوبت سطحی خاک به‌دست آمده از منبع رطوبتی ASCAT نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های مذکور کاملاً مشخص می‌باشد، مقدار خطا در برآورد بارش با استفاده از الگوریتم SM2Rain به‌ویژه در روزهای پربارش بسیار زیاد می‌باشد که علت اصلی طبق آنچه پیشتر عنوان شد، عدم لحاظ نمودن ترم‌های تاثیرگذاری در معادله بیلان آب خاک می‌باشد. حذف ترم‌هایی همچون برف، تبخیرتعرق و باران‌گیرش از معادله بیلان منجر به کم برآوردی مقدار بارش به‌ویژه در وقایع حدی خواهد گردید که نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نیز به‌خوبی گویای این امر می‌باشد. این مساله به‌خصوص در ماه‌های سرد سال (فصل زمستان) که بارش برف سهم عمده‌ای بیلان آب خاک را به خود اختصاص می‌دهد، کاملاً مشهود است.

اصلاح الگوریتم SM2Rain

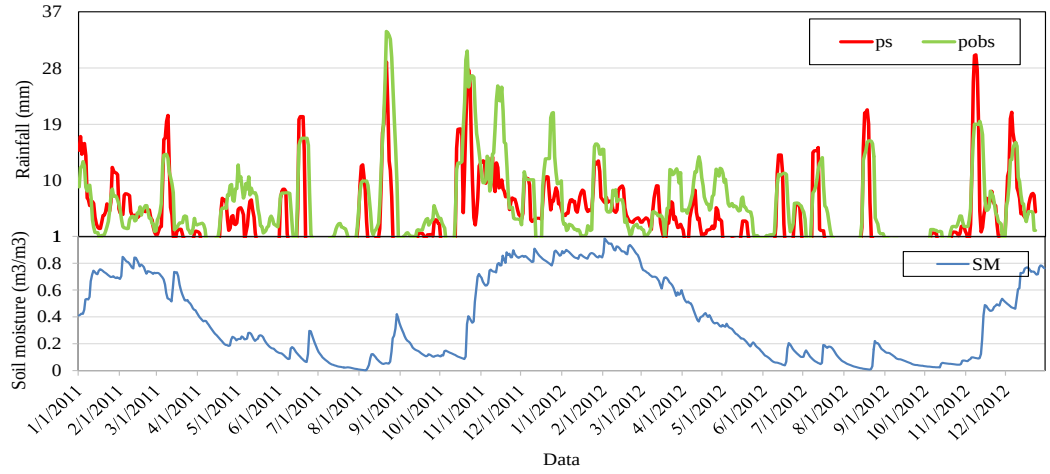
برای بهبود عملکرد الگوریتم مذکور، فرضیه ناچیز بودن ترم تبخیرتعرق در معادله بیلان سطحی آب خاک (Brocca *et al.*2014) اصلاح و معادله بیلان مجدداً بازنویسی گردید تا رابطه‌ای جدید برای تخمین بارش به‌دست آید (رابطه ۵). پس از اصلاح الگوریتم SM2Rain، سری زمانی بارش برای بازه‌های مطالعاتی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه و با داده‌های زمینی مقایسه گردید.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸- واسنجی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان مازندران در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۱ (Pobs: بارش مشاهداتی، Ps: بارش شبیه‌سازی شده)



شکل ۹- صحت‌سنجی الگوریتم SM2RAIN در سطح استان مازندران در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۳ (Pobs: بارش مشاهداتی، Ps: بارش شبیه‌سازی شده)

ارزیابی عملکرد الگوریتم اصلاح شده SM2Rain در سطح استان خراسان رضوی

از آنجایی که استان خراسان رضوی جزء استان‌های نیمه‌خشک محسوب می‌شود قاعدتاً ترم تبخیر-تعرق از اهمیت زیادی در بیلان رطوبتی سطحی خاک برخوردار می‌باشد. لذا برای بهبود عملکرد الگوریتم مذکور ترم تبخیر-تعرق به معادلات اضافه شد و نقشه تغییرات مکانی شاخص‌های آماری CC، RMSE و Bias برای این محدوده مطالعاتی تهیه گردید که نتایج آن در شکل (۱۰) و برای مرحله واسنجی نشان داده شده است. در شکل مذکور، نقشه تغییرات مکانی شاخص‌های آماری CC، RMSE و Bias با (گروه الف) و بدون (گروه الف) در نظر گرفتن ترم تبخیرتعرق (فرم اصلی الگوریتم SM2Rain) ارائه شده‌اند. همچنین مقادیر متوسط شاخص‌های مذکور در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که از روی نقشه تغییرات مکانی مشخص است بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ضریب همبستگی قبل از افزودن ترم تبخیر-تعرق به‌ترتیب معادل ۰/۸۴ و ۰/۵۵ بوده در حالی بعد از افزودن ترم تبخیر-تعرق مقدار این شاخص به ۰/۸۸ و ۰/۷۰رسیده است. به‌عبارت بهتر پس از اصلاح الگوریتم SM2Rain، میزان همبستگی بین بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی به‌شدت افزایش یافته است. همچنین متوسط مقدار شاخص RMSE در سطح بازه مطالعاتی از ۵/۹۶ به ۵/۱۸ میلی‌متر در روز کاهش یافته است.

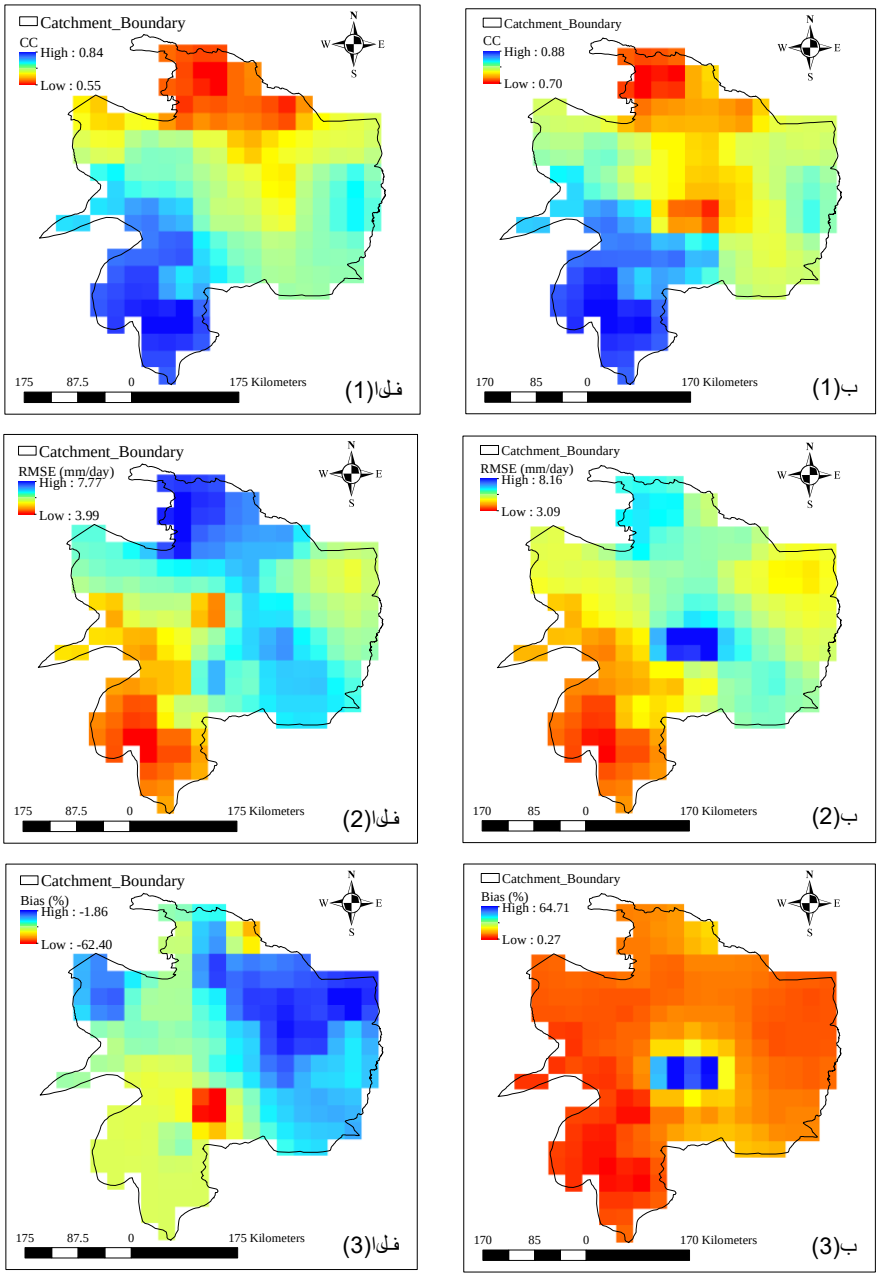
بر اساس شاخص RBias نیز کارائی الگوریتم مذکور افزایش چشم‌گیری را نشان می‌دهد. طبق محاسبات صورت گرفته، متوسط این شاخص در سطح محدوده مطالعاتی پس از افزودن ترم تبخیرتعرق به معادله بیلان آب خاک در حدود ۵۶ درصد کاهش یافته و به عدد ۹/۶۹ درصد رسیده است. در مرحله صحت‌سنجی نیز مقدار متوسط شاخص CC و RMSE در سطح بازه مطالعاتی به‌ترتیب از ۰/۷۹ به ۰/۸۱ و از ۵/۰۶ به ۴/۴۶ میلی-متر در روز تغییر یافته است. با توجه به توضیحات فوق، نتایج به‌دست آمده حاکی از بهبود عملکرد الگوریتم SM2Rain در سطح استان خراسان رضوی پس از افزودن ترم تبخیرتعرق می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

ارزیابی عملکرد الگوریتم اصلاح شده SM2Rain در سطح استان مازندران

در این بخش نیز بعد از افزودن ترم تبخیرتعرق به معادله بیلان آب خاک، مقادیر بارش در سطح استان مازندران شبیه‌سازی و با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. نقشه توزیع مکانی شاخص‌های آماری CC، RMSE و Bias به‌دست آمده از شکل اصلی و اصلاح شده الگوریتم SM2Rain در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در مرحله واسنجی با افزودن ترم تبخیرتعرق به الگوریتم مذکور، مقدار متوسط شاخص CC در سطح حوضه از۰/۶۲ به ۰/۷۰ افزایش یافته است. همچنین بارش شبیه‌سازی شده پس از اصلاح الگوریتم SM2Rain موجب شده است که میزان همبستگی بین بارش شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در بخش‌های عمده محدوده مطالعاتی از ۰/۶۰ فراتر رود و این به معنی بهبود عملکرد الگوریتم مذکور می‌باشد.



شکل ۱۰- نقشه توزیع مکانی شاخص‌های CC ، RMSE و Bias بارش شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم SM2RAIN در سطح استان خراسان رضوی (مرحله واسنجی) (گروه الف بدون لحاظ کردن تبخیر-تعرق و گروه ب بعد از اضافه کردن ترم تبخیر- تعرق به معادله بیلان آب خاک)

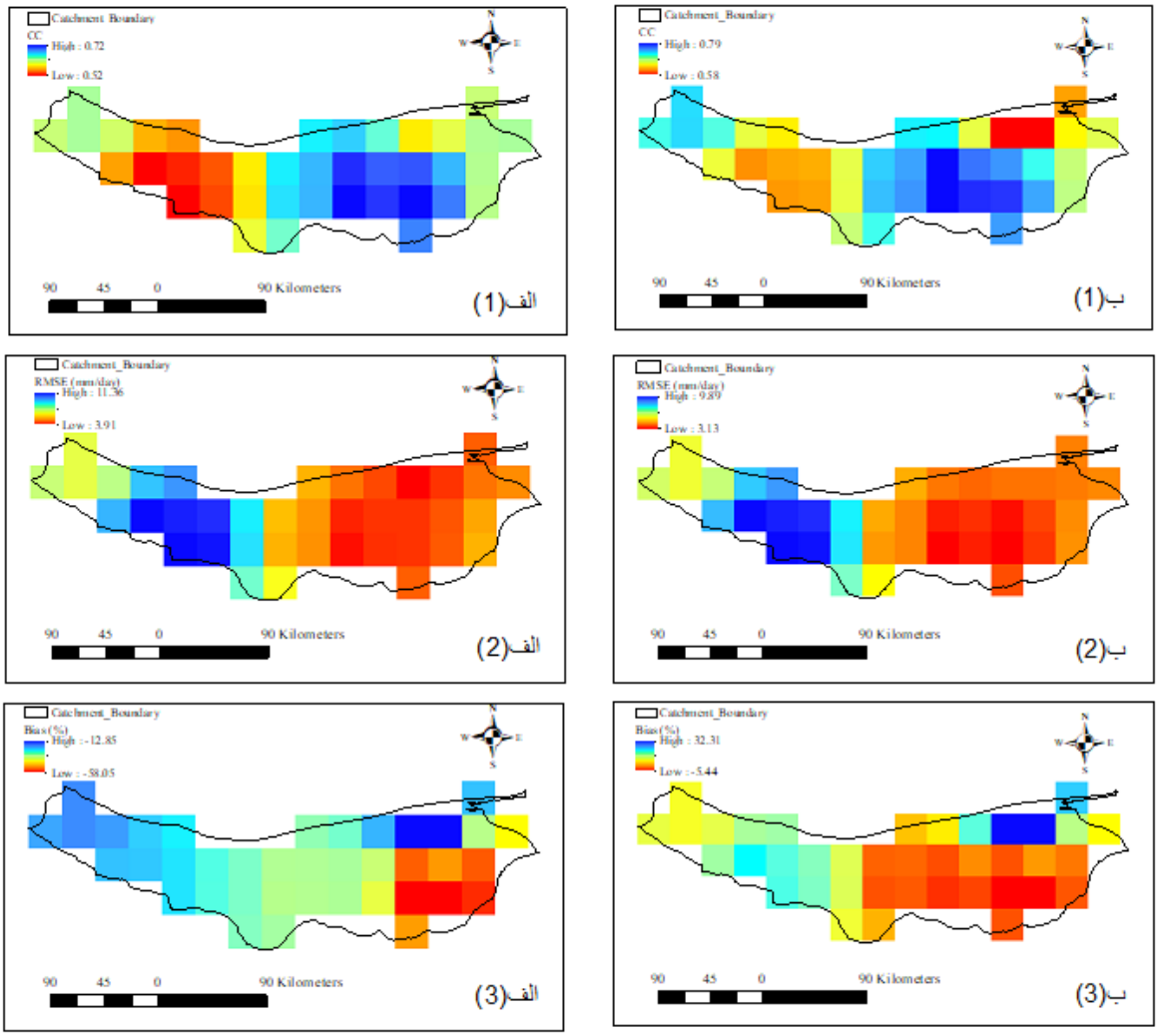
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- متوسط مشخصات آماری بارش شبیه‌سازی شده در سطح استان خراسان رضوی پس از اصلاح الگوریتم SM2Rain

شاخص‌های آماری	مرحله واسنجی		مرحله صحت‌سنجی	
	بدون ترم تبخیرتعرق	با ترم تبخیرتعرق	بدون ترم تبخیرتعرق	با ترم تبخیرتعرق
CC (-)	۰/۶۹	۰/۷۹	۰/۶۷	۰/۷۳
RMSE (mm/day)	۵/۹۶	۵/۱۸	۶/۷	۶/۳۴
NRMSE (-)	۱/۴۹	۰/۳۱	۱/۵۶	۰/۵۲
RBias (%)	-۲۱/۹۲	۹/۶۹	۳۰/۸	۱۸/۲

بر اساس شاخص RBias نیز می‌توان چنین عنوان نمود که اصلاح الگوریتم SM2Rain تا حد بسیار زیادی از خطای برآورد بارش کاسته است. طبق محاسبات صورت گرفته مقدار متوسط این شاخص در سطح حوضه از ۳۶/۹- درصد به ۷/۹۶ درصد کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر، بدون لحاظ کردن ترم تبخیرتعرق، الگوریتم مذکور به‌طور متوسط مقدار بارش را در حدود ۳۶/۹ درصد کم برآورد می‌نماید و این در حالیست که با افزودن ترم مذکور به معادله بیلان آب خاک، فرآیند شبیه‌سازی بارش از روند بهتری برخوردار شده و متوسط خطای الگوریتم فوق در برآورد بارش به کمتر از ۸ درصد محدود شده است. در جدول (۴) نیز متوسط مشخصات آماری بارش شبیه‌سازی شده قبل و پس از اصلاح الگوریتم مذکور برای دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است.



شکل ۱۱- نقشه توزیع مکانی شاخص‌های CC ، RMSE و Bias بارش شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم SM2RAIN در سطح استان مازندران (مرحله واسنجی) (گروه الف بدون لحاظ کردن تبخیر-تعرق و گروه ب بعد از اضافه کردن ترم تبخیر- تعرق به معادله بیلان آب خاک)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴- متوسط مشخصات آماری بارش شبیه‌سازی شده در سطح استان مازندران پس از اصلاح الگوریتم SM2Rain

شاخص‌های آماری	مرحله واسنجی		مرحله صحت‌سنجی	
	بدون ترم تبخیرتعرق	با ترم تبخیرتعرق	بدون ترم تبخیرتعرق	با ترم تبخیرتعرق
CC (-)	۰/۶۲	۰/۷۰	۰/۶۶	۰/۷۲
RMSE (mm/day)	۶/۴۶	۵/۵۴	۶/۱۶	۵/۳۶
NRMSE (-)	۱/۱۹	۰/۴۳	۱/۲۲	۰/۶۷
RBias (%)	-۳۶/۹	۷/۹۶	-۳۰/۱۲	۱۰/۹۳

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بارش در چرخه هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و مدلسازی بارش-رواناب، تلاش‌های زیادی در راستای ابداع و توسعه روش‌های جدید و کارا برای برآورد آن در سطح دنیا صورت گرفته است. یکی از جدیدترین این تلاش‌ها، الگوریتم SM2Rain می‌باشد که با حل معکوس معادله بیلان آب خاک و لحاظ نمودن یکسری فرضیات، مقدار بارش را برآورد می‌نماید. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی این الگوریتم در تخمین بارش در دو اقلیم خشک/نیمه‌خشک (خراسان رضوی) و مرطوب (مازندران) ایران به انجام رسیده است. همچنین اصلاح الگوریتم جهت بهبود عملکرد آن جهت تخمین بارش به‌ویژه در حوضه‌های نیمه‌خشک از دیگر اهداف این پژوهش به‌شمار می‌آید. نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم مذکور در دو استان خراسان رضوی و مازندران حاکی از همبستگی بالا بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌باشد. محاسبات صورت گرفته حاکی از آن است که متوسط شاخص CC در سطح بازه‌های مطالعاتی به‌ترتیب در حدود ۰/۷۰ و ۰/۶۵ می‌باشد. در نهایت برای ارتقا و بهبود عملکرد الگوریتم SM2Rain، ترم تبخیر-تعرق نیز به معادلات بیلان آب خاک اضافه گردید و مجدداً مقادیر بارش برای دو محدوده مطالعاتی برآورد و با داده‌های زمینی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن ترم تبخیر-تعرق و تعرق عملکرد الگوریتم مذکور در شبیه‌سازی بارش بین ۱۰ تا ۱۸ درصد افزایش یافته است. با اصلاح الگوریتم مذکور در سطح استان خراسان رضوی مقدار ضریب همبستگی از ۰/۶۹ به ۰/۷۹ افزایش و مقدار شاخص RMSE نیز از ۵/۹۶ به ۵/۱۸ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. همچنین در سطح استان مازندران نیز پس از لحاظ کردن ترم تبخیرتعرق، متوسط شاخص CC در سطح استان از مقدار ۰/۶۲ به ۰/۷۰ افزایش و مقدار شاخص RMSE نیز از ۶/۴۶ به ۵/۵۴ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. عدم لحاظ نمودن سهم ترم-های موثری همچون برف/ باران‌گیرش (به‌ویژه در سطح استان مازندران) و تبخیرتعرق در معادله بیلان آب خاک منجربه کاهش عملکرد الگوریتم SM2Rain در بخش‌هایی از بازه‌های مذکور می‌گردد.

با توجه به وضعیت پوشش‌های جنگلی متراکم واقع در اقلیم‌های مرطوب به‌نظر می‌رسد با افزودن روابط مناسب برای محاسبه ترم-های مذکور، به ویژه ترم باران گیرش و تبخیرتعرق که از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد می‌توان تا حد زیادی از خطای سیستماتیک الگوریتم مذکور کاست. باتوجه به توضیحات فوق، می‌توان چنین جمع‌بندی نمود که ترم تبخیرتعرق به ویژه برای مناطقی که دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک می‌باشند می‌تواند عامل تاثیرگذار و قابل توجه برای بهبود عملکرد الگوریتم SM2Rain باشد. خروجی حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک داده جایگزین یا مکمل به ویژه در حوضه‌های فاقد آمار و یا دارای آمار کم مورد استفاده قرار گیرد.

REFERENCES

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. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 777-791.

Ashouri, H. Hsu, K. L. Sorooshian, S. Braithwaite, D. K. Knapp, K. R. Cecil, L. D. Nelson, B. R. and Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from Multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc*, 96(1), 69–83.

Brocca, L. Ciabatta, L. Massari, C. Moramarco, T. Hahn, S. Hasenauer, S. Kidd, R. Dorigo, W. Wagner, W. and Levizzani, V. (2014). Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data. *J. Geophys. Res. Atmos*, 119(9), 5128–5141.

Brocca, L., *et al*. (2014). Improving the representation of soil moisture by using a semi-analytical infiltration model. *Hydrological Processes*, 28(4), 2103-2115.

Ciabatta, L. Brocca, L. Massari, C. Moramarco, T. Gabellani, S. Puca, S. and Wagner, W. (2015). Rainfall-runoff modelling by using SM2RAIN-derived and state-of-the-art satellite rainfall products over Italy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*

Ciabatta, L. Brocca, L. Massari, C. Moramarco, T. Puca

www.SID.ir

Archive of SID

S. Rinollo, A. Gabellani, S. and Wagner, W. (2015). Integration of Satellite Soil Moisture and Rainfall Observations over the Italian Territory. *J. Hydrometeorol*.

Crow W. T. and Bolten, J. D. (2007). Estimating precipitation errors using spaceborne surface soil moisture retrievals. *Geophys. Res. Lett*, 34(8).

Famiglietti, J. S., E. F. Wood. (1994). Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resour. Res*, 11, 3061–3078.

Ghajarnia, N. Liaghat, A. and Arasteh, P. D. (2015). Comparison and evaluation of high resolution precipitation estimation products in Urmia Basin-Iran. *Atmospheric Research*, 158, 50-65.

Ghajarnia, N. Liaghat, A. and Arasteh, P. D. (2014). Verifying precipitation data of TAMAB and meteorology institute in Urmia basin. Journal of Water and Soil Resources Conservation, 4(1), 91-109.

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.

Pellarin, T. S. Louvet, C. Gruhier, G. Quantin, and C. Legout. (2013). A simple and effective method for correcting soil moisture and precipitation estimates using AMSR-E measurements, *Remote Sens. Environ*, 136, 28–36.

Rahimi J., Ebrahimpour M. and Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. Theoretical and applied climatology. 112(3-4): 409-418.

www.SID.ir