

اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک ماهواره مایکروویو اسموس

مژده جامعی^۱ - محمد موسوی بایگی^{۲*} - امین علیزاده^۳ - پرویز ایران‌نژاد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۱

چکیده

رطوبت خاک یکی از مهمترین متغیرهای چرخه هیدرولوژیکی است که نقش کلیدی در پیش‌بینی‌های هواشناسی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مطالعات تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب دارد. در سال‌های اخیر برآوردهای جهانی رطوبت خاک از طریق سنجنده‌های مایکروویو ماهواره‌ای میسر شده و داده‌های آنها در دسترس قرار گرفته‌اند. اسموس نخستین ماموریت ماهواره‌ای آژانس فضایی اروپا برای پیش‌بینی رطوبت خاک است که در سال ۲۰۰۹ آغاز و هم‌اکنون نیز در حال بهره‌برداری می‌باشد. این ماهواره حامل اولین رادیومتر مایکروویو دوبعدی باند-L است که رطوبت سطحی خاک را در فرکانس ۱/۴ گیگاهرتز بازیابی می‌نماید. هدف تحقیق حاضر اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک ماهواره اسموس در پنج محدوده مطالعاتی غرب و جنوب‌غربی کشور است. اعتبارسنجی داده‌های اسموس با استفاده از داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در پنج ایستگاه‌ها هواشناسی انجام گردید. نتایج تحقیق نشان داد که بین برآوردهای رطوبت خاک اسموس و اندازه‌گیری‌های زمینی در ایستگاه‌ها همبستگی خوبی ($R=0.75$ تا 0.88) وجود دارد. ارزیابی خطای اعتبارسنجی‌ها مشخص نمود که بازیابی‌های اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرارود و سرابله به ترتیب با مقادیر $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ، $0.048/0.11$ MBE مقدار کمی برآوردی و در ایستگاه‌های داراب و اکباتان با $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ، -0.031 MBE مقداری بیش‌برآوردی دارند. تحلیل شاخص RMSD نیز بیانگر آن بود که داده‌های ماهواره در مقایسه با داده‌های رطوبت خاک ایستگاه‌ها از دقت مناسبی ($0.062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ تا 0.02 RMSD) برخوردارند. در ایستگاه اهواز بازیابی‌های اسموس با بالاترین ضریب همبستگی ($R=0.88$) و $0.048 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ RMSD، نزدیک‌ترین دقت را به دقت هدف ماموریت اسموس ($0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ RMSD) دارند. در مجموع داده‌های ماهواره اسموس با دقت و کیفیت مطلوبی که در منطقه مطالعاتی دارند می‌توانند ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک باشند.

واژه‌های کلیدی: باند-L، سنسجش از دور، رادیومتر مایکروویو، محصول MIR_SMUDP2، نقشه رطوبت خاک

مقدمه

ولی در شرایطی که رطوبت خاک زیاد باشد، رواناب افزایش یافته و احتمال وقوع سیلاب را بالا می‌رود (۵). سال ۲۰۱۰ رطوبت خاک به عنوان یکی از متغیرهای اساسی اقلیمی توسط سازمان جهانی هواشناسی، سیستم مشاهدات اقلیم جهانی و کمیته ماهواره‌های مشاهداتی زمین معرفی گردید (۲۲). به طور معمول اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک فقط در مقیاس نقطه‌ای و به صورت مستقیم انجام می‌شوند که تنها بیانگر وضعیت بخش محدودی از خاک می‌باشند. اگرچه اندازه‌گیری‌های متعدد در بسیاری از نقاط یک منطقه می‌تواند مقدار متوسط رطوبت خاک را برای آن منطقه تعیین کند (۹) اما هنگامی که اندازه‌گیری‌های زیاد و در مقیاس گسترده مورد نیاز باشد، چنین روش‌هایی دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر بوده و استفاده از آنها برای دوره‌های طولانی مدت عملی نمی‌باشد.

برآورد رطوبت خاک با روش‌های سنسجش از دور می‌تواند اطلاعات منطقه‌ای گسترده‌ای در مورد رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف ارائه دهند. رادیومتری مایکروویو در فرکانس‌های پائین (باند-

رطوبت خاک یکی از مهمترین متغیرهای چرخه هیدرولوژیکی است (۱۸) که نقش کلیدی در کاربری‌های علمی و عملی نظیر مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی عددی هواشناسی (۳۳)، پیش‌وقایع حدی مانند: سیلاب، خشکسالی و جنگل‌سوزی‌ها (۲۳ و ۲۷)، مطالعات تغییر اقلیم (۱۹) و مدیریت منابع آب (۲۴) دارد. رطوبت خاک بدلیل ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، بارش و تبخیر و تعرق، از نظر زمانی و مکانی بسیار تغییرپذیر است (۸). تغییرات رطوبت خاک بر رواناب و فرسایش خاک تاثیرگذار بوده به نحوی که کمبود رطوبت خاک در هنگام بارش سبب نفوذپذیری زیاد و کاهش رواناب می‌شود

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، استاد هواشناسی و استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*) نویسنده مسئول: (Email: mousavib@um.ac.ir)

۴- دانشیار گروه فیزیک فضا، دانشگاه تهران

برای مدل‌سازی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی و همچنین برای برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب، وجود داده‌های رطوبت خاک منطقه‌ای ضروری است. این در حالی که است که اندازه‌گیری رطوبت خاک در ایران فقط در تعداد محدودی از ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور انجام می‌شود و داده‌های ثبت شده نیز به صورت دوره‌های آماری کوتاه مدت، ناپیوسته و ناقص وجود دارد. بنابراین نظر به توانایی‌های ماهواره مایکروویو اسموس در برآورد جهانی رطوبت خاک و همچنین نتایج مطلوب سوابق تحقیقاتی مذکور در این زمینه، هدف تحقیق حاضر اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک ماهواره اسموس در پنج محدوده مطالعاتی وزارت نیرو است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی این تحقیق شامل پنج محدوده مطالعاتی وزارت نیرو در بخش‌های غرب و جنوب‌غرب کشور است که خصوصیات آن‌ها در جدول ۱- و موقعیت آن‌ها در کشور در شکل ۱- ارائه شده است.

ماهواره اسموس

ماموریت اسموس نخستین ماموریت ایسا برای پیش جهانی رطوبت خاک است که در ۲ نوامبر ۲۰۰۹ با موفقیت پرتاب شد. این ماهواره با همکاری مرکز ملی مطالعات فضایی (CNES)^۵ در فرانسه و مرکز توسعه صنعت و فناوری (CDTI)^۶ در اسپانیا رهبری می‌شود. اسموس حامل اولین رادیومتر مایکروویو روزنه ترکیبی (MIRAS)^۷ دو بعدی باند-L می‌باشد که دریافت کننده تابش گسیل شده از سطح زمین در فرکانس ۱/۴ گیگاهرتز (باند-L مایکروویو، ۲۱ سانتی‌متر) بوده و با رطوبت خاک در چند سانتی‌متری سطح خاک و با شوری سطحی اقیانوس‌ها مرتبط است. این رادیومتر دماهای درخشندگی (قطبیده دوگانه یا قطبیده کامل) را در زوایای فرودی بین صفر تا ۵۵ درجه با تفکیک مکانی ۳۵ کیلومتر در مرکز میدان دید برآورد می‌نماید. دمای درخشندگی چند زاویه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های اسموس، محصولات رطوبت خاک را با دقت $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و گام زمانی کمتر از ۳ روز در سطح جهان برآورد می‌نماید.

L: ۱/۴ گیگاهرتز) فنی است که اخیراً برای برآورد جهانی رطوبت سطحی خاک با دقت مناسب توسعه یافته است (۱۷). در سال‌های اخیر ماموریت‌های ماهواره‌ای اختصاصی برای پیش جهانی رطوبت خاک از طریق سنجده‌های مایکروویو طراحی شده و هم‌اکنون این ماهواره‌ها در حال بهره‌برداری هستند و داده‌های رطوبت خاک آن‌ها در دسترس هستند (۱۸). ماموریت اسموس^۱ نخستین ماموریت ماهواره‌ای آژانس فضایی اروپا (ایسا)^۲ با هدف ارائه داده‌های جهانی رطوبت خاک و شوری آب اقیانوس‌ها می‌باشد که در سال ۲۰۰۹ با موفقیت آغاز شده است. این ماهواره حامل اولین رادیومتر مایکروویو دوبعدی باند-L است که رطوبت سطحی خاک را در فرکانس ۱/۴ گیگاهرتز برای پیش‌بینی‌های هواشناسی، پیش‌های اقلیمی و چرخه هیدرولوژیکی با دقت $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ بازیابی می‌نماید (۱۹). مطالعات متعددی در خصوص اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس، بررسی کیفیت و دقت بازیابی‌ها و نیز تشخیص خطاهای احتمالی موجود در این داده‌ها صورت گرفته است. همچنین تحقیقاتی در مورد ارزیابی دقت محصولات اسموس در مقایسه با داده‌های مشاهداتی و استفاده از آن‌ها در سطوح وسیع و تحت شرایط اقلیمی مختلف انجام شده است. در مقیاس جهانی ارزیابی محصولات اسموس از مقایسه داده‌های رطوبت خاک این ماهواره با محصولات رطوبت خاک AMSR-E و ASCAT^۳ و همچنین داده‌های LDAS^۴ (۱، ۲۰) صورت گرفته است. در مقیاس منطقه‌ای نیز ارزیابی کیفیت بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس با استفاده از شبکه داده‌های مشاهداتی در قاره اروپا (۳، ۶، ۱۱، ۲۵ و ۲۸)، کانادا (۷، ۸ و ۱۰)، ایالات متحده (۲، ۴، ۱۳، ۱۹، ۲۴ و ۳۱)، استرالیا (۲۶ و ۲۹)، قاره آفریقا (۲۱ و ۲۳) و در قاره آسیا در فلات تبت (۳۲ و ۳۴) انجام شده است. آنالیز نتایج مختلف نشان می‌دهد که محصولات رطوبت خاک اسموس همبستگی خوبی با رطوبت خاک مشاهداتی و یا مدل‌سازی شده دارند (۲، ۱۴ و ۲۹). همچنین در شرایط اسمی بازیابی‌های اسموس نزدیک به مقدار هدف ماهواره یعنی $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ RMSE می‌باشند (۲، ۱۴ و ۲۵). در مجموع نتایج اعتبارسنجی‌های اسموس در تحقیقات مختلف، بیانگر کارایی خوب این داده‌ها نسبت به دیگر ماهواره‌ها و مدل‌های برآورد رطوبت خاک منطقه‌ای است (۲۹ و ۲۷).

از جمع‌بندی سوابق تحقیقاتی مذکور چنین استنباط می‌شود که بیشتر مطالعات انجام شده بر روی محصولات اسموس، محدود به قاره‌های اروپا و آمریکا بوده و فعالیت‌های راستی‌آزمایی کمتری در قاره آسیا انجام گردیده است. در ایران نیز مانند دیگر مناطق دنیا

5- Centre National d'Etudes Spatiales

6- Center for Technological and Industrial Development

7- Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis

1- Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)

2- European Space Agency

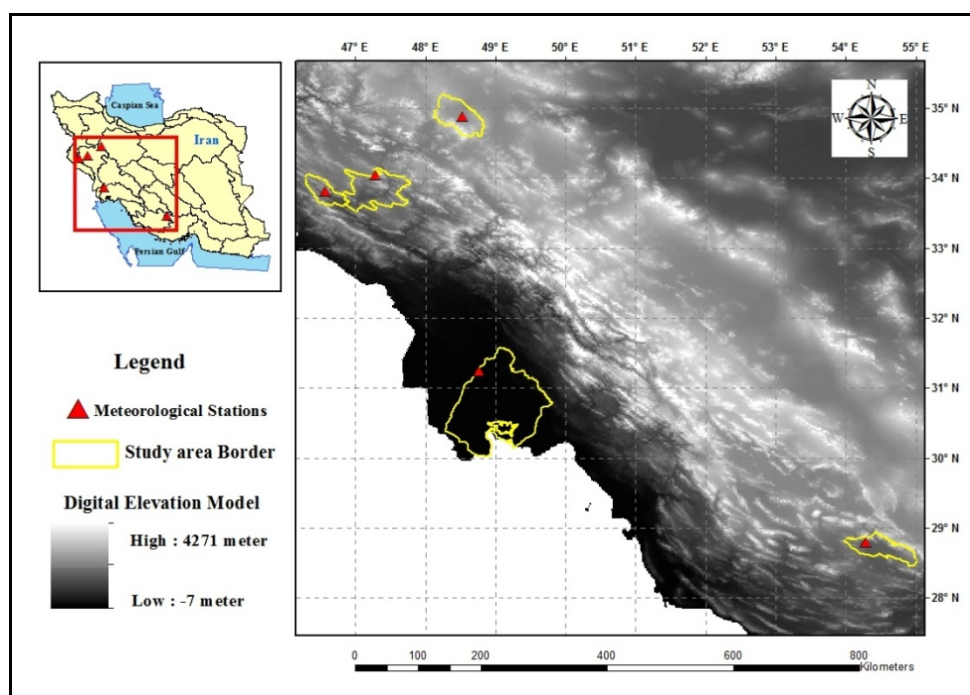
3- Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E)

4- land surface data assimilation system

جدول ۱- مشخصات محدوده‌های مطالعاتی

Table 1- Specifications of study areas

نام محدوده مطالعاتی Study area name	نام حوضه آبریز Catchments name	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع (مترمربع) Area (m)
هلیلان Helilan	کرخه Karkkeh	From 46° 47' 5" to 47° 49' 42" E	From 33° 27' 40" to 34° 10' 50" N	3625
چرداول Chardaval	کرخه Karkkeh	From 46° 15' 7" to 46° 56' 26" E	From 33° 33' 32" to 34° 5' N	1368
شادگان Shadegan	زهره-جراحی Zohreh-Jarahi	From 48° 11' 4" to 49° 53' 3" E	From 29° 57' 11" to 31° 38' 28" N	13328
داراب Darab	کل-مهران Kal-Mehran	From 53° 58' 10" to 55° 0' 52" E	From 28° 26' 48" to 28° 56' 15" N	2365
همدان-بهار Hamedan-Bahar	دریاچه نمک Salt Lake	From 48° 4' 53" to 48° 53' 12" E	From 34° 33' 25" to 35° 13' 15" N	2492



شکل ۱- موقعیت محدوده‌های مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

Figure 1- Situation of study areas and selected meteorological stations

دو اساموس^۲ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ساختار محصولات رطوبت خاک سطح دو اساموس

بطور کلی محصولات رطوبت خاک سطح دو اساموس از دو فایل مجزا یکی فایل هدر و دیگری فایل بلوک داده‌ها تشکیل شده‌اند که این دو فایل در یک دایرکتوری زیپ شده قرار دارند.

سیستم شبکه‌بندی محصولات اساموس، شبکه ISEA4H9^۱ بوده که دارای سلول‌ها شش‌وجهی شکل است و فواصل گره‌های این شبکه به طور مساوی ۱۵ کیلومتری می‌باشد (۱۶، ۱۵ و ۱۷). ماهواره اساموس چندین سری محصولات مختلف دارد که در این تحقیق اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک از محصولات رطوبت خاک سطح

2- SMOS Level 2 Soil Moisture

1- Icosahedral Snyder Equal Area projection with aperture 4, resolution 9

در محدوده‌های مطالعاتی در شکل (۱) آمده است.

داده‌های ماهواره‌ای مورد نیاز تحقیق

محصول رطوبت خاک سطح دو اسموس (MIR_SMUDP2) شامل داده‌هایی مانند: بازیابی‌های رطوبت خاک، مقدار آب پوشش گیاهی، دماهای درختندگی محاسبه شده در ۴۲/۵ درجه، ثابت دی الکتریک سطح و... با تفکیک مکانی ۳۵ کیلومتر در مرکز میدان دید است. هدف این تحقیق اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک محصول MIR_SMUDP2، نسخه ۵۵۱ طی سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ می‌باشد. در پروسه اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای بررسی می‌شوند که از نظر زمانی منطبق با روزهای دارای داده رطوبت خاک در ایستگاه‌های مطالعاتی (جدول ۲) باشند. تطبیق زمانی داده ماهواره و داده زمینی پس از بازکردن محصولات اسموس و استخراج اطلاعات از آن‌ها انجام می‌شود.

فرآیند خواندن و استخراج داده از محصولات ماهواره اسموس

دانشمندان ایسا براساس الگوریتم‌های اسموس مجموعه‌ای از کدها را برای بازکردن و خواندن محصولات سطح دو اسموس در زبان برنامه نویسی متلب تحت لینوکس توسعه داده‌اند. در تحقیق حاضر با استفاده از این کدها، خواندن و بازکردن محصول MIR_SMUDP2 و استخراج داده‌های مورد نیاز از هدر فایل و فایل بلوک داده‌های باینری این محصول، مانند: بازیابی‌های رطوبت خاک، زمان گذر ماهواره از منطقه (تاریخ و ساعت شروع و خاتمه تصویربرداری)، مختصات مکانی و اطلاعات مورد نیاز دیگر انجام گردید.

فرآیند کولوکیشن

کولوکیشن (هم‌مکانی و هم‌زمانی) روشی برای تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی در سنجش از دور است که برای بررسی تطابق اندازه‌گیری‌های دو یا چند ابزار مختلف بکار می‌رود. کولوکیشن کردن می‌تواند برای اندازه‌گیری‌های سنجنده‌های هوابرد با خروجی مدل‌ها، مشاهدات سنجنده‌های مختلف با یکدیگر و مشاهدات سنجنده‌ها با داده‌های زمینی انجام شود (۱۲). در مطالعه حاضر با کولوکیشن محصولات MIR_SMUDP2 با داده‌های زمینی، داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای برای اعتبارسنجی انتخاب می‌شوند که از لحاظ مکانی کمترین فاصله را با محل ایستگاه و از نظر زمانی نیز کمترین اختلاف زمانی را با اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های هواشناسی داشته باشند.

هدر فایل^۱، یک فایل ASCII XML با پسوند HDR است که دارای یک ساختار مشترک در همه محصولات اسموس بوده و از دو بخش هدر ثابت و هدر متغیر تشکیل شده است.

فایل بلوک داده‌ها^۲ (باینری) با پسوند DBL که شامل یک یا چندین مجموعه داده است و هر مجموعه داده شامل تعدادی از رکوردهای یکسان می‌باشد. بازیابی‌های رطوبت خاک به همراه داده‌های دیگر در این مجموعه داده‌ها قرار دارند. محصولات سطح دو رطوبت خاک اسموس شامل دو محصول MIR_SMUDP2^۳ و MIR_SMDAP2^۴ هستند.

اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های زمینی

در این مطالعه اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک محصول MIR_SMUDP2 با استفاده از اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی در دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۲ انجام شده است. پروسه اعتبارسنجی به کمک روش کولوکیشن^۵ (هم‌مکانی و هم‌زمانی کردن) طی چند مرحله مختلف صورت پذیرفت که در ادامه توضیحات هر مرحله ارائه شده است.

۲-۳-۱- آماده‌سازی داده‌های زمین

برای اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای، از اندازه‌گیری‌های مستقیم رطوبت خاک در پنج ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی (سازمان هواشناسی کشور) در محدوده‌های مطالعاتی منتخب استفاده گردید. رطوبت خاک در این ایستگاه‌ها در اعماق مختلف ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ سانتی‌متری و در مقیاس‌های زمانی: هفتگی، روزانه و ساعتی ثبت می‌شوند. باتوجه به این که ماهواره اسموس رطوبت خاک را در ۵ سانتی‌متری بالای خاک برآورد می‌نماید، لذا جهت اعتبارسنجی فقط از داده‌های ایستگاهی ثبت شده در عمق ۵ سانتی‌متری استفاده شد. در بررسی کمی و کیفی داده‌های ایستگاه‌های منتخب طی دوره آماری (۲۰۱۳-۲۰۱۲)، روزی که اندازه‌گیری رطوبت خاک در ایستگاه انجام شده و بارش نیز در آن روز رخ داده بود، از داده‌های مورد بررسی حذف گردید. سپس برای هر ایستگاه یک فایل شامل کلیه داده‌های روزانه رطوبت خاک، تاریخ و زمان اندازه‌گیری و مختصات مکانی (طول و عرض جغرافیایی) محل برداشت داده، با فرمت واحد به عنوان ورودی‌های اولیه مدل اعتبارسنجی تهیه شد. مشخصات ایستگاه‌های منتخب و تعداد روزهای مورد بررسی هر ایستگاه در جدول (۲) و موقعیت مکانی آن‌ها

- 1- Header File
- 2- Data Block File
- 3- Level 2 Soil Moisture User Data Product
- 4- Level 2 Soil Moisture Data Analysis Product
- 5- Collocation

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی
Table 2- Specifications of meteorological stations

نام ایستگاه Station Name	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع (متر) Altitude (m)	تعداد روز Number of Days
اهواز Ahvaz	48.77	31.23	12	105
داراب Darab	54.28	28.78	1098	50
اکباتان Ekbatan	48.53	34.87	1370	45
سرابله Sarableh	46.58	33.80	1030	142
سرارود Sararood	47.30	34.03	1361.7	101

داده برآوردی با سری داده‌های مشاهداتی می‌باشد. این روش خلاصه‌سازی گرافیکی شباهت بین دو سری داده را از لحاظ ضریب همبستگی (R)، اختلاف ریشه میانگین مربعات متمرکز شده (cRMSD) و انحراف معیار (σ) آنها (معادلات ۶-۷) کمی می‌نماید. موقعیت داده برآوردی روی نمودار تیلور براساس مقدار ضریب همبستگی و cRMSD آن با داده‌های زمینی و نیز انحراف معیار داده برآوردی تعیین می‌گردد (۳۰). رابطه بین سه شاخص آماری در نمودار تیلور بصورت معادله (۵) است.

$$cRMSD^2 = \sigma_{SM_{InSitu}}^2 + \sigma_{SM_{SMOS}}^2 - 2 * \sigma_{SM_{InSitu}} * \sigma_{SM_{SMOS}} * R \quad (5)$$

$$\sigma_{SM_{SMOS}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SM_{SMOS_i} - \overline{SM_{SMOS}})^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{SM_{InSitu}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SM_{InSitu_i} - \overline{SM_{InSitu}})^2 \quad (7)$$

نتایج و بحث

دستیابی به مدل اعتبارسنجی داده‌های اسموس

همانگونه که ذکر گردید پروسه اعتبارسنجی داده‌های ماهواره اسموس شامل چندین مرحله مختلف می‌باشد. براساس الگوریتمی که در این تحقیق تعریف شده است و با استفاده از زبان برنامه نویسی متلب تحت سیستم عامل لینوکس Red Hat، بخش‌های مختلف پروسه اعتبارسنجی بصورت یکپارچه درآمد و در نهایت مدل اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک اسموس حاصل گردید. مدل اعتبارسنجی برای پنج ایستگاه منتخب اجرا شده و در نهایت داده‌های رطوبت خاک محصولات اسموس و داده‌های زمینی متناظر با آنها، به

شاخص‌های اندازه‌گیری خطاهای اعتبارسنجی

ارزیابی خطای اعتبارسنجی محصولات اسموس در این مطالعه، با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف و نمودار تیلور انجام گردید. برای اندازه‌گیری تفاوت بین سری داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی از شاخص‌های آماری اختلاف ریشه میانگین مربعات (RMSD)^۱، اختلاف ریشه میانگین مربعات متمرکز شده (cRMSD)^۲ برای جلوگیری از بایاس‌های احتمالی ایجاد شده بین دو سری داده توسط RMSD بکار می‌رود (۱۱)، میانگین خطای اریبی^۳ یا بایاس (MBE) و از ضریب همبستگی (R) نیز برای اندازه‌گیری رابطه بین دو سری داده استفاده شد (معادله‌های ۱-۴). در این معادلات SM_{InSitu} و SM_{SMOS} به ترتیب رطوبت خاک ماهواره‌ای و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها می‌باشند.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SM_{InSitu_i} - SM_{SMOS_i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$cRMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(SM_{InSitu_i} - \overline{SM_{InSitu}}) - (SM_{SMOS_i} - \overline{SM_{SMOS}})]^2}{n}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (SM_{InSitu_i} - SM_{SMOS_i})}{n} \quad (3)$$

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SM_{InSitu_i} - \overline{SM_{InSitu}})(SM_{SMOS_i} - \overline{SM_{SMOS}})}{\sigma_{SM_{InSitu}} \sigma_{SM_{SMOS}}} \quad (4)$$

نمودار تیلور روشی برای پلات کردن سه شاخص آماری در یک نموداری دو بعدی است که نشان دهنده چگونگی نزدیکی یک سری

- 1 - Root Mean Square Difference
- 2 - Centered Root Mean Square Difference
- 3 - Mean Bias Error

عنوان خروجی مدل در فایل‌هایی برای ارزیابی خطا در مرحله بعدی ذخیره شدند. الگوریتم مدل اعتبارسنجی در شکل ۲ ارائه شده است.

نتایج ارزیابی خطای اعتبارسنجی رطوبت خاک ماهواره‌ای به منظور بررسی دقت بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در محدوده‌های مطالعاتی، داده‌های رطوبت خاک اسموس و داده‌های زمینی (حاصل از مدل اعتبارسنجی) با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج آنها در جدول ۳ آمده است.

بررسی ضرایب همبستگی بین داده‌های رطوبت خاک اسموس و داده‌های زمینی (جدول ۳) نشان داد که در ایستگاه‌های منتخب ضریب همبستگی بین ۰/۷۵ تا ۰/۸۸ متغیر است. بطوری که بیشترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به ایستگاه اهواز ($R=0/88$) و کمترین ضریب همبستگی متعلق به ایستگاه سرابله ($R=0/75$) بود. لذا این مقادیر بیانگر همبستگی خوب بین برآوردهای اسموس با اندازه‌گیری‌های زمینی در ایستگاه‌های منتخب است.

بررسی مقادیر اریبی محاسبه شده در ایستگاه‌های مختلف (جدول ۳) بیانگر آن است که در ایستگاه‌های اهواز ($MBE=0/11m^3m^{-3}$)، سرارود ($MBE=0/48m^3m^{-3}$) و سرابله ($MBE=0/48m^3m^{-3}$) با توجه به مقادیر مثبت اریبی، مقداری کم برآوردی در بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مستقیم رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی وجود دارد. اما در ایستگاه‌های داراب ($MBE=-0/11m^3m^{-3}$) و اکباتان

بررسی ضرایب همبستگی بین داده‌های رطوبت خاک اسموس و داده‌های زمینی (جدول ۳) نشان داد که در ایستگاه‌های منتخب ضریب همبستگی بین ۰/۷۵ تا ۰/۸۸ متغیر است. بطوری که بیشترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به ایستگاه اهواز ($R=0/88$) و کمترین ضریب همبستگی متعلق به ایستگاه سرابله ($R=0/75$) بود. لذا این مقادیر بیانگر همبستگی خوب بین برآوردهای اسموس با اندازه‌گیری‌های زمینی در ایستگاه‌های منتخب است.

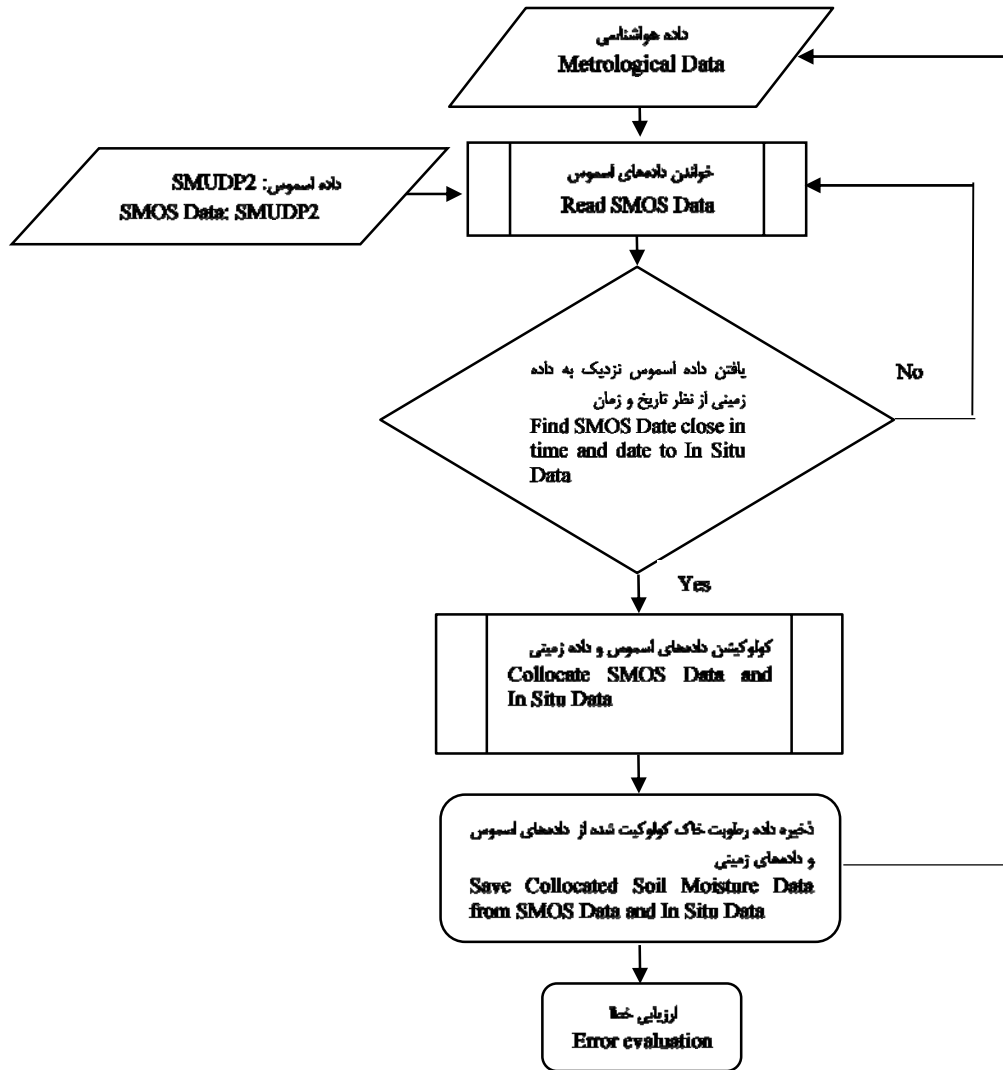
بررسی مقادیر اریبی محاسبه شده در ایستگاه‌های مختلف (جدول ۳) بیانگر آن است که در ایستگاه‌های اهواز ($MBE=0/11m^3m^{-3}$)، سرارود ($MBE=0/48m^3m^{-3}$) و سرابله ($MBE=0/48m^3m^{-3}$) با توجه به مقادیر مثبت اریبی، مقداری کم برآوردی در بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مستقیم رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی وجود دارد. اما در ایستگاه‌های داراب ($MBE=-0/11m^3m^{-3}$) و اکباتان

بررسی مقادیر اریبی محاسبه شده در ایستگاه‌های مختلف (جدول ۳) بیانگر آن است که در ایستگاه‌های اهواز ($MBE=0/11m^3m^{-3}$)، سرارود ($MBE=0/48m^3m^{-3}$) و سرابله ($MBE=0/48m^3m^{-3}$) با توجه به مقادیر مثبت اریبی، مقداری کم برآوردی در بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مستقیم رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی وجود دارد. اما در ایستگاه‌های داراب ($MBE=-0/11m^3m^{-3}$) و اکباتان

جدول ۳- ارزیابی خطای مقایسه رطوبت خاک اسموس با اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی

Table 3- Error evaluation for Compare of SMOS soil moisture and soil moisture measurements at meteorological stations

نام ایستگاه Station Name	RMSD (m^3m^{-3})	MBE (m^3m^{-3})	cRMSD (m^3m^{-3})	ضریب همبستگی R	انحراف معیار (m^3m^{-3}) Standard Deviation	
					SMOS	In situ
اهواز Ahvaz	0.048	0.040	0.021	0.88	0.045	0.029
سرارود Sararod	0.059	0.011	0.058	0.86	0.087	0.110
سرابله Sarableh	0.062	0.048	0.050	0.75	0.077	0.076
داراب Darab	0.028	-0.01	0.008	0.82	0.008	0.013
اکباتان Ekbatan	0.020	-0.031	0.025	0.80	0.041	0.023



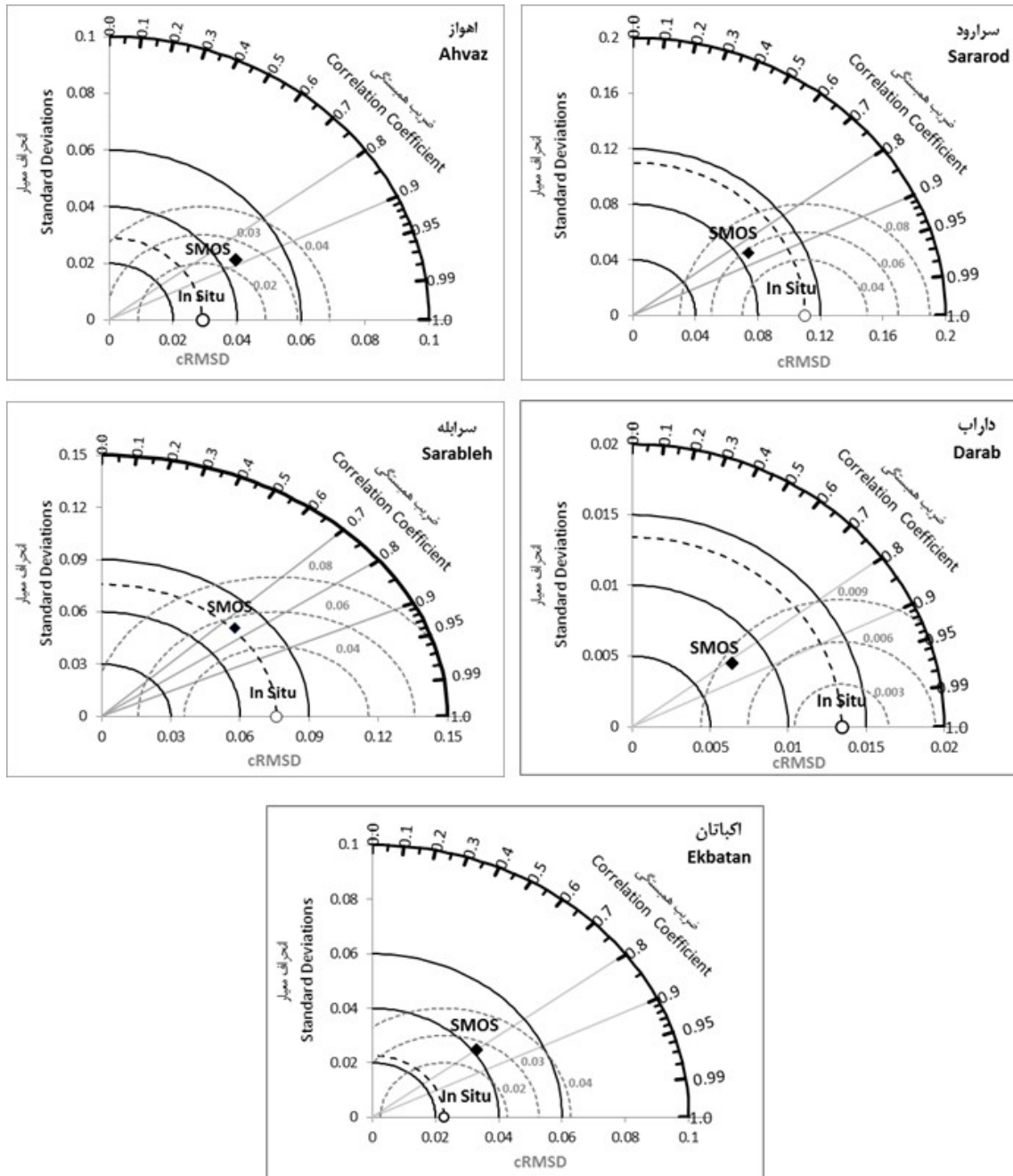
شکل ۲- الگوریتم مدل اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک اساموس
Figure 2- Algorithm for validation of SMOS soil moisture data

دارد و دامنه تغییرات مکانی داده‌های اساموس در این ایستگاه نیز مانند سرابله مناسب می‌باشد. بطور کلی در نمودار تیلور هر چه ضریب همبستگی بین دو سری داده بالاتر، cRMSD بین داده‌ها پایین‌تر و اختلاف انحراف معیار دو سری داده کمتر باشد، تطابق داده‌های برآوردی و مشاهداتی بیشتر می‌شود. بنابراین ایستگاه اهواز با بالاترین ضریب همبستگی، cRMSD برابر $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و اختلاف انحراف معیار ناچیز دو سری داده، بهترین تطابق بین بازیابی‌های رطوبت خاک اساموس و داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی وجود دارد. با توجه به دقت و کیفیت مطلوب داده‌های اساموس در منطقه مطالعاتی، محصولات این ماهواره می‌توانند ابزار مناسبی برای استخراج نقشه‌های رطوبت خاک باشند. در تحقیق حاضر برای نمونه نقشه

در نمودار تیلور ایستگاه اهواز، بالاترین ضریب همبستگی $(R=0.88)$ بین دو سری داده در بین همه ایستگاه‌ها وجود داشته، همچنین دامنه تغییرپذیر مکانی داده‌های اساموس با توجه به اختلاف انحراف معیار دو سری داده بسیار ناچیز است. در ایستگاه سرابله داده‌های اساموس با انحراف معیار $0.077 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ، دقیقاً منطبق بر قوس انحراف معیار داده‌های مشاهداتی می‌باشند. داده‌های اساموس در این ایستگاه انحراف معیار درستی داشته و نسبت به دیگر ایستگاه‌ها از دامنه تغییرات مکانی مناسب‌تری برخوردارند. اما کمترین ضریب همبستگی بین دو سری داده $(R=0.75)$ در این ایستگاه دیده می‌شود. در نمودار تیلور ایستگاه داراب، کمترین اختلاف بین سری داده‌های ماهواره‌ای و زمینی $(\text{cRMSD} = 0.008 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$ وجود

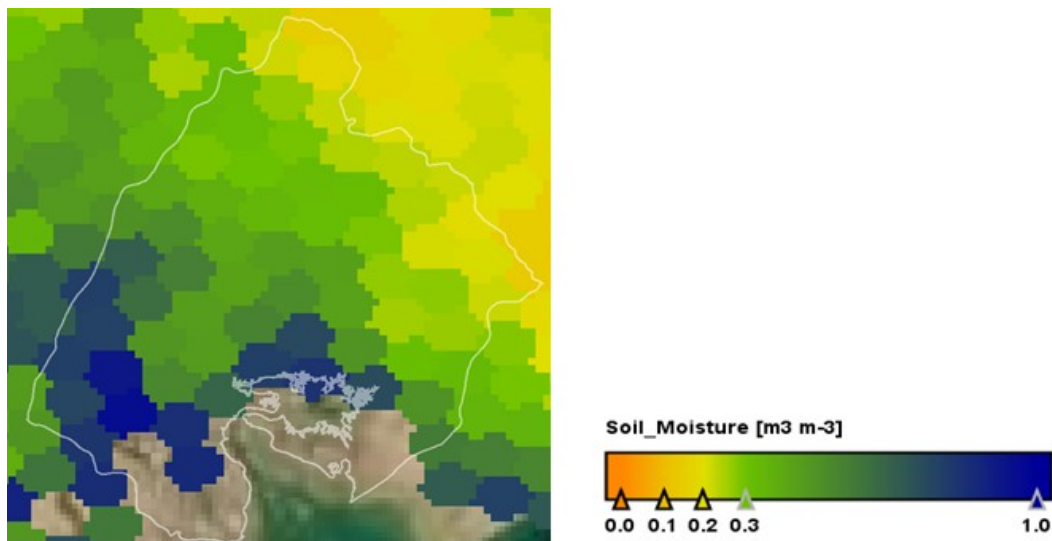
(شکل ۴).

رطوبت خاک روز ۱۴ نوامبر سال ۲۰۱۳ در محدوده مطالعاتی شادگان، از محصولات رطوبت خاک سطح دو اسموس استخراج گردیده است



شکل ۳- نمودارهای تیلور نشان دهنده دقت داده‌های اسموس در مقایسه با اندازه‌گیری‌های ایستگاهی

Figure 3- Taylor Diagrams showing accuracy of SMOS as compared to the in situ measurement



شکل ۴- نقشه رطوبت خاک روز ۱۴ نوامبر ۲۰۱۳ در محدوده مطالعاتی شادگان
Figure 4- Soil Moisture map for 14 November 2013 at Shadegan study area

با اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک در ایستگاه دارند. در مجموع چنین نتیجه‌گیری می‌شود که بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مطالعاتی از دقت مناسبی برخوردار هستند.

کمبود و فقدان داده‌های رطوبت خاک در اغلب مناطق کشور همواره از مشکلات مهم در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی‌های هواشناسی و مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد. بنابراین براساس نتایج تحقیق حاضر، برآوردهای رطوبت خاک ماهواره اسموس می‌توانند ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک و ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در محدوده‌های مطالعاتی مورد بررسی باشد.

تشکر

نگارندگان مقاله از آژانس فضایی اروپا به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های ماهواره اسموس و همچنین از آقای دکتر اسحاق مردای دانشیار پژوهشی مرکز تحقیقات فضایی ناسا گویدارد دانشگاه مریلند آمریکا به خاطر راهنمایی‌ها ارزنده و فراهم آوردن زمینه انجام این طرح در مرکز علوم زمین (ESSIC) دانشگاه مریلند کمال تشکر را دارند.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک محصول SMUDP2 ماهواره میکروویو اسموس با استفاده از داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در عمق ۵ سانتی‌متری سطح زمین، در پنج ایستگاه‌ها هواشناسی طی سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۳ انجام گردید. اعتبارسنجی داده‌های اسموس براساس الگوریتم تعریف شده در این مطالعه و با استفاده از مدل اعتبارسنجی توسعه داده شده صورت پذیرفت.

نتایج ارزیابی خطای اعتبارسنجی‌ها در ایستگاه‌های منتخب مشخص کرد که بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرارود و سرابله دارای مقداری کم‌برآوردی و در ایستگاه‌های داراب و اکباتان مقدار ناچیزی بیش برآوردی دارند.

در بین پنج ایستگاه مطالعاتی، براساس نتایج ارزیابی خطا و نمودار تیلور، بازیابی‌های رطوبت خاک اسموس در ایستگاه اهواز با بالاترین ضریب همبستگی ($R=0/88$)، $RMSD = 0/048 m^3 m^{-3}$ و $cRMSD = 0/021 m^3 m^{-3}$ بهترین تطابق را با اندازه‌گیری‌های زمینی داشته و نزدیک‌ترین دقت را به مقدار هدف اسموس ($RMSD = 0/04 m^3 m^{-3}$) دارند. پس از آن برآوردهای اسموس در ایستگاه داراب با ضریب همبستگی $R=0/82$ ، $RMSD=0/028 m^3 m^{-3}$ و $cRMSD=0/008 m^3 m^{-3}$ تطابق خوبی

منابع

- 1- Al-Yaari A., Wigneron, J.-P., Ducharne, A., Kerr, Y., De Rosnay, P., De Jeu, R., Govind, A., Al Bitar, A., Albergel, C., and Munoz-Sabater J. 2014. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture

- datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates, *Remote Sensing of Environment*, 149: 181-195.
- 2- Al Bitar A., Leroux, D., Kerr, Y. H., Merlin, O., Richaume, P., Sahoo, A., and Wood E. F. 2012. Evaluation of SMOS soil moisture products over continental US using the SCAN/SNOTEL network, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (5): 1572-1586.
 - 3- Bircher S., Skou N., Kerr Y.H., and Member S. 2013. Validation of SMOS L1C and L2 Products and Important Parameters of the Retrieval Algorithm in the Skjern River Catchment , Western Denmark, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51:2969-85.
 - 4- Coopersmith E.J., Cosh M.H., Petersen W.A., Prueger J., and Niemeier J.J. 2015. Soil Moisture Model Calibration and Validation: An ARS Watershed On the South Fork of the Iowa River, *Journal of Hydrometeorology*, 16, 1087-1101.
 - 5- Dall'Amico J.T. 2012. Multiscale analysis of soil moisture using satellite and aircraft microwave remote sensing, in situ measurements and numerical modelling , Dissertation, University of Munich, Department of Geography, Munich, Germany.
 - 6- Dall'Amico J.T., Schlenz F., Loew A., Mauser W. 2012. First Results of SMOS Soil Moisture Validation in the Upper Danube Catchment, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50:1507-16.
 - 7- Djamaï N., Magagi R., Goïta K., Hosseini M., Cosh M.H., Berg A., and Toth B. 2015. Evaluation of SMOS soil moisture products over the CanEx-SM10 area, *Journal of Hydrology*, 520:254-67.
 - 8- Djamaï N., Magagi R., Goïta K., Merlin O., Kerr Y., and Walker A. 2015. Disaggregation of SMOS soil moisture over the Canadian Prairies, *Remote Sensing of Environment*, 170:255-68.
 - 9- Famiglietti J.S., Ryu D., Berg A.A., Rodell M., and Jackson T.J. 2008. Field observations of soil moisture variability across scales, *Water Resources Research*, 44:1-16.
 - 10- Gherboudj I., Magagi R., Goïta K., Berg A.A., Toth B., and Walker A. 2012. Validation of SMOS Data Over Agricultural and Boreal Forest Areas in Canada, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5):1623-35.
 - 11- González-Zamora Á., Sánchez N., Martínez-Fernández J., Gumuzzio Á., Piles M., Olmedo E. 2015. Long-term SMOS soil moisture products: A comprehensive evaluation across scales and methods in the Duero Basin (Spain), *Physics and Chemistry of the Earth*, 83:123-36.
 - 12- Holl G. 2012. Collocations Toolkit in Atmlab (version 2-1-70).
 - 13- Jackson T.J., Bindlish R., Cosh M., and Zhao T. 2011. SMOS Soil Moisture validation with U.S. in situ networks, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*: 21-3.
 - 14- Jackson T.J., Bindlish R., Member S., Cosh M.H., Zhao T., Member S., et al. 2012. Validation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Soil Moisture Over Watershed Networks in the U.S., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5) :1530-43.
 - 15- Kerr Y.H., Waldteufel P., Richaume P., Wigneron J.P., Ferrazzoli P., Mahmoodi A., et al. 2012. The SMOS soil moisture retrieval algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5):1384-403.
 - 16- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F.O., Boutin J., et al. 2010. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle, *Proceedings of the IEEE*, 98(5):666-87.
 - 17- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Martinuzzi J.-M., Font J., and Berger M. 2001. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8):1729-35.
 - 18- Kornelsen K.C., and Coulibaly P. 2015. Reducing multiplicative bias of satellite soil moisture retrievals, *Remote Sensing of Environment*, 165:109-22.
 - 19- Leroux D.J., Kerr Y.H., Al Bitar A., Bindlish R., Jackson T.J., Berthelot B., et al. 2014. Comparison between SMOS, VUA, ASCAT, and ECMWF soil moisture products over four watersheds in U.S., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(3):1562-71.
 - 20- Leroux D.J., Kerr Y.H., Richaume P., and Fieuzal R. 2013. Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale, *Remote Sensing of Environment*, 133:240-50.
 - 21- Louvet S., Pellarin T., al Bitar A., Cappelaere B., Galle S., Grippa M., et al. 2015. SMOS soil moisture product evaluation over West-Africa from local to regional scale, *Remote Sensing of Environment*, 156:383-94.
 - 22- Mason P., Zillman J., Simmons A., Lindstrom E., Harrison D., Dolman H., et al. 2010. Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 Update), Geneva: GOOS-184, GTOS-76, WMO-TD/No. 1523, 2010.
 - 23- McNally A., Husak G.J., Brown M., Carroll M., Funk C., Yatheendradas S., Arsenault K., Peters-Lidard C., and Verdin, J.P. 2015. Calculating Crop Water Requirement Satisfaction in the West Africa Sahel with Remotely Sensed Soil Moisture., *Journal of Hydrometeorology*, 16:295-305.
 - 24- Pan M., Sahoo a.K., Wood E.F., Al Bitar A., Leroux D., and Kerr Y.H. 2012. An Initial Assessment of SMOS Derived Soil Moisture over the Continental United States, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(5):1448-57.

- 25-Sánchez N., Martínez-fernández J., Scaini A., and Pérez-gutiérrez C. 2012. Validation of the SMOS L2 Soil Moisture Data in the REMEDHUS Network (Spain), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5):1602-11.
- 26-Schalie R., Parinussa R.M., Renzullo L.J., van Dijk A.I.J.M., Su C.H., and de Jeu R.A.M. 2015. SMOS soilmoisture retrievals using the land parameter retrieval model: Evaluation over the Murrumbidgee Catchment, southeast Australia, *Remote Sensing of Environment*, 163:70-9.
- 27-Schalie R.v.d., Kerr Y.H., Wigneron J.P., Rodríguez-Fernández N.J., Al-Yaari A., and Jeu R.A.M.d. 2016. Global SMOS Soil Moisture Retrievals from The Land Parameter Retrieval Model, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45:125-34.
- 28-Schlenz F., Dall'Amico J.T., Loew A., and Mauser W. 2012. Uncertainty Assessment of the SMOS Validation in the Upper Danube Catchment., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (5):1517-29.
- 29-Su C.-H., Ryu D., Young R.I., Western A.W., and Wagner W. 2013. Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia, *Remote Sensing of Environment*, 134:1-11.
- 30- Taylor K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7):7183-92.
- 31-Wagner W., Brocca L., Naeimi V., Reichle R., Draper C., De Jeu R., et al. 2014. Clarifications on the "comparison between SMOS, VUA, ASCAT, and ECMWF Soil Moisture Products over Four Watersheds in U.S.", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(3):1901-6.
- 32-Zeng J., Li Z., Chen Q., Bi H. 2014. Method for Soil Moisture and Surface Temperature Estimation in the Tibetan Plateau Using Spaceborne Radiometer Observations, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(1):97-101.
- 33- Zeng J., Li Z., Chen Q., Bi H., Qiu J., and Zou P. 2015. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations, *Remote Sensing of Environment*, 163:91-110.
- 34-Zhao L., Yang K., Qin J., Chen Y., Tang W., Lu H., and Yang Z.L. 2014. The scale-dependence of SMOS soil moisture accuracy and its improvement through land data assimilation in the central Tibetan Plateau, *Remote Sensing of Environment*, 152:345-55.

Validation of Soil Moisture Retrievals from SMOS Microwave Satellite

M. Jamei¹-M. Mousavi Baygi^{2*}- A. Alizadeh³- P. Irannejad⁴

Received: 19-10-2016

Accepted: 22-05-2017

Introduction: Surface soil moisture is one of the most important variables in the hydrological cycle, and plays a key role in scientific and practical applications such as hydrological modelling, weather forecasting, climate change studies and water resources managements. Microwave radiometry at low frequencies (1.4GHz) is an established technique for estimating global surface soil moisture with a suitable accuracy. In recent years, soil moisture measurements have become increasingly available from satellite-based microwave sensors. The ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) satellite was launched in November 2009. It carries the first L-band 2-D synthetic aperture microwave radiometer to provide global estimates of soil moisture with an averaged ground resolution of 43 km over the field of view. The main objective of this research was to validate SMOS soil moisture retrievals over the west and south west of Iran.

Materials and Methods: The study area is located in the west and southwest of Iran which contains five areas belonging to the Ministry of Power. For the validation of SMOS data over the study area, the SMOS soil moisture retrievals from MIR_SMUDP2 products were compared with ground-based in situ measurements. The validation process was carried out using Collocation technique for the period 2012-2013. Collocation technique is a method used in the field of remote sensing to verify compliance measurements from two or more different instruments. In this study, the collocation codes were developed in Matlab Linux programming language. The ground-based in situ measurements included direct soil moisture measurements at the 5cm depth which were collected from five meteorological stations in the study area. We prepared a file for each station which contained daily soil moisture, date and time, geographical coordinates of meteorological stations as input for validation model. The SMOS Level 2 Soil Moisture User Data Product (MIR_SMUDP2 files) version 551, which were provided through the ESA, contains the retrieved soil moisture and simulated TB, dielectric constants, etc. In this work, the ESA's SMOS Matlab tool on RedHat Linux was used to read and derive soil moisture data from MIR_SMUDP2 files. Four statistical metrics and Taylor diagram were used for the evaluation error of validation; the Root Mean Squared Difference (RMSD), the centered Root Mean Square Difference (cRMSD), the Mean Bias Error or bias and the correlation coefficient (R).

The Taylor diagrams were used to represent three different statistical metrics (R, centered Root Mean Square Difference (cRMSD) and standard deviation) on two dimensional plots to graphically describe how closely SMOS dataset matched ground-based observations.

Results and Discussion: Based on the research algorithm and using MATLAB, the Validation model for SMOS soil moisture data was obtained. This model was applied for five meteorological stations and the collocated soil moisture data from SMOS data and in situ data was saved as output of model to error evaluation. The results of validation error showed a good correlation between the SMOS soil moisture and in situ measurements. The highest and lowest correlation coefficients were shown at Ahvaz ($R=0.88$) and Sarableh ($R=0.75$) stations, respectively. According to the bias values, the SMOS soil moisture retrievals had underestimation at Ahvaz ($MBE=0.04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), Sararod ($MBE=0.011 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), Sarableh ($MBE=0.048 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) stations, whereas a slight overestimation of the SMOS product was detected at the Darab ($MBE=-0.01 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) and Ekbatan ($MBE=-0.031 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) stations. In addition, the Root Mean Squared Difference (RMSD) values between the SMOS data and in situ data varied from 0.02 to $0.062 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ and at Ahvaz station with $RMSD=0.048 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ is close to the targeted SMOS accuracy of $0.04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Based on the Taylor diagrams, SMOS data had the highest correlation ($R=0.88$) with in situ measurements at Ahvaz station and the lowest difference ($cRMSD=0.008 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) between two data sets was found at Darab station.

Conclusions: The objective of this paper was to validate ESA's SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) satellite products in the west and southwest of Iran for the period of 2012-2013. The validation of SMOS soil moisture retrievals from MIR_SMUDP2 products was done by using soil moisture measurements from five meteorological stations. The SMOS soil moisture retrievals showed underestimations at Ahvaz, Sararod

1, 2 and 3- PhD Student of Agrometeorology, Professor of Meteorology and Professor of Water Science and Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: mousavib@um.ac.ir)

4- Associate Professor, Space Physics Department, University of Tehran

and Sarableh stations, whereas a slight overestimation were found at Darab, Ekbatan stations. The validation results and Taylor diagrams showed that the SMOS soil moisture retrievals with $R=0.88$, $RMSD=0.048 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, $cRMSD=0.021 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ at Ahvaz station was very close to the targeted SMOS accuracy objective of $0.04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ and then at Darab station SMOS data with $R=0.82$, $RMSD=0.028 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, $cRMSD=0.008 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ indicated a good agreement with ground soil moisture measurements. Overall, the SMOS soil moisture data had an acceptable accuracy and agreement with in situ data at all stations. Therefore, we can use these data sets as a tool to derive soil moisture maps at study areas.

Keywords: L- Band, Microwave Radiometry, MIR_SMUDP2 Product, Remote Sensing, Soil Moisture Map