



"مقاله پژوهشی"

تولید نقشه‌های رطوبت خاک ایران از محصولات BEC Global Level 3 ماهواره اسموس

ابراهیم اسعدی اسکویی^۱ و مؤده جامعی^۲

۱- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو
۲- دکتری هواشناسی کشاورزی، سازمان آب و برق خوزستان، (نویسنده مسوول: mozhdeh.jamei@gmail.com)
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۹ صفحه: ۶۵ تا ۷۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: رطوبت خاک سطحی یکی از مؤلفه‌های اساسی سامانه اقلیمی زمین و چرخه هیدرولوژیکی است که نقش مهمی در کاربری‌های علمی و عملی مختلف نظیر پیش‌بینی عددی هواشناسی، پایش وقایع فرین، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مطالعات تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب دارد. سنجش از دور مایکروویو قابلیت منحصر به فردی برای برآورد جهانی رطوبت خاک در سطوح گسترده دارد، در این خصوص ماهواره اسموس آژانس فضایی اروپا اولین مأموریت اختصاصی برای پایش جهانی رطوبت خاک است که از سال ۲۰۰۹ فعالیت دارد. هدف این تحقیق استخراج داده‌های رطوبت خاک از محصولات ماهواره اسموس (BEC_L3_SM_SMOS) و تولید نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ایران و نیز ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی این داده‌ها (دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹) برای کشور است.

مواد و روش‌ها: در راستای هدف تحقیق، یک مدل با استفاده از قابلیت‌های Model Builder نرم‌افزار Map Arc به منظور خواندن و استخراج باند رطوبت خاک از محصولات BEC_L3_SM_SMOS ماهواره اسموس و تولید نقشه‌های میانگین رطوبت خاک برای ایران توسعه داده شد. به منظور بررسی منابع تداخل فرکانس رادیویی (RFI) محصولات اسموس، نقشه‌های احتمال رخداد RFI اسموس در ایران در دوره آماری مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که داده‌های مدار صعودی اسموس در ایران کمترین درصد RFI را دارند. براین اساس از محصولات (ASC) BEC_L3_SM_SMOS برای تولید نقشه‌های رطوبت خاک کشور استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج حاصل از اجرای مدل توسعه داده شده در تحقیق، دستیابی به نقشه‌های میانگین ماهانه، فصلی و سالانه رطوبت خاک از محصولات ماهواره‌ای اسموس طی ۱۰ سال برای ایران است. ارزیابی تغییرات زمانی نقشه‌های میانگین ماهانه رطوبت خاک اسموس بیانگر آن است که بالاترین مقدار بیشینه ماهانه رطوبت خاک ($0/854 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) در ماه می رخ داده است. همچنین بیشترین میانگین ماهانه رطوبت خاک مربوط به ماه‌های فوریه ($0/37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)، مارس ($0/086 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) و آوریل ($0/086 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) بوده و کمترین میانگین ماهانه رطوبت خاک در ماه‌های اوت ($0/034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) و سپتامبر ($0/037 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) رخ می‌دهد. ارزیابی نقشه میانگین سالانه (۱۰ سال) رطوبت خاک کشور، حاصل از داده‌های ماهواره اسموس، نشان داد که رطوبت خاک بین مقادیر کمینه $0/02$ و بیشینه $0/78 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ در سطح کشور متغیر بوده و متوسط میانگین ۱۰ ساله رطوبت سطحی خاک برای کل ایران بر اساس داده‌های ماهواره اسموس برابر $0/063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ است.

نتیجه‌گیری: با توجه به کمبود داده‌های رطوبت خاک در ایران و توانایی ماهواره اسموس در تولید داده‌های رطوبت خاک با کیفیت مطلوب، می‌توان از محصولات این ماهواره برای کاربردهای مختلف در ایران استفاده نمود. از نقشه‌های میانگین رطوبت خاک ماهانه، فصلی و سالانه حاصل از این تحقیق می‌توان در مطالعات منطقه‌ای مدل‌های هیدرولوژی، بهبود و افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی، مدیریت منابع آب، مطالعات تغییر اقلیم، برنامه‌ریزی آبیاری در کشاورزی و هوشمندسازی آبیاری دارند.

واژه‌های کلیدی: رادیومتری باند-L، رطوبت خاک ماهواره‌ای، ماهواره اسموس، مایکروویو غیرفعال، نقشه رطوبت خاک

مقدمه

یافته و احتمال وقوع سیلاب را بالا می‌رود (۸). لذا وضعیت رطوبت سطحی خاک برای تقسیم‌بندی بارش به نفوذ و رواناب اهمیت بسزایی دارد (۱۳). نظر به نقش مهم رطوبت خاک در انجام کاربری‌های علمی و عملی مختلف، در دسترس بودن داده‌های رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف منطقه‌ای و جهانی از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۸). اندازه‌گیری رطوبت خاک معمولاً در مقیاس نقطه‌ای انجام می‌شود که این روش اندازه‌گیری بیانگر وضعیت رطوبت در بخش محدودی از خاک است. اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای متعدد در بخش‌های مختلف یک منطقه می‌تواند مقدار متوسط رطوبت خاک را برای آن منطقه تعیین نماید (۱۴). اما در شرایطی که اندازه‌گیری‌های زیاد و در مقیاس‌های وسیع مورد نیاز باشد، چنین روش‌هایی دشوار و بسیار پرهزینه بوده و استفاده از آن‌ها برای دوره‌های طولانی‌مدت عملی نیست. استفاده از مدل‌های برآورد رطوبت خاک نیز از دیگر روش‌های تخمین رطوبت خاک است، در این خصوص الگوریتم محاسبه کننده رطوبت خاک (SMA) برای بررسی تعیین اثرات رطوبت خاک در ایجاد رواناب در حوضه آبریز زارم رود استان مازندران استفاده شده است (۱۱).

رطوبت خاک یکی از مؤلفه‌های اساسی سامانه اقلیمی زمین و چرخه هیدرولوژیکی است که در سال ۲۰۱۰ رطوبت خاک به‌عنوان یک متغیر ضروری اقلیمی (ECV)^۱ توسط سازمان جهانی هواشناسی (WMO)^۲، سامانه اقلیمی مشاهدات جهانی و کمیته ماهواره‌های مشاهداتی معرفی شد (۲۲). اطلاعات رطوبت خاک در مقیاس محلی برای کاربردهای کشاورزی، در مقیاس منطقه‌ای برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب (۲۰) و در مقیاس جهانی برای مدل‌سازی جهانی جو و پیش‌بینی‌های عددی هواشناسی (۳۵)، پایش وقایع فرین مانند: سیلاب، خشکسالی و جنگل‌سوزی‌ها (۲۳،۲۴،۲۹)، مطالعات تغییر اقلیم (۲۶) نقش مهمی دارند. رطوبت خاک از نظر زمانی و مکانی بسیار تغییرپذیر است، به طوری که توزیع مکانی رطوبت خاک به مؤلفه‌های بزرگ مقیاس مانند الگوهای بارش و تبخیر، و به مؤلفه‌های کوچک مقیاس مانند پوشش گیاهی، بافت خاک و توپوگرافی وابسته است. تغییرات رطوبت خاک بر رواناب تأثیرگذار بوده به طوری که کمبود رطوبت خاک در هنگام بارش سبب نفوذپذیری زیاد و کاهش رواناب می‌شود. اما در شرایط بالا بودن رطوبت خاک، رواناب افزایش

راديو متر باند-L (۱/۴ گیگاهرتز) برای پایش جهانی رطوبت خاک است. البته بخش راداری ماهواره اسمپ حدود شش ماه پس از پرتاب ماهواره غیرفعال شد و هم‌اکنون اسمپ با راديو متر باند-L در حال فعالیت است (۲۷).

از زمان پرتاب ماهواره اسموس تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص اعتبارسنجی محصولات رطوبت خاک اسموس جهت بررسی کیفیت داده‌ها و وجود خطاهای احتمالی در آن‌ها در مناطق مختلف دنیا انجام شده است. مانند مطالعه ژانگ و همکاران در چین (۳۶)؛ آل حج و همکاران در فرانسه (۱۲)؛ کویی و همکاران (۷) و والکر و همکاران (۳۲) در آمریکا؛ آنام و همکاران در پاکستان (۵)، چامپنگ و همکاران (۶) و دجامی و همکاران در کانادا (۹)؛ سانچز و همکاران در اسپانیا (۲۸) که در مقیاس منطقه‌ای انجام شده‌اند. در مقیاس جهانی کر و همکاران (۱۶)، آل یاری و همکاران (۱،۲)، لروکس و همکاران (۲۱)، البرگل و همکاران (۴)، آل بیتر و همکاران (۳) و یگنرون و همکاران (۳۳) ارزیابی داده‌های ماهواره اسموس را انجام دادند. در مجموع نتایج این مطالعات مشخص کرد که محصولات رطوبت خاک ماهواره اسموس در مقایسه با دیگر ماهواره‌ها و سنجنده‌های فعال و غیرفعال از توانایی بالایی در بازیابی جهانی و منطقه‌ای رطوبت سطحی خاک برخوردار می‌باشند. بررسی سوابق مطالعاتی در زمینه اعتبارسنجی داده‌های ماهواره اسموس مشخص کرد که برای ارزیابی کیفیت داده‌های اسموس می‌توان از روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های زمینی مانند داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک و شبکه‌های پایش رطوبت خاک، روش‌های مبتنی بر برآوردهای رطوبت خاک دیگر ماهواره‌ها و نیز داده‌های مدل‌سازی شده استفاده کرد. همچنین بررسی سوابق تحقیقاتی مذکور نشان داد که بیشتر مطالعات انجام‌شده بر روی داده‌های اسموس، محدود به قاره‌های اروپا و آمریکا بوده و مطالعات کمتری در قاره آسیا انجام گردیده است.

در تحقیقی جامعی و همکاران، اعتبارسنجی محصولات دمای درخشندگی (SMOS Level 1C) و رطوبت خاک ماهواره اسموس (SMOS Level 2 SM) را در ایران انجام دادند (۱۵). در الگوریتم بازیابی رطوبت خاک اسموس، پردازش دماهای درخشندگی چند زاویه‌ای (Level 1C) به داده‌های رطوبت خاک (SMOS Level 2) صورت می‌پذیرد. اساس این الگوریتم بر مبنای مقایسه مشاهدات دماهای درخشندگی اسموس با داده‌های دمای درخشندگی شبیه‌سازی‌شده با مدل انتقال تابشی L-MEB است (۱۷). بر این اساس جامعی و همکاران اعتبارسنجی محصولات دمای درخشندگی ماهواره اسموس از طریق مقایسه با داده‌های دماهای درخشندگی شبیه‌سازی‌شده با مدل انتقال تابشی L-MEB در ایستگاه‌های هواشناسی کشور انجام داد. مدل L-MEB با استفاده از داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها، دمای درخشندگی را برآورد می‌نماید. نتایج ارزیابی دماهای درخشندگی اسموس در ایستگاه‌های مطالعاتی نشان داد که داده‌های اسموس همبستگی مطلوبی با داده‌های دمای درخشندگی شبیه‌سازی شده داشته و از دقت قابل قبولی

در برخی از کشورهای جهان شبکه‌های سراسری اندازه‌گیری زمینی رطوبت خاک وجود دارد که با تعداد ایستگاه‌های متفاوت به‌صورت خودکار داده‌های رطوبت خاک را ثبت می‌کنند. این شبکه‌ها به‌منظور اندازه‌گیری منظم و پیوسته رطوبت خاک طراحی شده‌اند. طی سال‌ها محققین متعددی تلاش کردند تا تمامی داده‌های موجود رطوبت خاک کشورهای مختلف را در یک پایگاه داده جهانی جمع‌آوری کنند. در نهایت نتیجه این تلاش‌ها منجر به تشکیل شبکه بین‌المللی رطوبت خاک (ISMN) در سال ۲۰۱۱ شد. شبکه ISMN در واقع یک پایگاه داده جهانی رطوبت خاک (اندازه‌گیری زمینی) است که ابزاری مهم برای کاربردهایی مانند: اعتبارسنجی و بهبود محصولات ماهواره‌ای جهانی؛ مدل‌های سطح زمین، مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی محسوب می‌شود (۱۰). بیشتر ایستگاه‌های این شبکه جهانی در نیمکره شمالی واقع بوده و فقط در برخی از کشورهای جهان، این شبکه دارای ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک است. لذا داده‌های این شبکه برای مطالعه رطوبت خاک در مقیاس جهانی کافی نمی‌باشند (۳۴). لازم به توضیح است که ایران نیز در شبکه بین‌المللی رطوبت خاک قرار نداشته و فاقد ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک در این شبکه است.

اخیراً سنجش‌ازدور در برآورد منطقه‌ای و جهانی رطوبت خاک ماهواره‌ای جهت کاربردهای هیدرولوژیکی، هواشناسی و اقلیمی پیشرفت‌های قابل‌توجهی داشته است (۳۱). در این خصوص سنجش‌ازدور مایکروویو قابلیت منحصر به فردی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در سطوح وسیع دارد (۳۰) زیرا دماهای درخشندگی^۲ در محدوده مایکروویو پایینی طیف الکترومغناطیسی حساسیت بالایی به رطوبت خاک دارند. در این زمینه راديو متری مایکروویو در فرکانس‌های پائین (باند-L) فنی است که برای برآورد جهانی رطوبت سطحی خاک با دقت مناسب توسعه یافته است (۱۹).

در محدوده مایکروویو طیف الکترومغناطیسی، تابش گرمایی گسیل‌شده از سطح زمین یا از سطح یک جسم که توسط راديو متر اندازه‌گیری می‌شود، دمای درخشندگی است. دمای درخشندگی گسیل‌شده از سطح زمین (TBp) با دمای فیزیکی (T) و گسیلندگی (ep) آن تعیین می‌شود (رابطه ۱) (۱۸):

$$TBp = ep \cdot T \quad (1)$$

که در این رابطه اندیس P بیانگر قطبش قائم و یا افقی است. با توجه به دلایل مذکور، مأموریت‌های اختصاصی اسموس^۳ و اسمپ^۴ بر اساس راديو مترهای مایکروویو باند-L بر روی سکوها ماهواره‌ای باهدف برآورد کمی رطوبت خاک در مقیاس جهانی طراحی شده‌اند. این ماهواره‌ها هم‌اکنون در حال بهره‌برداری بوده و داده‌های رطوبت خاک آن‌ها در دسترس می‌باشند.

اسموس نخستین مأموریت ماهواره‌ای آژانس فضایی اروپا است که حامل اولین راديو متر مایکروویو در باند-L (۱/۴ گیگاهرتز) است. اسموس در سال ۲۰۰۹ باهدف ارائه داده‌های جهانی رطوبت خاک و شوری آب اقیانوس‌ها با موفقیت آغاز شد (۱۶). مأموریت ماهواره اسمپ ناسا نیز در سال ۲۰۱۵ آغاز شد و این ماهواره حامل یک رادار باند-L (۱/۲۶ گیگاهرتز) و

1- International Soil Moisture Network
3- Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)

2- Brightness temperature
4- Soil Moisture Active Passive (SMAP)

می‌نمایند. مأموریت اسموس با همکاری مرکز ملی مطالعات فضایی (CNES)^۴ در فرانسه و مرکز توسعه صنعت و فناوری (CDTI)^۵ در اسپانیا رهبری می‌شود (۱۸،۱۹). مجموعه داده‌های اسموس در سطوح مختلف (Level 0 تا Level 4) و با توجه به سطوح متفاوت پردازندها توسط آژانس فضایی اروپا و مراکز ملی پردازش داده‌های اسموس در فرانسه و اسپانیا تولید و توزیع می‌شوند. محصولات Level 0 تا سطح Level 2 فقط از سوی آژانس فضایی اروپا تولید و در اختیار کاربران مختلف قرار می‌گیرند. محصولات Level 3 و Level 4 توسط مراکز ملی پردازش داده‌های اسموس در فرانسه و اسپانیا تولید و توزیع می‌شوند.

مرکز تخصصی بارسلونا (BEC)^۶ یکی از مراکز تحقیقاتی آژانس فضایی اروپا است که محصولات جهانی رطوبت سطحی خاک (SMOS BEC L3 SM) را از Global Level 3 soil moisture SMOS SM باهدف بهبود کیفیت داده‌ها تولید می‌کند. محصولات SMOS BEC L3 SM با سیستم شبکه‌بندی EASE-2^۷ و تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتری در دوره‌های زمانی مختلف: روزانه، ۳ روزه، ۹ روزه، ماهانه و سالانه در مدارهای صعودی^۸ (حرکت ماهواره از جنوب به شمال و عبور از خط استوا در ساعت ۰۶:۰۰ صبح به وقت محلی) و نزولی^۹ (حرکت ماهواره از شمال به جنوب و عبور از خط استوا در ساعت ۰۶:۰۰ عصر به وقت محلی) (۱۸) به‌طور جداگانه و با فرمت netcdf تهیه می‌شوند. محصولات SMOS BEC L3 SM دارای پارامترهای ژئوفیزیکی مختلفی مانند: داده رطوبت سطحی خاک، ضخامت نوری و ثابت دی‌الکتریک دمای درخشندگی در آن‌ها وجود دارد.

الگوریتم تولید نقشه‌های رطوبت خاک از محصولات اسموس

در این مطالعه به‌منظور تهیه نقشه‌های میانگین‌های ماهانه و سالانه رطوبت خاک ایران، الگوریتمی جهت استخراج داده‌های رطوبت خاک از محصولات SMOS BEC L3 SM اسموس تعریف شد (شکل ۱). این الگوریتم با استفاده از قابلیت Model Builder در محیط نرم‌افزاری ArcMap به‌صورت یک مدل توسعه داده شد. به کمک این مدل خواندن محصولات اسموس، استخراج داده (باند) رطوبت خاک از محصولات SMOS BEC L3 SM، برش لایه‌های ایران از داده‌های جهانی رطوبت خاک، تهیه لایه رستری رطوبت خاک کشور و محاسبه میانگین‌های ماهانه، فصلی و سالانه صورت پذیرفت. خروجی حاصل از اجرای این مدل برای داده‌های ۱۰ سال رطوبت خاک ماهواره اسموس (سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹)، تولید نقشه‌های میانگین ۱۰ ساله رطوبت خاک ماهانه، فصلی و سالانه است. همچنین در ادامه رژیم تغییرات درازمدت ماهانه رطوبت خاک حداقل، حداکثر و میانگین از روی نقشه‌های استخراج شده بدست آمد و تحلیل گردید.

برخوردار هستند. اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک ماهواره اسموس در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی صورت پذیرفت. نتایج اعتبارسنجی‌ها بیانگر همبستگی بالای دو سری داده و دقت و کیفیت مطلوب داده‌های رطوبت خاک ماهواره اسموس در مقایسه با داده‌های زمینی بود (۱۵). بر مبنای یافته‌های این پژوهش داده‌های رطوبت خاک اسموس می‌توانند ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک باشند. بر این اساس هدف مقاله حاضر تولید نقشه‌های توزیع مکانی و زمانی رطوبت خاک از محصولات رطوبت خاک اسموس برای کل کشور و تفسیر تغییرات مکانی و زمانی آن است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی این پژوهش دربرگیرنده کل ایران است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد متناسفانه در ایران شبکه سراسری پایش رطوبت خاک وجود نداشته و اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک محدود به مراکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی (ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی) سازمان هواشناسی کشور است. سازمان هواشناسی کشور در مجموع دارای ۴۵ ایستگاه هواشناسی کشاورزی در کل کشور است که در بیشتر آن‌ها داده‌های رطوبت خاک برای دوره‌های طولانی‌مدت و به صورت کامل وجود نداشته و ثبت داده‌های منظم فقط محدود به دوره‌های کوتاه‌مدت است. پراکندگی این ایستگاه‌ها در کشور نامنظم بوده و برخی از استان‌ها فاقد ایستگاه می‌باشند. با توجه به عدم وجود داده‌های کامل و طولانی‌مدت در این ایستگاه‌ها، همواره مشکل عدم دسترسی به نقشه‌های رطوبت خاک و عدم آگاهی از تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک منطقه‌ای وجود دارد. در این راستا داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای با دقتی که دارند می‌توانند این مشکلات را در کشور مرتفع نمایند (۱۵).

ماهواره اسموس و محصولات آن

مأموریت اسموس آژانس فضایی اروپا، اولین ماهواره مایکروویو غیرفعال است که به‌طور اختصاصی برای پایش دو متغیر ژئوفیزیکی رطوبت خاک و شوری اقیانوس‌ها در مقیاس جهانی فعالیت خود را از سال ۲۰۰۹ آغاز کرده است. جنبه منحصربه‌فرد اسموس آن است که ماهواره حامل یک رادیومتر تصویربرداری مایکروویو با روزه ترکیبی (MIRAS) دوبعدی است که بر روی سکوی فضاپیما نصب گردیده است. این رادیومتر دریافت‌کننده تابش‌های گسیل‌شده از سطح زمین (دماهای درخشندگی) در باند L- (فرکانس ۱/۴ گیگاهرتز) در دو قطبش (افقی و عمود) به‌صورت چند زاویه‌ای (در زوایای بین صفر تا ۵۵ درجه) است. اسموس دارای فرکانس تکرار حدود ۳ روز بوده و دو زمان گذر، از قطب جنوب به قطب شمال (بالا گذر یا صعودی)^۱ و از قطب شمال به قطب جنوب (پایین گذر یا نزولی)^۲ است. دماهای درخشندگی چند زاویه‌ای مشاهده‌شده با استفاده از الگوریتم‌های اسموس، محصولات رطوبت خاک را با دقت $0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ در ۵ سانتی‌متری سطح خاک و گام زمانی کمتر از ۳ روز در سطح جهان برآورد

1- Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis

4- Centre National d'Etudes Spatiales

6- Barcelona Expert Center

8- Ascending

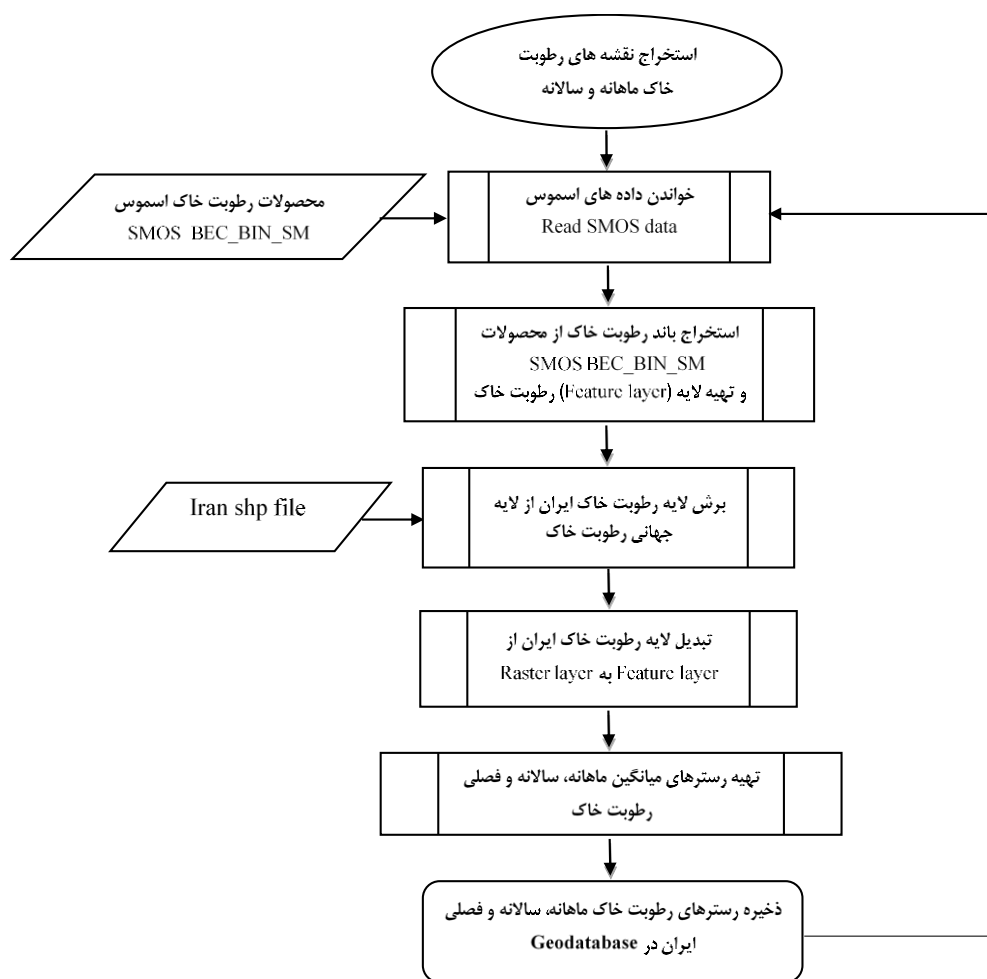
2- Ascending

3- Descending

5- Center for Technological and Industrial Development

7- Equal-Area Scalable Earth Grid

9- Descending



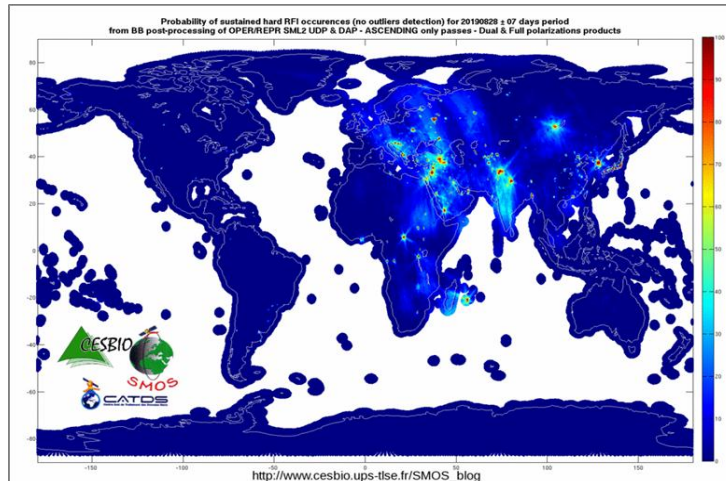
شکل ۱- الگوریتم تولید نقشه‌های رطوبت خاک از محصولات اسموس
Figure 1. Algorithm for producing soil moisture maps from SMOS products

مختلف نقشه‌های احتمال رخداد RFI در مناطق مختلف دنیا را در تارنمای آژانس فضایی اروپا ارائه می‌دهد. در این مطالعه کل نقشه‌های RFI دوره مطالعاتی (۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹) از تارنمای آژانس فضایی اروپا اخذ و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتیجه ارزیابی این نقشه‌ها مشخص کرد که در این دوره مطالعاتی داده‌های مدار صعودی در ایران کمترین درصد RFI را دارند. لذا در تحقیق حاضر از محصولات ماهانه و سالانه (ASC) SMOS BEC L3 SM برای تولید نقشه‌های رطوبت خاک در کشور با استفاده از الگوریتم توسعه داده‌شده، استفاده گردید. در شکل ۲ برای مثال دو نمونه‌هایی از نقشه‌های RFI اسموس برای یک روز از سال ۲۰۱۹ آورده شده است. بررسی این نقشه‌ها بیانگر آن است که در نقشه (الف) که مدار صعودی است درصد RFI در ایران کمتر از گذر نزولی ماهواره اسموس است.

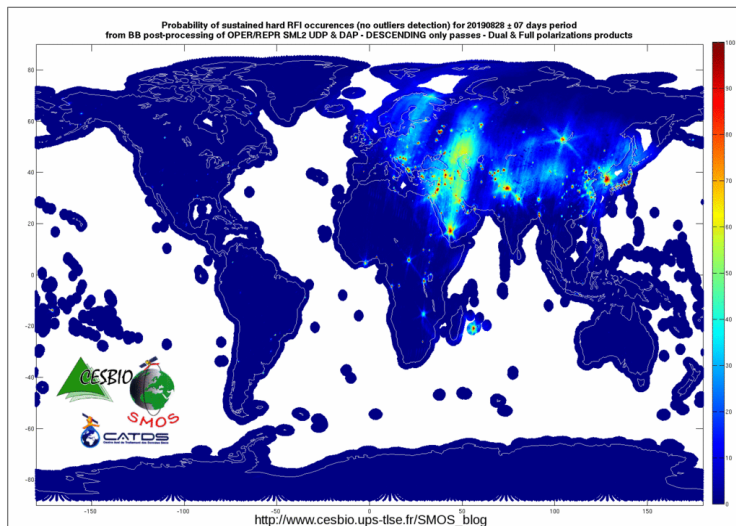
نتایج و بحث

انتخاب بهترین مدار محصولات SMOS BEC L3 SM در ایران

با توجه به اینکه منابع تداخل فرکانس رادیویی (Radio Frequency Interference-RFI) زیادی در سراسر جهان وجود دارد، این منابع RFI می‌توانند در برخی مناطق دنیا سبب بروز خطا در مشاهدات ماهواره اسموس شوند. در این راستا تلاش‌هایی زیادی برای شناسایی، بومی‌سازی، کاهش و پایش اثرات خطا بر روی داده‌های اسموس در حال انجام است (۲۵). از آنجایی‌که محصولات اسموس Level 3 در دو مدار صعودی و نزولی تهیه می‌شوند، انتخاب بهترین مدار در هر نقطه از دنیا بر اساس کمترین درصد RFI در منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود. مأموریت اسموس در بازه‌های زمانی



(الف) مدار صعودی
(A) Ascending Orbit



شکل ۲- نقشه‌های احتمال رخداد RFI در محصولات اسموس برای دوره ۲۸ اوت ۲۰۱۹
Figure 2. RFI occurrence probability maps of SMOS products for 2019 08 28 ± 7 days period

که میانگین ۱۰ ساله رطوبت سطحی خاک در کشور از سردترین تا گرم‌ترین ماه‌های سال، بین صفر تا $m^3 m^{-3}$ $0/۸۵۴$ متغیر است. تغییرات زمانی رطوبت خاک بیانگر آن است که بالاترین بیشینه ماهانه رطوبت خاک در ماه می ($0/۸۵۴ m^3 m^{-3}$) رخ داده است. در ماه می، بیشترین بیشینه رطوبت خاک مربوط به استان خوزستان و پس از آن به ترتیب استان‌های گیلان، بوشهر، سمنان، مازندران و گلستان است و پایین‌ترین بیشینه رطوبت خاک مربوط به استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان است.

بررسی مقادیر میانگین ماهانه رطوبت خاک ماهواره اسموس (جدول ۱) مشخص کرد که بالاترین میانگین ماهانه رطوبت خاک در کشور مربوط به ماه‌های فوریه ($m^3 m^{-3}$ $0/۰۸۷$)، مارس ($m^3 m^{-3}$ $0/۰۸۶$) و آوریل ($m^3 m^{-3}$ $0/۰۸۶$)، است. تغییرات مکانی رطوبت خاک (شکل ۳) در ماه فوریه بیانگر آن است که استان‌های خوزستان، بوشهر، گلستان و گیلان بیشترین میانگین ماهانه رطوبت خاک را در این ماه

نتایج خروجی اجرای مدل تولید نقشه‌های رطوبت خاک نتایج خروجی مدل تولید نقشه‌های رطوبت خاک اسموس، تولید نقشه‌های میانگین ۱۰ ساله ماهانه، فصلی و نقشه میانگین سالانه رطوبت خاک برای کشور است. در شکل‌های ۳، ۵ و ۶ نقشه‌های رطوبت خاک تولید شده ارائه و در ادامه به تحلیل و بررسی آن‌ها پرداخته شده است. در جدول ۱ مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین ماهانه، فصلی و سالانه رطوبت خاک استخراج شده از داده‌های ماهواره اسموس آورده شده است. لازم به توضیح است که الگوریتم رطوبت خاک ماهواره اسموس به نحوی است که داده‌های رطوبت خاک را برای سطوح خشکی‌ها بازیابی می‌نماید. بنابراین برای پهنه‌های آبی کشور مانند دریاچه ارومیه و دریاچه نمک برآورد رطوبت خاک انجام نشده است.

در شکل ۳ نقشه‌های میانگین ماهانه ۱۰ ساله و در شکل‌های ۵ و ۶ نقشه‌های میانگین فصلی و میانگین ۱۰ ساله برای ایران ارائه شده‌اند. ارزیابی نقشه‌های میانگین ماهانه رطوبت خاک اسموس (شکل ۳)، جدول ۱ و شکل ۴ نشان می‌دهند

رطوبت خاک $0.083 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و پس از فصل بهار با میانگین رطوبت خاک $0.081 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ مرطوب‌ترین فصول سال در ایران هستند. میانگین رطوبت خاک فصل پاییز $0.040 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و کمینه میانگین رطوبت خاک $(0.040 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$ مربوط به فصل تابستان است.

ارزیابی نقشه میانگین ۱۰ ساله کشور (شکل ۶) نشان می‌دهد که مقدار رطوبت خاک در سطح کشور بین مقدار کمینه 0.002 و مقدار بیشینه $0.078 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ متغیر است و متوسط میانگین ۱۰ ساله رطوبت سطحی خاک در ایران بر اساس داده‌های ماهواره اسмос برابر $0.063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ است.

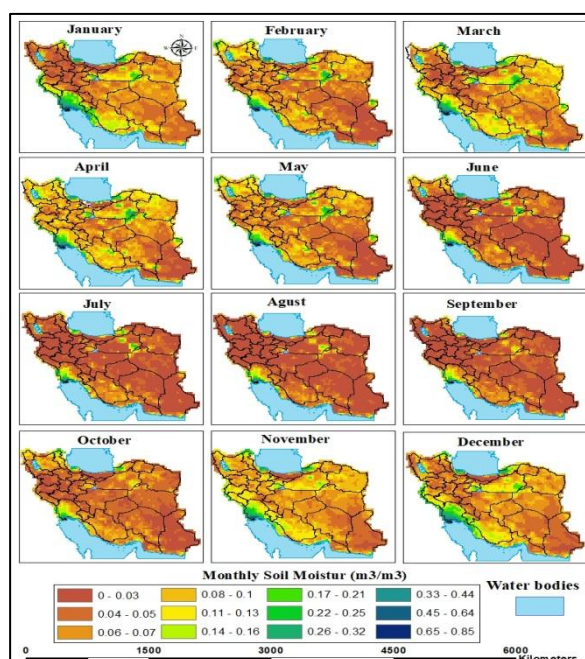
دارند و استان‌های همدان، قزوین و زنجان در این ماه خشک‌ترین مناطق از نظر رطوبت خاک هستند.

همچنین بررسی تغییرات زمانی مقادیر میانگین ماهانه رطوبت خاک اسмос براساس جدول ۱ و شکل ۴ نشان می‌دهد که کمترین میانگین ماهانه رطوبت خاک کشور در ماه‌های اوت $(0.034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$ و سپتامبر $(0.037 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$ رخ داده است. بررسی تغییرات مکانی رطوبت خاک در ماه‌های اوت و سپتامبر مشخص کرد که استان‌های کردستان، همدان و کرمانشاه کمترین مقادیر میانگین ماهانه رطوبت خاک را کشور دارند.

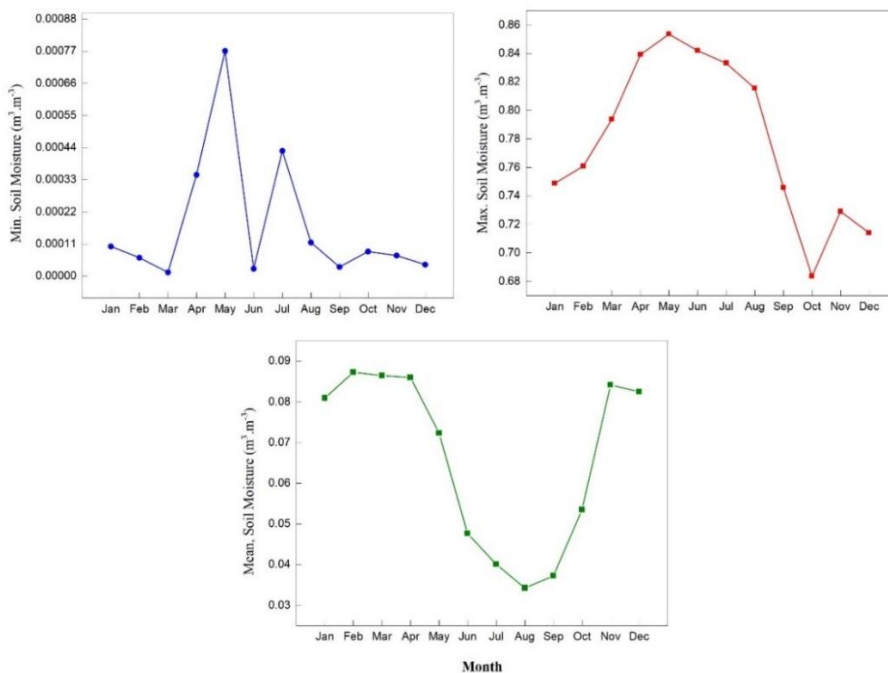
بررسی نقشه‌های میانگین فصلی رطوبت خاک اسмос (شکل ۵) بیانگر آن است که فصل زمستان با بیشینه میانگین

جدول ۱- مقادیر میانگین ماهانه، فصلی و سالانه رطوبت خاک $(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$ تولیدشده از محصولات ماهواره اسмос (دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۱۰)
Table 1. Monthly, seasonal and mean annual of soil moisture $(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$ values obtained from SMOS satellite products (Period 2010-2019)

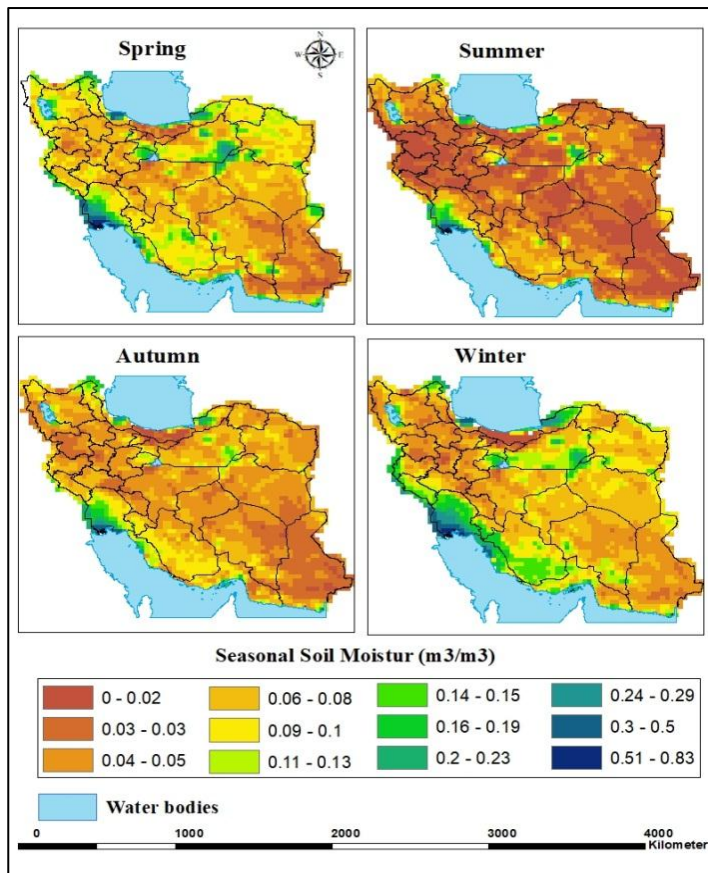
| ماه/فصل | کمینه | بیشینه | میانگین | انحراف معیار |
|---------|-------|--------|---------|--------------|
| ژانویه | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۴۹ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۶۲ |
| فوریه | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۶۱ | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۶۳ |
| مارس | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۹۴ | ۰/۰۸۶ | ۰/۰۶۳ |
| آوریل | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۳۹ | ۰/۰۸۶ | ۰/۰۶۳ |
| می | ۰/۰۰۱ | ۰/۸۵۴ | ۰/۰۷۲ | ۰/۰۷۲ |
| ژوئن | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۴۲ | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۵۴ |
| ژوئیه | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۳۳ | ۰/۰۴۰ | ۰/۰۴۹ |
| اوت | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۱۵ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۴۵ |
| سپتامبر | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۴۶ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۴۱ |
| اکتبر | ۰/۰۰۰ | ۰/۶۸۴ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۴۰ |
| نوامبر | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۲۹ | ۰/۰۸۴ | ۰/۰۵۰ |
| دسامبر | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۱۴ | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۶۱ |
| بهار | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۲۹ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۶۰ |
| تابستان | ۰/۰۰۱ | ۰/۸۳۰ | ۰/۰۴۱ | ۰/۰۴۸ |
| پائیز | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۲۰ | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۴۲ |
| زمستان | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۴۱ | ۰/۰۸۴ | ۰/۰۶۱ |
| سالانه | ۰/۰۰۲ | ۰/۷۸۰ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۵۱ |



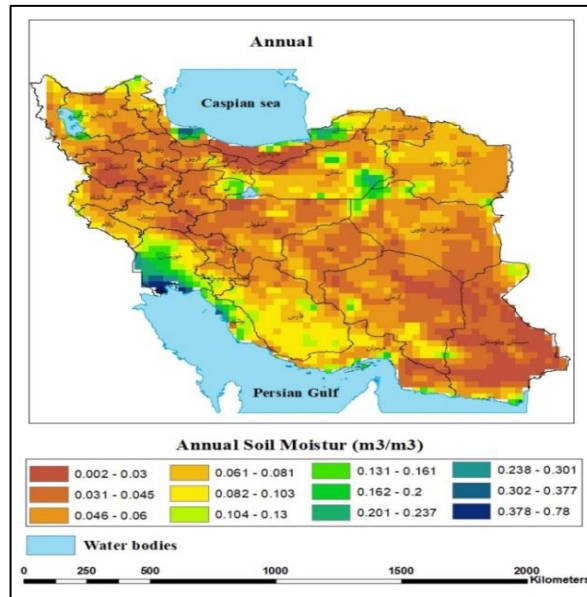
شکل ۳- نقشه‌های میانگین ماهانه رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره اسмос (دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۱۰)
Figure 3. Soil moisture monthly average maps produced from SMOS products (Period 2010-2019)



شکل ۴- تغییرات کمینه، بیشینه و میانگین ماهانه رطوبت خاک در ایران بر اساس داده‌های رطوبت خاک اسموس (دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۱۹)
 Figure 4. Minimum, maximum and monthly mean variations of soil moisture based on SMOS soil moisture data (Period 2010-2019)



شکل ۵- نقشه‌های میانگین فصلی رطوبت خاک تولیدشده از محصولات ماهواره اسموس (دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۱۹)
 Figure 5. Soil moisture seasonal average maps produced from SMOS products (Period 2010-2019)



شکل ۶- نقشه میانگین سالانه رطوبت خاک تولیدشده از محصولات ماهواره اسموس (دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۱۹)
Figure 6. Soil moisture annual average map produced from SMOS products (Period 2010-2019)

خوزستان ($0.117 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)، بوشهر ($0.130 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)، گلستان ($0.112 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) و گیلان ($0.101 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) به ترتیب بالاترین میانگین سالانه رطوبت خاک طی دوره آماری مطالعاتی (۲۰۱۰-۲۰۱۹) را دارند. بر اساس نقشه‌های رطوبت خاک اسموس، استان کردستان کمترین میانگین سالانه رطوبت خاک ($0.036 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) دارد.

به منظور بررسی تغییرات مکانی رطوبت خاک در استان‌های کشور، مقایر میانگین، کمینه و بیشینه سالانه رطوبت خاک ماهواره اسموس (دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۱۹) برای ۳۱ استان کشور از نقشه میانگین سالانه استخراج گردید که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی نتایج جدول ۲ مشخص کرد که استان‌های

جدول ۲- مقادیر میانگین سالانه رطوبت خاک ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) تولیدشده از محصولات ماهواره اسموس (دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۱۹) در استان‌ها
Table 2. Mean annual of soil moisture ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) values obtained from SMOS satellite products in the provinces

| استان | کمینه | بیشینه | میانگین |
|---------------------|-------|--------|---------|
| خوزستان | ۰/۰۳۶ | ۰/۷۸۰ | ۰/۱۷۷ |
| بوشهر | ۰/۰۲۸ | ۰/۳۳۴ | ۰/۱۳۰ |
| گلستان | ۰/۰۳۱ | ۰/۲۲۲ | ۰/۱۱۲ |
| گیلان | ۰/۰۲۹ | ۰/۳۱۸ | ۰/۱۰۱ |
| قم | ۰/۰۳۵ | ۰/۱۵۶ | ۰/۰۹۷ |
| فارس | ۰/۰۳۷ | ۰/۱۳۱ | ۰/۰۷۹ |
| سمنان | ۰/۰۱۷ | ۰/۲۲۰ | ۰/۰۷۸ |
| کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۰۴۵ | ۰/۱۱۹ | ۰/۰۷۷ |
| اردبیل | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۴۸ | ۰/۰۷۵ |
| ایلام | ۰/۰۴۸ | ۱/۳۰ | ۰/۰۷۲ |
| هرمزگان | ۰/۰۱۹ | ۰/۱۸۱ | ۰/۰۷۱ |
| آذربایجان غربی | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۸۸ | ۰/۰۶۵ |
| آذربایجان شرقی | ۰/۰۳۳ | ۱/۲۰۱ | ۰/۰۶۴ |
| خراسان رضوی | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۷۳ | ۰/۰۶۴ |
| خراسان شمالی | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۸۶ | ۰/۰۶۰ |
| خراسان جنوبی | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۸۵ | ۰/۰۵۶ |
| کرمانشاه | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۹۸ | ۰/۰۵۳ |
| تهران | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۲۰ | ۰/۰۵۳ |
| البرز | ۰/۰۰۶ | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۵۲ |
| اصفهان | ۰/۰۱۴ | ۰/۱۸۶ | ۰/۰۵۰ |
| یزد | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۸۳ | ۰/۰۴۹ |
| لرستان | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۴۸ |
| کرمان | ۰/۰۱۷ | ۰/۱۴۱ | ۰/۰۴۸ |
| چهارمحال و بختیاری | ۰/۰۲۶ | ۱/۰۷۰ | ۰/۰۴۴ |
| مرکزی | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۴۴ |
| قزوین | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۴۳ |
| زنجان | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۵۲ | ۰/۰۴۲ |
| سیستان و بلوچستان | ۰/۰۱۵ | ۰/۱۸۴ | ۰/۰۳۸ |
| همدان | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۳۷ |
| مازندران | ۰/۰۰۶ | ۰/۱۷۲ | ۰/۰۳۷ |
| کردستان | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۸۶ | ۰/۰۳۶ |

نتیجه‌گیری کلی

سنجش‌ازدور مایکروویو قابلیت منحصر به فردی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در سطوح گسترده دارد و رادیومتری مایکروویو در باند-L فناوری است که برای برآورد جهانی رطوبت سطحی خاک با دقت مناسب توسعه یافته است. مأموریت اسموس آژانس فضایی اروپا با رادیومتر مایکروویو دوبعدی باند-L، از سال ۲۰۱۰ داده‌های رطوبت خاک را در سطح جهانی برآورد می‌نماید. هدف این مطالعه استخراج و تولید نقشه‌های تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک منطقه‌ای برای ایران از محصولات رطوبت خاک ماهواره اسموس (SMOS BEC L3 SM) در ۱۰ دوره آماری ساله (۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹) بوده است. در این تحقیق برای تعیین مناسب‌ترین محصولات اسموس (مدار صعودی و نزولی) در ایران، نقشه‌های احتمال رخداد RFI اسموس مورد ارزیابی قرار گرفتند و مشخص شد که محصولات مدار صعودی در ایران کمترین درصد RFI را دارند، لذا این محصولات برای تولید نقشه‌های میانگین ۱۰ ساله استفاده شدند. به منظور تولید نقشه‌های رطوبت خاک کشور، مدلی با استفاده از قابلیت Model Builder در محیط نرم‌افزاری ArcMap جهت استخراج داده‌های رطوبت خاک از محصولات BEC SMOS L3 SM و تولید نقشه‌های رطوبت خاک توسعه داده شد. نتیجه اجرای این مدل، دستیابی به نقشه‌های میانگین ۱۰ ساله (۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹) ماهانه، فصلی و سالانه رطوبت خاک برای کشور بود. ارزیابی نقشه میانگین سالانه (۱۰ سال) رطوبت خاک ماهواره اسموس نشان داد که رطوبت خاک در سطح کشور بین مقدار کمینه ۰/۰۰۲ و مقدار بیشینه $۰/۷۸ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ متغیر بوده و مقدار متوسط میانگین ۱۰ ساله رطوبت سطحی خاک کشور برابر $۰/۰۶۳ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ است.

پایانگر آن است که بالاترین بیشینه ماهانه رطوبت خاک در ماه می ($۰/۸۵۴ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) رخ داده است. ارزیابی نقشه‌های میانگین فصلی رطوبت خاک اسموس نشان داد که فصل زمستان با بیشینه میانگین رطوبت خاک $۰/۰۸۳ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و پس از فصل بهار با میانگین رطوبت خاک $۰/۰۸۱ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ مرطوب‌ترین فصول سال در ایران می‌باشند. میانگین رطوبت خاک در فصل پاییز $۰/۰۵۸ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و کمینه میانگین رطوبت خاک در فصل تابستان برابر $۰/۰۴۰ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ است. نظر به کمبود داده‌های رطوبت خاک در کشور و با توجه به قابلیت‌های ماهواره اسموس در تولید داده‌های رطوبت خاک با کیفیت مطلوب، می‌توان از محصولات این ماهواره برای کاربردهای مختلف در ایران نظیر دیگر کشورهای جهان استفاده نمود. از نقشه‌های میانگین رطوبت خاک ماهانه، فصلی و سالانه می‌توان در مطالعات منطقه‌ای مدل‌های هیدرولوژی، بهبود مدل‌های پیش‌بینی رقومی وضع هوا (NWPs)، برنامه‌ریزی آبیاری در کشاورزی، هوشمندسازی آبیاری و مطالعات تغییر اقلیم استفاده‌های مختلفی نمود. پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش کارایی و کاربردی‌تر نمودن این نقشه‌ها به خصوص در مقیاس‌های کوچک، فرآیند ریزمقیاس کردن محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای صورت پذیرد. به منظور ریزمقیاس نمودن محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای می‌توان از محصولات ماهواره‌ای دارای قدرت تفکیک بالا مانند رادارها در جهت بهبود کیفیت و کاربرد پذیری این اطلاعات استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود از نتایج تحقیقات موجود اعتبارسنجی رطوبت خاک ماهواره اسموس در کشور جامعی و همکاران (۱۵) در تحقیقات آینده استفاده گردد، همچنین اندازه‌گیری‌های زمینی رطوبت خاک به صورت مداوم و پیوسته به منظور اعتبار سنجی و بررسی دقت داده‌های دیگر ماهواره‌های پایش جهانی رطوبت خاک در کشور انجام شود.

منابع

- Al-Yaari, A., J.P. Wigneron, A. Ducharne, Y. Kerr, W. Wagner, G. De Lannoy, R. Reichle, A. Al Bitar, W. Dorigo and P. Richaume. 2014. Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRA-Land). *Remote Sensing of Environment*, 152: 614-626.
- Al-Yaari, A.M. 2014. Global-scale evaluation of a hydrological variable measured from space: SMOS satellite remote sensing soil moisture products. 2014 Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Al Bitar, A., D. Leroux, Y.H. Kerr, O. Merlin, P. Richaume, A. Sahoo and E.F. Wood. 2012. Evaluation of SMOS soil moisture products over continental US using the SCAN/SNOTEL network. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(5): 1572-1586.
- Albergel, C., P. De Rosnay, C. Gruhier, J. Muñoz-Sabater, S. Hasenauer, L. Isaksen, Y. Kerr and W. Wagner. 2012. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118: 215-226.
- Anam, R., F. Chishtie, S. Ghuffar, W. Qazi and I. Shahid. 2017. Inter-comparison of SMOS and AMSR-E soil moisture products during flood years (2010-2011) over Pakistan. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1): 442-451.
- Champagne, C., T. Rowlandson, A. Berg, T. Burns, J. L'Heureux, E. Tetlock, J.R. Adams, H. McNairn, B. Toth and D. Itenfisu. 2016. Satellite surface soil moisture from SMOS and Aquarius: Assessment for applications in agricultural landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45: 143-154.

7. Cui, C., J. Xu, J. Zeng, K.S. Chen, X. Bai, H. Lu, Q. Chen and T. Zhao. 2018. Soil moisture mapping from satellites: An intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales. *Remote Sensing*, 10(1): 33 p.
8. dall'Amico, J.T., F. Schlenz, A. Loew and W. Mauser. 2012. First Results of SMOS Soil Moisture Validation in the Upper Danube Catchment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50: 1507-1516.
9. Djamai, N., R. Magagi, K. Goïta, M. Hosseini, M.H. Cosh, A. Berg and B. Toth. 2015. Evaluation of SMOS soil moisture products over the CanEx-SM10 area. *Journal of Hydrology*, 520: 254-267.
10. Dorigo, W., W. Wagner, R. Hohensinn, S. Hahn, C. Paulik, A. Xaver, A. Gruber, M. Drusch, S. Mecklenburg and P.V. Oevelen. 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5): 1675-1698.
11. Edrisi, T., M. Habibnejad Roshan and B. Jafari Gorzin. 2020. Simulation of Zaremrod river flow in different time scales using soil moisture accounting model (SMA). *journal of watershed management research*, 11(21): 198-207 (In Persian).
12. El Hajj, M., N. Baghdadi, M. Zribi, N. Rodríguez-Fernández, J.P. Wigneron, A. Al-Yaari, A. Al Bitar, C. Albergel and J.C. Calvet. 2018. Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 Soil Moisture Products at Sites in Southwestern France, 10(4): 569.
13. Entekhabi, D., E.G. Njoku, P.E. Neill, K.H. Kellogg, W.T. Crow, W.N. Edelstein, J.K. Entin, S.D. Goodman, T.J. Jackson and J. Johnson. 2010. The soil moisture active passive (SMAP) mission, *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 704-716.
14. Famiglietti, J.S., D. Ryu, A.A. Berg, M. Rodell and T.J. Jackson. 2008. Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research*, 44: 1-16.
15. Jamei, M., M. Mousavi Baygi, E.A. Oskouei and E. Lopez-Baeza. 2020. Validation of the SMOS Level 1C Brightness Temperature and Level 2 Soil Moisture Data over the West and Southwest of Iran. *Remote Sensing*, 12(17): 2819.
16. Kerr, Y.H., A. Al-Yaari, N. Rodriguez-Fernandez, M. Parrens, B. Molero, D. Leroux, S. Bircher, A. Mahmoodi, A. Mialon and P. Richaume. 2016. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sensing of Environment*, 180: 40-63.
17. Kerr, Y.H., P. Waldteufel, P. Richaume, J.P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi, A. Al Bitar, F. Cabot, C. Gruhier and S.E. Juglea. 2012. The SMOS soil moisture retrieval algorithm. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(5): 1384-1403.
18. Kerr, Y.H., P. Waldteufel, J.P. Wigneron, S. Delwart, F.O. Cabot, J. Boutin, M.J. Escorihuela, J. Font, N. Reul and C. Gruhier. 2010. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 666-687.
19. Kerr, Y.H., P. Waldteufel, J.P. Wigneron, J.M. Martinuzzi, J. Font and M. Berger, 2001. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(8): 1729-1735.
20. Leroux, D.J., Y.H. Kerr, A. Al Bitar, R. Bindlish, T.J. Jackson, B. Berthelot, and G. Portet. 2014. Comparison between SMOS, VUA, ASCAT and ECMWF soil moisture products over four watersheds in US. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 52(3): 1562-1571.
21. Leroux, D.J., Y.H. Kerr, P. Richaume and R. Fieuzal. 2013. Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale. *Remote Sensing of Environment*, 133: 240-250.
22. Mason, P., J. Zillman, A. Simmons, E. Lindstrom, D. Harrison, H. Dolman, S. Bojinski, A. Fischer, J. Latham and J. Rasmussen. 2010. Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 Update). 2010 GOOS-184, GTOS-76, WMO-TD/No. 1523: Geneva.
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: p. 295-305.
24. Nadi, m. and Shiukhy Soqanloo, S. 2020. Comparison of SPI and SPImod in Drought Monitoring of Several Climatic Samples of Iran. *journal of watershed management research*, 11(21): 108-118 (In Persian).
25. Oliva, R., E. Daganzo, Y.H. Kerr, S. Mecklenburg, S. Nieto, P. Richaume and C. Gruhier. 2012. SMOS radio frequency interference scenario: Status and actions taken to improve the RFI environment in the 1400-1427-MHz passive band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5): 1427-1439.
26. Pan, M., A.K. Sahoo, E.F. Wood, A. Al Bitar, D. Leroux and Y.H. Kerr. 2012. An initial assessment of SMOS derived soil moisture over the continental United States. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 5(5): 1448-1457.
27. Peggy O'Neill, R.B., S. Chan, E. NjokuJet and T. Jackson. 2018. Soil Moisture Active Passive (SMAP) Algorithm Theoretical Basis Document Level 2 & 3 Soil Moisture (Passive) Data Products. 2018, R. D, Editor: Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. 1-82 p.
28. Sánchez, N., J. Martínez-fernández, A. Scaini and C. Pérez-gutiérrez. 2012. Validation of the SMOS L2 Soil Moisture Data in the REMEDHUS Network (Spain), 50: 1602-1611.

29. Schalie, R.v.d., Y.H. Kerr, J.P. Wigneron, N.J. Rodríguez-Fernández, A. Al-Yaari and R.A.M.d. Jeu. 2016. Global SMOS Soil Moisture Retrievals from The Land Parameter Retrieval Model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45: 125-134.
30. Srivastava, P.K., Han, D., Rico Ramirez, M.a., and Islam, T. 2013. Appraisal of SMOS soil moisture at a catchment scale in a temperate maritime climate. *Journal of Hydrology*, 498: 292-304.
31. Su, C.H., D. Ryu, R.I. Young, A.W. Western and W. Wagner. 2013. Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia. *Remote Sensing of Environment*, 134: 1-11.
32. Walker, V.A., B.K. Hornbuckle and M.H. Cosh. 2018. A Five-Year Evaluation of SMOS Level 2 Soil Moisture in the Corn Belt of the United States. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, (99): 1-12.
33. Wigneron, J.P., M. Schwank, E.L. Baeza, Y. Kerr, N. Novello, C. Millan, C. Moisy, P. Richaume, A. Mialon, A. Al Bitar, F. Cabot, H. Lawrence, D. Guyon, J.C. Calvet, J.P. Grant, T. Casal, P. de Rosnay, K. Saleh, A. Mahmoodi, S. Delwart and S. Mecklenburg. 2012. First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, 124: 26-37.
34. WMO. 2014. Guide to Meteorological Instruments and Methods of observation. 2014 World Meteorological Organization.
35. Zeng, J., Z. Li, Q. Chen, H. Bi, J. Qiu and P. Zou. 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.
36. Zhang, L., C. He, M. Zhang and Y. Zhu. 2019. Evaluation of the SMOS and SMAP soil moisture products under different vegetation types against two sparse in situ networks over arid mountainous watersheds, Northwest China. *Science China Earth Sciences*, 62(4): 703-718.

Production of Soil Moisture Maps in Iran from BEC Global Level 3 Products of SMOS Satellite

Ebrahim Asadi Oskouei¹ and Mozhdeh Jamei²

1- Assistant Professor, Faculty member of ASMERC

2- Ph.D. in Agrometeorology, Khuzestan Water and Power Authority,

(Corresponding Author: mozhdeh.jamei@gmail.com)

Received: 30 September, 2020 Accepted: 19 Jun, 2021

Extended Abstract

Introduction and Objective: Surface soil moisture is an essential variable in the Earth's climate system and hydrological cycle that plays a crucial role in scientific and practical applications such as numerical weather forecasting, extreme event monitoring, hydrological modeling, climate models study, and water resources management. Microwave remote sensing has a unique capability to retrieve global soil moisture over a wide range; in this context, The European Space Agency's (ESA) Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) satellite is the first specific mission to monitor global soil moisture, which has been operating since 2009. This study aimed to extract soil moisture data from SMOS satellite products (BEC_L3_SM_SMOS), generate soil moisture maps at different time scales for Iran, and evaluate the spatial and temporal variations of soil moisture data (from 2010 to 2019).

Material and Methods: In line with the research objectives, we developed a model by Model Builder in ArcGIS that read and derived soil moisture values from the BEC_L3_SM_SMOS products and produced average soil moisture maps over Iran. This study evaluated the sources of Radio Frequency Interference (RFI) in the SMOS products by evaluating RFI probability maps. The results found that the SMOS ascending orbit products have the lowest RFI in Iran. This study evaluated the sources of Radio Frequency Interference (RFI) in the SMOS products by evaluating RFI probability maps. The results found that the SMOS ascending orbit products have the lowest RFI percentage in Iran. Therefore, we used the BEC_L3_SM_SMOS (ASC) products to generate the soil moisture maps in Iran.

Results: In this study, the outcomes of the developed model are the preparation of monthly, seasonal, and annual maps of the average soil moisture for Iran. Evaluation of temporal variations of the soil moisture monthly average maps shows that the highest maximum monthly value ($0.854 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) occurred in May. The highest monthly average of soil moisture values was related to February ($0.087 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), March ($0.086 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), and April ($0.086 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), and the lowest monthly average of soil moisture values were occurred in August ($0.034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and September ($0.037 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Evaluation of the annual average map (10 years) obtained from SMOS data shows that soil moisture varies between the lowest value of 0.002 and the highest value of $0.78 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ in Iran. The annual average value of soil moisture is $0.063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ based on SMOS data over Iran

Conclusion: Due to the scarce soil moisture data over Iran and the ability of SMOS to produce soil moisture data with desirable quality, SMOS products can be used for various applications. The monthly, seasonal, and annual maps of the average soil moisture obtained in this study can be used in regional studies of hydrological models, improving weather forecasting models, water resources management, climate change studies, irrigation schedule, and smart irrigation.

Keywords: L-band radiometry, Passive microwave, Satellite soil moisture, Soil moisture map, SMOS satellite