تخمین رطوبت خاک با تلفیق روش ریزمقیاس‌سازی داده‌های سنجنده مایکروویو و مدل SMAR (مطالعه موردی: دشت رفسنجان)

مائده فرخی، حسین انصاری* و علیرضا فریدحسینی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۸)

چکیده

برآورد رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی و مکانی کلید مدیریت استراتژیک منابع آب است. روش‌های سنجش از دور مبتنی بر امواج مایکروویو با وجود فراهم کردن گسترده و مداوم رطوبت در نزدیکی سطح زمین، قدرت تفکیک مکانی پایینی دارند. در این پژوهش، ابتدا از محصولات رطوبت خاک سطحی سنجنده مایکروویو AMSR2 با وضوح ۲۵ کیلومتر استفاده شد و این محصولات بر اساس یک مدل رگرسیونی که رطوبت خاک سطحی را به سه پارامتر سنجنده مودیس ارتباط می‌دهد، به ابعاد یک کیلومتر ریزمقیاس شدند. در مرحله بعد تلفیق مدل ریزمقیاس شده رطوبت خاک سطحی با مدل SMAR، به‌منظور پایش رطوبت خاک ناحیه ریشه در منطقه مورد مطالعه (دشت رفسنجان) انجام شد. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در ۱۰ ایستگاه از دشت رفسنجان رطوبت سطح و نیمرخ خاک اندازه‌گیری شد. مقایسه داده‌های معمولی و ریزمقیاس شده رطوبت خاک سطحی با داده‌های اندازه‌گیری نشان داد که مقادیر میانگین کل ایستگاه‌ها برای میزان ضریب همبستگی از ۰/۵۴۰ به ۰/۷۳۹ افزایش و قدر مطلق میانگین خطا و جذر میانگین مربعات خطا به‌ترتیب از ۰/۰۳۹ به ۰/۰۱۸ و از ۰/۰۴۰ به ۰/۰۲۰ کاهش یافت. همچنین نتایج حاصل از اعتبارسنجی مقادیر رطوبت خاک ناحیه ریشه نشان داد که روش پیشنهادی توانسته با دقت بالایی رطوبت را در این ناحیه تخمین بزند و تغییرات آن را نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس‌سازی، سنجش از دور، مودیس

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ansary@um.ac.ir

مقدمه

رطوبت خاک ناحیه ریشه، پارامتر مهم ذخیره‌سازی محسوب می‌شود که تقسیمات انرژی و جرم مربوط به تبخیر- تعرق و رواناب را کنترل می‌کند (۱۰). بارندگی، بافت خاک، توپوگرافی، استفاده از زمین و انواع متغیرهای هواشناسی بر توزیع مکانی و تغییرات زمانی رطوبت خاک تأثیرگذار هستند (۷). روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک با ابزارهای زمینی، قادر به ارائه رطوبت خاک در مقیاس نقطه‌ای هستند و میزان رطوبت را برای مناطق مجاور محل اندازه‌گیری، به‌دلیل ناهمگونی مکانی زیاد در طیف وسیعی از مقیاس‌ها، نشان نمی‌دهند. از طرف دیگر در بسیاری از حوزه‌های بزرگ، شبکه‌های مشاهداتی رطوبت خاک به‌صورت متراکم وجود ندارند. بنابراین، همچنان چالشی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط ابزارهای زمینی در مقیاس‌های مختلف موجود است.

روش‌های سنجش از دور مبتنی بر امواج مایکروویو، تکنیک‌های مؤثری در برآورد رطوبت خاک برای مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف محسوب می‌شوند (۱۲). محصولات رطوبت خاک حاصل از سنجنده‌های ماهواره‌ای، در مقیاس جهانی ارائه می‌شوند. از جمله، محصولات ماهواره SMAP (Soil Moisture Active Passive) ارائه شده توسط ناسا SMOS، (Soil Moisture and Ocean Salinity) توسط آژانس فضایی اروپا، رادیومتر پیشرفته AMSR-E (Advanced Observing Microwave Scanning Radiometer – Earth System) از آژانس اکتشاف فضایی ژاپن (JAXA) و AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer2) از ناسا و از JAXA قابل دستیابی هستند. اما، در حال حاضر، محصولات ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی پایین در دسترس هستند (از ۳ تا ۴۰ کیلومتر که برای مقیاس‌های کوچک هیدرولوژیکی، مدل‌سازی و برنامه‌های کاربردی کشاورزی مفید نیستند) و به دلیل کمبود شبکه‌های زمینی در دسترس، روند اعتبارسنجی این محصولات محدود است (۲۱، ۲۲ و۲۴). به‌تازگی، به‌منظور بهبود در ارائه تغییرات مکانی رطوبت خاک سطحی حاصل از سنجنده مایکروویو، مطالعاتی درخصوص ریزمقیاس‌سازی محصولات رطوبت خاک این سنجنده‌ها، توسط شاخص‌های مربوط به پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و همچنین سایر پارامترهای به سطح، که از سنجنده‌های نوری حرارتی به‌دست می‌آیند، انجام پذیرفته است (۵، ۱۸ و ۲۰).

داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک، اطلاعات رطوبت مربوط به لایه سطحی زمین ارائه را می‌کنند (۹)، درحالی که بسیاری از ملاحظات انرژی و اکوسیستم‌های آبی وابستگی بالایی به توزیع مکانی میزان رطوبت لایه ریشه گیاه دارند. مطالعاتی درخصوص اینکه چگونه می‌توان میزان رطوبت خاک منطقه ریشه را از تغییرات رطوبت خاک سطحی پیش‌بینی کرد، مورد بررسی قرار گرفته است (۱۴، ۱۵ و ۲۳). روش‌های ارائه شده شامل روابط آماری ساده تا روش‌های فیزیکی هستند که در آنها رطوبت نیمرخ خاک، با فرض وجود شرایط تعادل هیدرولیکی بین رطوبت لحظه‌ای خاک سطحی و عمقی تخمین زده می‌شود. مانفردا و همکاران (۱۵) بر اساس حل یک معادله ساده بیلان آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، رابطه تحلیلی رطوبت خاک (SMAR) را برای بیان ارتباط بین رطوبت خاک سطحی و رطوبت خاک منطقه ریشه ارائه کردند. نتایج اجرای مدل SMAR روی داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در عمق‌های مختلف، نشان‌دهنده توانایی بالقوه این مدل در پیش‌بینی رطوبت خاک منطقه ریشه در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای بود (۲ ، ۸ و ۱۵). از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مدل SMAR، داده‌های رطوبت لایه سطحی خاک است که استفاده از بازیابی‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک می‌تواند روشی مناسب به‌منظور برآورد رطوبت خاک منطقه ریشه در این مدل باشد (۲ و ۸).

از آنجا که دستیابی به مقادیر زمانی و مکانی رطوبت خاک سطحی و رطوبت منطقه ریشه و نیز دقت برآورد آنها، برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی مختلف ضروری است. همچنین در دشت رفسنجان منابع موجود برای اندازه‌گیری دقیق رطوبت خاک بسیار محدود بوده، لذا در این پژوهش سعی شده در

مرحله اول با استفاده از داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 و به‌کارگیری یک تکنیک ریزمقیاس‌سازی برای این داده‌ها، توصیف بهتری از رطوبت خاک سطحی ارائه شده توسط ماهواره در هنگام عبور از منطقه مورد مطالعه (دشت رفسنجان)، انجام شود و عملکرد این روش بر اساس تفاوت بین داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک سطحی و داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گیرد. روش استفاده شده برای ریزمقیاس‌سازی، شامل یک معادله خطی ساده، که رطوبت خاک سطحی حاصل از سنجنده AMSR2 را به سه ویژگی فیزیکی به‌دست آمده از سنجنده مودیس (شامل شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و آلبیدو) ارتباط می‌دهد، است. در مرحله بعد، به‌منظور تخمین میزان رطوبت ناحیه ریشه، مقادیر ریزمقیاس شده رطوبت خاک سطحی، در مدل SMAR به‌کار گرفته خواهد شد و نتایج حاصل از این مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می شود. این روش در واقع به ارائه یک سیستم جذب مقادیر ریزمقیاس شده رطوبت خاک سطحی به‌منظور تولید نقشه‌های رطوبت نیمرخ خاک در پیکسل‌های یک کیلومتری در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

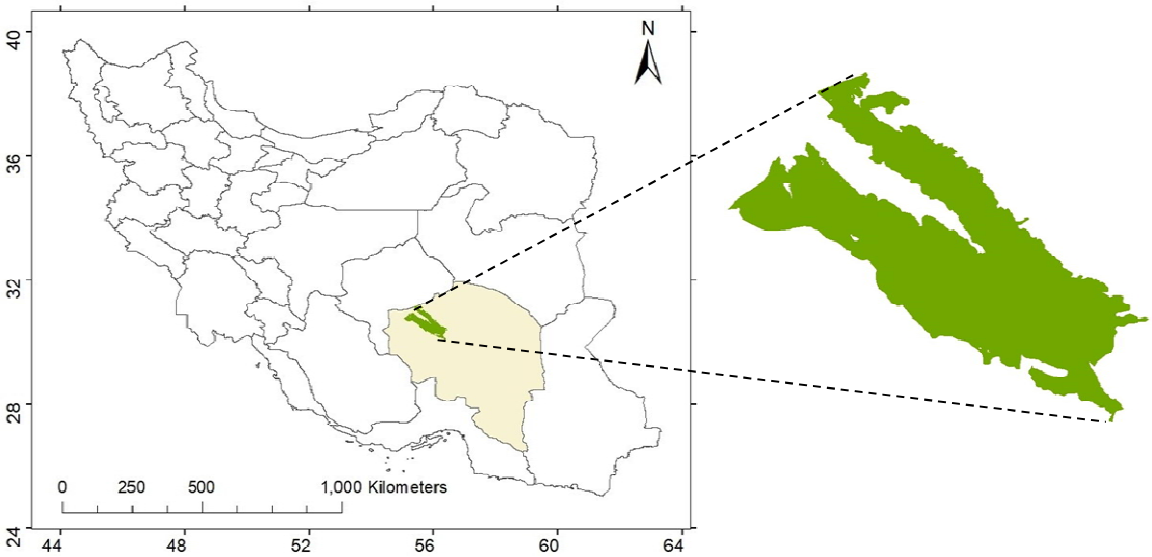
منطقه مورد مطالعه، دشت رفسنجان واقع در استان کرمان است. این دشت با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و وسعتی حدود ۵۶۲۲ کیلومتر مربع بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۱ دقیقه و طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۸ دقیقه و در باند ارتفاعی ۱۲۹۶ متر تا ۲۱۳۱ متر بالاتر از سطح دریای آزاد گسترده شده است. این منطقه بخشی از حوضه آبریز درجه ۲ کویر درانجیر- ساغند واقع شده در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، محسوب می‌شود (شکل ۱). متوسط میزان بارندگی در دشت رفسنجان ۱۲۹ میلی‌متر در سال گزارش شده است.

داده‌های رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2

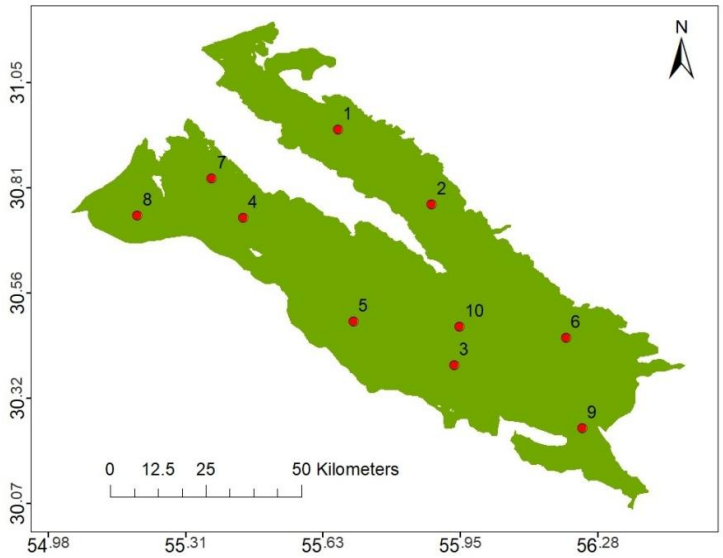
سیستم ماهواره‌ای GCOM-W1 با هدف مشاهده تغییرات چرخه آب و جمع‌آوری پارامترهای ژئوفیزیک (مانند بارندگی، دمای سطح دریا، مقادیر رطوبت خاک و...) در تاریخ ۱۷ ماه می ۲۰۱۲ راه‌اندازی شد (۱۳). سنجنده AMSR2 روی این سیستم ماهواره‌ای واقع شده و امواج رادیومتری انتشار یافته از زمین را بازیابی کرده و به ارائه داده‌های رطوبت خاک سطحی با وضوح مکانی بزرگ به‌صورت روزانه یا دو روزه، با پوشش جهانی می‌پردازد (۱۱ و ۱۳). این داده‌ها توسط مدل بازیابی پارامتر زمین (LPRM) که بر مبنای مدل انتقال تابشی، رطوبت خاک و عمق نوری، پوشش گیاهی را بازیابی می‌کند، برآورد می‌شوند. محصولات رطوبت خاک سنجنده AMSR2 را می‌توان از مرکز تحقیقات مشاهدات زمین (EORC) در وب‌سایت JAXA (داده‌ها در فرمت HDF5) و یا از طریق وب‌سایت ناسا (داده‌ها در فرمت netCDF4) بازیابی کرد. در این پژوهش، داده‌های رطوبت خاک مربوط به باند X سنجنده AMSR2 به‌صورت جهانی و روزانه با وضوح ۲۵ کیلومتر، در محدوده زمانی از روز ۲۸ شهریور ۱۳۹۶ تا ۷ شهریور ۱۳۹۷، مورد بازیابی و تحلیل قرار گرفتند که با استفاده از مختصات جغرافیایی منطقه رفسنجان، داده‌های رطوبت خاک سطحی، برای این منطقه به‌دست آمد.

داده‌های رطوبت خاک توسط اندازه‌گیری‌های زمینی

در این تحقیق، برای دستیابی به مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک سطحی و رطوبت پروفیل خاک در منطقه رفسنجان، حسگرهای هوشمند اندازه‌گیری رطوبت خاک REC-P55، که قادر به ثبت داده‌های رطوبت و دما با دقت بالایی هستند (۱)، انتخاب و در ۱۰ محل (ایستگاه) از دشت رفسنجان (شکل ۲)، در اعماق مختلف (اعماق ۱۰، ۴۰، ۱۰۰سانتی‌متری) نصب شدند و دستگاه دیتالاگر ولتاژ مربوط به رطوبت و دمای خاک را به‌طور مداوم ثبت می‌کرد. حسگرها از قبل کالیبره شدند و معادلات رطوبتی خاک‌ها برای هر کدام



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت رفسنجان



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک در دشت رفسنجان

از حسگرها با روش وزنی در آزمایشگاه حاصل شد. در این پژوهش، ابتدا داده‌های رطوبت لایه سطحی خاک در زمان گذر ماهواره در هر ایستگاه مورد تحلیل قرار گرفت و پس از آن به بررسی داده‌های رطوبت در پروفیل خاک پرداخته شد. خاک به‌صورت دو لایه سطحی و عمقی (منطقه ریشه)، به‌ترتیب با ضخامت ۱۰ و ۹۰ سانتی‌متر ، به‌منظور استفاده در مدل رطوبتی SMAR ، فرض شد.

پارامترهای سنجش از راه دور مودیس

سنجنده مودیس روی ماهواره‌های آکوا و ترا در دسامبر ۱۹۹۹ و می ۲۰۰۲ راه اندازی شد. این سیستم‌های ماهواره‌ای بخشی از سیستم مشاهداتی زمین مرکز بین‌المللی ناسا (EOS) هستند. هر دو سیستم در مسیر دایره‌ای مدار قطبی به‌دور زمین گردش کرده و داده‌ها را برای کل زمین به‌صورت روزانه یا هر دو روز جمع‌آوری می‌کنند. در این پژوهش محصولات مودیس استفاده

شده شامل: دمای سطح زمین (LST) از ماهواره آکوا (MYD11A1)، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) از دو مجموعه داده ۱۶ روزه MYD13A2 (ماهواره آکوا) و MOD13A2 (ماهواره ترا) به‌منظور ایجاد لایه‌های ۸ روزه و همچنین آلبیدوی سطحی (α) از ترکیب باندهای ۱ تا ۷ سنجنده مودیس (MOD09A1)، هستند. محصولات مودیس در فرمت HDF4 از سیستم اطلاعاتی و داده‌ای EOS از طریق وب‌سایت (https://search.earthdata.nasa.gov) با وضوح یک کیلومتر برای منطقه مورد مطالعه دریافت شد، که از آنها برای کاهش مقیاس رطوبت خاک از مقدار ۲۵ کیلومتری سنجنده AMRS2 به یک کیلومتر استفاده شد.

ریزمقیاس‌سازی داده‌های AMSR2

میزان رطوبت خاک در منطقه، تحت تأثیر عواملی مانند نحوه کاربری زمین، نوع خاک، درجه حرارت خاک، تراکم پوشش گیاهی، مناطق غیرقابل نفوذ ، بارش روزانه و... به میزان قابل توجهی در مکان تغییرپذیر است، لذا انتظار می‌رود که یک مقدار رطوبت میانگین، از مقیاس ۲۵ کیلومتری خاک نتواند نماینده این سطح پوشش باشد. ایده اصلی از ریزمقیاس‌سازی، ایجاد یک همبستگی آماری و یا یک مدل فیزیکی بین رطوبت خاک درشت‌مقیاس و متغیرهای کمکی ریزمقیاس مؤثر بر رطوبت خاک است (۱۷). از مزایای سنجش از دور نوری و حرارتی، فراهم کردن پارامترهای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، در مقایسه با سنجش از دور مایکروویو است. در این پژوهش برای تصحیح محصول رطوبت خاک از میزان وضوح ۲۵ کیلومتر به یک کیلومتر، یک تکنیک ریزمقیاس‌سازی که در آن رطوبت خاک سطحی با وضوح بالا، به‌صورت یک معادله چندجمله‌ای مبتنی بر پارامترهای مودیس شامل آلبیدو، LST و NDVI است، مورد استفاده قرار گرفت. معادله ۱ این روش ریزمقیاس‌سازی رانشان می‌دهد (۴):

$$\theta_{top} = \sum_{i=0}^{i=n}\sum_{j=0}^{j=n}\sum_{k=0}^{k=n} a_{ijk} V^i T^j A^k \qquad (۱)$$

با درنظر گرفتن تعداد متغیرهای توضیحی(n) برابر یک، معادله ۲ حاصل می‌شود:

$$\theta_{top} = a_{000}A + a_{100}T + a_{010}V + a_{110}TA + a_{101}VA + a_{011}VT \qquad (۲)$$

که در آن، θ_{top} مقدار رطوبت خاک سطحی، a_{ijk} ضرایب رگرسیونی، A آلبیدو، T بیانگر LST و V نشان‌دهنده NDVI هستند. به‌منظور تخمین ضرایب رگرسیونی، ابتدا هر پارامتر مودیس به‌منظور مطابقت با وضوح ۲۵ کیلومتری AMSR2، درشت‌مقیاس می‌شود، پس با یک مدل رگرسیون خطی چندگانه این ضرایب محاسبه می‌شوند. در این مطالعه، درشت مقیاس‌سازی (Upscaling) به‌شرح ذیل انجام شد (۴):

$$V_{25km} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} V_{i,j}}{mn}$$
$$T_{25km} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} T_{i,j}}{mn} \qquad (۳)$$
$$A_{25km} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} A_{i,j}}{mn}$$

که در آن، ۲۵ کیلومتر، مقیاسی است که پارامترهای فیزیکی به آن درشت‌مقیاس شده‌اند، m و n به‌ترتیب، تعداد ستون و سطر از شبکه‌ای با مقیاس یک کیلومتر درون پیکسل ۲۵ کیلومتری هستند.

ارزیابی داده‌های رطوبت خاک

ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک سطحی و منطقه ریشه با داده‌های اندازه‌گیری شده در محل با محاسبه مقادیر قدر مطلق میانگین خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) برای نقاط اندازه‌گیری شده، بر اساس روابط زیر تحلیل و ارزیابی می‌شود. که در آن $\theta_{i,G}$ مقادیر اندازه‌گیری زمینی رطوبت خاک، $\theta_{i,s}$ مقادیر رطوبت خاک برآورد شده، e_i اختلاف بین مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری زمینی رطوبت خاک و N تعداد روزهای مورد بررسی هستند:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left|\theta_{i,G} - \theta_{i,S}\right|}{N} \qquad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} e_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\theta_{i,G} - \theta_{i,S}\right]^2}{N}} \quad (۵)$$

$$R = \frac{N\sum_{i=1}^{N}\left(\theta_{i,G}\times\theta_{i,S}\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{i,G}\right)\times\left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{i,S}\right)}{\sqrt{\left[N\left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{i,G}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{i,G}\right)^2\right]\times\left[N\left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{i,S}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{i,S}\right)^2\right]}} \quad (۶)$$

مقادیر ضریب همبستگی (R) محاسبه شده در معادله ۶ ، بین صفر تا یک است که مقادیر R≥۰/۷ به‌عنوان برآوردی رضایت‌بخش درنظر گرفته شده است.

مدل SMAR

مدل SMAR با لحاظ کردن ویژگی‌های فیزیکی خاک، بین رطوبت لایه سطحی خاک (θ_{top}) و رطوبت منطقه ریشه (θ_{sub})، ارتباط برقرار می‌کند. در این مدل فرض شد، خاک از دو لایه تشکیل شده است که شامل لایه سطحی (که معادل عمق بازیابی‌های رطوبت خاک سطحی توسط ماهواره درنظر گرفته شده و عمق ۱۰-۵ سانتی‌متری بالای خاک معادل دینامیک لایه سطحی خاک درنظر گرفته می‌شود) و لایه دوم (زیر لایه سطحی قرار دارد و عمقی معادل با عمق گسترش ریشه گیاهان دارد) است و فلاکس جریان نفوذ از لایه اول به دوم اتفاق می‌افتد (۱۵):

$$n_1 Lr_1 I(t) = n_1 Lr_1 I\left[s_1(t), t\right] = n_1 Lr_1 \begin{cases} \left(s_1(t) - s_{c1}\right), & s_1(t) \geq s_{c1} \\ 0, & s_1(t) \geq s_{c1} \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن، $I(t)[-]$ درصدی از رطوبت اشباع خاک است که به لایه دوم نفوذ می‌کند، $n_1[-]$ تخلخل خاک لایه اول، Lr_1 ضخامت لایه اول، $s_1\left(\theta_{top}/n_1\right)[-]$ اشباع نسبی لایه اول و $s_{c1}[-]$ مقدار اشباع نسبی در ظرفیت زراعی لایه اول است. ضرایب نرمال شده a و b به‌صورت زیر ارائه شدند (۱۵):

$$a = \frac{V_2}{(1-s_{w2})n_2 Lr_2} \quad , \quad b = \frac{n_1 Lr_1}{(1-s_{w2})n_2 Lr_2} \quad (۸)$$

که $n_2[-]$ تخلخل خاک لایه دوم خاک، Lr_2 ضخامت لایه دوم، $s_{w2}[-]$ اشباع نسبی در نقطه پژمردگی در لایه دوم و V_2 هدررفت آب خاک با احتساب تبخیر- تعرق و نفوذ عمقی هستند. میزان اشباع نسبی لایه دوم ($s_2\left(\theta_{sub}/n_2\right)[-]$) از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$s_2\left(t_j\right) = s_{w2} + \left(s_2\left(t_{j-1}\right) - s_{w2}\right)e^{-a(t_j - t_{j-1})} + (1-s_{w2})bI\left(t_j\right)\left(t_j - t_{j-1}\right) \quad (۹)$$

پارامترهای مدل SMAR شامل تخلخل (n)، اشباع نسبی در نقطه پژمردگی (s_w) و اشباع نسبی در ظرفیت زراعی (s_c) برای بافت‌های مختلف خاک در جدول ۱ ارائه شده است (۱۴ و ۱۵).

در این پژوهش برای ایستگاه‌های منتخب منطقه، رطوبت روزانه خاک منطقه ریشه (عمق ۱۰۰-۱۰ سانتی‌متر)، از میانگین وزنی رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای موجود در اعماق ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک و همچنین رطوبت لایه سطحی خاک (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر، که معادل عمق بازیابی‌های ماهواره است) از رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر نصب شده در لایه سطحی به‌دست آمدند. مقدار پارامتر مربوط به هدررفت آب خاک با احتساب تبخیر- تعرق و نفوذ عمقی(V_2) در مدل SMAR، توسط بهینه‌سازی مطابق با شرایط منطقه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط برنامه‌نویسی متلب، با تابع هدف حداقل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) که بین رطوبت خاک منطقه ریشه شبیه‌سازی شده در مدل و مقادیر مشاهداتی انجام شد، برابر ۵/۸ میلی‌متر در روز به‌دست آمد. به‌منظور دستیابی به مقادیر یک کیلومتری از پارامترهای آلبیدو، LST و NDVI، محصولات سنجنده مودیس مورد استفاده قرار گرفتند. این محصولات و همچنین اطلاعات بافت خاک منطقه در نرم‌افزار GIS مورد پردازش قرار گرفته و به‌صورت لایه‌های رستری (با پیکسل‌های منطبق و برابر یک کیلومتر) در مدل SMAR استفاده شدند. معادله ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 در مدل SMAR به‌کار گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار متلب مقادیر رطوبت خاک روزانه منطقه ریشه، در هر پیکسل یک کیلومتری دشت رفسنجان برآورد شد. نتایج حاصل از مدل SMAR با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل ۱۰ ایستگاه اندازه‌گیری مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند.

جدول ۱ . پارامترهای مدل SMAR برای بافت‌های مختلف خاک (۱۴ و ۱۶)

بافت خاک	تخلخل (n)	اشباع نسبی ظرفیت زراعی (s_w)	اشباع نسبی نقطه پژمردگی (s_w)
شنی	۰/۴۳۷	۰/۰۶	۰/۱۴
لومی شنی	۰/۴۳۷	۰/۱۱	۰/۲۴
شنی لومی	۰/۴۳۵	۰/۱۹	۰/۴۲
سیلتی لومی	۰/۵۰۱	۰/۲۷	۰/۵۷
لومی	۰/۴۶۳	۰/۲۵	۰/۵۰
شنی رسی لومی	۰/۳۹۸	۰/۳۴	۰/۶۲
سیلتی رسی لومی	۰/۴۷۱	۰/۴۵	۰/۷۳
رسی لومی	۰/۴۶۴	۰/۴۰	۰/۶۷
شنی رسی	۰/۴۳۰	۰/۵۱	۰/۷۵
سیلتی رسی	۰/۴۷۹	۰/۵۲	۰/۷۸
رسی	۰/۴۷۵	۰/۵۶	۰/۸۰

نتایج و بحث

بهبود داده‌های رطوبت خاک سطحی توسط ریزمقیاس‌سازی

با روش ریزمقیاس‌سازی بر اساس پارامترهای مودیس، وضوح داده‌های رطوبت خاک سطحی به‌دست آمده از سنجنده AMSR2، از ۲۵ کیلومتر به یک کیلومتر کاهش یافت. معادله ریزمقیاس‌سازی به‌صورت زیر حاصل شد:

$$\theta_{top} = 0.893 - 0.931\ A - 0.256\ V - 0.0025\ T + 0.0027\ TV - 0.00226\ TA - 2.133\ VA \quad (۱۰)$$

که در آن، θ_{top} رطوبت سطحی ریزمقیاس شده، A آلبیدو، T دمای سطح زمین، V شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) هستند. مدل رگرسیونی با مقدار R^2 = ۰/۶۱ و آزمون آماری F قابل قبول به‌دست آمد (SignF=۴/۳×۱۰$^{-۲۴۸}$, P-value <۰/۰۵). این نتایج، نشان‌دهنده مناسب بودن مدل ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی است.

ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک سطحی بر اساس مشاهدات سنجنده AMSR2 (وضوح ۲۵ کیلومتر) و نیز مقادیر ریزمقیاس شده (وضوح یک کیلومتر) با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی در هر ایستگاه، از طریق محاسبه MAE، RMSE و R در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده شد که نتایج به‌دست آمده از رطوبت خاک سنجنده AMSR2 در بیشتر ایستگاه‌ها مطلوب نبودند، به‌خصوص برای ایستگاه‌هایی که در فاصله بیشتری از مرکز پیکسل ۲۵ کیلومتری واقع شده بودند (ایستگاه‌های ۱ ، ۲ ، ۳ و ۷). نتایج به‌دست آمده از مطالعه اولیویری و همکاران (۱۶) نیز نشان داد، با افزایش فاصله ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت از مرکز پیکسل ماهواره‌ای، ضریب همبستگی کاهش و میزان خطا افزایش یافت. به‌جز عامل فاصله ایستگاه از مرکز پیکسل، در هر پیکسل عواملی مانند تغییرات در تراکم پوشش گیاهی، نحوه استفاده از زمین، توپوگرافی، بارش و خواص خاک، بر میزان همبستگی بین داده‌ها با مقیاس درشت و اندازه‌گیری‌های زمینی تأثیرگذار هستند (۱۶).

محصولات ماهواره‌ای رطوبت خاک (با وضوح ۲۵ کیلومتر) میانگین مکانی سطح وسیعی را نشان می‌دهند و اختصاص این داده‌ها به کلیه نقاطی که درون آن قرار گرفته، با وجود موفقیت‌آمیز بودن در برخی ایستگاه‌ها، مؤثر نیست، لذا نیاز به کاهش مساحت با روش ریزمقیاس‌سازی است (۸). در برخی از مطالعات، در فرایند ریزمقیاس‌سازی، از پارامترهایی مانند بافت خاک، توپوگرافی و خصوصیات پوشش گیاهی در فرایند ریزمقیاس‌سازی، برای مقیاس‌های کوچک، استفاده شده است

جدول ۲. ارزیابی داده‌های معمولی و ریزمقیاس شده AMSR2

ایستگاه	فاصله (کیلومتر)	رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 (وضوح ۲۵ کیلومتر)			رطوبت خاک سطحی ریزمقیاس شده (وضوح ۱ کیلومتر)		
		MAE	RMSE	R	MAE	RMSE	R
۱	۵/۸۴	۰/۰۲۸	۰/۰۳۰	۰/۴۷۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۷۴۲
۲	۸/۴۶	۰/۰۹۲	۰/۰۹۴	۰/۴۰۰	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۸۷۶
۳	۹/۷۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۴	۰/۳۵۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۷۱۵
۴	۲/۱۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰	۰/۷۸۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۷۰۷
۵	۱/۹۷	۰/۰۲۷	۰/۰۲۹	۰/۷۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۷۸۲
۶	۲/۵۸	۰/۰۳۷	۰/۰۴۰	۰/۴۹۱	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱	۰/۵۳۸
۷	۱۴/۲۷	۰/۰۵۰	۰/۰۵۱	۰/۲۳۲	۰/۰۲۶	۰/۰۳۲	۰/۷۹۳
۸	۲/۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۶۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۷۳۵
۹	۳/۴۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۶۶۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۸۰۲
۱۰	۱/۰۶	۰/۰۴۲	۰/۰۴۳	۰/۷۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۷۰۵
میانگین	۵/۱۸	۰/۰۳۹	۰/۰۴۰	۰/۵۴۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۷۳۹

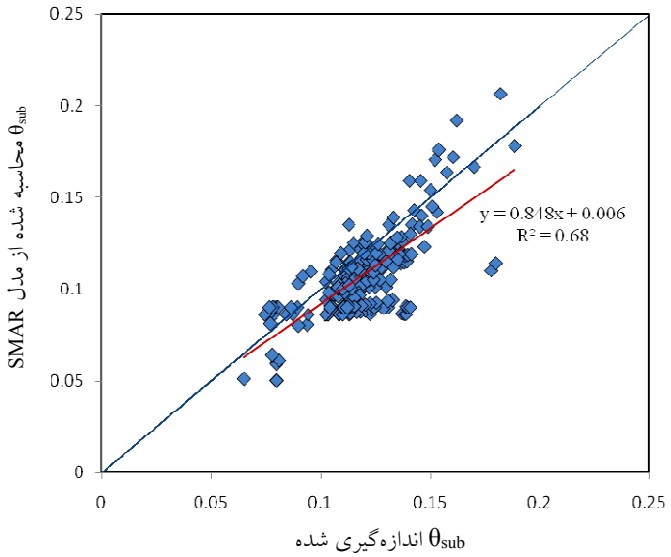
(۳، ۶ و ۱۹). از آنجا که، برقراری ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک با ویژگی‌های مبتنی بر بافت خاک و توپوگرافی، نیازمند مشاهدات گسترده است، لذا کاربرد این روش ریزمقیاس‌سازی را در مقیاس‌های بزرگ (به‌علت عدم وجود یا کمبود داده‌های اندازه‌گیری) محدود است. داده‌های سنجنده مودیس، به‌صورت جهانی و روزانه با وضوح یک کیلومتر موجود هستند، همچنین نتایج حاصل از مطالعات پیشین درخصوص ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سنجنده‌های مایکروویو با وضوح ۲۵ کیلومتر به یک کیلومتر (بر اساس پارامترهای مودیس)، بیانگر بهبود نتایج به دست آمده از رطوبت خاک سطحی بود (۵ و ۱۸). در این پژوهش نیز پس از انجام ریزمقیاس‌سازی، نتایج مشابهی گرفته شد، به‌طوری که در ایستگاه‌های۱، ۲ ، ۳ و ۷ مقادیر ضریب همبستگی به‌ترتیب از ۰/۴۷۳، ۰/۴۰۰، ۰/۳۵۰ و ۰/۲۳۲ به ۰/۷۴۲، ۰/۸۷۶، ۰/۷۱۵ و ۰/۷۹۳ افزایش و MAE و RMSE کاهش یافت و مقادیر میانگین کل ایستگاه‌ها برای R، MAE و RMSE به‌ترتیب از ۰/۵۴۰، ۰/۰۳۹ و ۰/۰۴۰ به ۰/۷۳۹، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۲۰ تغییر یافت. در این پژوهش می‌توان چنین اظهار کرد که روش ریزمقیاس‌سازی با استفاده از پارامترهای سنجنده مودیس، تطابق مناسب‌تری با داده‌های اندازه‌گیری شده برقرار کرده است.

برآورد رطوبت خاک منطقه ریشه بر اساس مدل SMAR

مقادیر رطوبت خاک منطقه ریشه (θ_{sub}) حاصل از مدل SMAR با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه‌ها، مورد مقایسه قرار گرفتند و نتایج در جدول ۳ ارائه شد. مشاهده شد، در اکثر ایستگاه‌ها مدل با دقت مطلوبی رطوبت منطقه ریشه را برآورد کرده است (مقادیر میانگین کل ایستگاه‌ها برای R، MAE و RMSE به ترتیب ۰/۷۵۳، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ به‌دست آمد). به‌طور کلی اگر داده‌های رطوبت خاک سطحی استفاده شده در مدل SMAR، با مقادیر اندازه‌گیری شده آن تطابق خوبی داشته باشند، نتایج این مدل در پیش‌بینی رطوبت خاک منطقه ریشه قابل قبول است (۸). در این پژوهش نیز نتایج به‌دست آمده مؤید همین نکته است، به‌طوری که در ایستگاه ۲ به‌علت اینکه مدل ریزمقیاس‌سازی،

جدول ۳. ارزیابی داده‌های رطوبت خاک ناحیه ریشه مدل SMAR

ایستگاه	فاصله (کیلومتر)	رطوبت ناحیه ریشه SMAR		
		MAE	RMSE	R
۱	۵/۸۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۸۲۹
۲	۸/۴۶	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۶۲۸
۳	۹/۷۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۷۵۱
۴	۲/۱۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۱	۰/۵۸۹
۵	۱/۹۷	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۷۶۷
۶	۲/۵۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۵۱۳
۷	۱۴/۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۸۹۳
۸	۲/۳۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۸۸۷
۹	۳/۴۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۹۰۳
۱۰	۱/۰۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۰/۷۷۰
میانگین	۵/۱۸	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۷۵۳



شکل ۳ . مقادیر رطوبت خاک ناحیه ریشه (θ_{sub}) به‌دست آمده از مدل SMAR در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده

رطوبت خاک سطحی را با میزان خطای بیشتری، در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها، برآورد کرده است (جدول۲)، مقادیر MAE و RMSE در برآورد رطوبت منطقه ریشه نیز بیشتر از سایر ایستگاه‌ها به‌دست آمد. در شکل ۳ مقادیر رطوبت خاک ناحیه ریشه به‌دست آمده از مدل SMAR در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده ارائه شده است. در اکثر موارد تفاوت به‌دست آمده محدود و ناچیز است و همبستگی به‌نسبت خوبی بین مقادیر مشاهده شد. بنابراین مدل SMAR برآوردهای معقولی از رطوبت ناحیه ریشه را فراهم کرده است و

مطابق بر مطالعات پیشین می‌توان بیان کرد که‌این مدل مناسب پایش رطوبت خاک منطقه ریشه به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۸ و ۱۵).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به توسعه مدل تخمین رطوبت خاک منطقه ریشه SMAR ، در پیکسل‌های یک کیلومتری در دشت رفسنجان پرداخته شد. ابتدا محصولات رطوبت خاک سطحی سنجنده مایکروویو AMSR2 با وضوح ۲۵ کیلومتر،توسط داده‌های سنجنده مودیس به وضوح یک کیلومتر ریزمقیاس شدند. نتایج نشان داد که داده‌های رطوبت خاک سطحی به‌دست آمده از این روش ریزمقیاس‌سازی، تطابق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده برقرار کرد، که این مورد با نتایج مطالعات پیشین مطابقت داشت (۵ و ۱۸). به‌طوری که پس از ریزمقیاس‌سازی میزان ضریب همبستگی افزایش و خطاها کاهش یافتند. از آنجا که مدل SMAR دارای عملکرد خوبی در تخمین میزان رطوبت در عمق خاک است (۲، ۸ و ۱۵)، لذا در این پژوهش به‌منظور دستیابی به مقادیر رطوبت خاک منطقه ریشه برای پیکسل‌های یک کیلومتری دشت رفسنجان، از مدل ریزمقیاس شده رطوبت سطحی بر اساس پارامترهای سنجنده مودیس در مدل SMAR استفاده شد و نتایج حاصل با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه‌ها مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. مشاهده شد، در اکثر ایستگاه‌ها مدل توانسته با دقت بالایی رطوبت منطقه ریشه را برآورد کنید.

پیشنهاد می‌شود، به‌منظور بهبود محصولات ریزمقیاس شده رطوبت، متغیرهای مؤثر بر محصول ریزمقیاس شده مانند بارش، در ریزمقیاس‌سازی لحاظ شود. تأثیر شاخص‌های گیاهی دیگری چون شاخص نسبت مادون قرمز ساده (Simple Ratio Infrared Index) یا شاخص گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI) بر بهبود کیفیت محصولات ریزمقیاس شده مورد مقایسه قرار گیرد و شاخص مناسب استفاده شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، برای اعتبارسنجی محصولات AMSR2 و مقادیر ریزمقیاس شده رطوبت خاک در منطقه، تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی توسط شبکه‌ای متراکم از حسگرها در داخل منطقه‌ای که یک پیکسل AMSR2 پوشش می‌دهد، با استفاده از آنالیز حساسیت بهینه‌سازی شود. همچنین برای افزایش دقت برآورد مدل SMAR پارامترهای دیگر مؤثر در مدل (مانند ضریب تلفات نفوذ و تبخیر و پارامترهای مربوط به بافت خاک)، به‌صورت دقیق‌تر برای هر پیکسل از دشت رفسنجان تعیین و با داده‌های اندازه‌گیری بهینه شوند.

سپاسگزاری

از همکاری‌های شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Ansari, H. and M. Hassanpour. 2015. Design and construction of REC-P55 for reading of soil moisture, temperature and salinity. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 9(1): 32-43. (In Farsi).
2. Baldwin, D., S. Manfreda, K. Keller and E. A. H. Smithwick. 2016. Predicting root zone soil moisture with soil properties and satellite near-surface moisture data at locations across the United States. *Journal of Hydrology* 546: 393-404.
3. Busch, F. A., J. D. Niemann and M. Coleman. 2012. Evaluation of an empirical orthogonal function-based method to downscale soil moisture patterns based on topographical attributes. *Hydrological Processes* 26(18): 2696-2709.
4. Chauhan, N. S., S. Miler and P. Aradny. 2003. Spaceborn soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing* 24(22): 4599-4622.
5. Choi, M. and Y. Hur. 2012. A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products. *Remote Sensing of Environment* 124: 259-269.
6. Coleman, M. L. and J. D. Niemann. 2013. Controls on topographic dependence and temporal instability in catchment-scale soil moisture patterns. *Water Resources Research* 49(3): 1625-1642.

7. Das, N. N. and B. P. Mohanty. 2006. Root zone soil moisture assessment using passive microwave remote sensing and vadose zone modeling. *Vadose Zone Journal* 5: 296-307.
8. Faridani, F., A. Farid, H. Ansari and S. Manfreda. 2016. Estimation of the root-zone soil moisture using passive microwave remote sensing and SMAR Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143(1): 04016070.
9. Gao, H., E. F. Wood, T. J. Jackson, M. Drusch and R. Bindlish. 2006. Using TRMM/TMI to Retrieve Surface Soil Moisture over the Southern United States from 1998 to 2002. *Journal of Hydrometeorology* 7: 23-38.
10. Georgakakos, K. P. 1996. Soil moisture theories and observations (special issue*). Journal of Hydrology* 184: 131-152.
11. Hihara, T., M. Kubota and A. Okuro. 2015. Evaluation of sea surface temperature and wind speed observed by GCOM-W1/AMSR2 using in situ data and global products. *Remote Sensing of Environment* 164: 170-178.
12. Jensen, J. R. 1999. Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective. Pearson.
13. Kawaguchi, M. and T. Yoshida. 2013. Regular observation by Global Change Observation Mission 1st-Water GCOM-W1 (Shizuku*). NEC Technical Journal* 8(1): 32-35.
14. Laio, F., A. Porporato, C. P. Fernandez-Illescas and I. Rodriguez-Itrube. 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: IV. Discussion of real cases. *Advances in Water Resources* 24(7): 745-762.
15. Manfreda, S., L. Brocca, T. Moramarco, F. Melone and J. Sheffield. 2014. A physically based approach for the estimation of root-zone soil moisture from surface measurements*. Hydrology and Earth System Sciences* 18(3): 1199-1212.
16. Olivieri, J. N., J. Muñoz-Barreto, R. Tirado-Corbalá, T. Lakhankar and A. Fisher. 2017. Comparison and downscale of AMSR2 soil moisture products with in-situ measurements from the SCAN-NRCS network over Puerto Rico. *Hydrology* 4(4): 46. doi:10.3390/hydrology4040046.
17. Peng, J., A. Loew, O. Merlin and N. E. C. Verhoest. 2017. Review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics* 55(2): 341-366.
18. Piles, M., A. Camps and M. Vall-llossera, I. Corbella, R. Panciera, C. Rudiger, Y. H. Kerr and J. Walker. 2011. Downscaling SMOS-Derived soil moisture using MODIS visible/infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(9): 3156-3166.
19. Ranney, K. J., J. D. Niemann, B. M. Lehman, T. R. Green and A. S. Jones. 2015. A method to downscale soil moisture to fine resolutions using topographic, vegetation, and soil data. *Advances in Water Resources* 76: 81-96.
20. Sánchez-Ruiz, S., M. Piles, N. Sánchez, J. Martínez-Fernández, M. Vall-llossera and A. Camps. 2014. Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology* 516: 273-283.
21. Soulis, K. X., S. Elmaloglou and N. Dercas. 2015. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. Agric. Water Manag 148: 258-268.
22. Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung. 1986. Microwave Remote Sensing, Active Passive – Volume III. Artech House, Remote Sensing Series.
23. Wagner, W., G. Lemoine and H. Rott. 1999. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data*. Remote Sensing of Environment* 70: 191-207.
24. Zhuo, L. and D. Han. 2016. The relevance of soil moisture by remote sensing and hydrological modelling *.Procedia Engineering* 154: 1368-1375.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 24, No. 1. Spring 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Estimation of Soil Moisture using Downscaling Soil Moisture Method of Microwave Sensor and the SMAR Model (A Case Study: Rafsanjan Plain)

M. Farokhi, H. Ansari* and A. R. Faridhoseini[1]

(Received: March 18-2019; Accepted: July 9-2019)

Abstract

Estimation of soil moisture at various temporal and spatial scales is a key to the strategic management of water resources. Satellite-based microwave observations have coarse spatial resolution despite widespread and continuous of the provision surface soil moisture (SSM). In this study, the SSM data from the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) 25km resolution were used and these products were downscaled by three parameters retrieved from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) to 1km resolution. In the next step, the integration of the SSM downscaling model with SMAR model was used to monitor the root zone soil moisture(RZSM) in the study area (Rafsanjan plain). In order to evaluate the performance of the proposed method, the SSM and the soil profile moisture were measured at 10 points in the Rafsanjan plain. Comparison of AMSR2 25k SSM and downscaled SSM with the field measurement data showed that the mean of total stations for the correlation coefficient(R) was increased from 0.540 to 0.739 and the mean absolute error(MAE) and the root mean square(RMSE) were reduced from 0.039 and 0.040 to 0.018 and 0.020, respectively. Moreover, the results obtained from the validation of the RZSM values showed that the proposed method could estimate the RZSM with high accuracy and indicate the variations.

Keywords: Downscaling, MODIS, Remote sensing.

1 Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*: Corresponding author, Email: ansary@um.ac.ir