

مقاله پژوهشی

ریزمقیاس نمایی تصاویر بازیابی میکروویو غیرفعال رطوبت خاک در ابعاد مزرعه

محمد فشائی^۱ - سیدحسین ثنائی نژاد^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

چکیده

رطوبت خاک از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات منابع آب و کشاورزی برخوردار است. طیف الکترومغناطیس مایکروویو، محدودیت‌های فیزیکی سایر امواج رادیومتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک را ندارد، اما غالباً دارای ابعاد پیکسل بسیار بزرگ (بیش از ۱۰ کیلومتر) هستند. در این پژوهش به منظور کاربرد داده‌های رطوبت خاکی دورسنجی در مقیاس مزرعه، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک در محدوده دشت نیشابور طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸، واسنجی داده‌های بازیابی سنجنده AMSR2 انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات ارتفاعی و پوشش گیاهی از جمله عوامل کلیدی تاثیرگذار بر دقت واسنجی به شمار می‌آیند. مبتنی بر نظریه اینرسی حرارتی و با کمک تصاویر سنجنده مودیس، اندرکنش‌های میانگین روزانه رطوبت خاک و اختلاف دمای روزانه سطح زمین در دو سنجنده MODIS و AMSR2 بررسی شد و با استفاده از آن روابط خطی ریزمقیاس نمایی تصاویر رطوبت خاک برای تبدیل ابعاد تصویر از ۲۵ کیلومتر به ۱۰۰۰ متر به دست آمد. بررسی شاخص‌های آماری R^2 با کمینه ۰/۷۳ و بیشینه ۰/۸۴، MAE و RMSE با دامنه تغییرات ۱/۶ تا ۴، نشان داد که الگوریتم استفاده شده در ریزمقیاس نمایی به خوبی قادر به بازتاب اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی بوده و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های هواشناسی کشاورزی تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: امواج مایکروویو، رطوبت خاک سطحی، سنجنش از دور، شاخص پوشش گیاهی، AMSR2

(2014).

مقدمه

با توسعه سریع فناوری سنجنش از دور، دستیابی به داده‌های رطوبت خاک در مقیاس‌های بزرگ نیز سرعت یافت و الگوریتم‌های متعددی برای تولید داده‌های رطوبت خاک توسعه یافت. این الگوریتم‌ها غالباً مبتنی بر تصاویر طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک یا تابش‌های مایکروویو هستند. به ویژه اخیراً استفاده از اندازه‌گیری مایکروویو فعال و غیرفعال نیز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. البته باید به این نکته توجه داشت که ابزارهای سنجنش از دور غالباً قادر به اندازه‌گیری رطوبت سطح خاک هستند (Chen et al., 2016). تکنیک‌های سنجنش از دور معمولاً داده‌های رطوبت خاک را برای یک گستره مکانی بزرگ و با قدرت تفکیک زمانی متوسط برای سطح زمین با هزینه‌های اندک ارائه می‌کنند (Mohanty et al., 2017). تخمین‌های رطوبت خاک غالباً از سه منبع مایکروویو، نوری و حرارتی تامین می‌شود (Peng and Loew., 2017). اغلب الگوریتم‌های مبتنی بر رطوبت خاک ماهواره‌ای، متکی بر تصاویر مایکروویو غیرفعال (Njoku et al., 2003)، مایکروویو فعال (Takada et al., 2009)، یا ترکیبی از داده‌های چندین سنجنده هستند (Entekhabi et al., 2010; Kim and Hogue, 2012). در مقایسه با سنجنش از دور مایکروویو غیرفعال، سنسورهای حرارتی/نوری دارای توانایی

دید جامع و یکنواخت از نواحی مختلف زمین و تصویربرداری مکرر از مناطق وسیع و غیر قابل دسترس به همراه اطلاعات با فواصل زمانی منظم، علاوه بر هزینه کم و سهولت تهیه داده‌ها از ویژگی‌های مهم سیستم‌های سنجنش از دور است که جایگاه آن را در تعیین خصوصیات سطحی خاک مانند رطوبت، متمایز کرده است. رطوبت خاک یکی از اجزای اصلی چرخه آب در طبیعت بوده و در پایش و پیش‌بینی خشکسالی به ویژه در اکوسیستم‌های کم‌آب نقش کلیدی ایفا می‌کند (Moran et al., 2007; D'Odorico et al., 2004; Peters-Lidard, 2008). با توجه به اینکه رطوبت خاک بر رشد گیاه و عملکرد آن تاثیر می‌گذارد لذا اغلب برای پایش خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین رطوبت خاک یک متغیر ویژه مهم برای نظارت بر پایداری و توسعه خشکسالی است (AghaKouchak, Wilhite, 2005; Boken et al., 2005).

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*) نویسنده مسئول: (Email: sanaein@gmail.com)

وانگ و همکاران تصاویر بزرگ مقیاس (۲۵ کیلومتر) رطوبت خاک به دست آمده از داده‌های مایکروویو را از طریق ادغام با تصاویر خشکی دما- پوشش گیاهی (TVDI) سنجنده مودیس، کوچک مقیاس (۱۰ کیلومتر) کردند (Wang et al., 2016). غفاری و همکاران (۱۳۹۹) نیز رطوبت خاک ماهواره فعال- غیرفعال رطوبت خاک (SMAP) را با استفاده از داده‌های MODIS ریزمقیاس کردند.

برخی دیگر از پژوهشگران نیز از داده‌های دورسنجی مایکروویو رطوبت خاک برای کاربرد در سایر حوزه‌ها بهره‌برده‌اند. به طور مثال عدنان و همکاران از داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR-E (عمق ۱ سانتی متری خاک) برای واسنجی مدل SWAT در چند حوضه آبریز در ایالت ایندیانا استفاده کردند (Adnan et al., 2016). مارتینز فرناندز و همکاران با استفاده از شاخص خشکی رطوبت خاک (SWDI) به دست آمده از داده‌های رطوبت خاک سنجنده SMOS خشکی کشاورزی را در اسپانیا پایش کردند (Martinez-Fernández et al., 2016). ژانگ و همکاران روشی را به منظور محاسبه شاخص SMSI (شاخص رطوبت اشباع خاک) با استفاده از داده‌های ماهواره MSG-SEVIRI ارائه کردند (Zhang et al., 2014). همچنین ژو و همکاران برای برآورد شاخص کمبود آب خاک (SWDI)، از مجموعه داده رطوبت خاک رادیومتر متر باند L سطح ۲ استفاده کردند (Zhu et al., 2019).

اگرچه رطوبت خاک را در مقیاس کوچک توسط سنسجش از دور مایکروویو فعال نیز می‌توان بازیابی کرد، اما استفاده از داده‌های سنسجش از دور فعال برای تخمین رطوبت خاک به دلیل وابستگی زیاد این داده‌ها به زبری سطح و پوشش گیاهی به سختی امکان‌پذیر است و تخمین‌های رطوبت خاک بازیابی شده از این طریق، دارای عدم قطعیت بیشتری هستند (Jagdhuber et al., 2019).

در این پژوهش با هدف دورسنجی رطوبت خاک برای کاربرد در علوم کشاورزی، داده‌های بازیابی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال سنجنده AMSR2 مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، استفاده از داده‌های میدانی برای واسنجی تصاویر سنجنده AMSR2 و سپس ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها مبتنی بر نظریه اینرسی حرارتی و با کمک تصاویر سنجنده MODIS، ضرورت یافت.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز نیشابور در طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه واقع شده است. وسعت کل حوضه آبریز دشت نیشابور حدود ۷۳۵۰ کیلومتر مربع است. دشت نیشابور با وسعت ۳۴۷۷ کیلومتر مربع، ۴۷/۴۴ درصد مساحت حوضه آبریز نیشابور را تشکیل می‌دهد. (ولایتی، ۱۳۷۸)

بازیابی رطوبت خاک سطحی در مقیاس مکانی کوچک‌تر هستند. هرچند داده‌های ماهواره‌های حرارتی/انوری حساسیت بیشتری به عوامل محیطی از قبیل شرایط هواشناسی و پوشش گیاهی و وجود ابر و غبار دارند (Adegoke and Carleton, 2002).

اصول رطوبت خاک به دست آمده از تصاویر مایکروویو غیرفعال بستگی به رابطه بین گذردهی خاک و مقدار آب در خاک دارد. روابط تجربی وجود دارند که دمای روشنایی مایکروویو غیرفعال را به رطوبت خاک مرتبط می‌سازند (Wang and Qu, 2009). کیم و همکاران دلایل تفاوت نتایج دو مدل پرکاربرد بازیابی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 که یکی به نام JAXA و دیگری LPRM نامیده می‌شود را بررسی کردند (Kim et al., 2015). نتایج حاکی از آن بود که روش LPRM از خطای RMSE کمتری نسبت به JAXA برخوردار است.

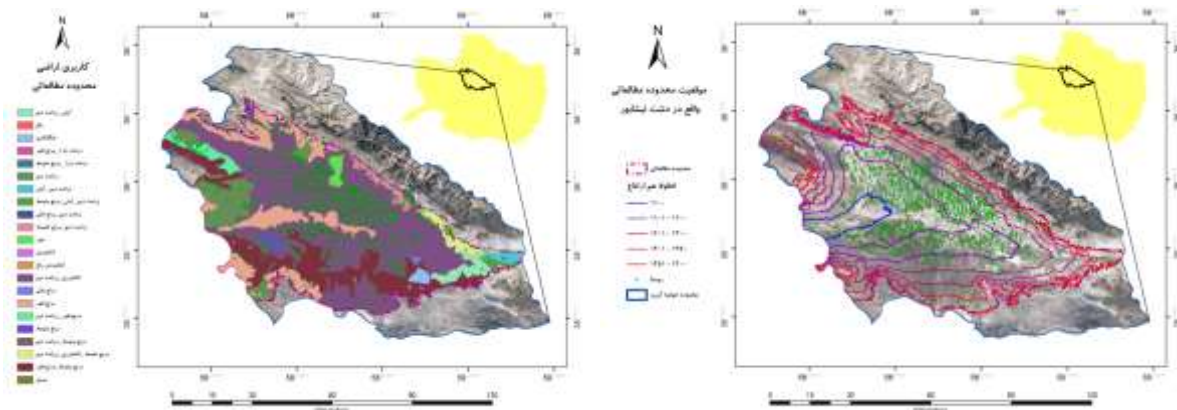
در حال حاضر ماهواره‌های متعددی مانند SMAP، SMOS، AMSRE، ASCAT و ESA GGI وجود دارند که موفق شده‌اند با فاصله زمانی ۲ تا ۳ روزه بازیابی رطوبت سطحی خاک را ارائه کنند (Chen and Wang, 2018; Montzka et al., 2017).

ضخامت بسیار کم لایه سطحی (۲ تا ۷ سانتی‌متر) که توسط ماهواره سنسجش می‌شود، مقیاس بزرگ تصاویر ماهواره‌ای (حدود ۲۰ کیلومتر) و کیفیت پایین در شرایط خاص مثل پوشش گیاهی متراکم و کوهستانی بودن مناطق جزو بزرگ‌ترین محدودیت‌های فعلی تکنیک‌های تخمین رطوبت خاک با استفاده از سنسجش از دور هستند (Dostálová et al., 2014; Brocca et al., 2017). به همین دلیل بخشی از پژوهش‌ها در حوزه رطوبت خاک و هواشناسی کشاورزی به ویژه در سال‌های اخیر به اعتبارسنجی، ریزمقیاس‌نمایی و یا تلفیق داده‌های سایر سنجنده‌های منابع طبیعی با تصاویر مایکروویو رطوبت خاک اختصاص یافته تا بتوان برای کاربری‌های مختلف از آن بهره برد.

برخی از پژوهشگران اقدام به اعتبارسنجی و ریزمقیاس‌نمایی تصاویر به روش‌های مختلف کرده‌اند. به طور مثال جامعی و همکاران (۱۳۹۶)، بازیابی‌های رطوبت خاک ماهواره اسموس را در پنج محدوده مطالعاتی غرب و جنوب غربی کشور اعتبارسنجی کردند و دریافتند بین برآوردهای رطوبت خاک اسموس و اندازه‌گیری‌های زمینی همبستگی خوبی (R: 0.75 - 0.88) وجود دارد. و یا فرخی و همکاران (۱۳۹۸)، داده‌های رطوبت خاک سطحی حاصل از سنجنده AMSR2 را مورد استفاده قرار داده و با اندازه‌گیری‌های زمینی برای دشت رفسنجان، مقایسه کردند. همچنین فنگ و لاکشمی بر اساس رابطه اینرسی حرارتی مابین تغییرات دمای روزانه و متوسط رطوبت خاک ترکیب شده با شرایط پوشش گیاهی، موفق به ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده SMOS و AMSR-E از ۲۵ کیلومتر به ۱ کیلومتر شدند (Fang and Lakshmi, 2014). در پژوهشی دیگر

کاربری اراضی و موقعیت روستاها نمایش داده شده است. بخش اعظم محدوده مطالعاتی به زراعت دیم و مراتع فقیر و متوسط اختصاص یافته است. توزیع جغرافیایی روستاها در این شکل می تواند به عنوان یک شاخص برای تحلیل بصری مطلوب بودن آب و خاک مورد توجه باشد.

در این پژوهش بخشی از دشت مورد استفاده قرار گرفت که دامنه تغییرات ارتفاع در آن از حدود ۳۰۰ متر تجاوز نکند. در این محدوده انواع کاربری اراضی شامل باغی، زراعی، کشاورزی دیم و آبی، مرتع فقیر و متوسط، درختزار، آیش، اراضی بایر، شهری و روستایی و ... در انواع دانه بندی خاک از ریزدانه تا درشت دانه به چشم می خورد. در شکل ۱ نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی، خصوصیات توپوگرافی،



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی، خصوصیات توپوگرافی، کاربری اراضی و موقعیت روستاها در محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور

(۳۶/۵ گیگاهرتز) سنجنده AMSR2 به دست آمده است (De Jue and Owe, 2014). به منظور برآورد دو متغیر رطوبت خاک و دمای سطحی در محدوده مطالعاتی، از محصول فوق در دو گذر روز و شب استفاده شده است. تصاویر در بازه زمانی ۲۲ نوامبر ۲۰۱۷ (۱ آذر ۱۳۹۶) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۸ (۱۵ خرداد ۱۳۹۷) و ۱ آوریل ۲۰۱۹ (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۹ (۱۵ خرداد ۱۳۹۸) از وب سایت داده های زمین به نشانی <https://search.earthdata.nasa.gov> برای تمام روزها در بازه زمانی مذکور با فرمت NETCDF4 دریافت شده است.

ب) سنجنده MODIS: با توجه به ابعاد بزرگ تصاویر رطوبت خاک و دمای سطحی سنجنده AMSR2 (۲۵ کیلومتر) و از آنجایی که این داده ها در مقیاس مزرعه (کمتر از ۱۰۰۰ متر) مورد نیاز است لذا در این پژوهش پس از استخراج و واسنجی داده های رطوبت خاک سنجنده AMSR2، عملیات ریزمقیاس نمایی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس انجام شده است. محصول دمای سطح زمین (LST: Land Surface Temperature) یکی از محصولات روزانه سنجنده مودیس در گروه MOD11 است که با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و با استفاده از الگوریتم روزنه مجزا (Split Window) بازیابی می شود. همچنین شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که در فواصل ۱۶ روزه و در تفکیک های مکانی متنوع تولید می شود، نیز در محصول MOD13 سنجنده مودیس ارائه می شود. هر دو محصول فوق در ابعاد ۱۰۰ متر (LST) و

داده های ماهواره ای

الف) سنجنده AMSR2: سنجنده AMSR2 نسخه جدیدتر سنجنده AMSR-E است که توسط JAXA طراحی و از سال ۲۰۱۲ روی ماهواره GCOM-W1 نصب شد تا گسیلش های ریزموج ضعیف را از سطح و جو زمین اندازه گیری نماید. این سنجنده از ارتفاع ۷۰۰ کیلومتری، اندازه گیری های دقیقی از شدت گسیلش و پراکندگی ریز موج ارائه می دهد. مکانیزم تصویربرداری کانونی، این سنجنده را قادر می سازد تا داده های شب و روز را در پوششی به وسعت ۹۹ درصد سطح زمین در طی ۲ روز ارائه دهد. این سنجنده در فرکانس های مشابه با AMSR-E فعال است. و برای تولید نقشه های بخار آب، آب مایع موجود در ابر، درجه حرارت سطح دریا، سرعت باد سطح دریاها، تمرکز یخ دریا، عمق برف و محتویات رطوبت خاک زمین مناسب است (NOAA, 2020).

محصول LPRM_AMSR2_SOILM3_001 یکی از محصولات سطح سوم سنجنده AMSR2 است که به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ در ۲۵ کیلومتر مربع تولید می شود. پارامترهای سطح زمین شامل دمای سطحی، رطوبت خاک و موجودی آب گیاه توسط داده های مایکروویو غیرفعال سنجنده و با استفاده از الگوریتم بازیابی پارامترهای زمین (LPRM) حاصل می شود. الگوریتم LPRM مبتنی بر یک مدل انتقال تابشی پیش رونده برای بازیابی رطوبت خاک سطحی و عمق نوری پوشش گیاهی عمل می کند. همچنین دمای سطح زمین نیز به صورت مجزا از باند Ka

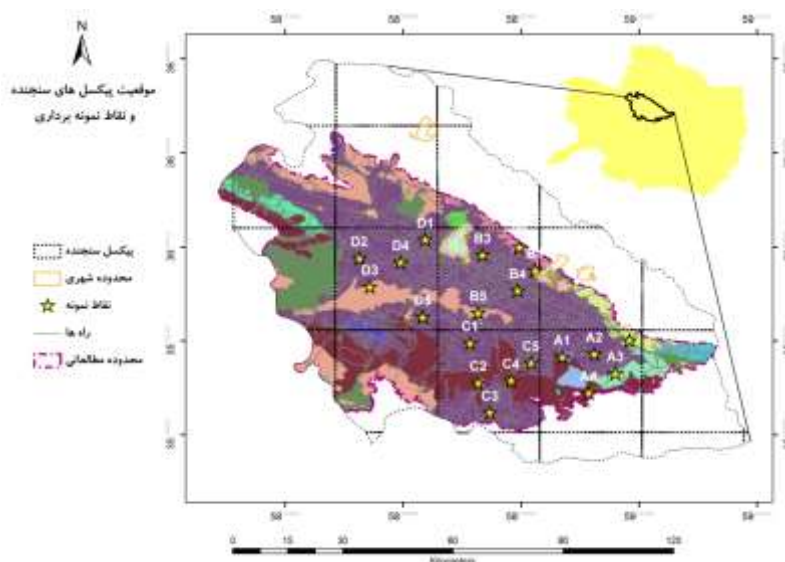
۲۵۰ متر (NDVI) از پایگاه داده‌های زمین دریافت شدند.

+ داده‌های هواشناسی: داده‌های ایستگاه هواشناسی همدیدی نیشابور واقع در بخش شمال شرقی محدوده مطالعاتی شامل بارش ۲۴ ساعته، دمای متوسط روزانه و دمای نقطه شبنم از اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی دریافت شد.

+ **واسنجی اطلاعات رطوبت خاک سنجنده AMSR2:** به منظور واسنجی داده‌های سنجنده AMSR2 پس از بر هم نهادن لایه‌های اطلاعاتی زیر، نقاط نمونه‌برداری در سطح محدوده مطالعاتی تعیین شد: (۱) لایه مرز محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور (۲) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده AMSR2 با ابعاد ۲۵ کیلومتر (۳) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده MODIS با ابعاد ۱۰۰۰ متر (۴) کاربری اراضی (۵) راه‌های اصلی و فرعی با تلفیق لایه‌های فوق در محیط نرم افزار ArcMap 10.5 نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شد که به ازای هر پیکسل سنجنده

AMSR2، ۵ نقطه وجود داشته باشد که این نقاط نماینده کاربری‌های اراضی غالب آن پیکسل باشند. در نهایت ۴ پیکسل که بیشترین پوشش در محدوده مورد نظر را داشتند گزینش شدند. سپس نقاط نمونه‌برداری با فرمت N_i نام‌گذاری شدند. که N نام پیکسل سنجنده AMSR2 واقع در محدوده مطالعاتی است و می‌تواند یکی از حروف A، B، C و D را اختیار کند. i شماره نقطه در هر پیکسل است. اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک به صورت حجمی و به روش آون خشک انجام شده است. در طی مدت پژوهش ۵۶۰ نمونه خاک (۲۰ نمونه در ۲۸ نوبت) جمع‌آوری و اندازه‌گیری رطوبت خاک در محل آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

در شکل ۲ موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری نمایش داده شده است.



شکل ۲- نقشه موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری رطوبت خاک

(Lakshmi, 2014 and). این مدل بر نظریه اینرسی حرارتی استوار است که مقاومت حرارتی یک شی را بیان می‌کند. اینرسی حرارتی متناسب با رسانایی گرمایی، تراکم و ظرفیت گرمایی ویژه مواد است. ظرفیت گرمایی ویژه آب به طور عمومی بیشتر از خاک فاقد پوشش گیاهی است و این بدان معنی است که زمین خشک نسبت به زمین مرطوب سریعتر به تغییرات دما پاسخ می‌دهد. از این ویژگی می‌توان برای تبیین رابطه بین مقدار متوسط روزانه رطوبت خاک و تغییرات دمای سطح زمین استفاده کرد. رابطه خطی زیر بر همین اساس استوار است:

$$\theta_{(s,t)}^{av} = a_0 + a_1 \Delta T_{s(t)} \quad (1)$$

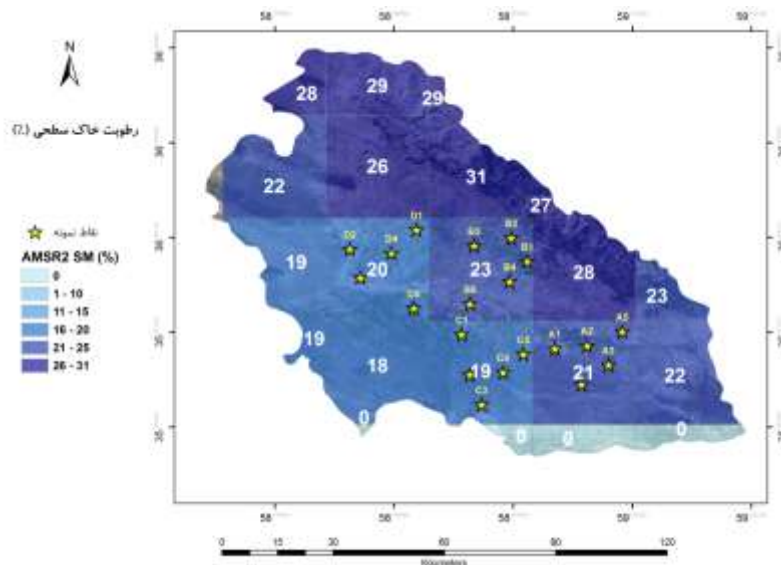
به منظور بررسی رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی؛ ابتدا ضریب وزنی هر یک از نقاط متناسب با مساحت تحت پوشش کاربری اراضی آن نقطه (شکل ۲) محاسبه شده و سپس میانگین وزنی رطوبت حجمی نقاط ۵ گانه داده‌برداری شده در هر پیکسل با مقدار رطوبت خاک به دست آمده از سنجنده AMSR2 مقایسه شده است.

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2: فنگ و همکاران؛ و فنگ و لاکشمی مدلی را برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مایکروویو رطوبت خاک بزرگ مقیاس مبتنی بر دمای سطحی و پوشش گیاهی توسعه دادند (Fang et al., 2013):

نتایج و بحث

واسنجی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2:

شکل ۳ نمونه تصویر پهنبندی داده رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 در تاریخ ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۷ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمونه تصویر پهنبندی داده رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 در تاریخ ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۷

(ستون‌های نارنجی) و محور عمودی سمت چپ نیز بیانگر میزبان بارش ثبت شده در محل ایستگاه هواشناسی بر حسب میلی متر است (ستون آبی). همان‌طور که مشاهده می‌شود هر سه متغیر از روند مشابهی تبعیت کرده و می‌توان گفت تغییرات عامل بارش، تاثیر واضحی بر تغییرات رطوبت خاک In-situ SM و AMSR2 SM داشته است.

در هر سه متغیر یک نقطه اوج در بازه‌های زمانی نیمه اسفند ۱۳۹۶، اواسط اردیبهشت ۱۳۹۷ و اواخر فروردین ۱۳۹۸ به چشم می‌خورد. همچنین متغیر رطوبت خاک از کاهش نزولات جوی در اوایل زمستان ۱۳۹۶ و اوایل بهار ۱۳۹۷ تاثیر پذیرفته است. در شکل ۵ نتایج برآزش رابطه خطی بین In-situ SM و AMSR2 SM نمایش داده شده است.

برآزش رابطه خطی با ضریب شیب خط 0.104 ، عرض از مبدا 3.30 ، و ضریب رگرسیون 0.80 می‌تواند بیانگر وجود ارتباط فیزیکی قوی بین این دو متغیر بوده و با توجه به ضریب شیب خط برآزش یافته که به عدد ۱ نزدیک است می‌توان عمده اختلاف بین داده‌ها را ناشی از بیش برآورد مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنجنده

در رابطه فوق، $\theta_{(s,t)}^{av}$ میانگین رطوبت خاک روزانه (داده ماهواره‌ای یا ایستگاهی)، و $\Delta T_{(s,t)}$ نیز تغییرات روزانه دمای سطحی ثبت شده توسط ماهواره در طول مدت شبانه روز است. a_0 و a_1 به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط برآزش داده شده هستند. ابتدا با استفاده از رابطه فوق ارتباط بین تغییرات روزانه دمای سطحی و رطوبت خاک برآورد شده، سپس از همین رابطه برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از محصول دمای سطحی مودیس استفاده شده است.

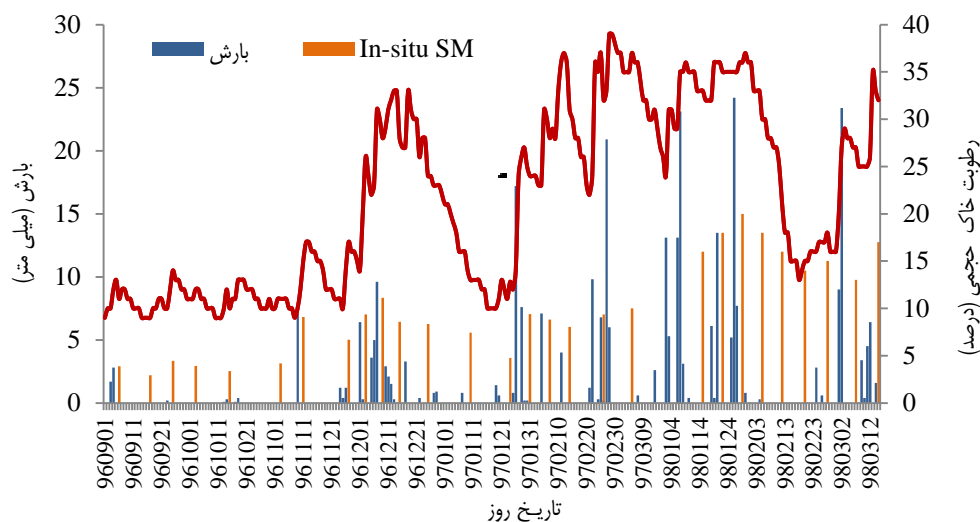
همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، در تاریخ ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۷، مقدار رطوبت خاک در ارتفاعات بیشتر از محدوده دشت است. حداقل مقدار رطوبت حجمی ثبت شده برابر با ۱۸ درصد و حداکثر آن ۳۱ درصد است. مقدار رطوبت در چهار پیکسل A, B, C و D به ترتیب برابر با ۲۱، ۲۳، ۱۹ و ۲۰ درصد است و متوسط رطوبت در این چهار پیکسل برابر با ۲۱ درصد است.

با توجه به اختلاف‌های موجود در نوع پوشش کاربری هر یک از پیکسل‌ها؛ بر این اساس برآزش رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 [که زین پس با نام اختصاری AMSR2 SM یاد می‌شود] ابتدا با میانگین وزنی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی [که زین پس با نام اختصاری In-situ SM نمایش داده می‌شود] به ازای هر پیکسل صورت گرفته و سپس رابطه خطی برای کل محدوده مطالعاتی محاسبه شد.

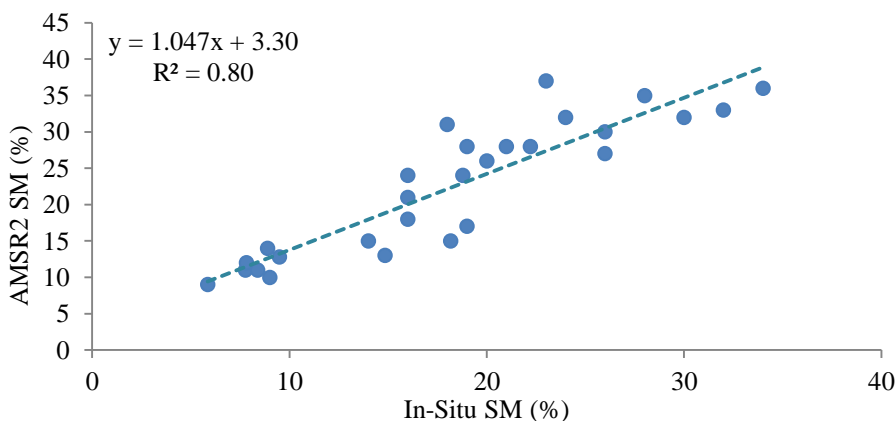
در شکل ۴ نمودار سری زمانی تغییرات سه متغیر بارش، AMSR2 SM و In-situ SM ارائه شده است. محور عمودی سمت راست بیانگر تغییرات متغیر رطوبت خاک حجمی (بر حسب درصد) مربوط به داده‌های ماهواره‌ای (منحنی قرمز) و داده‌های میدانی

میزان همبستگی در پیکسل A با ضریب تبیین ۰/۷۳ به چشم می‌خورد. به منظور ریشه‌یابی دلیل اختلاف واکنش به امواج الکترومغناطیسی در ۴ پیکسل مذکور، اختلاف وضعیت پوشش گیاهی و کاربری اراضی در آن‌ها بررسی شده است. در جدول ۱ خصوصیات آماری دامنه تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در محدوده مطالعاتی مربوط به سنجنده مودیس ارائه شده است.

AMSR2 نسبت به داده‌های میدانی دانست (تقریباً برابر با عرض از مبدا به میزان ۳/۳۰ واحد رطوبت خاک). نتایج برازش رابطه خطی بین داده‌های ماهواره‌ای و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی به ازای هر یک از چهار پیکسل A، B، C و D در شکل ۶ ارائه شده است. در شکل فوق، بیشترین میزان همبستگی بین دو متغیر In-situ SM و AMSR2 SM در پیکسل D با ضریب تبیین ۰/۸۴ و کمترین



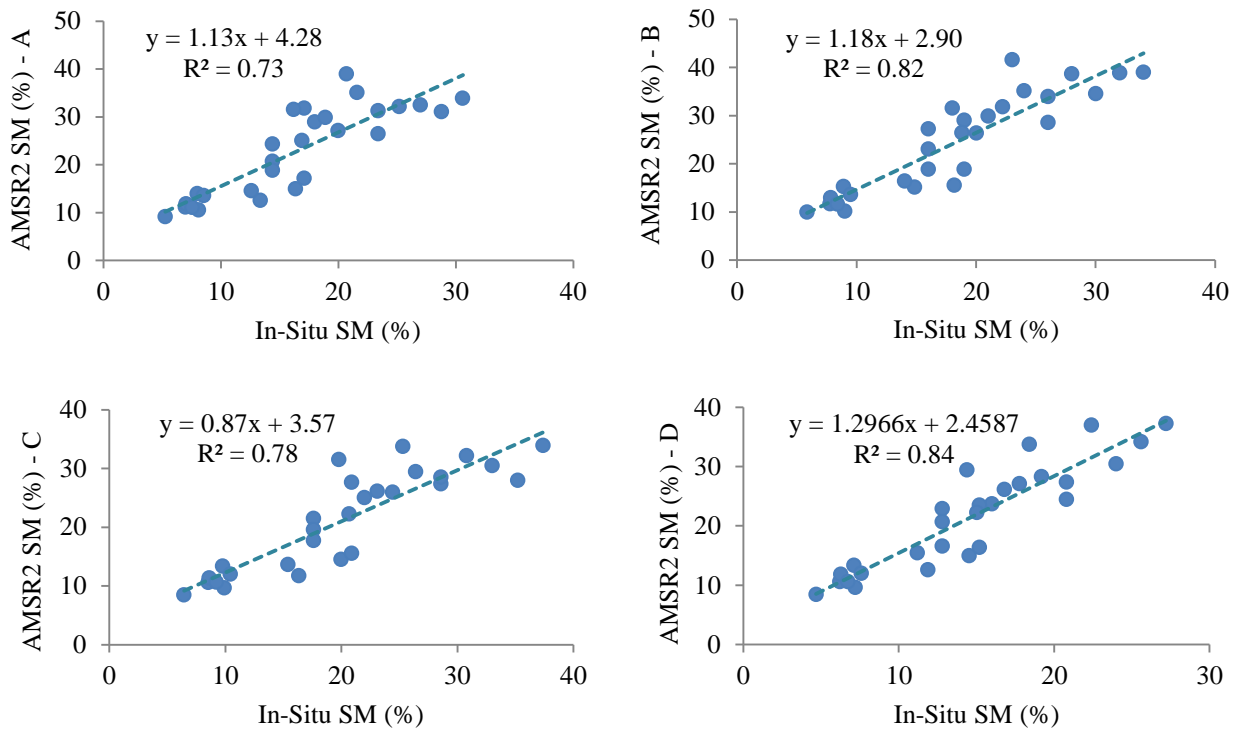
شکل ۴- سری زمانی تغییرات سه متغیر بارش، AMSR2 SM و In-situ SM



شکل ۵- برازش رابطه خطی بین AMSR2 SM و In-situ SM (میانگین پیکسل‌ها)

جدول ۱- خصوصیات آماری تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI در پیکسل‌های A، B، C و D

شاخص پوشش گیاهی (NDVI)				
پیکسل	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
A	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۸
B	۰/۶۲	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۰۶
C	۰/۶۷	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۵
D	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۳



شکل ۶- برازش رابطه خطی مجزا برای ۴ پیکسل A، B، C و D بین In-Situ SM و AMSR2 SM

جدول ۲- خصوصیات آماری برازش رابطه خطی بین In-Situ SM و AMSR2 SM در پیکسل‌های A، B، C و D

نام پیکسل	ضریب تبیین (R2)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	میانگین In-Situ SM
A	۰/۷۳	۴/۰	۳/۳	۱۶
B	۰/۸۲	۳/۸	۳/۲	۱۸
C	۰/۷۸	۲/۱	۱/۶	۲۰
D	۰/۸۴	۳/۹	۳/۴	۱۵

تبین به دست آمده از پیکسل‌های B و D کمتر است اما مقادیر خطای RMSE و MAE کمتری نیز به دست آورده است. لذا می‌توان گفت گرچه رابطه برازش یافته قادر است حداکثر ۷۸ درصد تغییرات رطوبت خاک ماهواره‌ای را با تغییرات داده‌های میدانی تفسیر کند اما خط برازش داده شده رابطه ریاضی مناسبی بین متغیر مستقل و وابسته برقرار کرده و نقاط متناظر کمترین فاصله از این خط را دارا هستند.

در مراحل بعدی این پژوهش از روابط رگرسیون به دست آمده در شکل ۶، به عنوان ضرایب واسنجی داده‌های AMSR2 استفاده شده است.

ریزمقیاس نمایی داده‌های رطوبت خاک: در گام نخست رابطه بین تغییرات روزانه دمای سطحی و رطوبت خاک در سنجنده AMSR2 استخراج شده است. در جدول ۳ شیب خط و عرض از مبدا روابط به دست آمده برای پیکسل‌های A تا D ارائه شده است.

مطابق شکل ۲ و جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشترین تنوع کاربری اراضی در پیکسل A و کمترین آن در پیکسل D به چشم می‌خورد. خصوصیات آماری شاخص NDVI نشان می‌دهد پیکسل A از بیشترین مقدار و پیکسل D از کمترین میزان انحراف معیار برخوردار است. که این می‌تواند بیانگر میزان پراکندگی مقادیر حول میانگین باشد که فزونی آن در پیکسل A بیانگر تنوع و دامنه تغییرات وسیع‌تر پوشش گیاهی است. با بررسی مجدد شکل ۱ می‌توان دریافت بیشترین شیب تغییرات ارتفاع مربوط به پیکسل A و کمترین آن مربوط به D است.

در جدول ۲ خلاصه بررسی شاخص‌های آماری مربوط به دقت برازش رابطه خطی ارائه شده است. در این جدول مقادیر خطاهای RMSE و MAE در محدوده ۱/۶ تا ۴ هستند که می‌توان در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. در پیکسل C با توجه به بیشتر بودن میانگین رطوبت خاک، اگر چه مقدار ضریب

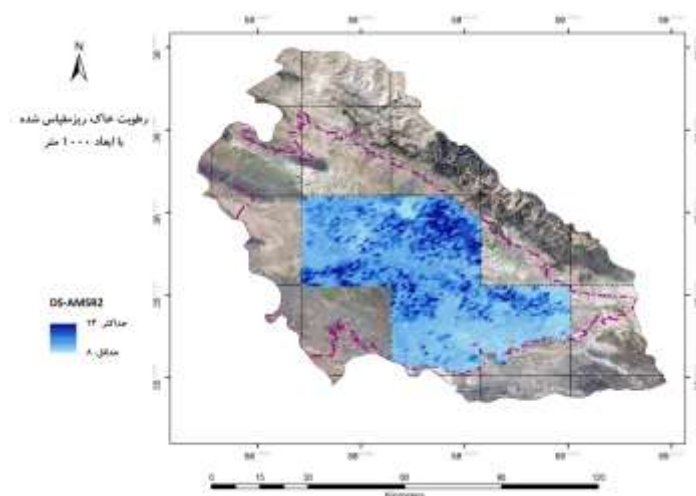
جدول ۳- خصوصیات آماری رابطه خطی تغییرات روزانه دما و

AMSR2 SM			
پیکسل	شیب خط	عرض از مبدأ	ضریب تبیین
A	-۲/۴۴	۳۹/۸	۰/۸۱
B	-۲/۳۰	۴۱/۷۶	۰/۹۵
C	-۲/۶۷	۴۵/۷۳	۰/۸۸
D	-۲/۲۳	۵۰/۹۷	۰/۹۵

از آن جایی که اختلاف روزانه دمای سطحی رابطه عکس با میانگین رطوبت خاک سطحی دارد لذا در جدول ۳ کلیه ضرایب به دست آمده منفی است. همچنین کمترین ضریب تبیین به پیکسل A و بیشترین مقدار آن به پیکسل D و B تعلق دارد. تغییرات دما و

رطوبت خاک هر دو تحت تاثیر عامل ارتفاع و پوشش گیاهی دستخوش تغییر می‌شوند لذا در این مورد نیز مشابه نتایج بخش قبل، می‌توان کمینه و بیشینه ضرایب تبیین را به تفاوت پیکسل‌ها از نظر پوشش گیاهی و دامنه تغییرات ارتفاعی ارتباط داد.

در گام بعدی، از روابط فوق برای محاسبه رطوبت خاک ریزمقیاس شده در ابعاد ۱۰۰۰ متر استفاده شده است. در شکل ۷ نمونه تصویر پهنه بندی شده رطوبت خاک ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 (DS-AMSR2) ارائه شده است. همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از ریزمقیاس‌نمایی، از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک میدانی استفاده شد. در جدول ۴ خلاصه شاخص‌های آماری اعتبارسنجی نتایج ارائه شده است.



شکل ۷- نمونه نقشه پهنه‌بندی رطوبت خاک ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 (DS-AMSR2)

جدول ۴- خصوصیات آماری برازش رابطه خطی بین DS-AMSR2 SM و In-Situ SM در پیکسل‌های A تا D

نام پیکسل	ضریب تبیین (R2)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	میانگین In-Situ SM
A	۰/۸۲	۴/۱	۳/۰	۱۶
B	۰/۹۶	۳/۱	۲/۸	۱۸
C	۰/۸۹	۱/۹	۱/۱	۲۰
D	۰/۹۶	۲/۹	۲/۳	۱۵

سطحی سنجنده AMSR2، با کمک تصاویر مودیس، انطباق مناسبی بر فیزیک آب، خاک و تغییرات دمایی سطح زمین داشته و کاربرد آن موفقیت‌آمیز بوده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نقش کلیدی پارامتر رطوبت خاک در مطالعات منابع آب، هواشناسی، کشاورزی و اقلیم‌شناسی؛ الگوریتم‌های متنوعی

در این جدول گرچه شاخص‌های RMSE و MAE از وضعیت مشابهی برخوردارند اما مقیاس سنجنده AMSR2 برخوردار هستند اما ضرایب تبیین به دست آمده بهبود قابل توجهی پیدا کرده است. اگرچه همچنان کمترین میزان ضریب تبیین مربوط به پیکسل A است اما مقدار آن از ۰/۷۳ در تصاویر بزرگ مقیاس به ۰/۸۲ در تصویر ریزمقیاس شده افزایش پیدا کرده است. نتایج مشابه این جدول با جدول ۲ بهبود نسبی شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که الگوریتم پیاده‌سازی شده برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک

سنجنده AMSR2 با محصولات دورسنجی مودیس به منظور برآورد رطوبت خاک با وضوح بالا، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۶۸۷-۶۹۸: (۲)۱۳

ولایتی، س. ۱۳۷۸. بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات کیفی آبخوان نیشابور، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، (۱۴۹): ۱۳۴-۱۱۹.

Adegoke, J.O., and Carleton, A.M. 2002. Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. *Journal of Hydrometeorology* 3:395-405.

Adnan, M., Merwade, V., and Yu, Z. 2016. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed / in-situ soil moisture. *Journal of Hydrology* 536:192-207.

AghaKouchak, A. 2014. A baseline probabilistic drought forecasting framework using Standardized Soil Moisture Index: Application to the 2012 United States drought. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18(7):2485-2492.

Boken, V.K. 2005. *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study*. Oxford Univ. Press. New York. 496.

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., and Tarpanelli, A. 2017. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. *Water*. 9(2):140.

Chen, J., Wen, J., and Tian, H. 2016. Representativeness of the ground observational sites and up-scaling of the point soil moisture measurements. *Journal of Hydrology* 533:62-73.

Chen, L. and Wang, L. 2018. Recent advance in earth observation big data for hydrology. *Big Earth Data*. 1-22.

De Jue, R.D., and Owe, M. 2014. AMSR2/GCOM-W1 surface soil moisture (LPRM) L3 1 day 25 km x 25 km ascending V001, Edited by Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (Bill Teng). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Greenbelt. MD. USA.

D'Odorico, P., Caylor, K., Okin, G.S., and Scanlon T. M. 2007. On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. *J. Geophys. Res.* 112(G04010).

Dostálová, A., Doubková, M., Sabel, D., Bauer-Marschallinger, B., and Wagner, W. 2014. Seven years of advanced synthetic aperture radar (ASAR) global monitoring (GM) of surface soil moisture over Africa. *Remote Sens.* 6(8):7683-7707.

Entekhabi, D., Reichle, R.H., Koster, R.D., and Crow, W.T. 2010. Performance metrics for soil moisture

توسعه یافته که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم پارامتر رطوبت خاک را با کمک تصاویر ماهواره‌ای در این مطالعات مداخله می‌دهد. در این پژوهش با هدف کاربرد داده‌های بازیابی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال در تخمین رطوبت خاک در مقیاس مزرعه، از تصاویر سنجنده AMSR2 و همچنین تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. در گام نخست محدوده مطالعاتی دشت نیشابور انتخاب و با کمک نمونه‌برداری میدانی، داده‌های استخراج شده از ماهواره واسنجی شد. در گام دوم با استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس نمایی و با کمک تصاویر مودیس، ابعاد تصاویر از ۲۵ کیلومتر به ۱۰۰۰ متر ریزمقیاس و نتایج آن صحت‌سنجی شد.

نتایج واسنجی رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 بیان‌گر آن است که با در نظر گرفتن مقادیر خطاهای برازش رابطه خطی بین داده‌های دورسنجی و اندازه‌گیری شده میدانی، مقدار RMSE و MAE در محدوده ۱/۶ تا ۴ درصد محاسبه شد که می‌توان این میزان خطا را در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. همچنین کمترین ضریب تبیین ۷۳ برای پیکسل A از پیکسل‌های چهارگانه و بیشترین آن ۸۴ درصد برای پیکسل D محاسبه شد و این یعنی حداقل ۷۳ درصد تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی، در داده‌های دریافت شده از سنجنده AMSR2 منعکس شده است. روند تغییرات رطوبت خاک دورسنجی، تطبیق خوبی با روند تغییرات سایر متغیرهای محیطی به ویژه بارش داشت. همچنین این فرضیه تقویت شد که دو عامل پوشش گیاهی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین از جمله عوامل مؤثر در اعتبارسنجی و واسنجی داده‌های دورسنجی رطوبت خاک محسوب می‌شوند. در نهایت می‌توان گفت فرآیندی که در این پژوهش به کار گرفته شد در اقلیم‌های مشابه می‌تواند از نتایج قابل قبولی برخوردار بوده و به ویژه در حوزه کشاورزی که خلا وجود داده‌های پهنه بندی شده رطوبت خاک وجود دارد، تا حد زیادی این خلا را جبران نماید.

منابع

جامعی، م.، موسوی بایگی، م.، علیزاده، ا. و ایران نژاد، پ. ۱۳۹۶. اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک ماهواره مایکروویو اسموس، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۶۶۰-۶۷۲: (۲)۳۱

غفاری، ا.، داوری، ک. و فریدحسینی، ع. ۱۳۹۹. توسعه الگوریتم‌های بهبود یافته برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده ماهواره‌های نوری/حرارتی، نشریه علمی-پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران، ۶۶۰-۶۵۰: (۲)۱۴

فرخی، م.، انصاری، ح. و فرید حسینی، ع. ۱۳۹۸. تلفیق بازیابی‌های

826.

- Njoku, E.G., Jackson, T.J., Lakshmi, V., Chan, T.K., and Nghiem, S.V. 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41(2):215–229.
- NOAA Office of Satellite and Product Operation (OSPO) website, About AMSR-2, https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about_amr2.html. Date of Visit: 2020-05-13.
- Peters-Lidard, C.D., Mocko, D.M., Garcia, M., Santanello, J.A., Tischler, M.A., Moran, M.S., and Wu, Y. 2008. Role of precipitation uncertainty in the estimation of hydrologic soil properties using remotely sensed soil moisture in a semiarid environment. *Water Resour. Res.* 44(W05S18).
- Peng, J., and Loew, A. 2017. Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing. *Water* 9(7):530–534.
- Takada, M., Mishima, Y., and Natsume, S. 2009. Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. *Landscape Ecol. Eng.* 5(1):45–58.
- Wilhite, D. A. 2005. *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press. 86:432.
- Wang, L., and Qu, J.J. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front. Earth Sci. Chin.* 3(2):237–247.
- Wang, J., Ling, Z., Wang, Y., and Zeng, H. 2016. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Improving spatial representation of soil moisture by integration of microwave observations and the temperature–vegetation–drought index derived from MODIS products. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 113:144–154.
- Zhang, D., Li, Z. L., Tang, R., Tang, B.H., and Wu, H. 2014. A remote sensing technique to determine the soil moisture saturation index. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research.* 978-1-4799-5775-0/14. 3280.
- Zhu, Q., Luo, Y., Xu, Y., Tian, Y., and Yang, T. 2019. Satellite Soil Moisture for Agricultural Drought Monitoring: Assessment of SMAP-Derived Soil Water Deficit Index in Xiang River Basin. *Remote Sensing.*
- retrievals and application requirements. *J. Hydrometeorol* 11(3):832–840.
- Fang, B., and Lakshmi, V. 2014. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *Journal of Hydrology* 516:2014:258–272.
- Fang, B., Lakshmi, V., Bindlish, R., Jackson, T. J., Cash, M. and Basara, J. 2013. Passive Microwave Soil Moisture Downscaling Using Vegetation Index and Skin Surface Temperature. *Vadose Zone Journal.*
- Jaghuber, T., Konings, A.G., McColl, K.A., Alemohammad, S.H., Das, N.N., Montzka, C., Link, M., Akbar, R., and Entekhabi, D. 2019. Physics-Based Modeling of Active and Passive Microwave Covariations Over Vegetated Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 57:788-802
- Jian, P., Alexander, L., Olivier, M., and C., V.N.E. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics* 55:341-366.
- Kim, J., and Hogue, T. 2012. Improving spatial soil moisture representation through integration of AMSR-E and MODIS products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 50(2):446–460.
- Kim, S., Liu, Y.Y., Johnson, F. M., Parinussa, R.M., and Sharma, A. 2015. Remote Sensing of Environment a global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ? *Remote Sensing of Environment* 161:43–62.
- Martinez-Fernández, J., González Zomora, A., Sánchez, N., and Gumuzzio, A. 2016. Remote Sensing of Environment Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sensing of Environment* 177:277–286.
- Mohanty, B.P., Cosh, M.H., Lakshmi, V. and Montzka, C. 2017. Soil moisture remote sensing: state-of-the-science. *Vadose Zone J.* 16(1):1–9.
- Montzka, C., Bogena, H.R., Zreda, M., Monerris, A., Morrison, R., Muddu, S., and Vereecken, H. 2017. Validation of spaceborne and modelled surface soil moisture products with cosmic-ray neutron probes. *Remote Sens.* 9(2):103–136.
- Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M., and McElroy, S. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Can. J. Remote Sens.* 30(5):805–

Downscaling Retrievals of the AMSR2 Passive Microwave Soil Moisture Imagery to Farm Scale

M. Fashae¹, S.H. Sanaei-Nejad^{2*}

Received: Sep.21, 2020

Accepted: Dec.01, 2020

Abstract

Soil moisture is of particular importance in the study of water resources and agriculture. The microwave electromagnetic spectrum does not have the physical limitations of other radiometric spectral in measuring soil moisture, but they often have very large pixel dimensions (more than 10 km). In this study, in order to apply soil moisture remote sensing data at the farm scale, using field soil moisture measurement data in the Nishabour plain during 2017-2019, calibration of AMSR2 retrieval data was performed. It turned out that altitude and vegetation changes are among the key factors affecting calibration accuracy. Based on the theory of thermal inertia and with the help of MODIS sensor images, the interactions of the average daily soil moisture and the daily surface temperature difference between the two MODIS and AMSR2 sensors were investigated. Using it, downscaling linear relationships of soil moisture images were obtained to convert the image dimensions from 25 km to 1000 m. Validation of R2 statistical indices with a minimum of 0.73 and a maximum of 0.84, MAE and RMSE with a range of 1.6 to 4, showed that the algorithm used in the downscaling is well able to reflect the interactions between rainfall, soil moisture, vegetation and changes in canopy temperature profile and this feature reinforces its application in agrometeorological studies.

Keywords: AMSR2, Downscaling, Microwave spectra, Remote sensing, Surface soil moisture

1- Ph.D. Student of Water Science and Engineering Department, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad
2- Professor of Water Science and Engineering Department, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad
(* - Corresponding Author Email: sanaein@gmail.com)