2021, Vol.7, No.4, Pages 61 to 72
Journal of Water and Sustainable Development

سال هفتم، شماره ٤، ١٣٩٩، صفحات ٦١ تا ٧٢
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review

نوع مقاله: مروری

Review on Soil Moisture Remote Sensing Techniques and Spatial Resolution Downscaling Methods

E. Ghafari[1*], A.R. Faridhosseini[2]

1, 2– Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: ghafarielaheh84@gmail.com)

Received: 15-06-2020
Accepted: 15-09-2020

مروری بر تکنیک‌های سنجش‌ازدور رطوبت خاک و روش‌های ریزمقیاس‌سازی مکانی

الهه غفاری[1*]، علیرضا فریدحسینی[2]

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: ghafarielaheh84@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۲۶
تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۵

Abstract

Soil moisture is a valuable parameter for water cycle over lands, controlling water fluxes between the atmosphere, land surface and subsurface, through evaporation and plant transpiration. Measurement and recording of soil moisture observations as in-situ data cannot meet human needs. The availability of global soil moisture maps which is possible using remote sensing sensors, will benefit many application, including precipitation forecasting, flood prediction, drought monitoring and agricultural related applications. These maps must be provided at suitable scale. This is done by spatially downscaling of the soil moisture observations. Spatial downscaling of soil moisture measured by satellites should provide two purposes in order to use this parameter in hydrological, meteorological and agricultural applications: 1- Achieving to medium resolution (approximately 10 km), 2- Sufficient retrieval accuracy. It is evident that fulfilling both purposes using a single sensor is difficult. Therefore, complementary downscaling using a range of observation types has been proposed as an approach to overcome these scale and accuracy issues, by combining the merits from different sensors. In this paper, the soil moisture remote sensing techniques and as well, two basic available downscaling approaches which have the potential to fulfil the stated requirements on resolution and accuracy are introduced and their pros and cons are investigated.

Keywords: Remote Sensing of Soil Moisture, Downscaling Algorithms, Spatial Resolution.

چکیده

رطوبت خاک یک پارامتر با ارزش برای چرخه آب برروی اراضی، کنترل جریان آب بین اتمسفر، سطح زمین و زیر زمین، از طریق تبخیرتعرق گیاه می‌باشد. اندازه‌گیری و ثبت مشاهدات رطوبت خاک به‌صورت داده‌های زمینی نمی‌تواند جوابگوی نیاز بشر باشد. دسترسی به نقشه‌های رطوبت خاک جهانی که با استفاده از سنسورهای سنجش از دور امکان پذیر است، کاربردهای بسیاری از جمله پیش‌بینی بارش، پیش‌بینی سیلاب، نظارت بر خشکسالی و برنامه‌های مرتبط با کشاورزی خواهد داشت. این نقشه‌ها باید در مقیاس مکانی مناسب فراهم شوند. این امر از طریق ریزمقیاس‌سازی مکانی مشاهدات رطوبت خاک انجام می‌شود. ریزمقیاس‌سازی مکانی رطوبت خاک اندازه‌گیری‌شده توسط ماهواره‌ها دو هدف را به‌منظور استفاده این پارامتر در کاربردهای هیدرولوژی، هواشناسی و کشاورزی باید تأمین کند: ۱- دست‌یابی به وضوح مکانی متوسط رطوبت خاک (تقریباً ۱۰ کیلومتری)، ۲- دقت بازیابی مناسب. تحقق هر دو هدف با استفاده از یک سنسور مفرد، مشکل می‌باشد. بنابراین، ریزمقیاس‌سازی مکمل با استفاده از طیف وسیعی از انواع مشاهدات توسط ترکیب سنسورهای مختلف، به‌عنوان یک روش برای غلبه بر مقیاس مکانی درشت و بهبود دقت بازیابی رطوبت خاک، پیشنهاد شده است. در این مقاله، تکنیک‌های سنجش از دور رطوبت خاک و دو روش اصلی ریزمقیاس‌سازی موجود که پتانسیل تحقق الزامات بیان شده در توان تفکیک‌پذیری مکانی و صحت ریزمقیاس‌سازی را دارند، معرفی می‌شوند و مزایا و معایب آنها بررسی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور رطوبت خاک، الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی، توان تفکیک‌پذیری مکانی.

DOI: 10.22067/jwsd.v7i4.87346

مقدمه

به دلیل اینکه رطوبت خاک، نقش اصلی در کنترل آب، انرژی و شار کربن بین سطح زمین و اتمسفر دارد، یک پارامتر اساسی در کشاورزی، هیدرولوژی و هواشناسی محسوب می‌شود (Wagner و همکاران، ۲۰۰۳؛ Seneviratne و همکاران، ۲۰۱۰؛ Falloon و همکاران، ۲۰۱۱ و McColl و همکاران، ۲۰۱۷). در مدل‌های بازیابی رطوبت خاک و همچنین کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی، وجود خطا مانعی در ثبت تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک می‌باشد. با وجود در دسترس بودن داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی، پراکندگی زمانی و مکانی این داده‌ها می‌تواند به‌عنوان مانعی برای استفاده دقیق آنها در مطالعات مرتبط با رطوبت خاک باشد (Hain و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین، عدم امکان تجهیز شبکه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک زمینی و همچنین محدودیت‌های تخمین رطوبت خاک با استفاده از مدل‌های عددی، بازیابی رطوبت خاک بر پایه داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ها را توسعه داد. با توسعه تکنولوژی سنجش از دور (Jackson و همکاران، ۲۰۰۲)، نقشه‌های جهانی رطوبت خاک تهیه شده توسط ماهواره‌ها می‌توانند به‌عنوان یک منبع داده باارزش مورد استفاده قرارگیرند (Entekhabi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Hain و همکاران، ۲۰۱۱ و Kerr و همکاران، ۲۰۱۲). این نقشه‌ها باید در مقیاس مکانی مناسب فراهم شوند تا بتوانند در علوم مرتبط با کشاورزی، هیدرولوژی و هواشناسی مفید واقع شوند.

سنجش از دور رطوبت خاک

از آنجایی‌که ثبت دقیق رطوبت خاک به‌صورت جهانی از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی توسط شبکه‌های بزرگ نظارت رطوبت خاک زمینی و به‌دلیل مشکلات ناشی از درشت مقیاس کردن داده رطوبت خاک از اندازه‌گیری‌های مقیاس نقطه‌ای، پیچیده است، تحقیقات گسترده‌ای در جهت بازیابی رطوبت خاک بااستفاده‌از روش‌های سنجش از دور خصوصاً از سکوهای مدار پایین زمین[۱] که توانایی فراهم کردن پوشش جهانی و زمان بازگشت مکرر[۲] مورد نیاز برای کاربردهای هیدرولوژی و هواشناسی را دارد (Entekhabi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Kerr و همکاران، ۲۰۱۲)، انجام شده‌اند (Entekhabi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Hain و همکاران، ۲۰۱۱).

۱) روش‌های سنجش‌ازدور مایکروویو غیرفعال[۳]

تحقیقات تجربی و نظری نشان دادند، سنجش از دور مایکروویو غیرفعال در باند L، امیدبخش‌ترین روش بازیابی رطوبت خاک به‌دلایل قابلیت اجرای آن در تمامی شرایط آب‌وهوایی، ارتباط قوی و مستقیم بین انتشار خاک[۴] در طول موج‌های مایکروویو با مقدار آب خاک و حداقل تأثیر پوشش گیاهی و زبری سطح بر انتشار خاک می‌باشد (Njoku و همکاران، ۲۰۰۲). سنسورهای مایکروویو غیرفعال، شدت انتشار مایکروویو[۵] از خاک، که به مقدار رطوبت خاک از طریق تفاوت عمده ثابت دی‌الکتریک خاک خشک (تقریباً ۳/۵) و آب (تقریباً ۸۰) مرتبط است، اندازه‌گیری می‌کنند (Schmugge و همکاران، ۱۹۷۴). انتشار مایکروویو، متناسب با دمای سطح و انتشار سطح[۶] می‌باشد و به‌طور معمول به‌عنوان دمای روشنایی[۷] معرفی می‌شود. ارتباط بین رطوبت خاک و دمای روشنایی براساس تفاوت‌های موجود در زبری سطح، شرایط گیاهی، و بافت خاک، تغییر می‌کند. در دهه‌های گذشته، روش‌های بازیابی رطوبت خاک با استفاده از مشاهدات غیرفعال، توسعه یافته است و با آزمایشات میدانی انجام شده و داده‌های زمینی، دستگاه‌های ماهواره و هوابرد ارزیابی شده‌اند (Owe و همکاران، ۲۰۰۱؛ Njoku و همکاران، ۲۰۰۳؛ Panciera و همکاران، ۲۰۰۹؛ Rudiger و همکاران، ۲۰۰۹). نتایج این مطالعات مدل‌های انتقال تابشی مایکروویو[۸] متفاوت را توسعه داده است، این مدل‌ها به‌منظور بازیابی رطوبت خاک با استفاده از دمای روشنایی مایکروویو غیرفعال طراحی شده‌اند. سنجش از دور مایکروویو غیرفعال، پایه و اساس ماهواره‌های سنجش رطوبت خاک می‌باشد. به‌عنوان نمونه، اندازه‌گیری‌های جهانی رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور مایکروویو غیرفعال با استفاده از ماهواره رطوبت خاک و شوری اقیانوس SMOS[۹]، ماهواره رطوبت خاک فعال-غیرفعال[۱۰] SMAP، ماهواره رادیومتر اسکن‌کننده مایکروویو پیشرفته برای سیستم مشاهده‌کننده‌زمین[۱۱] AMSR-E، سنسور ویژه‌مایکروویو تصویرگر[۱۲] (SSM/I) در دسترس هستند. SMOS توسط آژانس فضایی اروپا[۱۳] در نوامبر ۲۰۰۹، به‌عنوان اولین ماهواره اختصاصی اندازه‌گیری رطوبت خاک بااستفاده‌از اندازه‌گیری‌های مایکروویو غیرفعال باند L راه‌اندازی شد. SMOS به‌منظور نظارت بر رطوبت خاک، بایومس گیاهی و دمای سطح خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های رادیومتر در باند L (۱/۴ گیگاهرتز) در قطبش[۱۴] v و h (h حالت افقی و v حالت عمودی را نشان می‌دهند)، اختصاص یافته‌است، و رطوبت خاک را در توان تفکیک‌پذیری مکانی تقریباً ۴۰ کیلومتر فراهم می‌کند. ماهواره SMAP برای تهیه نقشه‌های جهانی رطوبت خاک و چشم‌انداز حالت انجماد/ذوب شدن طراحی شده است. این ماهواره از باند L رادیومتر (۱/۴ گیگاهرتز) در قطبش v و h و باند L رادار (۱/۲۶ گیگاهرتز) در قطبش‌های دوگانه hh، vv، hv و vh استفاده می‌کند. AMSR-E رطوبت خاک و تخمین‌های مرتبط با آب گیاه و دمای سطح را در باند C و باند X در توان تفکیک‌پذیری مکانی تقریباً ۵۶ کیلومتر فراهم می‌کند. باندهای فرکانس بالاتر به وسیله سنسور SSM/I اعمال می‌شوند که دمای روشنایی را در باند Ka و باند Ku اندازه‌گیری می‌کند مطالعات سنجش از دور رطوبت خاک با استفاده از تکنیک‌های مایکروویو غیرفعال انجام شده در

چندین دهه اخیر، برتری سنسورهای فرکانس پایین را نسبت به سایر تکنیک‌های سنجش از دور نشان می‌دهند (Schmugge و همکاران، ۱۹۷۴؛ Jackson و همکاران، ۱۹۹۳؛ Paloscia و همکاران، ۲۰۰۱). اگرچه سنسورهای مایکروویو غیرفعال در باند L، برای بازیابی رطوبت خاک به‌صورت جهانی بهترین هستند، اما توان تفکیک‌پذیری مکانی که از مشاهدات مایکروویو غیرفعال می‌توان به‌دست آورد، به‌دلیل رابطه معکوس بین طول موج و اندازه آنتن و با درنظر گرفتن محدودیت‌های فناوری استقرار آنتن بزرگ در فضا، به‌طور ذاتی از نظر مکانی درشت‌مقیاس می‌باشد (در حدود تقریباً ۴۰ کیلومتر). در نتیجه، تکنیک سنجش از دور مایکروویو غیرفعال در باند L به‌تنهایی داده‌های رطوبت خاک تخمین‌زده‌شده مورد نیاز در رزولوشن مکانی متوسط (حدود ۱۰ کیلومتر) برای کاربردهای هیدرولوژی و هواشناسی نظیر پیش‌بینی بارندگی و تخمین سیلاب و خشکسالی را فراهم نمی‌کند. اندازه آنتن رادیومتر، تنها فاکتوری است که می‌توان برای بهبود توان تفکیک‌پذیری مکانی، تغییر داد. لازم به ذکر است، افزایش اندازه آنتن، مشکلات مهندسی بسیار دشواری دارد که با تکنولوژی‌های مرسوم، قابل حل‌شدن نیستند. هدف از جستجوی روش‌های خلاقانه که بتوانند مشاهدات دقیق با توان تفکیک‌پذیری مکانی بالا فراهم کنند، این موضوع می‌باشد (Jackson و همکاران، ۱۹۹۹).

۲) روش‌های سنجش‌ازدور مایکروویو فعال[۱۵]

از آنجایی‌که سنجش‌ازدور مایکروویو غیرفعال به دلیل وضوح مکانی کم، محدود شده است، بعضی دیگر از تکنیک‌های سنجش‌ازدور به‌منظور فراهم‌کردن مشاهدات در توان تفکیک‌پذیری بیشتر، پیشنهاد شده است. به‌عنوان نمونه، تکنیک‌های سنجش‌ازدور مایکروویو فعال می‌توانند برای بازیابی اطلاعات رطوبت خاک از تفکیک‌پذیری ۱۰ متر تا ۳ کیلومتر، استفاده شوند. در حال حاضر، دو نوع رادار برای بازیابی رطوبت خاک در حال استفاده هستند: ۱- رادار روزنه مصنوعی[۱۶] (SAR) و ۲- پراکندگی‌سنج[۱۷]. SAR یک سامانه راداری منسجم نصب شده برروی یک سکوی متحرک مانند ماهواره یا هواپیمای هوابرد است که تصاویر دوبعدی با وضوح مکانی بالا و مستقل از نور (ثبت داده در روز و شب) و شرایط آب‌وهوایی را از سیگنال‌های پس‌پراکندگی[۱۸] دریافتی ایجاد می‌کند. به این صورت، وضوح مکانی بالا در واحد متر به دست خواهد آمد. قطبش‌های مورد استفاده در SAR بسته به جهت ارسال و دریافت موج الکترومغناطیسی شامل قطبش‌های دوگانه *hh*، *vv*، *hv* و *vh* می‌شوند. به‌عنوان نمونه، آژانس فضایی اروپا (ESA) از ماهواره‌های سنجش از دور زمین ۱ و ۲[۱۹] (ERS-1, ERS-2) برای سنجش از دور رطوبت خاک با استفاده از مشاهدات SAR در باند C استفاده کرده است (Wagner و همکاران، ۲۰۰۳؛ Wagner و همکاران، ۲۰۰۷). مشاهدات SAR موجود دیگر سنسورها عبارتند از: باند C سنسور ENVISAT ASAR (Desnos و همکاران، ۲۰۰۰)، باند C سنسور RADARSAT-1/2 (Nolin و همکاران، ۲۰۱۲؛ Cable و همکاران، ۲۰۱۴)، باند L سنسور PALSAR (Shimada و همکاران، ۲۰۰۹؛ Carreiras و همکاران، ۲۰۱۲)، باند X سنسور TerraSAR (Werninghaus، ۲۰۰۴)، و باند X سنسور COSMO-SkyMed (F.Covello و همکاران، ۲۰۱۰). سنسور رادار ماهواره SMAP نیز داده‌های SAR را در باند L و وضوح مکانی ۳ کیلومتر، اندازه‌گیری کرده است (Entekhabi و همکاران، ۲۰۱۰). در برابر سنسورهای SAR، پراکندگی‌سنج‌ها سنسورهای رادار مایکروویوی هستند که پس‌پراکندگی سطح را با استفاده از روزنه واقعی[۲۰]، اندازه‌گیری می‌کنند (Dubois و همکاران، ۱۹۹۵). سنسورهای پراکندگی‌سنج برای مطالعات بادهای نزدیک سطح اقیانوس‌ها، یخ‌های قطبی، پوشش گیاهی، و اندازه‌گیری‌های مقدار رطوبت خاک استفاده می‌شوند. سنسورهای پراکندگی‌سنج متنوعی بر روی ماهواره‌ها راه‌اندازی شده‌اند. از جمله این سنسورها، سنسور پراکندگی‌سنج ناسا[۲۱] و سنسور پراکندگی‌سنج پیشرفته[۲۲] برروی ماهواره عملیاتی هواشناسی ESA[۲۳] (MetOp-A) راه‌اندازی شده در سال ۲۰۰۶ می‌باشند (Wagner و همکاران، ۲۰۰۳؛ Wagner و همکاران، ۲۰۰۷). در سنجش از دور مایکروویو فعال، مقادیر سیگنال (ضریب پس‌پراکندگی) از طریق تضاد ثابت دی‌الکتریک آب و خاک با رطوبت خاک در ارتباط است. اگرچه در مشاهدات رادار، سیگنال خاک به شدت تحت تاثیر زبری سطح و پراکندگی مستقیم از پوشش گیاهی، قرار دارد. بنابراین، درمقابل سنجش‌ازدور مایکروویو غیرفعال، صحت رطوبت خاک بازیابی‌شده به‌صورت فعال، بسیار تحت تأثیر شرایط سطحی خاک قرار می‌گیرد.

۳) روش‌های سنجش‌ازدور نوری و حرارتی[۲۴]

در روش‌های سنجش‌ازدور نوری، سنسورهای نوری (مرئی/مادون‌قرمز نزدیک/مادون‌قرمز طول‌موج کوتاه/مادونقرمز حرارتی) می‌توانند انعکاس سطح از خورشید یا انتشار حرارتی را در توان تفکیک‌پذیری مکانی بالا (وضوح بالا)، اندازه‌گیری کنند (Pu و همکاران، ۲۰۰۳). ازآنجایی‌که سیگنال نوری تنها قادر به نفوذ به چند میلیمتر سطحی خاک یا پوشش گیاهی است، تفسیر آن مشکل می‌باشد. همچنین، این سیگنال‌ها در توانایی نفوذ به ابر و پوشش گیاهی محدودیت دارد و به‌دلیل وجود اتمسفر، ضعیف عمل کرده و به اصلاحات اتمسفریک قابل توجه‌ای نیاز دارند. علاوه‌بر آن، اندازه‌گیری‌های انعکاس خاک به‌شدت تحت‌تاثیر ترکیب، ساختار فیزیکی و شرایط جذب خاک قرار می‌گیرد که منجربه پیش‌بینی ضعیف رطوبت خاک در نمونه‌های خاک ترکیبی می‌شود (Musick و Pelletier، ۱۹۸۸). بنابراین تخمین‌های رطوبت خاک از سنسورهای مرئی/مادون قرمز معمولاً به اطلاعات ریزمقیاس هواشناسی و اتمسفریک نیاز دارند که این اطلاعات به‌طور معمول

در دسترس نمی‌باشند (Zhang و Wegehenkel، ۲۰۰۶). به دلیل وجود این محدودیت‌ها، برقراری ارتباط مستقیم بین انعکاس و رطوبت خاک، تنها زمانی‌که مدل‌ها برای انواع خاصی از خاک در عدم وجود پوشش گیاهی سطح زمین متناسب شده باشند، موفق خواهد بود (Muller و Decamps، ۲۰۰۱). دلایل ذکرشده نشان‌دهنده محدودیت شدید قابلیت استفاده از این تکنیک‌ها برای بازیابی رطوبت خاک به‌صورت جهانی می‌باشد.

سنجش‌ازدور مادون قرمز حرارتی برپایه این اصل استوار است که دمای خاک به‌طور مستقیم، توسط رطوبت خاک با افزایش حرارت ویژه و هدایت حرارتی، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. تخمین رطوبت خاک از طریق سنجش‌ازدور مادون قرمز حرارتی در درجه اول به استفاده از اندازه‌گیری‌های دمای خاک، به‌صورت مفرد یا در ترکیب با شاخص‌های گیاهی ارتباط دارد. برخی از مطالعات نشان دادند، تغییرات دمای خاک به شدت به تغییرات رطوبت خاک، وابسته می‌باشد (Friedl و Davis، ۱۹۹۴؛ Chehbouni و همکاران، ۲۰۰۱). ترکیب تصاویر حرارتی و شاخص‌های پوشش گیاهی، اصول ترمودینامیک موجود در مدل‌های تعادل انرژی سطح را به‌منظور تخمین میزان تبخیرتعرق سطحی، اجرا می‌کنند و سپس تخمین رطوبت خاک را بهبود می‌بخشند. بعضی از این روش‌ها برپایه همبستگی منفی بین دمای خاک و شاخص‌های گیاهی نظیر شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی[۲۵] (NDVI)، به‌منظور تخمین رطوبت خاک، می‌باشند (Carlson و همکاران، ۱۹۹۵؛ Goward و همکاران، ۲۰۰۲). اگرچه مانند تمام تکنیک‌های نوری، این روش‌ها به‌دلیل توانایی محدود در نفوذ به ابرها و پوشش گیاهی و تضعیف توسط اتمسفر زمین محدود می‌شوند. علاوه‌براین، آن‌ها اغلب به‌صورت تجربی هستند و بنابراین در طول زمان و انواع مختلف پوشش سطحی زمین، تغییر می‌کنند (Czajkowski و همکاران، ۲۰۰۰).

ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک

صحت بازیابی رطوبت خاک سطحی با استفاده از سنجش‌ازدور مایکروویو غیرفعال، بهینه می‌باشد اما به‌وسیله توان تفکیک‌پذیری مکانی کم، محدود می‌شود. ترکیب داده‌های رادیومتریک در وضوح مکانی کم با داده‌های موجود در وضوح مکانی بالاتر از سنسورهای دیگر، یک راه‌حل بالقوه به‌منظور تجزیه یا تفکیک پیکسل‌های بزرگ به پیکسل های کوچک می‌باشد. همچنین، اطلاعات اضافی فاکتورهای کنترل‌کننده رطوبت خاک، نظیر ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های گیاهی، یا مشاهدات هواشناسی، می‌توانند مورداستفاده قرار گیرند تا مشاهدات جمع‌آوری شده از وضوح پایین مایکروویو غیرفعال را با اعمال مدل‌های فیزیکی یا روابط تجربی مناسب، ریزمقیاس‌سازی کنند. بنابراین، در طی چند دهه گذشته، روش و الگوریتم‌های مختلفی به‌منظور ریزمقیاس‌سازی مشاهدات مقیاس بزرگ مایکروویو غیرفعال با استفاده از مشاهدات وضوح بالا، پیشنهاد شده است (Merlin و همکاران، ۲۰۱۰؛ Piles و همکاران، ۲۰۱۶؛ Das و همکاران، ۲۰۱۸؛ He و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ye و همکاران، ۲۰۱۹). دو روش کلی پرکاربرد و مناسب برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک شامل استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی غیرفعال و نوری[۲۶] و الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی غیرفعال و فعال[۲۷] می‌باشند. در ادامه به شرح بیشتر این روش‌ها، بیان مزایا و معایب آنها و همچنین نمونه‌های کاربردی الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ارائه شده توسط محققان پرداخته شده است.

۱) الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی غیرفعال و نوری-حرارتی

ارتباط بین دمای سطح خاک و پارامترهای گیاهی با رطوبت خاک (Nemani و همکاران، ۱۹۹۳)، پایه و اساس ریزمقیاس‌سازی نوری را فراهم می‌کند. مفهوم مثلث جهانی[۲۸] که پارامترهای مرئی/مادون قرمز نظیر NDVI و دمای سطح خاک را به رطوبت خاک مربوط می‌کند، اولین بار توسط Carlson و همکاران (۱۹۹۴) و Moran و همکاران (۱۹۹۴) معرفی شد. حساسیت تغییر دمای سطحی در پاسخ به رطوبت خاک، بسته به شرایط سطحی (نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی و ...)، متفاوت خواهد بود. این ارتباط، یک مجموعه از نقاط پراکنده شاخص پوشش گیاهی-دمای سطحی در شکل یک مثلث (یا یک چهارضلعی در مواردی که لبه‌های تر و خشک از بیشترین مقدار شاخص گیاهی انتخابی عبور کنند) را تشکیل می‌دهد. به‌گونه‌ای که مرزهای این شکل شرایط خشک و تر را نشان می‌دهند. بعضی از محققان از مفهوم مثلث به‌عنوان روشی برای بهبود مقیاس مکانی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال، با استفاده از دمای سطح خاک و پارامترهای گیاهی استخراج شده از مشاهدات نوری در وضوح بالا، استفاده کردند (Piles و همکاران، ۲۰۱۱؛ Merlin و همکاران، ۲۰۱۳؛ Fang و همکاران، ۲۰۱۳). روش‌های ریزمقیاس‌سازی نوری، مشاهدات رادیومتریک با ویژگی صحت زیاد و مشاهدات نوری با ویژگی وضوح بالا را با یکدیگر ترکیب می‌کنند. با این حال، مشاهدات نوری در وضوح بالا، به‌دلیل تاثیر زیاد پوشش ابر و گیاه بر این مشاهدات، کاربرد محدودی دارند. به‌منظور مقایسه و درک بهتر روش ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک حاصل از ترکیب پارامترهای سنسورهای غیرفعال و نوری-حرارتی، نمونه‌های کاربردی الگوریتم‌های معرفی شده توسط محققان، داده‌های ورودی، شرح مختصری از روش‌های مورداستفاده در این الگوریتم‌ها و همچنین صحت آنها در جدول (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که شرح کامل این الگوریتم‌ها، مفاهیم مفصلی دارد که باتوجه‌به هدف این مقاله در اینجا ذکر نگردیده و در منابع ذکر شده موجود می‌باشند.

جدول ۱- صحت الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک با استفاده از ترکیب پارامترهای ماهواره‌های غیرفعال و نوری-حرارتی

منبع	داده‌های ورودی الگوریتم	شرح روش-صحت ریزمقیاس‌سازی (RMSE (m^3m^{-3}))
Merlin و همکاران (۲۰۰۸a)	داده‌های رادیومتریک باند L سنسور هوابرد PMBR ۹۰ Monsson داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	روش بر پایه جزء تبخیر – ۰/۰۳ روش بر پایه تبخیرتعرق واقعی- ۰/۰۲
Merlin و همکاران (۲۰۰۸b)	داده‌های رادیومتریک باند L سنسور هوابرد ۰۶'NAFE داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	روش رطوبت خاک یکنواخت – ۰/۰۱۷ روش رطوبت خاک غیریکنواخت – ۰/۰۱۵۳
Merlin و همکاران (۲۰۱۲)	داده‌های سطح ۲ رطوبت خاک SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	روش انجام شده در تابستان استرالیا – ۰/۰۵۷ روش انجام شده در زمستان استرالیا – ۰/۱۳۸
Merlin و همکاران (۲۰۱۳)	داده‌های سطح ۲ رطوبت خاک SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI داده‌های سنجنده ASTER شامل دمای سطح خاک و NDVI داده‌های سنجنده Landsat شامل دمای سطح خاک و NDVI	رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۳ کیلومتر بااستفاده از MODIS – ۰/۱۱ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۱۰۰ متر بااستفاده از ASTER – ۰/۰۸۱۵ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۱۰۰ متر بااستفاده از Landsat –۰/۱
Djamai و همکاران (۲۰۱۵)	داده‌های سطح ۲ رطوبت خاک SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	مقایسه رطوبت خاک ریزمقیاس شده با داده‌های زمینی - ۰/۰۳
Fan و همکاران (۲۰۱۵)	داده‌های رطوبت خاک ۷۰۰ متر سیستم هوابرد PLMR داده‌های سنجنده ASTER شامل دمای سطح خاک و NDVI در مقیاس مکانی ۱۰۰ متر	۰/۰۴۸
Mallbeteau و همکاران (۲۰۱۶)	داده‌های رطوبت خاک سطح ۳ ماهواره AMSR-E داده‌های رطوبت خاک سطح ۳ ماهواره SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI داده‌های DEM موجود در gtopo۳۰	عبور ماهواره AMSR-E به‌صورت صعودی– ۰/۰۷۶ عبور ماهواره AMSR-E به صورت نزولی– ۰/۰۹۲ عبور ماهواره SMOS به صورت صعودی– ۰/۰۷۹ عبور ماهواره SMOS به صورت نزولی– ۰/۰۶۸
Djamai و همکاران (۲۰۱۶)	داده‌های رطوبت خاک سطح ۲ SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI داده‌های ژئوفیزیکی OURANOS داده‌های اتمسفریک NARR	روش خطی-صعودی ماهواره - ۰/۰۶ روش خطی-نزولی ماهواره - ۰/۰۵ روش غیرخطی-صعودی ماهواره - ۰/۰۶ ۰ روش غیرخطی-نزولی ماهواره - ۰/۰۶
Chen و همکاران (۲۰۱۷)	داده‌های رطوبت خاک رادیومتر SMAP داده‌های انعکاس سطح خاک MODIS	روش NRSD در ماه May – ۰/۰۴ روش DisPATCh در ماه May – ۰/۰۷ روش NRSD در ماه September – ۰/۱۲ روش DisPATCh در ماه September – ۰/۱۷
Kim و Hogue (۲۰۱۲)	داده‌های رطوبت خاک سطح ۳ ماهواره AMSR-E داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	۰/۰۵۱

ادامه جدول ۱- صحت الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک با استفاده از ترکیب پارامترهای ماهواره‌های غیرفعال و نوری-حرارتی

منبع	داده‌های ورودی الگوریتم	شرح روش-صحت ریزمقیاس‌سازی (RMSE (m^3m^{-3}))
Zhou و همکاران (۲۰۱۵)	داده‌های رطوبت خاک سطح ۳ ماهواره AMSR۲ داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	روش (Merlin و همکاران، ۲۰۰۸) – ۰/۰۳۲ روش (Kim و Hogue، ۲۰۱۲) – ۰/۰۳۸
Peng و همکاران (۲۰۱۵)	داده‌های رطوبت خاک ESA CCI داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI داده‌های MSG SEVIRI	روش استفاده از داده‌های MODIS – ۰/۰۷۶ روش استفاده از داده‌های SEVIRI – ۰/۰۷۲
Peng و همکاران (۲۰۱۶)	داده‌های رطوبت خاک ESA CCI داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک، EVI و NDVI	روش LST/NDVI – ۰/۰۹۹ روش LST/EVI –۰/۱۰۳
Fang و Lakshmi (۲۰۱۴)	داده‌های رطوبت خاک ماهواره AMSR-E داده‌های رطوبت خاک سطح ۳ ماهواره SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	استفاده از داده‌های SMOS – ۰/۰۴۲ استفاده از داده‌های AMSR-E – ۰/۰۳۸۵
Mallick و همکاران (۲۰۰۹)	مجموعه داده‌های نوری سنجنده‌های MODIS و ASTER داده‌های رادیومتریک باند C ماهواره AMSR-E	پوشش گیاهی کم – ۰/۰۲۷ پوشش گیاهی زیاد – ۰/۰۶
Chauhan و همکاران (۲۰۰۳)	داده‌های رادیومتریک باند K سنجنده SSM/I داده‌های سنجنده AVHRR شامل دمای سطح خاک و NDVI	۰/۰۵
Choi و Hur (۲۰۱۲)	داده‌های رطوبت خاک ماهواره AMSR-E داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک، ضریب آلبدو و NDVI	۰/۰۱۲
Piles و همکاران (۲۰۱۱)	داده‌های سطح ۲ رطوبت خاک SMOS داده‌های سنجنده MODIS شامل دمای سطح خاک و NDVI	رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده به مقیاس مکانی ۱ کیلومتر – ۰/۱۳ رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده به مقیاس مکانی ۱۰ کیلومتر – ۰/۰۹
غفاری و همکاران (۱۳۹۹)	داده‌های رطوبت خاک رادیومتر SMAP داده‌های دمای سطح خاک MODIS داده‌های انعکاس سطح خاک MODIS داده‌های NDVI MODIS	رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده به مقیاس مکانی ۱ کیلومتر –۰/۰۳
متکان و همکاران (۱۳۹۷)	داده‌های رطوبت خاک ESA CCI داده‌های ماهواره NOAA شامل دمای سطح خاک، NDVI و آلبدو	منطقه مطالعاتی استرالیا – ۰/۰۴۹ منطقه مطالعاتی اول پارس آباد مغان ایران – ۰/۰۷۳ منطقه مطالعاتی دوم پارس آباد مغان ایران – ۰/۰۵۵

۲) الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی غیرفعال و فعال

به‌دلیل کمبودهای موجود در روش‌های نوری، روش‌های ریزمقیاس‌سازی بازیابی رطوبت خاک از طریق ترکیب مشاهدات فعال (رادار) و غیرفعال (رادیومتر) در حال توسعه هستند، و این تکنیک، پایه ماموریت ماهواره SMAP را شکل می‌دهد (Das و همکاران، ۲۰۱۱). هدف اصلی این ماهواره، فراهم کردن رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده در توان تفکیک‌پذیری مکانی ۹ کیلومتر، از طریق ترکیب داده‌های رادار در مقیاس ۳ کیلومتر با مشاهدات رادیومتر در مقیاس ۳۶ کیلومتر می‌باشد. ترکیب مشاهدات مایکروویو فعال و غیرفعال، یک روش ارجح برای ریزمقیاس‌سازی می‌باشد، زیرا هر دو سنسورها به تغییر در ویژگی‌های دی‌الکتریک خاک پاسخ می‌دهند. مشابه جدول (۱)، جدول (۲) نمونه‌های کاربردی الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی غیرفعال و فعال معرفی‌شده توسط محققان، داده‌های ورودی، شرح مختصری از روش‌های مورد استفاده در این الگوریتم‌ها و همچنین صحت آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- صحت الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک با استفاده از ترکیب پارامترهای ماهواره‌های غیرفعال و فعال

منبع	داده‌های ورودی الگوریتم	شرح روش-صحت ریزمقیاس‌سازی (RMSE (m^3m^{-3}))
ONeili و Chauhan (۱۹۹۲)	داده‌های باند L رادار هوابرد AIRSAR داده‌های باند L رادیومتر هوابرد PBMR	۰/۰۲۹
Narayan و همکاران (۲۰۰۶)	داده‌های باند L رادیومتر هوابرد PALS SMEX۰۲ داده‌های باند L رادار هوابرد AIRSAR SMEX۰۲	استفاده از کل داده‌ها- ۰/۰۴۶ پس از حذف داده‌های پرت- ۰/۰۲۸
Narayan و Lakshmi (۲۰۰۸)	داده‌های باند C رادیومتر AMSR-E داده‌های دمای روشنایی باند X سنسور TMI داده‌های پس‌پراکندگی باند Ku سنسور TRMM-PR	روش ترکیب AMSR-E و TRMM-PR- ۰/۰۵۲ روش ترکیب TMI و TRMM-PR- ۰/۰۴۹
Bindlish و Barros (۲۰۰۲)	داده‌های باند L رادیومتریک ESTAR داده‌های باند X، C و L سنسورهای SIR-C/X-SAR	۰/۰۲۸
Xiwu و همکاران (۲۰۰۶)	مجموعه داده‌های باند L سنسور آزمایشی OSSE	رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۳ کیلومتر: (داده‌ها با نویز کم) - ۰/۰۲۸ و (داده‌ها با نویز زیاد) - ۰/۰۳۸ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۹ کیلومتر:(داده‌ها با نویز کم) - ۰/۰۲۷ و (داده‌ها با نویز زیاد) - ۰/۰۴۶
Wu و همکاران (۲۰۱۷)	مشاهدات باند L سنسورهای PLIS و PLMR سایت آزمایشی SMAPEX-۳	رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۱ کیلومتر - ۰/۰۲ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۳ کیلومتر - ۰/۰۱۷ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۹ کیلومتر - ۰/۰۱۳
Das و همکاران (۲۰۱۱)	داده‌های باند L رادیومتر هوابرد PALS SMEX۰۲ مجموعه داده‌های باند L سنسور آزمایشی OSSE	پلاریزیشن افقی – ۰/۰۲۷ پلاریزیشن عمودی – ۰/۰۲۳
Das و همکاران (۲۰۱۴)؛ Akbar و Moghaddam (۲۰۱۵)	داده‌های باند L رادیومتر هوابرد PALS SMEX۰۲ داده‌های ComRad	داده‌ها با نویز کم - ۰/۰۳۹ داده‌ها با نویز زیاد - ۰/۰۴۷
Velde و همکاران (۲۰۱۵)	داده‌های رطوبت خاک باند C ماهواره AMSR-E داده‌های پس پراکندگی رادار باند L سنسور PALSAR	رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۱ کیلومتر - ۰/۰۶۷ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۵ کیلومتر - ۰/۰۶۸ رطوبت خاک ریزمقیاس شده به مقیاس مکانی ۱۰ کیلومتر - ۰/۰۶۹
Rudiger و همکاران (۲۰۱۶)	مشاهدات هوابرد PLMR باند L سایت آزمایشی AACES داده‌های رادار باند C سنسور ASAR	۰/۰۶-۰/۱۲
کرمی و همکاران (۱۳۹۹)	داده‌های رطوبت خاک باند L ماهواره SMAP داده‌های پس پراکندگی رادار باند C ماهواره Sentinel-۱	۰/۰۴۳

بحث و نتیجه‌گیری

در اختیار داشتن نقشه‌های جهانی رطوبت خاک به دلیل کارایی آنها در علوم و توانایی در سودرسانی به جامعه بشری، ضروری هستند. اندازه‌گیری رطوبت خاک بااستفاده از روش‌های سنجش از دور می‌تواند منجر به تهیه نقشه‌های جهانی رطوبت خاک در مقیاس زمانی مناسب باشد. مقاله حاضر به جمع‌بندی و معرفی کامل سه روش اصلی سنجش از دور رطوبت خاک و دو روش کلی پرکاربرد و مناسب

برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک، شامل استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس سازی ترکیبی غیرفعال و نوری و الگوریتم‌های ریزمقیاس سازی ترکیبی غیرفعال و فعال می‌باشند، پرداخته است. در چند دهه گذشته، سنجش از دور مایکروویو غیرفعال به‌عنوان دقیق‌ترین روش سنجش از دور رطوبت خاک به دلیل توانایی ثبت داده در هر شرایط آب و هوایی، ارتباط مستقیم و قوی بین دمای روشنایی و رطوبت خاک نزدیک به سطح (تقریباً ۵ سانتی‌متر) و کاهش اثرات اتمسفر، پوشش گیاهی و زبری سطح، به‌صورت گسترده‌ای نسبت به سنجش از دور مایکروویو فعال (مشاهدات پس پراکندگی رادار) یا سنجش از دور حرارتی (مشاهدات دمای سطحی)، پذیرش شده است (Ulaby و همکاران، ۱۹۸۱؛ Kerr، ۲۰۰۷؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۱). بهترین نتایج حاصل از سنجش از دور مایکروویو غیرفعال را در فرکانس کم (تقریباً ۱/۴ گیگاهرتز) به دلیل کاهش اثرات ناشی از اتمسفر، زبری سطح، پوشش گیاهی، افزایش عمق نفوذ (بیشتر از ۵ سانتی‌متر) می‌توان یافت. با وجود حساسیت زیاد روش رادیومتر مایکروویو غیرفعال به اندازه‌گیری رطوبت خاک سطحی زمین، این روش به دلیل بزرگ بودن مقیاس مکانی (در حدود ۳۶ کیلومتر)، برای کاربردهای منطقه‌ای نظیر پیش‌بینی بارندگی و تخمین سیلاب، مدل‌های هیدرولوژی و کاربردهای مرتبط با کشاورزی و هواشناسی که نیازمند مقیاس مکانی کوچک‌تر از ۱۰ کیلومتر هستند، محدودیت دارد (Leese و همکاران، ۲۰۰۱؛ Colliander و همکاران، ۲۰۱۷). دسترسی به مقیاس مکانی کوچک رطوبت خاک به‌ویژه در کاربردهای هواشناسی مانند پیش‌بینی بارندگی و برنامه‌های کاربردی در علوم هیدرولوژی و جوی، دارای اهمیت می‌باشد (Das و همکاران، ۲۰۱۱).

به‌منظور ریزمقیاس‌سازی داده‌های رادیومتر ماکروویو در مقیاس کوچک‌تر، الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی که از داده‌های فرعی ماهواره‌ها، داده‌های راداری یا مشاهدات حرارتی/نوری استفاده می‌کنند، معرفی و توسعه یافته‌اند (Jian و همکاران، ۲۰۱۷). لازم به ذکر است، الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی هرکدام به نوبه خود مزایا و معایبی دارند. تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی که برپایه داده های رادار عمل می‌کنند، توانایی ثبت داده در تمامی شرایط آب‌وهوایی را دارند. همچنین استفاده از این تکنیک‌ها مستقل از نیاز به اطلاعات هواشناسی و اطلاعات سطح زمین می‌باشد. از سوی دیگر، داده‌های رادار نسبت به مشاهدات سنسورهای نوری حساسیت بهتری به رطوبت خاک نشان می‌دهند. اما عدم توانایی ثبت داده‌های رادار و رادیومتر برروی یک سنسور مشترک به‌طور همزمان و در تکرار زمانی یکسان، به‌عنوان ضعف اصلی تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی برپایه داده‌های رادار محسوب می‌شود. از سوی دیگر، پوشش زمانی کم از تصاویر راداری نیز منجر به کاهش دسترسی به این داده‌ها خواهد شد. همچنین قابل توجه است که مشاهدات مایکروویو فعال نسبت به پوشش‌های گیاهی و زبری سطح حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند. این امر می‌تواند دقت ریزمقیاس‌سازی را تحت تاثیر قرار دهد. تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی که برپایه داده‌های سنسورهای نوری عمل می‌کنند، از مزیت برتر وضوح مکانی و زمانی بالای مشاهدات نوری بهره‌مند هستند. اما ضعف اصلی استفاده از مشاهدات ماهواره‌های نوری، عدم دسترسی به داده‌ها در شرایط آسمان ابری می‌باشد. همچنین تأثیر پوشش گیاهی بر مشاهدات نوری، ارتباط این مشاهدات با رطوبت خاک را دشوار می‌کند. از سوی دیگر، مشاهدات نوری با تغییرات رطوبت خاک به‌طور غیرمستقیم رابطه برقرار می‌کند. اما به‌طور کلی، می‌توان گفت هر دو این تکنیک‌ها می‌توانند به بازیابی رطوبت خاک از مقیاس مکانی بزرگ به مقیاس مکانی کوچک و با دقت مناسب، با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ها بپردازند.

تقدیر و تشکر

مقاله حاضر بخشی از پایان نامه دکتری الهه غفاری انجام شده در دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. بدین وسیله از دکتر کامران داوری به عنوان استاد راهنمای پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌شود. طبق آیین‌نامه نشریات و چاپ مقاله، نام ایشان به دلیل عضویت در هیئت تحریریه نشریه با تأیید و نظر مساعد ایشان از عنوان نویسندگان مقاله حذف شده است.

پی‌نوشت‌ها

1-Low-Earth orbit platforms
2-Frequent revisit time
3-Passive microwave remote sensing techniques
4-soil emissivity
5-Microwave emission
6-surface emissivity
7-Brightness temperature
8-Microwave radiative transfer models
9-Soil Moisture Ocean and Salinity (SMOS)
10-Soil Moisture Active Passive (SMAP)
11-Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E)
12-Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)
13-European Space Agency (ESA)
14-polarization
15-Active microwave remote sensing techniques
16-Synthetic Aperture Radar (SAR)
17-Scatterometer
18-Backscatter
19-Earth Remote Sensing (ERS-1, ERS-2)
20-Real aperture

21-NASA SCATterometer (NSCAT)
22-Advanced SCATterometer (ASCAT)
23-ESA meteorological operational satellite (MetOp-A ESA)
24-Optical and Thermal remote sensing techniques
25-Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
26-Optical and passive downscaling approaches
27-Active and passive downscaling algorithms
28-Global Triangle concept

منابع

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

کرمی، ا.، مرادی، ح. و موسیوند، ع. ۱۳۹۹. بهبود وضوح مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با روش تلفیق رادار-مایکروویو در آبخیز فیروزآباد اردبیل. نشریه پژوهش‌های آبخیزداری. اصلاح‌شده برای چاپ.

متکان، ع.، عاشورلو، د.، عقیقی، ح. و گل‌صفتان، غ. ۱۳۹۷. ریزمقیاس‌سازی داده رطوبت ESA با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA. فصلنامه انجمن جغرافیای ایران، ۱۶(۵۷): ۱۵۷-۱۴۳.

Akbar R. and Moghaddam M. 2015. A Combined Active–Passive Soil Moisture Estimation Algorithm With Adaptive Regularization in Support of SMAP. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53: 3312-3324.

Bindlish R. and Barros A.P. 2002. Subpixel variability of remotely sensed soil moisture: an inter-comparison study of SAR and ESTAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40: 326-337.

Cable J., Kovacs J., Shang J. and Jiao X. 2014. Multi-Temporal Polarimetric RADARSAT-2 for Land Cover Monitoring in Northeastern Ontario, Canada. Remote Sensing, 6: 2372-2392.

Carlson T.N., Gillies R.R. and Perry E.M. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. Remote Sensing Reviews, 9: 161-173.

Carlson, T.N., Gillies R.R. and Schmugge T.J. 1995. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. Agricultural and Forest Meteorology, 77: 191-205.

Carreiras, J.M.B., Vasconcelos, M.J. and Lucas, R.M. 2012. Understanding the relationship between aboveground biomass and ALOS PALSAR data in the forests of Guinea-Bissau (West Africa). Remote Sensing of Environment, 121: 426-442.

Chauhan N.S., Miller S. and Ardanuy P. 2003. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. International Journal of Remote Sensing, 24: 4599-4622.

Chehbouni A., Nouvellon Y., Kerr Y.H., Moran M.S., Watts C.J., Prévot L., Goodrich D. and Rambal S. 2001. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site. Remote Sensing of Environment, 76: 360-372.

Chen N., He Y. and Zhang X. 2017. NIR-Red Spectra-Based Disaggregation of SMAP Soil Moisture to 250 m Resolution Based on OzNet in Southeastern Australia. Remote Sensing, 9(4): 1-21.

Choi M. and Hur Y. 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.

Colliander A., Jackson T.J., Bindlish R., Chan S., Das N., Kim S.B., Cosh M.H., Dunbar R.S., Dang L., Pashaian L., Asanuma J., Aida K., Berg A., Rowlandson T., Bosch D., Caldwell T., Caylor K., Goodrich D., al Jassar H., Lopez-Baeza E., Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Livingston S., McNairn H., Pacheco A., Moghaddam M., Montzka C., Notarnicola C., Niedrist G., Pellarin T., Prueger J., Pulliainen J., Rautiainen K., Ramos J., Seyfried M., Starks P., Su Z., Zeng Y., van der Velde R., Thibeault M., Dorigo W., Vreugdenhil M., Walker J.P., Wu X., Monerris A., O'Neill P.E., Entekhabi D., Njoku E.G. and Yueh S. 2017. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. Remote Sensing of Environment, 191: 215-231.

Czajkowski K.P., Goward S.N., Stadler S.J. and Walz A. 2000. Thermal Remote Sensing of Near Surface Environmental Variables: Application Over the Oklahoma Mesonet. The Professional Geographer, 52: 345-357.

Das N., Entekhabi D. and Njoku E. 2011. An Algorithm for Merging SMAP Radiometer and Radar Data for High-Resolution Soil-Moisture Retrieval. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(5): 1504 - 1512

Das N.N., Entekhabi D., Njoku E.G., Shi J.J.C., Johnson J.T. and Colliander A. 2014. Tests of the SMAP Combined Radar and Radiometer Algorithm Using Airborne Field Campaign Observations and Simulated Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52: 2018-2028.

Das N.N., Entekhabi D., Dunbar R.S., Colliander A., Chen F., Crow W., Jackson T.J., Berg A., Bosch D.D., Caldwell T., Cosh M.H., Collins C.H., Lopez-Baeza E., Moghadd-

Ground Observations. Remote Sensing, 7(10): 13273-13297.

Fang B., Lakshmi V., Bindlish R., Jackson T.J., Cosh M. and Basara J. 2013. Passive Microwave Soil Moisture Downscaling Using Vegetation Index and Skin Surface Temperature. Vadose Zone Journal, 12(4): 1-20.

Fang B. and Lakshmi V. 2014. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. Journal of Hydrology, 516: 258-272.

Friedl M.A. and Davis F.W. 1994. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. Remote Sensing of Environment, 48: 1-17.

Goward S.N., Xue Y. and Czajkowski K.P. 2002. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. Remote Sensing of Environment, 79: 225-242.

Hain C.R., Crow W.T., Mecikalski J.R., Anderson M.C. and Holmes T. 2011. An intercomparison of available soil moisture estimates from thermal infrared and passive microwave remote sensing and land surface modeling. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116,D1510,7: 1-18.

He L., Hong Y., Wu X., Ye N., Walker J.P. and Chen X. 2018. Investigation of SMAP Active–Passive Downscaling Algorithms Using Combined Sentinel-1 SAR and SMAP Radiometer Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56: 4906-4918.

Jackson T.J., Vine D.M.L., Hsu A.Y., Oldak A., Starks P.J., Swift C.T., Isham J.D. and Haken M. 1999. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: the Southern Great Plains Hydrology Experiment. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37: 2136-2151.

Jackson T.J., Hsu A.Y. and O'Neill P.E. 2002. Surface Soil Moisture Retrieval and Mapping Using High-Frequency Microwave Satellite Observations in the Southern Great Plains. Journal of Hydrometeorology, 3: 688-699.

Jackson T.J., Vine D.M.L., Schiebe F.R. and Schmugge T.J. 1993. Large area mapping of soil moisture using passive microwave radiometry in the Washita'92 experiment. In, Proceedings of IGARSS '93 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1003: 1009-1012.

Jian P., Alexander L., Olivier M. and V.N.E C. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. Reviews of Geophysics, 55: 341-366.

Kerr Y. 2007. Soil moisture from Space: Where are we? Hydrogeology Journal, 15: 117-120.

am M., Rowlandson T., Starks P.J., Thibeault M., Walker J.P., Wu X., O'Neill P.E., Yueh S. and Njoku E.G. 2018. The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. Remote Sensing of Environment, 211: 204-217.

Desnos Y.L., Buck C., Guijarro J., Levrini G., Suchail J.-L., Torres R., Laur H., Closa J. and Rosich B. 2000. The ENVISAT advanced synthetic aperture radar system. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3: 91-100.

Djamai N., Magagi R., Goïta K., Merlin O., Kerr Y. and Roy A. 2016. A combination of DISPATCH downscaling algorithm with CLASS land surface scheme for soil moisture estimation at fine scale during cloudy days. Remote Sensing of Environment, 184: 1-14.

Djamai N., Magagi R., Goita K., Merlin O., Kerr Y. and Walker A. 2015. Disaggregation of SMOS soil moisture over the Canadian Prairies. Remote Sensing of Environment, 170: 255-268.

Dubois P.C., Zyl J.v. and Engman T. 1995. Measuring soil moisture with imaging radars. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33: 915-926.

Entekhabi D., Asrar G.R., Betts A.K., Beven K.J., Bras R.L., Duffy C.J., Dunne T., Koster R.D., Lettenmaier D.P., McLaughlin D.B., Shuttleworth W.J., Genuchten M.T.v., Wei M.-Y. and Wood E.F. 1999. An Agenda for Land Surface Hydrology Research and a Call for the Second International Hydrological Decade. Bulletin of the American Meteorological Society, 80: 2043-2058.

Entekhabi D., G. Njoku E., E. O'Neill P., Kellogg K.H., Crow W., Edelstein W.N., Entin J., D. Goodman S., J. Jackson T., Johnson J., Kimball J., Piepmeier J., D. Koster R., Martin N., McDonald K., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J. and van Zyl J. 2010. The Soil Moisture Active and Passive (SMAP) mission. Proceedings of the IEEE ,98(5): 704–716.

Covello F., Battazza F., Coletta A., Lopinto E., Fiorentino C., Pietranera L., Valentini G. and Zoffoli S. 2010. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth. Journal of Geodynamics, 49: 171-180.

Falloon P., Jones C.D., Ades M. and Paul K. 2011. Direct soil moisture controls of future global soil carbon changes: An important source of uncertainty. Global Biogeochemical Cycles, 25(3): 1-14.

Fan L., Xiao Q., Wen J., Liu Q., Jin R., You D and Li X. 2015. Mapping High-Resolution Soil Moisture over Heterogeneous Cropland Using Multi-Resource Remote Sensing and

Southeastern Australia. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50: 1556-1571.

Merlin O., Escorihuela M.J., Mayoral M.A., Hagolle O., Al Bitar A. and Kerr, Y. 2013. Self-calibrated evaporation-based disaggregation of SMOS soil moisture: An evaluation study at 3km and 100m resolution in Catalunya, Spain. Remote Sensing of Environment, 130: 25-38.

Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y. and Vidal A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment, 49: 246-263.

Muller E. and Décamps H. 2001. Modeling soil moisture–reflectance. Remote Sensing of Environment, 76:173-180.

Musick H.B. and Pelletier R.E. 1988. Response to soil moisture of spectral indexes derived from bidirectional reflectance in thematic mapper wavebands. Remote Sensing of Environment, 25: 167-184.

Narayan U., Lakshmi V. and Jackson, T.J. 2006. High-resolution change estimation of soil moisture using L-band radiometer and Radar observations made during the SMEX02 experiments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44: 1545-1554.

Narayan U. and Lakshmi V. 2008 . Characterizing subpixel variability of low resolution radiometer derived soil moisture using high resolution radar data. Water Resources Research, 44(6): 1-11.

Nemani R., Pierce L., Running S. and Goward, S. 1993. Developing Satellite-derived Estimates of Surface Moisture Status. Journal of Applied Meteorology, 32: 548-557.

Njoku E.G., Wilson W.J., Yueh S.H., Dinardo S.J., Li F.K., Jackson T.J., Lakshmi V. and Bolten J. 2002. Observations of soil moisture using a passive and active low-frequency microwave airborne sensor during SGP99. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40: 2659-2673.

Njoku E.G., Jackson T.J., Lakshmi V., Chan T.K. and Nghiem S.V. 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41: 215-229.

Nolin M., Bernier M. Perron I. 2012. Digital Mapping of Soil Drainage Classes Using Multitemporal RADARSAT-1 and ASTER Images and Soil Survey Data. Applied and Environmental Soil Science, 2012: 1-18.

ONeili P. and Chauhan N. 1992. Synergistic Use Of Active And Passive Microwave In Soil Moisture Estimation. In, [Proceedings] IGARSS '92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 492-494.

Kerr Y.H., Waldteufel P., Richaume P., Wigneron J.P., Ferrazzoli P., Mahmoodi A., Bitar A.A., Cabot F., Gruhier C., Juglea S.E., Leroux D., Mialon A. and Delwart S. 2012. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50: 1384-1403.

Kim J. and Hogue T.S. 2012. Improving Spatial Soil Moisture Representation Through Integration of AMSR-E and MODIS Products. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50: 446-460.

Leese J., Jackson T., Pitman A. and Dirmeyer P. 2001. Meeting summary: GEWEX/BAHC International Workshop on Soil Moisture Monitoring, Analysis, and Prediction for Hydrometeorological and Hydroclimatological Applications.

Liu Y.Y., Parinussa R., A. Dorigo W., de Jeu R., Wagner W., van Dijk A., McCabe M. and Evans J. 2011. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. Hydrology and Earth System Sciences, 15(2): 425-436.

Malbéteau Y., Merlin O., Molero B., Rüdiger C. and Bacon S. 2016. DisPATCh as a tool to evaluate coarse-scale remotely sensed soil moisture using localized in situ measurements: Application to SMOS and AMSR-E data in Southeastern Australia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 45: 221-234.

Mallick K., Bhattacharya B.K. and Patel N.K. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. Agricultural and Forest Meteorology, 149:1327-1342.

McColl K.A., Alemohammad S.H., Akbar R., Konings A.G., Yueh S. and Entekhabi D. 2017. The global distribution and dynamics of surface soil moisture. Nature Geoscience, 10: 100-104.

Merlin O., Chehbouni A., Walker J.P., Panciera R. and Kerr Y.H. 2008a. A Simple Method to Disaggregate Passive Microwave-Based Soil Moisture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46: 786-796.

Merlin O., Walker J.P., Chehbouni A. and Kerr Y. 2008b. Towards deterministic downscaling of SMOS soil moisture using MODIS derived soil evaporative efficiency. Remote Sensing of Environment, 112: 3935-3946.

Merlin O., Al Bitar A., Walker J.P. and Kerr Y. 2010. An improved algorithm for disaggregating microwave-derived soil moisture based on red, near-infrared and thermal-infrared data. Remote Sensing of Environment, 114: 2305-2316.

Merlin O., Rudiger C., Bitar A.A., Richaume P., Walker J.P. and Kerr Y.H. 2012. Disaggregation of SMOS Soil Moisture in

Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B. and Teuling, A.J. 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews, 99: 125-161.

Shimada M., Isoguchi O., Tadono T., & Isono K. 2009. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47: 3915-3932.

Ulaby, F.T., Moore, R.K., & Fung, A.K. 1981. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Artech House.

Velde R.v.d., Salama M.S., Eweys O.A., Wen J., & Wang Q. (2015). Soil Moisture Mapping Using Combined Active/Passive Microwave Observations Over the East of the Netherlands. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8: 4355-4372.

Wagner W., Blöschl, G., Pampaloni P., Calvet J.-C., Bizzarri B., Wigneron J.-P., & Kerr Y. 2007. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. Hydrology Research, 38: 1-20.

Wagner W., Scipal K., Pathe C., Gerten D., Lucht W., & Rudolf B. 2003. Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108.

Werninghaus R. 2004. TerraSAR-X mission. SPIE.

Wu X., Walker J.P., Rüdiger C., Panciera R., & Gao Y. 2017. Medium-Resolution Soil Moisture Retrieval Using the Bayesian Merging Method. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55: 6482-6493.

Xiwu Z., Houser P.R., Walker J.P., & Crow W.T. 2006. A method for retrieving high-resolution surface soil moisture from hydros L-band radiometer and Radar observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44: 1534-1544.

Ye N., Walker J.P., Bindlish R., Chaubell J., Das N.N., Gevaert A.I., Jackson T.J., & Rüdiger C. 2019. Evaluation of SMAP downscaled brightness temperature using SMAPEx-4/5 airborne observations. Remote Sensing of Environment, 221: 363-372.

Zhang Y., & Wegehenkel M. 2006. Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration. Remote Sensing of Environment, 104: 393-408.

Zhou Z., Zhao S., Chen Z., & Jiang L. 2015. Comparison of different downscaling methods of soil moisture in Luan he Watershed. In, 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 1980-1983).

Owe M., Jeu R.d. and Walker J. 2001. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39: 1643-1654.

Paloscia S., Macelloni G., Santi E. and Koike T. 2001. A multifrequency algorithm for the retrieval of soil moisture on a large scale using microwave data from SMMR and SSM/I satellites. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39: 1655-1661.

Panciera R., Walker J., Kalma J., Kim E., Saleh K. and Wigneron J.-P. 2009. Evaluation of the SMOS L-MEB passive microwave soil moisture retrieval algorithm. Remote Sensing of Environment, 113: 435-444.

Peng J., Niesel J. and Loew A. 2015. Evaluation of soil moisture downscaling using a simple thermal-based proxy – the REMEDHUS network (Spain) example. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19: 4765-4782.

Peng J., Loew A., Zhang S., Wang J. and Niesel J. 2016. Spatial Downscaling of Satellite Soil Moisture Data Using a Vegetation Temperature Condition Index. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54: 558-566.

Piles M., Camps A., Vall-llossera M., Corbella I., Panciera R., Rüdiger C., H. Kerr Y. and Walker J. 2011. Downscaling SMOS-derived soil moisture using MODIS Visible/Infrared data. 49(9): 3156–3166.

Piles M., Petropoulos G.P., Sánchez N., González-Zamora Á. and Ireland G. 2016. Towards improved spatio-temporal resolution soil moisture retrievals from the synergy of SMOS and MSG SEVIRI spaceborne observations. Remote Sensing of Environment, 180: 403-417.

Pu R., Ge S., Kelly N.M. and Gong P. 2003. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (Quercus agrifolia) leaves. International Journal of Remote Sensing, 24: 1799-1810.

Rüdiger C., Calvet J.-C., Gruhier C., Holmes T., de Jeu R. and Wagner W. 2009. An Intercomparison of ERS-Scat and AMSR-E Soil Moisture Observations with Model Simulations over France. Journal of Hydrometeorology, 10.

Rüdiger C., Su C., Ryu D. and Wagner W. 2016. Disaggregation of Low-Resolution L-Band Radiometry Using C-Band Radar Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 13: 1425-1429.

Schmugge T., Gloersen P., Wilheit T. and Geiger, F. 1974. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers. Journal of Geophysical Research (1896-1977), 79: 317-323.