



دوره‌ی ۳۳، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۲۹، زمستان ۱۳۹۹، صفحه‌های ۲۹-۱۷
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2020.127911.1265

پژوهش‌های آبخیزداری

بهبود وضوح مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای SMAP با روش تلفیق رادار - تابش سنج در آبخیز فیروزآباد اردبیل

ایوب کرمی

دانش‌آموخته‌ی دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

حمیدرضا مرادی

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

علی جعفر موسیوند

استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده‌ی علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: hrmoradi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۷ مهر ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۲۷ اسفند ۱۳۹۸

چکیده

امروزه دستیابی به برآوردهای رطوبت خاک سطحی با روش‌های سنجش از دور در منطقه‌ی گسترده با صحت زیاد و در مقیاس زمانی کم‌تر از سه روز امکان‌پذیر شده‌است، اما اندازه‌ی پیکسل این داده‌ها بزرگ است. این پژوهش با هدف ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ی اسمپ و با داده‌های رادار سنتینل-۱، با روش تلفیق رادار-تابش سنج در آبخیز فیروزآباد استان اردبیل انجام شد. در این روش با فرض ارتباط خطی بین رطوبت خاک از تابش سنج (مقدار تنا در پیکسل بزرگ) با پس‌پراکنش رادار (سیگمانات)، ابتدا تصویر رادار به اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر و نه کیلومتر (پیکسل بزرگ) تبدیل شد. سپس در هر پیکسل بزرگ با برقراری ارتباط خطی بین گروه زمانی رطوبت خاک و مقادیر پس‌پراکنش رادار، ضرایب آلفا و بتا به روش وایازی محاسبه شد. با روش تلفیق رادار-تابش سنج رطوبت خاک ریزمقیاس با اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر تهیه شد. مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات خطای نارایب به‌دست‌آمده از اعتبارسنجی روش ریزمقیاس‌سازی ۰/۰۳۹ است و بیان‌گر صحت خوب داده‌های رطوبت خاک با اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر است. مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات خطا نیز ۰/۰۴۳ و نزدیک به مقدار هدف مأموریت اسمپ (ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۵) برای داده‌های یک کیلومتر است. با توجه به محدودبودن داده‌ی رطوبت خاک به نقاط اندازه‌گیری در برخی ایستگاه‌های هواشناسی و کشاورزی کشور و لزوم تهیه‌ی نقشه‌های پیوسته‌ی مکانی در مساحت‌های زیاد، داده‌های رایگان ماهواره‌ی اسمپ و بررسی ریزمقیاس‌سازی آن با داده‌های رادار سنتینل-۱ برای کاربرد در مقیاس محلی و منطقه‌ی می‌تواند ابزاری کارآمد و کم‌هزینه در بخش پژوهش و اجرا باشد.

واژگان کلیدی: آبخیز فیروزآباد، رطوبت خاک، ریزمقیاس‌سازی، Sentinel-1۰ SMAP

مقدمه

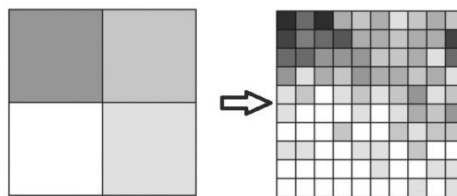
رطوبت خاک متغیر کلیدی است که چرخه‌های آب، کربن و انرژی را با مهار تبخیر و تعرق تأثیرپذیر کرده است (سریواساوا و همکاران ۲۰۱۳) و دارای نقش مهمی در رشد گیاه، و سامان‌دهی زیست بوم‌های طبیعی است (هونگیانگ و مرادخانی ۲۰۱۶؛ برت و همکاران ۲۰۱۳). رطوبت خاک با حفظ اطلاعات آب‌وهوایی ماه‌های گذشته در حافظه‌ی خود، می‌تواند ابزاری ارزشمند برای تحلیل و پیش‌بینی فرآیندهای اقلیمی باشد (مونترکا و همکاران ۲۰۱۶). تغییر رطوبت خاک در مهار نسبت بین نفوذ و روان‌آب و اثرگزاری بر مقدار فرسایش سطحی دارای اهمیت زیادی است (خالدی و همکاران ۲۰۱۴). به‌دلیل حساسیت زیاد مدل‌های بارش-روان‌آب به تغییر وضعیت رطوبت خاک، برآوردهای دقیق این متغیر در سرتاسر آب‌خیز و تلفیق آن با مدل آب‌شناختی باعث بهبود عمل‌کرد برآورد روان‌آب (بروکا و همکاران ۲۰۱۲؛ الوارز و همکاران ۲۰۱۴) یا پیش‌بینی سیلاب خواهد شد (سپهوند و همکاران ۲۰۱۱). این متغیر می‌تواند ابزاری برای اندازه‌گیری مقدار و توزیع بارندگی در مقیاس وسیع نیز باشد (بروکا و همکاران ۲۰۱۲).

روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری و پایش رطوبت خاک وجود دارد که شامل اندازه‌گیری نقطه‌یی، با زمین‌آمار برای میان‌یابی، کاربرد مدل‌های سطح زمین^۱ و مدل‌های آب‌شناختی و روش‌های سنسجش از دور است (انتخابی و همکاران ۲۰۱۰). با روش‌های اندازه‌گیری نقطه‌یی رطوبت خاک برای دوره‌های طولانی مدت و در سطح گسترده دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر است، و نتیجه‌های برداشت‌های نقطه‌یی تنها مناسب محدوده‌های کوچک است. برآورد رطوبت خاک به‌دست‌آمده از روش‌های سنسجش از دور ریزموج^۲ اطلاعات منطقه‌یی گسترده‌یی در مورد رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف داده‌است. امواج ریزموج به‌دلیل قابلیت نفوذ به خاک و اثرپذیری مستقیم از رطوبت خاک و به‌دلیل داشتن قابلیت داده‌برداری در روزهای ابری به‌دلیل امکان نفوذ این امواج از توده‌های ابر، نسبت به روش‌های نوری صحت و

کارایی بیش‌تری در اندازه‌گیری رطوبت خاک نشان داده‌اند (انتخابی و همکاران ۲۰۱۰). پژوهش‌های متعددی در خصوص اعتبارسنجی برآوردهای رطوبت خاک ماهواره‌یی، بررسی کیفیت و دقت بازیابی‌ها و نیز تشخیص خطاهای احتمالی در این داده‌ها انجام شده‌است (آلبرگل و همکاران ۲۰۱۲؛ کولیاندرو و همکاران ۲۰۱۷).

سنجنده‌های ماهواره‌یی ریزموج غیرفعال (تابش‌سنج) با تکرار داده‌برداری کوتاه مدت، دو یا سه روز (مانند ایمسیر^۳، اسموس^۴ و اسمپ^۵)، دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۵ کیلومتراند. این داده‌های بزرگ‌مقیاس رطوبت خاک پاسخگوی نیاز پژوهش‌های آبخیزداری در زمینه‌های آب‌شناسی، محیط‌زیست و کشاورزی در مقیاس محلی نیست. ماهواره‌های راداری دارای قدرت تفکیک مکانی فراوان نیز فاصله‌ی زمانی داده‌برداری طولانی‌تری (بیش از ده روز) دارد و بازیابی رطوبت خاک از این داده‌ها پیچیده است و بی‌قطعیتی بیش‌تری خواهد داشت (داس و همکاران ۲۰۱۴؛ رودیگر و همکاران ۲۰۱۶). بنابراین، با ریزمقیاس‌سازی داده‌های به دست آمده از سنجنده‌های ریزموج غیرفعال دارای دوره‌ی تکرار داده‌برداری در حد دو تا سه روز، می‌توان داده‌های رطوبت خاک، ریزمقیاس با اندازه پیکسل یک کیلومتر به‌دست آورد (داس و همکاران ۲۰۱۴؛ ژائو و همکاران ۲۰۱۴؛ رودیگر و همکاران ۲۰۱۶؛ اکبر و همکاران ۲۰۱۶).

ریزمقیاس‌سازی فرایند استخراج داده‌های با مقیاس محلی تا منطقه‌یی از روی داده‌های بزرگ‌مقیاس است (ترزاسکا و همکاران ۲۰۱۴). در فرآیند ریزمقیاس‌سازی مکانی داده‌های رطوبت خاک، با به‌کارگیری توابع تجربی و ریاضی، از روی داده‌های بزرگ مقیاس داده‌های با مقیاس محلی تا منطقه‌یی (ریزمقیاس) تولید می‌شود. در این فرآیند داده‌ی کمکی با وضوح مکانی زیاد، برای نمایان ساختن واریانس رطوبت خاک درون پیکسل‌های بزرگ و اطمینان از این‌که اطلاعات اضافه شده حین ریزمقیاس‌سازی دارای مبنای فیزیکی است، مورد نیازاند. شکل ۱ نمونه‌ی نمادین داده‌ی ریزمقیاس را در کنار داده‌ی اصلی نشان می‌دهد.



شکل ۱- داده‌ی ریزمقیاس در کنار داده‌ی بزرگ‌مقیاس.

- 1- Land surface model (LSM)
- 2- Microwaves
- 3- Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSRE)
- 4- Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)
- 5- Soil Moisture Active Passive (SMAP)

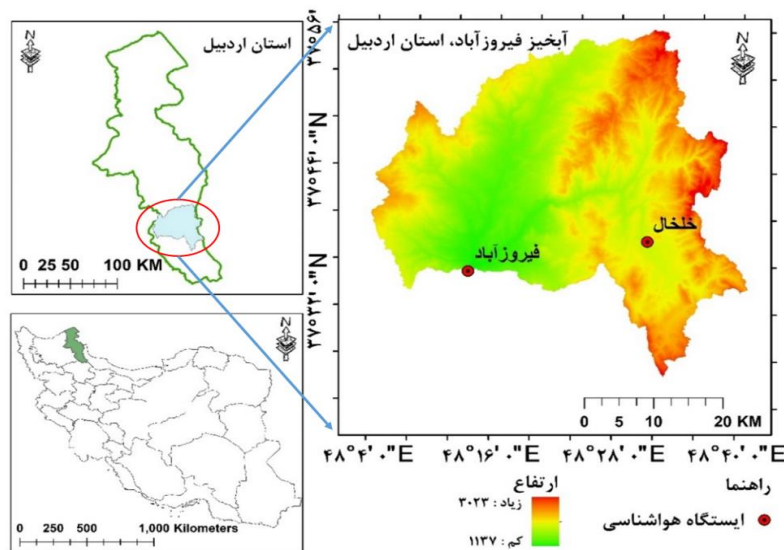
ناسا در سال ۲۰۱۵ ماهواره‌ی اسمپ را براساس مزیت ادغام داده‌ی تابش‌سنج و رادار طراحی و برای تولید داده‌های رطوبت خاک در اندازه‌ی پیکسل ۳۶، نه و سه کیلومتر به فضا پرتاب کرد. پس از گذشت سه ماه، بخش رادار دچار نقص فنی شد. بنابراین، برای ریزمقیاس‌سازی (تولید داده‌ی یک و سه کیلومتر) نیاز به استفاده از سنجنده‌ی رادار مناسب و روش‌های جایگزین است. هدف از این پژوهش بررسی تهیه‌ی داده‌ی رطوبت خاک ریزمقیاس (یک کیلومتر) با به‌کارگیری داده‌ی اسمپ و تلفیق آن با داده‌ی رادار سنتینل-۱ با الگوریتم پایه در جنوب استان اردبیل است.

مواد و روش‌ها

آبخیز فیروزآباد با مساحت ۱۵۰۰ کیلومتر مربع و اقلیم سرد و نیمه‌خشک بخش بزرگی از جنوب استان اردبیل را شامل می‌شود (شکل ۲). بیش از ۶۰٪ این منطقه دیم‌کاری و زراعت آبی است و بقیه به زمین‌های مرتعی و مسکونی اختصاص دارد. پوشش گیاهی مراتع این منطقه علفی و بوته‌یی است که در نیمه‌ی شرقی تراکم زیادی دارد. بخش بزرگی از نیمه‌ی جنوبی این منطقه دارای خاک عمیق لومی-رسی است و در بخش‌های کوهستانی در نیمه‌ی شرقی آن، خاک‌های کم عمق لومی-شنی غالبیت دارند. سایر منطقه‌ها که بخش شمال‌غربی این منطقه را در بر می‌گیرند، دارای خاک‌های نیمه‌عمیق و عمیق لومی-شنی اند (اکبری‌مجدر و همکاران ۲۰۱۸).

نتیجه‌های پژوهش‌های پیشین نشان داده است که با ادغام مزیت‌های داده‌ی سنجنده‌ی ریزموج غیرفعال و رادار (ریزموج فعال)، تولید داده‌ی رطوبت خاک ریزمقیاس (حدود یک کیلومتر) امکان‌پذیر است. این فرآیند تلفیق داده‌های فعال و غیرفعال و به اختصار (کپ) است (اکبری و مقدم ۲۰۱۵). در همین زمینه پیش از تکمیل و پرتاب ماهواره‌ی اسمپ شیوه‌ی ریزمقیاس‌سازی ویژه‌یی به نام الگوریتم پایه‌ی ریزمقیاسی توسعه پیدا کرده است. در آزمون و اعتبارسنجی آن و بررسی موفقیت پروژه از داده‌های به‌دست آمده پروازهای آزمایشی انجام شده در سطح مزارع پژوهشی بخش‌های مختلف آمریکا، استرالیا و کانادا به‌کاربرده شد (داس و همکاران ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴). با این داده‌های تهیه شده و با الگوریتم پایه‌ی داده‌های رطوبت خاک تابش‌سنج با اندازه‌ی پیکسل ۳۶ کیلومتر با پس‌پراکنش رادار^۷ با اندازه‌ی پیکسل سه کیلومتر، به داده‌ی ریزمقیاس تبدیل شد.

در جنوب شرق استرالیا در مساحت ۳۶× کیلومتر تصاویر هوایی با تکرار داده‌برداری دو تا سه روزه با الگوریتم پایه و برای قطبی‌های مختلف رادار، شاخص آروی‌آی^۸ محاسبه و در کاربری‌های مختلف بررسی شده‌است (وو و همکاران ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵). در شرق هلند برای تهیه‌ی نقشه‌ی رطوبت خاک با این روش، از داده‌های ایمسیر و رادار پالسار^۹، رطوبت خاک بزرگ مقیاس ایمسیر به داده‌های ریزمقیاس با ابعاد پیکسل یک و پنج کیلومتر تبدیل شد (وندروالد و همکاران ۲۰۱۴).



شکل ۲- منطقه‌ی بررسی‌شده در استان اردبیل و کشور ایران.

- 6 - Combining Active-Passive
- 7 - Radar backscatter
- 8 - RVI
- 9 - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR)

داده‌ی رطوبت خاک ماهواره‌ی اسمپ

ماهواره‌ی اسمپ حامل سنجنده‌ی مایکروویو باند-ال (طول موج ۱۵-۳۰ سانتی‌متر) است که رطوبت سطحی خاک را در فرکانس ۱/۴ گیگاهرتز برای پیش‌بینی‌های هواشناسی، پایش‌های اقلیمی و چرخه‌ی آب‌شناختی با میزان خطای ۱۰٪ (ریشه‌ی میانگین مربعات خطا برابر ۰/۰۴ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) بازیابی می‌نماید. داده‌های این ماهواره به‌طور منظم پردازش شده و به‌شکل محصولات متنوع (دمای درخشندگی، رطوبت خاک

سطحی و ناحیه‌ی ریشه) با اندازه‌ی پیکسل ۳۶، نه و سه کیلومتر دست‌رس است (کولیاندر و همکاران ۲۰۱۷). در این پژوهش برای سال‌های ۲۰۱۵ (۱۳۹۴) تا ۲۰۱۷ (۱۳۹۶) محصولات روزانه‌ی رطوبت خاک اسمپ با اندازه‌ی پیکسل نه کیلومتر (تعداد ۱۰۰ تصویر) از وبگاه داده‌های زمین^{۱۰} تهیه و برای ریزمقیاس‌سازی به کار گرفته شد. ویژگی‌های محصول رطوبت خاک ماهواره‌ی اسمپ در جدول ۱ آورده شده است.

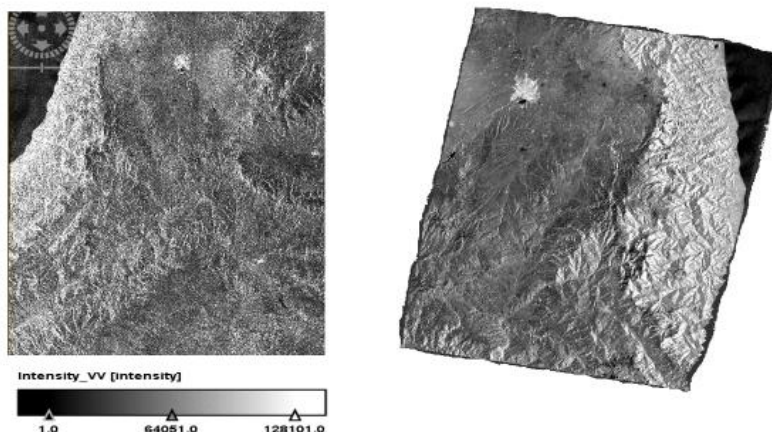
جدول ۱- ویژگی‌های داده‌ها و تصویرهای کاربردی در ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک اسمپ در آبخیز فیروزآباد

داده	تکرار داده برداری	تفکیک مکانی (متر)	دوره‌ی آماری	محصول کاربردی	منبع	تعداد
رطوبت خاک اسمپ	دو یا سه روز	نه کیلومتر	۲۰۱۷ - ۲۰۱۵	L3_SM_P_E	ناسا	۱۰۰
Sentinel-1A & B	شش تا ۱۲ روز	۲۰	۲۰۱۷ - ۲۰۱۵	IW_GRD-HD-L2 - Dual-Pol	سازمان فضایی اروپا	۱۰۰
مدل رقومی ارتفاع	-	۳۰	-	-	SRTM - DEM	-

پایگاه داده ماهواره‌ی آلاسکا^{۱۳}، وابسته به سازمان فضایی ناسا دریافت شد، اما به دلیل هم‌زمان نبودن برخی روزها با ماهواره‌ی اسمپ تنها ۱۰۰ تصویر به کار گرفته شد. اگر هم‌زمان نبودند تصاویر سنتینل-۱ یک روز قبل به کار گرفته می‌شد. تصویرهای تهیه شده دارای قطبیت‌های^{۱۴} عمودی-عمودی و عمودی-افقی با عرض ۲۵۰ کیلومتر (قدرت تفکیک مکانی ۲۰متر) بودند.

داده‌های رادار ماهواره‌ی سنتینل-۱

تصویرهای ماهواره‌ی رادار سنتینل-۱ آ و سنتینل-۱ ب از نوع رادار با گشودگی مصنوعی^{۱۱} (جدول ۱) در محدوده‌ی باند سی^{۱۲} (۵/۳ گیگاهرتز و طول موج ۷/۵-۳/۸ سانتی‌متر) است و قدرت تفکیک زمانی آن ۶ تا ۱۲ روز است که در عرض‌های جغرافیایی زیاد به کم‌تر از سه روز نیز می‌رسد (کورنلسن و کولیبالی ۲۰۱۳ و ایزا ۲۰۱۵). تعداد ۱۱۵ تصویر سنتینل-۱ از



شکل ۳- چپ: تصویر رادار قبل از انجام پیش پردازش؛ راست: تصویر رادار پس از انجام پیش پردازش.

10 - <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

11 - Synthetic Aperture Radar (SAR)

12 - C-band

13 - <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>

14 - Polarization (Vertical or Horizontal)

با مشخص شدن ضرایب و ایازی برای هر پیکسل با رابطه‌ی ۲ رطوبت خاک ریزمقیاس (اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر) تهیه شد. در رابطه‌ی ۲ تا اما رطوبت حجمی خاک (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) برای اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر است. رابطه‌ی ۱ و ۲ برای هر پیکسل تصویر به طور مجزا از پیکسل‌های همسایه محاسبه شد.

$$\theta_c = \alpha_c + \beta_c * \sigma_c^0$$

$$\theta_m = \theta_c + \beta_c * (\sigma_m^0 - \sigma_c^0)$$

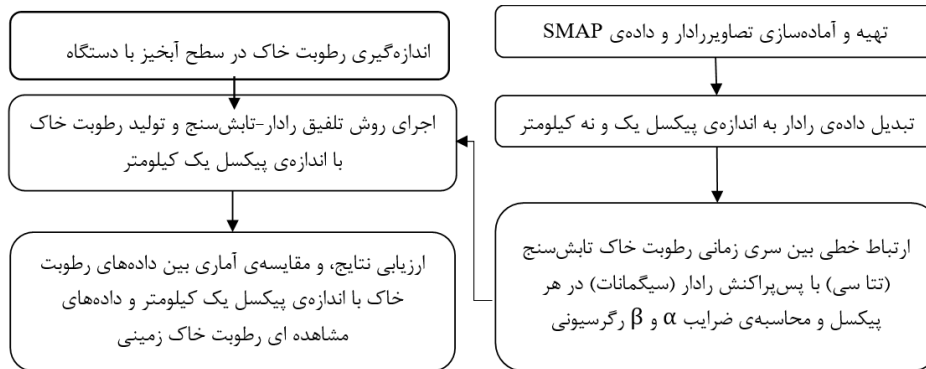
شکل ۴ نمودار جریانی روش ریزمقیاس‌سازی داده‌ی رطوبت خاک اسمپ را نشان می‌دهد.

برای بررسی دقت نتایج برآوردهای رطوبت خاک در اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر، اندازه‌گیری زمینی رطوبت خاک تهیه شده به وسیله‌ی نگارنده و از داده‌های پژوهش اکبری‌مجدر (۲۰۱۸) که در پنج روز مختلف و هم‌زمان با روز گذر ماهواره‌ی از منطقه‌ی بررسی شده برای بررسی دقت داده‌ی رطوبت خاک ماهواره‌ی برداشته شده بود، به کار گرفته شد. این اندازه‌گیری‌ها از عمق پنج سانتیمتری سطح زمین بود و با دستگاه رطوبت‌سنج تی-دی آر مدل تتاپروب ام-ال سه^{۲۴} اندازه‌گیری شده بود. داده‌ها در هر محدوده‌ی ۱۰۰ مترمربعی در پنج نقطه به شکل پراکنده برداشته و میانگین آن‌ها رطوبت خاک آن محدوده ثبت شده بود. محدوده‌ها به گونه‌ی انتخاب شده بودند که از نظر متغیرهای مختلف مکانی مانند پستی‌وبلندی، کاربری زمین و زبری سطح خاک، در یک سطح وسیع یکنواخت است و برای برداشت گروهی و آسان امکان دسترسی به آن‌ها با جاده وجود داشته باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده با این نوع دستگاه رطوبت‌سنج با ضریب تبدیل استاندارد ثبت شده در دفترچه‌ی راهنمای دستگاه به رطوبت سطحی خاک تبدیل شد. شکل ۵ محل نقاط نمونه‌برداری در آبخیز فیروزآباد را نشان می‌دهد. در بررسی تغییر زمانی و میزان هماهنگی تغییر با داده‌ی بارندگی، داده‌های رطوبت خاک یک کیلومتر در محل متناظر با مختصات ایستگاه هواشناسی فیروزآباد استخراج و مقایسه‌ی گروه زمانی داده‌های بارش و تغییر زمانی رطوبت خاک نه و یک کیلومتر انجام شد.

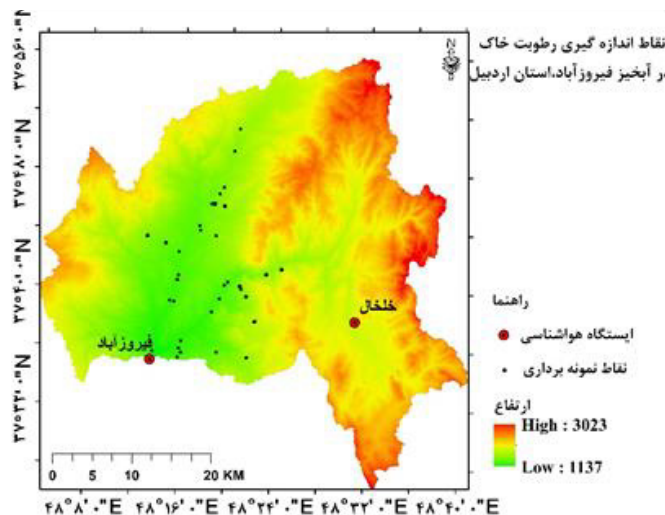
برای پردازش تصویرهای رادار، به ترتیب تنظیم ویژگی‌های مداری، واسنجی موج‌سنجی^{۱۵} و تبدیل عدد راقومی^{۱۶} به پس‌پراکنش رادار، رفع نویز حرارتی^{۱۷}، تبدیل پیکسل تصویر به حالت مربع شکل^{۱۸}، کاهش نویز لکه‌یی^{۱۹}، تصحیح هندسی و پستی‌وبلندی^{۲۰} و برش تصویر در نرم‌افزار اسنپ^{۲۱} نسخه شش انجام شد (سانتی و همکاران ۲۰۱۸). برای رفع سیگنال‌های اشتباه (نویز)، فیلتر لی اصلاح شده^{۲۲} و برای تصحیح پستی و بلندی داده‌ی مدل راقومی ارتفاع به کار برده شد. با توجه به خطای کم‌تر داده‌های با قطبیت عمودی-عمودی در برآورد رطوبت خاک این قطبیت به کار گرفته شد (داس و همکاران ۲۰۱۴). شکل (۳) یک تصویر اولیه و پردازش‌شده‌ی سنتینل-۱ را نشان می‌دهد.

داده‌ی رطوبت سطحی خاک ماهواره‌ی اسمپ با اندازه‌ی پیکسل نه کیلومتر که دارای وضوح مکانی کم (اندازه پیکسل درشت) است، به کار گرفته شد. این داده‌ها با استفاده از ویژگی‌های پس‌پراکنش رادار که مرتبط با رطوبت خاک است و با به کارگیری الگوریتم پایه‌ی اسمپ، ریزمقیاس‌سازی شد. در این روش مشاهدات رادار برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های بزرگ‌مقیاس اسمپ به کار گرفته می‌شود، بنابراین با از کار افتادن بخش رادار اسمپ، مشاهدات رادار سنتینل-۱ به عنوان جایگزین، پژوهش و بررسی شد. روش ریزمقیاس‌سازی با الگوریتم پایه، بر ارتباط خطی بین رطوبت خاک تابش‌سنج با پس‌پراکنش رادار سنتینل-۱ استوار است (داس و همکاران ۲۰۱۴). تصویر اصلی رادار با میانگین‌گیری به اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر و نه کیلومتر (مقیاس بزرگ) نمونه‌گیری مجدد^{۲۳} (یا تبدیل) شد. سپس در هر پیکسل بزرگ ارتباط خطی بین گروه زمانی رطوبت خاک اسمپ (تتا سی) و مقادیر سیگمانات ایجاد و ضرایب آلفا و بتا رگرسیون محاسبه شدند (رابطه‌ی ۱). نشانه ام و سی به ترتیب برای اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر و نه کیلومتر (مقیاس بزرگ) به کار گرفته شد. سیگمانات ام (پیکسل یک کیلومتر) با میانگین‌گیری از پیکسل‌های اصلی تصویر رادار (۲۰ متر) حاصل شد و سیگمانات سی با میانگین‌گیری از همه‌ی پیکسل‌های اصلی تصویر رادار که در قاب نه در نه کیلومتر قرار می‌گیرند به دست آمد (داس و همکاران ۲۰۱۴؛ وندروالد و همکاران ۲۰۱۴).

- 15 - Radiometric Calibration
- 16 - DN
- 17 - Thermal noise removal
- 18 - Multilooking
- 19 - Speckle reduction
- 20 - Geometric and terrain correction
- 21 - SNAP 6.0
- 22 - Refined lee
- 23- Regrid
- 24 - TDR - Tetra probe ML3



شکل ۴ - نمودار جریان الگوریتم پایه تهیه شده برای ریزمقیاس سازی رطوبت خاک اسمپ.



شکل ۵ - موقعیت نقاط اندازه‌گیری رطوبت خاک با ارزیابی نتایج ریزمقیاس سازی داده‌ی اسمپ.

نیز، میانگین خطای ارزیابی^{۲۷} محاسبه شد. برای بررسی میزان قوی بودن ارتباط بین مشاهده‌ها و برآوردها نیز ضریب همبستگی به کار گرفته شد (رابطه‌های ۳ تا ۵) (داس و همکاران ۲۰۱۱؛ ژائو و همکاران ۲۰۱۸). که در آن‌ها مقادیر «اس ام او»^{۲۸} رطوبت خاک مشاهده‌ی، «اس ام اس»^{۲۹} رطوبت خاک ریزمقیاس و «ان»^{۳۰} تعداد داده‌ها است.

برای اندازه‌گیری تفاوت بین مجموعه‌ی داده‌های ریزمقیاس شده و مشاهدات زمینی از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا^{۲۵} و ریشه‌ی میانگین مربعات خطای ناریب^{۲۶} (که برای جلوگیری از انحراف‌های احتمالی ایجاد شده بین رده داده‌ها استفاده می‌شود) محاسبه شدند (داس و همکاران ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴). برای بیان بیش یا کم‌برآورد بودن نتیجه‌های روش

25 - RMSE
 26 - Unbiased RMSE (UnbRMSE)
 27 - Bias (MBE)
 28 - SMO
 29 - SMs
 30 - n

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SM_o - SM_s)^2}{n}} \quad (3)$$

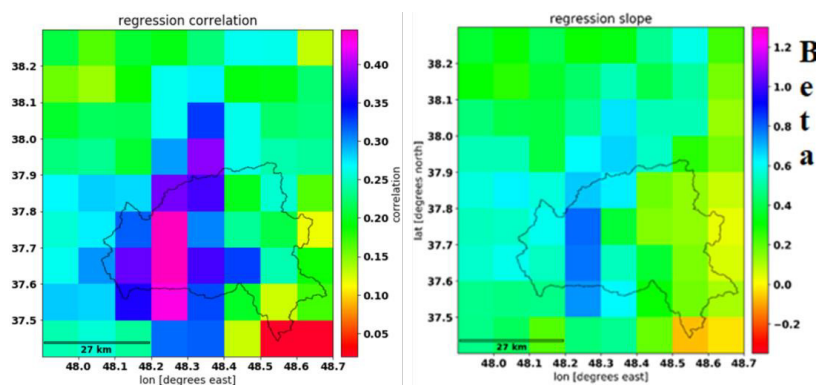
$$UnbRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((SM_o - \overline{SM_o}) - (SM_s - \overline{SM_s}))^2}{n}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (SM_o - SM_s)}{n} \quad (5)$$

این تفاوت مقادیر در بخش‌های با پستی‌وبلندی بیش‌تر در شرق و شمال‌شرق با بخش جنوب و جنوب‌غربی، با توجه به شرایط پستی‌وبلندی منطقه، پوشش گیاهی و زبری سطح زمین متفاوت است.

نتایج

شکل ۶ نقشه‌های مکانی بتا و ضریب همبستگی بین سیگمانات و تتا را نشان می‌دهد. ویژگی بتا ناهمگونی در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد. در نیمه‌ی غربی بیش‌تر از نیمه‌ی شرقی است.

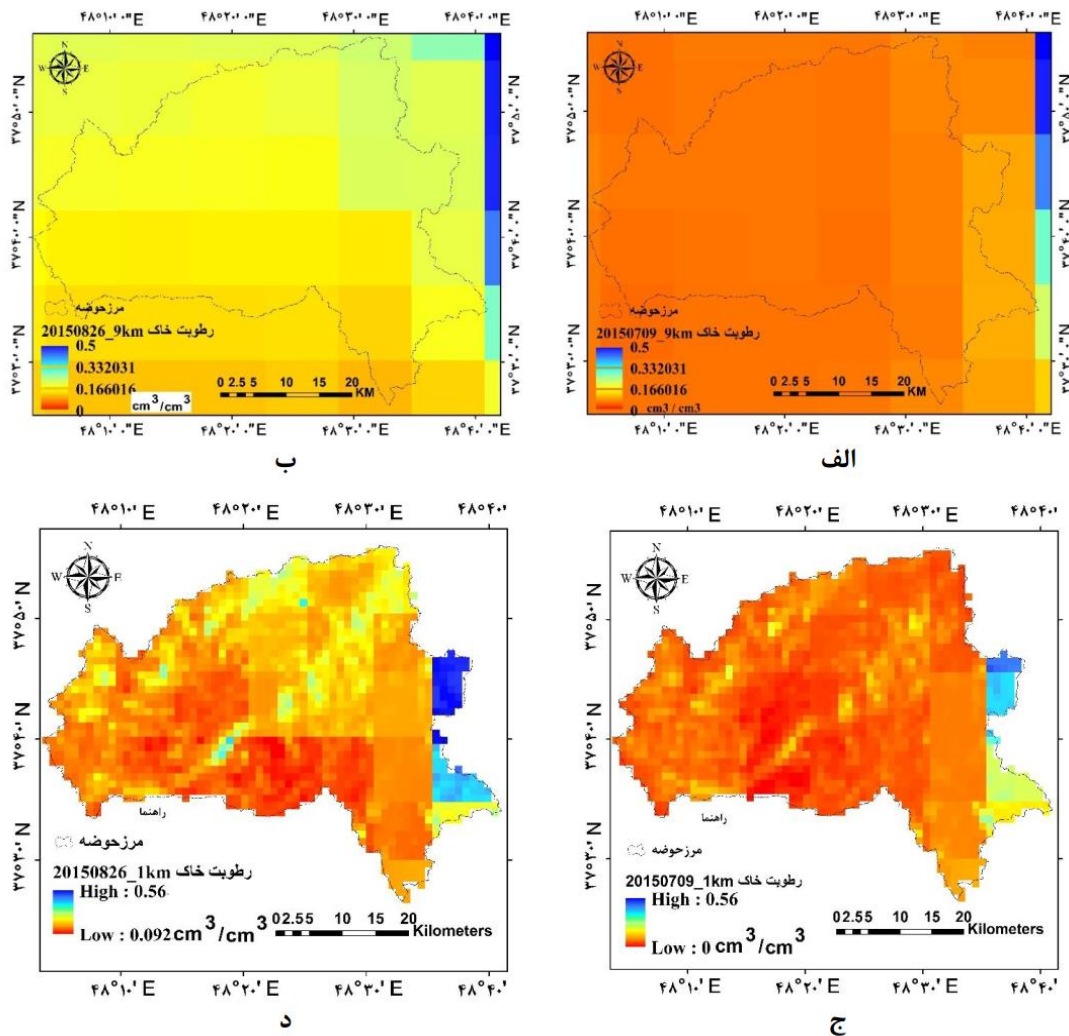


شکل ۶- نقشه‌ی مکانی شیب خط رگرسیون (راست)، و نقشه‌ی ضریب همبستگی بین پراکنش رادار و رطوبت خاک (چپ).

در داده‌ی یک کیلومتر شده و از نظر بصری داده‌ی ریزمقیاس برای کل منطقه دارای الگوی توزیع مکانی مشابهی با اسمپ است. روش به طور مؤثری شرایط خشک و مرطوب را متمایز و برآوردهای خوبی در ریزمقیاس تولید کرده است. با توجه به نتیجه‌های شکل ۷ نواحی جنوبی آبخیز که دارای شیب و ارتفاع کم‌تر است و بارش کم‌تری دریافت می‌کند اغلب در شرایط خشک رطوبت کم‌تری دارند. در حالی که نواحی شرقی آبخیز همواره رطوبت فراوانی دارند.

برای بررسی توزیع مکانی رطوبت خاک در شرایط بارانی (مرطوب) و در شرایط بی بارش در نهم جولای ۲۰۱۵ و ۲۶ آگوست ۲۰۱۵ که به ترتیب روز خشک و مرطوب‌اند بررسی شدند. نقشه‌های رطوبت خاک با پیکسل یک کیلومتر و داده‌ی اصلی اسمپ در همان تاریخ‌ها نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.

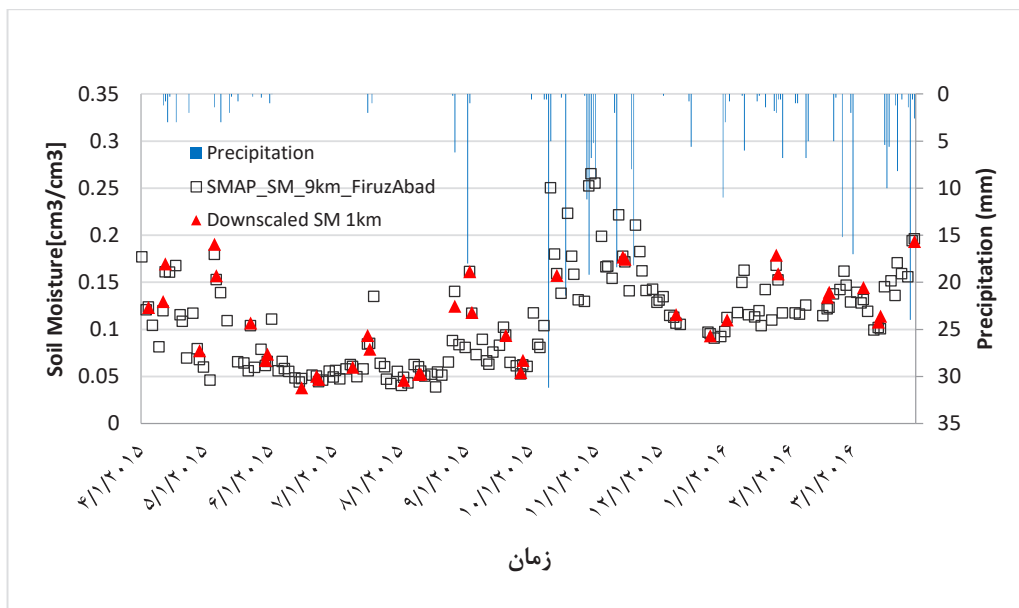
با توجه به نقشه‌ی رطوبت خاک، داده‌های رادار سنتینل-۱ با قدرت تفکیک مکانی فراوان سبب افزایش جزئیات مکانی



شکل ۷- نقشه‌ی رطوبت خاک ماهواره‌ی اسمپ در روز خشک (الف) و مرطوب (ب)؛ رطوبت خاک یک کیلومتر حاصل از اجرای روش ریزمقیاس‌سازی در روز خشک (ج) و مرطوب (د) در آبخیز فیروزآباد اردبیل.

این یافته نشان می‌دهد که رطوبت خاک به‌دست آمده از شیوه‌ی ریزمقیاس‌سازی به‌خوبی خصوصیات تغییر زمانی اسمپ را حفظ کرده است. بررسی گروه زمانی محصول رطوبت خاک ریزمقیاس تولید شده در اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر نشان دهنده‌ی الگوی زمانی مرطوب در ماه‌های دارای بارندگی است که به‌طور معمول بیش‌تر در زمستان و بهار است. در این ناحیه در ماه‌های بهار و زمستان میزان رطوبت بیشتر از سایر ماه‌ها است. مقادیر کمینه‌ی رطوبت خاک نیز در فصل تابستان و بخش‌هایی از پاییز رخ داده است به‌گونه‌ی که در طول دوره‌ی خشک (ماه می تا سپتامبر) مقادیر رطوبت خاک کم است.

برای بررسی تغییر زمانی رطوبت خاک، مقادیر داده برای پیکسل منطبق بر مختصات ایستگاه هم‌دید فیروزآباد استخراج و نمودار تغییر رطوبت خاک اسمپ، رطوبت خاک یک کیلومتر و بارندگی روزانه‌ی ایستگاه هواشناسی فیروزآباد در طول زمان در شکل ۸ ترسیم شد. براساس گروه زمانی تغییر داده اسمپ و داده‌های ریزمقیاس، میزان رطوبت خاک در دوره‌های خشک (تابستان) کم بود و افزایش و کاهش رطوبت بعد از وقایع بارندگی در فصل خشک مشاهده شد. از نظر تغییر زمانی هماهنگی خوبی بین گروه داده‌ها وجود داشت و اختلاف زیادی بین رطوبت خاک یک کیلومتر و نه کیلومتر مشاهده نشد.



شکل ۸- تغییر رطوبت خاک اسمپ، رطوبت خاک یک کیلومتر خروجی الگوریتم ریزمقیاس‌سازی و بارندگی در طول زمان در ایستگاه سینوپتیک فیروزآباد-اردبیل (ضریب همبستگی برابر ۰/۳۸۶).

نیز بیان‌گر مقدار جزئی بیش برآوردی در رطوبت خاک یک کیلومتر در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی است. ارزیابی مقدار شاخص آماری اختلاف ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (جدول ۲) برابر ۰/۴۳ است که نزدیک به مقدار هدف ماهواره‌ی اسمپ برای داده‌های ریزمقیاس (۰/۰۵) است.

براساس نتایج آماره‌های اعتبارسنجی به‌دست آمده از ارزیابی داده‌های ریزمقیاس با مشاهدات زمینی (جدول ۲)، مقدار ضریب همبستگی ۰/۳۸ و مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات خطای نارایب ۰/۳۹ است. این مقادیر بیانگر صحت خوب داده‌های رطوبت خاک ریزمقیاس است. مقدار ارزیابی محاسبه‌شده به‌میزان ۰/۰۵

جدول ۲- نتایج برآوردهای رطوبت خاک ریزمقیاس بر اساس داده‌های زمینی.

UnbRMSE cm ³ /cm ³	Bias (cm ³ /cm ³)	RMSE (cm ³ /cm ³)	p-value	R	داده
۰/۰۳۹	۰/۰۰۵	۰/۰۴۳	۰/۰۱۲۷	۰/۳۸۶	SMAP-Sentinel SM 1 km

این روش به‌طور مؤثری شرایط خشک و مرطوب را متمایز و برآوردهای خوبی در ریزمقیاس تولید کرده است. به‌دلیل ماهیت این روش تلفیقی است که در آن داده‌ی اصلی اسمپ همان‌روز به‌عنوان مرجع ریزمقیاس‌سازی به‌کارگرفته می‌شود (ژائو و همکاران ۲۰۱۸).

براساس گروه زمانی تغییرداده‌ی اسمپ و داده‌های ریزمقیاس، میزان رطوبت خاک به‌دلیل اثر تبخیر و تعرق در دوره‌های خشک (تابستان) کم بود و افزایش و کاهش رطوبت بعد از وقایع بارندگی در فصل خشک مشاهده شد. از نظر تغییر زمانی نیز هماهنگی خوبی بین گروه داده‌ها وجود داشته است و اختلاف زیادی بین رطوبت خاک یک کیلومتر و نه کیلومتر مشاهده نمی‌شود. این نشان می‌دهد که رطوبت خاک به‌دست آمده از شیوه‌ی ریزمقیاس‌سازی به‌خوبی خصوصیات تغییر زمانی اسمپ را حفظ کرده است. از طرف دیگر بررسی گروه زمانی محصول رطوبت خاک ریزمقیاس تولیدشده در اندازه‌ی پیکسل

با توجه به مقدار احتمال آزمون بررسی معنی‌دار بودن، که ۰/۰۱۲۷ محاسبه شد و کم‌تر از ۰/۰۵ است فرض صفر با اطمینان ۰/۹۵ رد می‌شود. نتایج محاسبه شده با اطمینان ۰/۹۵ درصد معنی‌دار است و بر این اساس صحت ارزیابی تأیید شد.

بحث

تفاوت مقادیر شیب خط رگرسیونی و ضریب همبستگی در بخش‌های با پستی‌وبلندی بیش‌تر در شرق و شمال‌شرق نسبت به بخش‌های جنوب و جنوب‌غربی، به‌میزان کیفیت متفاوت مشاهدات ماهواره‌ی در نواحی مختلف مربوط است. در این زمینه نتیجه‌ی پژوهش‌های پیشین نشان داد که کیفیت متفاوت مشاهدات ماهواره‌ی با توجه به شرایط پستی‌وبلندی منطقه، پوشش گیاهی و زبری سطح زمین متفاوت است (داس و همکاران ۲۰۱۱؛ پلوسی‌کا و همکاران ۲۰۱۳؛ وندروالد و همکاران ۲۰۱۴).

شدید رطوبتی دیده نشود (اکبری مجدر و همکاران ۲۰۱۸).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر در زمینه‌ی ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ی اسمپ با داده‌های رادار سنتینل-۱ با روش تلفیق رادار-تابش‌سنج در آبخیز فیروزآباد استان اردبیل انجام شد. در فرآیند ریزمقیاسی با این روش ارتباط بین رطوبت خاک اسمپ با سیگمانات رادار خطی فرض شد و شیب این رابطه‌ی خطی در ریزمقیاس‌سازی به‌کار گرفته شد. نتیجه‌ها نشان داد داده‌های رادار سنتینل-۱ با قدرت تفکیک مکانی زیاد سبب افزایش جزئیات مکانی در داده‌ی ریزمقیاس با ابعاد یک کیلومتر شده‌است و این افزایش وضوح و توزیع اطلاعات مکانی رطوبت خاک در منطقه با شرایط طبیعی هماهنگ است. برآوردهای منطقی در شرایط خشک و مرطوب و تغییرات رطوبت خاک نیز نشان دهنده‌ی توانایی خوب روش ریزمقیاس‌سازی است. در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی مقادیر آماره‌های خطا (ریشه‌ی میانگین مربعات خطا برابر ۰/۰۴۳) نیز نشان‌دهنده‌ی صحت زیاد نتایج ریزمقیاس‌سازی داده رطوبت خاک است. تغییر رطوبت خاک در پاسخ به بارندگی نیز به‌خوبی منعکس شده است. این نتیجه‌ها نشان دهنده‌ی توانایی الگوریتم پیشنهادی در ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک اسمپ با داده‌های سنتینل-۱ بود و سازگاری با مشاهدات در محل را پشتیبانی می‌کند. با توجه به این‌که شبکه‌ی سنجش رطوبت خاک در کشور محدود به نقاط اندازه‌گیری در برخی ایستگاه‌های هواشناسی و کشاورزی است و به نظر این اطلاعات پاسخ‌گوی نیاز تهیه‌ی نقشه‌های پیوسته مکانی برای مدل‌سازی آب‌شناختی، همگون‌سازی داده‌های رطوبت خاک^{۳۱} و برنامه‌ریزی منابع آب نیست. از این‌رو روش ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌های ریزموج با داده‌های رادار سنتینل-۱، می‌تواند ابزاری کارآمد و کم هزینه برای تهیه و استخراج نقشه‌های توزیع رطوبت خاک در گستره‌های بزرگ برای کاربر در بخش پژوهش و اجرا باشد.

سپاسگزاری

نگارندگان از سازمان ناسا، آژانس فضایی اروپا و سازمان هواشناسی کشور به‌ترتیب به‌دلیل در اختیار قراردادن داده‌های ماهواره‌ی اسمپ، تصویرهای رادار سنتینل-۱ و داده‌های هواشناسی تشکر می‌کنند. از آقای دکتر اکبری مجدر برای کمک در تهیه‌ی اندازه‌گیری‌های زمینی رطوبت خاک و از آقای دکتر آلبرت فندایک استاد دانشگاه ملی استرالیا به‌خاطر راهنمایی‌ها ارزنده کمال تشکر را دارند.

یک کیلومتر نشان دهنده‌ی الگوی زمانی مرطوب در ماه‌های بارندگی است که به‌طور معمول بیش‌تر در زمستان و بهار است. در این ماه‌ها به‌علت خنکی هوای منطقه میزان تبخیر و تعرق کم و میزان رطوبت زیاد از سایر ماه‌ها است. مقادیر کمینه‌ی رطوبت خاک نیز در فصل تابستان و بخش‌هایی از پاییز رخ داده است به‌گونه‌ی که در طول دوره‌ی خشک (ماه می تا سپتامبر) مقادیر رطوبت خاک کم است. دلیل این نتیجه‌ها اثر قوی تبخیر و تعرق در این بازه از سال و در شرایط اقلیم مدیترانه‌ی و کمبود بارش در فصل خشک است. در پژوهش‌هایی نیز کمبود بارش و زیادبودن تبخیر و تعرق در فصل خشک علت کم بودن رطوبت خاک در داده‌ی یک کیلومتر گزارش شده است.

اعتبارسنجی برآوردهای رطوبت خاک ریزمقیاس براساس داده‌های زمینی نیز بیان‌گر صحت خوب داده‌های رطوبت خاک یک کیلومتر است. با روش ادغام رادار-تابش‌سنج با داده‌های رادار و تابش‌سنج سنج‌سنجده‌ی پالس دارای باند-ال در ایالت آیووا (داس و همکاران ۲۰۱۱) مقدارریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۳۵۸ به‌دست آمد. در دیگر مطالعات نیز که این روش به‌کار گرفته شده است، مقدار خطا بین ۰/۰۳۵ تا ۰/۱ به دست آمده است (جیانگ و همکاران ۲۰۱۷). این نتیجه‌ها بیان‌گر صحت خوب این روش است.

وجود تغییرات مکانی در متغیرهایی مانند بارش، پستی‌وبلندی (درجه و جهت شیب)، دمای سطحی خاک، ویژگی‌های فیزیکی (بافت خاک و میزان کربن آلی) و ویژگی‌های آبی خاک بر مقدار تبخیر و تعرق و نگاه‌داشت رطوبت در خاک مؤثر است. برهم‌کنش این متغیرها توزیع ضریب دی الکتریک و در نتیجه توزیع مکانی مقدار پس‌پراکنش رادار را در منطقه مهار می‌کند (وندروالد و همکاران ۲۰۱۴). در فاصله‌ی زمانی نهم جولای تا ۲۶ اوست ۲۰۱۵ در منطقه‌ی بررسی‌شده بارش دارای تغییرات زیاد بود اما سایر متغیرها تغییر چندانی نداشت یا ثابت بود، بنابراین به‌نظر می‌رسد وقایع، مقدار و توزیع مکانی بارش، مهارکننده‌ی میزان پس‌پراکنش رادار و در نتیجه تغییر ناپیکنواخت رطوبت خاک در منطقه است. به‌گونه‌ی که نواحی جنوبی آبخیز که دارای شیب و ارتفاع کم‌تر است و بارش کم‌تری دریافت می‌کند اغلب در شرایط خشک رطوبت کم‌تری نیز دارد. در حالی که نواحی شرقی آبخیز همواره رطوبت بیشتری دارند. این نتیجه‌ها با پژوهش اکبری‌مجدر (۲۰۱۸) و اکبری و همکاران (۲۰۱۸) هم‌خوانی دارد. ناحیه‌ی شرقی منطقه که در مجاورت با کوه‌های تالش قرار دارند به‌واسطه‌ی قرارگیری در ارتفاع بیش‌تر و تأثیرپذیری از عبور جریان‌های هوایی مرطوب دریای خزر همواره رطوبت بیش‌تری دارند و این شرایط سبب می‌شود که در شرایط نبود بارندگی نیز خشکی در خاک سطحی مشاهده نگردد و نوسانات

- Akbar R, Das N, Entekhabi D, Moghaddam M. 2016. Active and passive microwave remote sensing synergy for soil moisture estimation, satellite soil moisture retrieval. Elsevier Inc. pp. 187–207
- Akbar R, 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(6): 3312–24.
- Akbari Majdar H. 2018. Downscaling the surface soil moisture data extracted from the SMAP images, using the simulated soil moisture pattern. Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tarbiat Modares University. 124 p. (In Persian).
- Akbari Majdar H, Vafakhah M, Sharifikia M, Ghorbani A. 2018. Spatial and temporal variability of soil moisture in relation with topographic and meteorological factors in south of Ardabil Province, Iran. *Environmental monitoring and assessment*. 190(9): 500–510
- Albergel C, De Rosnay P, Gruhier C, Muñoz-Sabater J, Hasenauer S, Isaksen L, Kerr Y, Wagner W. 2012. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*. 118(1): 215–226.
- Alvarez-Garreton C, Ryu D, Western AW, Crow WT, Robertson DE. 2014. The impacts of assimilating satellite soil moisture into a rainfall–runoff model in a semi-arid catchment. *Journal of Hydrology*. 519(1): 2763–2774
- Barrett B, Petropoulos G. 2013. Satellite Remote Sensing of Surface Soil Moisture, in: Petropoulos GP. *Remote sensing of energy fluxes and soil moisture content*. CRC Press. pp. 85–120
- Brocca L, Tullio T, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. 2012. Catchment scale soil moisture spatial–temporal variability. *Journal of Hydrology*. 422(1): 63–75
- Colliander A, Jackson TJ, Bindlish R, Chan S, Das N, Kim SB, Cosh MH, Dunbar RS, Dang L, Pashaian L, Asanuma J. 2017. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote Sensing of Environment*. 191(1): 215–231.
- Das NN, Entekhabi D, Njoku EG. 2011. An algorithm for merging SMAP radiometer and radar data for high-resolution soil-moisture retrieval. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 49(5): 1504–1512
- Das NN, Entekhabi D, Njoku EG, Shi JJC, Johnson JT, 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(4): 2018–2028.
- Entekhabi D, Njoku EG, O’Neill PE, Kellogg KH, Crow WT, Edelstein WN, et al. 2010. The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*. 98(5): 704–716.
- ESA. 2015. European Space Agency website. [RLwww.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1)
- Jiang H, Shen H, Li H, Lei F, Gan W, Zhang L, 2017. Evaluation of multiple down-scaled microwave soil moisture products over the Central Tibetan Plateau. *Remote Sensing*. 9(5):402–410.
- Hongxiang Y, Moradkhani H. 2016. Combined assimilation of streamflow and satellite soil moisture with the particle filter and geostatistical modeling. *Advance Water Resources*. 94(2): 364–378
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SH, Homae

- M, Arabkhedri M. 2014. Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrology Processes*. 28(3): 4463–4471.
- Kornelsen, KC, Coulibaly P, 2013. Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar and hydrology applications. *Journal of Hydrology*. 476(4): 460–489.
- Montzka C, Jagdhuber T, Horn R, Bogena HR, Hajnsek I, Reigber A, Vereecken H, 2016. Investigation of SMAP fusion algorithms with airborne active and passive l-band microwave remote sensing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 54(4): 3878–3889.
- Paloscia S, Pettinato S, Santi E, Notarnicola C, Pasolli L, Reppucci A. 2013. Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation. *Remote Sensing of Environment*. 134(1): 234–248.
- Rüdiger C, Member S, Su C, Ryu D, Wagner W, Member S, Rüdiger C, Ieee SM, Su C, Ryu D, Wagner W, Ieee SM. 2016. Disaggregation of low-resolution l-band radiometry using c-band radar data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 1–5.
- Santi E, Paloscia S, Pettinato S, Brocca L, Ciabatta L, Entekhabi D. 2018. On the synergy of SMAP, AMSR2 and SENTINEL-1 for retrieving soil moisture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 65(2): 114–123.
- Sepahvand A, Taie Semiromi M, Mirnia Kh, Moradi H R. 2011. Assessing the sensitivity of infiltration models to variability of soil moisture. *Journal of Water and Soil*. 25(2): 338–346. (In Persian).
- Srivastava PK, Han D, Ramirez M A, Islam T. 2013. Machine learning techniques for downscaling SMOS satellite soil moisture using MODIS land surface temperature for hydrology application. *Water resour. manag.* 27(8): 3127–3144.
- Trzaska S, Schnarr E. 2014. A review of downscaling methods for climate change projections. United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD. pp.1–42
- van der Velde R, Salama MS, Eweys OA, Wen J, Wang Q. 2014. Active / Passive microwave observations over the east of the netherlands. *IEEE J. Sel. Top. Appl. eath Obs. Remote.* 8(3): 1–18.
- Wu X, Walker JP, Das NN, Panciera R, Rüdiger C. 2014. Evaluation of the SMAP brightness temperature downscaling algorithm using active–passive microwave observations. *Remote Sensing of Environment*. 155(1): 210–221.
- Wu X, Walker JP, Rudiger C, Panciera R. 2015. Effect of land-cover type on the SMAP active/passive soil moisture downscaling algorithm performance. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 12(2): 846–850.
- Zhao W, Sánchez N, Lu H, Li A. 2018. A spatial downscaling approach for the SMAP passive surface soil moisture product using random forest regression. *Journal of hydrology*. 563(1):1009–1024.
- Zhao L, Yang K, Qin J, Chen Y, Tang W, Lu H, Yang ZL. 2014. The scale-dependence of SMOS soil moisture accuracy and its improvement through land data assimilation in the central Tibetan Plateau. *Remote Sensing of Environment*. 152(2): 345–355.



Watershed Management Research

VOL. 33, No. 4, Ser. No: 129, Winter 2021, pp. 17-29
DOI: 10.22092/wmej.2020.127911.1265

Improving Spatial Resolution of SMAP Surface Soil Moisture through the Synergy of Radar-Microwave Observations at the Firuzabad Watershed, Ardabil

Ayoob Karami

Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

Hamid Reza Moradi

(Corresponding Author)* Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

Ali Jafar Mousivand

Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University, Iran

Corresponding Email: hrmoradi@modares.ac.ir

Received: 29 September 2019 Accepted: 17 March 2020

Abstract

Surface soil moisture retrieval using microwave remote sensing, as the most promising method, has been highly valued due to its great accuracy and temporal resolution in broad scales. However, its coarse resolution limits regional scale applications. This study aims to apply the optional downscaling algorithm to generate high resolution soil moisture (θ_f) over Firoozabad Watershed, Ardabil, Iran. The algorithm integrates the advantage of Sentinel-1 (S-1) radar and the SMAP Radiometer soil moisture to make a linear correlation between the satellite soil moisture (θ_c) and the radar backscatter (σ_0) at each coarse pixel. The outputs were compared with the soil moisture measurements collected from individual points in the study area. The values of $0.043 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and $0.039 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectively, were obtained for RMSE and UnbRMSE at 1 km resolution. This result are close to the SMAP's downscaled target accuracy (RMSE = $0.05, \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$). Taken together, point measurement has limitations in terms of spatial representation and spatial extent, especially in a watershed scale data analysis; therefore, utilizing the freely available SMAP soil moisture data and its downscaled version with the S-1 SAR data could be considered as an efficient and low cost tool to be used in research and implementation for the local and regional applications.

Keywords: Active-passive downscaling, Firoozabad watershed, Sentinel-1, soil moisture, SMAP