

برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر رادار ENVISAT/ASAR

ابراهیم بابائیان، مهدی همایی^{۱*} و علی اکبر نوروزی

دانشجوی دکتری خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، e_babaeian@yahoo.com

استاد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، mhomaee@modares.ac.ir

استادیار سنجش از دور، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، noroozi@itc.nl

چکیده

پایش رطوبت خاک به عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم پایش خشکسالی به ویژه در بخش کشاورزی، در مطالعه روند تغییر اقلیم در ایران اهمیت فراوان دارد. در این پژوهش، یک روش کاربردی به منظور برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از داده‌های میکروموج ارائه شد. بدین منظور، تعداد هشت تصویر سنجنده ASAR (باند C) با روش تصویربرداری (GM) Global Mode در پلاریزاسیون HH از اواخر سال ۱۳۹۰ تا اوایل سال ۱۳۹۱ از بخشی از حوزه آبخیز زنجانرود واقع در استان زنجان تهیه شد. پس از پردازش تصاویر، مقدار پس انتشار کل از خاک (σ^0_T) محاسبه و با استفاده از روش‌های آمار مکانی شاخص مورانز و روش حداقل مربعات معمولی (OLS) ارتباط آن با مقادیر رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR و منطبق با زمان اخذ تصاویر ASAR، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده حاکی از ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۶۸ و معنی‌دار (سطح ۱ درصد) بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده خاک و ضریب پس انتشار کل بود. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد روش ارائه شده از دقت نسبتاً مناسبی ($RMSE=0/032$ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و خطای نسبی ۱۱ درصد) در تخمین رطوبت خاک سطحی برخوردار بوده و تا حدودی تمایل به بیش‌برآوردی ($MBE=0/011$ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) دارد. بر اساس نتایج بدست آمده، مُد GM داده‌های سنجنده ASAR می‌تواند در مناطق نیمه خشک و در شرایط عدم پوشش گیاهی، در برآورد رطوبت سطحی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ضریب پس انتشار، مدل رگرسیون، میکروموج فعال، مُد GM

مقدمه

درجا (مانند روش‌های وزنی و انعکاس سنجی حوزه زمانی، TDR) می‌باشد. این روش به منظور پایش رطوبت خاک در مقیاس‌های کوچک نظیر کرت‌های مزرعه‌ای و مقیاس محلی دقت بسیار بالایی داشته، اما برای مقیاس‌های بزرگ (حوزه آبخیز، ناحیه‌ای، قاره‌ای و جهانی)

رطوبت خاک به‌رغم آنکه بخش بسیار اندکی (۰/۱۵ درصد) از آب موجود بر روی کره زمین را شامل می‌شود، تأثیر بسزایی بر گردش آب، انرژی و کربن در طبیعت دارد. روش معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک، روش

^۱. آدرس نویسنده مسئول: تهران- دانشگاه تربیت مدرس- گروه خاکشناسی

* دریافت: دی ۱۳۹۱ و پذیرش: آبان ۱۳۹۲

به دلیل فراهم نبودن اطلاعات کافی از پیوستگی و پوشش مکانی و نیز صرف هزینه و زمان زیاد، مناسب نیست. استفاده از دورکاوی هوایی یا ماهواره‌ای علاوه بر رفع این محدودیت‌ها، می‌تواند باعث ایجاد پوشش مکانی وسیع و پیوستگی زمانی شده و سطح قابل قبولی از اطمینان را در مقابل اندازه‌گیری‌های درجا ارائه نماید (۶). از آنجا که از حساسیت باندهای مرئی، مادون قرمز و حرارتی به رطوبت خاک در شرایط ابرناکی (به دلیل تضعیف امواج توسط بخار آب موجود در اتمسفر) و وجود پوشش گیاهی (به دلیل جذب امواج به وسیله سطوح مختلف گیاه) کاسته می‌شود، این بخش از موج الکترومغناطیس چندان در برآورد رطوبت خاک مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

داده‌های میکروموج برخلاف باندهای فوق‌نه‌تنها تحت تأثیر شرایط اتمسفری قرار نمی‌گیرند، بلکه قادرند تحت شرایط متنوع خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در تخمین رطوبت خاک مورد استفاده قرار گیرند. توانایی داده‌های میکروموج در بازیابی رطوبت خاک به دلیل حساسیت آن‌ها به ثابت دی‌الکتریک محیط خاک است. از جمله سنجنده‌های مورد استفاده در تخمین رطوبت خاک می‌توان به سنجنده‌های میکروموج فعال (رادار) همچون ENVISAT/ASAR (۲) و ALOS/PALSAR (۱۳) و (۱۴) و غیرفعال (رادار) همچون AQUA/AMSRE (۶) اشاره نمود. بر اساس نتایج پژوهش‌ها، بین ضریب پس‌انتشار داده‌های رادار و مقدار رطوبت خاک سطحی ارتباط قابل ملاحظه‌ای وجود دارد (۱۱، ۲۰ و ۱۶). پژوهشگران نشان داده‌اند با استفاده از داده‌های رادار می‌توان مقدار رطوبت سطحی خاک را با بزرگنمایی کمتر از یک کیلومتر و در شرایطی که آسمان پوشش گیاهی کمتر از ۱۵ سانتی متر باشد، با دقت قابل قبول ($\pm 3/5$ v/v) برآورد نمود (۷). همچنین، پژوهش‌ها نشان داده که سنجنده SAR (باند C) در خاک‌های فاقد پوشش گیاهی دقت بالایی ($RMSE = 3-4$ % v/v) در تخمین رطوبت خاک دارد (۲). اخیراً بغدادی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های سنجنده TerraSAR-X (باند x

بسامد ۹/۶ گیگاهرتز) مقدار رطوبت خاک را در شرایط بدون پوشش گیاهی با دقت سه درصد (RMSE) برآورد کرده‌اند

در پژوهشی، بروکا و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های میکروموج غیرفعال سنجنده AMSR-E ماهواره Aqua و سنجنده ASCAT ماهواره MetOP مقدار رطوبت سطح خاک را به ترتیب با ضرایب همبستگی (R) برابر ۰/۷۱ و ۰/۶۲ برآورد کرده‌اند. در پژوهشی دیگر، لیونز و ورهوست (۲۰۱۲) وجود همبستگی بین داده‌های سنجنده RADARSAT-2 در پلاریزاسیون‌های HH و VV با مقدار رطوبت خاک را گزارش دادند، به طوری که رطوبت تخمینی توسط مدل IEM با RMSE برابر ۰/۰۴ (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) برآورد شد. همچنین، سالدی و همکاران (۲۰۰۸) دقت تصاویر ASAR (باند C، پلاریزاسیون HH و VV) و RADARSAT-1 (باند L، پلاریزاسیون HH) را در تخمین رطوبت خاک اراضی کشاورزی غرب ترکیه مورد مقایسه قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، ارتباط بین رطوبت خاک و ضریب پس‌انتشار از خاک به ترتیب با R^2 برابر ۰/۷۷، ۰/۸۱ و ۰/۸۶ بدست آمد.

در برآورد رطوبت خاک به کمک داده‌های پس‌انتشار، می‌توان از رویکردهای نظری و تجربی استفاده نمود (۱ و ۱۹). از معمول‌ترین این رویکردها، بررسی ارتباط بین مقدار رطوبت خاک و ضریب پس‌انتشار و سپس استفاده از مدل‌های تجربی رگرسیونی است (۵ و ۱۲). بررسی نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نوع سنجنده، روش مدل‌سازی و شرایط اقلیمی و ژئوفیزیکی منطقه تأثیر زیادی بر دقت نتایج حاصله دارد. لذا، هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از داده‌های سنجنده ASAR مُد GM در مناطق نیمه خشک کشور به‌منظور ارائه یک مدل ساده تجربی برای بازیابی مقدار رطوبت لایه سطحی خاک در مقیاس حوزه آبخیز بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوزه آبخیز زنجان رود واقع در شمال غربی شهر زنجان است. وسعت منطقه ۲۵۳ کیلومتر مربع با اقلیم مدیترانه‌ای، بیشینه و کمینه دمای سالانه ۴۳ و ۳۰- درجه سانتی‌گراد و متوسط سالانه بارش ۳۲۶/۸ میلی‌متر می‌باشد. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی منطقه شامل زیریک و مزیک و حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه از سطح دریا برابر با ۱۳۸۳ و ۲۱۶۰ متر می‌باشد. تیپ غالب اراضی شامل فلات و تراس‌های فوقانی و دشت‌های دامنه‌ای و کاربری فعلی اراضی شامل کشاورزی آبی، دیم، مراتع و اراضی متفرقه است. از نظر بافت خاک، خاک غالب منطقه لومی رسی و لوم می‌باشد (شکل ۱).

داده‌های ماهواره‌ای

سنجنده ASAR^۲ نوعی سنجنده پیشرفته رادار فعال ماهواره زیست محیطی اروپا^۳ (ENVISAT) با پنج نما یا مُد است که در این پژوهش از مُد GM^۴ آن استفاده شد. مشخصات این سنجنده به همراه داده‌های مورد استفاده در جداول (۱) و (۲) آمده است. یک از دلایل انتخاب این سنجنده، سهولت در دستیابی به تصاویر مربوطه بود. مراحل پیش پردازش تصاویر شامل تصحیحات هندسی و واسنجی تصاویر به روش یکسوسازی Range-Doppler و با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) و فایل‌های مداری^۵ و پردازش تصاویر (محاسبه ضریب پس انتشار) به کمک برنامه NEST و SARscape انجام شد (۸).

محاسبه ضریب پس انتشار کل

پس انتشار کل از سطح زمین (σ_{Total}^0) شامل سه جزء پس انتشار از خاک (σ_{Soil}^0)، گیاه و خاک-گیاه (σ_{Cover}^0) می‌باشد (رابطه ۱) (۱۵).

$$\sigma_{Total}^0(\phi) = f \cdot \sigma_{Cover}^0 + (1 - f) \cdot \sigma_{Soil}^0 \quad (1)$$

که در آن: ϕ زاویه میل سنجنده (درجه)، σ^0 ضریب پس انتشار (دسی بل) و f جزء مساحت پوشش گیاهی می‌باشد. بخش σ_{Cover}^0 متأثر از خاک و برهم‌کنش خاک-گیاه است و به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\sigma_{Cover}^0 = \sigma_{Vegetation}^0 + \sigma_{Soil-Vegetation}^0 + \gamma^2(\phi) \cdot \sigma_{Soil}^0 \quad (2)$$

که در آن: $\gamma^2(\phi) = \exp[-2\tau / \cos(\phi)]$ میزان عبور موج از سطح پوشش گیاهی است. پس انتشار ناشی از پوشش گیاهی ($\sigma_{Vegetation}^0$) می‌تواند به صورت رابطه (۳) محاسبه شود (۱۵).

$$\sigma_{Vegetation}^0(\phi) = 0.75 \cdot w \cdot \cos(\phi) [1 - \gamma^2(\phi)] \quad (3)$$

بر اساس پژوهش‌ها، در زوایای میل کم ($> 30^\circ$ درجه) اثر پوشش گیاهی در مقدار پس انتشار کل ناچیز است و با افزایش زاویه میل ($< 30^\circ$ درجه) اثر آن افزایش پیدا می‌کند (۱۵). به عبارتی، در زوایای میل کم مقدار σ_{Total}^0 عمدتاً تحت تأثیر مقدار رطوبت سطح خاک قرار می‌گیرد. همچنین، در صورتی که جزء مساحت پوشش گیاهی کمتر از ۰/۲ باشد، از اثر پوشش گیاهی بر پس انتشار کل صرف نظر می‌شود (۲۱). در این حالت، پس انتشار کل معادل با پس انتشار از خاک است (رابطه ۴).

$$\sigma_{Total}^0(< 30) \approx \sigma_{Soil}^0(< 30) \quad (4)$$

گستره زاویه میل سنجنده در منطقه بین ۱۶/۳ تا ۴۲/۴ درجه می‌باشد. از این رو به دلیل تفاوت در زاویه میل تصاویر و نیز تقویت اثر خاک بر پس انتشار کل، عمل نرمال‌سازی زاویه میل بر اساس زاویه ۳۰ درجه انجام گرفت (۱۱، ۱۷ و ۲۱):

$$\sigma^\circ(30, t) = \sigma^\circ(\phi, t) - \beta(\phi - 30) \quad (5)$$

که در آن: $\sigma^\circ(30, t)$ پس انتشار نرمال شده به ازای زاویه میل ۳۰ درجه و زمان t (دسی بل)، $\sigma^\circ(\phi, t)$ پس انتشار به ازای زاویه ϕ و زمان t (دسی بل) و β پارامتر تصحیح (تغییرات پس انتشار به ازای تغییر در زاویه میل) (دسی بل بر درجه) به ازای زاویه میل ۳۰ درجه می‌باشد. از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه دارای گذر متفاوتی هستند، پیکسل‌های آنها کاملاً منطبق بر یکدیگر نبوده و نمی‌توانند برای تجزیه و تحلیل‌های سری زمانی

²Advanced Synthetic Aperture Radar

³ENVironmentalSATellite

⁴Global Monitoring

⁵DORIS Orbit Files

تصاویر و انجام مقایسه مربوطه مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، مرحله co-registration که در آن یک تصویر به عنوان تصویر مبنا انتخاب و سایر تصاویر بر اساس آن تصحیح می‌شوند، انجام شد (۸). تصاویر رادار به دلیل سیستم تصویربرداری کوه‌رنت همیشه دارای اسپیکل (حالت نقطه نقطه شبیه اثر نمک و فلفل) می‌باشند. حذف نویز اسپیکل که یکی از مراحل مهم پیش پردازش تصاویر رادار است به کمک فیلتر میانه (Median) (۳×۳) انجام شد. تصاویر به صورت WGS1984 با استفاده از برنامه ArcGIS9.3 و با استفاده از برخی عوارض و نقاط نمونه‌برداری زمینی، زمین مرجع شدند. در شکل (۲) مراحل تخمین رطوبت سطحی خاک از داده‌های پس انتشار نشان داده شده است.

داده‌های زمینی

مقدار رطوبت حجمی لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتیمتر) در ۹۹ محل به صورت مقدار متوسط در یک شعاع ۱۰ متری و با استفاده از روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی (TDR) در تاریخ ۹۰/۱۲/۳ منطبق با گذر سنجنده ASAR از منطقه اندازه‌گیری و به عنوان سری داده‌های واسنجی به منظور اشتقاق مدل مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). همچنین، سنسورهای TDR در ۲۰ نقطه به فواصل متوسط ۲۰۰ متر در ایستگاه پخش سیلاب قره-چریان به وسعت ۱۵۰ هکتار مستقر و رطوبت حجمی خاک سطحی (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر) طی زمان‌های ۹۰/۱۰/۱۲ (DOY:۱)، ۹۰/۱۰/۲۲ (DOY:۱۱) و ۹۰/۱۲/۳ (DOY:۲۲) اندازه‌گیری و به عنوان سری داده‌های اعتبارسنجی به منظور ارزیابی دقت مدل در نظر گرفته شد. داده‌های بارش ایستگاه قره‌چریان نیز به صورت روزانه و از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد.

ناهمواری^۶ و پوشش گیاهی سطح خاک

فیزیوگرافی منطقه شامل فلات و تراس‌های فوقانی و دشت دامنه‌ای می‌باشد. شیب عمومی بین یک تا سه درصد و از نظر توپوگرافی تقریباً صاف و هموار است.

همچنین، بر اساس مشاهدات صحرایی طی زمان مطالعه، ناهمواری سطح خاک کم و تغییرات محسوسی نداشته است. لذا، به نظر می‌رسد عامل ناهمواری سطح خاک اثر ناچیزی بر مقدار پس‌انتشار داشته باشد. در طول زمان مطالعه (۸۲ روز)، سطح خاک فاقد هر نوع پوشش گیاهی بود. بنابراین، از عامل پوشش گیاهی نیز در محاسبه ضریب پس‌انتشار صرف‌نظر شد. بر اساس مطالعات، اگر مقدار زیست توده گیاهی سطح زمین کمتر از ۰/۵ کیلوگرم بر مترمربع باشد، می‌توان اثر پوشش گیاهی بر ضریب پس‌انتشار کل را نادیده گرفت (۶).

ارتباط بین مقدار رطوبت خاک سطحی و ضریب پس انتشار و دقت آزمایی

با استفاده از روش آمار مکانی، توزیع مکانی و خطای باقیمانده متغیر رطوبت خاک محاسبه شد. در ابتدا بر اساس شاخص مورانز^۷، وضعیت توزیع مکانی متغیر مورد نظر محاسبه شد. بر اساس این شاخص، متغیر مورد نظر باید دارای توزیع تصادفی باشد. هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده شرایط مطلوب و تصادفی بودن توزیع متغیر در منطقه است. از این‌رو، مقادیری که دارای توزیع خوشه‌ای (شاخص مورانز برابر ۱) و یا پراکنده (شاخص مورانز برابر -۱) بودند از مجموعه داده‌ها حذف و در نهایت توزیع رطوبت به صورت تصادفی با شاخص مورانز ۰/۱۴ بدست آمد. در مرحله بعد، با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی^۸ (OLS) همبستگی درونی^۹ متغیر رطوبت خاک بر اساس مقدار و فواصل نقاط محاسبه شد. نقاطی که از خطای باقیمانده بالایی برخوردار بودند، از مجموعه داده‌ها حذف شد. سپس بین مقادیر رطوبت خاک سطحی و ضریب پس‌انتشار کل تجزیه و تحلیل همبستگی و رگرسیونی انجام گرفت. به منظور بررسی میزان ارتباط بین مقدار رطوبت خاک سطحی و ضریب پس‌انتشار، از ضریب تبیین (R²) استفاده شد. دقت‌آزمایی نتایج با

⁷ Moran's Index

⁸ Ordinary Least Square

⁹ Autocorrelation

⁶ Roughness

رگرسیون در تخمین رطوبت خاک از روی داده‌های پس انتشار رادار معمول است. در پژوهشی زیری و همکاران (۲۰۱۰) همبستگی بین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به روش‌های وزنی و تتاپروپ با ضریب پس انتشار سنجنده ASAR در پلاریزاسیون‌های HH و VV را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۶۷ (در پلاریزاسیون HH) و ۰/۵۳ (در پلاریزاسیون VV) بین متغیرهای موردنظر است. همچنین، واندرولد و همکاران (۲۰۰۸) (۱۶) با استفاده از داده‌های ASAR و مقادیر رطوبت خاک مشاهده شده، ضرایب تبیین برابر با ۰/۴۳ و ۰/۳۷ را به ترتیب در اراضی خیس با پستی و بلندی زیاد و چمنزارهایی به وسعت یک کیلومتر مربع بدست آوردند. به‌منظور دقت‌آزمایی مدل، مقادیر رطوبت تخمینی خاک حاصل از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک مورد مقایسه قرار گرفت.

توزیع ضریب پس انتشار کل

در شکل (۳) ضریب پس انتشار کل نرمال شده در پلاریزاسیون HH در پیکسل‌هایی به ابعاد 1 کیلومتر طی دوره مطالعه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب پس انتشار کل در منطقه دارای پویایی فصلی است. به عبارتی، مقدار σ_{Total}^0 با تغییر فصل دارای دامنه تغییرات $< 5\text{dB}$ است. این نوسانات عمدتاً ناشی از تغییرات در مقدار ثابت دی‌الکتریک محیط و نیز تا حدودی تغییر در پوشش گیاهی (NDVI) باشد. زیرا سنجنده‌های رادار مستقیماً تحت تأثیر مقدار ثابت دی‌الکتریک محیط قرار می‌گیرند. از آنجا که اختلاف زیادی بین ثابت دی‌الکتریک آب (حدود ۸۱) و خاک خشک (بین ۴ تا ۷) وجود دارد، می‌توان استنباط نمود که خاک - مرطوب در مقایسه با خاک خشک از مقدار ضریب دی‌الکتریک بالاتری برخوردار است. مقادیر حداقل و حداکثر ضریب پس انتشار کل برابر ۱۹- و ۱- دسی بل است. از سویی، بالاترین ضریب پس انتشار عمدتاً متعلق به قسمت‌های شرق و شمال شرق منطقه است. به دلیل وجود تغییرات مکانی در دمای خاک سطحی، مشخصه-

استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نسبی (RE) و میانگین انحراف خطا (MBE) انجام شد.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{est} - y_{obs})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i \right]^2}{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est} - y_{obs}) \quad (8)$$

که در آن‌ها: x_i و y_i به ترتیب متغیرهای مستقل و وابسته، y_{obs} و y_{est} و به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی (مقدار محاسبه شده از روی ضریب پس انتشار) رطوبت خاک، \bar{x} میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد داده‌ها است.

نتایج و بحث

ارتباط بین رطوبت خاک سطحی و ضریب پس انتشار

مقادیر حداقل، حداکثر و انحراف معیار رطوبت حجمی خاک در منطقه به ترتیب برابر با ۰/۲۸، ۰/۱۰ و ۰/۴۴ سانتیمتر مکعب بر سانتیمتر مکعب اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج این پژوهش، ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۶۸ و معنی‌دار (سطح یک درصد) بین مقدار رطوبت خاک سطحی و پس انتشار کل از خاک بدست آمد. انحراف از مقدار مطلق ارتباط ($R^2=1$) بین این دو مقیاس می‌تواند ناشی از ناهمگنی در نوع خاک، تفاوت در مقیاس رطوبت اندازه‌گیری شده (مقیاس نقطه‌ای) و سیگنال‌های پس انتشار (۱ × ۱ km) و نیز ویژگی‌های سنجنده (نظیر بسامد، پلاریزاسیون و زاویه میل) باشد (۱). مدل ساده رگرسیونی بدست آمده در این پژوهش به ترتیب دارای عرض از مبدأ و ضریب زاویه‌ای برابر با ۱۵/۶ و ۰/۴۲- است. به‌طور کلی، در پژوهش‌ها استفاده از مدل‌های ساده

های ژئوفیزیکی (بافت خاک، درجه و جهت شیب) و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، که بر مقدار تبخیر و نگهداشت رطوبت در خاک مؤثرند، توزیع ثابت دی-الکتریک و به دنبال آن توزیع مکانی مقدار پس انتشار در منطقه متغیر است. خاک‌های سنگین بافت و رسی به دلیل ظرفیت بالای نگهداشت رطوبت، ثابت دی‌الکتریک بالاتری نسبت به خاک‌های سبک بافت دارند. بنابراین، مقدار ضریب پس انتشار در این خاک‌ها بیشتر از خاک‌های شنی است (۱۸).

بر اساس نقشه بافت خاک (شکل ۱)، روند مشخصی بین وضعیت بافت خاک و ضریب پس انتشار مشاهده نمی‌شود. از آنجاکه این پژوهش در اواخر زمستان و اوایل بهار که سطح خاک فاقد پوشش گیاهی است، به عمل آمده است، مقدار تعرق گیاهی تقریباً برابر با صفر و مقدار تبخیر نیز بسیار ناچیز بوده و لذا مقدار رطوبت خاک باید در کنترل میزان بارش و وضعیت بافت خاک منطقه باشد. به‌طور کلی، در مقایسه با بافت خاک، این وقایع بارش و مقدار آن در منطقه است که عمدتاً کنترل کننده مقدار ضریب پس انتشار از خاک است (شکل ۱ و ۳).

توزیع رطوبت تخمینی خاک سطحی

در شکل (۳) سری زمانی مقدار رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از مدل تخمینگر رگرسیونی نشان داده شده است. حداقل و حداکثر رطوبت خاک تخمینی در منطقه در تاریخ ۹۰/۱۲/۳ (DOY:۵۲) و ۹۰/۱۰/۱۲ (DOY:۱) به ترتیب برابر ۱۶/۳۳ و ۲۲/۴۰ درصد (حجمی) بدست آمد. مقدار متوسط رطوبت تخمینی در سطح خاک به ازای ۸۲، ۷۱، ۶۳، ۵۲، ۴۱، ۲۲، ۱۱، DOY:۱ به ترتیب برابر با $(\pm 1/0.2)$ ، $19/84$ ، $(\pm 0/73)$ ، $20/47$ ، $(\pm 1/12)$ ، $19/41$ ، $(\pm 1/0.9)$ ، $19/79$ ، $(\pm 0/65)$ ، $20/16$ ، $(\pm 0/69)$ ، $19/95$ ، $(\pm 0/55)$ و $20/22$ و $(\pm 0/67)$ درصد برآورد شده است. بیشترین مقادیر رطوبت خاک عمدتاً در قسمت‌های مرکز، غرب، جنوب و جنوب

غرب و کمترین مقادیر آن در قسمت‌های شرق و شمال شرق منطقه بدست آمد. تغییرات در مشخصه‌های توپوگرافی (درجه شیب، جهت، انحنای و ارتفاع دامنه) بر توزیع رطوبت در خاک مؤثر است. درجه شیب بر نفوذپذیری، مقدار رواناب و زهکشی خاک تأثیر می‌گذارد. جهت شیب از نظر میزان دریافت انرژی خورشیدی بر مقدار تبخیر-تعرق و رطوبت خاک مؤثر است. بر اساس نقشه‌های درصد شیب و درجه شیب، مقدار شیب غالب منطقه کمتر از چهار درصد، شیب عمومی آن به سمت جنوب غرب و شیب‌های جانبی در جهت غرب، شمال غرب و جنوب شرق منطقه می‌باشد (شکل ۱). معمولاً در تمامی فصول سال، شیب‌های شمالی و غربی در مقایسه با شیب‌های شرقی و جنوبی به دلیل دریافت کمتر انرژی گرمایی خورشید و نیز وسعت اندک پوشش گیاهی، به‌طور متوسط از مقدار رطوبت خاک کمتری برخوردار هستند. همچنین، مقدار رطوبت خاک رابطه معکوس با ارتفاع دارد (۱۰). از آنجا که از قسمت شمال شرق به سمت جنوب غرب از ارتفاع منطقه کاسته می‌شود، بیشترین مقدار رطوبت خاک در قسمت‌های مرکز، غرب، جنوب و جنوب غرب و کمترین آن در قسمت‌های شرق و شمال شرق منطقه مشاهده می‌شود (شکل ۳). تغییرپذیری رطوبت سطحی خاک می‌تواند ناشی از توزیع غیریکنواخت بارش در منطقه باشد (۲۰).

می‌توان بر اساس وقایع بارش و مقدار آن نیز تفسیری از تغییرات زمانی رطوبت خاک در منطقه ارائه نمود. مطابق شکل (۵، الف)، در طول دوره مطالعه تعداد بیست واقعه بارش با حداکثر ارتفاع ۱۴/۹ میلی‌متر و متوسط ۰/۶ میلی‌متر در روز در منطقه اتفاق افتاده است. نکته قابل توجه آن است که پس از وقوع هر بارش، مقدار رطوبت خاک نیز به‌طور متوسط افزایش یافته است. به عنوان مثال، متوسط مقدار رطوبت حجمی خاک در DOY:۲۲ برابر ۰/۱۹۶ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برآورد شده است. پس از پنج واقعه بارش جمعاً به ارتفاع ۲۳/۴ میلی‌متر، مقدار متوسط رطوبت حجمی خاک

مطالعات، با استفاده از روش بارزسازی تغییرات در سری زمانی تصاویر ASAR مُد GM اقدام به تخمین رطوبت سطحی خاک شده است. نتایج حاکی از تفاوت در دقت تخمین رطوبت خاک در کاربری‌های مختلف بود. به-طوریکه مقدار RMSE بین ۰/۰۴ تا ۰/۱۴ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بدست آمده است (۸).

واگنر و همکاران (۲۰۰۷) از مُدهای مختلف سنجنده ASAR در تخمین رطوبت خاک در اسپانیا استفاده نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها، مقدار RMSE در حدود ۰/۰۶ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بدست آمد. بر این اساس، به نظر می‌رسد مقدار متوسط RMSE برابر ۰/۰۳۲ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و خطای نسبی تخمین ۱۱ درصد که در این پژوهش بدست آمده است، مقدار مناسبی در پذیرش دقت مدل تخمینگر به-منظور برآورد رطوبت لایه سطحی خاک باشد. البته به-منظور کاهش خطا در برآورد رطوبت خاک، می‌باید نوع سنجنده و روش تخمین بر اساس شرایط منطقه مطالعاتی و نیز داده‌های در دسترس انتخاب شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل ساده تجربی با تفکیک زمانی- مکانی مناسب به‌منظور بازیابی، پایش و تهیه نقشه رطوبت لایه سطحی خاک از داده‌های پس انتشار سنجنده ASAR مُد GM در کاربری‌های کشاورزی (گندم) و مرتع ارائه شد. مدل رگرسیون اشتقاقی قادر است با ضریب تبیین ۰/۶۸ و RMSE برابر ۰/۰۳۲ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب با تفکیک مکانی یک کیلومتر، مقدار رطوبت لایه سطحی خاک را در منطقه مطالعاتی برآورد نماید. نتایج بدست آمده حاکی از انطباق کامل بین وقایع و مقادیر بارش ثبت شده در ایستگاه‌های باران-سنجی منطقه، توزیع دمای سطح خاک و روند تغییرات رطوبت سطح خاک بود. همچنین، نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی مدل نشان داد بین مقادیر تخمینی رطوبت خاک و مقادیر اندازه‌گیری شده آن تفاوت اندکی (خطای نسبی ۱۱ درصد) وجود دارد. با توجه به فقدان شبکه

در DOY:۴۱ به ۰/۲۰۲ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافته است. بر اساس شکل (۵، الف)، میانگین درجه حرارت هوا از زمان شروع مطالعه تا پایان DOY:۵۶ کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد و پس از این زمان به‌طور نسبی تا حداکثر هفت درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. بر این اساس، علاوه بر موارد ذکر شده افزایش درجه حرارت هوا نیز می‌تواند در توزیع رطوبت سطح خاک در منطقه در زمان‌های DOY:۶۳، DOY:۷۱ و DOY:۸۲ نقش مهمی داشته باشد.

دقت‌آزمایی

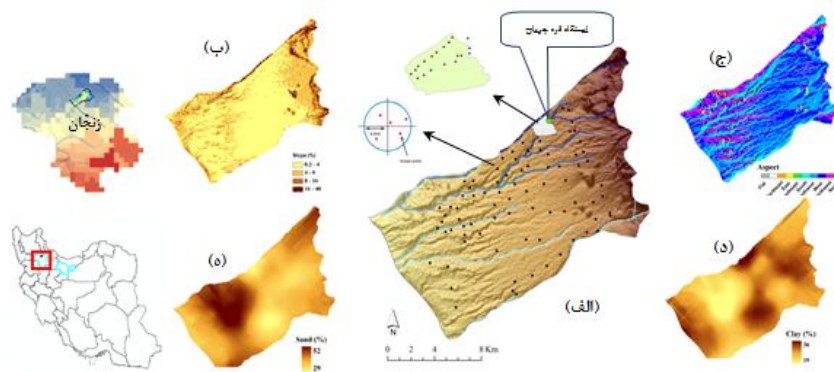
بر اساس نتایج، گستره مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۴۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب (مقدار متوسط ۰/۰۳۲)، خطای نسبی ۱۱ درصد و میانگین خطای معیار (MBE) بین ۰/۰۱۲- تا ۰/۰۱۵ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب (مقدار متوسط ۰/۰۱۱) بدست آمد (شکل ۴). نکته قابل توجه آن است که مقدار RMSE تا حدودی وابسته به ماه یا فصل سال است. به عبارت دیگر، با اتمام فصل زمستان و آغاز فروردین‌ماه مقدار RMSE تا حدودی با افزایش همراه است. این افزایش در مقدار خطا را می‌توان تا حدودی به توسعه پوشش گیاهی سطح زمین در بهار نسبت داد که تا حدودی باعث کاهش مقدار پس انتشار از سطح خاک می‌شود (۶). مقادیر منفی MBE نشان دهنده آن است که مدل رگرسیونی در تخمین مقدار رطوبت خاک حالت کم-برآورد و مقادیر مثبت آن حالت بیش‌برآورد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مذکور، مدل تخمینگر به‌رغم ساده بودن، در مقایسه با سایر مطالعات نیز دارای دقت بالایی در تخمین مقدار رطوبت خاک است. اخیراً زریبی و همکاران (۲۰۱۱) از داده‌های ASAR در مُدهای HH و VV برای برآورد رطوبت خاک در باغات زیتون و مزارع گندم اقلیم نیمه‌خشک تونس استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها، مدل رگرسیون خطی قادر بود به ازای گستره مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر ۰/۶۷-۰/۵۳ و ۶/۴- ۳/۸ درصد، رطوبت خاک را برآورد نماید. در دیگر

طول سال به‌ویژه فصول خشک و در حضور و عدم حضور پوشش گیاهی مورد ارزیابی قرار گیرد.

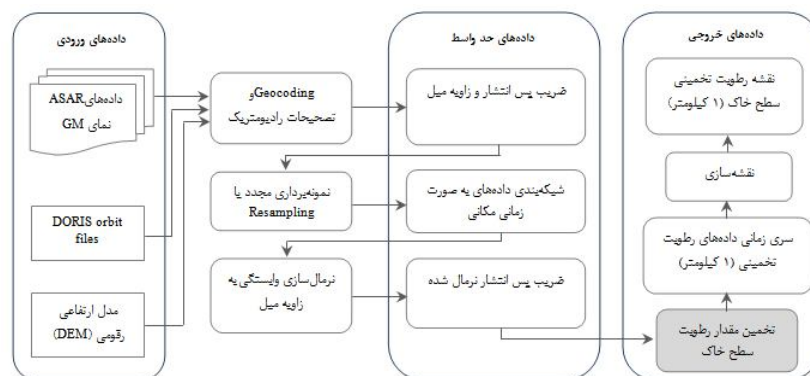
تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از سازمان فضایی اروپا (ESA) به دلیل در اختیار قرار دادن تصاویر رادار سپاسگزاری می‌شود.

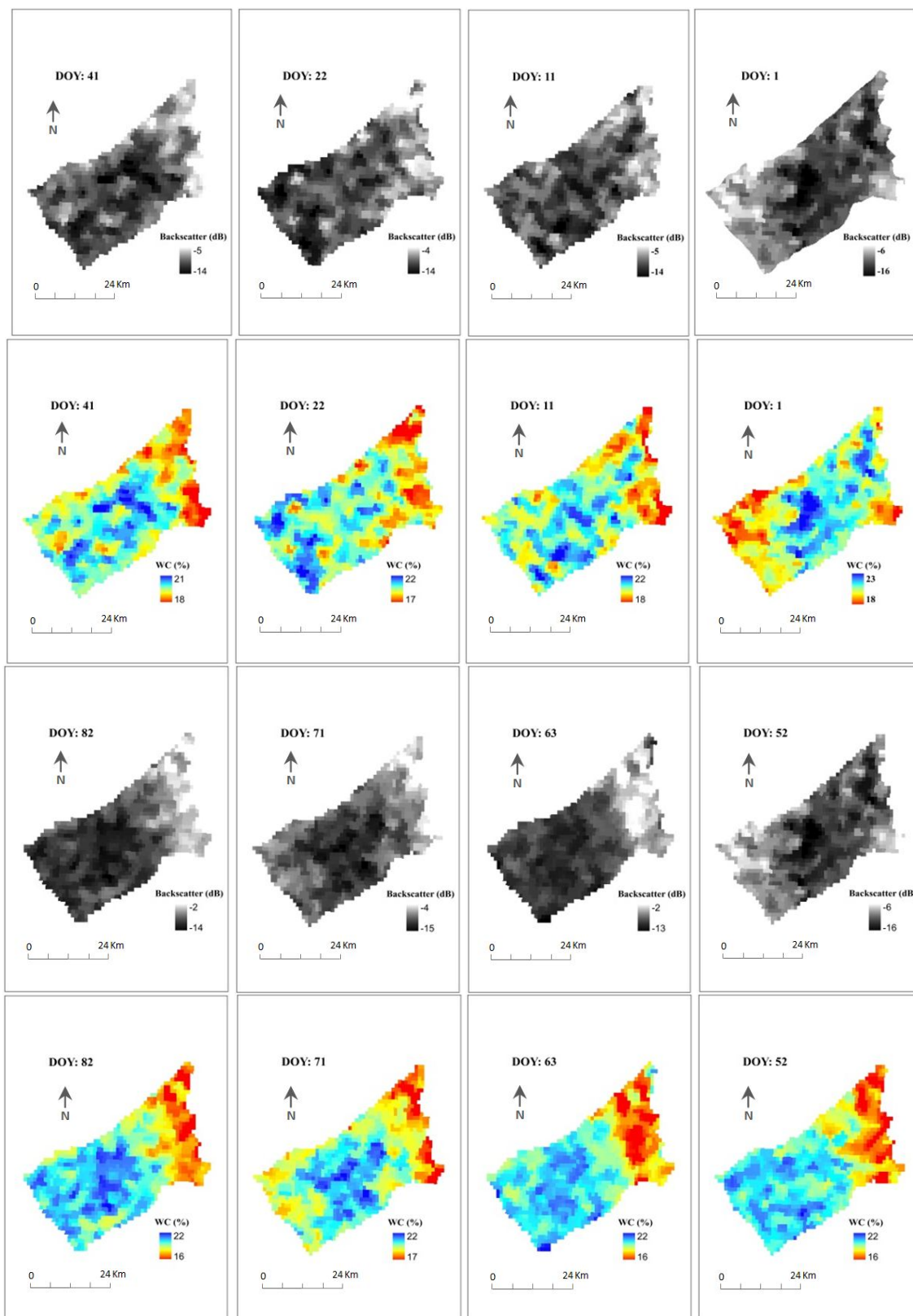
منسجم رطوبت‌سنجی خاک در کشور به ویژه در دشت- های مهم کشاورزی، استفاده از داده‌های رادار ASAR مُد GM می‌تواند به عنوان روشی نوین و کارآمد به‌منظور آگاهی از توزیع رطوبت خاک در نظر گرفته شود. از آنجا که پژوهش حاضر در بخشی از اقلیم خشک و نیمه خشک کشور انجام شده است، پیشنهاد می‌شود روش موردنظر و مدل پیشنهادی در سایر مناطق کشور و نیز در



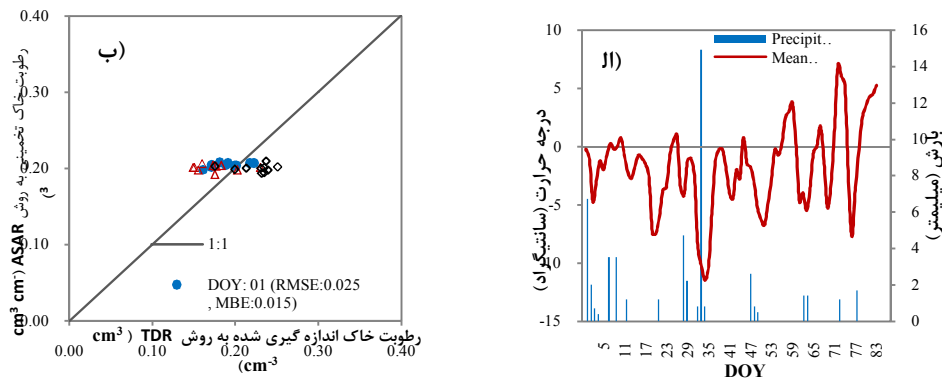
شکل ۱- منطقه مطالعاتی و نقاط اندازه‌گیری رطوبت خاک (الف)، نقشه‌های شیب (ب)، جهت شیب (ج) و بافت خاک (د و ه)



شکل ۲- فرآیند تخمین رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از داده‌های ASAR مُد GM



شکل ۳- توزیع زمانی- مکانی مقدار ضریب پس انتشار کل و مقدار رطوبت تخمینی سطح خاک (WC) (1km×1km) در منطقه از دیماه ۹۰ تا فروردین ماه ۹۱



شکل ۴- نمودار تغییرات میزان بارش و دما نسبت به زمان (الف) و نتایج ارزیابی دقت مدل تخمینگر رطوبت خاک در منطقه طی سه زمان مختلف (ب)

جدول ۱- مشخصه‌های سنجنده ENVISAT/ASAR نمای GM

بسامد - طول موج	۵/۳۳۱ گیگاهرتز (باند C) - ۵/۶۷ سانتیمتر
پلاریزاسیون	افقی-افقی (HH)
تفکیک مکانی / زمانی	۱۰۰۰ متر / ≤ ۳ روز
تفکیک رادیومتریکی	۱/۲ دسی بل
زاویه میل	۲۰ - ۴۰ درجه

جدول ۲- مشخصه‌های داده‌های ماهواره‌ای و زمینی

ردیف	تاریخ تصویر روز / ماه / سال	روز از سال (DOY)	تصاویر ASAR		داده‌های زمینی	
			گذر ماهواره	زاویه میل (درجه)	رطوبت خاک	عمق سنسور (cm) TDR
۱	۹۰/۱۰/۱۱	۱	۱۵۷	۳۶/۰۴ - ۳۷/۴۲	§	۰-۱۰
۲	۹۰/۱۰/۲۲	۱۱	۳۱۵	۳۱/۴۶ - ۳۲/۹۶	§	۰-۱۰
۳	۹۰/۱۱/۰۳	۲۲	۴۲	۲۶/۶۸ - ۲۸/۲۷	§	۰-۱۰
۴	۹۰/۱۱/۲۲	۴۱	۳۱۵	۳۱/۳۹ - ۳۲/۹۳	-	-
۵	۹۰/۱۲/۰۳	۵۲	۴۲	۲۶/۶۰ - ۲۸/۲۰	§	۰-۱۰
۶	۹۰/۱۲/۱۴	۶۳	۲۰۰	۲۱/۴۹ - ۲۳/۲۳	-	-
۷	۹۰/۱۲/۲۲	۷۱	۳۱۵	۳۱/۴۶ - ۳۲/۹۶	-	-
۸	۹۱/۰۱/۰۴	۸۲	۴۲	۲۶/۶۵ - ۲۸/۳۱	-	-

§: وجود داده رطوبت خاک - فاقد داده رطوبت خاک

فهرست منابع

1. Altese, E., Bolognani, O., Mancini, M. and Troch, P.A. 1996. Retrieving soil moisture over bare soil from ERS1 Synthetic Aperture Radar data: sensitivity analysis based on a theoretical surface scattering model and field data. *Water Resources Research J.*, 32: 653-661.
2. Baghdadi, N., Holah, N. and Zribi, M. 2006. Soil moisture estimation using multiincidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (10): 1907-1920.
3. Baghdadi, N., Aubert, M. and Zribi, M. 2012. Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9: 3-12.

4. Brocca, L.S., Hasenauer, T., Lacava, F., Melone, T., Moramarco, W., Wagner, W., Dorigo, P., Matgen, J., Martínez-Fernández, P., Llorens, J., Latron, C. and Martin, M. Bittelli. 2011. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: an intercomparison and validation study across Europe. *Remote Sensing of Environment J.*, 115:3390–3408.
5. Cognard, A.L., Loumagne, C., Normand, M., Olivier, P., Otle, C., Vidal-Madjar, D., Louahala, S. and Vidal, A. 1995. Evaluation of the ERS1/Synthetic Aperture Radar capacity to estimate surface soil moisture: two years results over the Naizin watershed. *Water Resources Research J.*, 31: 975-982.
6. Das, N.N., Mohanty, B.P. and Njoku, E.G. 2008. A Markov chain Monte Carlo algorithm for upscaled SVAT modeling to evaluate satellite-based soil moisture measurements. *Water Resources Research*. 44:W05416.[doi:10.1029/2007WR006472].
7. Dobson, M.C. and Ulbay, F.T. 1986. Active microwave soil moisture research. *GE24*, 23-36.
8. ESA. 2009. Image Processing with Next ESA SAR Toolbox (NEST). Available online at <http://earth.esa.int/nest>.
9. Lievens, H. and Verhoest, N.E.C. 2012. Spatial and temporal soil moisture estimation from RADARSAT-2 imagery over Flevoland, The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 456: 44-56
10. Nyberg, L. 1996. Spatial variability of soil water content in the covered catchment at Gardsjon, Sweden, *Hydrological Processes*, 10: 89-103.
11. Pathe, C., Wagner, W., Sabel, D., Doubkova, M. and Basara, J.B. 2009. Using ENVISAT ASAR global mode data for surface soil moisture retrieval over Oklahoma, USA. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47:2.
12. Quesney, A., Hegarat-Masclé, S., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Wigneron, J.P., Loumagne, C. and Normand, M. 2000. Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. *Remote Sensing of Environment J.*, 72: 290-303.
13. Sanli, F.B., Kurucu, Y., Esetlili, M.T. and Abdikana, S. 2008. Soil moisture estimation from RADARSAT-1, ASAR and PALSAR data in agricultural fields of Menemen plain of western Turkey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Part B7*, Beijing.
14. Takada, M., Mishima, Y. and Natsume, S. 2009. Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. *Landscape and Ecological Engineering J.*, 5(1): 45– 58.
15. Ulbay, F.T., Aslam, A. and Dobson, M.C. 1982. Effects of vegetation cover on the radar sensitivity to soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing J.*, 20: 476-481
16. Van der Velde, R., Su, Z. And Ma, Y. 2008. Impact of Soil Moisture Dynamics on ASAR σ_0 Signatures and Its Spatial Variability Observed over the Tibetan Plateau. *Sensors J.*, 8: 5479-5491.
17. Wagner, W., Pathe, C., Doubkova, M., Sabel, D., Bartsch, A., Hasenauer, S., Bloschl, G., Scipal, K., Martinez-Fernandez, J. and Low, A. 2008. Temporal stability of soil moisture and radar backscatter observed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). *Sensors J.J* 8:1147-1197.
18. Wang, J. R. and Schmugge, T.J. 1980. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soil as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 18: 288-295.
19. Wang, J., Hsu, A., Shi, J.C., O'neil, P. and Engman, T. 1997. Estimating surface soil moisture from SIR-C measurements over the Little Washita River watershed. *Remote Sensing of Environment J.*, 59:308-320.
20. Western, A.W., Grayson, R.B. and Bloschl, G. 2002. Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. *Annual Review Earth Planet Sciences J.*, 30:149-180.

21. Zribi, M., Chahbi, A., Shabou, A., Lili-Chabaane, Z., Duchemin, B., Baghdadi, N., Amri, R. and Chehbouni, A. 2011. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT ASAR radar data for soil evaporation evaluation. *Hydrology and Earth System Science J.*, 15: 345–358.