



سخن از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۰  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.13, No. 3, Autumn 2021

۹۳-۱۱۲  
مقاله پژوهشی

## برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از داده آלוِس پالسار ۲

- سعداله سنگینی<sup>۱</sup>، هادی فدایی<sup>۲</sup>، امیر سعدالدین<sup>۳\*</sup>، واحد بردی شیخ<sup>۴</sup>، چوقی بایرام کمکی<sup>۵</sup>
۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، گرایش آب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان
  ۲. استادیار گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا، دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران
  ۳. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان
  ۴. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان
  ۵. استادیار، گروه مناطق بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۰۶

### چکیده

توزیع زمانی و مکانی رطوبت خاک متغیری کلیدی در برنامه‌ریزی هیدرولوژیکی است. در محدوده تحقیق، افزایش رطوبت خاک باعث سرعت شکل‌گیری رواناب می‌شود. هدف این تحقیق بررسی پتانسیل باند L از سنجنده پالسار ۲ (PALSAR-2) ماهواره آلوِس (ALOS)، در برآورد رطوبت سطح خاک، به‌منظور مدیریت منابع آب و کاهش مخاطرات ناشی از سیل است. با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی خوشه‌ای، نمونه‌ها دریافت شد. هم‌زمان با دریافت داده SAR رطوبت وزنی، زبری سطح و محتوای آب گیاهی، میانگین ضرایب بازپراکنش راداری و زاویه فرود روی تصویر اندازه‌گیری شد. مراحل پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش داده SAR با استفاده از نرم‌افزار SNAP و شاخص‌های گیاهی و نمناکی از لندست ۸ سنسور OLI در محیط ArcGIS 10/5 استخراج شد. برای دریافت زبری سطح، دو دوربین دارای زاویه مایل به‌کار رفت و بیست قطعه عکس، با ده نقطه کنترلی (GCP) برای هر خوشه، گرفته شد. سپس با نرم‌افزار Agisoft PhotoScan ابر نقاط متراکم محاسبه و سپس مش‌بندی به‌منظور تولید DTM انجام گرفت. از زبانه 3D Analysts در ArcGIS پروفیل طولی ناهمواری‌های سطح برای هر خوشه استخراج شد. به‌منظور انتخاب مدل مناسب در منطقه، سه مدل در برآورد رطوبت سطح خاک، شامل مدل‌های Dubois-MLR-WCM، مد نظر قرار گرفت. نتایج سه مدل در برآورد رطوبت سطح خاک در پلاریزه HH به‌ترتیب در مدل Dubois با  $R^2 = 0.82$  و  $RMSE = 0.027$ ، مدل MLR با  $R^2 = 0.71$  و  $RMSE = 0.03$  و مدل WCM با  $R^2 = 0.67$  و  $RMSE = 0.033$  به‌دست آمد. نتایج نشان داد مدل Dubois در اراضی بایر تا تنک برای محدوده تحقیق و شرایط مشابه مناسب‌تر است.

**کلیدواژه‌ها:** رطوبت سطح خاک، آلوِس پالسار ۲، مدل دوبویس (Dubois)، مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، مدل ابرآب.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: استان گلستان، گرگان، میدان بسیج، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، کدپستی ۴۹۱۸۹۴۳۴۶۴، تلفن: ۳۲۴۲۷۰۴۰  
Email: Amir.sadoddin@gmail.com

## ۱- مقدمه

رطوبت خاک مقدار آب موجود در خاک به صورت حجمی یا وزنی است (Al-Yaari et al., 2014; Zhao & Li, 2013). توزیع زمانی و مکانی رطوبت سطح خاک از متغیرهای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی و بوم‌شناسی است که در تبادلات انرژی بین زمین و اتمسفر تأثیر می‌گذارد. این متغیر برای بسیاری از برنامه‌ها حیاتی است؛ از جمله هواشناسی، کشاورزی مانند پایش، نظارت تغییرات مکانی و زمانی محصولات، برنامه‌های آبیاری و انتخاب محصول مناسب با شرایط منطقه، مخاطرات طبیعی مانند پیش‌بینی، هشدار و خطر سیلاب، خشک‌سالی، طوفان‌های گردوغبار و فرسایش خاک، هیدرولوژی مانند نفوذ رواناب، تبخیر و تعرق، پایش و ارزیابی حوزه‌های آبخیز. کسب اطلاعات دقیق در مورد رطوبت خاک یکی از عوامل اصلی و مؤثر در تهیه طرح مدیریت منابع آب است و برآورد دقیق تغییرات زمانی و مکانی رطوبت سطح خاک به منظور مطالعات محیطی در مقیاس بزرگ بسیار اهمیت دارد (Zribi et al., 2019; Aliihsan et al., 2020). رطوبت خاک پویاست و تغییرات زمانی و مکانی آن اهمیت دارد (Şekertekin et al., 2018).

روش‌های اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک نقطه‌ای است که، علاوه بر هزینه‌بر و زمان‌بر بودن و آثار مخربی که در طبیعت دارد، در مناطق وسیع و با نظارت طولانی‌مدت عملی و مقرون‌به‌صرفه نیست. همچنین، تهیه نقشه رطوبت خاک با اندازه‌گیری زمینی بسیار دشوار است (Aliihsan et al., 2020). مزایای استفاده از سنسور از دور در برآورد رطوبت سطح خاک در مقایسه با روش‌های قدیمی و معمول در سرعت، نظارت منظم، پوشش وسیع منطقه و صرفه‌جویی در هزینه است (Baghdadi & Zribi, 2006). اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش سنسور از دور غیرمخرب است و لازم نیست، برای هر محل، نمونه خاک برداشت شود. (Anderson et al., 2009). در طول سی سال گذشته، الگوریتم‌های گوناگونی با بهره‌گیری از داده‌های سنسور

از دور مانند نوری، حرارتی، ماکروویو فعال و غیرفعال برای برآورد رطوبت خاک پیشنهاد شده است (Zribi et al., 2019; Sadeghi et al., 2017). رادار با روزه‌ مصنوعی، که به اختصار SAR<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، در مقایسه با داده‌های نوری و حرارتی به منظور تخمین بافت خاک، ناهمواری‌های سطح و رطوبت سطح خاک مناسب‌تر است (Gorrab et al., 2015; Zribi et al., 2014). پیش‌تر مطالعاتی به قصد برآورد رطوبت سطح خاک، تخمین پارامترهای هدف و سنجنده در اراضی لخت و اراضی دارای پوشش گیاهی و نیز ناهمواری‌های سطح در باند X (Baghdadi et al., 2011, 2012)، در باند C (Şekertekin et al., 2018; Dave et al., 2019) و برای داده‌های باند L (Zribi et al., 2019; El Hajj et al., 2019b) صورت گرفته است. توانایی باند L در بازیابی رطوبت سطح خاک و نفوذ در پوشش گیاهی به مراتب بیشتر از دو باند X و C است؛ با این حال مطالعات در زمینه باند L به نسبت سایر باندها کم است (Aliihsan et al., 2020). برآورد رطوبت خاک با استفاده از داده‌های SAR به دو عامل هدف (زبری سطح، ثابت دی‌الکتریک، زاویه فرود محلی، پوشش گیاهی) و پارامترهای سنجنده (طول موج، زاویه فرود، پلاریزاسیون) بازمی‌گردد (Ulaby et al., 1978; Das & Paul, 2015). پوشش گیاهی و توپوگرافی دو عامل مهم در برآورد رطوبت خاک است. خاک دارای پوشش گیاهی و تغییرات توپوگرافی در تخمین رطوبت سطح خاک تأثیر دارند و هر دو عاملی محدودکننده محسوب می‌شوند زیرا بازتاب پراکنش حاصل به سمت سنجنده نمی‌تواند بیانگر واقعی بازتاب از سطح خاک باشد و بخش عمده انرژی را خاک و پوشش گیاهی جذب می‌کند (Du et al., 2000). در مناطق دارای تغییرات توپوگرافی، پاسخ سنجنده در زوایای فرودی متفاوت یکسان نیست (Lakhankar et al., 2009). ناهمواری یا زبری سطح<sup>۲</sup> برای سنسور از دور فعال مسئله مهمی است؛ در بسیاری

1. Synthetic Aperture Radar
2. Surface roughness

پالسا ۲<sup>۹</sup> از ماهواره آلوس<sup>۱۱</sup> با استفاده از مدل تجربی دوبویس، تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)<sup>۱۱</sup> برای سطوح با تراکم پوشش گیاهی کمتر از ۰.۴ و مدل نیمه تجربی (WCM)<sup>۱۲</sup> برای سطوح با تراکم پوشش گیاهی بیش از ۰.۴ است. از اصلی ترین مشکلات حوزه مورد مطالعه، فقدان شیب و تجمع رواناب و غرقابی شدن اراضی است که این موارد موجب افت بهره‌وری اراضی، کاهش نفوذپذیری و شکل‌گیری سیلاب می‌شود. اطلاع از میزان رطوبت پیشین سطح خاک در استفاده از مدل‌های بارش- رواناب و روندیابی‌های هیدرولوژیکی کمک شایانی به مدل‌سازی‌ها می‌کند و تا حدودی می‌تواند نتایج مدل‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر کند. هدف اصلی این پژوهش تعیین مدل مناسب در برآورد رطوبت سطح خاک، به‌منظور تصمیم‌گیری بهنگام با داده‌های رادار، برای مقابله با سیل‌گیری و غرقابی شدن در منطقه مورد مطالعه است.

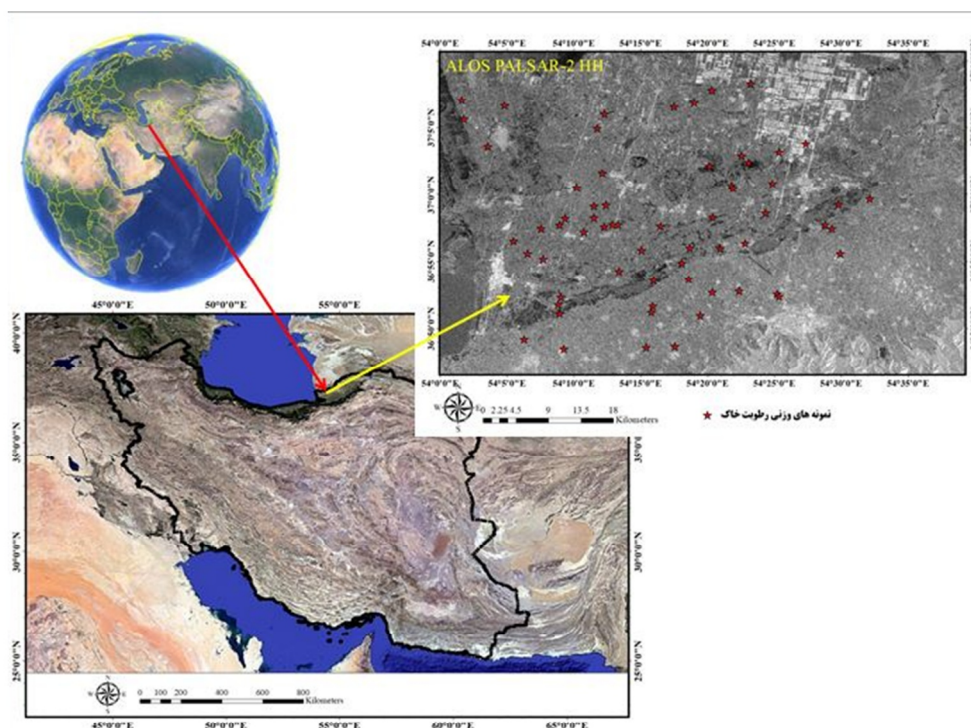
## ۲- محدوده و داده‌های مورد استفاده در تحقیق

محدوده تحقیق (شکل ۱) بخشی از حوزه آبخیز آق‌قلا، واقع در شمال استان گلستان، بین ۵۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی است که بیشتر کاربری کشاورزی دارد. حداقل ارتفاع آن از سطح دریا ۱۲- متر، میانگین دمای سالانه ۱۹.۰۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی ۲۳۰.۵ میلی‌متر است. زمین‌شناسی به دوره کواترنر بازمی‌گردد و رسوبات باتلاقی و مردابی را دربر می‌گیرد و از نظر توپوگرافی، فاقد هرگونه عارضه طبیعی است. همچنین، این منطقه به‌صورت دشت مسطح با شیب بسیار کم، یک تا دودهم درصد است.

1. Zribi
2. Integration Equation Model
3. Fung
4. Adapted Integration Equation Model
5. Wu
6. Oh
7. Dubois
8. Baghdadi
9. PALSAR-2
10. ALOS
11. Multivariate Linear Regression
12. Water Cloud Model

از موارد، اثر ناهمواری‌های سطحی در ضریب بازپراکنشی بیشتر از رطوبت خاک است (Autret et al., 1989). زبری سطح بیشتر باعث افزایش بازپراکنش راداری می‌شود (Dubois et al., 1995). استفاده از داده‌های SAR به ایجاد و توسعه الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم‌های چندزمانه (Moran et al., 2000)، شبکه‌های عصبی (El Hajj et al., 2017; Paloscia et al., 2013;) (Zribi et al., 2019)، الگوریتم‌های تشخیص تغییرات (Gao et al., 2017; Zribi et al., 2019) و معکوس‌سازی مستقیم مدل‌های فیزیکی و تجربی (Bousbih et al., 2018; Zribi et al., 2019) شده است. در مطالعات زریبی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، بازپراکنش سیگنال رادار به‌منزله تابعی از رطوبت و زبری خاک معرفی شده است. ضریب بازپراکنش راداری حساسیت نسبتاً بالایی به رطوبت خاک در زوایای فرود ۳۵-۲۰ درجه دارد (Fieuzal et al., 2011; Aubert et al., 2011). مدل‌های گوناگون بازپراکنش راداری (فیزیکی، نیمه تجربی و تجربی) به‌منظور بهبود درک علمی رابطه بین ضریب همبستگی بازپراکنش راداری و پارامترهای مورد استفاده برای خاک توسعه یافته‌اند. رایج‌ترین مدل‌های به‌کاررفته مدل معادله انتگرال (IEM)<sup>۲</sup>، پیشنهادی فانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۲)، و مدل انتگرال اصلاحی (AIEM)<sup>۴</sup> وو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۱) است که هر دو را می‌توان در طیف وسیعی از شرایط زبری خاک اعمال کرد. مدل نیمه تجربی اُه<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۲)، مدل تجربی دوبویس<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۹۵) و مدل بغدادی<sup>۸</sup> و زریبی (۲۰۱۶) دارای روابط تحلیلی ساده بین سیگنال رادار و پارامترهای فیزیکی خاک هستند. برآورد رطوبت سطح خاک در اراضی دارای پوشش گیاهی، به‌دلیل تأثیرات پراکنش چندگانه بین پوشش گیاهی و سطح خاک، تا حدودی پیچیده است و برای کاهش تأثیرات پوشش گیاهی در برآورد رطوبت خاک، مدل نیمه تجربی ابراب (WCM) مطرح شده است (Zribi et al., 2019; Huang et al., 2019).

هدف این مطالعه بررسی پتانسیل باند L سنجنده



شکل ۱. موقعیت مکانی محدوده تحقیق در ایران و استان گلستان

## ۲-۱- اندازه‌گیری میدانی

امواج الکترومغناطیسی در محدوده ۱۰-۱.۳ گیگاهرتز، عمق نفوذ امواج کاهش می‌یابد. طول موج و فرکانس آلوس پالسار ۲، به ترتیب، ۲۲.۹۰ سانتی‌متر و ۱.۲۷ گیگاهرتز است. نمونه‌ها در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری و سپس نمونه‌های خاک هر محل به‌طور یکنواخت مخلوط شدند؛ بدین ترتیب که داخل استوانه‌ای آلومینیومی قرار گرفتند و وزن مرطوب آن ثبت شد. این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت، در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، در دستگاه آن قرار گرفتند و بار دیگر، توزین و وزن خشک آنها ثبت شد. رطوبت حجمی خاک که با رابطه (۱) معرفی خواهد شد، در مورد هر نمونه به دست آمد. رابطه (۱) به روش گرانی‌سنجی گرمایی<sup>۱</sup> معروف است که معمول‌ترین روش کلاسیک برای اندازه‌گیری حجمی محتوای آب خاک شمرده می‌شود. علاوه بر رطوبت حجمی، در آزمایشگاه با یک الک به قطر ۰.۵ میلی‌متر محتوای هر

مهم‌ترین مرحله مطالعات خاک تعیین موقعیت مکانی نمونه‌هاست. نمونه‌های خاک باید یکنواختی در سطح منطقه را بیان کند و منطقه نیز دارای ویژگی‌های محیطی مشابه مانند توپوگرافی، خاک، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، درجه حرارت سطح باشد. از عملگر هم‌پوشانی در GIS، با در نظر گرفتن ویژگی‌های محیطی، نقشه شکل واحد زمین استخراج شد (شکل ۲). موقعیت نمونه‌ها، با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی به تعداد پنجاه موقعیت و چهارده نمونه برای هر موقعیت، به صورت خوشه‌ای تعیین شد. هر واحد نمونه معرف نمونه مشابه آن در مقیاس بزرگ‌تر، به فاصله حداقل دو کیلومتر در واحد مطالعاتی، به منظور جلوگیری از خودهمبستگی است. عمق نفوذ امواج در خاک از ۰.۱ تا نصف طول موج است (Ulaby et al., 1981a). با افزایش فرکانس

### 1. Thermogravimetric Method

## برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از داده آئوس پالسار ۲

SNAP<sup>۳</sup> و لندست ۸ از نرم‌افزار Arc GIS 10.5 استفاده شد. گام‌های ۱ تا ۴ برداشت شده از پالسار ۲ از ماهواره آئوس و گام ۵: OLI از ماهواره لندست ۸ است.

۱. کالیبراسیون رادیومتریکی برای به‌دست‌آوردن ضریب بازپراکنشی برحسب دسی‌بل، در حالت دوگانه پلاریزاسیون؛

۲. چندمنظرسازی که ساختار بافت تصویر را به وضعیت واقعی نزدیک می‌کند و نویز اسپیکل را کاهش می‌دهد؛

۳. فیلتر لی با ابعاد پنجره ۵\*۵ برای کاهش نویز؛

۴. تصحیح هندسی به‌منظور حذف خطاهای توپوگرافی، شامل سایه- کوتاه‌شدگی و خوابیدگی؛

۵. مراحل پیش‌پردازش داده‌های لندست شامل تصحیح رادیومتریکی، اتمسفری، توپوگرافی و استخراج شاخص‌های گیاهی و نمناکی است.

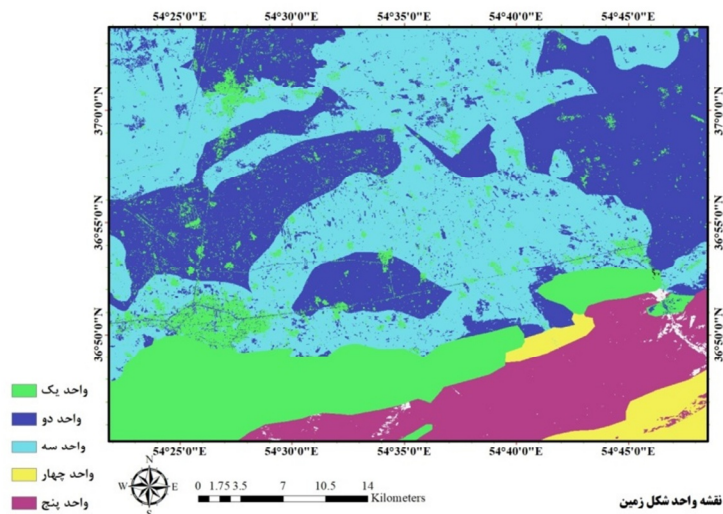
سیلندر الک شد و سپس بافت خاک و وزن مخصوص ظاهری خاک تعیین شد. ارتفاع گیاهان، محتوای آب گیاهی<sup>۱</sup> و زبری سطح در محل اندازه‌گیری شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{SSM} = \left( \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \right)$$

SSM رطوبت حجمی خاک،  $W_{\text{wet}}$  وزن نمونه مرطوب و  $W_{\text{dry}}$  وزن نمونه خشک است.

### ۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

سنجنده پالسار ۲ از آئوس و سنجنده OLI از ماهواره لندست ۸، به‌ترتیب، از سایت‌های <https://auig2.jaxa.jp/> و <https://earthexplorer.usgs.gov> دریافت شدند و مشخصات هر دو تصویر در جدول ۱ آورده شده است. در مراحل پیش تا پس‌پردازش داده‌های SAR از



شکل ۲. نقشه واحد شکل زمین برای دریافت نمونه‌ها و اندازه‌گیری میدانی

جدول ۱. مشخصات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

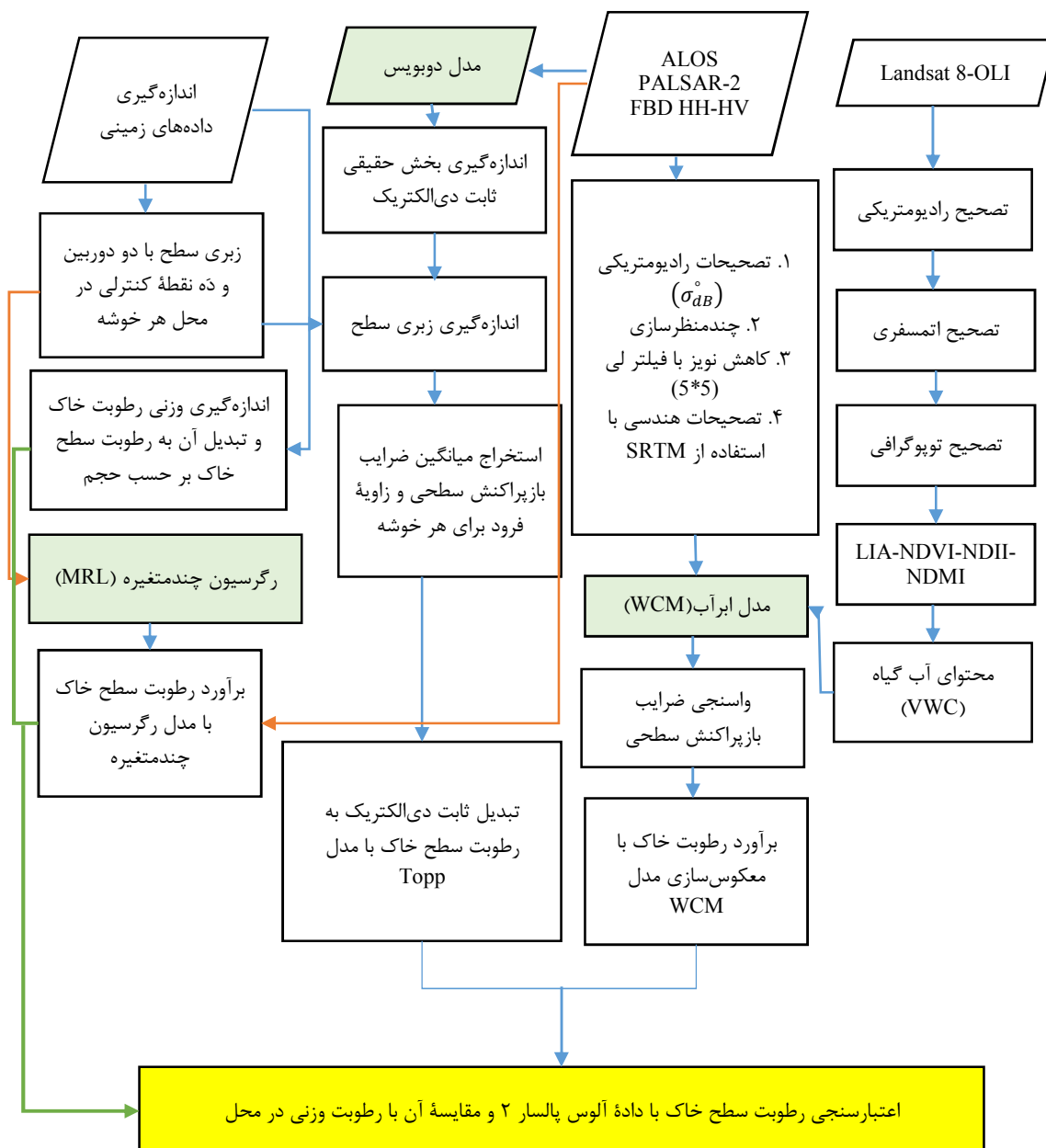
پلتفرم	تاریخ دریافت داده	زاویه فرود	پلاریزاسیون	قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک مکانی (متر)
ALOS/PALSAT-2	۱۳۹۹/۰۲/۱۱	۹۰-۳۰	HH-HV	۱۴ روز	۱۲.۵
Landsat 8/OLI	۱۳۹۹/۰۲/۲۰	-	۱۲ باند	۱۶ روز	۳۰

1. Vegetation Water Content (VWC)
2. Soil Surface Moisture
3. Sentinels Application Platform

### ۳- روش‌شناسی تحقیق

شده است تا مدل‌سازی ضرایب بازپراکنش خاک و برآورد رطوبت سطح خاک انجام شود. مراحل تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این تحقیق، از سه مدل تجربی دوبویس، مدل رگرسیون چندمتغیره برای سطوح با  $NDVI < 0.4$  و مدل ابرآب برای سطوح دارای پوشش گیاهی استفاده



شکل ۳. فلوچارت روش‌شناسی تحقیق

### ۳-۱- اندازه گیری زبری سطح خاک

اندازه گیری های زبری با استفاده از دوربین دیجیتال و با زاویه ای مایل انجام شد. در محل هر نمونه، دو پلات با ابعاد ۲\*۲ متر مربع با هم پوشانی طولی ۴۰-۶۰٪ و هم پوشانی عرضی ۳۰-۲۰٪ با ده نقطه کنترل زمینی انتخاب شد. چهار گوشه هر پلات پیکه گذاری و سپس موقعیت مکانی آنها، با استفاده از GPS، برداشت و ثبت شد. برای هر نمونه، بیست عکس با هدف سه بعدی سازی گرفته شد. عکس ها با نرم افزار Agisoft PhotoScan کیفیت سنجی و به هم متصل شدند. در ادامه، ابر نقاط کم تراکم، ابر نقاط متراکم و مش بندی تولید شد. با استفاده از ابر نقاط متراکم، DTM منطقه به دست آمد و با به کارگیری زبانه 3D Analyst، پروفیل طولی ناهمواری های سطح (شکل ۴) استخراج شد. در نهایت، طبق رابطه (۲) یکی از پارامترهای مهم زبری به دست آمد که ریشه میانگین مربعات ارتفاعی (H<sub>RMS</sub>) است. میانگین ارتفاعی ناهمواری های سطح، در محدوده مطالعاتی، بین ۰.۳-۲.۹ سانتی متر محاسبه شد.

$$RMS_{height} = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (2)$$

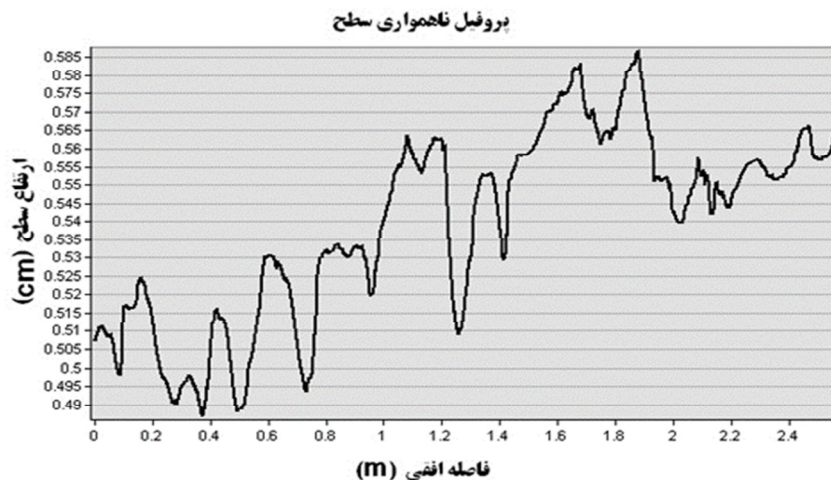
در این معادله،  $z_i$  ارتفاع نقطه  $i$  است که به نسبت یک سطح مبنا تعریف می شود،  $\bar{z}$  متوسط ارتفاعات به نسبت سطح مبنا و  $n$  نیز تعداد نقاط است.

### ۳-۲- مدل دوبویس

این مدل از مدل های تجربی و ساده شده آه است (Dubois et al., 1995) که دوبویس و همکاران (۱۹۹۵) آن را، از ضرایب بازپراکنش کوپلاریزه  $\sigma_{HH}^{\circ}$  و  $\sigma_{VV}^{\circ}$  برای مدل کردن ضرایب بازپراکنش راداری در اراضی با  $NDVI < 0.4$  پدید آورده اند. محدوده صحت این مدل برای انحراف معیار ناهمواری های سطح بین ۰.۳ تا ۳ سانتی متر، زاویه فرود ۳۰ تا ۶۰ درجه و رطوبت ۳۵-۰٪ است (Dubois et al., 1995). علت به کار رفتن پلاریزاسیون ناهمسان HV در این معادلات این است که حساسیت مدل به نویز کاهش یابد. در اراضی با  $NDVI < 0.4$  ضمن دقیق تر بودن مدل دوبویس، کالیبره کردن آن هم به آسانی انجام می شود (Dubois et al. 1995). مدل دوبویس با رابطه (۳) معرفی و محاسبه می شود.

رابطه (۳)

$$\sigma_{HH}^{\circ} = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5}\theta}{\sin^5\theta} 10^{0.028\varepsilon' \tan\theta} (ks \cdot \sin\theta)^{1.4} \lambda^{0.7}$$



شکل ۴. پروفیل ناهمواری سطح حاصل از اندازه گیری زمینی با روش فتوگرامتری برد کوتاه در محیط Arc GIS 10/5

فرود،  $S$  میانگین ارتفاع ناهمواری‌ها، و  $A$ ،  $B$  و  $C$  ضرایب مدل‌اند. ۷۵٪ نمونه‌ها برای مدل و ۲۵٪ دیگر به منظور ارزیابی مدل استفاده شد. رطوبت خاک با زبری سطح رابطه لگاریتمی دارد (Sadeh et al., 2018; Huang et al., 2019; Aliihsan et al., 2020). این مدل، به دلیل اعمال زبری، توانایی بسیاری در برآورد رطوبت سطح خاک دارد.

### ۳-۴- مدل ابرآب (WCM)

مدل ابرآب مدلی نیمه تجربی برای مدل‌سازی نقش گیاهان در تعیین رطوبت خاک است که اولایی<sup>۱</sup> و آتما<sup>۳</sup> (۱۹۷۸) پیشنهاد دادند. این مدل قادر است بازپراکنش پوشش گیاهی را نیز، به خوبی بازپراکنش خاک زیرین در زمان رشد محصول، نشان دهد (Motagh et al., 2004; Maity et al., 2014). در این مدل، بازپراکنش کل رادار (رابطه (۹)) برابر با مجموع بازپراکنش گیاه و بازپراکنش خاک به همراه تضعیف دوطرفه لایه گیاه است. برای یک زاویه فرود مشخص، بازپراکنش هم‌پلازیه مدل ابرآب طبق روابط (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) معرفی و محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{con}^{\circ}(\theta) = \sigma_{veg}^{\circ}(\theta) + \gamma^2 \sigma_{soil}^{\circ}(\theta) \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sigma_{veg}^{\circ}(\theta) = A \cdot vwc \cdot \cos(\theta) [1 - \gamma^2(\theta)] \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\gamma^2(\theta) = \exp\left[-2B \cdot \frac{vwc}{\cos(\theta)}\right] \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sigma_{soil}^{\circ}(dB) = C + D \cdot SSM \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در معادلات بالا،  $\sigma_{con}^{\circ}(\theta)$  ضریب بازپراکنش راداری سطح زیرین،  $\sigma_{veg}^{\circ}(\theta)$  سهم گیاه در ضریب بازپراکنشی،  $\sigma_{soil}^{\circ}(\theta)$  سهم ضریب بازپراکنشی از سطح خاک،  $\gamma^2(\theta)$  گذردهی گیاهی دوطرفه، شاخص محتوای آب گیاه (میانگین آب موجود در پوشش گیاهی) و  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  ضرایب تجربی مدل‌اند که با روش

$\theta$  زاویه فرودی برحسب درجه،  $\varepsilon$  بخش حقیقی ثابت دی‌الکتریک،  $k = 2\pi/\lambda$  عدد موج،  $s$  ارتفاع ناهمواری‌های سطح در واحد سانتی‌متر و  $\lambda$  طول موج در واحد سانتی‌متر است. فرایند معکوس‌سازی مدل دوبویس دو گام اساسی برای حل دو پارامتر مجهول  $\varepsilon$  و  $ks$  دارد. با جای‌گذاری مقادیر اندازه‌گیری‌شده زبری حاصل از فتوگرامتری برد کوتاه و اعمال عدد موج در آن ( $K$ )، پارامتر مجهول  $\varepsilon$  طبق رابطه‌های (۴) و (۵) به دست آمد. در ادامه، با مدل تاپ<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۸۰) که با رابطه (۶) معرفی می‌شود،  $\varepsilon$  به رطوبت خاک تبدیل شد. مدل تاپ یک تابع چندجمله‌ای درجه سه است که برای انواع خاک‌ها معتبر است و تابعی جهانی محسوب می‌شود (Topp et al., 1980).

$$\varepsilon = \left( \frac{\log(\sigma_{HH}^{\circ}) - \log(AC)}{B} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$A = 10^{-2.75 \frac{\cos^{1.5}\theta}{\sin^5\theta}} \quad B = 0.028 \tan\theta \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$C = (ks * \sin\theta)^{1.4} \lambda^{0.7} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$m_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$$

### ۳-۳- توسعه مدل تجربی برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره

مدل‌های تجربی قادرند، به کمک تحلیل رگرسیونی، اطلاعاتی را در مورد تأثیر متغیرهای رطوبت سطح خاک، زاویه فرود و ناهمواری سطح به دست دهند. این متغیرها از عوامل اصلی تأثیرگذار در ضرایب بازپراکنش راداری شمرده می‌شوند. به منظور توسعه مدل‌های تجربی با استفاده از این متغیرها، می‌توان رابطه رگرسیونی چندمتغیره‌ای را، طبق رابطه‌های (۷) و (۸)، ایجاد کرد.

$$SSM = f(\sigma_{pq}^{\circ}, \theta, s) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$SSM = A + B \cdot \sigma_{pq}^{\circ} + C \cdot \theta + D \cdot S \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این روابط،  $\sigma_{pq}^{\circ}$  ضرایب بازپراکنش راداری است که بالاترین همبستگی را با رطوبت خاک دارد،  $\theta$  زاویه

1. Topp  
2. Ulaby  
3. Attema



علاوه بر این شاخص‌ها، NDVI شاخص گیاهی مهمی است که در مطالعات بگدادی و همکاران (۲۰۱۷) و هوانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) و تحقیق حاضر استفاده شده است. مقادیر پارامترهای گیاهی به کاررفته در مدل نیمه تجربی ابرآب در جدول ۲ و شاخص گیاهی و نمناکی در جدول ۳ نشان داده شده است.

### ۳-۵- تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از دو روش کیفی انجام شده است: ضریب تعیین و ریشه دوم میانگین مربعات خطا. ضریب تعیین طبق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در این معادله،  $x_i$  و  $y_i$  نقاط نمونه برداری با متغیر  $i$  تعداد نقاط نمونه برداری،  $\bar{x}$  میانگین نمونه‌های  $x_i$  و  $\bar{y}$  میانگین نمونه‌های  $y_i$  هستند.

ریشه دوم میانگین مربعات خطا طبق رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$N$  تعداد نمونه‌ها،  $P_i$  تعداد نمونه‌های پیش‌بینی شده در  $i$  و  $O_i$  تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده در  $i$  است.

کمترین مربعات به دست می‌آیند (Palosica et al., 2013; Zribi et al., 2013; Baghdadi et al., 2017). در این معادلات، پارامترهای A و B به خصوصیات تاج پوشش گیاه بستگی دارد (Bindlish & Barros, 2001). پارامترهای C و D با ایجاد رابطه‌ای خطی بین ضریب بازپراکنش سطحی و رطوبت سطح خاک برای خاک‌های بدون پوشش به دست می‌آیند. ضرایب بازپراکنش سطحی خاک بر حسب دسی بل با رطوبت سطح خاک رابطه‌ای خطی دارد. در خاک عاری از پوشش گیاهی، ضرایب بازپراکنش خاک بر حسب دسی بل از طریق تابعی خطی نمایش می‌یابد که شامل زبری سطح و رطوبت سطح خاک است. در اراضی کشاورزی، در طول دوره رشد گیاهی، پارامتر ناهمواری سطح طی دوره‌های کوتاه ثابت فرض می‌شود؛ بنابراین، هنگامی که داده‌های SAR چندزمانه در همان محل به کار می‌رود، تغییرات زمانی در خاک عاری از پوشش گیاهی فقط تغییرات رطوبت خاک در آن محل را نشان می‌دهد (Li & Wang, 2018; Aliihsan et al., 2020). محتوای آب گیاهی، شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه، شاخص سطح آب برگ و زیست توده گیاهی پرکاربردترین شاخص‌های مورد استفاده در مدل ابرآب است (Attema & Ulaby, 1978; Kumar et al., 2015).

جدول ۲. مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل نیمه تجربی ابر متراکم آب

نوع پوشش	تمامی گیاهان	مراتع	زراعی	گراسلند
پارامتر A	۰.۰۰۱۲	۰.۰۰۰۹	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۱۴
پارامتر B	۰.۰۹۱	۰.۰۳۲	۰.۱۳۸	۰.۰۸۴

جدول ۳. شاخص گیاهی و نمناکی مورد استفاده در تحقیق

شاخص‌های تحقیق	باندهای مورد استفاده	طول موج $\mu m$
$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	Red	0.630-0.680
$LAI = 0.57 * exp^{(NDVI * 2.33)}$	NIR	0.845-0.885
$NDMI = \frac{(NIR - SWIR2)}{(NIR + SWIR2)}$	SWIR1	1.560-1.660
$NDII = \frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)}$	SWIR2	2.100-2.300

تأثیر پارامترهای سطح را می‌توان، با استفاده از داده‌های چندپلاریزه یا چندفرکانسی، به حداقل رساند (Baghdadi et al., 2008; Zribi & Dechambre, 2003). در این بخش، NDVI کمتر از ۰.۴ و بیشتر از آن، به ترتیب، بیانگر اراضی بایر تا تنک و نیمه‌انبوه است.

#### ۴-۱-۱-۴ نتایج حساسیت بازپراکنش رادار در سطوح با $NDVI < 0.4$

در این بخش، حساسیت بازپراکنش داده راداری آلسو پالسار ۲ به رطوبت و زبری سطح خاک دارای  $NDVI < 0.4$  بررسی شد. شکل‌های a-۵ و b-۵ رابطه بین بازپراکنش راداری با رطوبت وزنی و زبری سطح حاصل از برداشت میدانی در پلاریزاسیون HH را نشان می‌دهد. طبق این شکل، ضرایب بازپراکنش مدل در پلاریزاسیون HH، به ترتیب با  $R^2 = 0.71$  و  $R^2 = 0.94$ ، به رطوبت و زبری سطح خاک حساس است.

#### ۴-۱-۲-۴ نتایج حساسیت بازپراکنش رادار به سطوح با $NDVI > 0.4$

در این بخش، حساسیت بازپراکنش داده راداری آلسو پالسار ۲ به رطوبت سطح خاک دارای  $NDVI > 0.4$  بررسی شده است. شکل‌های a-۶ و b-۶ رابطه میان بازپراکنش سطحی حاصل از مدل ابرآب و رطوبت وزنی حاصل از برداشت میدانی را، به ترتیب در پلاریزاسیون

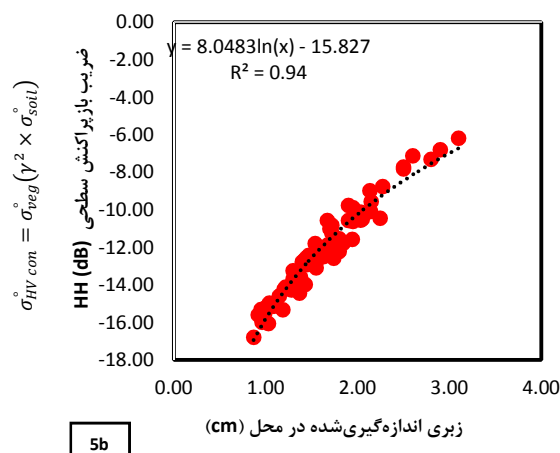
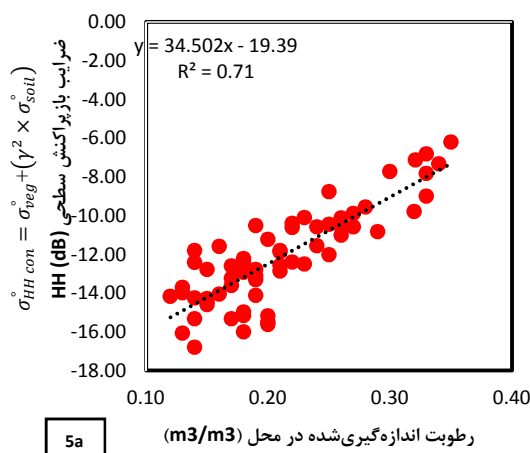
هدف از بررسی داده‌ها اطمینان یافتن از آن است که داده‌ها از توزیعی نرمال پیروی می‌کنند تا، پس از آن، به منظور تجزیه و تحلیلشان اقدام شود. برای این کار، ابتدا داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده با مقدار داده مشاهداتی رطوبت خاک مقایسه می‌شود. همچنین، برای اعتبارسنجی داده‌های مشاهداتی و ارزیابی آن از RMSE استفاده می‌شود. مقایسه نتایج آماری هر سه مدل در جدول ۴ آمده است.

#### ۴- نتایج و بحث

بخش نخست تحقیق درباره حساسیت سیگنال SAR به رطوبت خاک، بخش دوم محاسبه رطوبت خاک با سه مدل دوبویس، تحلیل رگرسیون چندمتغیره (MRL) و مدل نیمه تجربی ابرآب، و بخش سوم دربرگیرنده نتایج آماری مدل است.

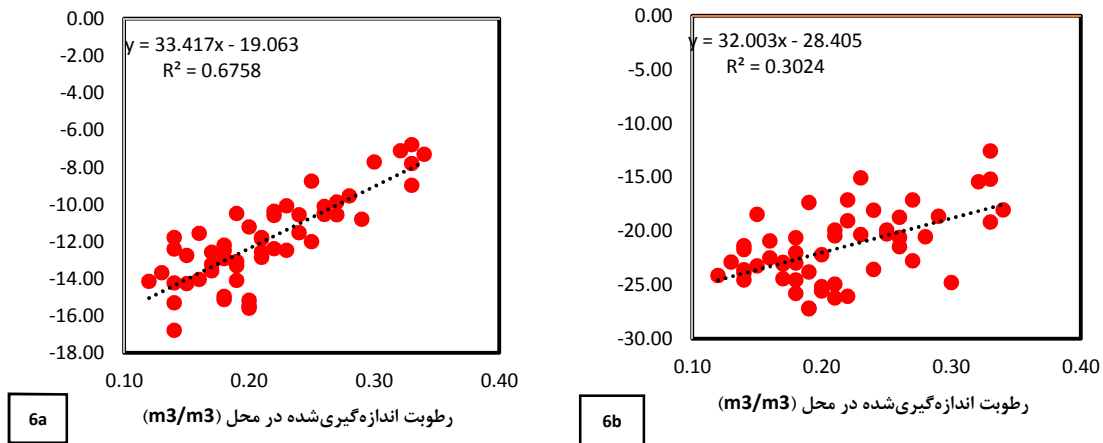
#### ۴-۱- حساسیت سیگنال SAR به رطوبت سطح خاک

در این بخش، حساسیت بازپراکنش سطحی باند L به رطوبت سطح خاک با استفاده از پلاریزاسیون HH در سطوح دارای  $NDVI < 0.4$  سنجیده شده و برای سطوح با  $NDVI > 0.4$ ، پلاریزاسیون HH و HV به کار رفته است. برآورد رطوبت خاک از طریق بازپراکنش رادار به هندسه سطح وابسته است (Das & Paul, 2015) و



شکل ۵. رابطه بین ضرایب بازپراکنش مدل (دسی‌بل) با رطوبت وزنی (a)؛ رابطه بین ضرایب بازپراکنش مدل (دسی‌بل) با زبری سطح در اراضی با تراکم پوشش گیاهی اندک (b)

برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از داده آلودی پالساار ۲



شکل ۶. رابطه ضریب بازپراکنش خاک با رطوبت وزنی در مناطق دارای پوشش گیاهی HH (۶-ا) و HV (۶-ب)

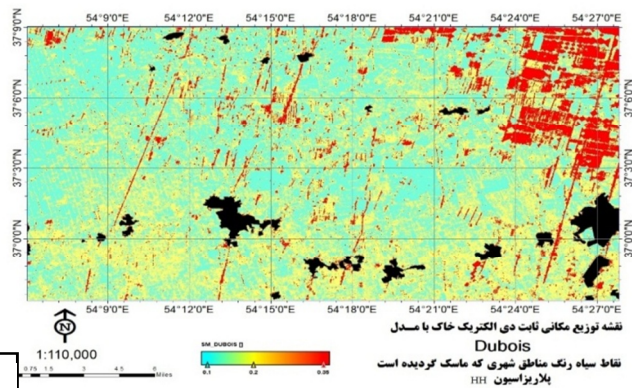
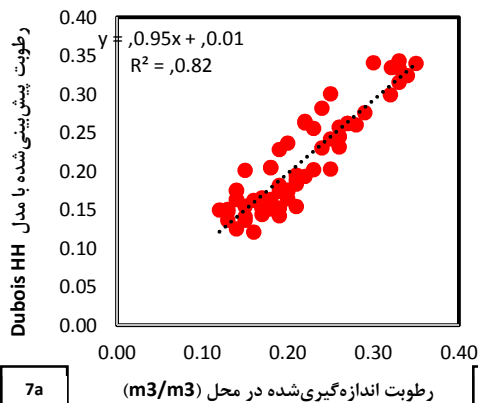
۴-۲-۱- نتایج برآورد رطوبت سطح خاک با مدل دوبویس

با معلوم بودن زبری سطح و جای گذاری در رابطه (۵)، ثابت دی الکتریک به دست آمد. در ادامه، ثابت دی الکتریک حاصل از مدل با استفاده از رابطه (۶)، مشهور به رابطه تاپ، به رطوبت خاک تبدیل شد. شکل  $a-Y$  رطوبت اندازه گیری شده با رطوبت حاصل از مدل در پلاریزه HH دارای  $R^2 = 0.82$  و  $RMSE = 0.027$  را نشان می دهد. مطابق نتایج، محدوده اعتبار مدل دوبویس در برآورد رطوبت سطح خاک در زمین های بایر با  $NDVI \leq 0.2$  و زمین های دارای پوشش گیاهی تنگ با  $0.2 \leq NDVI \leq 0.4$  است. شکل  $b-Y$  نقشه ثابت دی الکتریک حاصل از مدل دوبویس را نشان می دهد.

HH و HV، نشان می دهد. ضرایب بازپراکنش مدل در پلاریزاسیون HH و HV، به ترتیب، با  $R^2 = 0.68$  و  $R^2 = 0.30$  به رطوبت سطح خاک حساس است. نتایج تحقیق نشان داد که، در اراضی با تراکم پوشش گیاهی بیش از ۰.۴، تأثیر پلاریزه همسان HH بیشتر از پلاریزه HV است؛ در نتیجه، مدل در پلاریزه HH ثبات بیشتری خواهد داشت.

۴-۲-۲- برآورد رطوبت سطح خاک مبتنی بر مدل

این بخش از تحقیق دربرگیرنده نتایج برآورد رطوبت خاک با مدل تجربی دوبویس، مدل نیمه تجربی WCM و MRL است. از مدل های دوبویس و MLR برای مناطقی با  $NDVI < 0.4$  و از مدل نیمه تجربی WCM برای مناطقی با  $NDVI > 0.4$  استفاده شده است.



شکل ۷. رابطه رطوبت وزنی با رطوبت پیش بینی شده طبق مدل دوبویس (۷-ا)؛ نقشه توزیع مکانی ثابت دی الکتریک (۷-ب)

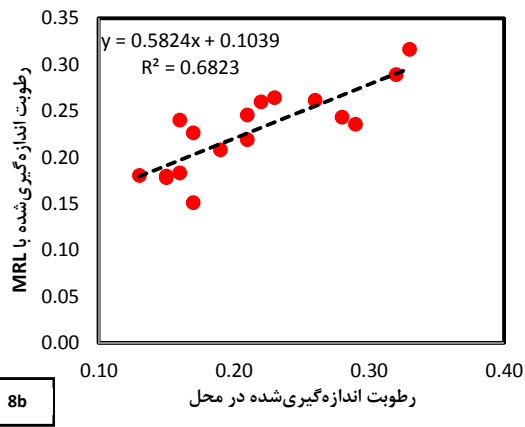
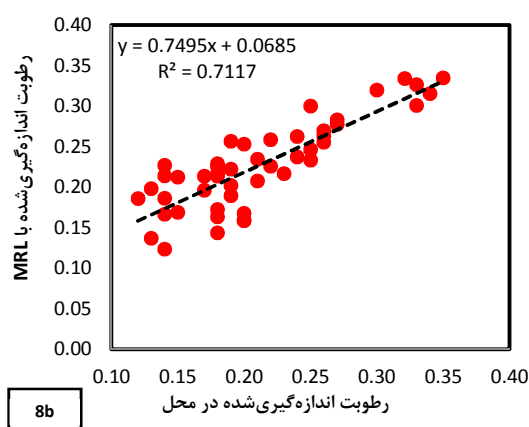
وزنی در محل برحسب  $m^3/m^3$  با رطوبت اندازه‌گیری شده طبق مدل MLR، به ترتیب برای داده‌های آموزشی و تست،  $R^2 = 0.71$  و  $R^2 = 0.68$  به دست آمد (شکل‌های a-8 و b-8). نتایج نشان داد که مدل، به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای تارگت (زبری) و سنجنده (پلاریزاسیون و زاویه فرود)، توانایی فراوانی در برآورد رطوبت سطح خاک دارد. شکل 8-c نقشه توزیع مکانی رطوبت سطح خاک با مدل MRL را نشان می‌دهد.

رابطه (15)

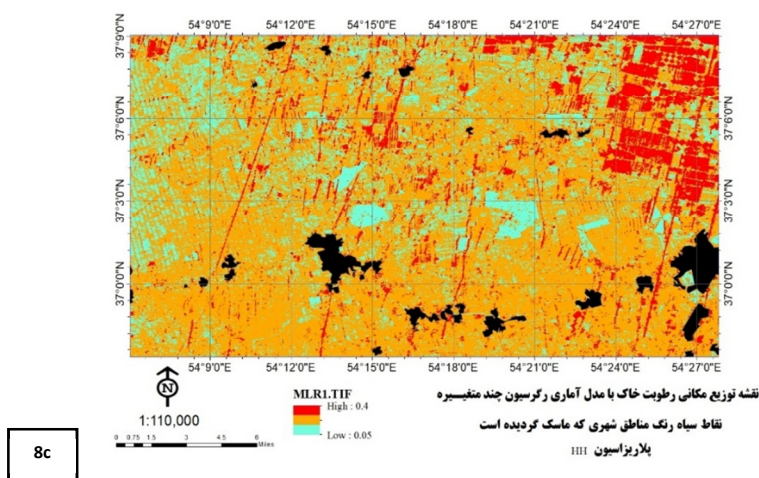
$$SSM_{LBand} = 0.03185 \times \sigma_{HH}^{\circ} - 0.03976 \times \theta - 0.05743 \times Hrms + 0.73095$$

#### ۴-۲-۲- نتایج برآورد رطوبت سطح خاک با مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

در پژوهش حاضر، تحلیل رگرسیونی چندمتغیره با استفاده از مجموعه داده‌های آموزشی و تست انجام شد. برای مجموعه داده‌های آموزشی و تست، به ترتیب ۴۸ و ۱۷ سایت انتخاب شد. سپس، برای داده‌های آموزشی رابطه (۱۵) معادله‌نویسی شد و براساس آن، رطوبت خاک به دست آمد. با توجه به اینکه بیشترین حساسیت را به رطوبت سطح خاک دارد،  $\sigma_{HH}^{\circ}$  در تحلیل رگرسیون به کار رفت. نتایج حاصل از رطوبت



شکل ۸. رابطه بین رطوبت اندازه‌گیری شده با مدل MRL با رطوبت وزنی در  $\sigma_{HH}^{\circ}$ : داده آموزشی (a-8) و داده تست (b-8)



شکل 8-c. توزیع مکانی رطوبت خاک با مدل آماری رگرسیون چندمتغیره

رابطه (۱۶)، تأثیرات محتوای آب گیاهی حذف شد. برای تخمین ضرایب مجهول مدل، روش کمترین مربعات به کار رفت. با استفاده از رطوبت اندازه گیری شده زمینی، به منظور محاسبه پارامترهای مجهول معادله نویسی شد. در ادامه، با داشتن ضرایب بازپراکنش سطحی و نیز مقادیر به دست آمده ضرایب مجهول از طریق حل معکوس مدل ابرآب، رطوبت خاک به دست آمد. شکل ۹-۱ نقشه توزیع مکانی رطوبت سطح خاک را در پلاریزه HH، نمودار ۹-۱ رابطه بین رطوبت وزنی و رطوبت پیش بینی شده با  $R^2 = 0.67$  و  $RMSE = 0.03$  و شکل ۹-۲ کاهش تأثیر آب موجود در پوشش گیاهی را نشان می دهد.

رابطه (۱۶)

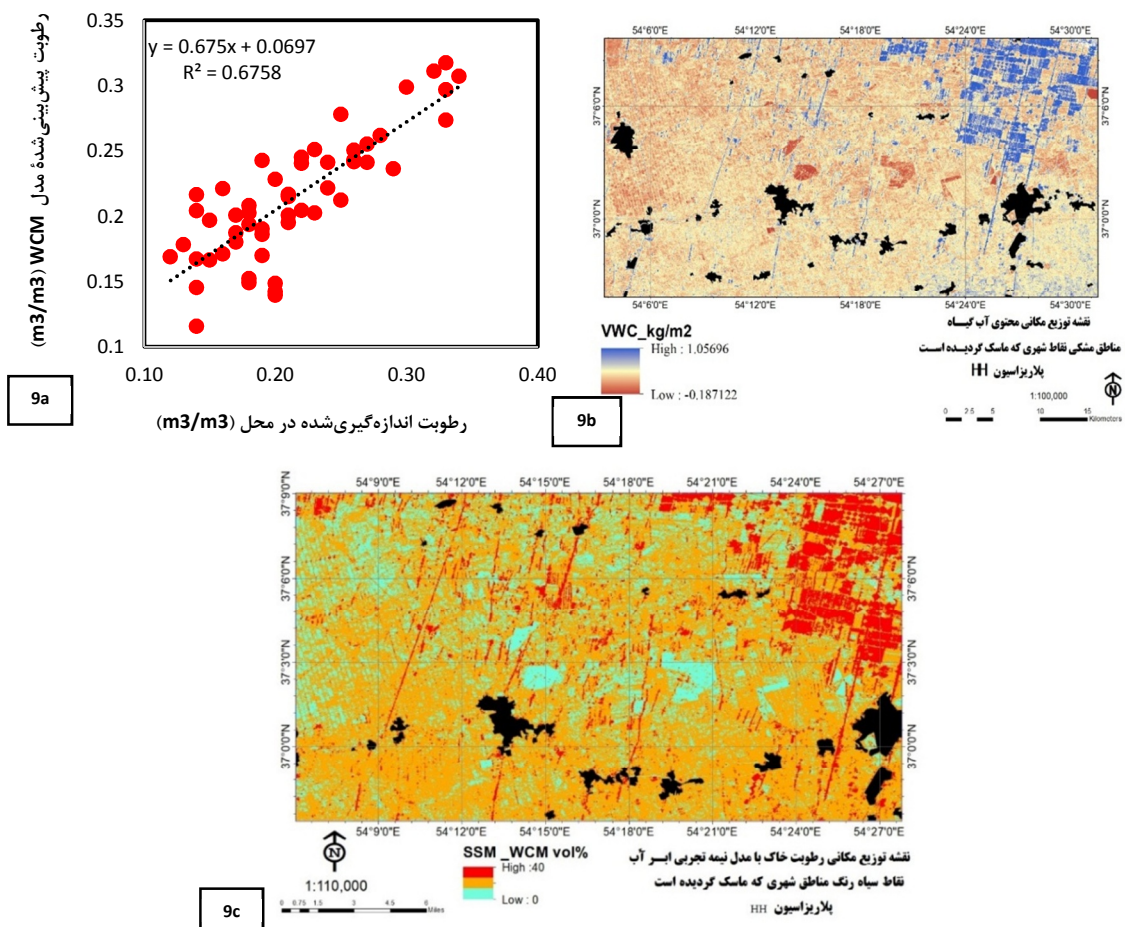
$$WVC_{L\text{Band}} = 0.000158 * LIA + 0.322507 * NDWI - 0.00098 * NDVI + 0.000468 * NDII - 0.000081$$

جدول ۴. نتایج آماری مدل های بر آورد رطوبت سطح خاک بر حسب  $(m^3/m^3)$

متغیر	Dubois		MLR		WCM	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
SSM	0.1	0.35	0.08	0.32	0.1	0.32
$(\theta^\circ)$	30.05	33.80	30.05	33.80	30.05	33.80
S (cm)	0.87	2.90	0.87	2.90	0.87	2.90
$R^2$	$R^2 = 0.82$		$R^2 = 0.71$		0.67	
RMSE	0.027		0.036		0.033	

۴-۲-۳- نتایج بر آورد رطوبت سطح خاک با استفاده از مدل ابرآب

علاوه بر اندازه گیری محتوای رطوبت گیاه در آزمایشگاه، شاخص های گیاهی NDVI-LIA و شاخص های نمناکی NDWI-NDII از داده های لندست ۸ سنسور OLI محاسبه شد. با محاسبه شاخص ها و معادله نویسی



شکل ۹. رابطه بین رطوبت وزنی با رطوبت سطح خاک پیش بینی شده (a)؛ توزیع مکانی محتوای آب گیاهی (b)؛ توزیع مکانی رطوبت خاک در مدل نیمه تجربی ابرآب پس از حذف اثر محتوای آب گیاهی (c)

سنجش از دور و GIS ایران

سال سیزدهم = شماره سوم = پاییز ۱۴۰۰

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پتانسیل داده‌های آلوس پالسا ۲ در باند L، به‌منظور برآورد رطوبت سطح خاک در اراضی با  $NDVI < 0.4$  و  $NDVI > 0.4$ ، در محدوده تحقیق بررسی و تحلیل شد. عملیات میدانی و جمع‌آوری نمونه‌های رطوبت خاک، زبری سطح و محتوای آب گیاهی در محل مطابق با زمان دریافت تصویر SAR انجام شد. تمرکز تحقیق بر دو موضوع اساسی شامل حساسیت سیگنال SAR به رطوبت خاک و برآورد رطوبت سطح خاک مبتنی بر مدل‌های ارائه‌شده است. حساسیت سیگنال رادار به رطوبت سطح خاک، طبق روش وزنی در مدل دوبویس در پلاریزه HH، در اراضی بایر تا اراضی دارای پوشش گیاهی تنک بررسی شد. نتایج نشان داد که پلاریزه HH در تخمین رطوبت خاک با  $R^2 = 0.82$  و  $RMSE = 0.027$  نتایجی بهتر از سایر پلاریزه‌ها دارد. نتایج مدل MLR در قطبش HH، برای مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی کمتر از ۰.۴،  $R^2 = 0.71$  و  $RMSE = 0.036$  به‌دست آمد. در اراضی بایر تا تنک، نتایج رطوبت سطح خاک با مدل دوبویس مورد قبول‌تر از MLR بود اما، در سطوح با پوشش گیاهی بیش از ۰.۴، نتایج مدل دوبویس و MLR ضعیف بود. رطوبت حاصل از مدل WCM در مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی بیشتر از ۰.۴ با  $R^2 = 0.67$  و  $RMSE = 0.033$  به‌دست آمد. نتایج مدل ابرآب نشان داد که مدل به‌خوبی توانسته اثر پوشش گیاهی را حذف کند. مهم‌ترین ضعف مدل ابرآب در نظرنگرفتن پارامتر زبری است. بر این اساس، در برآورد رطوبت سطح خاک، در اراضی بایر تا تنک، به‌ترتیب دقت مدل دوبویس و سپس مدل MLR بیشتر است. در اراضی پوشیده از پوشش گیاهی نیز، مدل WCM در برآورد رطوبت خاک پس از حذف اثر پوشش گیاهی مؤثرتر است. با توجه به نتایج، مدل دوبویس برای منطقه مطالعاتی و مناطق مشابه مناسب‌تر است. از نتایج این مدل می‌توان در پیش‌بینی مخاطرات طبیعی مانند سیل و غرقابی شدن اراضی و کاهش

خسارات ناشی از آن در محدوده مطالعاتی استفاده کرد.

## ۶- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خویش را از دکتر مهدی معتق، به‌دلیل تأمین بخشی از داده‌های تحقیق، ابراز می‌کنند.

## ۷- منابع

- Ahmad, A., Zhang, Y. & Nichols, S., 2011, **Review and Evaluation of Remote Sensing Methods for Soil-Moisture Estimation**, SPIE Rev. 2, 028001, Retrieved from <https://doi.org/10.1117/1.3534910>.
- Aliihsan, S., Aycan, M.M. & Saygin, A., 2020, **ALOS-2 and Sentinel-1 SAR Data Sensitivity Analysis to Surface Soil Moisture over Bare and Vegetated Agricultural Fields**, Comput. Electron. Agric., 171, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.copage.2020.105303>.
- Álvarez-Mozos, J., Casali, J., González-Audicana, M. & Verhoest, N.E.C., 2005, **Correlation between Ground Measured Soil Moisture and RADARSAT-1 Derived Backscattering Coefficient over an Agricultural Catchment of Navarre (North of Spain)**, Biosyst. Eng., 92, PP. 119-133, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.06.008>.
- Al-Yaari, A., Wigneron, J.P., Ducharne, A., Kerr, Y.H., Wagner, W., De Lannoy, G., ... & Mialon, A., 2014, **Global-Scale Comparison of Passive (SMOS) and Active (ASCAT) Satellite Based Microwave Soil Moisture Retrievals with Soil Moisture Simulations (MERRA-Land)**, Remote Sensing of Environment, 152, PP. 614-626, Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.013>.
- Anderson, K. & Croft, H., 2009, **Remote Sensing of Soil Surface Properties**, In: Progress in Physical Geography, 33(4), PP. 457-473, Retrieved from <https://doi.org/10.1177/0309133309346644>.

- Anguela, T.P., Zribi, M., Baghdadi, N. & Loumagne, C., 2010, **Analysis of Local Variation of Soil Surface Parameters with TerraSAR-X Radar Data over Bare Agricultural Fields**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 48, PP. 874-881, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2028019>.
- Attema, E.P.W. & Ulaby, F.T., 1978, **Vegetation Modeled as a Water Cloud**, Radio Sci., 13, PP. 357-364, Retrieved from <https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357>.
- Aubert, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Douaoui, A., Loumagne, C., Baup, F., El Hajj, M. & Garrigues, S., 2011, **Analysis of TerraSAR-X Data Sensitivity to Bare Soil Moisture, Roughness, Composition and Soil Crust**, Remote Sens. Environ., 115, PP. 1801-1810, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.021>.
- Autret, M., Bernard, R. & Vidal-Madjar, D., 1989, **Theoretical Study of the Sensitivity of the Microwave Backscattering Coefficient to the Soil Surface Parameters**, International Journal of Remote Sensing, 10(1), PP. 171-179, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431168908903854>.
- Baghdadi, N., King, C., Chanzy, A. & Wigneron, J.P., 2002, **An Empirical Calibration of the Integral Equation Model Based on SAR Data, Soil Moisture and Surface Roughness Measurement over Bare Soils**, Int. J. Remote Sens., 23, PP. 4325-4340, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431160110107671>.
- Baghdadi, N., Holah, N. & Zribi, M., 2006, **Soil Moisture Estimation Using Multi-Incidence and Multi-Polarization ASAR Data**, Int. J. Remote Sens., 27, PP. 1907-1920, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431160500239032>.
- Baghdadi, N., Cerdan, O., Zribi, M., Auzet, V., Darboux, F., El Hajj, M. & Kheir, R.B., 2008, **Operational Performance of Current Synthetic Aperture Radar Sensors in Mapping Soil Surface Characteristics in Agricultural Environments: Application to Hydrological and Erosion Modelling**, Hydrol. Process., 22, PP. 9-20, Retrieved from <https://doi.org/10.1002/hyp.6609>.
- Baghdadi, N., Camus, P., Beaugendre, N., Issa, O.M., Zribi, M., Desprats, J.F., Rajot, J.L., Abdallah, C. & Sannier, C., 2011, **Estimating Surface Soil Moisture from TerraSAR-X Data over Two Small Catchments in the Sahelian Part of Western Niger**, Remote Sens., 3, PP. 1266-1283, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs3061266>.
- Baghdadi, N., Aubert, M. & Zribi, M., 2012, **Use of TerraSAR-X Data to Retrieve Soil Moisture over Bare Soil Agricultural Fields**, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 9, PP. 512-516, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2173155>.
- Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M. & Bousbih, S., 2017, **Calibration of the Water Cloud Model at C-Band for Winter Crop Fields and Grasslands**, Remote Sens., 9, P. 969, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs9090969>.
- Baghdadi, N. & Zribi, M., 2006, **Evaluation of Radar Backscatter Models IEM, Oh and Dubois Using Experimental Observations**, In: International Journal of Remote Sensing, 27(18), PP. 3831-3852, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431160600658123>.
- Baghdadi, N. & Zribi, M., 2016, **Microwave Remote Sensing of Land Surfaces, Techniques and Methods**, ISTE Press: London, UK. Bindlish, R. & Barros, A.P., 2001, **Parameterization of Vegetation Backscatter in Radarbased, Soil Moisture Estimation**, Remote Sens. Environ., 76, PP. 130-137, Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00200-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00200-5).
- Bousbih, S., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Baghdadi, N., El Hajj, M., Gao, Q. & Mougnot, B., 2017, **Potential of Sentinel-1 Radar Data for the Assessment of Soil and Cereal Cover Parameters**, Sensors, 17, P. 2617, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s17112617>.
- Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., Gao, Q. & Fanise, P.,

- 2018, **Soil Moisture and Irrigation Mapping in a Semi-Arid Region, Based on the Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data**, *Remote Sens.*, 10, P. 1953, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs10121953>.
- Chai, X., Zhang, T., Shao, Y., Gong, H., Liu, L. & Xie, K., 2015, **Modeling and Mapping Soil Moisture of Plateau Pasture Using RADARSAT-2 Imagery**, *Remote Sens.*, 7, PP. 1279-1299, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs70201279>.
- Champion, I. & Guyot, G., 1991, **Generalized Formulation for Semi-Empirical Radar Models Representing Crop Backscattering**, *ESA Phys. Meas. Signal. Remote Sens.*, 1, PP. 269-272.
- Dabrowska-Zielinska, K., Inoue, Y., Kowalik, W. & Gruszczynska, M., 2007, **Inferring the Effect of Plant and Soil Variables on C- and L-Band SAR Backscatter over Agricultural Fields, Based on Model Analysis**, *Adv. Sp. Res.*, 39, PP. 139-148, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.032>.
- Das, K. & Paul, P.K., 2015, **Present Status of Soil Moisture Estimation by Microwave Remote Sensing**, *Cogent Geosci.*, 1, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1084669>.
- Dave, R., Kumar, G., Kr. Pandey, D., Khan, A. & Bhattacharya, B., 2019, **Evaluation of Modified Dubois Model for Estimating Surface Soil Moisture Using Dual Polarization RISAT-1 C-Band SAR Data**, *Geocarto Int.*, 1-11, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1655801>.
- Du, Y., Ulaby, F.T. & Dobson, M.C., 2000, **Sensitivity to Soil Moisture by Active and Passive Microwave Sensors**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. J.*, 38(1), Retrieved from <https://DOI: 10.1109/36.823905>.
- Du, W., Chen, N. & Yan, S., 2016, **Online soil moisture retrieval and sharing using geospatial web-enabled BDS-R service**, *Comput. Electron. Agric.*, 121, PP. 354-367, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.005>.
- Dubois, P.C., Zyl, J. & Engman, T., 1995, **Measuring Soil Moisture with Imaging Radars**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. J.*, 33(4), PP. 915-926.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Belaud, G., Cheviron, B., Courault, D. & Charron, F., 2016, **Soil Moisture Retrieval over Irrigated Grassland Using X-Band SAR Data**, *Remote Sens. Environ.*, 176, PP. 202-218, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.027>.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M. & Bazzi, H., 2017, **Synergic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Images for Operational Soil Moisture Mapping at High Spatial Resolution over Agricultural Areas**, *Remote Sens.*, 9, P. 1292, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs9121292>.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, J.P., Al-Yaari, A., Al Bitar, A., Albergel, C. & Calvet, J.C., 2018, **Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 Soil Moisture Products at Sites in Southwestern France**, *Remote Sens.*, 10, P. 569, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs10040569>.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Bazzi, H. & Zribi, M., 2019a, **Penetration Analysis of SAR Signals in the C and L Bands for Wheat, Maize, and Grasslands**, *Remote Sens.*, 11, P. 31, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs11010031>.
- El Hajj, M., Baghdadi, N. & Zribi, M., 2019b, **Comparative Analysis of the Accuracy of Surface Soil Moisture Estimation from the C- and L-Bands**, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 82, P. 101888, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.021>.
- Esetlili, M.T. & Kurucu, Y., 2016, **Determination of Main Soil Properties Using Synthetic Aperture radar**, *Fresenius Environ. Bull.*, 25, PP. 23-36.
- Fieuzal, R., Duchemin, B., Jarlan, L., Zribi, M., Baup, F., Merlin, O., Dedieu, G., Garatuza-Payan, J., Watt, C. & Chehbouni, A., 2011,



- Combined Use of Optical and Radar Satellite Data for the Monitoring of Irrigation and Soil Moisture of Wheat Crops**, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, PP. 1117-1129, Retrieved from <https://doi.org/10.5194/hess-15-1117-2011>, 2011.
- Francois, C., 2002, **The Potential of Directional Radiometric Temperatures for Monitoring Soil and Leaf Temperature and Soil Moisture Status**, *Remote Sens. Environ.*, 80, PP. 122-133, Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00293-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00293-0).
- Fung, A.K., Li, Z. & Chen, K.S., 1992, **Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30, PP. 356-369.
- Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M. & Baghdadi, N., 2017, **Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution**, *Sensors*, 17, P. 1966, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s17091966>.
- Gorab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., Mougenot, B. & Chabaane, Z., 2015, **Potential of X-Band TerraSAR-X and COSMO-SkyMed SAR Data for the Assessment of Physical Soil Parameters**, *Remote Sens.*, 7, PP. 747-766, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs70100747>.
- Hajnsek, I., Papathanassiou, K.P., Cloude, S.R., 2001. **Land Pband for surface parameter estimation. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '01)**, Sydney, NSW, Australia, pp. 2775-2777.
- Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A. & King, C., 2005, **Potential of ASAR/ENVISAT for the Characterization of Soil Surface Parameters over Bare Agricultural Fields**, *Remote Sens. Environ.*, 96, PP. 78-86, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.008>.
- Huang, S. & Tsang, L., 2012, **Electromagnetic Scattering of Randomly Rough Soil Surfaces Based on Numerical Solutions of Maxwell Equations in Three-Dimensional Simulations Using a Hybrid UV/PBTG/SMCG Method**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50, PP. 4025-4035, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2189776>.
- Huang, S., Ding, J., Zou, J., Liu, B., Zhang, J. & Chen, W., 2019, **Soil Moisture Retrieval Based on Sentinel-1 Imagery under Sparse Vegetation Coverage**, *Sensors*, 19, P. 589, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s19030589>.
- Inoue, Y., Kurosu, T., Maeno, H., Uratsuka, S., Kozu, T., Dabrowska-Zielinska, K. & Qi, J., 2002, **Season-Long Daily Measurements of Multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and Full-Polarization Backscatter Signatures over Paddy Rice Field and Their Relationship with Biological Variables**, *Remote Sens. Environ.*, 81, PP. 194-204, Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00343-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00343-1).
- Jacome, A., Bernier, M., Chokmani, K., Gauthier, Y., Poulin, J. & De Sève, D., 2013, **Monitoring Volumetric Surface Soil Moisture Content at the La Grande Basin Boreal Wetland by Radar Multi Polarization Data**, *Remote Sens.* 5, PP. 4919-4941, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs5104919>.
- Karam, M.A., Fung, A.K. & Chauhan, N.S., 1992, **A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30, PP. 767-784.
- Kseneman, M., Gleich, D. & Potočník, B., 2012, **Soil-Moisture Estimation from TerraSAR-X Data Using Neural Networks**, *Mach. Vis. Appl.*, 23, PP. 937-952, Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00138-011-0375-3>.
- Kumar, K., Suryanarayana Rao, H.P. & Arora, M.K., 2015, **Study of Water Cloud Model Vegetation Descriptors in Estimating Soil Moisture in Solani Catchment**, *Hydrol. Process.*, 29, PP. 2137-2148, Retrieved from <https://doi.org/10.1002/hyp.10344>.
- Kurucu, Y., Sanli, F.B., Esetlili, M.T., Bolca, M. & Goksel, C., 2009, **Contribution of SAR Images to Determination of Surface Moisture on the Menemen Plain, Turkey**,

- Int. J. Remote Sens., 30, PP. 1805-1817, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431160802639764>.
- Lakhankar, T., Ghedira, H., Termini, M., Azar, A.E. & Khanbilvardi, R., 2009, **Effect of Land Cover Heterogeneity on Soil Moisture Retrieval Using Active Microwave Remote Sensing Data**, J. Remote Sens., 1, PP. 80-91, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs1020080>.
- Li, J. & Wang, S., 2018, **Using SAR-Derived Vegetation Descriptors in a Water Cloud Model to Improve Soil Moisture Retrieval**, Remote Sens., 10, P. 1370, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs10091370>.
- Lievens, H. & Verhoest, N.E.C., 2012, **Spatial and Temporal Soil Moisture Estimation from RADARSAT-2 Imagery over Flevoland**, The Netherlands. J. Hydrol., 456-457, PP. 44-56, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.013>.
- Ma, J., Huang, S., Li, J., Li, X., Song, X., Leng, P., Sun, Y. & Lei, T., 2016, **Estimating Soil Moisture in the Agricultural Areas Using RADARSAT-2 Quad-Olarization SAR Data**, in: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, PP. 3031-3034, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729784>.
- Maity, S., Patnaik, C., Chakraborty, M. and Panigrahy, S., 2004, **Analysis of temporal backscattering of cotton crops using a semiempirical model**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(3), pp. 577-587.
- Moran, S., Hymer, D., Qi, J. & Sano, E., 2000, **Soil Moisture Evaluation Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) in Semiarid Rangeland**, Agric. Meteorol., 105, PP. 69-80.
- Oh, Y., Sarabandi, K. & Ulaby, F.T., 1992, **An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 30, PP. 370-382.
- Oh, Y., Jang, Y.-M. & Sarabandi, K., 2002, **Full-Wave Analysis of Microwave Scattering from Short Vegetation: An Investigation on the Effect of Multiple Scattering**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40, PP. 2522-2526, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.805085>.
- 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 Sens. Environ., 134, PP. 234-248.
- Prévo, L., Champion, I. & Guyot, G., 1993, **Estimating Surface Soil Moisture and Leaf Area Index of a Wheat Canopy Using a Dual-Frequency (C and X Bands) Scatterometer**, Int. J. Remote Sens., 46, PP. 331-339, Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90053-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90053-Z).
- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M. & Jones, S.B., 2017, **The Optical Trapezoid Model: Anovel Approach to Remote Sensing of Soil Moisture Applied to Sentinel-2 and Landsat-8 Observations**, Remote Sens. Environ., 198, PP. 52-68, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>.
- Sadeh, Y., Cohen, H., Maman, S. & Blumberg, D., 2018, **Evaluation of Manning's n Roughness Coefficient in Arid Environments by Using SAR Backscatter**, Remote Sens., 10, P. 1505, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs10101505>.
- Şekertekin, A., Marangoz, A.M., Abdikan, S. & Esetlili, M.T., 2016, **Preliminary Results of Estimating Soil Moisture over Bare Soil Using Full-Polarimetric ALOS-2 Data**, ISPRS -Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., XLII-2/W1, PP. 173-176, Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W1-173-2016>.
- Şekertekin, A., Marangoz, A.M. & Abdikan, S., 2018, **Soil Moisture Mapping Using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar Data**, Int. J. Environ. Geoinformatics, 5, PP. 178-188, Retrieved from <https://doi.org/10.30897/ijgeo.425606>.

- Sikdar, M. & Cumming, I., 2004, **A Modified Empirical Model for Soil Moisture Estimation in Vegetated Areas Using SARdata**, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International, 2, PP. 803-806, Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1368526>.
- Sonobe, R., Tani, H., Wang, X. & Fukuda, M., 2008, **Estimation of Soil Moisture for Bare Soil Fields Using ALOS/PALSAR HH Polarization Data**, Agric. Inf. Res., 17, PP. 171-177, Retrieved from <https://doi.org/10.3173/air.17.171>.
- Srivastava, H.S., Patel, P., Sharma, Y. & Navalgund, R.R., 2009, **Large-Area Soil Moisture Estimation Using Multi-Incidence-Angle RADARSAT-1 SAR Data**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 47, PP. 2528-2535, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2018448>.
- Srivastava, P.K., O'Neill, P., Cosh, M., Kurum, M., Lang, R. & Joseph, A., 2015, **Evaluation of Dielectric Mixing Models for Passive Microwave Soil Moisture Retrieval Using Data from ComRAD Ground-Based SMAP Simulator**, IEEE J Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., 8, PP. 4345-4354, Retrieved from <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2372031>.
- Tian, J. & Philpot, W.D., 2015, **Relationship between Surface Soil Water Content, Evaporation Rate, and Water Absorption Band Depths in SWIR Reflectance Spectra**, Remote Sens. Environ., 169, PP. 280-289, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.007>.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P., 1980, **Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines**, Water Resour. Res., 16, PP. 574-582, Retrieved from <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.
- Ulaby, F.T., Batlivala, P.P. & Dobson, M.C., 1978, **Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part I-Bare Soil**, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 16(4), PP. 286-295.
- Ulaby, F. T., M. C. Dobson, and G. A. Bradley. (1981a). **Radar reflectivity of bare and vegetation covered soil**, *Advances in Space Research*, vol. 1, no. 10, pp. 91-104
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. & Fung, A.K., 1986, **Microwave Remote Sensing: Active and Passive** (Vol. 3), Reading, MA: Addison-Wesley.
- Wang, L. & Qu, J., 2009, **Satellite Remote Sensing Applications for Surface Soil Moisture Monitoring: A Review**, In: *Frontiers of Earth Science in China*, 3.2, PP. 237-247, Retrieved from <http://DOI:10.1007/s11707-009-0023-7>.
- Wu, T.D., Chen, K.S., Shi, J. & Fung, A.K., 2001, **A Transition Model for the Reflection Coefficient in Surface Scattering**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39, PP. 2040-2050.
- Zeng, W., Xu, C., Huang, J., Wu, J. & Tuller, M., 2016, **Predicting Near-Surface Moisture Content of Saline Soils from Near-Infrared Reflectance Spectra with a Modified Gaussian Model**, Soil Sci. Soc. Am. J., 80, P. 1496, Retrieved from <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.06.0188>.
- Zhao, W. & Li, Z.L., 2013, **Sensitivity Study of Soil Moisture on the Temporal Evolution of Surface Temperature over Bare Surfaces**, International Journal of Remote Sensing, 34, PP. 3314-3331, Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716532>.
- Zribi, M. & Baghdadi, N., 2015, **Chapter: Analysis of Soil Properties Using High Resolution Radar Remote Sensing, Soils and Sediments as Archives of Environmental Change**, In *Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics*, Lucke, B., äumler, R., Schmidt, M. (Eds.), Fränkische Geographische Gesellschaft: Erlangen, Germany.
- Zribi, M. & Dechambre, M., 2002, **A New Empirical Model to Retrieve Soil Moisture and Roughness from C-Band Radar Data**,

- Remote Sensing of Environment, 84, PP. 42-52, Retrieved from [https://doi:10.1016/S0034-4257\(02\)00069-X](https://doi:10.1016/S0034-4257(02)00069-X).
- Zribi, M., Dechambre, M., 2003, **A New Empirical Model to Retrieve Soil Moisture and Roughness from C-Band Radardata**, Remote Sens. Environ., 84, PP. 42-52, Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00069-X).
- Zribi, M. & Dechambre, M., 2013. **Influence of Radar Frequency on the Relationship Between Bare Surface Soil Moisture Vertical Profile and Radar Backscatter**. HAL Id: hal-00907867, version 1. doi: 10.1109/LGRS.2013.2279893.
- Zribi, M., Baghdadi, N., Holah, N. & Fafin, O., 2005, **New Methodology for Soil Surface Moisture Estimation and Its Application to ENVISAT-ASAR Multi-Incidence Data Inversion**, Remote Sens. Environ., 96, PP. 485-496, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.005>.
- Zribi, M., Saux-Picart, S., André, C., Descroix, L., Otlé, C. & Kallel, A., 2007, **Soil Moisture Mapping Based on ASAR/ENVISAT Radar Data Over a Sahelian Region**, Int. J. Remote Sens., 28, PP. 3547-3565, Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431160601009680>.
- Zribi, M., Gorraab, A. & Baghdadi, N., 2014, **A New Soil Roughness Parameter for the Modelling of Radar Backscattering over Bare Soil**, Remote Sens. Environ., 152, PP. 62-73, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.009>.
- Zribi, M., Muddu, S., Bousbih, S., Al Bitar, A., Tomer, S.K., Baghdadi, N. & Bandyopadhyay, S., 2019, **Analysis of L-Band SAR Data for Soil Moisture Estimations over Agricultural Areas in the Tropics**, Remote Sens., 11, P. 1122, Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs11091122>.



نشر از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۰  
Vol.13, No. 3, Autumn 2021

93-112

## Estimation of Soil Surface Moisture Using ALOSPALSAR-2 Data

Sangini S.<sup>1</sup>, Fadaei H.<sup>2</sup>, Sadoddin A.<sup>3\*</sup>, Bardi Shaix V.<sup>4</sup>, Komaki C.B.<sup>5</sup>

1. Ph.D. Student, Watershed Management, Dep. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan
2. Assistant Prof., Dep. of Geography, Faculty of Geography, University of Amin Police, Tehran
3. Associate Prof., Dep. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan
4. Associate Prof., Dep. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan
5. Assistant Prof., Dep. of Desert Management, Faculty of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan

### Abstract

Temporal and spatial distribution of soil moisture is a key variable for hydrological planning. In the research area, increasing soil moisture accelerates the formation of runoff. The purpose of this study is to investigate the L-band potential of the Pulsar 2 sensor from the ALOS satellite in estimating soil surface moisture in order to manage water resources and reduce flood hazards. Samples were taken using random sampling. Simultaneously with obtaining SAR data, weight moisture, surface roughness and plant water content, average radar backscattering coefficients and indices angle were measured on the image. The pre-processing, processing and post-processing stages of SAR data were calculated using SNAP software and extraction of plant and moisture indices in ArcGIS 5.10 environment. Surface roughness was obtained using two angled cameras with 20 images with 10 control points (GCP) for each cluster, then using Agisoft Photo Scan software, dense cloud meshes and meshing were performed to produce DTM. Longitudinal profiles of surface roughness for each cluster were extracted from the Analysts 3D tab in ArcGIS. In order to select the appropriate model in the region, three models were considered in estimating soil surface moisture including Dubois-MLR-WCM models. The results of three models in estimating soil surface moisture in HH polarization in Dubois model with  $R^2 = 0.82$  and  $RMSE = 0.027$ , MLR model with  $R^2 = 0.71$  and  $RMSE = 0.03$  and WCM model with  $R^2 = 0.67$  and  $RMSE = 0.033$  was estimated. The results showed that Dubois model is more suitable for research areas and similar conditions in lands with sparse to medium cover.

**Keywords:** Soil surface moisture, ALOS PALSAR 2, Dubois model, Multivariate linear regression model, Water cloud model.

\* Correspondence Address: Golestan Province, Gorgan, Basij Square, Faculty of Natural Resources University, Department of Desert and Watershed Management, Postal Code 4918943464, Tel: 32427040  
Email: Amir.sadoddin@gmail.com