نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱

Vol.10, No.4, Winter 2023

۱۰۹ -۱۲۳

مقاله پژوهشی

DOR: *20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]

[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

برآورد میزان رطوبت خاک با استفاده از مدل *WCM* و تصاویر ماهواره ای سنتینل جهت برنامه‌ریزی آبیاری اراضی نیشکر

ریحانه لقایت[۱]، سعید حمزه[۲*]، نجمه نیسانی سامانی[۲] ، جمال محمدی معله‌زاده[۳]، عبدعلی ناصری[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳- رئیس بخش سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر

۴- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱

چکیده

تخمین میزان رطوبت خاک جهت انجام مطالعات منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است و بدین منظور استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بسیار راهگشا می‌باشد. تحقیق حاضر به منظور ارزیابی مدل *WCM* مبتنی بر استفاده از داده‌های رادار و نوری سنتنیل ۱ و ۲ جهت برآورد میزان رطوبت خاک و برنامه‌ریزی آبیاری در اراضی کشت نیشکر واقع در جنوب غربی ایران انجام شد. بدین منظور میزان رطوبت خاک از تاریخ ۱۸ می تا ۲۷ سپتامبر ۲۰۲۰ همزمان با ۷ گذر ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ در ۳۳۷ نقطه کنترل زمینی واقع شده در ۱۸ مزرعه تحت کشت نیشکر با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج *TDR*۳۵۰ برداشت گردید. پس از انجام پردازش‌های لازم، میزان رطوبت خاک با استفاده از مدل *WCM* با بهره‌گیری از قطبش‌های مختلف تصاویر رادار و همچنین شاخص‌های مختلف گیاهی برآورد گردید و ارزیابی نتایج با استفاده از مشاهدات میدانی صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد مدل *WCM* با استفاده از شاخص سطح برگ (*LAI*) و قطبش *VV* در برآورد رطوبت خاک از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین دقت نتایج برای حالتی که مدل مورد نظر برای هر تصویر جداگانه محاسبه شود به نسبت زمانی که یک مدل عمومی برای کل دوره رشد نیشکر توسعه داده شود بیشتر می‌باشد. میزان خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*) این مدل برای تک تصویر و با استفاده از شاخص *LAI* در بازه *[۱-۱۳]* درصد بوده و ضریب همبستگی آن *[۰٫۹۸-۰٫۳۴]* می‌باشد، در صورتی که یک مدل برای کل دوره توسعه داده شود، میزان *RMSE* بین *[۲۲-۱۷]*درصد و ضریب همبستگی آن *[۰٫۲-۰٫۱]* می باشد.

کلید واژه‌ها : سنجش‌ازدور، تصاویر رادار و نوری، مدل *WCM*، رطوبت خاک، آبیاری.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران – خیابان انقلاب - خیابان وصال شیرازی – نبش کوچه آذین – دانشکده جغرافیا – گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۳۵۴۰

Email: saeid.hamzeh@ut.ac.ir

۱- مقدمه

تنش آبی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. لذا مطالعه و توسعه راه‌کارهای مدیریتی مناسب برای جلوگیری از ایجاد تنش آبی و از طرفی دیگر افزایش کارایی مصرف آب و پیش‌بینی و برنامه‌ریزی زمان آبیاری مزارع از اهمیت زیادی برخوردار است[۱]. اما با توجه به وسعت زیاد اراضی تحت کشت و متغیر بودن خصوصیات این اراضی، تعیین زمان آبیاری با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر مشاهدات میدانی بسیار پرهزینه و زمان بر می‌باشد. تکنیک‌های سنجش از دور برای برآورد رطوبت خاک شامل روش‌های نوری، مادون قرمز حرارتی و ماکروویو فعال و غیر فعال هستند که هر کدام نقاط ضعف و قوت خود را دارند[۳,۲]. در روش‌های نوری ارتباط بازتاب از سطح خاک با مقدار رطوبت خاک بررسی می‌شود که در این میان تأثیر سایر عوامل بر بازتاب خاک باعث ایجاد خطا در مقادیر رطوبت برآورد شده می‌گردد. در داده‌های حرارتی ارتباط بین میزان تغییرات دمای سطح و رطوبت خاک استفاده می‌شود [۴] و در داده‌های رادار از خاصیت کاهش بازپراکنش امواج رادار در قطبش های مختلف در اثر افزایش رطوبت خاک بهره گرفته می‌شود.

رطوبت سطحی خاک نقش تعیین کننده‌ای در فرایندهای مختلف سطح زمین بازی می کند و بازخورد بین زمین و سامانه آب و هوایی منطقه می باشد. این پارامتر یکی از اجزای مهم مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی است و در توزیع آب و شارهای مختلف انرژی بین سطح زمین و اتمسفر، اهمیت بسیاری دارد [۶,۵].

تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر راداری از دهه ۱۹۹۰ آغاز شده است. مدل *WCM* ابتدا توسط آتما و اولابی ساخته شد که تاج پوشش گیاهی را به عنوان ابر حاوی قطرات آب در نظر می‌گیرد. در سطح خاک لخت، سیگنال راداری برگشتی، تحت تاثیر ثابت‌دی‌الکتریک و زبری‌سطح (چند سانتی‌متر اول از سطح زمین) می‌باشد[۷]. ثابت‌دی‌الکتریک به رطوبت‌خاک، بافت آن، فرکانس و سنجنده راداری بستگی دارد[۸]. مطالعات متعددی میزان بازپخش سیگنال راداری را به عنوان تابعی از رطوبت‌خاک بیان‌کرده‌اند[۹]. ضریب بازپخش دارای حساسیت بالایی در برابر رطوبت‌خاک، در زاویه‌های پایین است[۱۰].

مدل های مختلفی برای استفاده از تصاویر راداری برای بهبود درک علمی از رابطه بین ضریب بازپخش و پارامترهای مورد استفاده برای توصیف خاک ساخته شده‌است. این مدل‌ها به سه دسته کلی مدل‌های فیزیکی، تجربی و نیمه‌تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های نیمه‌تجربی که توسط اوه [۱۱]، دابوس [۹]و بغدادی[۱۰] ارائه شده‌اند، از روابط تحلیلی ساده بین سیگنال بازپخش راداری و پارامترهای فیزیکی خاک برخوردار هستند. زمانی که سطح با پوشش‌گیاهی پوشانده شده باشد، سیگنال بازپخش راداری نه تنها به خاک، بلکه به ویژگی های پوشش گیاهی نیز بستگی دارد. *WCM*[۱۲] ،یک مدل نیمه تجربی است. در این مدل تمام سیگنال بازپخش راداری به عنوان مجموع بازپخش های حاصل از پوشش گیاهی، همراه با یک بازپخش دوم مربوط به خاک، که توسط اثر پوشش‌گیاهی تضعیف شده است، در نظر گرفته می شود. این اثر پوشش گیاهی، با استفاده از متغیرهای فیزیکی مرتبط با محصول، مانند زیست توده، محتوای آب رویشی، ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ (*LAI*) [۱۳] و با استفاده از مشاهدات نوری، مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال شده(*NDVI*) برآورد می‌شود[۱۴].

وانگ و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی دریافتند که تصاویر سنتینل۲ نسبت به ویژگی های پوشش گیاهی حساس‌تر بوده و توانایی قوی‌تری برای تشخیص سیگنال پوشش گیاهی دارند. به طور کلی برای محاسبه *NDVI* تصاویر سنتینل۲ عملکرد بهتری ارائه دادند، از طرفی برای محاسبه شاخص آب تفاضلی نرمال شده((*NDVI* از تصاویر لندست۸ نتایج بهتری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

حاصل می شد. بر این اساس این پژوهش مرجعی برای انتخاب شاخص گیاهی مورد نظر ارائه می‌دهد.[۱۵]

یانگ و همکاران (۲۰۲۱) مدل *WCM* را برای منطقه فلات تبت با استفاده از تصاویر راداری سنتینل۱ و تصاویر مادیس مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از مدل اوه جهت برآیند میزان بازپخش خاک لخت و استفاده از شاخص *NDVI* به نتایج قابل اطمینانی جهت برآورد رطوبت خاک در منطقه فلات تبت دست پیدا کردند.[۱۶]

سکرتکین و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی ارائه دادند که مدل *WCM* را با استفاده از تصاویر سنتینل۱ و آلوس۲ در مزارع کشاورزی برهنه و دارای پوشش گیاهی در فصل خشک (بدون آبیاری) مورد ارزیابی قرار داده اند. این پژوهش نشان داد که حساسیت سنتینل۱ برای مدل *WCM* بیشتر بوده و نتایج مطلوب تری ارائه می‌دهد [۱۷].

به همه عملیاتی که طی آن مشخص شود چه موقع و چه مقدار آب به زمین داده شود برنامه ریزی آبیاری گویند. با برنامه‌ریزی آبیاری می‌توان استراتژی‌های آبیاری را نیز طراحی کرد. منظور از استراتژی آن است که آیا آبیاری به صورت کامل صورت پذیرد که به آن آبیاری کامل گفته می‌شود و یا اینکه کم‌آبیاری انجام شود. روش های مختلفی وجود دارد که بر اساس آنها زارع می‌تواند زمان آبیاری را مشخص کند[۱۸].

علارغم توانایی خوب مدل *WCM* هنوز کارآیی آن برای محصولات محدودی مورد ارزیابی قرار گرفته است و در این خصوص مطالعات بیشتری جهت بررسی عمومیت این مدل لازم است. از طرفی این مدل قابلیت اجرا با استفاد از شاخص های مختلف گیاهی و همچنین قطبش های مختلف داده های رادار را دارد و در این زمینه نیز پیدا کردن بهترین شاخص و قطبش برای هر محصول خاص از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بر اساس مطالعات پیشین تا کنون توانایی این مدل جهت برآورد رطوبت خاک در اراضی تحت کشت نیشکر ارزیابی نشده است. لذا پژوهش حاضر به منظور بررسی توانایی این مدل تحت سناریو های مختلف اجرا از قبیل داده های ورودی مختلف و همچنین بررسی توانایی آن در طی فصل رشد نیشکر صورت پذیرفت. بدین منظور با استفاده از تصاویر راداری سنتینل۱ و تصاویر نوری سنتینل۲ و اجرای مدل *WCM*، ابتدا رطوبت خاک منطقه موردمطالعه به‌دست‌می‌آید و با استفاده از نمونه برداری های زمینی، صحت کار انجام شده مورد ارزیابی قرار می گیرد. سپس با مقایسه نتایج، دقت در هر دوره رشد گیاه مشخص می شود. در نهایت با استفاده از نتایج، روشی مناسب جهت آبیاری اراضی نیشکر پیشنهاد می‌شود.

۲- مواد و روش ها

در این بخش ابتدا به معرفی منطقه موردمطالعه پرداخته شده‌است. سپس توضیحاتی درباره داده‌های مورداستفاده و روش انجام پژوهش داده شده‌است. در نهایت روش‌های صحت‌سنجی بیان‌شده است.

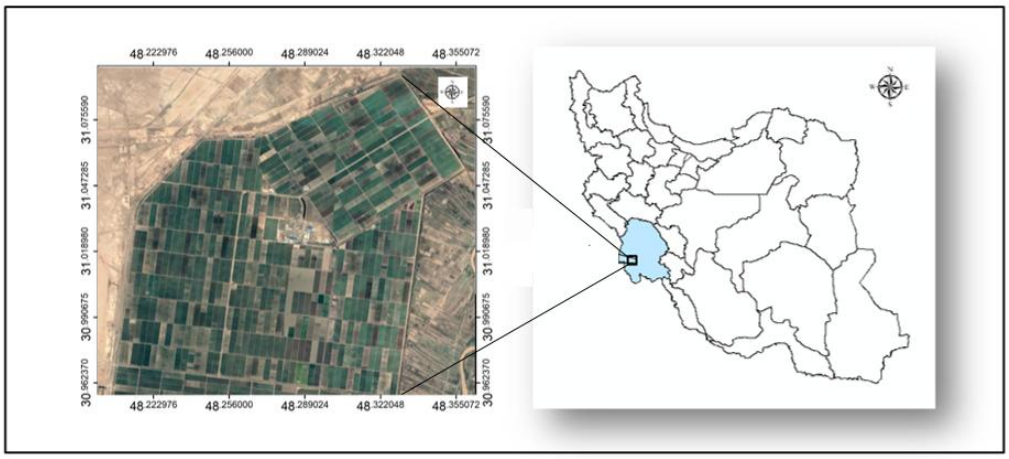
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در شکل(۱) موقعیت جغرافیایی شرکت کشت و صنعت امیرکبیر نشان داده شده است. این شرکت یکی از هفت واحد کشت نیشکر متعلق به شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی جنوب غرب ایران، استان خوزستان است. شرکت مورد بررسی در موقعیت جغرافیایی۴۸/۱۲ درجه تا ۴۸/۲۱ طول شرقی و ۴۵/۳۰ درجه تا ۳۰/۵۶ درجه عرض شمالی قرار گرفته است. اراضی این واحد شامل ۴۸۰ قطعه منظم ۲۵هکتاری می‌باشد. نیشکر گیاهی است که برای ادامه زندگی و رشد و نمو کامل خود و همچنین تولید و ذخیره قند کافی در ساقه به آب کافی نیاز دارد، علاوه بر آن به‌وسیله آبیاری باید رطوبت تبخیر شده را جبران نمود. هرگاه مقدار آب مصرفی در واحد سطح بیش از جذب باشد و این وضع مدتی ادامه یابد، سبب کوتاه شدن فاصله گره‌ها و نازک شدن قطر نی‌ها شده و ریشه نیشکر به اعماق نفوذ نمی‌کند [۱۹].

آب آبیاری از طریق ایستگاه پمپاژ اصلی که در حاشیه رودخانه کارون می‌باشد تامین می‌شود. آبیاری مزارع در

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

عملیات داشت در فواصل آبیاری ۷ تا ۱۵ روز است، که این فواصل آبیاری بستگی به مرحله رشد، ارتفاع گیاه، دمای هوا و رطوبت نسبی دارد. بیشترین میزان مصرف آب نیشکر در شرایط اقلیمی خوزستان در فصل تابستان بوده که متوسط تبخیر روزانه در حدود ۱۵ تا ۲۰ میلی‌متر است [۱۹].



شکل ۱: موقعیت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر

۲-۲- داده های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده به دو بخش داده‌های زمینی و ماهواره‌ای تقسیم می‌شوند که در ادامه هریک تشریح شده است.

۲-۲-۱- داده های زمینی

جهت انجام این پژوهش در ۱۸ مزرعه تحت کشت نیشکر با مجموع مساحت ۴۳۰ هکتار داده برداری میدانی انجام گردید. نمونه‌برداری رطوبت خاک در عمق متوسط ۵ تا ۷ سانتی‌متر همزمان با گذر ماهواره سنتینل ۱ با استفاده از دستگاه *TDR*۳۵۰ در سه ایستگاه در سطح هر یک از مزارع انتخابی از ۲۰ مارس تا ۲۱ اکتبر ۲۰۲۰ انجام شد. در شکل (۲) موقعیت نقاط اندازه گیری شده نشان داده شده است. در مجموع تعداد ۳۳۷ نمونه اندازه‌گیری رطوبت خاک برداشت شد که از ۸۰ درصد این نمونه‌ها به منظور مدل‌سازی رطوبت خاک و از ۲۰ درصد باقی مانده برای صحت سنجی نتایج مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردید.



شکل ۲: موقعیت مکانی مزارع آزمایشی و محل اندازه گیری زمینی میزان رطوبت خاک

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

جهت انجام تحقیق حاضر، از تصاویر ماهواره‌ای سنتیل ۱ و ۲ طول فصل رشد گیاه نیشکر استفاده شد. در این راستا، از ۷ تصویر سنتینل ۱ با قطبش *VV* و *VH* و همچنین ۷ تصویر سنتیل ۲ استفاده شد. تصاویر از طریق سامانه ارث انجین و در بالاترین سطح پردازش موجود دریافت شدند. اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری‌های میدانی و زمان اخذ تصاویر مورد استفاده در جدول(۱) ارائه شده است.

جدول ۱: اطلاعات زمان تصویربرداری و نمونه‌برداری زمینی در ماهواره سنتینل-۱ و سنتینل-۲

تاریخ تصاویر ماهواره سنتینل۲	تاریخ تصاویر ماهواره سنتینل۱	تاریخ نمونه برداری زمینی
۲۰۲۰/۰۵/۱۸	۲۰۲۰/۰۵/۱۸	۲۰۲۰/۰۵/۱۸
۲۰۲۰/۰۵/۳۰	۲۰۲۰/۰۵/۳۰	۲۰۲۰/۰۵/۳۰
۲۰۲۰/۰۷/۱۳	۲۰۲۰/۰۷/۱۳	۲۰۲۰/۰۷/۱۳
۲۰۲۰/۰۷/۲۹	۲۰۲۰/۰۷/۲۹	۲۰۲۰/۰۷/۲۹
۲۰۲۰/۰۸/۱۸	۲۰۲۰/۰۸/۱۸	۲۰۲۰/۰۸/۱۸
۲۰۲۰/۰۹/۱۷	۲۰۲۰/۰۹/۱۵	۲۰۲۰/۰۹/۱۵
۲۰۲۰/۰۹/۲۷	۲۰۲۰/۰۹/۲۷	۲۰۲۰/۰۹/۲۷

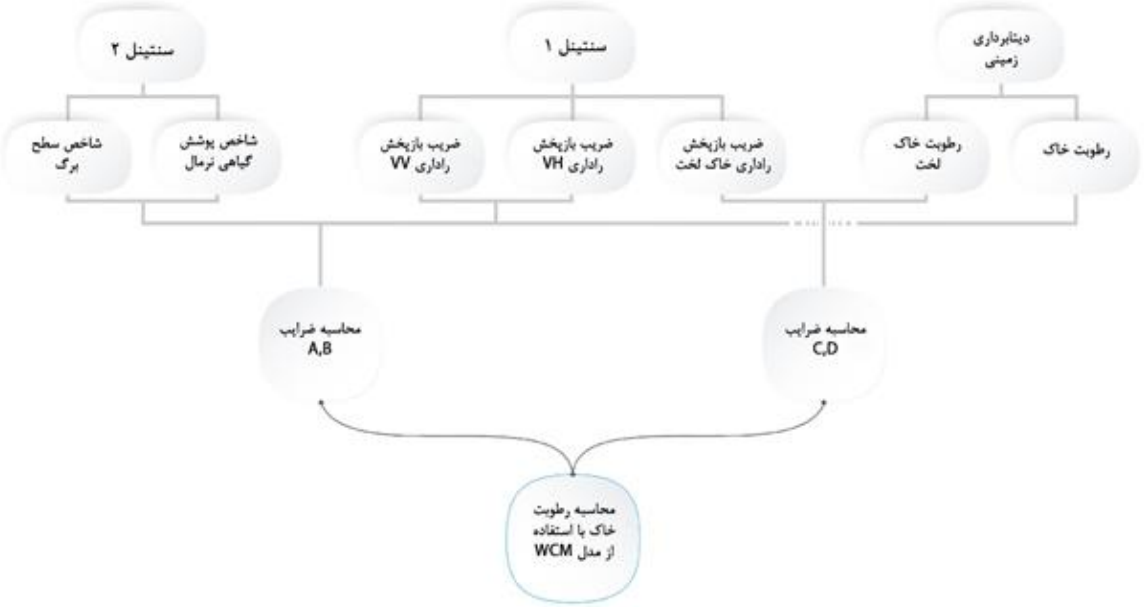
ماهواره سنتینل ۱ در محدوده باند *C* و در محدوده فرکانس ۵/۴۰۵ گیگاهرتز فعالیت می‌کند. این ماهواره ماموریت خود را از تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ آغاز کرده است. دوره گذر ماهواره از یک مکان ۶ روزه است و دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌باشد. تصاویر رادار قابلیت تصویربرداری در شرایط آب و هوایی مختلف از جمله ابر و در طول تمام ساعات شبانه روز را دارا هستند. به عبارت دیگر، تصاویر رادار در هر شرایط آب و هوایی و در تمام زمان ها قابلیت ثبت و ضبط تصاویر را دارند. این ماهواره در چهار حالت مختلف، با وضوح قابل قبول تا حد ۵ متری و پوششی در عرض ۴۰۰ کیلومتر تصویربرداری می‌کنند. در این پژوهش از حالات *VV* و *VH* استفاده شده است. مدارقطبی بودن آن و قابلیت قطبش دوگانه این ماهواره، باعث تحویل سریع داده‌ها از ماهواره به ایستگاه‌های زمینی شده است. این ماهواره از یک رادار با روزنه مجازی برخورداراست که تصاویری با قدرت تفکیک بالا را ارائه می‌دهد.

ماهواره سنتینل ۲ در سال ۲۰۱۵ و سنتینل ۲بی در سال ۲۰۱۷ راه‌اندازی شد. این ماهواره از نوع مدار قطبی است و از ۱۳ باند طیفی در محدوده های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول‌موج کوتاه برخوردار است. سنتینل۲ در موقعیت مکانی مطالعه شده با تفکیک زمانی ۵ روز و قدرت تفکیک مکانی از ۱۰ تا ۶۰ متر با سیستم تصویر ۳۹ شمالی و برمبنای *WGS-84* می‌باشند [۲۰]

۲-۳- روش تحقیق

مراحل انجام پژوهش در فلوچارت شکل(۳) به طور کلی نشان داده شده‌اند و در ادامه، جزئیات هر مرحله توضیح داده می‌شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]



شکل۳: نمودار فرآیند مدل *WCM*

معادلـه عمـومی *WCM* بـه صـورت روابـط (۱) تـا (۳) تعریف می‌شود[۲۲,۲۱]:

رابطه(۱) $$\sigma^0_{pp} = \sigma^0_{veg} + \tau^2 \sigma^0_{soil}$$

رابطه(۲) $$\sigma^0_{veg} = AV_1 cos\theta_i \left(1 - \tau^2\right)$$

رابطه(۳) $$\tau^2 = e^{-2BV_2 sec\theta_i}$$

در رابطه (۱) تا (۳)، σ^0_{pp}: ضریب بازپخش یـک پلاریـزه خاص، σ^0_{veg}: ضـریب بـازپخش حجـم پوشـش‌گیـاهی، σ^0_{soil}: ضریب بازپخش خاک لخت، τ^2: انتقال دو طرفـه پوشش‌گیـاهی، Aو B: ضـرایب مـدل، V_2وV_1: توصـیف کننده گیاهی مانند *NDVI* یا *LAI* می‌باشد.

طبق یافته‌های محققان [۱۶] مدل *WCM* را می‌توان بـا گسترش τ^2 از طریق سری مـک لـورن بـه شـرح زیـر ساده‌تر کرد [۲۳]:

رابطه(۴)

$$\tau^2 = e^{-2BV_2 sec\theta_i} = 1 - \frac{2BV_2}{cos\theta_i} + \frac{2B^2V_2^2}{cos^2\theta_i} + \dots$$

در رابطه (۴) فقط۲ جمله اول سری مک لورن بـه کـار برده می شود. براساس روابط ارائه شده، *WCM* بصـورت رابطه (۵) می‌باشد [۲۴,۲۳]:

رابطه(۵) $$\sigma^0_{pp} = 2ABV^2 + \left(1 - \frac{2BV}{cos\theta_i}\right)\sigma^0_{soil}$$

در رابطه(۵)، σ^0_{soil}: بازپخش خاک لخت بوده و با عملگر $f(R,Mv)$ نشان داده می‌شود کـه R زبـری سـطح و Mv رطوبت‌خاک است. بـرای یـک مزرعـه، بـه ویـژه مـزارع کشاورزی، در طی زمان رشد گیـاه، زبـری سـطح بـرای دوره کوتاه، ثابت در نظر گرفته می‌شود[۲۵].

وقتی از تصاویر چنـد زمانـه راداری اسـتفاده مـی‌شـود (برای یک منطقه خاص)، تغییرات زمـانی بـرای خـاک لخت، نشانگر تغییر رطوبـت‌خـاک بـا زمـان آن منطقـه است و σ^0_{soil} با Mv رابطه خطـی دارد کـه بـه صـورت رابطه(۶) بیان می‌شود [۲۵].

رابطه(۶) $$\sigma^{0\,db}_{soil} = CMv + D$$

کـه در رابطـه(۶) C حساسـیت رادار نسـبت بـه رطوبت‌خاک و D عقب مانـدگی ناشـی از زبـری خـاک می‌باشد.

در *WCM* اغلب، V_2وV_1 را یکی در نظر گرفته و از V در رابطه (۷) استفاده می‌کنند[۲۶]:

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

رابطه(۷) $$\sigma_{pp}^{0} = aV^{2} + bV\sigma_{soil}^{0} + \sigma_{soil}^{0}$$

که در رابطه(۷) ضرایب b, a به صورت رابطه (۸) و رابطه(۹) بیان می‌شوند[۲۶]:

رابطه(۸) $$b = -\frac{2B}{\cos\theta_i}$$

رابطه(۹) $$a = 2AB$$

V به عنوان LAI و یا $NDVI$ یا محتوای پوشش گیاهی با استفاده از داده های نوری یا زمینی به‌دست می‌آید. $NDVI$ به عنوان نسبت اختلاف و مجموع اندازه‌گیری‌های بازتاب شده از مادون قرمز نزدیک (NIR[1]) و طیف قرمز (R[2]) از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود[۲۷]:

رابطه(۱۰) $$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

جهت محاسبه LAI از رابطه کالیبره شده برای نیشکر به صورت رابطه(۱۱) و (۱۲) استفاده می‌شود[۲۸]:

رابطه(۱۱) $$LAI = -\frac{\ln\left(0/8 - SAVI\right)}{0/9}$$

رابطه(۱۲) $$SAVI = \frac{\left(\rho_{NIR} - \rho_{red}\right)\left(1+L\right)}{\left(\rho_{NIR} + \rho_{red} + L\right)}$$

پس از به‌دست آوردن ضرایب مورد نیاز از طریق برنامه نویسی کمترین مربعات با نرم‌افزار متلب و یا با استفاده از قسمت *Curve Fitting* این نرم‌افزار، مقدار رطوبت‌خاک را برای تمام منطقه از طریق رابطه(۱۳) محاسبه می‌شود:

رابطه(۱۳) $$Mv = \frac{\sigma_{pp}^{0} - \sigma_{veg}^{0} - \tau^{2}D}{\tau^{2}C}$$

۲-۴- صحت‌سنجی مدل

نتایج مدل های گفته شده برای رطوبت خاک در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (رابطه(۱۴)) (R) و *RMSE*[3] (رابطه(۱۵))صحت‌سنجی می‌شوند[۳۰,۲۹]:

رابطه(۱۴)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Ms_{oi} - \overline{Ms}_{o}\right)\left(Ms_{pi} - \overline{MS}_{p}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(MS_{oi} - \overline{MS}_{o}\right)^{2}\sum_{i=1}^{n}\left(Ms_{pi} - \overline{Ms}_{p}\right)^{2}}}$$

در رابطه(۱۴)، Ms_{oi} رطوبت‌خاک بازیابی شده در منطقه i، Ms_{pi} رطوبت‌خاک میدانی به‌دست آمده در منطقه i، $\overline{Ms}_{o}$ مقدار میانگین رطوبت‌خاک بازیابی شده، $\overline{Ms}_{p}$ مقدار میانگین رطوبت‌خاک میدانی و n تعداد نمونه‌برداری‌ها می‌باشد.

رابطه(۱۵) $$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Ms_{pi} - Ms_{oi}\right)^{2}}{n}}$$

در رابطه(۱۵)، Ms_{oi} رطوبت‌خاک بازیابی شده در منطقه i، Ms_{pi} رطوبت‌خاک میدانی به‌دست آمده در منطقه i و n تعداد نمونه‌برداری‌ها می‌باشد. مقادیر شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک با اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه شده و اعتبار هر شبیه‌سازی با استفاده از *RMSE* ارزیابی شد.

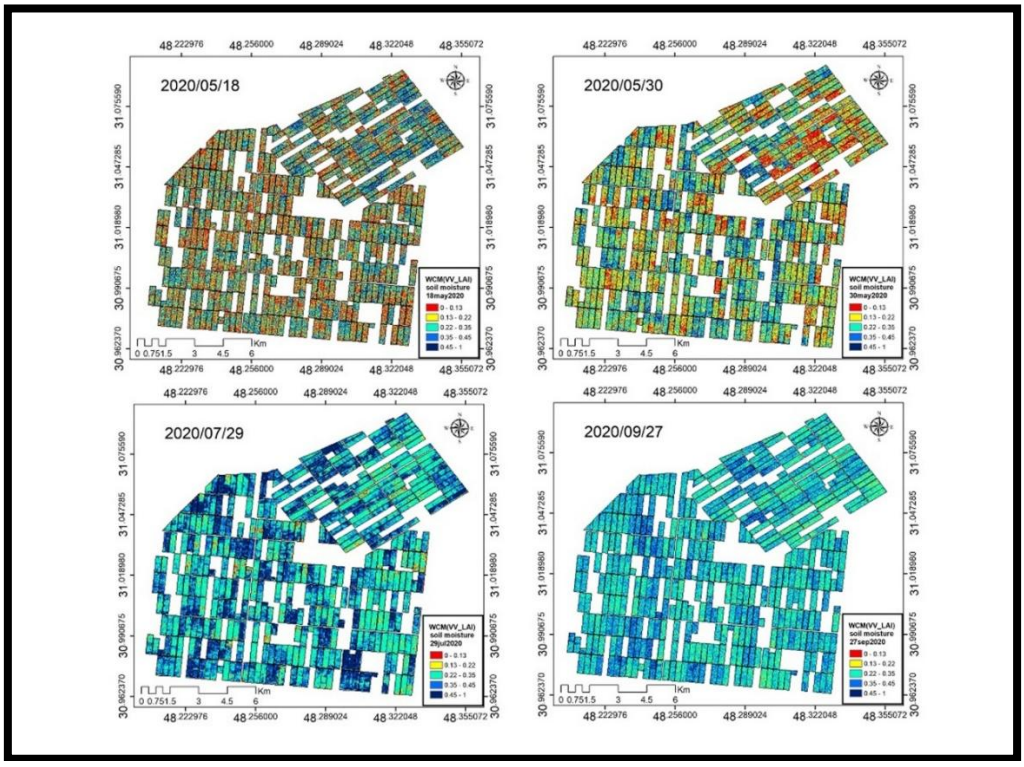
۳- نتایج و بحث

پس از محاسبه مقادیر $NDVI$ و LAI و ضرایب بازپخش VV و VH برای تاریخ‌های اخذ تصاویر، و با داشتن میزان رطوبت‌خاک میدانی، مقادیر مجهول مدل برآورد شده و در نتیجه نقشه رطوبتی منطقه برای تاریخ‌های ذکر شده استخراج گردید.

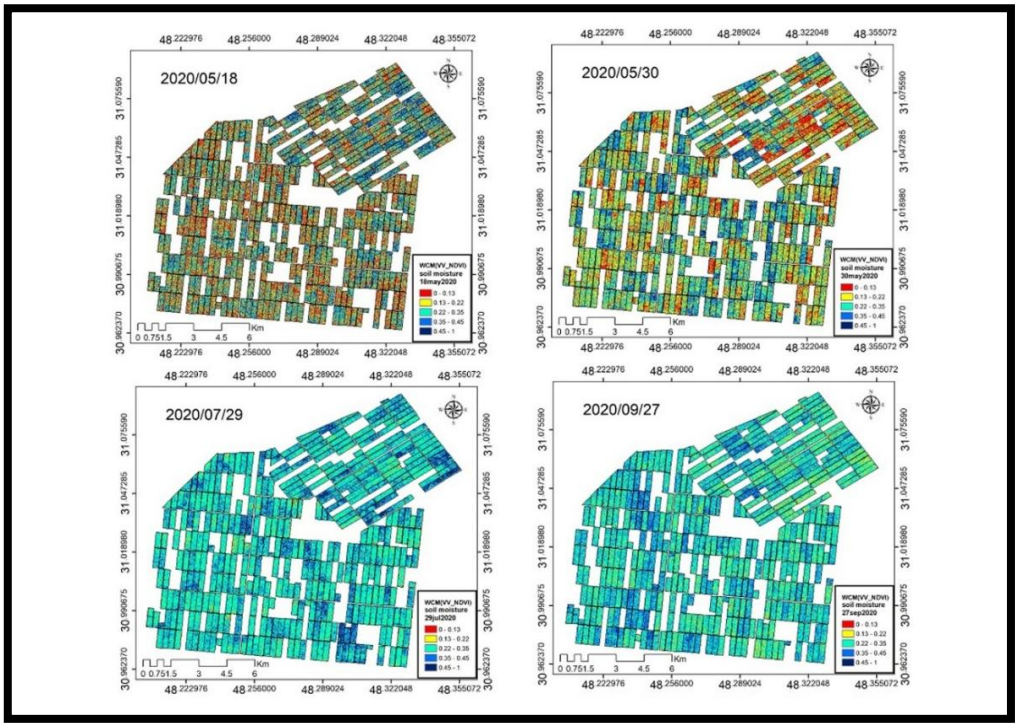
شکل‌های (۴)تا (۷) نقشه‌های رطوبت خاک در قطبش و زمان های مختلف را نشان می‌دهد. رنگ قرمز نمایانگر مناطقی است که دارای تنش هستند و مناطق با رنگ آبی نمایانگر رطوبت ۴۵٪ تا ۱۰۰٪ می‌باشد. باتوجه به این‌که در انتهای رشد، گیاه نیشکر دارای پوشش‌گیاهی و تاج‌پوشش متراکی است، و باتوجه به میزان آبیاری گیاه، میزان رطوبت بالاتر بوده و بیشتر نقاط دارای رطوبت بالا و یا در حال آبیاری هستند.

[1] *Near-Infrared*
[2] *red*
[3] *Root Mean Square Erorr*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

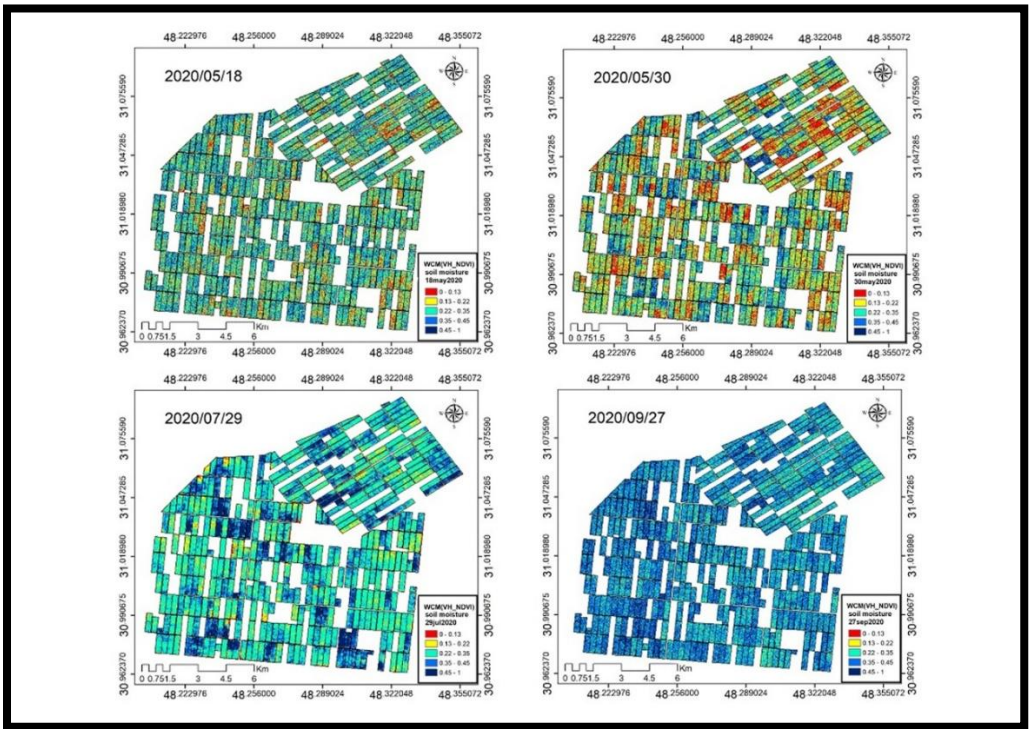


شکل۴: نقشه رطوبت‌خاک مدل *WCM* با استفاده از شاخص *LAI* و قطبش *VV*

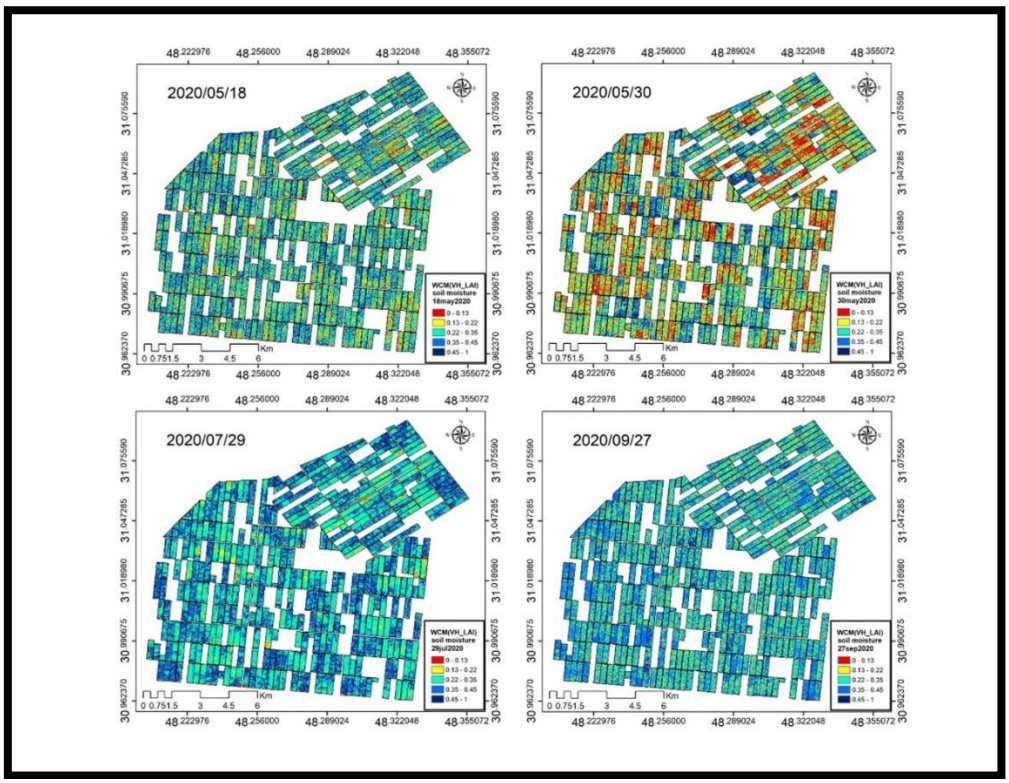


شکل۵: نقشه رطوبت‌خاک مدل *WCM* با استفاده از شاخص *NDVI* و قطبش *VV*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]



شکل۶: نقشه رطوبت‌خاک مدل *WCM* با استفاده از شاخص *NDVI* و قطبش *VH*



شکل۷: نقشه رطوبت‌خاک مدل *WCM* با استفاده از شاخص *LAI* و قطبش *VH*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

نتایج حاصل از مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل‌ها بـرای حالات مختلف ورودی و همچنین تـاریخ‌هـای مختلـف تصویربرداری در جدول‌های(۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول۲: ضرایب مدل *WCM* با شاخص *NDVI* و میزان ضریب همبستگی و *RMSE* جهت ارزیابی مدل در برآورد رطوبت خاک

WCM-NDVI	قطبش	*A*	*B*	*C*	*D*	*RMSE*	*R*
۱۸ می	*VV*	۹۵/۸۸۴	-۰/۰۱۹۳۳	۰/۱۴۱	-۱۳/۰۸۱	۰/۰۶۸	۰/۵۰
	VH	-۳۸/۹۴۶۹	-۰/۲۴۴۳۶	۰/۱۰۰۶	-۱۸/۵۳۵	۰/۱۳	۰/۳۴
۳۰ می	*VV*	-۲۱/۱۴۸۹	۰/۷۰۲۸۱۸	-۰/۱۶۵۴	-۷/۲۶۷	۰/۱۳	۰/۵۶
	VH	-۳۵/۰۳۸۱	۰/۵۴۹۲۰۳	-۰/۲۶۱	-۱۲/۶۶	۰/۱۵	۰/۵۲
۱۳ جولای	*VV*	-۳۳/۱۰۴۵	۰/۰۳۶۳۴۴	-۰/۱۷۶	-۷/۰۲۶	۰/۰۴۳	۰/۴۱
	VH	-۴۴/۱۳۱۳	۰/۱۸۵۰۷	-۰/۰۳۲	-۱۷/۰۲۵	۰/۱۰۶	۰/۴۲
۲۹ جولای	*VV*	-۹/۰۶۱۴۲	-۰/۰۴۴۰۸	-۰/۰۸۶۷	-۱۰/۲۴۵	۰/۰۱۳	۰/۹۷
	VH	-۵۲/۶۳۵۶	۰/۷۴۲۳۵۷	-۰/۴۴۴۲	-۱۰/۶۴۳	۰/۰۸	۰/۶۱
۱۸ آگوست	*VV*	-۱۴/۰۲۱۸	-۱/۰۱۷۴۸	-۰/۰۵۲۵	-۷/۵۰۸۹	۰/۰۹	۰/۷۹
	VH	۱۶۳/۹۵۵۷	۰/۰۱۸۷۸۸	-۰/۱۱۵۷	-۱۵/۷۵۴	۰/۰۸	۰/۵۰
۱۵ سپتامبر	*VV*	-۴۷/۱۶۹۷	۰/۱۴۲۹۸۹	۰/۲۳۰۸	-۱۷/۹۹	۰/۰۶۵	۰/۶۷
	VH	-۴۷/۱۲۵۸	-۰/۰۹۳۰۲	۰/۲۹۱۳	-۲۹/۶۳۴	۰/۰۶۶	۰/۵۸
۲۷ سپتامبر	*VV*	-۶۷/۰۶۰۳	۰/۰۶۸۲۹۹	۰/۳۵۷۲	-۲۳/۵۵۹	۰/۰۵۳	۰/۵۴
	VH	-۶۲۵/۴۸۱	-۰/۰۰۷۷	۰/۳۳۲۲	-۳۱/۲۶۸	۰/۰۳	۰/۵۰
ماه می	*VV*	-۱۹/۲۶۶۳	-۰/۲۵۸۵۷	۰/۱۰۰۵	-۱۲/۲۲۴	۰/۱۳	۰/۳۴
	VH	-۴۲/۶۱۵۵	۰/۸۹۰۶۲۱	۰/۱۰۴۱	-۲۹/۲۹۱	۰/۱۶	۰/۱۶
ماه جولای	*VV*	-۳۷/۳۵۴۹	۰/۰۷۴۶۵۲	-۰/۱۴۱	-۸/۲۸۵۲	۰/۰۹	۰/۵۲
	VH	-۵۸/۱۰۰۱	۰/۰۶۲۵۲۴	-۰/۰۶۳۷	-۱۶/۳۳۱	۰/۰۵۵	۰/۲۵
ماه آگوست	*VV*	-۱۴/۰۲۱۸	-۱/۰۱۷۴۸	-۰/۰۵۲۵	-۷/۵۰۸۹	۰/۰۹	۰/۷۹
	VH	۱۶۳/۹۵۵۷	۰/۰۱۸۷۸۸	-۰/۱۱۵۷	-۱۵/۷۵۴	۰/۰۸	۰/۵۰
ماه سپتامبر	*VV*	-۵۱/۲۸۹۹	۰/۱۳۸۸۷	۰/۲۵۷۷	-۱۹/۳۲۹	۰/۰۸۲	۰/۶۵
	VH	-۱۸۸/۱۱۸	-۰/۰۳۲۸۴	۰/۲۵۴۱	-۲۸/۴۸۶	۰/۰۶۵	۰/۶۲
فصل بهار	*VV*	-۱۹/۲۶۶۳	-۰/۲۵۸۵۷	۰/۱۰۰۵	-۱۲/۲۲۴	۰/۱۳	۰/۳۴
	VH	-۴۲/۶۱۵۵	۰/۸۹۰۶۲۱	۰/۱۰۴۱	-۲۹/۲۹۱	۰/۱۶	۰/۱۶
فصل تابستان	*VV*	-۶۷/۷۹۶۴	۰/۰۳۳۷۲۶	۰/۰۶۹۳	-۱۳/۳۵۹	۰/۱۲	۰/۲۱
	VH	-۱۱۳/۴۴۷	-۰/۰۴۲۸۱	۰/۰۴۶۳	-۲۱/۳۴۶	۰/۱۶	۰/۱۷
تمام دوره رشد گیاه	*VV*	-۲۵/۵۵۶۷	۰/۱۹۱۳۴۵	۰/۰۶۹۳	-۱۲/۷۵۶	۰/۱۸	۰/۱۸
	VH	۱۰/۴۸۰۳۳	۰/۰۶۲۸۳۲	۰/۰۴۶۶	-۲۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۷

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

جدول۳: ضرایب مدل *WCM* با شاخص *LAI* و میزان *RMSE* جهت ارزیابی مدل

WCM-LAI	قطبش	*A*	*B*	*C*	*D*	*RMSE*	*R*
۱۸ می	*VV*	-۱۹/۰۷۶۲	۰/۲۸۰۰۱۱	۰/۱۴۱	-۱۳/۰۸۱	۰/۱۲	۰/۴۲
	VH	-۲۱/۵۶۸۱	-۰/۱۳۴۰۶	۰/۱۰۰۶	-۱۸/۵۳۵	۰/۱۲	۰/۴۴
۳۰ می	*VV*	-۱۵/۷۱۲	۰/۶۷۲۷۴۹	-۰/۱۶۵۴	-۷/۲۶۷	۰/۱۳	۰/۲۲
	VH	-۲۰/۰۲	۰/۳۳۰۵۲۳	-۰/۲۶۱	-۱۲/۶۶	۰/۱۵	۰/۶۷
۱۳ جولای	*VV*	-۱۳/۳۸۰۶	-۰/۱۵۶۶۲	-۰/۱۷۶	-۷/۰۲۶	۰/۰۴۴	۰/۵۵
	VH	-۲۶/۷۷۹۵	۰/۰۵۴۱۳۱	-۰/۰۳۲	-۱۷/۰۲۵	۰/۰۸۱	۰/۴۸
۲۹ جولای	*VV*	-۳/۷۱۸۲۶	-۰/۰۲۴۱۸	-۰/۰۸۶۷	-۱۰/۲۴۵	۰/۰۱۱	۰/۹۸
	VH	-۳۲/۵۲۳	۰/۴۹۹۳۴۵	-۰/۴۴۴۲	-۱۰/۶۴۳	۰/۰۲۸	۰/۹۲
۱۸ آگوست	*VV*	-۴/۵۶۳۰۸	-۰/۲۲۱۳	-۰/۰۵۲۵	-۷/۵۰۸۹	۰/۰۹۸	۰/۸۲
	VH	-۱۰/۶۹۹۲	۰/۱۴۰۱۷۹	-۰/۱۱۵۷	-۱۵/۷۵۴	۰/۱۳	۰/۶۸
۱۵ سپتامبر	*VV*	۰	-۰/۱۲۹۴۸	۰/۲۳۰۸	-۱۷/۹۹	۰/۰۶	۰/۶۷
	VH	۲۰/۷۷۹۲۲	۰/۰۰۹۹۷۲	۰/۲۹۱۳	-۲۹/۶۳۴	۰/۰۶۱	۰/۵۷
۲۷ سپتامبر	*VV*	-۱۸/۳۳۷۳	۰/۳۳۷۹۹۲	۰/۳۵۷۲	-۲۳/۵۵۹	۰/۰۴۱	۰/۴۱
	VH	-۱۶/۲۶۰۵	۰/۱۸۱۲۵۸	۰/۳۳۲۲	-۳۱/۲۶۸	۰/۰۲۸	۰/۵۶
ماه می	*VV*	-۱۰/۰۰۷۲	-۰/۰۸۴۴۷	۰/۱۰۰۵	-۱۲/۲۲۴	۰/۱۳	۰/۴۴
	VH	-۱۹/۱۳۰۵	۰/۳۴۲۵۷۳	۰/۱۰۴۱	-۲۹/۲۹۱	۰/۱۸	۰/۱۶
ماه جولای	*VV*	-۱۱/۳۲۹۹	-۰/۰۵۲۱۷	-۰/۱۴۱	-۸/۲۸۵۲	۰/۰۷۷	۰/۵۳
	VH	-۶۵/۱۳۸۵	۰/۰۱۱۵۵	-۰/۰۶۳۷	-۱۶/۳۳۱	۰/۰۵۷	۰/۳۲
ماه آگوست	*VV*	-۴/۵۶۳۰۸	-۰/۲۲۱۳	-۰/۰۵۲۵	-۷/۵۰۸۹	۰/۰۹۸	۰/۸۲
	VH	-۱۰/۶۹۹۲	۰/۱۴۰۱۷۹	-۰/۱۱۵۷	-۱۵/۷۵۴	۰/۱۳	۰/۶۸
ماه سپتامبر	*VV*	۱/۹۲۲۱۷	-۰/۱۰۸۱۹	۰/۲۵۷۷	-۱۹/۳۲۹	۰/۰۷۵	۰/۶۷
	VH	-۸/۸۸۵۳۳	۰/۱۱۶۵۰۱	۰/۲۵۴۱	-۲۸/۴۸۶	۰/۰۷۸	۰/۶۵
فصل بهار	*VV*	-۱۰/۰۰۷۲	-۰/۰۸۴۴۷	۰/۱۰۰۵	-۱۲/۲۲۴	۰/۱۳	۰/۴۴
	VH	-۱۹/۱۳۰۵	۰/۳۴۲۵۷۳	۰/۱۰۴۱	-۲۹/۲۹۱	۰/۱۸	۰/۱۵
فصل تابستان	*VV*	-۱۰/۰۸۹۷	-۰/۱۹۷۳۹	۰/۰۶۹۳	-۱۳/۳۵۹	۰/۱۲	۰/۳۱
	VH	۲۹/۸۶۷۰۹	۰/۰۱۶۴۴	۰/۰۴۶۳	-۲۱/۳۴۶	۰/۱۷	۰/۲۱
تمام دوره رشد گیاه	*VV*	-۱۶/۳۴۶۵	۰/۰۴۳۲۳۶	۰/۰۶۹۳	-۱۲/۷۵۶	۰/۱۷	۰/۱۶
	VH	-۱۱/۳۵۲۷	۰/۰۹۶۴۰۴	۰/۰۴۶۶	-۲۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۱۱

در این جدول ضرایب مدل *WCM* (*A, B, B, D*) با استفاده از شاخص‌های *NDVI* و *LAI* در تاریخ‌های مختلف و همچنین به صورت ماهانه، فصلی و تمام دوره رشد گیاه ارائه شده است. همچنین مقادیر ضریب همبستگی (*R*) و میزان میانگین جذر مربعات خطا (*RMSE*) بین مقدار رطوبت برداشت شده از سطح زمین و مقدار رطوبت محاسبه شده توسط مدل نیز جهت ارزیابی دقت مدل آورده شده است. نتایج نشان می دهد که این مدل در سطوح زمانی روزانه دقت بیشتری دارد و هرچه به انتهای دوره رشد گیاه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

نزدیک‌تر می‌شویم، دقت برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل *WCM* افزایش می یابد. همچنین، مدل *WCM* با استفاده از دو نوع قطبش *VV* و *VH* مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج نشان می دهد که قطبش *VV* دقت بهتری نسبت به قطبش *VH* دارد. این نتایج با توجه به روابط علمی و مدل‌سازی ارائه شده قابل تفسیر و استنتاج می‌باشند.

۳-۱- برنامه‌ریزی آبیاری مزارع با استفاده از محصولات رطوبت خاک

در قسمت دوم این تحقیق سعی شد تا به ارزیابی استفاده از نقشه‌های رطوبت خاک بدست آمده جهت برنامه ریزی آبیاری مزارع نیشکر و ارتباط بین میزان رطوبت خاک و زمان آبیاری پرداخته شود.

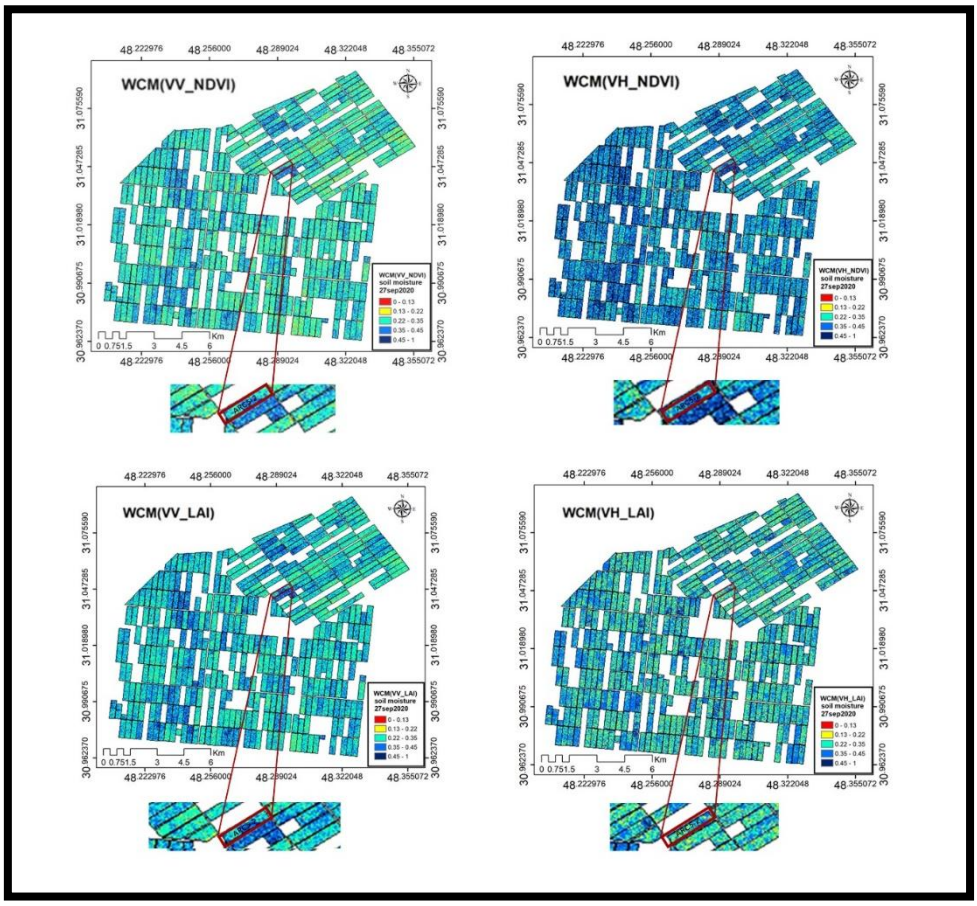
شکل(۸) نقشه رطوبت‌خاک در مدل‌های مختلف را در تاریخ ۲۷ سپتامبر نشان می‌دهد. یک مزرعه براساس زمان شروع و پایان آبیاری انتخاب شده‌است. در مزرعه ۲-*ARC*۵ از تاریخ ۱۸ تا ۲۱ سپتامبر آبیاری صورت گرفته‌است. با توجه به بافت سنگین تا نیمه سنگین مزارع نیشکر، رطوبت‌خاک در مرحله ظرفیت زراعی، با توجه به تخلیه مجاز رطوبتی نیشکر، معمولاً با گذشت سه تا شش روز (بستگی به مرحله رشد و تاج‌پوشش گیاه) از پایان آبیاری مزرعه باقی می‌ماند. با درنظر گرفتن رطوبت‌خاک اندازه‌گیری شده در طول فصل رشد نیشکر و طبقه بندی‌های صورت گرفته در مزارع کشت و صنعت امیرکبیر، مزرعه ۲-*ARC*۵ بعد از گذشت شش روز از زمان قطع آبیاری به مرحله ظرفیت زراعی (رطوبت متوسط) رسیده است.

براساس مشاهدات میدانی و مطالعات آب و خاک، می توان برای مدیریت رطوبت خاک و برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر از طبقه‌بندی زیر استفاده کرد: نقاطی که رطوبت خاک آنها بین ۰ تا ۱۳٪ است، در شروع تنش قرار دارند و نیاز به آبیاری فوری دارند. مناطقی که رطوبت خاک آنها بین ۱۳٪ تا ۲۲٪ است، در زمان آبیاری قرار دارند و نیاز به آبیاری منظم دارند. مناطقی که رطوبت خاک آنها بین ۲۲٪ تا ۳۵٪ است، در دسته رطوبت متوسط قرار دارند و نیاز به آبیاری منظم و مدیریت مناسب دارند. مناطقی که رطوبت خاک آنها بین ۳۵٪ تا ۴۵٪ است، در دسته رطوبت بالا قرار دارند و به‌طور عمومی نیاز به آبیاری ندارند. نقاطی که رطوبت خاک آنها بالای ۴۵٪ است، در حال آبیاری هستند.

با استفاده از نقشه‌های رطوبتی که از طریق مدل *WCM* به‌دست آمده‌اند، می‌توان به‌صورت دقیق‌تر و پیش‌بینی شده، برنامه‌ریزی آبیاری را انجام داد. با توجه به طبقه‌بندی فوق و تحلیل نقشه‌های رطوبتی، میزان آبیاری را بهینه تر و با رویکرد پیشگیرانه تنظیم کرده و از مصرف آب صحیح و بهینه برای کشت نیشکر استفاده کرد.

در برنامه‌ریزی آبیاری مزارع با استفاده از محصولات رطوبت‌خاک، مشاهده می‌شود که مدل *WCM* با استفاده از قطبش *VV* و شاخص گیاهی *LAI* نسبت به سایر وضعیت‌های مدل، وضعیت مزرعه را با دقت بالاتری برآورد می‌کند. با استفاده از قطبش *VV* که قدرت نفوذ به سطح زمین را نشان می‌دهد و شاخص گیاهی *LAI* که اطلاعات درباره پوشش گیاهی را دربرمی‌گیرد، مدل *WCM* بهبود یافته و دقت برآورد رطوبت خاک افزایش می‌یابد. اما در مدل *WCM* با استفاده از شاخص *NDVI* و قطبش *VV* یا *VH*، به دلیل اشباع شدن این شاخص در اواسط دوره رشد گیاه تا انتهای آن، دقت مدل در برآورد رطوبت خاک کاهش می‌یابد. اشباع شدن شاخص *NDVI* به معنی ناپایداری اطلاعات در زمینه پوشش گیاهی است و این موضوع می‌تواند تأثیر منفی بر دقت مدل در برآورد رطوبت خاک داشته باشد. به طور کلی، استفاده از مدل *WCM* با قطبش *VV* و شاخص گیاهی *LAI* به عنوان روش برتر در برآورد وضعیت رطوبت خاک مزارع نیشکر مورد توصیه است، زیرا این ترکیب به دقت بالاتری در برآورد وضعیت رطوبت خاک می انجامد و برای برنامه ریزی آبیاری بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]



شکل۸: مقایسه زمان آبیاری مزرعه *ARC5-2* با مدل‌های مختلف در تاریخ ۲۰۲۰/۰۹/۲۷

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری سنتینل۱ و قطبش‌های *VV* و *VH* و همچنین تصاویر نوری سنتینل ۲ و شاخص های *NDVI* و *LAI*، مدل *WCM* جهت برآورد رطوبت خاک استفاده شد. در این مدل نیاز به میزان بازپخش راداری خاک لخت بود که از طریق رطوبت مناطقی از سطح خاک که عاری از هرگونه گیاهی بود، این میزان به دست آمده و ضرایب *C,D* محاسبه شدند. سپس با استفاده از سایر داده های موجود و نمونه برداری زمینی مقادیر ضرایب *A,B* محاسبه شده و مدل به دست آمده برای تمام منطقه اجرا و میزان رطوبت خاک منطقه به‌دست آمد که حاصل بررسی های این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

در برآورد رطوبت خاک، شاخص گیاهی مناسب تاثیر بسزایی بر نتایج دارد. همچنین استفاده از قطبش مورد نظر نیز در دقت برآورد رطوبت خاک با تصاویر راداری حائز اهمیت است. با توجه به نتایج حاصله برای گیاه نیشکر و منطقه جنوب ایران با توجه به شرایط آب و هوایی و همچنین دوره‌های آبیاری، می‌توان نتیجه گرفت که مدل *WCM* با استفاده از شاخص *LAI* و قطبش *VV* نتایج بهتری ارائه داده و می‌توان با استفاده از این نتایج برنامه‌ای جهت آبیاری مزارع به‌کار برد. هرچند اختلاف بین برآورد رطوبت خاک از طریق شاخص *LAI* و *NDVI* زیاد نبوده و می‌توان از شاخص *NDVI* نیز جهت حصول نتیجه مطلوب استفاده نمود. همانطور که ذکر شد، این مدل برآورد رطوبت خاک به

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

صورت روزانه، ماهانـه، فصـلی و تمـام دوره رشـد گیـاه نیشکر بررسی شده و مشـخص شـد کـه جهـت بـرآورد دقیق تر رطوبت خاک بهتر است به‌صورت روزانـه مـدل اجرا شده و نتایج حاصله جهت ارائه برنامه آبیاری بهینه مورد استفاده قرار گیرند. براساس این پـژوهش، میـزان دقت و *RMSE* برآورد رطوبت خاک بـه صـورت روزانـه تقریبا بین ۰٫۳ تا ۰٫۱۵ بوده که در مقابل سـایر حـالات مورد بررسی و با توجه به نتایج *RMSE* مقالات پیشین، مقدار قابل قبولی می‌باشد.

مراجع

[1] Rogier Van der Velde. and Zhongbo SU." Dynamics in land-surface conditions on the Tibetan Plateau observed by Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)". Hydrological Sciences Journal. 54.6.1079–1093,2009

[2] Rogier Van der Velde, Zhonogbo Su and Yaoming Ma. "Impact of soil moisture dynamics on ASAR signatures and its spatial variability observed over the Tibetan Plateau". Sensors, vol. 8, no. 9, pp. 5479–5491, Sep. 2008

[3] Foroughi. H., Boroomand Nasab. S., Naseri. A.A., Hamzeh. S., Sadeghi. M., Tuller. M., Jones. S."A new mathematical formulation for remote sensing of soil moisture based on the Red-NIRspace."International Journal of Remote Sensing, 41:20, 8034-8047,2020.

[4] Njoku, E.G., & Kong, J.A. "Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture". Journal of Geophysical Research, 3108–3118,1977.

[5] Hamzeh, S., Mehrabi, M., Alavipanah, S., Kiavarz, M., Ziaee, R. "Estimating soil moisture using remotely sensed data and Surface Energy Balance System." Watershed Engineering and Management, 759-770,2019

[6] Khazaei. M., Hamzeh. S., Qihao. W. "Generating high spatial and temporal soil moisture data by disaggregation of SMAP product and its assessment in different land covers."GIScience & Remote Sensing,1046-1056,2020

[7] Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications. Dedham, MA, USA, 1986.

[8] W. Barrett, E. Dwyer, and P. Whelan, "Soil moisture retrieval from active spaceborne microwave observations: An evaluation of current techniques," Remote Sensing, vol. 1, no.3, pp. 210–242, 2009.

[9] Dubois, P.C.; Van Zyl, J.and Engman, T. "Measuring soil moisture with imaging radars." IEEE Trans. Geosci.Remote Sens. 33.4, 915–926, 1995.

[10] Baghdadi, N.; Choker, M.; Zribi, M.; El-hajj, M.; Paloscia, S.; Verhoest, N.; Lievens, H.; Baup, F.; Mattia, F. "A new empirical model for radar scattering from bare soil surfaces". Remote Sens. 8.11, 920, 2016.

[11] Oh, Y.; Sarabandi, K.and Ulaby, F.T. "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30.2, 370–382,1992

[12] Fung, A.K.; Li, Z.and Chen, K.S. "Backscattering from a randomly rough dielectric surface". IEEE Trans. Geosci.Remote Sens. 30.2, 356–369,1992.

[13] Baghdadi, N.; Hajj, M.E.; Zribi, M.and Bousbih, S. "Calibration of the water cloud model at C-band for winter crop fields and grasslands". Remote Sens. 9, 969,2017.

[14] Zribi, M.; Saux-Picart, S.; André, C.; Descroix, L.and Ottlé, O.and Kallel, A. "Soil moisture mapping based on ARSAR/ENVISAT radar data over a sahelian site". International journal of remote sensing. 28, 3547–3565,2007.

[15] Qi Wang, Jiancheng Li, Taoyong Jin, Xin Chang, Yongchao Zhu, Yunwei Li, Jiaojiao

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

Sun and Dawei Li: "Comparative Analysis of Landsat-8, Sentinel-2 and GF-1 Data for Retrieving Soil Moisture over Wheat Farmlands". 12.17,2708,2020.

*[16] Mengying Yang, Hongquan Wang *, Cheng Tong, Luyao Zhu, Xiaodong Deng, Jinsong Deng and Ke Wang: "Soil Moisture Retrievals Using Multi-Temporal Sentinel-1 Data over Nagqu Region of Tibetan Plateau". 13.10,1913,2021.*

[17] Aliihsan Sekertekin, Aycan Murat Marangoz, Saygin Abdikan: "ALOS-2 and Sentinel-1 SAR data sensitivity analysis to surface soil moisture over bare and vegetated agricultural fields". 105303,2020.

[18] Veysi. Sh., Naseri A. A., Hamzeh. S. "Relationship Between Field Measurement of Soil Moisture in the Effective Depth of Sugarcane Root Zone and Extracted Indices from Spectral Reflectance of Optical/Thermal Bands of Multispectral Satellite Images.","Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 48, 1035-1044,2020

[19] Marashi, Jafarzadeh Haghighifard, Khorasani, Monarouel, "Life Cycle Assessment of the Sugar Industry: A Case Study of Amir Kabir Sugar Cane Industry". Iranian journal of Biosystems Engineering 49.4,597-608,2019

[20] Vuolo, F.; D'Urso, G.; De Michele, C.; Bianchi, B.; Cutting, M. "Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for di_erent experiences from Europe to Australia". Agricultural water management.147, 82–95,2015.

[21] Mehrez Zribi et al, "Analysis of L-Band SAR Data for Soil Moisture Estimations over Agricultural Areas in the Tropics", remote sensing, 11.9,1122,2019.

[22] Engman, E. T., & Chauhan, N. "Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing". Remote Sensing of Environment, 51(1), 189-198,1995

*[23] Junhua Li * and Shusen Wang, "Using SAR-Derived Vegetation Descriptors in aWater Cloud Model to Improve Soil Moisture Retrieval", remote sensing, 10.9,1370,2018.*

[24] Thoma, D. P., Moran, M. S., Bryant, R., Rahman, M., Holifield-Collins, C. D., Skirvin, S & Slocum, K. "Comparison of four models to determine surface soil moisture from C-band radar imagery in a sparsely vegetated semiarid landscape". Water resources research, 42(1),2006

[25] Xiaojing Bai et al, "First Assessment of Sentinel-1A Data for Surface Soil Moisture Estimations Using a Coupled Water Cloud Model and Advanced Integral Equation Model over the Tibetan Plateau", remote sensing, 9.7,714,2017.

[26] Gherboudj, I.; Maga gi, R.; Berg, A.A.; Toth, B. "Soil moisture retrieval over agriculture fields from multi-polarized and multi-angular Radarsat-2 SAR data". Remote Sensing of Environment. 115.1, 33–43,2011.

*[**27**] Bai, X.; He, B.; Xing, M.; Li, X. "Method for soil moisture retrieval in arid prairie using TerraSAR-X data". Journal of applied remote sensing. 9.1, 096062-096062,2015.*

[28] Neysi. L, Hamzeh. S and Karamolachab. E. "Modeling of leaf area index and crop control variables during the growing season of sugarcane using remote sensing, final report of the research project of Sugarcane Development Institute". Project code 12019901,2020.

*[**29**] Wen, J.; Su, Z. A "time series-based method for estimating relative soil moisture with ERS wind scatterometer data". Geophysical research Letters 30.7,2003.*

*[**30**] Jensen, J.R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Univ. of South Carolina, Columbus. 1986.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.10, No.4, Winter 2023

Research Paper

Estimation of soil moisture using WCM model and Sentinel satellite imagery for irrigation scheduling of sugarcane fields

Reihane Leghayat [1], Saeid Hamzeh [2*], Najmeh Neisani Samani[2] , Jamal Mohammadi Moalezade[3] , Abed Ali Naseri[4]

1- Master Student of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran
2- Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran
3 - Head of Remote Sensing and GIS Department of Sugarcane & By-Products Development Company
4- Professor of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science and Environment Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

Abstract

Estimating of soil moisture is very important for water resources studies and irrigation scheduling, and for this purpose the use of satellite imagery is very helpful. The present research was conducted to evaluate the capability of WCM model based on the use of radar and optical data of Sentinel 1 and 2 to estimate soil moisture and irrigation scheduling in sugarcane cultivation lands located in the southwest of Iran. For this purpose, the soil moisture was measured from May 18 to September 27, 2020, simultaneously with 7 passes of Sentinel 1 and 2 satellites at 337 ground control points located in 18 sugarcane fields using a TDR350 moisture meter. After performing the necessary processing, the soil moisture was estimated using the WCM model using different polarizations of radar images as well as different plant indices and the results were evaluated using field observations. The obtained results show that the WCM model using LAI index and VV polarization is more accurate in estimating soil moisture. Also, the accuracy of the results for the case where the desired model is calculated for each image separately is higher than when a general model is developed for the entire sugarcane growth period. The RMSE of this model for a single image using the LAI index is in the range of [1-13 %] and its correlation coefficient is [0.98-0.34]. If a model is developed for the entire period, the RMSE is between [17 -22 %] and its correlation coefficient is [0/1-0/2].

Key words : *Remote Sensing, Radar and Optical Imagery, WCM model, Soil Moisture, Irrigation.*

Correspondence Address*: Department of Remote Sensing and GIS , Faculty of Geography of University of Tehran, Vesal Shirazi St., Tehran, Iran.*
Tel*: : 02161113540*
Email : *saeid.hamzeh@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.6.6]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.109]