

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

ریحانه لقایت^۱، سعید حمزه^{۲*}، نجمه نیسانی سامانی^۲، جمال محمدی معله زاده^۲، 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 برنامه ریزی آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است و بدین منظور استفاده از داده های ماهواره ای بسیار راهگشا می باشد. تحقیق حاضر به منظور ارزیابی مدل WCM مبتنی بر استفاده از داده های رادار و نوری سنتینل ۱ و ۲ جهت برآورد میزان رطوبت خاک و برنامه ریزی 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 ماهواره های سنتینل ۱ و ۲ در ۳۳۷ نقطه کنترل زمینی واقع شده در ۱۸ مزرعه تحت کشت نیشکر با استفاده از دستگاه رطوبت سنج TDR۳۵۰ برداشت گردید. پس از انجام پردازش های لازم، میزان رطوبت خاک با استفاده از مدل WCM با بهره گیری از قطبش های مختلف تصاویر رادار و همچنین شاخص های مختلف گیاهی برآورد گردید و ارزیابی نتایج با استفاده از مشاهدات میدانی صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد 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 می باشد. 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] می باشد. 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 واژه ها: سنجش از دور، 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

۱- مقدمه

تنش آبی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. لذا مطالعه و توسعه راه کارهای 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 زمان‌بر 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 [۲، ۳]. 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 قطبش‌های مختلف در اثر افزایش رطوبت خاک بهره گرفته می‌شود. رطوبت سطحی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایندهای مختلف سطح زمین بازی می‌کند و بازخورد بین زمین و سامانه آب و هوایی منطقه می‌باشد. 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 [۵، ۶].

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 تأثیر ثابت‌دی‌الکتریک و زبری سطح (چند سانتی‌متر اول از

سطح زمین) می‌باشد [۷]. ثابت‌دی‌الکتریک به رطوبت خاک، بافت آن، فرکانس و سنجنده راداری بستگی دارد [۸]. مطالعات متعددی میزان بازپخش سیگنال راداری را به عنوان تابعی از رطوبت خاک بیان کرده‌اند [۹]. ضریب بازپخش دارای حساسیت بالایی در برابر رطوبت خاک، در زاویه‌های پایین است [۱۰]. مدل‌های 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 پوشش گیاهی پوشانده شده باشد، سیگنال بازپخش راداری نه تنها به خاک، بلکه به ویژگی‌های پوشش گیاهی نیز بستگی دارد. WCM [۱۲]، یک مدل نیمه تجربی است. در این مدل تمام سیگنال بازپخش راداری به عنوان مجموع بازپخش‌های حاصل از پوشش گیاهی، همراه با یک بازپخش دوم مربوط به خاک، که توسط اثر پوشش گیاهی تضعیف شده است، در نظر گرفته می‌شود. 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 سنتینل ۲ نسبت به ویژگی‌های پوشش گیاهی حساس‌تر بوده و توانایی قوی‌تری برای تشخیص سیگنال پوشش گیاهی دارند. به طور کلی برای محاسبه NDVI تصاویر سنتینل ۲ عملکرد بهتری ارائه دادند، از طرفی برای محاسبه شاخص آب تفاضلی نرمال شده (NDVI) از تصاویر لندست ۸ نتایج بهتری

توانایی این مدل تحت سناریوهای 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 سنتینل ۱ و تصاویر نوری سنتینل ۲ و اجرای مدل WCM، ابتدا رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه به دست می آید 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 می شود.

۲- مواد و روش ها

در این بخش ابتدا به معرفی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. سپس توضیحاتی درباره داده های مورد استفاده و روش انجام پژوهش داده شده است. در نهایت روش های صحت سنجی بیان شده 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 جغرافیایی ۴۸/۱۲ 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 ۲۵ هکتاری می باشد. 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 به وسیله 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 گره ها و نازک شدن قطر نی ها شده و ریشه نیشکر به اعماق نفوذ نمی کند [۱۹].

آب آبیاری از طریق ایستگاه پمپاژ اصلی که در حاشیه رودخانه کارون می باشد تامین می شود. آبیاری مزارع در

حاصل می شد. بر این اساس این پژوهش مرجعی برای انتخاب شاخص گیاهی مورد نظر ارائه می دهد. [۱۵]
یانگ و همکاران (۲۰۲۱) مدل WCM را برای منطقه فلات تبت با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ 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]

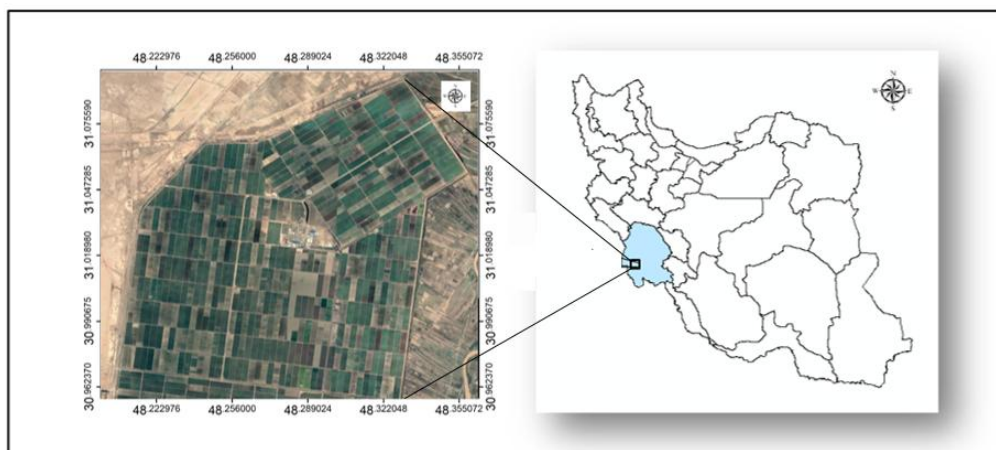
سکرتکین و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی ارائه دادند که مدل WCM را با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و آلوس ۲ در مزارع کشاورزی برهنه و دارای پوشش گیاهی در فصل خشک (بدون آبیاری) مورد ارزیابی قرار داده اند. این پژوهش نشان داد که حساسیت سنتینل ۱ برای مدل WCM بیشتر بوده و نتایج مطلوب تری ارائه می دهد [۱۷].

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

علاو بر توانایی خوب مدل WCM هنوز کارایی 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

آب نیشکر در شرایط اقلیمی خوزستان در فصل تابستان بوده که متوسط تبخیر روزانه در حدود ۱۵ تا ۲۰ میلی‌متر است [۱۹].

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



شکل ۱: موقعیت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر

سنسینل ۱ با استفاده از دستگاه TDR_{350} در سه ایستگاه در سطح هر یک از مزارع انتخابی از ۲۰ مارس تا ۲۱ اکتبر ۲۰۲۰ انجام شد. در شکل (۲) موقعیت نقاط اندازه‌گیری 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 صحت‌سنجی نتایج مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردید.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

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

۲-۲-۱- داده‌های 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



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

۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

جهت انجام تحقیق حاضر، از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ طول فصل رشد گیاه نیشکر استفاده شد. در این راستا، از ۷ تصویر سنتینل ۱ با قطبش VH و VV و همچنین ۷ تصویر سنتینل ۲ استفاده شد. تصاویر از

طریق سامانه ارث انجین و در بالاترین سطح پردازش موجود دریافت شدند. اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری-های 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 سنتینل ۲	تاریخ تصاویر ماهواره سنتینل ۱	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

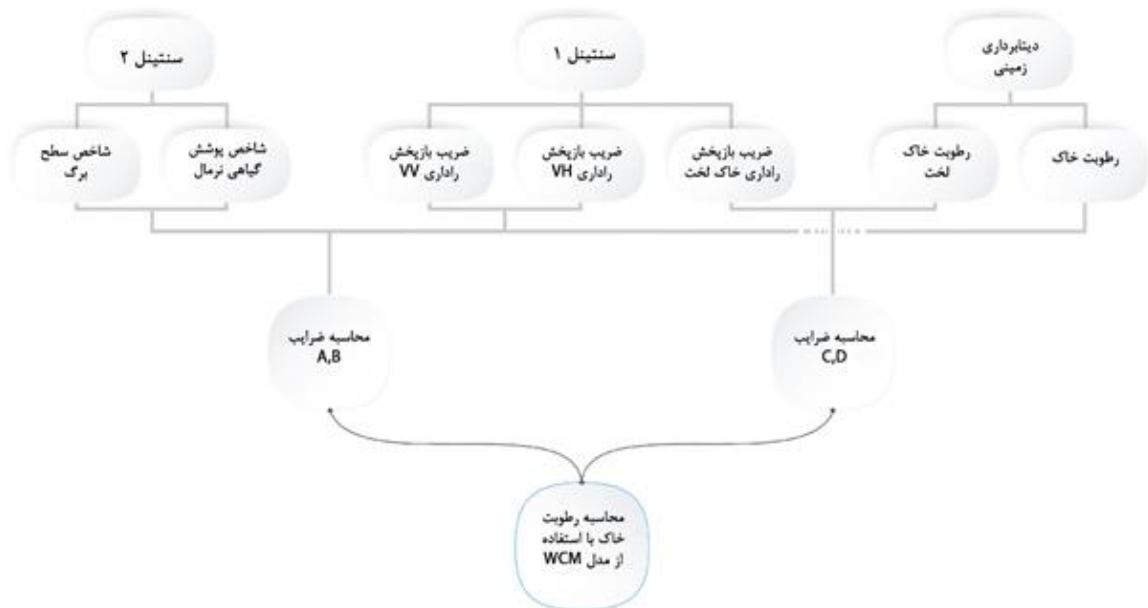
ماهواره سنتینل ۱ در محدوده باند C و در محدوده فرکانس ۵/۴۰۵ گیگاهرتز فعالیت می‌کند. این ماهواره مأموریت خود را از تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ آغاز کرده است. دوره گذر ماهواره از یک مکان ۶ روزه است و دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌باشد. تصاویر رادار قابلیت تصویربرداری در شرایط آب و هوایی مختلف از جمله ابر و در طول تمام ساعات شبانه روز را دارا هستند. به عبارت دیگر، تصاویر رادار در هر شرایط آب و هوایی و در تمام زمان‌ها 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 VH و VV استفاده شده است. مدار قطبی 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

برخوردار است 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 محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول‌موج کوتاه برخوردار است. سنتینل ۲ 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.



شکل ۳: نمودار فرآیند مدل WCM

رابطه (۵) می‌باشد [۲۴,۲۳]:

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

در رابطه (۵)، σ_{soil}^0 : بازپخش خاک لخت بوده و با عملکرد $f(R, Mv)$ نشان داده می‌شود که R زبری سطح و Mv رطوبت خاک است. برای یک مزرعه، به ویژه مزارع کشاورزی، در طی زمان رشد گیاه، زبری سطح برای دوره کوتاه، ثابت در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

وقتی از تصاویر چند زمانه راداری استفاده می‌شود (برای یک منطقه خاص)، تغییرات زمانی برای خاک لخت، نشانگر تغییر رطوبت خاک با زمان آن منطقه است و σ_{soil}^0 با Mv رابطه خطی دارد که به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۲۵].

$$\sigma_{soil}^{0db} = CMv + D \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در رابطه (۶) C حساسیت رادار نسبت به رطوبت خاک و D عقب ماندگی ناشی از زبری خاک می‌باشد.

در WCM اغلب، V_1 و V_2 را یکی در نظر گرفته و از V در رابطه (۷) استفاده می‌کنند [۲۶]:

معادله عمومی WCM به صورت روابط (۱) تا (۳) تعریف می‌شود [۲۲,۲۱]:

$$\sigma_{pp}^0 = \sigma_{veg}^0 + \tau^2 \sigma_{soil}^0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\sigma_{veg}^0 = AV_1 \cos\theta_i (1 - \tau^2) \quad \text{رابطه (۲)}$$

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

در رابطه (۱) تا (۳)، σ_{pp}^0 : ضریب بازپخش یک پلاریزه خاص، σ_{veg}^0 : ضریب بازپخش حجم پوشش گیاهی، σ_{soil}^0 : ضریب بازپخش خاک لخت، τ^2 : انتقال دو طرفه پوشش گیاهی، A و B : ضرایب مدل، V_1 و V_2 : توصیف کننده گیاهی مانند $NDVI$ یا LAI می‌باشد.

طبق یافته‌های محققان [۱۶] مدل WCM را می‌توان با گسترش τ^2 از طریق سری مک لورن به شرح زیر ساده‌تر کرد [۲۳]:

$$\tau^2 = e^{-2BV_2 \sec\theta_i} = 1 - \frac{2BV_2}{\cos\theta_i} + \frac{2B^2V_2^2}{\cos^2\theta_i} + \dots \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴) فقط ۲ جمله اول سری مک لورن به کار برده می‌شود. براساس روابط ارائه شده، WCM بصورت

رابطه (۱۵) صحت‌سنجی می‌شوند [۳۰، ۲۹]:

رابطه (۱۴)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (MS_{oi} - \overline{MS_o}) (\overline{MS_{pi}} - MS_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MS_{oi} - \overline{MS_o})^2 \sum_{i=1}^n (\overline{MS_{pi}} - MS_p)^2}}$$

در رابطه (۱۴)، MS_{oi} رطوبت خاک بازیابی شده در منطقه i ، MS_{pi} رطوبت خاک میدانی به دست آمده در منطقه i ، $\overline{MS_o}$ مقدار میانگین رطوبت خاک بازیابی شده، $\overline{MS_p}$ مقدار میانگین رطوبت خاک میدانی و n تعداد نمونه برداری‌ها می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MS_{pi} - MS_{oi})^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه (۱۵)، MS_{oi} رطوبت خاک بازیابی شده در منطقه i ، MS_{pi} رطوبت خاک میدانی به دست آمده در منطقه i و n تعداد نمونه برداری‌ها می‌باشد. مقادیر شبیه‌سازی شده 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 رطوبت خاک 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 زمان‌های 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 پوشش گیاهی 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.

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

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

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

$$a = 2AB \quad \text{رابطه (۹)}$$

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

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

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

$$LAI = -\frac{\ln(0.8 - SAVI)}{0.9} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

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

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

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

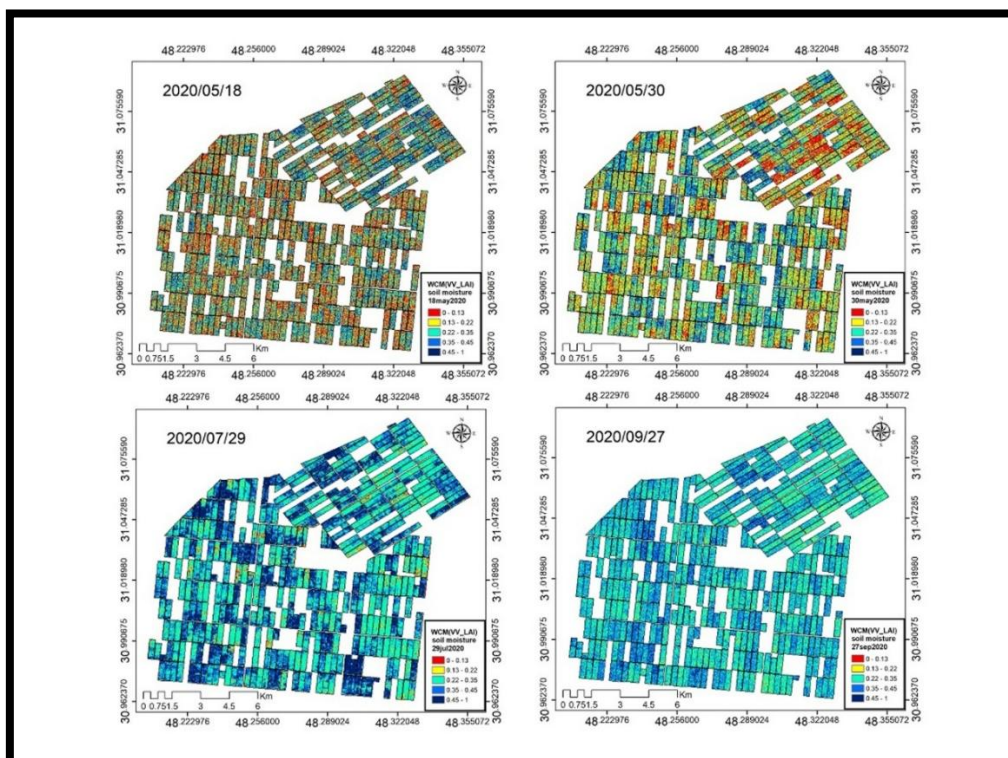
۲-۴- صحت‌سنجی مدل

نتایج مدل‌های گفته شده برای رطوبت خاک در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (رابطه (۱۴)) (R) و $RMSE^3$

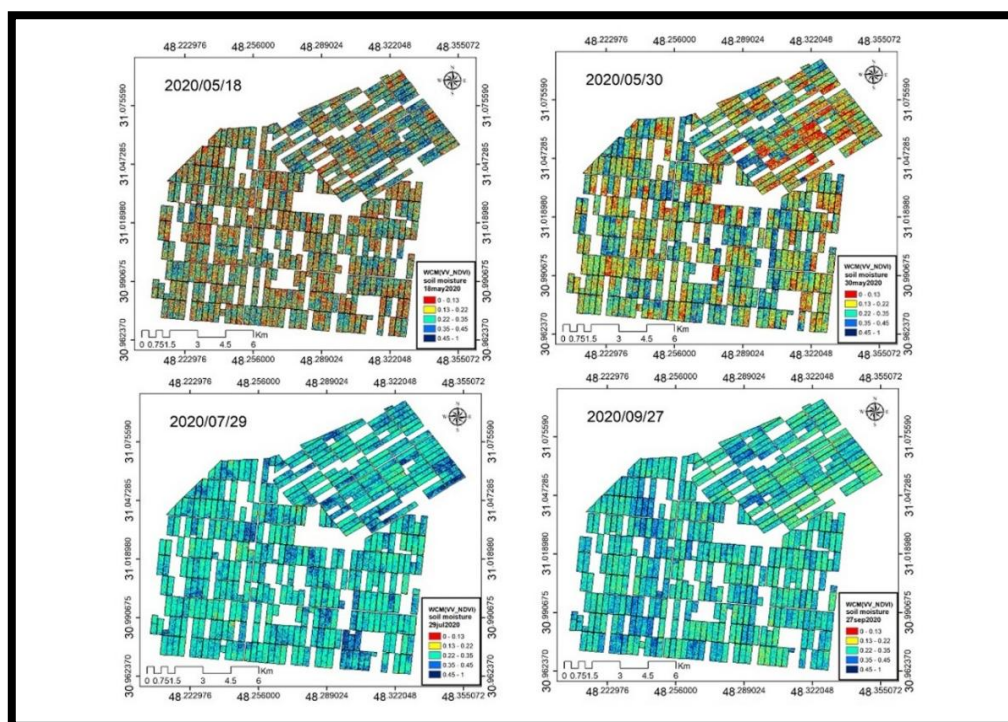
¹ Near-Infrared

² red

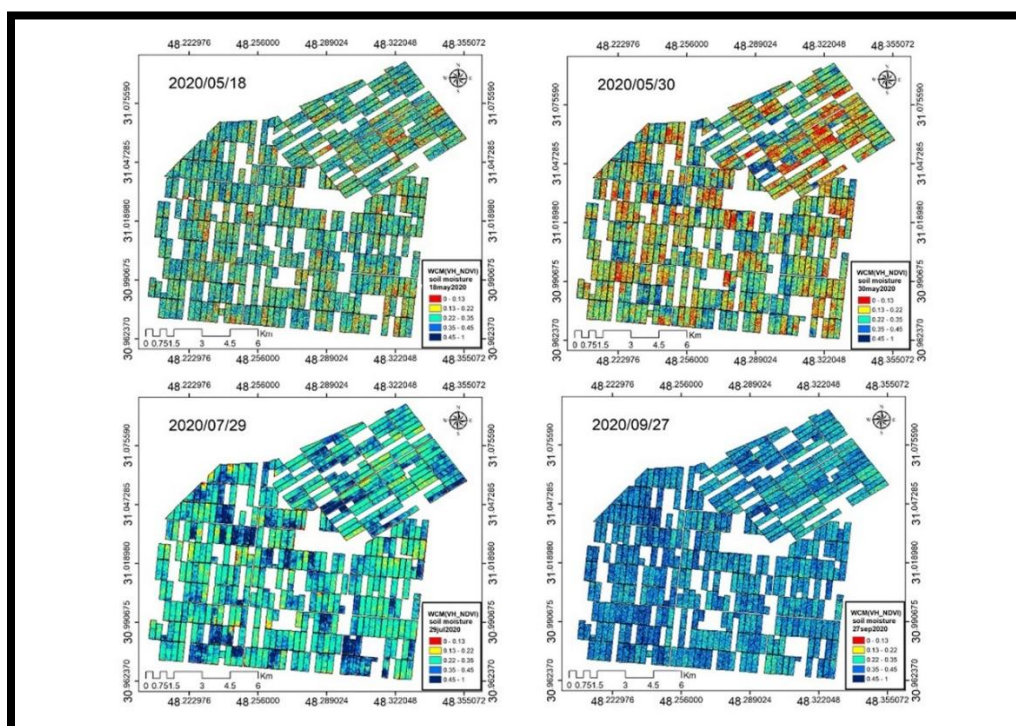
³ Root Mean Square Error



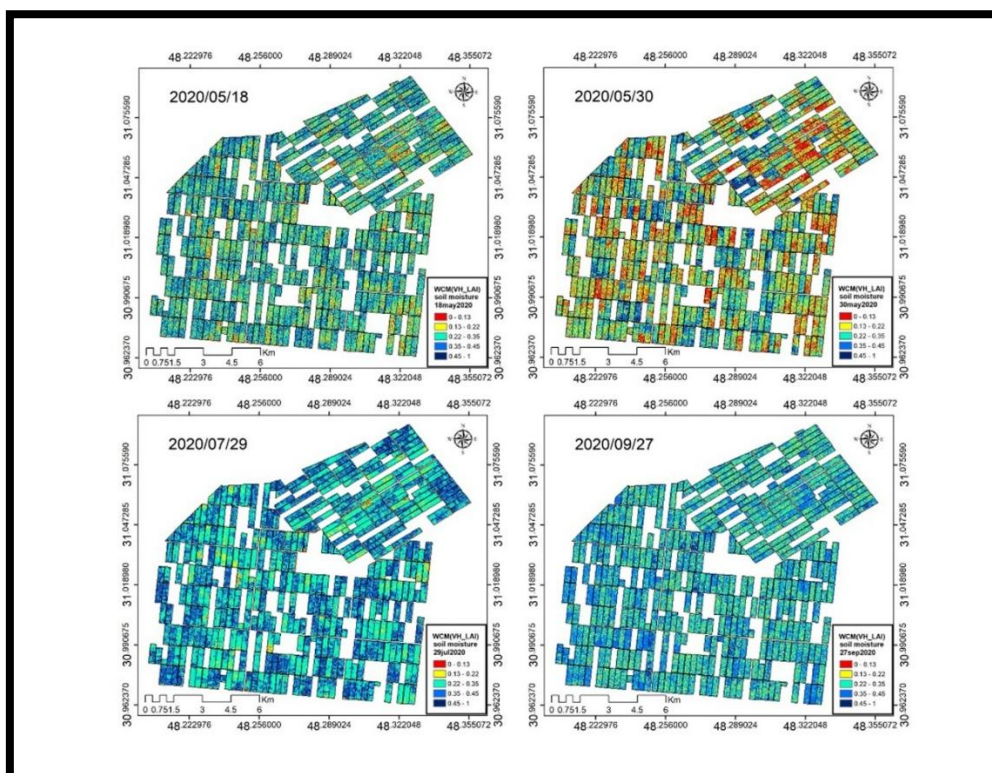
شکل ۴: نقشه رطوبت خاک مدل WCM با استفاده از شاخص LAI و قطبش VV



شکل ۵: نقشه رطوبت خاک مدل WCM با استفاده از شاخص NDVI و قطبش VV



شکل ۶: نقشه رطوبت خاک مدل WCM با استفاده از شاخص NDVI و قطبش VH



شکل ۷: نقشه رطوبت خاک مدل WCM با استفاده از شاخص LAI و قطبش VH

نتایج حاصل از مدل سازی و صحت سنجی مدل ها برای تصویربرداری در جدول های (۲) و (۳) ارائه شده است. حالات مختلف ورودی و همچنین تاریخ های مختلف

جدول ۲: 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

جدول ۳: 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	-۰/۰۸۱۹	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

(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

در این جدول ضرایب مدل WCM (A, B, C, D) با استفاده از شاخص های LAI و $NDVI$ در تاریخ های 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

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 به طور 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 به دست آمده‌اند، می‌توان به صورت دقیق‌تر و پیش‌بینی شده، برنامه ریزی آبیاری را انجام داد. با توجه به طبقه‌بندی فوق و تحلیل نقشه‌های رطوبتی، میزان آبیاری را بهینه‌تر و با رویکرد پیشگیرانه تنظیم کرده و از مصرف آب صحیح و بهینه برای کشت نیشکر استفاده کرد.

در برنامه ریزی آبیاری مزارع با استفاده از محصولات رطوبت خاک، 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 می‌انجامد و برای برنامه ریزی آبیاری بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

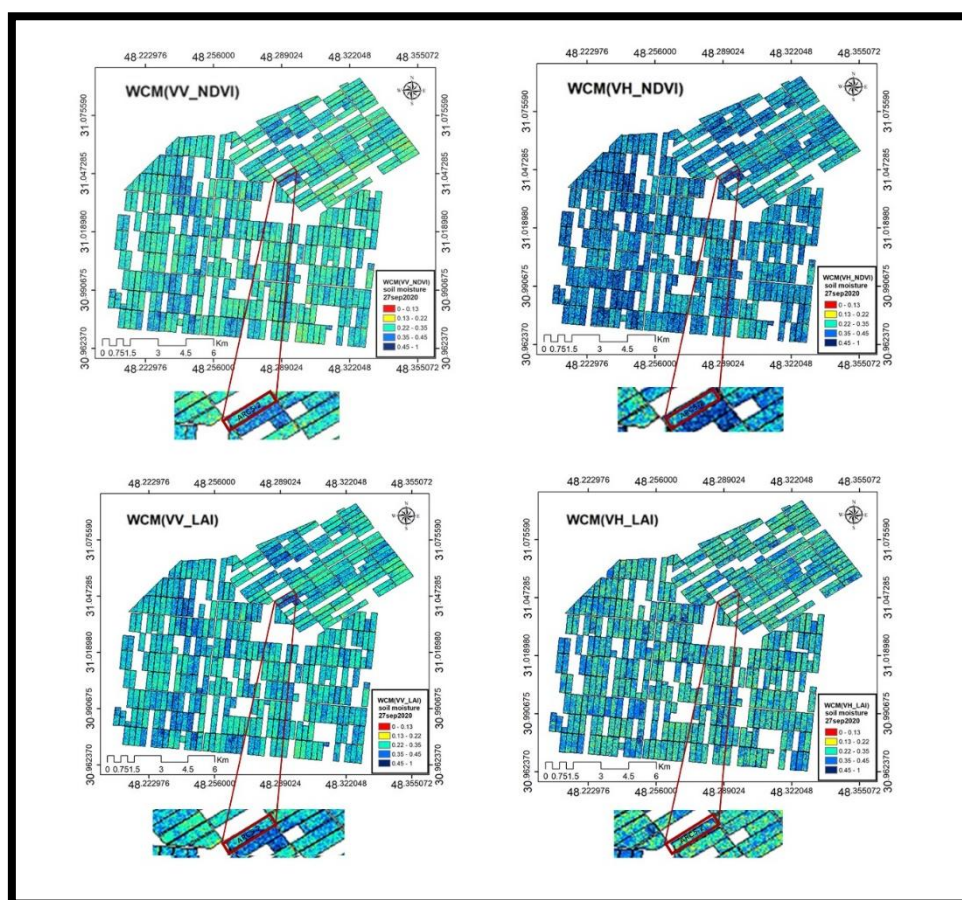
نزدیک‌تر می‌شویم، دقت برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل WCM افزایش می‌یابد. همچنین، مدل WCM با استفاده از دو نوع قطبش VV و VH مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که قطبش VV دقت بهتری نسبت به قطبش VH دارد. این نتایج با توجه به روابط علمی و مدل‌سازی ارائه شده قابل تفسیر و استنتاج می‌باشند.

۳-۱- برنامه ریزی 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 رطوبت خاک در مدل‌های مختلف را در تاریخ ۲۷ سپتامبر نشان می‌دهد. یک مزرعه براساس زمان شروع و پایان آبیاری انتخاب شده‌است. در مزرعه ۲-ARC5 از تاریخ ۱۸ تا ۲۱ سپتامبر آبیاری صورت گرفته‌است. با توجه به بافت سنگین تا نیمه سنگین مزارع نیشکر، رطوبت خاک در مرحله ظرفیت زراعی، با توجه به تخلیه مجاز رطوبتی نیشکر، معمولاً با گذشت سه تا شش روز (بستگی به مرحله رشد و تاج پوشش گیاه) از پایان آبیاری مزرعه باقی می‌ماند. با در نظر گرفتن رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در طول فصل رشد نیشکر و طبقه‌بندی‌های صورت گرفته در مزارع کشت و صنعت امیرکبیر، مزرعه ۲-ARC5 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، می‌توان برای مدیریت رطوبت خاک و برنامه ریزی آبیاری مزارع نیشکر از طبقه‌بندی زیر استفاده کرد: مناطقی 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،



شکل ۸: 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 سنتینل ۱ و قطبش‌های VV و VH و همچنین تصاویر نوری سنتینل ۲ و شاخص‌های 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 داده‌های 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 به دست آمد که حاصل بررسی‌های 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 به کار 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

دقت و $RMSE$ برآورد رطوبت خاک به صورت روزانه تقریباً بین ۰/۳ تا ۰/۱۵ بوده که در مقابل سایر حالات مورد بررسی و با توجه به نتایج $RMSE$ مقالات پیشین، مقدار قابل قبولی می‌باشد.

صورت روزانه، ماهانه، فصلی و تمام دوره رشد گیاه نیشکر بررسی شده و مشخص شد که جهت برآورد دقیق تر رطوبت خاک بهتر است به صورت روزانه مدل اجرا شده و نتایج حاصله جهت ارائه برنامه آبیاری بهینه مورد استفاده قرار گیرند. براساس این پژوهش، میزان

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

- 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, Ayca 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 different 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.



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

Reihane Leghayat¹, Saeid Hamzeh^{2*}, Najmeh Neisani Samani², Jamal Mohammadi Moalezade³, Abed Ali Naseri⁴

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.