

برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور و ارزیابی آن با داده‌های مزرعه‌ای (مطالعه موردی دشت هرمزآباد)

محمد تاج سعید^۱، مهدی قیصری^۱، الهام فاضل نجف‌آبادی^{۱*}، رضا جعفری^۲ و الهه سیفی پور نقنه^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۳۱)

چکیده

رطوبت خاک یکی از عوامل مهم و تعیین کننده برای رشد گیاه، میزان تبخیر و تعرق و همچنین مدیریت آبی در مزرعه است. به همین منظور سنجش آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. سطح زمین دارای تنوع زیادی در رطوبت خاک بوده و سنجش و اندازه‌گیری آن به شیوه‌های مختلف انجام می‌گیرد. به دلیل مشکلاتی که روش‌های تماسی اندازه‌گیری رطوبت خاک دارد، امروزه سنجش از دور از این جهت که امکان تحلیل و پایش رطوبت خاک را در مقیاس‌های بزرگ و جهانی فراهم می‌کند مورد توجه واقع شده است. در این تحقیق از داده‌های ماهواره‌ای و رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در مزارع انتخابی واقع در دشت هرمز آباد استفاده و این داده‌ها تحلیل و مقایسه شده‌اند. داده‌های ماهواره سنتینل-۲ با سامانه گوگل ارث انجین تحلیل شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر چه استفاده از شاخص‌های سه‌گانه جهت کاربرد در مدل OPTRAM برای برآورد رطوبت دقت بالایی ندارند، ولی با این وجود استفاده از شاخص گیاهی EVI نتایج بهتری نسبت به دو شاخص دیگر ارائه کرده است.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، شاخص گیاهی، ماهواره سنتینل-۲، مدل OPTRAM

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: efazel@iut.ac.ir

مقدمه

رطوبت خاک یکی از عوامل مهم در تعیین سلامت و عملکرد گیاهان و بهبود کشاورزی است. رطوبت خاک نقش مهمی در تعادل انرژی زمین و اتمسفر داشته و می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر فرایندهای هیدرولوژیکی و هواشناسی داشته باشد. این تأثیرات می‌تواند شامل تبخیر-تعرق گیاهان، تشکیل ابر و بارش، تغذیه آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها، تغییرات دما و رطوبت محیط و سایر فرایندهای زیست‌محیطی باشد (۲۴). دانستن اینکه خاک چه زمانی خشک است، از بروز اثرات تنش خشکی و کاهش عملکرد محصول در بخش کشاورزی جلوگیری می‌کند. اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌طور کلی به‌صورت تماسی و غیرتماسی (سنجش‌ازدور) تقسیم می‌شود. روش‌های تماسی اندازه‌گیری رطوبت خاک خود به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مستقیم، مقادیر جرمی یا حجمی رطوبت را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند. اما روش‌های غیرمستقیم مانند نوترون پروب نیازمند اندازه‌گیری یک عامل دیگر است که بر رطوبت خاک تأثیر گذاشته و سپس مقدار رطوبت خاک تخمین زده می‌شود. این روش‌ها به زمان زیاد و تجهیزات خاص نیاز داشته و معمولاً برای اندازه‌گیری در مقیاس‌های کوچک استفاده می‌شوند (۱۳ و ۱۴).

با توجه به تحقیقات انجام شده، استفاده از تکنولوژی سنجش از دور دارای مزایای فراوان است. با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای، می‌توان اطلاعات رطوبت خاک را در یک منطقه وسیع و در طول زمان به‌دست آورد. این تکنیک‌ها قابلیت تکرار در بازه‌های زمانی منظم و دسترسی به بایگانی اطلاعات گذشته را فراهم می‌کنند (۱۱). استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای به محققان امکان می‌دهد تا اطلاعات جدید در مورد پوشش گیاهی و تغییرات سطح زمین را در مقیاس‌های مختلف به‌دست آورند. همچنین اطلاعات به‌روز و جامعی را درباره روند توسعه و تغییرات سطحی در پوشش زمین را فراهم می‌کند (۲۳). از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به جمع‌آوری داده‌ها در مناطق گسترده و کاهش هزینه نمونه‌برداری مستقیم خاک

اشاره کرد (۶، ۱۳ و ۱۹). مدل‌های کاربردی در زمینه بررسی رطوبت خاک را می‌توان در دو دسته مدل‌های راداری و نوری حرارتی طبقه‌بندی کرد. با توجه به هدف این پژوهش می‌توان اظهار داشت که مدل کاربردی در دسته نوری مدل ذوزنقه اپتیکی Optical TRapezoid Model (OPTRAM) و مدل استفاده شده در دسته حرارتی، Thermal-Optical TRapezoid Model (TOTRAM) است (۲۰). در مدل‌های حرارتی برای تخمین رطوبت خاک، از دمای سطح زمین استفاده شده و این روش بر پایه اندازه‌گیری تغییرات دما به‌دلیل رطوبت در خاک استوار است (۲۱). برای بهبود دقت تخمین رطوبت خاک، از شاخص‌های پوشش گیاهی نیز می‌توان استفاده کرد. برای ارزیابی تنش آبی در گیاهان، اندازه‌گیری دما از طریق امواج مادون قرمز که توسط تاج پوش گیاه منتشر می‌شود، می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مورد استفاده قرار گیرد (۲). روش ذوزنقه شاخص پوشش گیاهی - دما (TOTRAM)، که توسط موران و همکاران در سال ۱۹۹۴ ارائه شد (۱۶)، یک شاخص به نام شاخص کمبود آب را بر اساس دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی محاسبه می‌کند. استفاده از این روش در مناطق با پوشش گیاهی کم مفید است، اما با مشکلاتی مانند نیاز به داده‌های حرارتی و پارامترسازی مکرر مواجه است. برای حل این مشکلات، روش‌های اپتیکی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای روش ذوزنقه شاخص پوشش گیاهی - دما مطرح شده‌اند (۲۰). مدل OPTRAM که یک مدل اپتیکی بوده و در این تحقیق استفاده شده است، فرض می‌کند رابطه خطی بین شاخص Shortwave Infrared Transformed Reflectance (STR) و شاخص پوشش گیاهی مانند شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) وجود دارد و شکل این توزیع دقیقاً مانند یک ذوزنقه است. به‌علاوه، OPTRAM تنها برای تخمین رطوبت خاک استفاده شده، و تاکنون مطالعات اندکی درباره کارایی آن در برآورد محتوای آب پوشش گیاهی انجام شده است. این مسئله به‌وضوح نشان می‌دهد که مدل OPTRAM نیاز به انجام تحقیقات بیشتر

خشکی عمودی اصلاح شده دوم (MPDI) و شاخص خشکی دما-گیاهی (TVDI) Temperature-Vegetation Dryness Index نشان داد که TVMDI دقیق‌ترین شاخص بود. این محققین به‌طور کلی به این نتیجه رسیدند که TVMDI پتانسیل زیادی برای نقشه‌برداری از خشکی در مناطق مختلف داشته و یک شاخص امیدوارکننده برای آگاهی زودهنگام از مدیریت خطر خشکی است (۲).

صادقی و همکاران (۲۰۱۷) رطوبت سطحی خاک را بر اساس مدل OPTRAM، با استفاده از مشاهدات Landsat-8 و Sentinel-2 برای حوضه آبریز Walnut Gulch و Little Washita برآورد کرده و با داده‌های واقعی رطوبت خاک مقایسه کردند. نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی‌های مدل OPTRAM و TOTRAM مقایسه‌پذیر بوده، و مزیت مدل OPTRAM در این است که تنها نیازمند مشاهدات در دامنه فرکانس‌های نوری است. این محققین عنوان کردند که مدل OPTRAM تنها نیاز به یک پارامتری کردن عمومی برای موقعیت مشخصی دارد، که پیشرفت قابل توجهی بوده و راهی جدید برای حسگری از دور رطوبت خاک را در پیش می‌گیرد (۲۰). یوسف زاده و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل دوزنقه‌ای TOTRAM و OPTRAM برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ رطوبت خاک را برای حوضه رودخانه سیمینه‌رود بررسی کردند. داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده در این مطالعه از ماهواره Landsat 8 به‌دست آمده که در طول موج‌های قابل مشاهده است. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل OPTRAM بهتر و دقیق‌تر از مدل TOTRAM در پیش‌بینی رطوبت خاک بوده است (۲۲).

بورردون و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیق خود، پتانسیل تصاویر ماهواره‌ای نوری و حرارتی برای پایش تغییرات زمانی و مکانی عمق سطح ایستابی (WTD) را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مدل دوزنقه‌ای چندبعدی برای پایش رطوبت خاک در مناطق دارای خاک‌های معدنی به‌کار برده شده است. نتایج نشان داد که شاخص OPTRAM به‌طور معناداری (با مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵)

داشته و می‌تواند از نظر کارایی و دقت خود در تخمین رطوبت خاک و محتوای آب‌پوشش گیاهی بهبود یابد (۲۰). هدف این پژوهش کاربرد یکی از مدل‌های نوری-حرارتی و بررسی دقت استفاده از آن در برآورد رطوبت است، در ادامه به بررسی منابع در زمینه کاربرد مدل‌های نوری-حرارتی پرداخته می‌شود.

بررسی منابع

استفاده از انعکاس مادون قرمز به‌خصوص در باندهای جذب آب، به ما این امکان را می‌دهد وضعیت آب خاک و گیاه را ارزیابی کنیم. بر اساس مدل‌های انتقال تابشی دو جریان کوبلکا و مونک (۱۵)، محققینی همچون صادقی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که بین انعکاس تبدیل‌شده موج کوتاه مادون قرمز (STR) و رطوبت خاک (θ) رابطه‌ای خطی وجود دارد (۲۰). بر اساس این رابطه، مدلی به نام مدل دوزنقه اپتیکی (OPTRAM) توسعه داده شد. در این راستا محققینی چون بابائیان و همکاران (۲۰۱۸ و ۲۰۱۹)، امانی و همکاران (۲۰۱۷)، تحقیقات خود را در این زمینه پیش برده‌اند (۲، ۴ و ۵).

امانی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیق خود یک فضای سه‌بعدی از دمای سطح زمین (LST) Land Surface Temperature، شاخص گیاهی عمودی (PVI) Perpendicular Vegetation Index و Soil Moisture (SM) توسعه داده و شاخص جدیدی به نام شاخص خشکی دما - گیاهی - رطوبت خاک Temperature-Vegetation-soil Moisture Dryness Index (TVMDI) تعریف کردند. TVMDI با استفاده از داده‌های محلی محتوای رطوبت خاک، دمای خاک در محل، و همچنین شاخص NDVI ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مقادیر TVMDI با داده‌های دمای خاک محلی و NDVI به‌طور قابل توجهی همبستگی داشتند. علاوه بر این، مقایسه‌ای بین شاخص پیشنهادی و چندین شاخص خشکی مبتنی بر ماهواره، شامل شاخص خشکی عمودی (PDI) Perpendicular Drought Index، شاخص خشکی عمودی اصلاح شده Modified Perpendicular Drought Index (MPDI)، شاخص

درصد خاک رس پیش‌بینی شد که نشان دهنده برآزش خوب ($R^2=0/69$) و خطای جذر میانگین مربعات پایین ($RMSE=0/053 m^3 m^{-3}$) بود (۱).

با توجه به بررسی منابع انجام شده مدل OPTRAM چه از نظر قدرت تفکیک مکانی و زمانی و چه از نظر دقت در تخمین رطوبت سطحی خاک عملکرد بهتر نسبت به مدل TOTRAM داشته است. از آنجاکه OPTRAM در چند سال اخیر توسعه داده شده و تا بحال در مطالعات محدودی به‌کاررفته است، بررسی کارایی و کاربرد این مدل در سایر مناطق جغرافیایی جهان به‌عنوان یک پژوهش مستقل و ناحیه‌بندی وسیع‌تر برای ارزیابی عمومیت و پارامتره بودن آن ضروری است. اگر OPTRAM در مناطق دیگر جهان و در مقیاس‌های مختلف اثبات شود، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قوی و مؤثر در ارزیابی و پایش رطوبت خاک در محیط‌های مختلف به کار گرفته شود. این کار می‌تواند تا حد زیادی به کشف تنش‌های آبی و مدیریت بهتر منابع آب‌و خاک کمک کند. در این تحقیق از مدل OPTRAM استفاده شده، با این تفاوت که در تحقیقات پیشین معمولاً این مدل در مقیاس‌های بزرگ‌تر مورد بررسی قرار گرفته و همچنین از شاخص گیاهی NDVI در فضای STR_VI استفاده شده (Vegetation Index (VI) شاخص گیاهی) ولی در این تحقیق عملکرد مدل OPTRAM با استفاده از شاخص‌های NDVI، Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) و Enhanced Vegetation Index (EVI) در مقیاس مزرعه (۱۰ متر در ۱۰ متر) مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

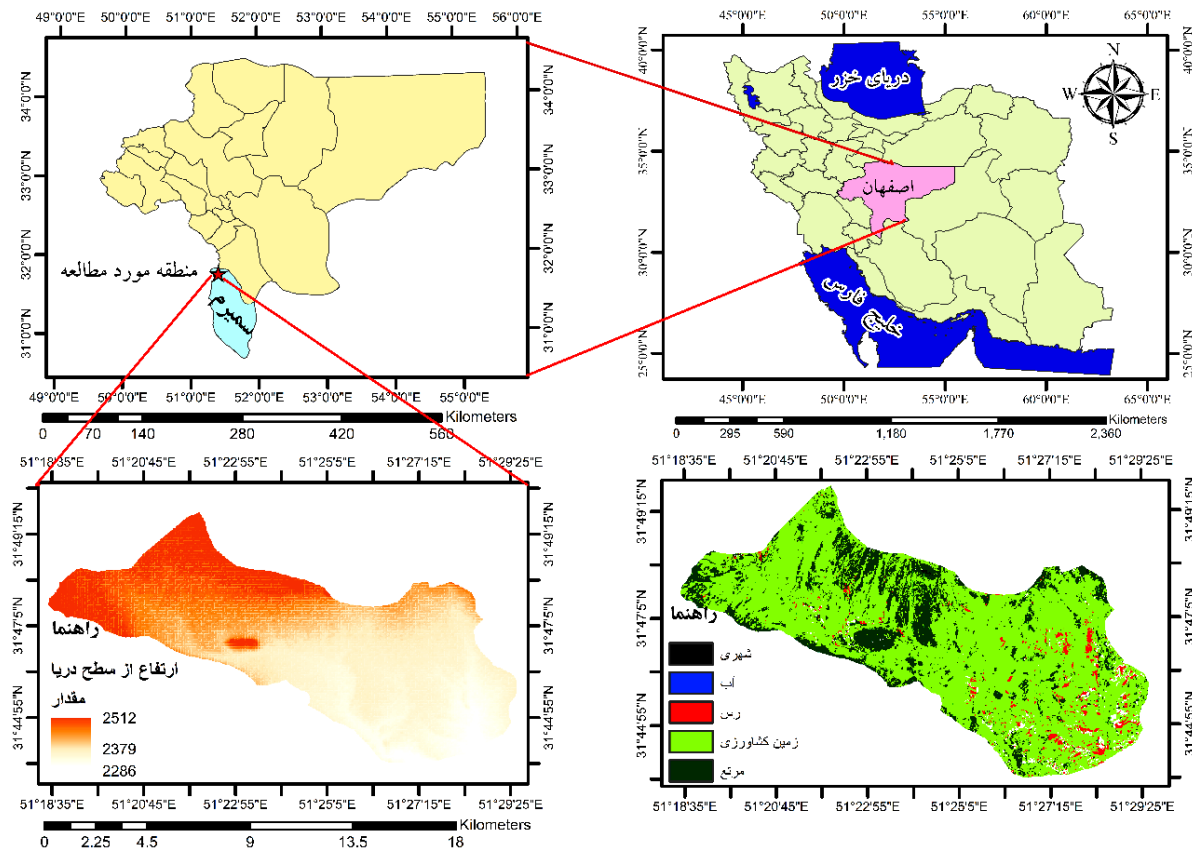
منطقه مورد مطالعه

منطقه هرمزآباد واقع در دشت وردشت در شهرستان سمیرم در جنوب غربی استان اصفهان در مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی، و ۳۱ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۹ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع متوسط ۲۴۰۰ متر از دریا قرار گرفته است (شکل ۱).

با عمق WTD در زمان همبستگی داشت، درحالی‌که مدل TOTRAM آزمون شده چنین ارتباط معناداری با آن نداشت (۶). چن و همکاران (۲۰۲۰) مدل نوری دوزنقه‌ای (OPTRAM) را برای برآورد رطوبت خاک در دشت سانجیانگ، چین، با استفاده از داده‌های سنجنده تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS) و داده‌های رطوبت خاک محلی که از ماه مه تا سپتامبر در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ جمع‌آوری شده بودند، ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که برآوردهای رطوبت خاک مبتنی بر OPTRAM به‌ترتیب دارای RMSE کل از ۰/۰۵ تا ۰/۱۳ cm^3/cm^3 و R^2 از ۰/۱ تا ۰/۵ برای همه سایت‌های مورد بررسی بودند. نتیجه گرفتند، OPTRAM می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ با دقت قابل قبولی برای برآورد رطوبت خاک استفاده شود (۸).

پاندی و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق خود، با استفاده از مدل TOTRAM، با تکیه بر ارتباط دمای سطح زمین (LST) و شاخص تفاوت نرمال‌شده گیاهی (NDVI)، ارزیابی رطوبت خاک را انجام دادند. اعتبارسنجی ارزیابی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ارائه شده در پرتال Visualisation of Earth Observation Data and Archival System (VEDAS) انجام شده است. نتایج مطالعه نشان داد که مدل تقریباً دقت مشابه پرتال VEDAS دارد. این پژوهش برای یک منطقه جغرافیایی بزرگ در ناحیه هوشنگ آباد در ایالت مادیا پرادش، هند، انجام شده است (۱۷).

آچاریا و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود برای پیش‌بینی رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از مدل نوری دوزنقه‌ای (OPTRAM) و ارزیابی امکان بهبود پیش‌بینی‌های OPTRAM با ترکیب داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، خاک و زراعت با الگوریتم جنگل تصادفی استفاده کردند. نتایج نشان داد که رابطه بسیار ضعیفی بین شاخص‌های مرتبط با رطوبت و محتوای رطوبت سطحی خاک وجود دارد که مقادیر R^2 و شیب‌ها به‌ترتیب کمتر از ۰/۱ و ۰/۲ بودند. سپس رطوبت سطحی با استفاده از رگرسیون جنگل تصادفی با استفاده از مقادیر رطوبت OPTRAM، بارندگی و شاخص استاندارد بارش Standardized Precipitation Index (SPI) و



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

پرچم گذاری و مختصات این نقاط ثبت شد تا در زمان تصویربرداری ماهواره ستینل ۲ نمونه برداری از رطوبت خاک در همان زمان انجام شود. نمونه برداری‌ها در روزهایی که آسمان کاملاً صاف و بدون ابر و با دید افقی خوب بود، انجام شد تا میزان خطا به کمترین مقدار خود برسد. با توجه به اینکه کشت سیب‌زمینی به صورت جوی و پشته بود، نمونه برداری خاک شامل یک نمونه از کف جویچه و یک نمونه از وسط پشته بود. نمونه‌ها به منظور تعیین رطوبت وزنی به آزمایشگاه منتقل شده و پس از توزین وزن تر به مدت ۲۴ ساعت داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند. پس از ۲۴ ساعت وزن خشک نمونه اندازه گیری و رطوبت وزنی خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. با ضرب رطوبت وزنی در چگالی ظاهری خاک نیز رطوبت حجمی حاصل شد. لازم به ذکر

منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم سرد کوهستانی با میانگین سالانه دما ۱۱/۴۶ درجه سلسیوس با انحراف معیار ۰/۷ درجه سلسیوس، میانگین دما در سردترین ماه سال ژانویه ۱/۳- و در گرم‌ترین ماه سال یعنی ژوئیه ۲۴/۱۱ درجه سلسیوس، متوسط بارندگی سالانه ۲۳۶ میلی‌متر است (۹). این منطقه با حدود ۱۰۵۴۰ هکتار مساحت دارای ۵۰۰۰ هکتار زمین کشاورزی است. عمده محصولات زراعی این منطقه گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی و یونجه است.

روش کار

در این تحقیق ۱۲ مزرعه تحت کشت سیب‌زمینی در دشت به گونه ای انتخاب شد که در کل دشت امکان اندازه‌گیری وجود داشته باشد. سپس در هر مزرعه سه تا پنج نقطه انتخاب و پرچم گذاری شد. در مجموع ۴۸ نقطه

ب- شاخص طیفی پوشش گیاهی اصلاحی-خاک SAVI
شاخص SAVI برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی بوده و با تصحیح عوامل تغییر رنگ خاک و تأثیرات نوری مختلف در پوشش گیاهی ساخته شده است. این شاخص به صورت زیر تعریف شده است (۲۵):

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)(1+L)}{(NIR + RED + L)} \quad (2)$$

در این معادله، NIR و RED همانند معادله (۱) تعریف شده، L تابعی از پوشش گیاهی بوده و تعیین آن به دانش قبلی از میزان پوشش گیاهی بستگی دارد. به این صورت که برای مقادیر متوسط پوشش گیاهی مقدار L در حدود ۰/۵ برای پوشش گیاهی انبوه صفر یا ۰/۲۵ و برای پوشش گیاهی تنک ۱ در نظر گرفته می‌شود (۲۵).

ج- شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته EVI

یکی دیگر از شاخص مهم در بررسی پوشش گیاهی شاخص EVI است که در بازه ۱- تا ۱ قرار دارد و از مزایای این شاخص کاستن اثرات اتمسفری و پخش آئروسول است (۷).

$$EVI = \frac{G \times (NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)} \quad (3)$$

در این معادله، NIR و RED همچون معادله (۱) تعریف شده است، Blue طول موج آبی، باند B2 سنتینل-۲، L فاکتور تعدیل‌کننده خاک، C1 و C2 ضرایب تصحیح آئروسول است. ضرایب مذکور در الگوریتم محاسبه EVI در ماهواره سنتینل ۲ برابر با $G = 2.5$, $C1 = 6$, $C2 = 7.5$, $L = 1$ است (۷). در حالی که شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) به کلروفیل حساس است، شاخص EVI بیشتر به نوسانات ساختاری پوشش گیاهی مانند شاخص سطح برگ، نوع گیاه، سیمای ظاهری گیاه، حساس بوده و تغییر می‌کند. این دو شاخص پوشش گیاهی در مطالعات مربوطه در مقیاس جهانی همچون شناسایی و تشخیص تغییرات پوشش گیاهی و استخراج پارامترهای بیوفیزیکی آن و گونه‌های مختلف گیاهی، تکمیل‌کننده یکدیگر هستند (۳ و ۱۲).

است که به دلیل تنوع برنامه آبیاری کشاورزان و در حال آبیاری بودن بعضی از نقاط پرچم گذاری شده در زمان عبور ماهواره و همچنین کمبود زمان و نیروی کار برای نمونه‌گیری رطوبت خاک، لزوماً در هر تاریخ از تمام نقاط پرچم گذاری شده نمونه‌گیری انجام نشده است. در کل تعداد ۱۱۸ نمونه‌گیری رطوبت خاک از ۴۸ ایستگاه‌های پرچم گذاری شده در ۱۲ مزرعه طی دوره رشد سبب زمینی در لحظه تصویربرداری ماهواره سنتینل-۲ اندازه‌گیری و ثبت شد. جدول ۱ تاریخ تصویربرداری ماهواره سنتینل-۲ از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

سنتینل-۲ یک مأموریت ماهواره‌ای آژانس فضایی اروپا است و شامل دو ماهواره سنتینل-۲a و سنتینل-۲b است که به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ راه‌اندازی شدند. تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در ۱۳ باند طیفی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و ۲۰ متر برای باندهای طول موج کوتاه مادون قرمز موجود است. در این تحقیق از باند NIR و RED و BLUE با قدرت تفکیک ۱۰ متر و باند SWIR با قدرت تفکیک ۲۰ متر استفاده شده و با انجام تبدیل، تصویر نهایی رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر است. همچنین لازم به ذکر است که تصحیحات رادیومتریک و اتمسفریک بر روی تصاویر انجام شد.

در این تحقیق از سه شاخص NDVI، SAVI و EVI به منظور ترسیم فضای STR_VI استفاده شد که در ادامه تشریح می‌شود.

الف- شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI

این شاخص به صورت معادله زیر تعریف شده است (۱۰ و ۱۸):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

در این معادله، NIR طول موج مادون قرمز نزدیک، باند B8 سنتینل-۲، و RED طول موج قرمز، باند B4 سنتینل-۲ است. NDVI شاخصی برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی و سلامت آن است. مقدار NDVI معمولاً بین ۱- و ۱ قرار دارد (۱۰ و ۱۸).

جدول ۱. تاریخ تصویربرداری ماهواره سنتینل ۲ و برداشت نمونه‌های میدانی

شناسه تصویر	تاریخ تصویربرداری ماهواره	برداشت نمونه‌های میدانی
20220726T071631_20220726T073002_T39SWR	۰۷/۲۶/۲۰۲۲	(۰۷/۲۶/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۵/۰۴
20220802T070631_20220802T071945_T39SWR	۰۸/۰۲/۲۰۲۲	(۰۸/۰۲/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۵/۱۱
20220812T070631_20220812T071617_T39SWR	۰۸/۱۲/۲۰۲۲	(۰۸/۱۲/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۵/۲۱
20220817T070629_20220817T071835_T39SWR	۰۸/۱۷/۲۰۲۲	(۰۸/۱۷/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۵/۲۶
20220830T071619_20220830T072134_T39SWR	۰۸/۳۰/۲۰۲۲	(۰۸/۳۰/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۶/۰۸
20220901T070631_20220901T071654_T39SWR	۰۹/۰۱/۲۰۲۲	(۰۹/۰۱/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۶/۱۰
20220911T070631_20220911T071750_T39SWR	۰۹/۱۱/۲۰۲۲	(۰۹/۱۱/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۶/۲۰
20221006T070739_20221006T071407_T39SWR	۱۰/۰۶/۲۰۲۲	(۱۰/۰۶/۲۰۲۲) ۱۴۰۱/۰۷/۱۴

باتوجه به این فرض که همبستگی و رابطه خطی بین محتوای آب خاک و مقدار پوشش گیاهی برقرار است، انتظار می‌رود در فضای STR-VI یک شکل مثلثی یا دوزنقه ای ایجاد شود، که ضلع بالایی آن خط خاک مرطوب و ضلع پایین خط خاک خشک باشد (شکل ۲).

$$STR_d = i_d + s_d VI \quad (6)$$

$$STR_w = i_w + s_w VI \quad (7)$$

در دو معادله اخیر VI شاخص گیاهی است که می‌توان از هر یک از شاخص‌های گیاهی NDVI، SVAI یا EVI استفاده کرد، i_d نشان‌دهنده کمترین مقدار STR و i_w نشان‌دهنده بیشترین مقدار STR و s_d و s_w به ترتیب شیب خط خاک خشک و مرطوب که در شکل ۲ قابل مشاهده هستند و از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$s_w = \frac{i_w - STR_{maxFC}}{VI_{BS} - VI_{FC}} \quad (8)$$

$$s_d = \frac{i_d - STR_{minFC}}{VI_{BS} - VI_{FC}} \quad (9)$$

در معادلات بالا STR_{maxFC} بیشترین مقدار STR در ناحیه پوشش گیاهی کامل، STR_{minFC} کمترین مقدار STR در ناحیه

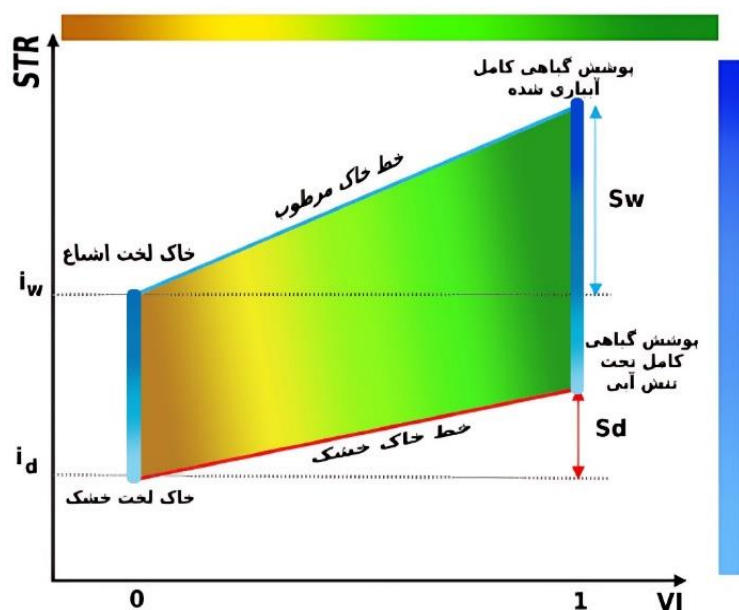
مدل OPTRAM: مدل دوزنقه‌ای مرئی (OPTRAM) که در ابتدا توسط کوبلکا و مونک (۱۵) تحت عنوان "مدل انتقال تابشی دوگانه" پایه‌گذاری شده، به منظور برآورد رطوبت خاک در محدوده طول موج مرئی استفاده می‌شود. این مدل سپس توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۷) به عنوان یک مدل فیزیکی برای نمایش ارتباط خطی بین رطوبت خاک و انعکاس مادون قرمز کوتاه توسعه یافت (۲۰):

$$SM = \frac{(\theta - \theta_d)}{(\theta_w - \theta_d)} = \frac{(STR - STR_d)}{(STR_w - STR_d)} \quad (4)$$

در این معادله، SM، رطوبت خاک نرمال شده توسط حداقل رطوبت خاک خشک (θ_d) و حداکثر رطوبت خاک مرطوب (θ_w) و STR انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه، که با استفاده از معادله ۵ محاسبه می‌شود. اندیس‌های d نشان‌دهنده شرایط خاک خشک، و w نشان‌دهنده شرایط خاک مرطوب است. همچنین STR_d انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه در لبه خاک خشک، و STR_w انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه در لبه خاک تر بوده که از روابط ۶ و ۷ قابل محاسبه هستند.

$$STR = \frac{(1 - SWIR)^2}{25WIR} \quad (5)$$

در معادله (۵)، SWIR نشان‌دهنده مادون قرمز موج کوتاه است.



شکل ۲. ترسیم مدل OPTRAM بر اساس توزیع‌های پیکسل در فضای STR_VI

نتایج

در این بخش ابتدا بر اساس فرض رابطه خطی بین شاخص STR و شاخص پوشش گیاهی و تشکیل یک توزیع دوزنقه‌ای در مدل OPTRAM و با توجه به سه شاخص پوشش گیاهی استفاده شده در این تحقیق به بررسی فضای STR_VI پرداخته خواهد شد.

توزیع پیکسلی در فضاهای STR_EVI، STR_SAVI و STR_NDVI با ۵۰۰۰ نمونه‌گیری در گوگل ارث انجین برای تاریخ‌های مختلف رسم شد و خطوط لبه‌های خاک خشک و مرطوب به دست آمد. با توجه به تعداد زیاد تاریخ‌ها و حجم بالای اطلاعات نتایج این بخش تنها برای سه تاریخ در شکل ۳ ارائه شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، خطوط سبز بیانگر خط خاک مرطوب و خطوط قرمز معرف خط خاک خشک هستند. بر اساس آنچه که در تحقیقات پیشین مشاهده شده شیب خط خاک خشک و مرطوب مثبت بوده و این بدان معناست که با افزایش شاخص گیاهی، مقدار STR نیز افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه در تمامی تاریخ‌ها به جز ۱۱ مرداد ماه دیده شد.

پوشش گیاهی کامل، VI_{BS} مقدار شاخص گیاهی در محدوده خاک لخت که مقدار آن صفر یا نزدیک به صفر است، و VI_{FC} مقدار شاخص گیاهی در محدوده پوشش گیاهی کامل است.

با جایگذاری معادلات (۵)، (۶) و (۷) در معادله (۴) رطوبت خاک تابعی از یک شاخص گیاهی (VI) و انعکاس بازگشتی مادون‌قرمز کوتاه (STR) برای هر پیکسل محاسبه شد.

$$SM = \frac{i_d + s_d VI - STR}{i_d - i_w + (s_d - s_w) VI} \quad (10)$$

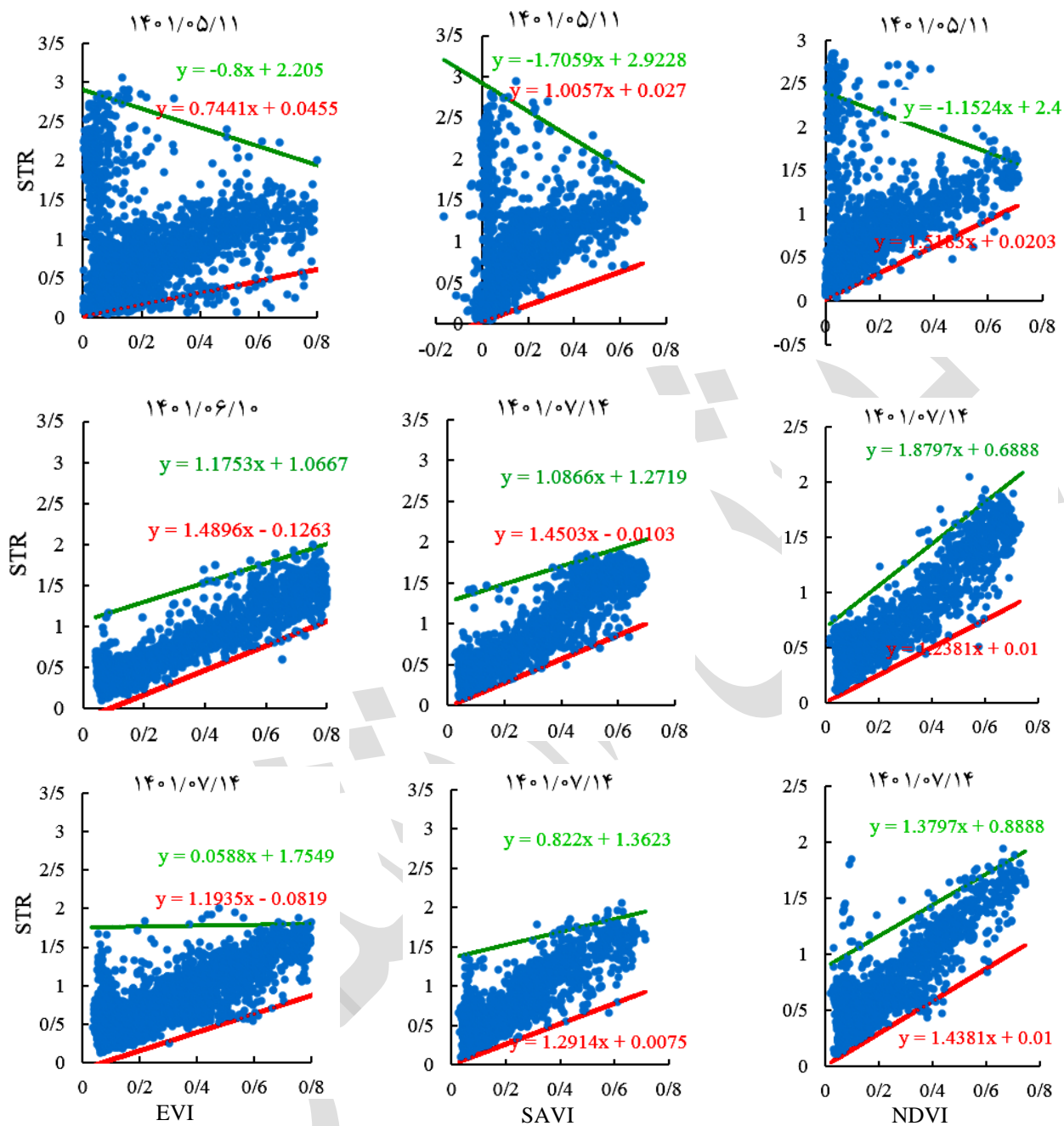
شاخص‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق RMSE، NRMSE و R^2 هستند که از طریق روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SM_s - SM_m)^2}{n}} \quad (11)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{SM_s} \times 100 \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (SM_s - SM_m)^2}{\sum_{i=1}^n (SM_s - \overline{SM_m})^2} \quad (13)$$

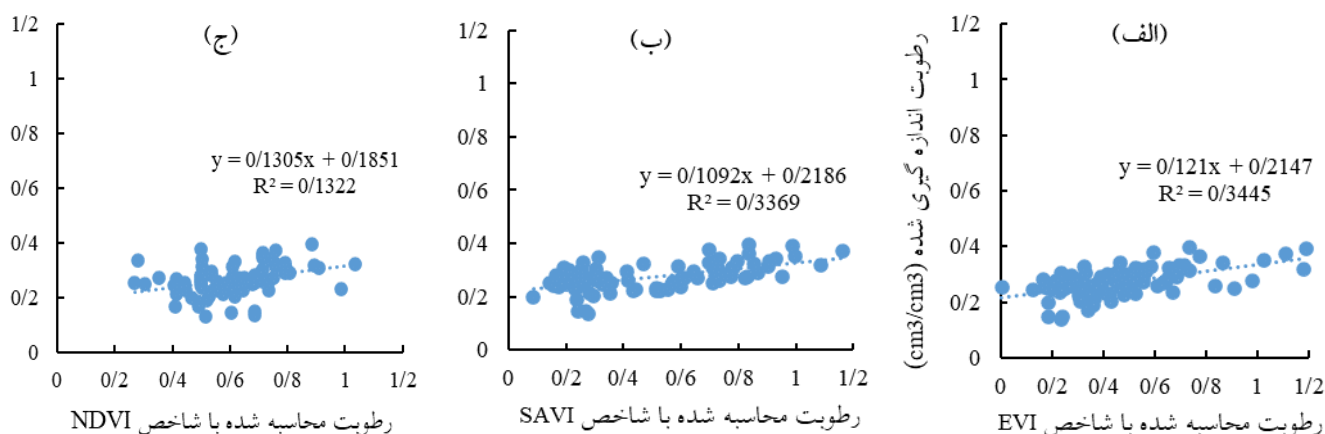
در معادلات بالا SM_s میزان رطوبت محاسبه شده و SM_m رطوبت اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳. مقایسه شاخص‌ها در چارچوب خطوط لبه‌های خاک خشک و تر

لبه‌های خاک خشک و خاک مرطوب، رطوبت خاک به روش OPTRAM با استفاده از معادله ۱۰ به دست می‌آید. نتایج حاصل از محاسبات و مقایسه با داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین پارامترهای آماری محاسبه شده برای خطوط برآزش داده شده در جدول ۳ آورده شده است.

در تاریخ ۱۱م مرداد شیب خط خاک مرطوب منفی به دست آمده که دلیل آن را می‌توان به وجود ابر در قسمت جنوب شرقی دشت نسبت داد. وجود ابر در بالای دامنه کوه باعث شده که این نمونه‌ها مقادیر کم شاخص گیاهی را در مقابل مقادیر زیاد STR نشان دهند. با توجه به شیب‌های به دست آمده از معادلات خطوط



شکل ۴. محاسبه رطوبت محاسبه شده با شاخص‌های سه‌گانه و رطوبت اندازه‌گیری شده

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل‌های OPTRAM برای محاسبه رطوبت خاک در تمام هفت تاریخ اندازه‌گیری شده

N	NRMSE	RMSE	R	فضای STR_VI	مدل
۱۰۷	۴۶	۰/۲۵۹	۰/۵۸۶**	STR_EVI	OPTRAM
۱۰۷	۶۰	۰/۲۷۸	۰/۵۸**	STR_SAVI	
۱۰۷	۷۷	۰/۸۳۴	۰/۴۱۷	STR_NDVI	

** سطح معنی داری ۹۹ درصد را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل ۴ برمی‌آید، نتایج مدل OPTRAM در فضای STR_EVI دقت بالاتر نسبت به مدل OPTRAM در فضای STR_SAVI دارد. اما در کل نتایج نشان می‌دهند که مدل OPTRAM در مقیاس یک پیکسل ۱۰ متر در ۱۰ متر در برآورد رطوبت خاک ضعیف است.

با توجه به آنچه گفته شد در تاریخ ۱۱ مرداد ماه وجود ابر در قسمت جنوب شرقی دشت مشاهده شد. همچنین با توجه به شب منفی به‌دست آمده برای خط خاک مرطوب در این نمونه، می‌توان دلیل نتایج ضعیف را حضور اعداد این نمونه در میان نمونه‌ها دانست. لذا در مرحله بعد اقدام به حذف نمونه‌های این تاریخ شد و محاسبات مجدداً تکرار شد. نتایج پارامترهای آماری حاصل از محاسبات جدید در جدول ۴ ارائه شده است.

همان‌گونه که نتایج جدول ۴ نیز نشان می‌دهد، علی‌رغم حذف داده‌های تاریخ ۱۱ مرداد ماه همچنان مقادیر پارامترهای آماری حاکی از این است که مدل OPTRAM در مقیاس یک پیکسل ۱۰ متر در ۱۰ متر در برآورد رطوبت خاک ضعیف است. با توجه به نتایج حاصل و اینکه نتایج مدل OPTRAM در فضای STR_EVI دقت بالاتر نسبت به دو مدل دیگر داشته است، از رابطه رگرسیونی به‌دست آمده (شکل ۴) به‌منظور اعتبارسنجی استفاده شد. این کار با استفاده از ۱۱ داده که در بین نمونه‌های قبلی وجود نداشت انجام شد. سپس نتایج به‌دست آمده در مقابل نمونه‌های رطوبت خاک ترسیم شدند (شکل ۵).

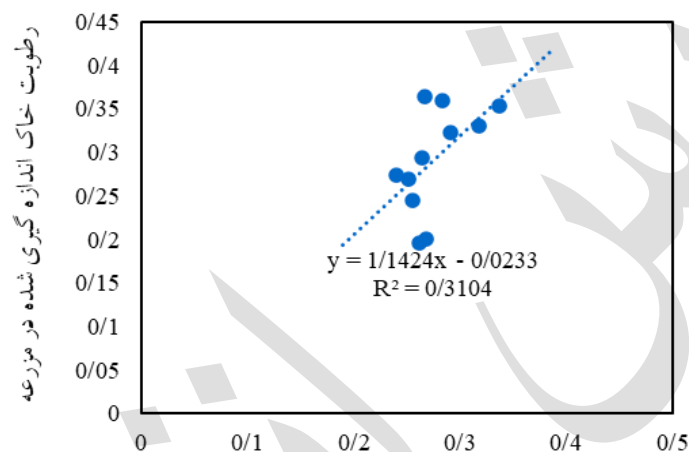
نتیجه ارزیابی با R^2 برابر با ۰/۳۱ و r برابر با ۰/۵۶ در سطح ۹۵ درصد معنی دار نشان داد. همچنین مقدار جذر میانگین مربع خطا (RMSE) برابر ۰/۰۵ متر مکعب بر متر مکعب به‌دست آمد (جدول ۵).

همچنین با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین نقشه‌های تغییرات رطوبت خاک در چهار تاریخ از فصل کشت به‌عنوان خروجی مدل OPTRAM در فضای STR_EVI ترسیم شد. (شکل ۶).

جدول ۴. نتایج ارزیابی مدل‌های OPTRAM برای محاسبه رطوبت خاک با حذف داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت در ۱۱م مرداد

N	NRMSE	RMSE	R	فضای STR_VI	مدل
۸۵	۵۸	۰/۲۶۸	۰/۶۷۵**	STR_EVI	
۸۵	۷۱	۰/۳۴۸	۰/۶۱۹**	STR_SAVI	OPTRAM
۸۵	۸۱	۰/۸۸۳	۰/۴۲۸	STR_NDVI	

** سطح معنی‌داری ۹۹ درصد را نشان می‌دهد

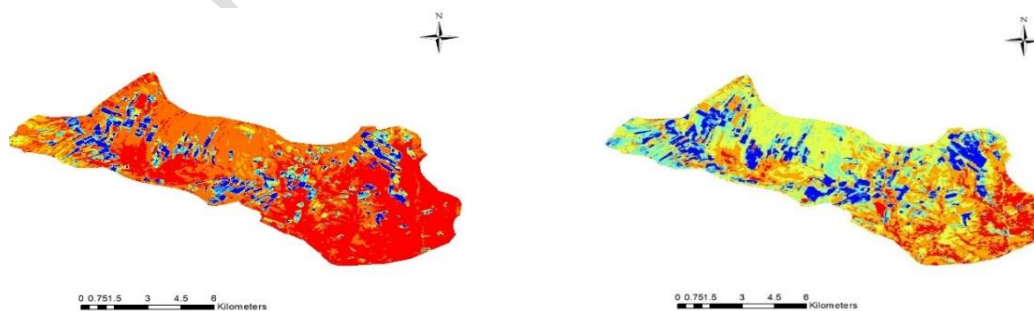


رطوبت خاک تخمین زده شده از رابطه رگرسیون

شکل ۵. مقایسه رطوبت تخمین‌زده شده و اندازه‌گیری شده برای ۱۱ نمونه ارزیابی

جدول ۵. نتایج ارزیابی مدل OPTRAM در فضای STR_EVI با ۱۱ نمونه رطوبت خاک مزرعه‌ای

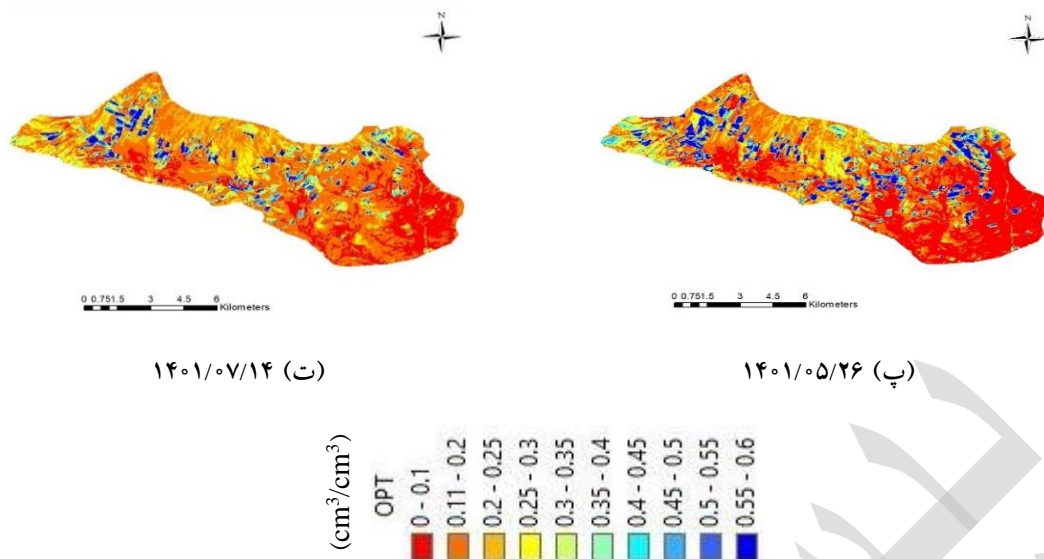
NRMSE	RMSE	r	فضای STR_VI	مدل
۱۸	۰/۰۵	۰/۵۶*	STR_EVI	OPTRAM



۱۴۰۱/۰۵/۲۱ (ب)

۱۴۰۱/۰۵/۰۴ (الف)

شکل ۶. تغییرات رطوبت خاک مدل OPTRAM با استفاده از فضای STR_EVI



شکل ۶. تغییرات رطوبت خاک مدل OPTRAM با استفاده از فضای STR_EVI (ادامه)

رطوبت اندازه‌گیری شده مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر چه مدل OPTRAM برای برآورد رطوبت خاک در یک منطقه local مناسب نیست اما در فضای STR_EVI عملکرد بهتری داشته است. در مرحله بعد، ضرایب به‌دست آمده از معادله رگرسیون خطی در فضای STR_EVI برای صحت‌سنجی ۱۱ نمونه رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در مزرعه استفاده و نتایج R^2 برابر با ۰/۳۱ و r برابر با ۰/۵۶ در سطح ۹۵ درصد معنی‌داری آن‌ها را تأیید کرد.

این تصاویر تفاوت رطوبت خاک در مزارع کشت شده و زمین‌های بایر را نشان می‌دهند. همچنین تغییرات رطوبت خاک در چهار تاریخ قابل مشاهده است (شکل ۶).

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده از ۱۲ مزرعه دشت هرمزآباد و داده‌های ماهواره‌ای متناظر آن‌ها انجام شد. داده‌های ماهواره سنتینل-۲ با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین تحلیل شده و رطوبت به‌دست آمده با

منابع مورد استفاده

1. Acharya, U., A. Daigh and P.Oduor. 2022. Soil Moisture Mapping with Moisture-Related Indices, OPTRAM, and an Integrated Random Forest-OPTRAM Algorithm from Landsat 8 Images. *Remote Sensing* 14: 3801. <https://doi.org/10.3390/rs14153801>.
2. Amani, M., B. Salehi, S. Mahdavi, A. Masjedi and S. Dehnavi. 2017. Temperature-vegetation-soil moisture dryness index (TVMDI). *Remote sensing of environment* 197: 1-14.
3. Andalibi, L., A. Ghorbani, R. Darvishzadeh, M. Moameri, Z. Hazbavi, R. Jafari and F. Dadjou. 2022. Multisensor Assessment of Leaf Area Index across Ecoregions of Ardabil Province, Northwestern Iran. *Remote Sensing* 14: 5731. <https://doi.org/10.3390/rs14225731>.
4. Babaeian, E., M. Sadeghi, T. Franz, S. Jones and M. Tuller. 2018. Mapping soil moisture with the Optical TRapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations. *Remote Sensing of Environment* 211: 425-440. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.04.029>.
5. Babaeian, E., P. Sidike, M. Newcomb, M. Maimaitijiang, S. White, J. Demieville, R. Ward, M. Sadeghi, D. LeBauer, S. Jones, V. Sagan and M. Tuller. 2019. A New Optical Remote Sensing Technique for High-Resolution Mapping of Soil Moisture. *Frontiers in Big Data* 2: 37. <https://doi.org/10.3389/fdata.2019.00037>.

6. Burdun, I., M. Bechtold, V. Sagris, V. Komisarenko, G. De Lannoy and Ü. Mander 2020. A comparison of three trapezoid models using optical and thermal satellite imagery for water table depth monitoring in Estonian bogs. *Remote Sensing* 12(12): 1980.
7. Cavalaris, C., S. Megoudi, M. Maxouri, K. Anatolitis, M. Sifakis, E. Levizou and A. Kyparissis. 2021. Modeling of Durum Wheat Yield Based on Sentinel-2 Imagery. *Agronomy* 11(8): 1486. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081486>.
8. Chen, M., Y. Zhang, Y. Yao, J. Lu, X. Pu, T. Hu and P. Wang. 2020. Evaluation of the OPTRAM Model to Retrieve Soil Moisture in the Sanjiang Plain of Northeast China. *Earth and Space Science* 7(6): e2020EA001108. <https://doi.org/10.1029/2020EA001108>.
9. Copernicus Climate Change Service (C3S) 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), (date of access). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
10. Cummings, C., Y. Miao, G. Paiao, S. Kang and F. Fernández. 2021. Corn Nitrogen Status Diagnosis with an Innovative Multi-Parameter Crop Circle Phenom Sensing System. *Remote Sensing* 13(3): 401. <https://doi.org/10.3390/rs13030401>.
11. Edokossi, K., A. Calabia, S. Jin, and Í. Molina. 2020. GNSS-Reflectometry and Remote Sensing of Soil Moisture: A Review of Measurement Techniques, Methods, and Applications. *Remote Sensing* 12(4): 614. <https://doi.org/10.3390/rs12040614>.
12. Firoozi, F., T. Tavosi, and P. Mahmoudi. 2019. Investigating the Sensitivity of Two Vegetation Indices, NDVI and EVI, to Droughts and Wet Periods in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study of the Sistan Plain, Iran. *Geographical Information Science Research Quarterly "Sepehr"*, 28: 163-179 (In Persian).
13. Gomarkechi, Y., and M. Mohasses Mostashari. 2020. Methods of Measuring Soil Moisture in Farms and Orchards. Soil and Water Research Institute, Tehran. (In Persian).
14. Kashyap, B., and R. Kumar. 2021. Sensing Methodologies in Agriculture for Soil Moisture and Nutrient Monitoring. *IEEE Access*, 9: 14095-14121. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052478>.
15. Kubelka, P. 1931. Ein beitrag zur optik der farbanstriche *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* 12: 593-601.
16. Moran, M. S., T. R. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of environment* 49(3): 246-263.
17. Pandey, R., S. Goswami, J. Sarup and S. Matin. 2021. The thermal-optical trapezoid model-based soil moisture estimation using Landsat-8 data. *Modeling Earth Systems and Environment* 7(2): 1029-1037.
18. Rees, W., E. Golubeva, O. Tutubalina, M. Zimin and A. Derkachev. 2020. Relation between leaf area index and NDVI for subarctic deciduous vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 41(22): 8573 - 8589. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1782505>.
19. Rezaei, Y. 2014. Estimation of Soil Moisture Using the Combination of Thermal Images and Vegetation Index. Third National Conference on Sustainable Rural Development Hamedan. (In Persian).
20. Sadeghi, M., E. Babaeian, M. Tuller and S. B. Jones. 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote sensing of environment* 198: 52-68.
21. Verstraeten, W. W., F. Veroustraete, C. J. Van Der Sande, C. I. Grootaers and J. Feyen. 2006. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. *Remote Sensing of Environment* 101(3): 299-314.
22. Yousefzadeh, A., B. Zeinali, K. Valizadeh, A. Sarascanroud and S. A. Sar Eskanrood. 2019. Estimation of Soil Moisture Using a New Visible Trapezoid Model for the Simineh Basin with Landsat 8 Satellite Images. *Hydrogeomorphology* 6: 181-205(In Persian).
23. Zeng, L., B. Wardlow, D. Xiang, S. Hu and D. Li. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment* 237: 111511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511>.
24. Zhao, T., J. Shi, L. Lv, H. Xu, D. Chen, Q. Cui, T. J. Jackson, G. Yan, L. Jia. and L. Chen. 2020. Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities. *Remote Sensing of Environment* 240: 111680.
25. Zhen, Z., S. Chen, T. Yin, E. Chavanon, N. Lauret, J. Guilleux, M. Henke, W. Qin, L. Cao, J. Li, P. Lu and J. Gastellu-Etchegorry. 2021. Using the Negative Soil Adjustment Factor of Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) to Resist Saturation Effects and Estimate Leaf Area Index (LAI) in Dense Vegetation Areas. *Sensors* 21(6): 2115. <https://doi.org/10.3390/s21062115>.