

## بررسی کارایی سنجش از دور طیفی در برآورد رطوبت سطحی خاک و مقایسه آن با

### داده‌های حرارتی به منظور مدیریت آبیاری مزارع نیشکر

جمال محمدی معله‌زاده، سعید حمزه<sup>۱</sup> و عبدعلی ناصری

رئیس اداره سنجش از دور و GIS، مؤسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر، اهواز، ایران.

Jamalmohammadi611@gmail.com

دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران.

saeid.hamzeh@ut.ac.ir

استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

abdalinaseri@scu.ac.ir

دریافت: آبان ۱۴۰۱ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۱

#### چکیده

رطوبت خاک یکی از پارامترهای مهم در مدیریت منابع آب، خاک و گیاه می‌باشد. تحقیق حاضر به منظور بررسی کارایی داده‌های سنجش از دور حرارتی و نوری به منظور تخمین رطوبت خاک و برنامه‌ریزی آبیاری در مزارع نیشکر خوزستان صورت گرفت. بدین منظور میزان رطوبت خاک برای ۹ گذر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ با استفاده از روش‌های دوزنقه حرارتی و نوری از فروردین تا مهرماه ۱۳۹۹ در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر محاسبه گردید. برای صحت‌سنجی نتایج از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت سطحی خاک ۳۳۷ نقطه کنترل زمینی واقع در ۱۸ مزرعه زیر کشت نیشکر که توسط دستگاه رطوبت‌سنج TDR350 همزمان با گذر ماهواره‌ها اندازه‌گیری شده بود استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل TOTRAM با میزان ضریب تبیین ۰/۸۲ و میزان خطای RMSE و NRMSE برابر با ۴/۴۵٪ و ۱۲/۹٪، و مدل OPTRAM با میزان ضریب تبیین ۰/۹۳ و میزان خطای RMSE و NRMSE برابر با ۳/۱۴٪ و ۱۲/۱٪ قادر به تخمین مناسب رطوبت سطحی خاک در اراضی نیشکر می‌باشند. همچنین، بررسی کارایی نقشه‌های بدست آمده از رطوبت خاک برای برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر نشان می‌دهد، که می‌توان از این داده‌ها برای برنامه‌ریزی آبیاری با میانگین خطای متوسط NRMSE برابر با ۱۶٪ و ۹٪ به نسبت داده‌های زمینی زمان آبیاری به ترتیب برای مدل‌های TOTRAM و OPTRAM استفاده نمود. در این خصوص داده‌های مدل OPTRAM به دلیل قدرت تفکیک مکانی بهتر داده‌های نوری نسبت به داده‌های حرارتی و از طرفی تأثیر پذیری کمتر نسبت به عوامل محیطی مانند دما و رطوبت نسبی هوا و همچنین اثر پیکسل‌های مجاور، از کارایی بالاتری برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، مدل دوزنقه حرارتی، مدل دوزنقه نوری

حرارتی میزان گسیل گرما از سطح زمین با طول موج‌های ۳/۵ تا ۱۴ میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود (کاران، ۱۹۸۵) تخمین رطوبت خاک با این روش، نیاز به برآورد دمای سطحی خاک و شاخص گیاهی دارد. (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱) پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST)، وابستگی پیچیده‌ای بر روی رطوبت خاک دارند کارلسون و همکاران (۱۹۹۴) و گیلیس و همکاران (۱۹۹۷) نشان داده‌اند از ترکیب این دو شاخص می‌توان برای برآورد رطوبت خاک با دقت قابل قبول استفاده کرد. تغییرات رطوبت خاک، تأثیراتی فراوان بر ویژگی‌های حرارتی خاک دارد؛ به‌عبارت‌دیگر، تغییرات روزانه دما، همبستگی بالایی با مقدار رطوبت خاک دارد. در این میان استفاده ترکیبی از داده‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های گیاهی از قبیل NDVI<sup>۲</sup> بسیار مورد توجه واقع شده و در تحقیقات متعددی استفاده گردیده است (رحیمزاده و همکاران، ۲۰۱۲). ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ رابطه NDVI با رطوبت خاک در مناطق نیمه‌خشک را بسیار معتبرتر از مناطق مرطوب ارزیابی کرده و میزان تأخیر زمانی در تأثیر رطوبت خاک بر NDVI را در مناطق مرطوب بیشتر از مناطق نیمه‌خشک بیان نمودند. تعدادی از محققین نیز استفاده ترکیبی از اطلاعات ماهواره‌ای دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های گیاهی را در تخمین رطوبت خاک پیشنهاد نمودند و اذعان داشتند که ترکیب این داده‌ها می‌تواند اطلاعات بهتری از تنش‌های گیاهی و شرایط رطوبتی سطح زمین فراهم آورد. در مناطق خشک انتظار می‌رود که رابطه منفی بین NDVI و LST به دلیل افزایش دمای سطح زمین برای مناطق با NDVI پایین تغییر کند این منتهی به یک فضای مثلثی می‌شود که برای استخراج وضعیت رطوبت خاک موردبررسی قرار گرفته است (متالیک و همکاران، ۲۰۰۹). (انگمن، ۱۹۹۵) در سال ۲۰۱۷ یک مدل جدید برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور مرئی گردید که بر اساس رابطه فیزیکی خطی بین رطوبت خاک و بازتابی تبدیل شده مادون قرمز کوتاه

تخمین رطوبت خاک برای ارزیابی مواردی مانند تبخیر و تعرق، نفوذ، رواناب و برای مدل‌سازی روابط خاک و پوشش گیاهی و جو مهم است. در زمینه کشاورزی، اندازه‌گیری رطوبت خاک در مدیریت منابع آب نقش دارد (الکساندراتوس و همکاران، ۲۰۱۲). اگرچه اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی صورت می‌گیرد، اما در سطح وسیع نیاز به نظارت طولانی‌مدت و هزینه زیاد دارد. سال‌های گذشته، الگوریتم‌های مختلفی برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از مشاهدات سنجش‌ازدور نوری و رادار ارائه شده است (بغدای و همکاران، ۲۰۱۶). مدل ذوزنقه‌ای یا مثلثی یکی از مدل‌های به کاررفته در سنجش‌ازدور جهت برآورد رطوبت خاک است. مدل ذوزنقه حرارتی-مرئی براساس تفسیر توزیع پیکسل در فضای 'LST-VI'، جایی که دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی یک شاخص رشد گیاهی است استفاده می‌شود. یکی از دلایل موفقیت این مدل متکی بودن به داده‌های سنجش‌ازدور حرارتی و مرئی و عدم نیاز به اطلاعات جوی و داده‌های جانبی است. 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. 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 و در داده‌های رادار از خاصیت کاهش بازپراکنش امواج رادار در قطبش‌های مختلف در اثر افزایش رطوبت خاک بهره گرفته می‌شود (رنجبر و همکاران، ۲۰۲۱؛ انگمن ۱۹۹۵). طبق نتایج تحقیقات قبلی از ترکیب این ویژگی‌ها و داده‌های ماهواره‌ای مختلف می‌توان جهت برآورد رطوبت خاک با دقت قابل قبولی استفاده کرد (کارلسون، ۱۹۹۴). در روش

محدودیت دوم مدل دوزنقه‌ای قدیمی را حل می‌کند (بابائیان و همکاران ۲۰۱۸).

برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور در اراضی کشاورزی شهرستان شوشتر نشان داد، بر اساس نتایج تحقیق رطوبت سطحی خاک با شاخص‌های NDVI، SAVI، NDMI، NDTI و SMSWIR رابطه مستقیم و با شاخص LST رابطه معکوس داشته است. همچنین، شاخص LST برآورد بهتری از رطوبت خاک داشته که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این عامل بر مقادیر رطوبت سطحی خاک است (عبیات و همکاران، ۲۰۲۲).

با توجه به مرور منابع مشخص شد که مدل دوزنقه حرارتی TOTRAM<sup>۱</sup> و مدل دوزنقه معکوس طیفی OPTRAM<sup>۲</sup> از توانایی خوبی در برآورد رطوبت خاک برخوردار است، اما تاکنون تحقیقی جهت مقایسه نتایج حاصل از اجرا همزمان این دو مدل برای اراضی نیشکر و از آن مهم‌تر کارایی نتایج این روش‌ها برای برنامه‌ریزی آبیاری صورت نگرفته است؛ بنابراین هدف این مطالعه مدل‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل TOTRAM و OPTRAM مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ و بررسی توانایی این مدل‌ها در پایش به هنگام میزان رطوبت خاک و بررسی تنش آبی مزارع به منظور برنامه‌ریزی آبیاری اراضی کشت و صنعت‌های نیشکر است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر در ناحیه عرض شمالی از  $31^{\circ} 5' 28''$  تا  $19/17''$   $51' 53''$  و طول شرقی از  $48^{\circ} 20' 51''$  تا  $49/07''$   $48^{\circ}$  واقع شده است (شکل ۱). این کشت و صنعت یکی از کشت و صنعت‌های هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی است؛ که سالانه حدود ۹۵۰۰ هکتار آن تحت

(STR) است که بر اساس توزیع پیکسل در داخل فضای دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (STR – VI) بیان می‌شود (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷). در روش نوری این روش‌ها با استفاده از باندهای نوری (طول‌موج‌های بین  $0/35$  تا  $2/5$  میکرومتر) که در آن تابش منعکس شده از خورشید به سطح زمین، به‌عنوان بازتاب شناخته می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود (بن دور و همکاران ۲۰۰۹). معمولاً رطوبت خاک با استفاده از بازتاب و تجزیه و تحلیل‌های تجربی برآورد (ونگ و کیو، ۲۰۰۴). مدل دوزنقه روشی گسترده برای سنجش‌ازدور رطوبت خاک بر اساس حرارت دمای سطح زمین (LST) و داده‌های نوری است. علیرغم موفقیت آشکار آن، از دو محدودیت ذاتی رنج می‌برد. نخست این که نیاز به داده‌های هم‌زمان نوری و حرارتی دارد که این مدل را برای ماهواره‌هایی که داده‌های حرارتی را ارائه نمی‌دهند، غیرقابل استفاده می‌کند. دمای سطح زمین نه تنها تحت تأثیر رطوبت خاک، بلکه شرایط محیطی (مانند سرعت باد، دمای هوا و رطوبت هوا) است. از این رو، مدل دوزنقه نیاز به وقت و محاسبات برای کالیبراسیون در هر تاریخ مشاهداتی دارد.

برای غلبه بر این دو محدودیت، صادقی و همکاران (۲۰۱۷) مدل فیزیکی دوزنقه نوری را برای اولین بار به منظور برآورد رطوبت خاک ارائه دادند. مدل دوزنقه نوری که از تفاضل شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و طول‌موج کوتاه مادون‌قرمز (SWIR) به‌دست می‌آید، برای محاسبه رطوبت خاک استفاده می‌شود. مدل دوزنقه نوری نیازی به باند حرارتی ندارد، از این رو، برای ماهواره‌هایی که تنها باندهای نوری ارائه می‌دهند نیز قابل استفاده است. با توجه به جایگزینی دمای سطح زمین؛ یعنی جایگزینی LST به بازتاب SWIR، این پارامتر به‌طور معنی‌داری با شرایط اتمسفر محیطی تغییر نمی‌کند. به این ترتیب مدل دوزنقه نوری می‌تواند به‌طور جهانی برای مکانی مشخص پارامتر بندی شود، این مسئله

استفاده از روش حجمی عمل می‌کند، اطلاعاتی مانند بافت خاک از نقطه نمونه‌برداری، جرم مخصوص خاک و رطوبت وزنی به دست می‌آید. سپس این اطلاعات با رطوبت وزنی صحت سنجی می‌شوند تا دقت و صحت اندازه‌گیری رطوبت خاک تأیید شود.

در این روش، ابتدا با استفاده از دستگاه TDR نقاط نمونه‌برداری شده از خاک، سیگنال‌های الکترومغناطیسی را ارسال می‌کند. سپس با توجه به تغییرات سرعت انتشار این سیگنال‌ها در خاک، می‌توان به رطوبت خاک پی برد. با اندازه‌گیری جرم مخصوص خاک و رطوبت وزنی به دست آمده، می‌توان اطمینان حاصل کرد که اندازه‌گیری رطوبت خاک به درستی انجام شده است. در نتیجه، با استفاده از دستگاه TDR و روش حجمی، امکان اندازه‌گیری دقیق رطوبت خاک فراهم می‌شود که با رطوبت وزنی صحت سنجی می‌شود شکل (۲).

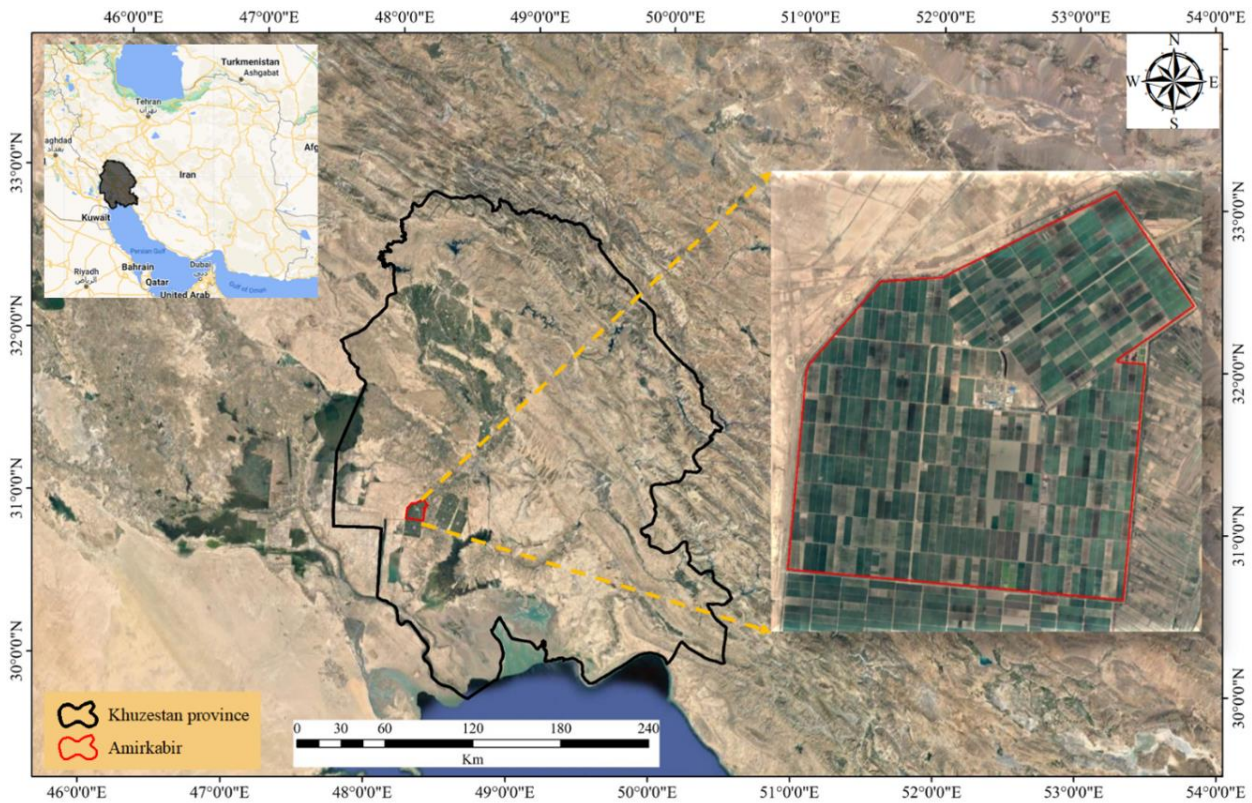
در مجموع تعداد ۲۳۰ نمونه رطوبت سطحی برداشت شد که برای ماهواره سنتینل ۲ برابر ۱۳۸ نمونه و برای ماهواره لندست ۸ برابر ۹۲ نمونه است. همچنین ۸۰ درصد این نمونه‌ها به منظور مدل‌سازی رطوبت خاک و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای صحت سنجی نتایج مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردید (شکل ۳).

داشت نیشکر اختصاص یافته و ۲۰۰۰ هکتار آن در حال آیش و کشت جدید است. اساس طراحی مزارع نیشکر به صورت ۲۵ هکتاری با طول مزرعه ۱۰۰۰ متر و فاصله فاروها ۱/۸۳ متر است.

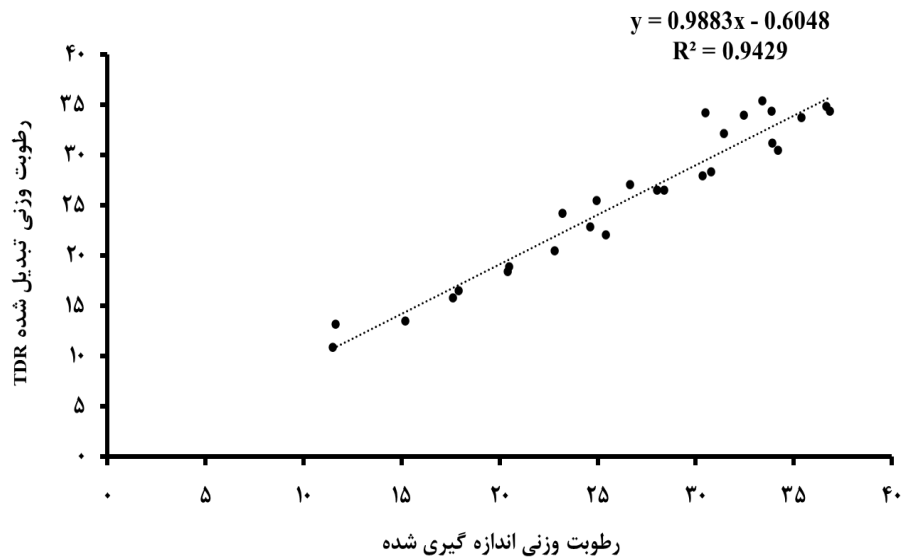
#### داده‌های مورد استفاده

##### داده‌های زمینی

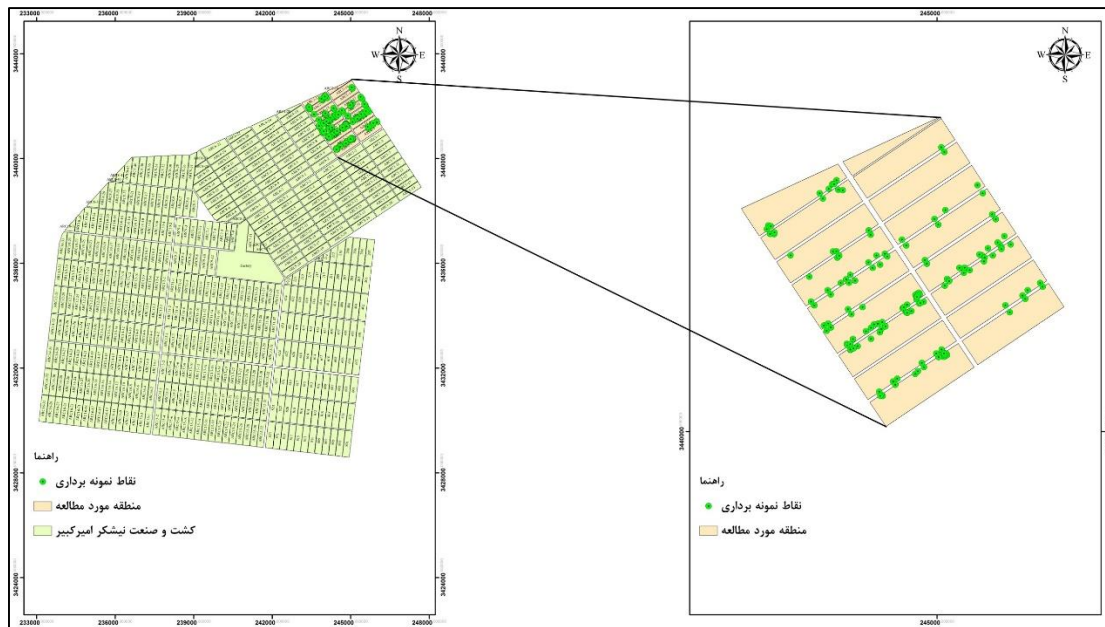
داده‌برداری میدانی برای انجام این پژوهش در خط آبیاری ARC2 انجام شد و پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل رطوبت خاک، بافت خاک و همچنین اطلاعات آبیاری مزارع شامل زمان شروع و پایان آبیاری، مدت زمان آبیاری، عمق آب زیرزمینی یادداشت‌برداری شد. با توجه به اینکه ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ با منبع نور خورشید است، تصاویر دمایی و رطوبت ناشی از محاسبات با آن مربوط به اعماق سطحی خاک است؛ بنابراین برای برآورد رطوبت خاک، نمونه‌برداری لازم در عمق پنج سانتی‌متر هم‌زمان با گذر ماهواره لندست ۸ یا سنتینل ۲، دو تا سه بار در ماه (نیمه اول و دوم هرماه، با توجه به روند رشد نیشکر) با استفاده از دستگاه قابل‌حمل TDR350 در فصل داشت نیشکر از فروردین تا مهرماه ۱۳۹۹ اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه دستگاه TDR<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با



شکل ۱- موقعیت کشت و صنعت امیرکبیر در جنوب خوزستان



شکل ۲- صحت سنجی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR



شکل ۳- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

#### داده‌های ماهواره‌ای

جهت انجام این تحقیق از تعداد نه تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به شماره گذر و ردیف‌های ۱۶۶ و ۳۸ طی بازه زمانی فروردین تا مهرماه سال ۱۳۹۹ استفاده گردید. ماهواره لندست ۸ در ۱۱ باند مختلف در محدوده طیفی ۰/۴۳۳ تا ۱۲/۵ میکرومتر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای باندهای محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی و ۱۰۰ متر برای محدوده مادون قرمز حرارتی و با دوره بازگشت زمانی ۱۶ روزه داده‌برداری را انجام می‌دهد. همه تصاویر در سطح پردازش یک (LC08\_L1TP) و از طریق سایت زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دانلود شد. بعد از دانلود تصاویر اقدام به انجام پیش‌پردازش‌های مورد نیاز با نرم‌افزار ENVI 5.3.1 شامل انجام تصحیحات رادیومتریکی، اتمسفری و سپس استخراج منطقه مورد مطالعه گردید.

ماهواره سنتینل-۲ آدر سال ۲۰۱۵ و سنتینل-۲بی در سال ۲۰۱۷ راه‌اندازی شد. این ماهواره، ماهواره مدار قطبی است و مأموریت آن اخذ تصاویر با وضوح بالا برای پایش پدیده‌هایی همانند آب، خاک و پوشش گیاهی است. این ماهواره از ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی،

مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج 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 بر مبنای WGS-84 می‌باشند، بعد از دانلود تصاویر از سایت زمین‌شناسی آمریکا (<https://scihub.copernicus.eu>) و انجام پیش‌پردازش‌های مورد نیاز برای سال ۱۳۹۹ از فروردین تا مهرماه در نه گذر ماهواره استخراج شد.

#### پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

تصاویر ماهواره لندست ۸ در تحقیق دارای تصحیحات هندسی است. سپس برای به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر، تصحیحات رادیومتریکی و تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH انجام می‌شوند. الگوریتم FLAASH با بررسی مدل‌های انتقال تابشی، اثراتی را که از اتمسفر و زمین بر روی امواج الکترومغناطیسی منتشر شده دارند، شبیه‌سازی می‌کند. در نتیجه، تصاویر به‌دقت بیشتری تصحیح می‌شوند و اطلاعات بیشتری درباره محیط مورد نظر به دست می‌آید.

در مرحله بعد، با استفاده از نسبت گیری طیفی، شاخص گیاهی NDVI استخراج می‌شود. این شاخص،

NDVI مشاهده شده،  $P_v$ : نسبت پوشش گیاهی که با استفاده از مقدار NDVI محاسبه می‌شود و  $e$ : توان تشعشعی است (روننگالی و همکاران، ۲۰۱۸).

در ابتدا مقدار رادیان تصویر با استفاده از رابطه (۵) بدست آمد:

$$\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i \quad (5)$$

در این رابطه  $M_L$  فاکتور تغییر مقیاس<sup>۲</sup> برای هر باند،  $Q_{cal}$  باند ۱۰ لندست،  $A_L$  فاکتور تغییر مقیاس و  $O_i$  ضریب تصحیح برای باند ۱۰ است. مقادیر این پارامترها برای باند ۱۰ لندست در جدول ذکر شده است.

پس از بدست آوردن رادیانس باید دمای روشنایی<sup>۳</sup> محاسبه شود. دمای روشنایی از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$BT = \frac{K_2}{\ln[k_1/L\lambda + 1]} \quad (6)$$

که در این رابطه  $k_1$  و  $k_2$  ضرایبی تبدیل هستند که در فایل متادیتا (METADATA\_FILE) موجود در فایل ماهواره لندست ۸ یا ۹، برای هر باند مقدار مشخص دارد، برای بدست آوردن دما برحسب سلسیوس باید مقادیر بدست آمده منهای صفر مطلق شوند. در جدول (۱) مقادیر این ضرایب برای باند ۱۰ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مقادیر ضرایب مورد استفاده برای محاسبه رادیانس و درجه روشنایی برای باند ۱۰

ضریب	
$K_1$	۷۷۷/۸۹
$K_2$	۱۳۲۱/۰۸
$M_L$	۰/۰۰۰۳۴۲
$A_L$	۰/۱
$O_i$	۰/۲۹

پیکسل‌های با ارزش NDVI بزرگ‌تر از ۰/۵ بیشترین تراکم پوشش گیاهی را نشان می‌دهند که مقدار ثابت گسیلمندی آن‌ها ۰/۹۹ تخمین زده می‌شود. اگر NDVI بین ۰/۲ و ۰/۵ باشد پیکسل ترکیبی از پدیده‌های مختلف است و از رابطه (۴) قابل محاسبه است (ونگ و همکاران، ۲۰۰۴).

به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های گیاهی، نشان‌دهنده میزان فعالیت گیاهی در منطقه مورد نظر است.

همچنین، برای محاسبه دمای سطح زمین، از الگوریتم تک پنجره‌ای (Mono Window) استفاده می‌شود. در این روش، با استفاده از پارامترهایی مانند دمای درخشندگی، میانگین دمای اتمسفر، ضریب عبور اتمسفری و گسیلمندی، دمای سطح زمین به دست می‌آید. این روش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، به‌دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی، دمای سطح زمین را محاسبه می‌کند. (روننگاری و همکاران، ۲۰۱۸).

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

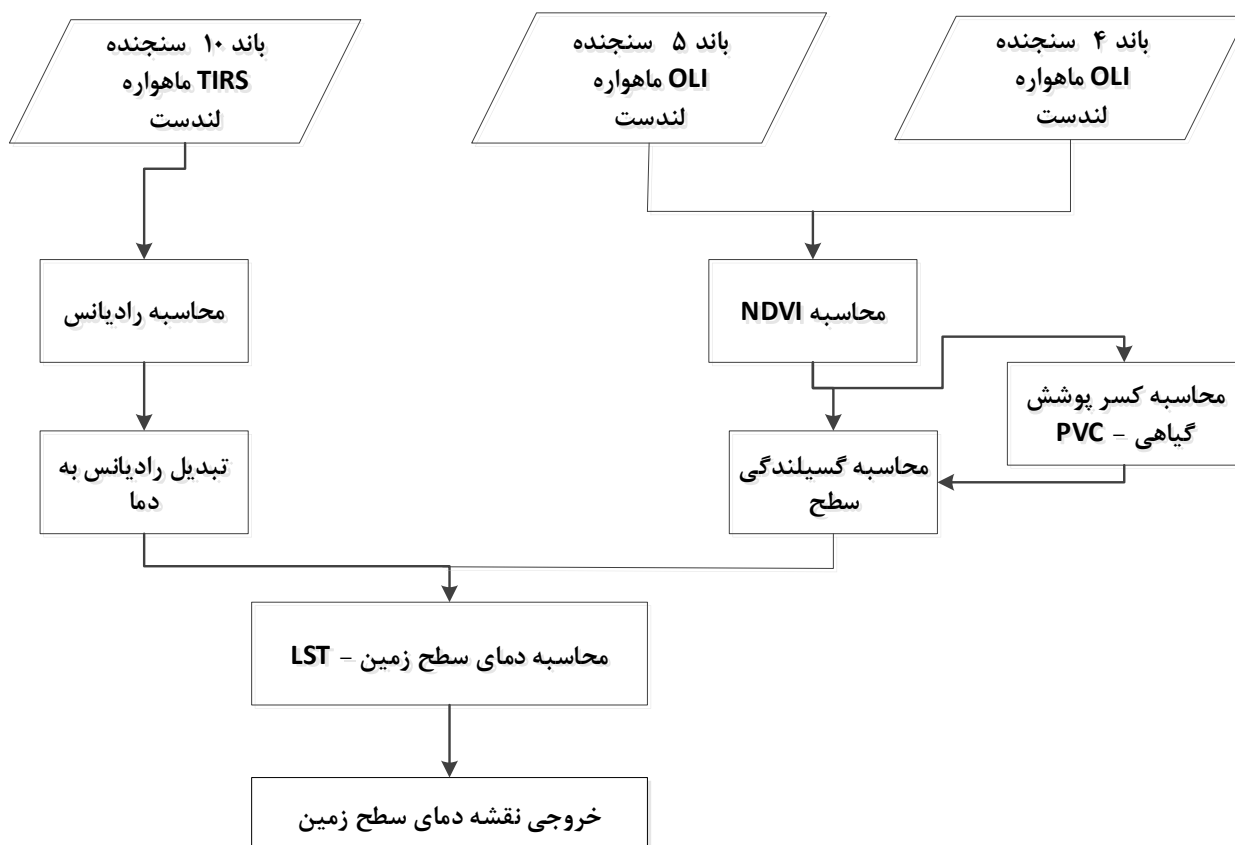
$$LST = \frac{BT}{(1 + w(\frac{BT}{\rho})Lne)} \quad (2)$$

$$e = 0.004P_v + 0.986 \quad (3)$$

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (4)$$

$BT$ <sup>۱</sup>: دمای درخشندگی است و مقدار  $W$  نیز، طول موج باند ۱۰ و یا ۱۱ است که در این پژوهش از باند ۱۰ استفاده شد و مقدار آن در لندست ۸ برابر ۱۱/۵ میکرومتر است. مقدار  $\rho$  برابر با میلی کلوین  $1/438 \times 10^{-2}$  است.  $NDVI_{max}$  و  $NDVI_{min}$  به ترتیب بیشترین و کمترین

شاخص NDVI از رابطه (۱) به دست می‌آید،  $NDVI_{max}$  و  $NDVI_{min}$  به ترتیب بیشترین و کمترین NDVI مشاهده شده است. در این روش از طبقه‌بندی NDVI استفاده می‌شود، پیکسل مربوط به خاک خشک با میزان گسیلمندی حرارتی ۰/۹۷ برای لندست است.



شکل ۴- روند مراحل محاسبه دمای سطح زمین (LST)

که برای ماهواره لندست ۸ باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و باند قرمز (Red) به ترتیب باندهای ۵ و ۴ می‌باشند.

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{LST_d - LST}{LST_d - LST_w} \quad (7)$$

$W$ : مقدار رطوبت خاک نرمال شده،  $\theta_d$ : حداقل مقدار رطوبت خاک خشک در شرایط محلی،  $\theta_w$ : حداکثر مقدار رطوبت خاک مرطوب در شرایط محلی،  $LST_d$  و  $LST_w$  به ترتیب مربوط به خاک خشک و مرطوب می‌باشند.

$$LST_d = i_d + s_d NDVI \quad (8)$$

$$LST_w = i_w + s_w NDVI \quad (9)$$

$i_d$  و  $s_d$  به ترتیب مربوط به بیشترین دمای سطح زمین و کمترین تراکم پوشش گیاهی،  $i_w$  و  $s_w$  به ترتیب مربوط به کمترین دمای سطح زمین و بیشترین تراکم پوشش گیاهی است که با استفاده از یک معادله خطی (رابطه ۱۰) رطوبت

#### مدل دوزنقه نوری - حرارتی (TOTRAM<sup>۱</sup>)

این مدل بر اساس توزیع پیکسل در فضای دو بعدی دمای سطح زمین و پوشش گیاهی است. مدل دوزنقه جدید OPTRAM بر اساس ایده جایگزینی LST در مدل TOTRAM با یک معیار برای رطوبت خاک در حوزه نوری استوار است. بر اساس مدل انتقال تابش دو شار کوبلکا و مانک (۱۹۳۱) و صادقی و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل فیزیکی توسعه دادند که یک رابطه خطی بین محتوای رطوبت سطح و بازتاب تبدیل شده SWIR را نشان می‌دهد.

برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از یک معادله خطی در فضای دمای سطح زمین (LST<sup>۲</sup>) و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI<sup>۳</sup>) با استفاده از معادلات ذیل برازش داده می‌شود.

3- Normalized difference vegetation index

1- Thermal-Optical TRAapezoid Model  
2- Land surface temperature



$$STR = \frac{(1-R_{SWIR})^2}{2R_{SWIR}} \quad (15)$$

که  $STR$ ،  $STR_w$ ،  $STR_d$  خشک  $\theta \sim 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ، جایی که  $\theta = \theta_s \text{ cm}^3$  و مرطوب  $\theta = \theta_s \text{ cm}^3$ ، جایی که  $\theta_s$  رطوبت اشباع است) و  $R$  بازتاب سطحی برای دامنه الکترومغناطیسی SWIR باند ۱۳ ماهواره سنتینل-۲ است. با فرض روابط خطی تجربی بین  $STR_d$  و  $STR_w$  با شاخص تفاضلی پوشش گیاهی، لبه‌های خشک و مرطوب دوزنقه نوری به شرح زیر تعریف می‌شوند. برای تعیین لبه‌های تر و خشک با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شد، در این مرحله هر پیکسل به‌عنوان لبه خشک یا تر شناخته می‌شود بر اساس اینکه آیا مقدار NDVI و دوزنقه نوری آن بیشتر یا کمتر از آستانه‌های تعیین‌شده در رطوبت خاک است.

استفاده از نرم‌افزار Matlab می‌تواند در اجرای مراحل فوق کمک کند. با استفاده از توابع و ابزارهای موجود در Matlab، می‌توان مقادیر NDVI و دوزنقه نوری محاسبه شود و سپس با تعیین آستانه‌ها و اعمال آن‌ها بر روی تصویر، نقشه لبه‌های خشک و تر تولید می‌شود. (شکل ۵ ب).

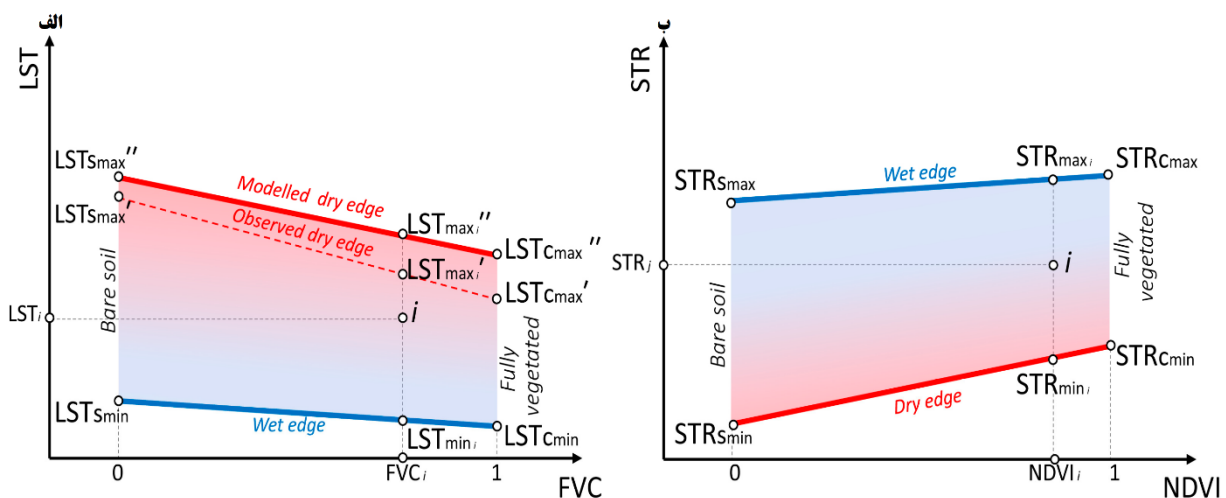
خاک را می‌توان برای هر پیکسل در فضای LST-NDVI برآورد کرد.

$$W = \frac{i_d + s_d NDVI - LST}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad (10)$$

### مدل دوزنقه جدید نوری (OPTRAM)

مدل دوزنقه‌ی نوری بر مبنای ایده جایگزینی LST در دوزنقه قدیمی با  $STR^2$  در مدل جدید دوزنقه نوری بر پایه اندازه‌گیری رطوبت خاک در حوزه نوری استوار است. صادقی و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس مدل انتقال تابشی دوقطبی، یک مدل فیزیکی را ایجاد کرد که رابطه خطی بین رطوبت سطح و بازتاب تبدیل یافته  $STR^2$  را نشان می‌دهد. این مدل بر اساس توزیع پیکسلی در محدوده STR-NDVI است که STR نشان‌دهنده بازتاب تبدیل‌شده SWIR (طول موج مادون قرمز کوتاه) است و NDVI شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی است و بنابراین جایگزین LST در مدل دوزنقه‌ی معمولی می‌شود. با توجه به رابطه خطی بین درجه اشباع خاک  $W$  (صفر برای خشک و یک برای خاک اشباع‌شده) و  $STR$  (صادقی و همکاران، ۲۰۱۵) رابطه ۱۴ و ۱۵ را داریم:

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (14)$$



شکل ۵- مدل دوزنقه نوری - حرارتی (الف) و مدل نوری جدید (ب)

(NRMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) انجام شد؛ که در آن‌ها  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$  مقادیر مشاهده شده،  $n$  تعداد نمونه‌های به کار رفته،  $\bar{O}_i$  مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\bar{O}}} \quad (13)$$

### طبقه‌بندی رطوبت و آبیاری مزارع نیشکر

معیار طبقه‌بندی مزارع نیشکر در این روش، ترکیبی از رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و زمان سپری از آبیاری مزارع انجام شد. این طبقه‌بندی‌ها به پنج دسته به ترتیب، در حال آبیاری، رطوبت بالا (مزارعی که بین یک تا حدود سه روز قبل آبیاری شدند)، رطوبت متوسط (مزارعی که بین چهار تا هفت روز قبل آبیاری شدند)، زمان آبیاری (مزارعی که بر حسب رطوبت ۱۵ درصد وزنی زمان آبیاری آن است) و شروع تنش رطوبتی (مزارعی که زمان آبیاری آن گذشته و دچار تنش می‌شود) انجام شد. هدف از این طبقه‌بندی سهولت در تفسیر تصاویر، مدیریت آبیاری مزرعه و توزیع یکنواختی آبیاری در سطح مزرعه است (جدول ۲).

جدول ۲- طبقه‌بندی رطوبت خاک و زمان آبیاری مزارع نیشکر

وضعیت مزرعه	درصد رطوبت وزنی خاک	طبقه‌بندی
مزارعی که زمان آبیاری آن گذشته و دچار تنش می‌شود.	۱۳-۰	شروع تنش
مزارعی که بر حسب رطوبت ۱۵ درصد وزنی زمان آبیاری است.	۲۲-۱۳	بررسی جهت شروع آبیاری (بستگی به بافت خاک)
مزارعی که بین چهار تا هفت روز قبل آبیاری شدند.	۳۵-۲۲	رطوبت متوسط
مزارعی که بین یک تا حدود سه روز قبل آبیاری شدند.	۴۵-۳۵	رطوبت بالا
مزرعه در حال آبیاری	۱۰۰-۴۵	در حال آبیاری (اشیاع)

با استفاده از نرم‌افزار متلب، معادلات بهترین خط‌های برازش شده بالا و پایین ( $LST_w$  و  $LST_d$ ،  $STR_d$  و  $STR_w$ ) برای هر یک از تاریخ‌های نمونه‌برداری شده میدانی، مشخص شد. توزیع پیکسلی فضای  $LST$  و  $NDVI$  برای مدل TOTRAM با توجه به پژوهش

$$STR_d = i_d + s_d NDVI \quad (16)$$

$$STR_w = i_w + s_w NDVI \quad (17)$$

که  $i_d$  و  $s_d$  جداکننده و شیب لبه خشک و  $i_w$  و  $s_w$  جداکننده و شیب لبه مرطوب هستند. بر اساس معادله (۱۶) و (۱۷) رطوبت خاک در یک پیکسل تصویر ماهواره‌ای داده شده می‌تواند با استفاده از مقدار  $STR$  و شاخص  $NDVI$  آن محاسبه شود:

$$W = \frac{i_d + s_d NDVI - STR}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad (18)$$

که در آن درجه اشباع ( $W$ )، می‌تواند در تخلخل خاک ضرب و به صورت حجمی ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) بیان شود (که فرض می‌شود  $\theta$  برابر با  $\theta_s$  است). فضای  $STR-NDVI$  برخلاف مدل دوزنقه قدیمی تقریباً در زمان پایدار و ثابت است زیرا بازتاب سطح تنها وابسته به خواص سطح است نه پارامترهای جوی و محیطی؛ بنابراین پارامترهای عمومی (جهانی) معادله (۱۸) برای هر مشاهدات ماهواره‌ای و در هر مکان امکان‌پذیر است (باباییان و همکاران، ۲۰۱۸).

### صحت سنجی مدل

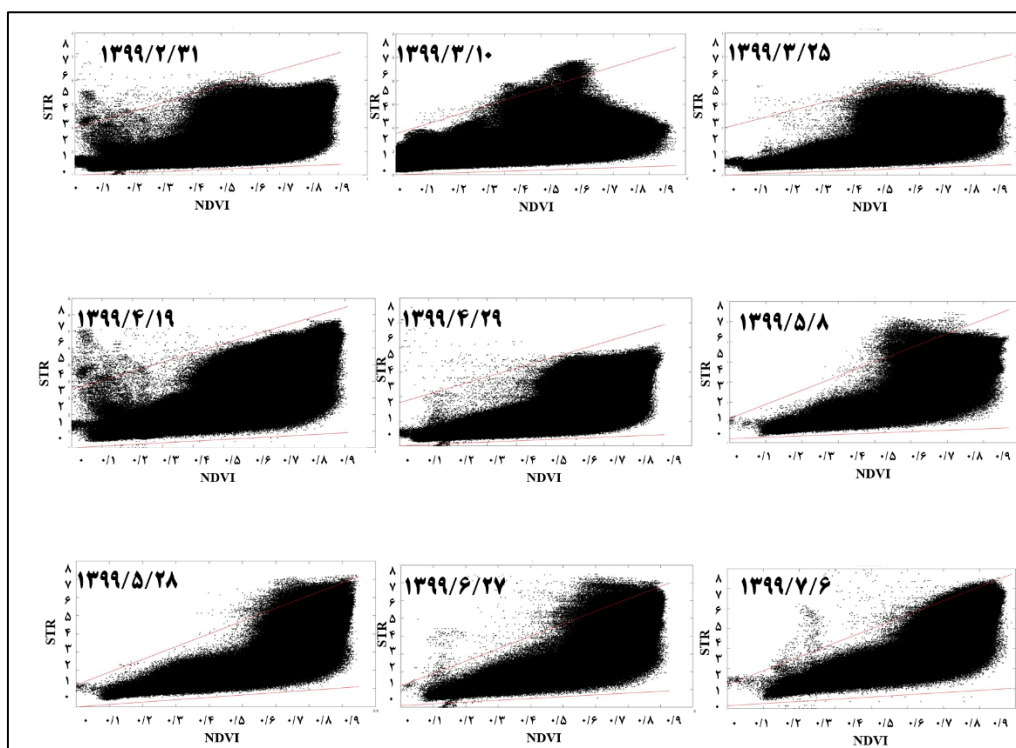
برای صحت‌سنجی مدل‌ها با شرایط واقعی مزرعه و انتخاب مدل بهینه در طول دوره رشد نیشکر و پایش بهنگام رطوبت سطحی خاک در مزارع نیشکر، با استفاده از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده

### نتایج و بحث

برای انجام محاسبات مدل TOTRAM<sup>۱</sup> و OPTRAM<sup>۲</sup> که بر اساس توزیع پیکسل در فضای  $LST-NDVI$  و  $STR-NDVI$  است، ابتدا برای هر تصویر مقادیر  $NDVI$  در برابر  $LST$  و  $STR$  پلات گردید و سپس

پلات در جدول (۳) ارائه شده است. این میزان میانگین خطا برای کل زمان‌های داده‌برداری در طول دوره رشد است. همچنین با توجه به اینکه بافت خاک منطقه بسیار سنگین است و همچنین محدوده‌های رطوبت مورد نظر برای برنامه‌ریزی آبیاری و طبقه‌بندی نقشه‌ها جهت مدیریت آبیاری این مقدار جوابگویی نیازهای کاربردی است همچنین ذکر این نکته ضروری است که همه مدل‌های سنجش از دوری دارای خطای نسبی در همین حد است.

(محمدی معله‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱) موجود است و همچنین STR و NDVI برای مدل OPTRAM در دوره داشت نیشکر در شکل (۶) آمده است. رابطه NDVI و STR در مدل OPTRAM مستقیم است و با افزایش شاخص NDVI پارامتر STR افزایش می‌یابد. خط بالا و پایین ابر نقاط مدل نوری به ترتیب،  $STR_w$ ،  $STR_d$  است. همچنین نتایج معادلات مدل‌های TOTRAM و OPTRAM با فرض در نظر گرفتن همه داده‌ها در یک



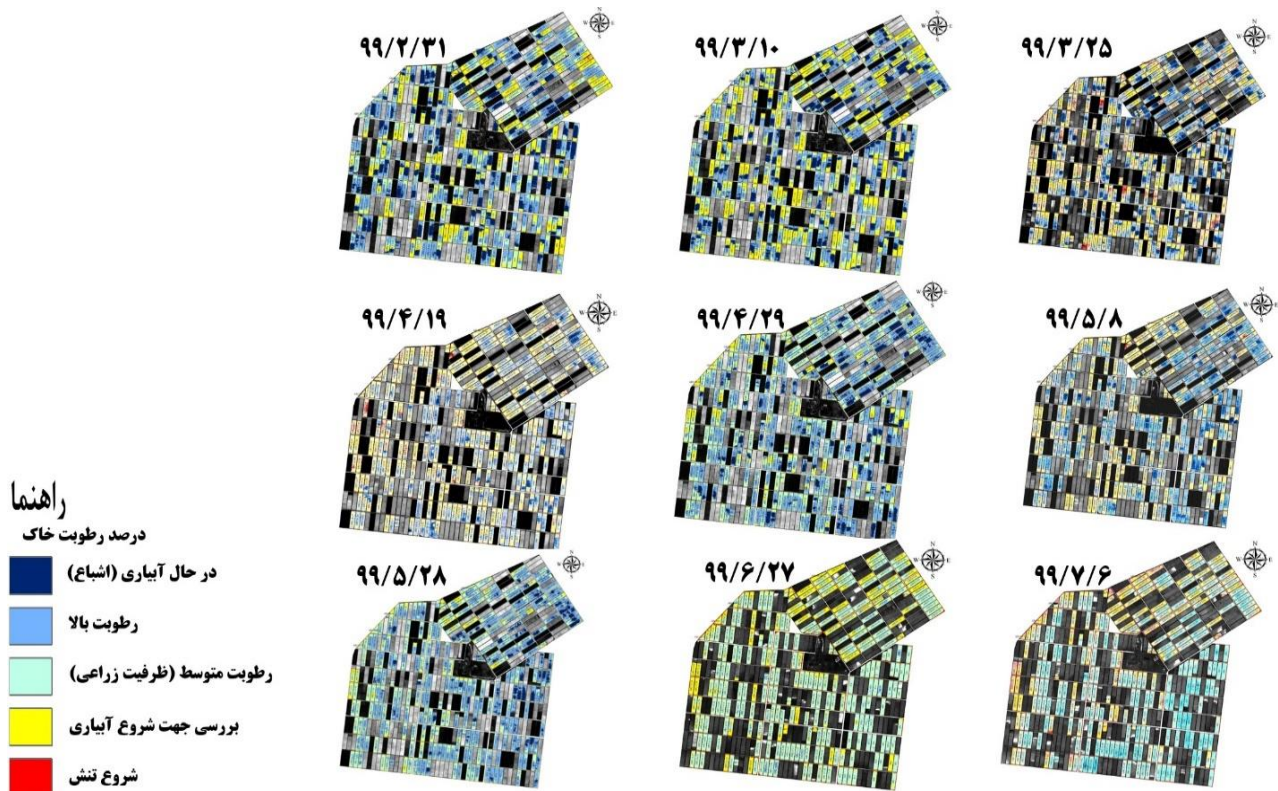
شکل ۶- نمونه‌ای از تعیین پارامترهای  $STR_w$  و  $STR_d$  در مدل OPTRAM

جدول ۳- نتایج معادلات لبه تر و خشک مدل TOTRAM و OPTRAM مربوط به کل داده‌ها

شاخص	لبه تر ( $LST_w / STR_w$ )	لبه خشک ( $LST_d / STR_d$ )	$R^2$	RMSE (درصد)	NRMSE (درصد)
TOTRAM	$-3.1458 \text{ NDVI} + 308.54$	$-11.044 \text{ NDVI} + 320.95$	۰/۷۷	۴/۴۵	۱۲/۹
OPTRAM	$7.0313 \text{ NDVI} + 1.6639$	$3.2034 \text{ NDVI} + 0.0629$	۰/۸۰	۴/۰۸	۱۲/۱

آموزش (۸۰ درصد نمونه‌ها) و داده‌های آزمون (۲۰ درصد نمونه‌ها)، تصویر مدل‌های TOTRAM و OPTRAM. رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی ارزیابی گردید که نتایج آن برای تاریخ‌های مختلف در جدول (۴) ارائه شده است.

پس از محاسبه مقادیر  $LST_w$  و  $LST_d$  برای مدل TOTRAM و  $STR_w$  و  $STR_d$  برای مدل OPTRAM در تاریخ‌های موجود، درصد رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه برآورد شد. سپس مقدار همبستگی، میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده بین داده‌های



شکل ۷- برآورد درصد رطوبت خاک کشت و صنعت امیرکبیر با مدل OPTRAM

جدول ۴- نتایج معادلات لبه تر و خشک مدل TOTRAM و OPTRAM

OPTRAM			تاریخ	TOTRAM			تاریخ	ردیف
RMSE %	R <sup>2</sup>	NRMSE %		RMSE %	R <sup>2</sup>	NRMSE %		
۴/۲۶	۰/۸۷	۱۲/۴۲	۱۳۹۹/۲/۳۱	۲/۲۱	۰/۴۰	۵/۴۸	۱۳۹۹/۰۲/۲۳	۱
۴/۲۹	۰/۸۱	۱۶/۳۹	۱۳۹۹/۳/۱۰	۳/۲۳	۰/۹۸	۱۱/۱۴	۱۳۹۹/۰۳/۰۸	۲
۳/۴۸	۰/۹۳	۱۰/۲۶	۱۳۹۹/۳/۲۵	۵/۷۴	۰/۸۰	۱۶/۸۹	۱۳۹۹/۰۳/۲۴	۳
۲/۹۹	۰/۹۵	۱۰/۹۱	۱۳۹۹/۴/۱۹	۴/۶۰	۰/۹۸	۱۰/۳۱	۱۳۹۹/۰۴/۹	۴
۳/۱۲	۰/۹۳	۱۰/۳۲	۱۳۹۹/۴/۲۹	۳/۲۲	۰/۹۶	۱۲/۵۳	۱۳۹۹/۰۴/۲۵	۵
۳/۰۵	۰/۹۹	۸/۳۵	۱۳۹۹/۵/۸	۳/۶۲	۰/۹۸	۱۱/۳۶	۱۳۹۹/۰۵/۱۰	۶
۴/۲۵	۰/۹۶	۹/۶۸	۱۳۹۹/۵/۲۸	۴/۵۳	۰/۹۱	۹/۸۷	۱۳۹۹/۰۵/۲۶	۷
۴/۶۳	۰/۸۵	۱۳/۱۹	۱۳۹۹/۶/۲۷	۲/۷۶	۰/۹۶	۸/۰۱	۱۳۹۹/۰۶/۲۰	۸
۴/۱۹	۰/۹۷	۱۳/۷۳	۱۳۹۹/۷/۶	۲/۷۷	۰/۷۶	۷/۹۴	۱۳۹۹/۰۷/۰۵	۹

در مدل‌های OPTRAM و TOTRAM که برای برآورد رطوبت خاک استفاده می‌شوند، تفاوت‌هایی نسبت به یکدیگر وجود دارد. با توجه به تفاوت‌های موجود بین مدل‌های OPTRAM و TOTRAM در برآورد رطوبت خاک، این دو مدل می‌توانند به‌عنوان ابزارهای کاربردی در پیش‌بینی رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه استفاده شوند.

تحلیل داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که مدل OPTRAM و TOTRAM قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه با دقت بالایی هستند. در مدل TOTRAM، ضریب تبیین مقداری بین ۰/۴ تا ۰/۹۸ دارد که به معنای توانایی مدل در برآورد رطوبت خاک است. همچنین در مدل OPTRAM، ضریب تبیین بین ۰/۸۱ تا ۰/۹۹ قرار دارد که نشان می‌دهد این مدل توانایی بیشتری در پیش‌بینی رطوبت خاک دارد.

مورد مطالعه با در نظر گرفتن شرایط محیطی و زمانی مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

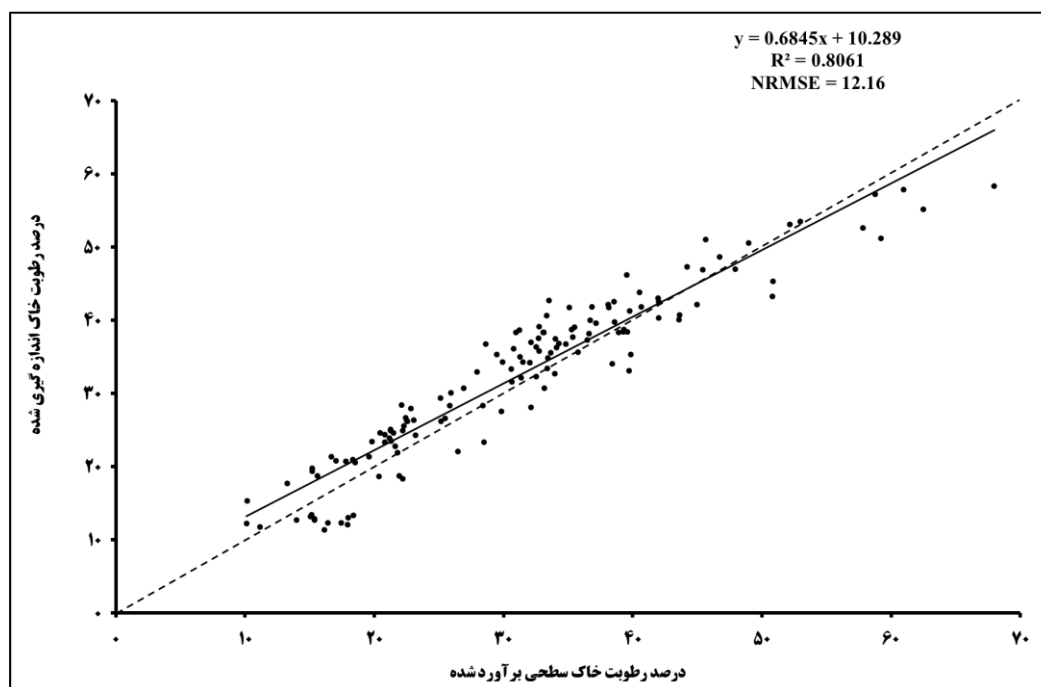
در تحقیقی که (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷) انجام دادند دو محدودیت اصلی مدل TOTRAM (استفاده از باندهای حرارتی، وابسته بودن به عوامل محیطی) را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل OPTRAM می‌تواند این محدودیت‌ها را پشت سر بگذارد. با بررسی‌های انجام‌شده در این تحقیق، این محدودیت‌ها برای گیاه نیشکر در برخی از ماه‌ها (نیمه دوم خرداد و تیرماه) است. از طرف دیگر در مناطقی مانند خوزستان که دمای هوا و رطوبت نسبی بالا است و همچنین به علت اثر دمای پیکسل‌های مجاور بر روی پیکسل هدف تا حدی نتایج داده‌های حرارتی مخصوصاً در داده‌های لندست که پیکسل سایز آن‌ها ۱۰۰ متر است با خطای بیشتری به نسبت داده‌های نوری ماهواره سنتینل که پیکسل سایز آن ۱۰ متر است مواجه خواهد بود. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل OPTRAM برای گیاه نیشکر و خوزستان بهتر و دقیق‌تر از مدل TOTRAM رطوبت خاک را برآورد کند (محمدی معله‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱).

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این دو مدل می‌تواند اطلاعات مفیدی را درباره تغییرات رطوبت خاک در شرایط محیطی و زمانی مختلف در منطقه مورد مطالعه فراهم کند.

استفاده از مدل‌های TOTRAM و OPTRAM برای پیش‌بینی رطوبت خاک می‌تواند به دلیل داشتن روابط خطی تجربی بین مقادیر  $STR_d$  و  $STR_w$  یا  $LST_d$  و  $LST_w$  با شاخص تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI)، لبه‌های خشک و مرطوب مدل OPTRAM و TOTRAM، به‌عنوان ابزاری کارآمد و دقیق در مطالعات رطوبت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تفاوت‌های موجود در مدل‌های TOTRAM و OPTRAM می‌تواند ناشی از تفاوت در قدرت تفکیک زمانی و مکانی برای نیشکر محدودیت‌هایی دارند، علاوه بر این، لندست به‌صورت ۱۶ روز و داده‌های سنتینل ۲ به‌صورت پنج روز جمع‌آوری می‌شوند. همچنین، در لندست هر پیکسل حرارتی معادل ۱۰۰ متر و در سنتینل هر پیکسل معادل ۱۰ متر است.

بنابراین، با توجه به نتایج و تحلیل‌های به‌دست‌آمده، مدل OPTRAM می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی و مؤثر در پیش‌بینی رطوبت خاک در منطقه



شکل ۸- نتایج رطوبت سطحی برآوردی با استفاده از مدل OPTRAM

ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم)، تنها ۶۰٪ مجاز به تخلیه بوده که این میزان تخلیه در اثر جذب نیشکر به علاوه میزان آب خارج شده در اثر خروج ثقلی (میزان زه آب در هر آبیاری)، بایستی مجدداً به خاک اضافه شود جدول (۵).

نظر به اینکه رطوبت خاک در هنگام آبیاری در وضعیت طبیعی از ۱۳-۱۸ درصد وزنی (با توجه به نوع بافت و ساختمان خاک) نباید کمتر شود، با توجه به حد مجاز رطوبتی خاک از ظرفیت نگهداری خاک (تفاوت حد

جدول ۵- درصد رطوبت وزنی خاک برای شروع آبیاری

بافت خاک	درصد رطوبت وزنی خاک
لوم	۱۳-۱۱
لوم رسی	۱۶-۱۵
رس سیلتی	۱۷-۱۶
رسی	۱۹-۱۸

نشان می‌دهد این مزرعه زمان آبیاری آن فرا نرسیده است که باعث ایجاد خطا و عدم قطعیت زمان آبیاری مزرعه در این مرحله رشد نیشکر که معمولاً خرداد و تیرماه است می‌شود. شکل (۹ - ب) مدل OPTRAM این محدودیت‌ها را پشت سر گذاشته و زمان آبیاری مزرعه ARC12-20 را به خوبی برآورد نمود. همچنین در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود زمان آبیاری مزرعه ARC2-8 در تاریخ ۲۵ خردادماه است، این مدل با دقت بالایی زمان آبیاری مزرعه را برآورد کرده است.

نتایج حاصل از بررسی کارایی نقشه‌های بدست آمده رطوبت خاک جهت برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر نشان می‌دهد که می‌توان از این داده‌ها جهت برنامه‌ریزی آبیاری با میانگین خطای متوسط NRMSE برابر با ۱۶ و ۹ درصد به نسبت داده‌های زمینی زمان آبیاری به ترتیب برای مدل‌های TOTRAM و OPTRAM استفاده نمود. در این خصوص داده‌های مدل OPTRAM به دلیل قدرت تفکیک مکانی بهتر داده‌های نوری نسبت به داده‌های حرارتی و از طرفی تأثیرپذیری کمتر نسبت به عوامل محیطی از قبیل دما و رطوبت نسبی هوا و همچنین اثر پیکسل‌های مجاور، از کارایی بالاتری برخوردار هستند.

در تحقیق برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل جدید دوزنقه‌ای نوری برای حوضه سیمینه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸، به این نتیجه رسیدند که مدل OPTRAM با همبستگی ۰/۷۰۹ بهتر و دقیق‌تر از مدل TOTRAM توانسته است رطوبت خاک را برآورد نماید و دلیل دقت بالای دقت بالای OPTRAM، تأثیرپذیری کمتر از عوامل محیطی و پارامترهای جهانی بوده است که قابلیت اجرایی و کاربردی در مناطق دارای محدودیت مکانی را دارد (یوسف زاده و همکاران، ۲۰۱۹).

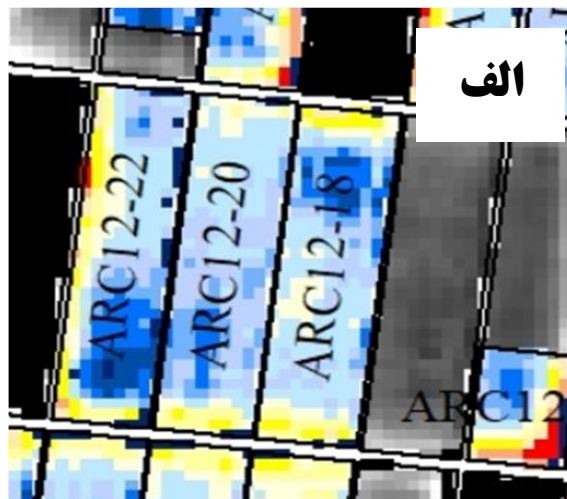
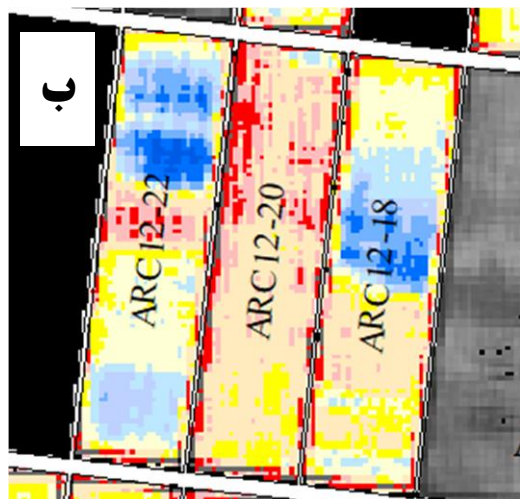
به‌عنوان مثال، در برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر با استفاده از مدل TOTRAM، شکل (۹-الف) سه مزرعه به نام‌های ARC12-18، ARC12-20 و ARC12-22، در کشت و صنعت امیرکبیر به صورت تصادفی انتخاب شد. تاریخ آبیاری این مزارع در شرایط واقعی به ترتیب ۱۷، ۱۹ و ۱۷ تیرماه در حال انجام بود.

همچنین در تحقیق ارزیابی رطوبت خاک در مزارع ذرت دیمی و آبی با استفاده از سنتینل ۲ و مدل OPTRAM نشان داد، این مدل در تخمین رطوبت سطحی خاک نسبت به رطوبت خاک اندازه‌گیری شده از دقت بالایی برخوردار است همچنین در فصل رشد محصول از این مدل می‌توان تنش‌های گیاهی و زمان آبیاری را مدیریت کرد (آمبروزون همکاران، ۲۰۲۰).

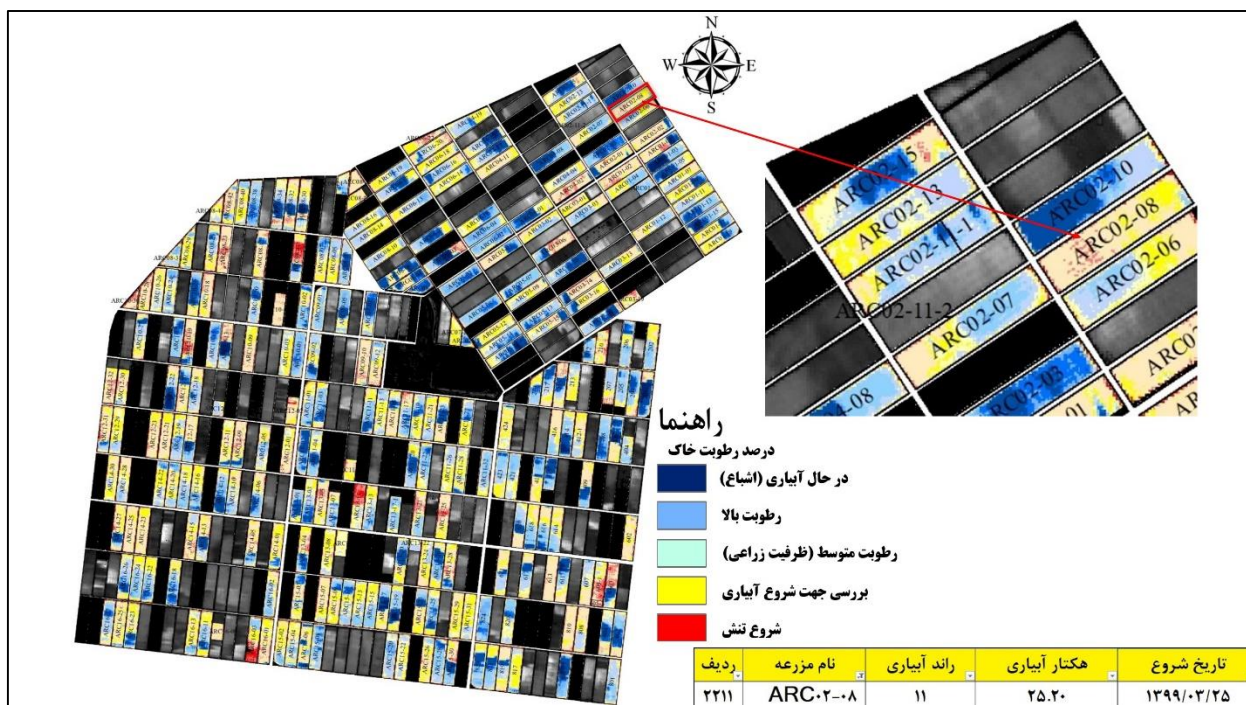
با مقایسه نقشه رطوبت خاک مدل TOTRAM که در تاریخ ۱۸ تیرماه تصویربرداری شده بود مقایسه گردید. مشاهده می‌شود مزارع شماره ARC12-18 و ARC12-22 یک روز قبل از تصویربرداری ماهواره لندست ۸ در حال آبیاری است و مزرعه ARC12-20 زمان آبیاری آن یک روز بعد از تصویربرداری لندست ۸ است. مشاهده می‌شود اثر آبیاری دو مزرعه مجاور بر روی دمای گیاه مزرعه ARC12-20 تأثیر گذاشته است و از نظر مدل

آب خاک و پایش خشکسالی گردد. همچنین نتایج نشان داد مدل OPTRAM می‌تواند نتایج مفیدی را در اختیار کشاورز بدهد که باعث افزایش بهره‌وری آب در زمین‌های زراعی تحت شرایط خاص سامانه‌های کشاورزی موزامبیک است (ماننز و همکاران، ۲۰۱۹).

در پژوهش پایش خشکسالی کشاورزی بر اساس رطوبت خاک برگرفته از مدل دوزنقه نوری در موزامبیک نشان داد، مدل OPTRAM نسبت به رطوبت خاک اندازه‌گیری شده  $R^2 \geq 0.79$  و  $RMSE \leq 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  بدست آمد. این مدل موفق به تهیه نقشه‌های شاخص کمبود



شکل ۹- مقایسه زمان آبیاری مزارع در مدل TOTRAM (الف) با مدل OPTRAM (ب)



شکل ۱۰- صحت سنجی مدل OPTRAM با زمان آبیاری مزرعه در ۲۵ خردادماه ۱۳۹۹

ضریب تبیین  $0.82$  و میزان خطای RMSE و NRMSE برابر با  $4/45$  درصد و  $12/9$  درصد و مدل OPTRAM با میزان ضریب تبیین  $0.93$  و میزان خطای RMSE

### نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از برآورد رطوبت خاک سطحی در عمق پنج سانتی‌متر نشان داد، مدل TOTRAM با میزان

پوشش گیاهی باشد، باندهای حرارتی جواب بهتری نسبت باندهای نوری خواهند داشت؛ اما در خصوص برآورد رطوبت خاک کمی مسئله متفاوت خواهد بود؛ زیرا که بین زمان آبیاری و یا به عبارتی میزان دقیق رطوبت خاک و تغییرات رطوبتی برگ مخصوصاً در گیاهی مانند نیشکر یک تأخیر زمانی بین ۲۴ تا ۴۸ ساعت وجود دارد که این می‌تواند کمی نتایج باندهای حرارتی را تحت تأثیر قرار بدهد. از طرف دیگر در مناطقی مانند خوزستان که دمای هوا و رطوبت نسبی بالا است و همچنین به علت اثر دمای پیکسل‌های مجاور بر روی پیکسل هدف تا حدی نتایج داده‌های حرارتی مخصوصاً در داده‌های لندست که پیکسل سایز آن‌ها ۱۰۰ متر است با خطای بیشتری به نسبت داده‌های نوری ماهواره سنتینل که پیکسل سایز آن ۱۰ متر است مواجه خواهد بود.

NRMSE برابر ۳/۱۴ درصد و ۱۲/۱ قادر به تخمین رطوبت سطحی خاک در اراضی نیشکر می‌باشند. همچنین نتایج حاصل از بررسی کارایی نقشه‌های بدست آمده رطوبت خاک جهت برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر نشان می‌دهد که می‌توان از این داده‌ها جهت برنامه‌ریزی آبیاری با میانگین خطای متوسط NRMSE برابر با ۱۶ و ۹ درصد به نسبت داده‌های زمینی زمان آبیاری به ترتیب برای مدل‌های TOTRAM و OPTRAM استفاده نمود. در این خصوص داده‌های مدل OPTRAM به دلیل قدرت تفکیک مکانی بهتر داده‌های نوری نسبت به داده‌های حرارتی و از طرفی تأثیرپذیری کمتر نسبت به عوامل محیطی از قبیل دما و رطوبت نسبی هوا و همچنین اثر پیکسل‌های مجاور، از کارایی بالاتری برخوردار هستند. همچنین در خصوص پاسخ طیفی حرارتی، در صورتی که هدف بررسی تنش

#### فهرست منابع

۱. عبیات م، عبیات م و عبیات م ۲۰۲۲. برآورد رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: شهرستان شوشتر)، تحقیقات آب‌و خاک ایران.
۲. شاه مرادی ص، غفاریان مالگیری ح و امینی م ۲۰۲۱. استخراج شاخص رطوبت سطحی خاک (TVDI) با استفاده از نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی و تصاویر مودیس، سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۲(۱)، ۳۸-۶۲.
۳. محمدی معله‌زاده؛ جمال، حمزه؛ سعید، ناصری؛ عبدعلی، (۱۴۰۱) برآورد رطوبت سطحی خاک و بررسی برنامه‌ریزی آبیاری اراضی نیشکر با استفاده از مدل ذوزنقه حرارتی، <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338383.669214>. مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۵۳ (۱۰).
4. Alexandratos, N.; Bruinsma, J. World Agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision; ESA Working Paper No. 12-13; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2012.
5. AMBROSONE, Mariapaola, et al. retrieving soil moisture in rainfed and irrigated fields using Sentinel-2 observations and a modified OPTRAM approach. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 89: 102113.
6. Babaeian, E., Sadeghi, M., Franz, T.E., Jones, S., Tuller, M., 2018. Mapping soil moisture with the OPTical TRAPEZOID Model (OPTRAM) based on long term MODIS observations. Remote Sens. Environ. 211, 425-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.29>.
7. Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J.A.M., Taylor, G.R., Hill, J., Whiting, M.L., et al. (2009). Using imaging spectroscopy to study soil properties. Remote Sensing of Environment, 113(Supplement 1), S38-S55.
8. 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. 2016, 8, 920.



9. Carlson, T. N., Gillies, R. R., & Perry, E. M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote sensing reviews*, 9(1-2), 161-173.
10. Carlson, T. (2007). An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 7(8), 1612-1629.
11. Engman, E. T., & Chauhan, N. (1995). Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 189-198.
12. Gillies, R. R., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1997). A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface e. *international journal of remote sensing*, 18(15), 3145-3166.
13. Kubelka, P., & Munk, F. (1931). Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Zeitschrift für Technische Physik*, 12(11), 593-601.
14. MANANZE, Sosdito; PÔÇAS, Isabel; CUNHA, Mário. Agricultural drought monitoring based on soil moisture derived from the optical trapezoid model in Mozambique. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13.2: 024519.
15. Rahimzadeh-Bajgirani, P., Omasa, K., & Shimizu, Y. (2012). Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 1-12.
16. Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). A mono-window algorithm for land surface temperature estimation from Landsat 8 thermal infrared sensor data: a case study of the Beas River Basin, India. *Pertanika J Sci Technol*, 26(2), 829-840.
17. Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., & Jones, S. B. (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.
18. Sadeghi, A.M., Jones, S.B., Philpot, W.D., 2015. A linear physically – based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sens. Environ.* 164, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.007>.
19. S. Ranjbar, M. Akhoondzadeh, B. Brisco, M. Amani and M. Hosseini, "Soil moisture change monitoring from c and 1-band sar interferometric phase observations", *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 14, pp. 7179-7197, 2021.
20. Wang, W., Huang, D., Wang, X. G., Liu, Y. R., & Zhou, F. (2011). Estimation of soil moisture using trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1699-1712.
21. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467-483.

## Evaluation of Optical Remote Sensing Efficiency in Estimating Soil Surface Moisture and Comparing It with Thermal Data for Irrigation Management of Sugarcane

**J. Mohammadi-Moalezadeh, S. Hamzeh<sup>1</sup>, and A. Naseri**

Head of Remote Sensing and GIS, Sugarcane Development Research and Education Institute, Ahvaz, Iran.

[Jamalmohammadi611@gmail.com](mailto:Jamalmohammadi611@gmail.com)

Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran.

[saeid.hamzeh@ut.ac.ir](mailto:saeid.hamzeh@ut.ac.ir)

Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran

University, Ahvaz, Iran. [abdalinaseri@scu.ac.ir](mailto:abdalinaseri@scu.ac.ir)

Received: October 2022 and Accepted: February 2023

### Abstract

Soil moisture is one of the most important parameters in water, soil and plant resources management. Therefore, the present study was conducted to evaluate the efficiency of thermal and optical remote sensing data in order to estimate soil moisture and irrigation planning in sugarcane fields of Khuzestan Province, Iran. For this purpose, soil moisture content for 9 passes of Landsat 8 and Sentinel 2 satellites was calculated using thermal and optical trapezoidal methods from April to October 2020 in Amirkabir Sugarcane Agro-industry fields. To validate the results, the measured soil moisture content data of 337 ground control points located in 18 sugarcane-growing fields measured by TDR350 dehumidifier were used simultaneously with the passage of the satellites. The results showed that TOTRAM model with a determination coefficient of 0.82 and error rate of RMSE and NRMSE as 4.45% and 12.9%, and OPTRAM model with an explanation coefficient of 0.93 and RMSE and NRMSE error of 3.14% and 12.1% were able to properly estimate soil surface moisture in sugarcane fields. Also, the results of evaluation of soil moisture maps for irrigation planning of sugarcane fields showed that these data could be used for irrigation planning with average NRMSE error of 16% and 9% in relation to ground irrigation time data for TOTRAM and OPTRAM models, respectively. In this regard, OPTRAM model data were more efficient compared to thermal data, due to better spatial resolution of optical data and less effect by environmental factors such as temperature and relative humidity of air and also the effect of adjacent pixels.

**Keywords:** Irrigation planning, Thermal Trapezoidal Model, Optical Trapezoidal Model

---

<sup>1</sup> - Corresponding authors: [saeid.hamzeh@ut.ac.ir](mailto:saeid.hamzeh@ut.ac.ir)