

## Valuating the Accuracy of Models Based on Thermal and Optical Satellite Data to Estimate Soil Moisture with Different Textures in Haft-Tapeh Sugarcane Agro- Industry

**M. Kaydani\***, **A. Hooshmand**, and **S. Hamzeh**

PhD student of Water Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. [Kaydanimehdi63@gmail.com](mailto:Kaydanimehdi63@gmail.com)

Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. [hooshmand\\_a@scu.ac.ir](mailto:hooshmand_a@scu.ac.ir)

Associate Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. [saeid.hamzeh@ut.ac.ir](mailto:saeid.hamzeh@ut.ac.ir)

Received: September 2024 and Accepted: December 2024

### Abstract

Soil moisture is one of the key parameters in the management of water, soil and plant resources. Due to problems such as discontinuity in taking samples, lack of access to sufficient information about the characteristics of the regions, as well as spending a lot of time and money to estimate the amount of available soil moisture and its spatial changes, the use of satellite images is proposed as a cost-effective and efficient method. The thermal-visible trapezoidal model is based on the interpretation of pixel distribution in LST-V1 space, which is used to estimate soil surface moisture or real evapotranspiration. The aim of this study was to estimate soil moisture during the season of 2021-22 for three different soil textures in Haft-Tapeh Sugarcane Agro-industry Company. This was done by Landsat 8 and 9 satellite images and using thermal and optical trapezoidal methods. The results indicated similar accuracy of both models in estimating soil moisture in all three soil textures. Based on the fitted regression relationship between both models and the percentage of volumetric soil moisture in the measured points, the highest coefficient of explanation obtained between was 0.96 for the thermal trapezoidal model and 97.00 for the optical trapezoidal model, in loamy soil texture. This indicated the exact fit and distribution of data in LST-V1 and STR-VI space by the desired models. Also, for the efficiency of the obtained maps, the lowest value of RMSE percentage was calculated for the two models in loamy soil texture as 3.74 and 3.77, respectively. In general, it can be concluded that optical and thermal trapezoidal models predict soil moisture with a small difference and with high accuracy for all the three loamy soil textures.

**Keywords:** Optical Trapezoidal Model, Thermal Trapezoidal Model, Landsat 8 and 9 satellite images

\*- Corresponding Author's Email: [Kaydanimehdi63@gmail.com](mailto:Kaydanimehdi63@gmail.com)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2024.367149.1056>

## ارزیابی دقت مدل‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای حرارتی و نوری برای تخمین میزان رطوبت خاک سطحی با بافت‌های متفاوت در کشت و صنعت نیشکر هفت‌تپه

مهدی کایدانی\*، عبدالرحیم هوشمند و سعید حمزه

دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.

[Kaydanimehdi63@gmail.com](mailto:Kaydanimehdi63@gmail.com)

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

[hooshmand\\_a@scu.ac.ir](mailto:hooshmand_a@scu.ac.ir)

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

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

دریافت: مهر ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

### چکیده

رطوبت خاک یکی از پارامترهای کلیدی در مدیریت منابع آب، خاک و گیاهان به شمار می‌رود. به دلیل مشکلاتی نظیر ناپیوستگی در برداشت نمونه‌ها، عدم دسترسی به اطلاعات کافی در مورد ویژگی‌های مناطق، و نیز صرف هزینه و زمان زیاد برای برآورد میزان آب قابل‌دسترس خاک و تغییرات مکانی آن، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به عنوان روشی به صرفه و کارآمد مطرح می‌شود. مدل دوزنقه‌ای حرارتی- مرئی بر اساس تفسیر توزیع پیکسل در فضای LST-VI است که این فضا برای تخمین رطوبت سطحی خاک یا تبخیر-تعرق واقعی استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه برآورد رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ و ۸ در طول فصل داشت گیاه در دوره ۲۰۱۰-۱۴۰۱ و با استفاده از مدل‌های دوزنقه حرارتی و نوری در شرکت کشت و صنعت نیشکر هفت‌تپه در سه بافت خاک متفاوت بود. نتایج حاکی از دقت مشابه هر دو مدل در برآورد رطوبت خاک در هر سه بافت خاک است. بر اساس رابطه رگرسیونی برازش شده بین هر دو مدل و درصد رطوبت حجمی خاک در نقاط اندازه‌گیری شده بیشترین ضریب تبیین بدست آمده بین داده‌های مشاهده‌ای و بدست آمده برای مدل دوزنقه حرارتی ۰/۹۶ و برای مدل دوزنقه نوری ۰/۹۷ در بافت خاک لومی است. که نشان‌دهنده برازش و پراکنش دقیق داده‌ها در فضای LST-VI و STR-VI توسط مدل‌های مورد نظر است. همچنین به‌منظور کارایی نقشه‌های بدست آمده کمترین مقدار درصد RMSE برای دو مدل در بافت خاک لومی و به ترتیب ۳/۷۴ و ۳/۷۷ محاسبه گردید. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های دوزنقه نوری و حرارتی رطوبت خاک را با اختلاف کم و با دقت بالا برای هر سه بافت خاک پیش‌بینی می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مدل دوزنقه نوری، مدل دوزنقه حرارتی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹

این مهم دست یافت (خسروی‌ان و همکاران، ۱۳۹۶). فشانی و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی رطوبت خاک و شاخص کمبود آب ضریب همبستگی را ۹۳ درصد برآورد کردند که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل است. حسینی و فرخیان (۲۰۱۹) به برآورد رطوبت خاک سطحی در منطقه دهدز در استان خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های نرمال شده رطوبت، پوشش گیاهی نرمال شده و دمای سطح زمین پرداخته‌اند. نتایج نشان داد بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های NDMI، NDVI و LST همبستگی ۷۸ درصدی وجود دارد. شاهمرادی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از نمودار پراکنندگی دما پوشش گیاهی و تصاویر مودیس، شاخص رطوبت سطحی خاک را برای استان آذربایجان غربی استخراج کردند. نتایج به دست آمده از مدل برآورد شاخص رطوبتی سطحی خاک در این پژوهش نشان داد که این مدل قادر به برآورد مقدار رطوبت خاک در پهنه‌های وسیع جغرافیایی با دقت قابل قبول است.

کاظمی پور و همکاران (۱۳۹۷) نشان دادند مدل رگرسیونی نقطه‌ای که با استفاده از اطلاعات هیدرولیکی خاک به دست آمده، تطابق مناسبی بر داده‌های تجربی داشته و ضریب تبیین بالای مدل (۸۹ درصد) نشان‌دهنده دقت توابع پیشنهادی است. در این روش میزان گسیل گرما از سطح زمین با طول موج ۳/۵ تا ۱۴ میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود (کوران<sup>۱۱</sup>، ۱۹۸۵). تخمین رطوبت خاک با این روش، نیاز به برآورد دمای سطح خاک و شاخص گیاهی دارد (وانگ و کو<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۹). پوشش گیاهی و دمای سطح زمین وابستگی پیچیده‌ای با رطوبت خاک دارند (کارلسون و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۱۹۹۴). بر اساس تحقیقات گیلیاس و همکاران<sup>۱۴</sup> (۱۹۹۷) از ترکیب این دو شاخص می‌توان برای برآورد رطوبت خاک استفاده کرد. تغییرات دما در طول روز

در دهه گذشته روش‌های مبتنی بر ماهواره از جمله روش‌های سنجش‌ازدور در بسیاری از مطالعات برای تشخیص رطوبت سطح خاک به صورت منطقه‌ای استفاده شده است (پاسولی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). تصاویر ماهواره‌ای توانایی اندازه‌گیری رطوبت در سطح را امکان‌پذیر می‌کند؛ بنابراین در مقایسه با اندازه‌گیری میدانی، تکنیک‌های سنجش‌ازدور امیدوارکننده هستند زیرا آن‌ها قادر به اندازه‌گیری میدانی با هزینه نسبتاً کم می‌باشند (ورسترتین و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). رطوبت خاک یکی از حساس‌ترین و بارزترین متغیرهای هیدرولوژیکی است (کرنلسن و کولیبالی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). این فاکتور نقش اساسی در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی است (ام سی نالی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۵)، پیش‌بینی‌های هواشناسی، مطالعات تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب (پن و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۲) دارد. اوچسندر و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۳) رطوبت خاک را از لحاظ زمانی و مکانی بررسی و نتیجه گرفتند که کاهش رطوبت خاک در زمان بارندگی باعث کاهش رواناب و افزایش رطوبت خاک، افزایش رواناب را به دنبال دارد. طبق تحقیقات ماسون<sup>۷</sup> (۲۰۱۰) رطوبت خاک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین متغیرهای اقلیمی توسط سازمان جهانی هواشناسی، سیستم مشاهدات اقلیم جهانی و کمیته ماهواره‌های مشاهداتی زمین معرفی گردید. سنجش‌ازدور یک ابزار قدرتمند برای تعیین رطوبت خاک نزدیک به سطح زمین (صفر تا پنج سانتیمتر) را فراهم می‌کند. روش‌های متعددی برای محاسبه رطوبت با کمک سنجش‌ازدور وجود دارد که توسط محققینی مانند وانگ<sup>۸</sup>، ۲۰۰۹، نیکلاس<sup>۹</sup>، ۲۰۱۱ و زانگ<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۶ توسعه یافته است. روش‌های سنجش‌ازدور مبتنی بر امواج ماکروویو، روش‌های مؤثری برای برآورد رطوبت خاک بوده و با استفاده از شاخص NDVI در تصاویر لندست می‌توان به

<sup>8</sup> - Wang

<sup>9</sup> - Nichols

<sup>10</sup> - Zhang

<sup>11</sup> - Curran

<sup>12</sup> - Wang and Qu

<sup>13</sup> - Carlson et al.

<sup>14</sup> - Gillies et al.

<sup>1</sup> - Pasolli et al.

<sup>2</sup> - Verstraeten et al.

<sup>3</sup> - Kornelsen and Coulbaly

<sup>4</sup> - McNally

<sup>5</sup> - Pan et al.

<sup>6</sup> - Ochsner et al.

<sup>7</sup> - Mason

با رطوبت خاک همبستگی زیادی دارند (انگ من<sup>۱</sup>، ۱۹۸۵). همچنین وانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) با تلفیق داده‌های رطوبت خاک و شاخص‌های NDVI و LST حاصل از شاخص گیاهی و دمای سطحی تصاویر MODIS روابط رگرسیونی را برای برآورد رطوبت خاک به دست آوردند که همبستگی بالایی را با مشاهدات زمینی نشان داده است. برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره-ای و شاخص‌های سنجش‌ازدور در اراضی کشاورزی شهرستان شوشتر نشان داد رطوبت سطحی خاک با شاخص NDVI 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، ۱۴۰۱). در سال ۲۰۱۷ یک مدل جدید برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش‌ازدور مرئی ارائه شد که بر اساس رابطه فیزیکی خطی بین رطوبت خاک و بازتابی است که بر اساس توزیع پیکسل در داخل فضای تبدیل‌شده مادون-قرمز کوتاه (STR) توصیف می‌گردد (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص‌های مختلفی جهت برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش‌ازدور مرئی و حرارتی وجود دارد که در جدول شماره ۱ به چند مورد اشاره شده است.

مدل ذوزنقه‌ای<sup>۳</sup> یا مثلث<sup>۴</sup> یکی از مدل‌های به کار رفته در سنجش‌ازدور جهت برآورد رطوبت خاک است. مدل ذوزنقه‌ای حرارتی-مرئی<sup>۵</sup> بر اساس تفسیر توزیع مکانی دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی یک شاخص رشد گیاهی است که فضای LST-VI برای تخمین رطوبت سطحی خاک یا تبخیر-تعرق واقعی استفاده می‌شود (کارلسون<sup>۶</sup>، ۱۹۹۴، نعمایی، ۱۹۹۳، موران<sup>۷</sup>، ۱۹۹۴) اگر تعداد کافی از پیکسل‌ها وجود داشته باشد و ابر و پیکسل‌های مانده در سطح آب از توزیع پیکسل حذف شوند، شبیه مثلث یا ذوزنقه می‌شوند (کارلسون، ۲۰۱۳) که

یکی از دلایل موفقیت این مدل متکی بودن به داده‌های سنجش‌ازدور حرارتی و مرئی و عدم نیاز به اطلاعات جوی و داده‌های جانبی است (کارلسون، ۲۰۰۷). این مدل دارای دو محدودیت اصلی است. اول اینکه مدل ذوزنقه حرارتی<sup>۸</sup> (TOTRAM) را نمی‌توان برای ماهواره‌های بدون باند حرارتی بکار گرفت، دوم اینکه علاوه بر رطوبت خاک، دمای سطح زمین به عوامل محیطی ارتباط دارد که نیاز است برای هر تصویر کالیبره گردد. بدین منظور یک مدل ذوزنقه-ای جدید بنام مدل ذوزنقه نوری<sup>۹</sup> (OPTRAM) معرفی گردید که بر پایه رابطه فیزیکی بین رطوبت خاک و بازتاب تبدیل‌شده مادون‌قرمز کوتاه است (صادقی و همکاران، ۲۰۱۵). با توجه به مرور منابع مشخص شد که مدل ذوزنقه حرارتی TOTRAM و مدل ذوزنقه معکوس طیفی OPTRAM از توانایی خوبی در برآورد رطوبت خاک برخوردار هستند اما تاکنون تحقیقی جهت مقایسه نتایج حاصل از اجرای هم‌زمان این دو مدل برای اراضی نیشکر در بافت خاک متفاوت صورت نگرفته است؛

بنابراین در این تحقیق علاوه بر ارتباط بین داده-های بدست آمده رطوبت خاک با شاخص‌های دما و گیاه، تفاوت و دقت مدل‌های TOTRAM و OPTRAM برای تصاویر استخراجی از ماهواره لندست ۸ و ۹ در مورد عامل رطوبت خاک در بافت خاک متفاوت بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه‌ی مورد مطالعه

این تحقیق با اهداف ذکر شده در سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ در مزرعه شرکت کشت و صنعت نیشکر هفت‌تپه در ۲۰ کیلومتری شهر شوش و ۹۰ کیلومتری شمال شهر اهواز میان رودخانه‌های دز و کرخه اجرا می‌گردد. آب‌وهوای آن متأثر از آب‌وهوای عمومی دشت جنوب، گرم و خشک است (ملایی، ۱۳۹۴). زمین‌های منطقه

<sup>6</sup>- Carlson.

<sup>7</sup>- Moran.

<sup>8</sup>- Thermal-Optical Trapezoid Model

<sup>9</sup>- Optical TRapezoid Model

<sup>1</sup>- Angmen

<sup>2</sup>- Wang et al.

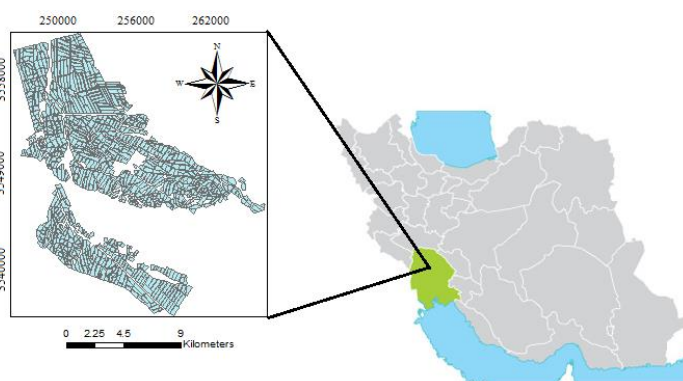
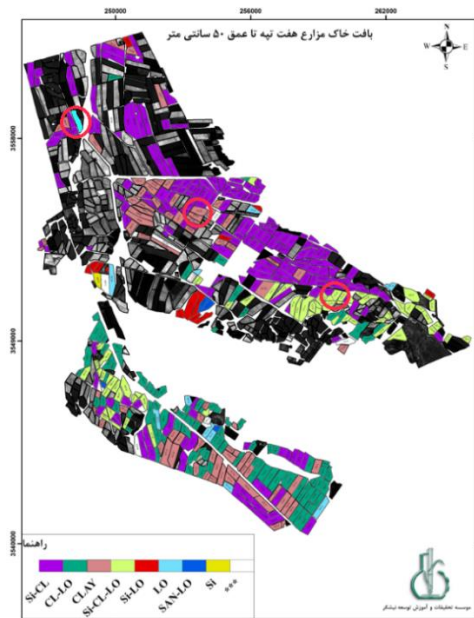
<sup>3</sup>- Trapezoid

<sup>4</sup>- Triangle

<sup>5</sup>- Thermal-Optical Trapezoid Model

کشت و صنعت هفت تپه، معدل روزانه بیشینه دما ۳۲/۸ درجه سانتی‌گراد و معدل حداقل روزانه دما ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. میانگین بارندگی سالانه ۲۶۴ میلی‌متر و تبخیر سالانه در این منطقه بسیار زیاد و سالانه نزدیک به ۲۷۴۰ میلی‌متر است (ایستگاه هواشناسی هفت تپه).

هفت تپه دارای ارتفاع ۴۳ تا ۸۲ متر از سطح دریا می‌باشند. کشت و صنعت هفت تپه نخستین واحد تولید شکر از نیشکر در ایران است. سطح کل زمین‌های آن بیش از ۲۴۵۰۰ هکتار است که نزدیک ۱۲۳۰۰ هکتار آن زمین‌های فاریاب م‌ساعد کشت نیشکر هستند (ملایی، ۱۳۹۴). بر اساس اطلاعات هواشناسی ده سال اخیر (۱۴۰۲-۱۳۹۳)



شکل ۱- نقشه بافت خاک و موقعیت مزارع انتخاب شده

جدید A ۶۰۳ (بافت لومی)، B ۲۰۵ (بافت رسی) و H ۱۲۱ (بافت لومی-رسی-سیلتی) با واریته CP69-1062 برای مطالعه مورد نظر انتخاب گردید. در جدول ۱ درصد رس، شن و سیلت برای هر کدام از مزارع ذکر گردیده است.

همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد بافت‌های خاک منطقه شامل سیلت، لومی-شنی، لومی، لومی-سیلتی، لومی-رسی-سیلتی، لومی-رسی-شنی، رسی، لومی-رسی و رسی سیلتی می‌باشند. سه مزرعه کشت

جدول ۱- درصد بافت خاک مزارع مورد مطالعه

بافت	clay	silt	sand	مزرعه
لومی	25.80	32.00	42.20	603 A
رسی	53.80	37.32	8.88	205 B
لومی-رسی-سیلتی	39.60	50.00	10.40	121 H

مکانی ۳۰ متر برای باندهای یک تا نه (طول موج کوتاه) و باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ با وضوح ۱۰۰ متر تشکیل شده‌اند. لندست ۹ از نظر ویژگی و شرایط باندی مشابه لندست ۸ بوده و از این لحاظ تفاوتی قائل نمی‌شود اما از مزیت‌های این سری ماهواره می‌توان به در نظر گرفتن جزئیات بیشتر پدیده‌ها، توان رادیومتریکی بالاتر و ظرفیت تصویربرداری فراتر اشاره نمود. همچنین از ترکیب داده‌های لندست ۹ و

## داده‌ها

### داده‌های ماهواره‌ای

جهت انجام این تحقیق از تعداد نه تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ مربوط به شماره گذر و ردیف‌های ۱۲۲ و ۳۹ طی بازه زمانی اسفند ۱۴۰۱ تا بهمن ماه سال ۱۴۰۲ استفاده گردید. تصاویر لندست ۸ معمولاً هر ۱۶ روز در دسترس قرار گرفته و از یازده باند طیفی با وضوح

لندست ۸ خلأ زمانی جبران گردیده و تقریباً هر هشت روز یکبار امکان تصویربرداری و جمع‌آوری داده وجود دارد. اشاره گردیده است. در جدول ۲ مشخصات کلی سری ماهواره لندست ۸ و ۹

جدول ۲- مشخصات باندهای ماهواره لندست ۸-۹

شماره باند	معرفی باند	طول موج (میکرومتر)	قدرت تفکیکی مکانی (متر)	هدف
1	Coastal Aerosol	0.433 – 0.453	30	عمق سنجی و شناسایی گردوغبار
2	Blue	0.450 – 0.515	30	شناسایی آب، تهیه نقشه‌های کاربری اراضی
3	Green	0.525 – 0.600	30	پوشش گیاهی، جذب کلروفیل
4	Red	0.630 – 0.680	30	تشخیص گونه‌های گیاهی از یکدیگر و خاک
5	NIR (Near Infrared)	0.845 – 0.885	30	تمایز خاک، پوشش گیاهی و آب و سلامت گیاه
6	SWIR 1	1.560 – 1.660	30	تشخیص رطوبت
7	SWIR 2	2.100 – 2.300	30	تشخیص رطوبت
8	Panchromatic	0.500 – 0.680	15	ارتقای وضوح مکانی (باند مرئی سیاه‌وسفید)
9	Cirrus	1.360 – 1.390	30	شناسایی ابرهای سیروس
10	TIRS 1 (Thermal Infrared)	10.600 – 11.200	100	تشخیص گرمای سطح زمین و اجسام موجود
11	TIRS 1 (Thermal Infrared)	11.500 - 12500	100	تشخیص گرمای سطح زمین و اجسام موجود

ماهواره لندست ۸ و ۹ با قدرت تفکیک مکانی متوسط است. این ماهواره‌ها از دو سنجنده‌ی OLI<sup>۱</sup> در نه باند و TIS<sup>۲</sup> در دو باند تشکیل شده است. همه تصاویر در سطح پردازش یک و از طریق سایت زمین‌شناسی آمریکا

ماهواره لندست ۸ و ۹ با قدرت تفکیک مکانی متوسط است. این ماهواره‌ها از دو سنجنده‌ی OLI<sup>۱</sup> در نه باند و TIS<sup>۲</sup> در دو باند تشکیل شده است. همه تصاویر در سطح پردازش یک و از طریق سایت زمین‌شناسی آمریکا

جدول ۳- تاریخ و موقعیت تصاویر مورد استفاده در تحقیق

ردیف	نوع ماهواره	تاریخ شمسی	مزرعه	تصویر
1	لندست 8	1401.12.20	205 B	WGS84-38N
2	لندست 8	1402.01.31	603 A	WGS84-38N
3	لندست 9	1402.03.24	121 H	WGS84-38N
4	لندست 8	1402.04.18	205 B	WGS84-38N
5	لندست 8	1402.05.02	603 A	WGS84-38N
6	لندست 9	1402.06.11	121 H	WGS84-38N
7	لندست 8	1402.07.20	205 B	WGS84-38N
8	لندست 9	1402.09.25	603 A	WGS84-38N
9	لندست 9	1402.11.20	121 H	WGS84-38N

داده‌های زمینی در مزارع مورد پژوهش، پارامترهای رطوبت خاک و بافت خاک اندازه‌گیری شدند. با توجه به اینکه ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ با استفاده از منبع نور خورشید کار می‌کنند، تصاویر دمای به دست آمده از آن‌ها مرتبط با سطحی خاک یا دمای کنوپی هستند. به همین دلیل، برای برآورد دقیق رطوبت خاک، نمونه‌برداری در عمق پنج سانتیمتر به صورت همزمان با عبور ماهواره‌های لندست ۸ یا ۹ انجام شد. این عملیات برای هر مزرعه در سه مرحله از فصل برداشت نیشکر، از اسفند ۱۴۰۱ تا بهمن ۱۴۰۲،

داده‌های زمینی در مزارع مورد پژوهش، پارامترهای رطوبت خاک و بافت خاک اندازه‌گیری شدند. با توجه به اینکه ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ با استفاده از منبع نور خورشید کار می‌کنند، تصاویر دمای به دست آمده از آن‌ها مرتبط با

<sup>2</sup>- Thermal InfraRed Sensor

<sup>1</sup>- Operational Land Imager

مورد استفاده در برآورد رطوبت خاک در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.

### پردازش داده‌ها

با استفاده از تصویر کالیبره شده شاخص LST و NDVI محاسبه گردید. مقدار NDVI از رابطه (۱) بدست می‌آید. NDVImax و NDVImin به ترتیب بیشترین و کمترین NDVI مشاهده شده است. در این روش از آستانه‌گذاری NDVI استفاده می‌شود، پیکسل مربوط به خاک خشک با میزان گسیلمندی ۰/۹۷ برای لندست می‌باشد. اگر NDVI بزرگتر از ۰/۵ باشد 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 (۵) قابل محاسبه است (ونگ<sup>۳</sup>، ۲۰۰۴).

تراکم پوشش گیاهی بین ۱ و ۱- است و مقدار LST بر اساس درجه‌ی کلویین بوده و که از دمای روشنایی به دست می‌آید (تاردی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶) در این مطالعه دمای سطح زمین بر اساس درجه‌ی سانتی‌گراد بیان شده است. شاخص NDVI برای اولین بار توسط روسه و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۷۴) ارائه گردید (رابطه (۱)).

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

که در آن  $R_{NIR}$  باند مادون‌قرمز نزدیک (باند ۵ در ماهواره لندست) و  $R_{red}$  باند قرمز (باند ۴ در ماهواره لندست) است. برای تبدیل تصاویر رادیانس شده به دمای روشنایی و دمای سطح زمین به ترتیب از رابطه‌های ۲ و ۳ استفاده شده است.

$$T_b = \frac{hc/k\lambda}{\ln\left(\frac{2hc^2\lambda^{-5}}{L_\lambda} + 1\right)} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

صورت گرفت. برای هر مزرعه ۱۵ نقطه، ۱۰ نقطه در بالا و پنج نقطه در پایین مزرعه طبق نظر کارشناسان مطالعات کاربردی و به نحو داده‌برداری کراپ‌لاگ و در مجموع برای هر مزرعه ۴۵ داده برای هر پارامتر در سه بار نمونه‌گیری اندازه‌گیری شد. همچنین در این نقاط، پارامترهایی نظیر دما، جرم مخصوص ظاهری خاک، رطوبت وزنی و رطوبت حجمی نیز اندازه‌گیری شد.

### پیش‌پردازش داده‌ها

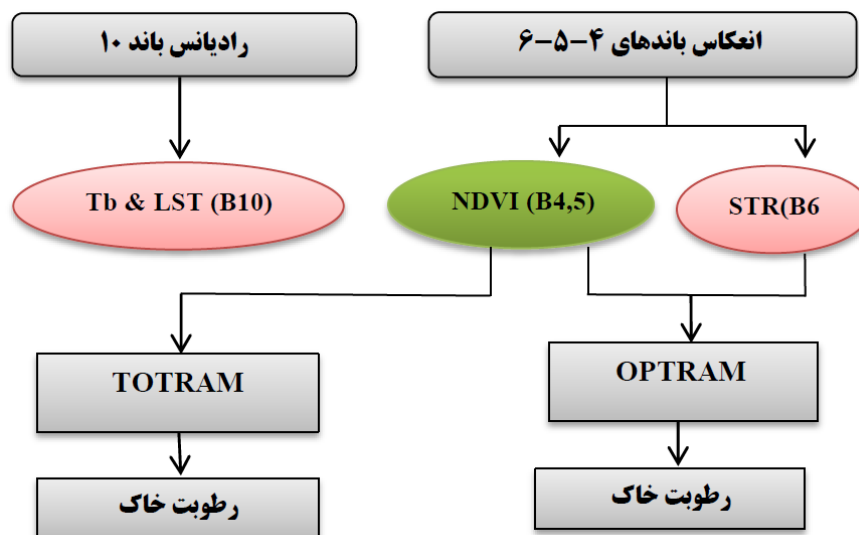
تصاویر ماهواره لندست ۸ و ۹ دارای تصحیحات هندسی است و تصحیحات اتمسفری و رادیومتریک توسط نرم‌افزار ENVI۵.۶ و با استفاده از متادیتای این تصاویر انجام گرفته است. برای به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر، تصحیحات رادیومتریک و تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH انجام گرفته است. الگوریتم FLAASH با بررسی مدل‌های انتقال تابشی، اثراتی را که از اتمسفر و زمین بر روی امواج الکترومغناطیسی منتشر شده دارند، شبیه‌سازی می‌کند. در مرحله بعد، با استفاده از نسبت‌گیری طیفی، شاخص گیاهی NDVI استخراج گردید. این شاخص، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های گیاهی، نشان‌دهنده میزان فعالیت گیاهی در منطقه موردنظر است. همچنین، برای محاسبه دمای سطح زمین، از الگوریتم تک پنجره‌ای (Window Mono) استفاده شد. 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 (رونگالی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸). روش‌ها و الگوریتم‌های

<sup>3</sup>- Tardy et al.

<sup>4</sup>- Rouse et al.

<sup>1</sup>- Rongali et al.

<sup>2</sup>- Weng



شکل ۲- نمای مراحل تحقیق جهت برآورد رطوبت خاک

مربوط به خاک خشک و  $LST_w$  دمای مربوط به خاک مرطوب است.

$$LST_d = i_d + s_d \times NDVI \quad (7)$$

$$LST_w = i_w + s_w \times NDVI \quad (8)$$

$i_d$  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 رابطه (۹) رطوبت خاک در فضای LST-VI قابل تخمین است.

$$TOTRAM = \frac{i_d + s_d \times NDVI - LST}{i_d - i_w + (s_d - s_w) \times NDVI} \quad (9)$$

#### مدل جدید دوزنقه‌ای مرئی

این مدل برای نخستین بار توسط کوبلا و مونک<sup>۱</sup> (۱۹۳۱) تحت عنوان مدل انتقال تابشی دوگانه پایه‌گذاری شد سپس توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۵) به عنوان مدل فیزیکی بین رطوبت خاک و انعکاس مادون قرمز کوتاه توسعه داده شد.

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (10)$$

$$LST = \frac{T}{1 + \left(\lambda \times \frac{T}{\rho}\right) \times \ln \varepsilon} \quad (3)$$

$LST$  دمای سطح بر حسب (°K)،  $\lambda$  طول موج باند حرارتی،  $\rho$  برابر با  $2 \times 10^{-10} \times 1/438$  و  $\varepsilon$  توان تشعشعی است که از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$\varepsilon = \varepsilon_{veg} P_v + \varepsilon_{soil} (1 - P_v) \quad (4)$$

$\varepsilon_{veg}$  برابر با  $0.99$  و  $\varepsilon_{soil}$  برابر با  $0.97$  و مقدار  $P_v$  از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (5)$$

#### مدل سنتی دوزنقه‌ای حرارتی-مرئی

این مدل بر اساس توزیع پیکسل در فضای دمای سطح زمین و پوشش گیاهی است که جهت محاسبه رطوبت خاک با استفاده از یک معادله خطی در فضای LST-VI (روابط ۶ و ۷ و ۸) برازش می‌شود.

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{LST_d - LST_w}{LST_d - LST_w} \quad (6)$$

$W$  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،  $LST_d$  دمای

<sup>1</sup>- Kubelka and Munk



$$OPTRAM = \frac{i_d + s_d \times NDVI - STR}{i_d - i_w + (s_d - s_w) \times NDVI} \quad (14)$$

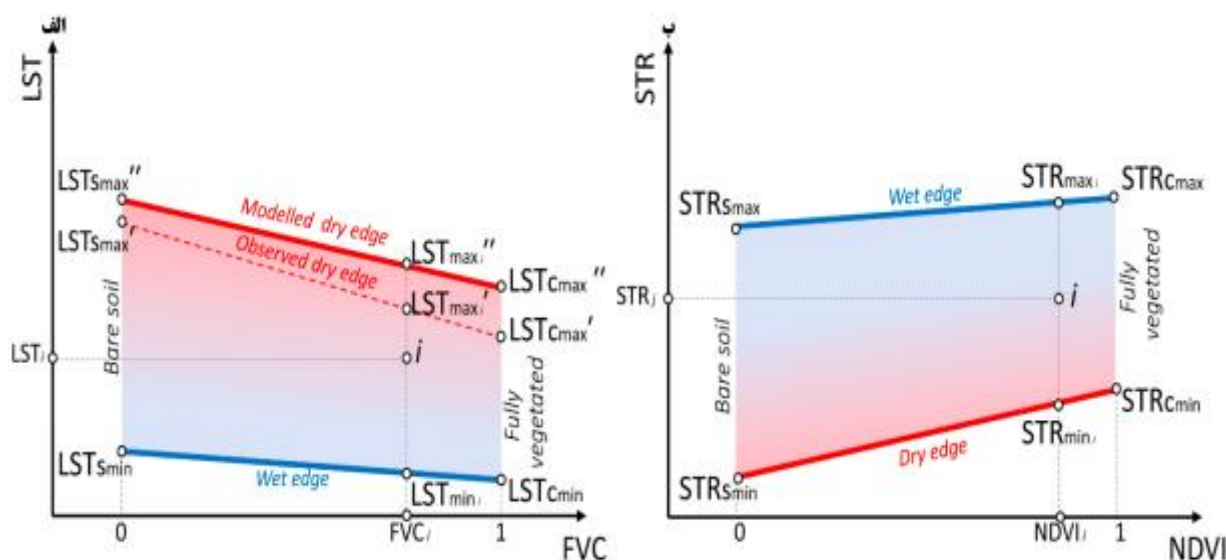
عدد بدست آمده از رطوبت خاک نوری به- صورت رطوبت خاک اشباع است که باید در مقدار تخلخل خاک ضرب گردد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است رابطه خطی بین خاک و پوشش گیاهی وجود دارد که ایجاد یک شکل مثلثی در فضای STR-NDVI انتظار می‌رود؛ بنابراین پارامترهای رابطه ۱۱ را می‌توان برای لبه‌های خشک و تر از تصاویر ماهواره‌ای استخراج نمود.

STR انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه،  $STR_d$  و  $STR_w$  به ترتیب انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه در لبه‌های خشک و تر می‌باشند.  $R_{SWIR}$  انعکاس باند مادون قرمز کوتاه برای باندهای ۶ و ۷ است.

$$STR = \frac{(1 - R_{SWIR})^2}{2 \times R_{SWIR}} \quad (11)$$

$$STR_d = i_d + s_d \times NDVI \quad (12)$$

$$STR_w = i_w + s_w \times NDVI \quad (13)$$



شکل ۳- لبه‌های خشک و تر در پارامترهای مدل‌های OPTRAM و TOTRAM (محمدی معله زاده و همکاران، ۱۴۰۲)

نمونه‌های به کار رفته،  $\bar{O}_i$  مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (16)$$

### طبقه‌بندی رطوبت خاک

معیار طبقه‌بندی مزارع نیشکر در این روش، رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و زمان سپری از آبیاری مزارع است. این طبقه‌بندی به پنج دسته رطوبتی از حالت اشباع تا تنش آبیاری تقسیم‌بندی می‌گردد که در جدول ۴ ذکر گردیده است. هدف از این طبقه‌بندی سهولت در تفسیر تصاویر، مدیریت آبیاری مزرعه و توزیع یکنواختی آبیاری

روابط ۹ و ۱۴ شبیه یکدیگر هستند با این تفاوت که STR جایگزین LST شده است. در مدل TOTRAM فضای LST-VI در زمان و مکان قابل تغییر است. مدل OPTRAM از طول موج مادون قرمز نزدیک استفاده می‌کند که تحت تأثیر پارامترهای جوی و اتمسفر نیست.

### ارزیابی نتایج مدل

برای صحت سنجی 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 (RMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) انجام شد؛ که در آن‌ها  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$  مقادیر مشاهده شده،  $n$  تعداد

NDVI افزایش می‌یابد تا گیاه به رشد بیشینه (اوج سبزیگی) برسد. بعد از مرحله رسیدگی و خواب گیاه و همچنین زرد شدن (خشکیدگی) به دلیل اینکه گیاه آب از دست می‌دهد مقدار NDVI تا حدی کاهش می‌یابد که این فرآیند در تحقیق خیرخواه زرکش و همکاران (۱۳۹۲)، ال نهری و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) و نورالدین و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) نیز گزارش شده است.

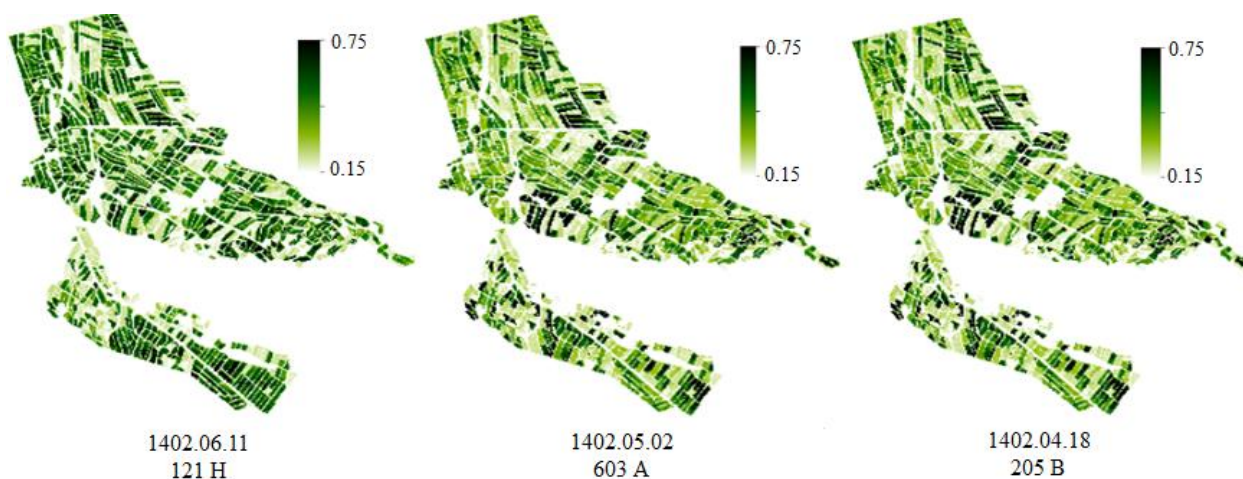
در سطح مزرعه است (محمدی معله‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲) (جدول ۴).

#### نتایج و بحث

نقشه NDVI مزارع در زمان رشد محصول در شکل ۴ نشان داده شده است. با رشد محصول، مقدار

جدول ۴- طبقه‌بندی رطوبت حجمی خاک

وضعیت مزرعه	درصد رطوبت خاک	طبقه‌بندی
رطوبت مزارعی که زمان آبیاری آن گذشته و دچار تنش می‌شود	0-15	شروع تنش
رطوبت مزارعی که زمان آبیاری آن‌ها رسیده است	15-22	شروع آبیاری (بستگی به بافت خاک)
رطوبت مزارع چهار تا هفت روز بعد از آبیاری	22-35	رطوبت متوسط
رطوبت مزارع یک تا سه روز بعد از آبیاری	35-45	رطوبت بالا
رطوبت مزارع در حال آبیاری	45-100	در حال آبیاری (اشباع)



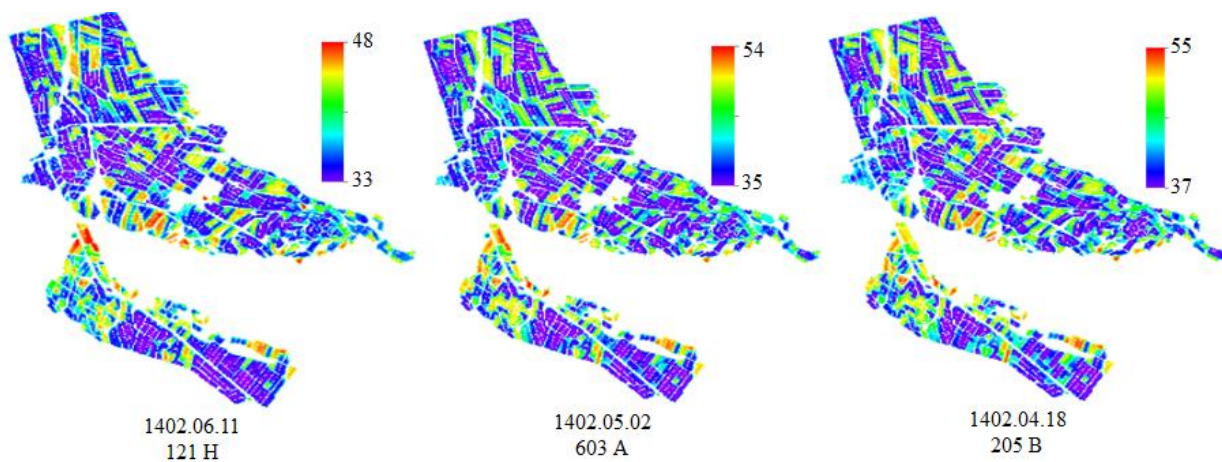
شکل ۴- نقشه NDVI مزارع

رطوبت سطحی خاک بدست آمده با استفاده از روش TOTRAM و OPTRAM در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

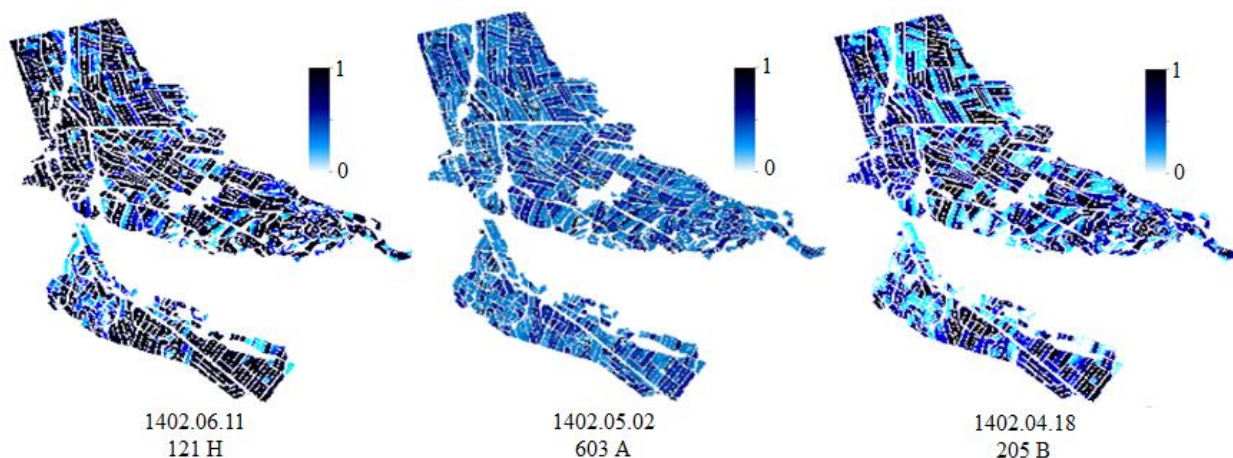
نقشه پراکنش LST در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد بیشترین بازه دمایی مربوط به خرداد، تیر و مردادماه و کمترین بازه دمایی مربوط به بهمن‌ماه است.

<sup>2</sup>- Nouredin et al.

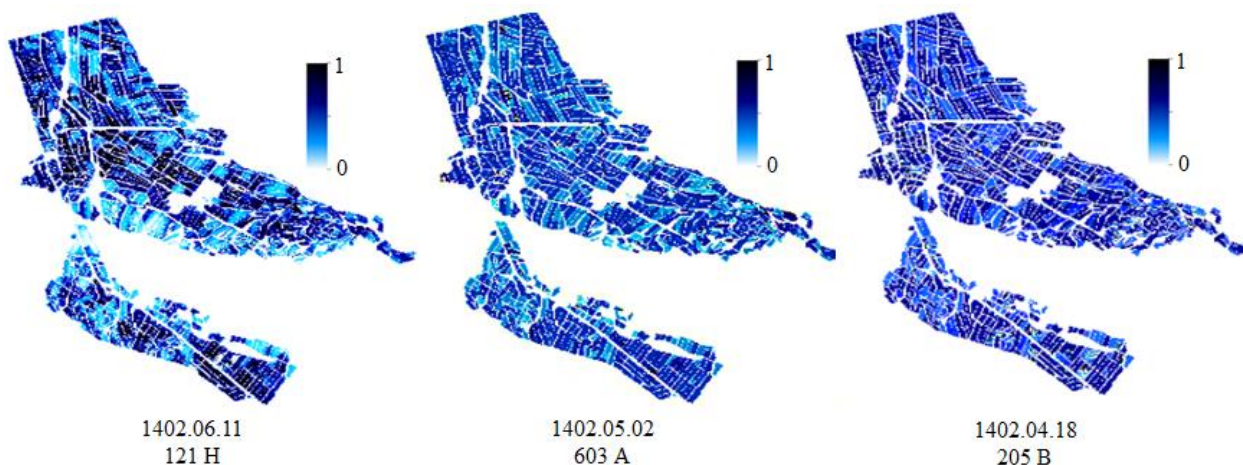
<sup>1</sup>- El Nahry et al.



شکل ۵- نقشه پراکنش LST



شکل ۶- نقشه رطوبت خاک بدست آمده به روش TOTRAM



شکل ۷- نقشه رطوبت خاک بدست آمده به روش OPTRAM

تراکم کمتر و بایر. همچنین نوسانات رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی نسبت به مناطق دیم و بایر حاکی از تأثیر آبیاری محصولات زراعی بر دمای سطح زمین و در

همان‌گونه که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود رطوبت سطحی خاک در بخش‌های غربی بیشتر است که عمدتاً مزارع پوشیده از محصول هستند، نسبت به مزارع با

بازتاب خاک و در نتیجه دمای سطح زمین تأثیر می‌گذارد (عبیات و همکاران، ۲۰۲۲). برای انجام محاسبات مدل<sup>۱</sup> TOTRAM 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 ترسیم گردید و سپس، معادلات بهترین خط‌های برازش شده بالا و پایین LSTd و LSTw، STRd و STRw برای هر یک از تاریخ‌های نمونه‌برداری شده میدانی، مشخص شد (جدول ۵).

نتیجه تغییر در شاخص‌های پوشش گیاهی و رطوبت خاک دارد. در نواحی با پوشش گیاهی متراکم، آب قدرت نفوذ بیشتری داشته و به دلیل وجود لاش‌برگ، قدرت نگهداری آب در خاک بیشتر است و نسبت مواد آلی خاک به مواد معدنی، نقش بسزایی در جذب انرژی خورشید دارد، به طوری که با افزایش کربن آلی خاک، رنگ آن تیره‌تر شده و جذب انرژی خورشید افزایش پیدا می‌کند در حالی که جذب انرژی خورشید در مناطق خشک و بایر به دلیل روشن بودن خاک و وجود املاح کاهش می‌یابد، ضمن آن‌که در مناطق با خاک مرطوب‌تر، تراکم پوشش گیاهی بر

جدول ۵- معادلات خطی بدست آمده از فضای مثلثی LST-NDVI و STR-NDVI برای شاخص TOTRAM و OPTRAM

شاخص	تاریخ	لبه خشک (LST <sub>d</sub> )	لبه تر (LST <sub>w</sub> )
TOTRAM	1401.12.20	-4.56NDVI+29.860	-3.46NDVI+25.080
TOTRAM	1402.01.31	-24.28NDVI+43.638	-3.45NDVI+29.914
TOTRAM	1402.03.24	-25.89NDVI+48.759	-6.287NDVI+36.972
TOTRAM	1402.04.18	-31.85NDVI+56.686	-4.57NDVI+37.363
TOTRAM	1402.05.02	-42.21NDVI+58.264	-4.19NDVI+36.215
TOTRAM	1402.06.11	-25.89NDVI+42.952	-12.35NDVI+36.699
TOTRAM	1402.07.20	-16.86NDVI+38.185	-17.79NDVI+31.459
TOTRAM	1402.09.25	-9.40NDVI+18.731	-1.08NDVI+14.391
TOTRAM	1402.11.20	-89.729NDVI+22.28	-23.80NDVI+17.02
شاخص	تاریخ	لبه خشک (STR <sub>d</sub> )	لبه تر (STR <sub>w</sub> )
OPTRAM	1401.12.20	0.38NDVI-0.052	0.08NDVI-0.045
OPTRAM	1402.01.31	1.19NDVI-0.186	0.036NDVI-0.024
OPTRAM	1402.03.24	0.73NDVI-0.057	0.123NDVI-0.032
OPTRAM	1402.04.18	0.42NDVI+0.148	0.11NDVI+0.261
OPTRAM	1402.05.02	1.69NDVI-0.641	0.21NDVI+0.161
OPTRAM	1402.06.11	0.703NDVI-0.015	0.28NDVI-0.074
OPTRAM	1402.07.20	1.17NDVI-0.252	0.052 NDVI-0.021
OPTRAM	1402.09.25	0.098NDVI-0.021	0.06NDVI-0.017
OPTRAM	1402.11.20	2.42NDVI-0.116	1.30NDVI-0.010

<sup>2</sup>- Optical TRapezoid Model

<sup>1</sup>- Thermal-Optical Trapezoid Model

نرمال بودن داده‌هاست. در مرحله بعد، برای بررسی ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک و شاخص‌های مورد بررسی، آزمون همبستگی پیرسون انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

توزیع نرمال بودن داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۱</sup> و شاپیرو ویلک<sup>۲</sup> با استفاده از نرم‌افزار SPSS بررسی شد. نتایج این آزمون در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو ویلک نشان‌دهنده

جدول ۶- نتایج آزمون نرمال بودن شاخص‌های به کار رفته در مدل برآورد رطوبت خاک

روش	N	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		603 A	205 B	121 H	603 A	205 B	121 H
OPTRAM	45	0.008	0.008	0.153	0.150	0.020	0.078
TOTRAM	45	0.007	0.006	0.098	0.007	0.036	0.041
Observation	45	0.200	0.200	0.164	0.329	0.275	0.067

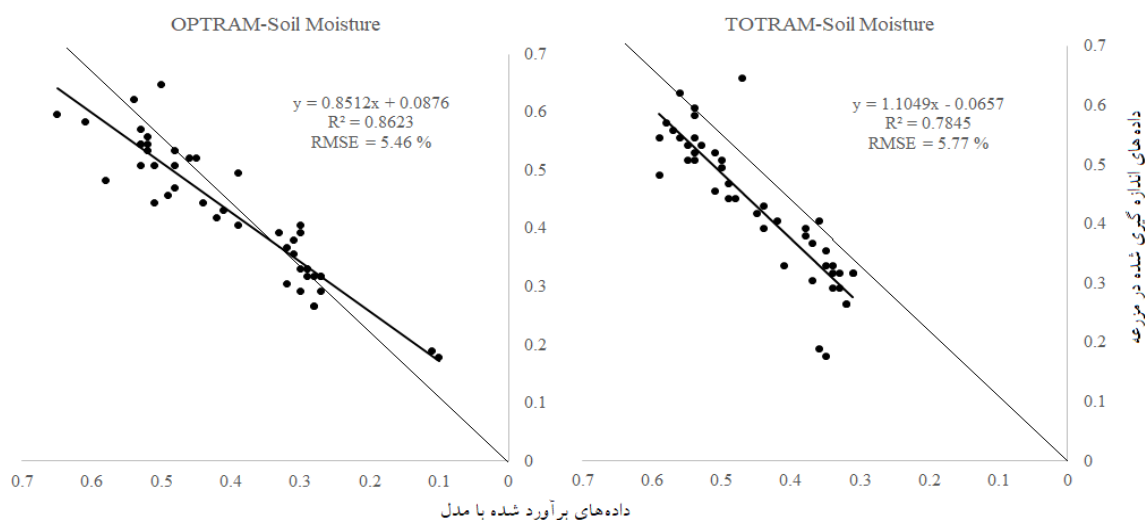
جدول ۷- همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده

روش	603 A	205 B	121 H
	Observation	Observation	Observation
OPTRAM	0.927**	0.940**	0.957**
TOTRAM	0.885**	0.907**	0.950**

نتایج جدول نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد است

در ادامه به منظور ایجاد مدل‌های خطی بین مقادیر مشاهده شده و اندازه‌گیری شده در سه بافت خاک در شکل-های ۶، ۷ و ۸ ارتباط بین رطوبت خاک مشاهده شده با روش‌های OPTRAM و TOTRAM ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص OPTRAM و TOTRAM در هر سه مزرعه با بافت خاک متفاوت، همبستگی مثبت معنی-دار در سطح یک وجود دارد؛ بنابراین نتایج به دست آمده نشان‌دهنده رابطه بسیار قوی بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص‌های مورد نظر در این پژوهش است.



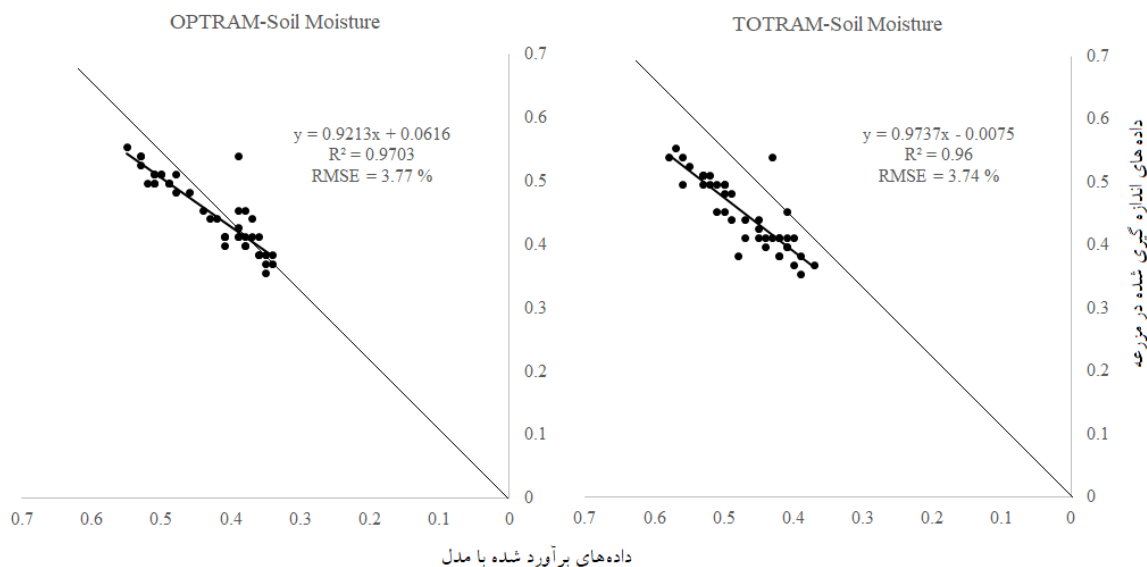
شکل ۸- ارتباط بین داده‌های بدست آمده با استفاده از روش‌های OPTRAM و TOTRAM و داده‌های مزرعه‌ای برای مزارع با بافت رسی

<sup>2</sup> -Shapiro-Wilk

<sup>1</sup> -Kolmogorov-Smirnov

با پنج درصد در برآورد رطوبت خاک در بافت خاک سنگین بیشتر است.

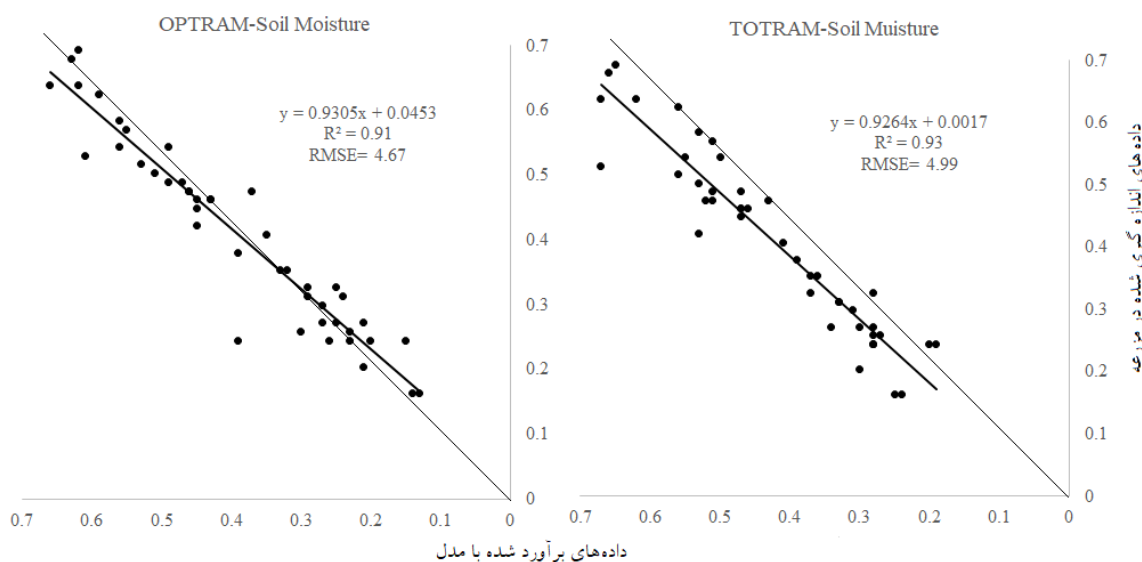
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد دقت روش OPTRAM با ضریب تبیین ۰/۸۶ و RMSE برابر



شکل ۹- ارتباط بین داده‌های بدست آمده با استفاده از روش‌های OPTRAM و TOTRAM و داده‌های مزرعه‌ای برای مزارع با بافت لومی

یکسان هر دو مدل در این نوع بافت خاک و دقت بالای هر دو مدل در مزرعه با بافت خاک لومی نسبت به دو بافت دیگر است.

در شکل ۹ مشاهده می‌گردد که ضریب تبیین برای هر دو مدل TOTRAM و OPTRAM به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۷ و RMSE یکسان است که نشان‌دهنده دقت



شکل ۱۰- ارتباط بین داده‌های بدست آمده با استفاده از روش‌های OPTRAM و TOTRAM و داده‌های مزرعه‌ای برای مزارع با بافت لومی، رسی، سیلتی

TOTRAM، مقدار ضریب تبیین ۰/۹۳ است که به معنای توانایی مدل در برآورد رطوبت خاک است. همچنین در

شکل ۱۰ نشان‌دهنده دقت مشابه هر دو مدل برای مزرعه با بافت لومی-رسی-سیلتی است. در مدل

رطوبت خاک را برآورد نماید و دلیل دقت بالای مدل OPTRAM نسبت به مدل TOTRAM در مزارع با بافت رسی می‌تواند تأثیرپذیری کمتر از عوامل محیطی در مزارع با بافت سنگین باشد که با نتایج یوسف‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد. از این داده‌ها جهت برنامه‌ریزی آبیاری با میانگین خطای متوسط (RMSE) برابر با سه تا پنج درصد به نسبت داده‌های زمینی برای مدل‌های TOTRAM و OPTRAM استفاده نمود.

در حالت کلی و با در نظر گرفتن جمیع موارد می‌توان نتیجه گرفت که با اختلاف کم مدل OPTRAM برای گیاه نیشکر در منطقه خوزستان بهتر و با کارایی بیشتر از مدل TOTRAM رطوبت خاک را برآورد می‌کند که با نتایج محمدی معله زاده و همکاران (۱۴۰۱) و همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۹) مشابه است.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به تفاوت‌های موجود بین مدل‌های TOTRAM و OPTRAM در برآورد رطوبت خاک، این دو مدل می‌توانند به‌عنوان ابزارهای کاربردی در پیش‌بینی رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه استفاده شوند. در این خصوص داده‌های مدل OPTRAM به دلیل قدرت تفکیک مکانی بهتر داده‌های نوری نسبت به داده‌های حرارتی و همچنین تأثیرپذیری کمتر نسبت به عوامل محیطی مانند دما و رطوبت نسبی هوا از کارایی بالاتری برخوردار است. نتایج حاصل از بررسی کارایی نقشه‌های رطوبت خاک جهت برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر، نشان می‌دهد 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. همچنین نتایج این تحقیق می‌تواند جهت مدیریت منابع آب و خاک، شناسایی و کنترل فرسایش خاک به‌ویژه فرسایش بادی و تعیین نواحی مستعد برای کشت گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

مدل OPTRAM، ضریب تبیین ۰/۹۱ نشان می‌دهد این مدل توانایی قابل قبولی در تخمین رطوبت خاک دارد. تحلیل داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که مدل TOTRAM و OPTRAM در هر سه بافت خاک قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه با دقت بالایی می‌باشند. به‌طور خلاصه بر اساس این نمودارها، مقادیر ضریب تبیین برای روابط رگرسیونی، بالای ۰/۶۵ بود که نشان‌دهنده برآورد مناسب رطوبت خاک به‌وسیله هر دو روش در هر سه بافت خاک است. بر اساس نتایج این پژوهش، رطوبت برآورد شده توسط مدل آماری پیشنهادی تا حد قابل قبولی نزدیک به مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) می‌باشند که با نتایج حسینی و فرخیان (۲۰۱۹) مطابقت دارد. در تحقیقی که صادقی و همکاران (۲۰۱۸) انجام دادند دو محدودیت اصلی مدل TOTRAM استفاده از باندهای حرارتی و وابسته بودن به عوامل محیطی را ذکر کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل OPTRAM می‌تواند این محدودیت‌ها را پشت سر بگذارد. در این تحقیق با توجه اطلاعات میدانی و با استفاده از نقاط کنترل زمینی به استخراج رطوبت خاک اقدام گردید و مقایسه دقت دو مدل در منطقه بررسی شد که نتایج حاکی از قابل استخراج بودن رطوبت خاک از شاخص STR با دقت مشابه در هر سه بافت خاک نسبت به LST است. نتایج نشان داد که بیشترین ضریب تبیین ( $R^2$ ) و کمترین مقدار میانگین خطای متوسط (RMSE) بین مقادیر محاسبه‌شده با مدل و داده‌های مزرعه‌ای در بافت خاک لومی بدست آمد که می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری کمتر این نوع بافت خاک نسبت به عوامل محیطی از جمله آب ماندگی درون مزارع نیشکر باشد. با توجه به دقت نسبتاً مشابه هر دو مدل در برآورد رطوبت خاک و از طرفی هزینه پایین و قابل دسترس بودن تصاویر مرئی نسبت به حرارتی و همچنین فاصله زمانی نزدیک‌تر تصاویر مرئی نسبت به حرارتی در ماهواره‌هایی مانند سنتینل، مدل OPTRAM بهتر و کاراتر از مدل TOTRAM جهت برآورد رطوبت خاک پیشنهاد می‌گردد. طبق نتایج مشاهده‌شده هر دو شاخص توانسته است

## تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی شرکت توسعه نیشکر و واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز از طریق پژوهانه نویسنده دوم به شماره (SCU.WI.1402.144) تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از حامیان مالی تشکر و قدردانی می نمایند.

## تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

## فهرست منابع

۱. خسروی، مریم. انتظاری، علیرضا. رحمانی، ابوالفضل. و باعقیده، محمد. ۱۳۹۶. پایش تغییرات سطح آب دریاچه‌ی پریشان با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور. هیدروژئوموفولوژی، ۱۳، صص: ۹۹-۱۲۰. **20.1001.1.23833254.1396.4.13.6.1**
۲. خیرخواه زرخش، میرمسعود. درویشی، مهدی. آبکار، علی‌اکبر. و احمدی، غلام‌رضا. ۱۳۹۲. برآورد شاخص‌های پوشش گیاهی برنج با تصاویر چند زمانه راداری و اپتیک. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۵)، صص: ۸۵-۹۶. **10.22059/jphgr.2014.50074**
۳. عیبات، محمد. عیبات، مصطفی. و عیبات، مرتضی. ۱۴۰۱. برآورد رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش‌ازدور (مطالعه موردی شهرستان شوشتر). تحقیقات آب‌و‌خاک ایران. ۵۳(۵): صص: ۹۵۷-۹۷۰. **10.22059/ijswr.2022.341981.669251**
۴. فشانی، محمد. ثنایی نژاد، سیدحسین. و داوری، کامران. ۱۳۹۴. تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی مودیس (مطالعه موردی: محدوده‌ی دشت مشهد). آب‌و‌خاک، ۲۹(۶)، صص: ۱۷۳۵-۱۷۴۸. **https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.34978**
۵. کاظمی‌پور اسفهلان، مهسا. محمدی، محمدحسین. و واعظی، علیرضا. ۱۳۹۷. تخمین نقطه‌ای منحنی رطوبت خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، تحقیقات کاربردی خاک، ۶(۲). صص: ۸۴-۹۵.
۶. ملایی، نرگس. ۱۳۹۴. تأثیر مدیریت‌های گوناگون کشت نیشکر بر برخی از شناسه‌های کیفیت خاک در منطقه هفت تپه خوزستان. رساله کارشناسی ارشد.
۷. محمدی معله زاده، جمال. حمزه، سعید. و ناصری، عبدالعلی. ۱۴۰۲. بررسی کارایی سنجش‌ازدور طیفی در برآورد رطوبت سطحی خاک و مقایسه آن با داده‌های حرارتی به‌منظور مدیریت آبیاری مزارع نیشکر. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۷(۱)، صص: ۸۵-۱۰۲. **10.22092/jwra.2023.360324.953**
۸. محمدی معله‌زاده، جمال. حمزه، سعید. و ناصری، عبدالعلی. ۱۴۰۱. برآورد رطوبت سطحی خاک و بررسی برنامه‌ریزی آبیاری اراضی نیشکر با استفاده از مدل دوزنقه حرارتی. مجله تحقیقات آب‌و‌خاک ایران، ۵۳(۱۰). صص: ۲۲۰۹-۲۲۲۳. **10.22059/ijswr.2022.338383.669214**
9. Carlson, T.N., 2013. Triangle models and misconceptions, *Int. J. Remote Sensing Applications*, 3(3), pp: 155-158. **20.1001.1.20087942.1402.17.3.14.2**
10. Carlson, T.N., 2007. An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 7, pp: 1612-1629. **10.22059/ijswr.2019.266967.668024**
11. Carlson, T.N., Gillies, R.R. and 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 Sens*, 9(1-2), pp: 161-173. <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>
12. Curran, P.J., 1985. Principles of Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 6(11), p: 1765. <https://doi.org/10.1080/01431168508948322>
  13. El Nahry, A.H., Ali, R.R. and El Baroudy, A.A., 2012. An approach for precision farming under pivot irrigationsystem using remote sensing and GIS techniques, *Journal of Agricultural Water Management*, 98 (4), pp:517-531. **10.1016/j.agwat.2010.09.012**
  14. Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. and Weidner, V.R., 1965. Spectral properties of plants. *Applied optics*, 4(1), pp: 11-20. <https://doi.org/10.1364/AO.4.000011>
  15. Hosseini, F. and Farrokhian, A., 2019. Pedotransfer Function (PTF) for Estimation Soil Moisture Using NDVI, Land Surface Temperature (LST) and Normalized Moisture (NDMI) Indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), pp: 239-254. **10.22069/jwsc.2019.15306.3053**
  16. Kornelsen, K.C. and Coulibaly, P., 2015. Reducing multiplicative bias of satellite soil moisture retrievals, *Remote Sensing of Environment*, 165(1), pp: 109-122. **10.1016/j.rse.2015.04.031**
  17. Mason, M., 2010. Sample Size and Saturation in PhD Studies Using Qualitative Interviews. *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum: Qualitative Social Research*, 11(3). <https://doi.org/10.17169/fqs-11.3.1428>
  18. McNally, A., Husak, G.J., Brown, M., Carroll, M., Funk, C., Yatheendradas, S., Arsenault, K., Peters-Lidard, C., and Verdin, J.P., 2015. Calculating Crop Water Requirement Satisfaction in the West Africa Sahel with Remotely Sensed Soil Moisture. *Journal of Hydrometeorology*, 16, pp.295-305. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0049.1>
  19. Moran, M.S., Clarke, T.R. and Inoue, Y., 1994. Vidal Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), pp.246-263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90020-5)
  20. Nichols, D.S., 2011. Essentials of MMPI-2 assessment (2nd ed.), Essentials of psychological assessment. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.
  21. Noureldin, N.A., Aboelghar, M.A., Saady, H.S., and Ali, A.M., 2013. Rice yield forecasting models using satellite imagery in Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 16, pp.125-131. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.04.005>
  22. Ochsner, T.E., Cosh, M.H., Cuenca, R.H., Dorigo, W.A., Draper, C.S., Hagimoto, Y., Kerr, Y.H., Njoku, E.G., Small, E.E and Zreda, M., 2013. State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 77(6), pp.1888-1919. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0093>
  23. Pan, M., Sahoo, a.K., Wood, E.F., Al Bitar, A., Leroux, D. and Kerr, Y.H., 2012. An Initial Assessment of SMOS Derived Soil Moisture overthe Continental United States. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, pp.1448-1457. **10.1109/JSTARS.2012.2194477**
  24. Pasolli, L., Notarnicola, C., Bertoldi, G., Della Chiesa, S., Niedrist, G. and L Bruzzone, L., 2014. Soil moisture monitoring in mountain areas by using high-resolution SAR images: Results from a feasibility study, *European journal soil science*. 65(6), pp.852-64. <https://doi.org/10.1111/ejss.12189>
  25. Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K., and 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), pp.829-840.
26. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351, Washington DC, pp.309-317.
27. Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M. and Jones, S.B., 2017. The opticaltrapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 198, pp.52-68. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>
28. Sadeghi, M., Jones, S.B. and Philpot, W.D., 2015. A linear physicallybased model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sens, Environ*, 164, pp.66–76. [10.1016/j.rse.2015.04.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.007)
29. Shahmoradi, S., Malamiri, H.R.G. and Amini, M., 2021. Extraction of Soil Moisture Index (TVDI) Using a Scatter Diagram Temperature/Vegetation and MODIS Images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(1), pp.38–62. [10.30495/GIRS.2021.675968](https://doi.org/10.30495/GIRS.2021.675968)
30. Verstraeten, W., Veroustraete, F., Van Der Sande, C.J., Grootaers, I. and Feyen, J., 2006. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), pp.299–314. [10.1016/j.rse.2005.12.016](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.016)
31. Wang, L. and Qu, J.J., 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring, a review, *Front. Earth Sci, China*, 3(2), pp.237–247. [10.1007/s11707-009-0023-7](https://doi.org/10.1007/s11707-009-0023-7)
32. Zhang, D. and Zhou, G., 2016. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: a review. *Sensors*, 16(8), p.1308. <https://doi.org/10.3390/s16081308>