



Estimation of Surface Soil Moisture Using the Thermal-Optical TRapezoid Model with Landsat-8 Data

Atefeh Nouraki¹ | Mona Golabi² | Mohammad Albaji³ | Abd Ali Naseri⁴ |
Saeid Homayouni⁵

1. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: a_nouraki@stu.scu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.golabi@scu.ac.ir
3. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.albaji@scu.ac.ir
4. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: abdalinaseri@scu.ac.ir
5. Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), 490 Couronne St, Quebec, QC G1K 9A9, Canada. E-mail: saeid.homayouni@inrs.ca

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 29 May 2024

Received in revised form

29 June 2024

Accepted 25 July 2024

Published online 10 February 2025

Keywords:

Optical and thermal remote sensing

Soil moisture

Sugarcane

Vegetation index

ABSTRACT

Soil moisture is a critical variable for land-atmosphere interactions. It measures drought conditions in agricultural areas and significantly impacts surface water and agricultural production. This study aims to evaluate the Thermal-Optical TRapezoid Model (TOTRAM) in estimating surface soil moisture at a farm scale using Landsat-8 imagery in the Hakim Farabi sugarcane agro-industrial company lands in Khuzestan, Iran. For this purpose, 16 Landsat-8 images were used during the sugarcane growing season in the agricultural year 2019-2020, and simultaneously, surface soil moisture was measured at 27 ground control points at a depth of 0-10 cm. Additionally, to investigate the potential of various vegetation indices in the TOTRAM model, NDVI, SAVI, and kNDVI were used in soil moisture modeling. Subsequently, the wet and dry edges were determined based on the distribution of pixels in the different LST-NDVI, LST-SAVI, and LST-kNDVI spaces. The distribution of pixels in various LST-VI spaces showed significant changes in land surface temperature from November 11, 2019, to October 28, 2020. These temperature changes led to significant variations in the distribution of pixels and the equations of the wet and dry edges over the studied period. The results also indicated a better correlation of soil moisture with TOTRAM-SAVI (0.56) compared to TOTRAM-kNDVI (0.46). Moreover, examining the soil moisture maps derived from the TOTRAM model showed that with increased plant growth, soil moisture increased, and soil moisture distribution heterogeneity decreased in the sugarcane fields. Overall, despite the need for local calibration, the TOTRAM model can estimate soil moisture with acceptable accuracy over large geographical areas.

Cite this article: Nouraki, A., Golabi, M., Albaji, M., Naseri, A. A., & Homayouni, S. (2025). Estimation of Surface Soil Moisture Using the Thermal-Optical TRapezoid Model with Landsat-8 Data. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (4), 827-844. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.376802.1163>





برآورد رطوبت سطحی خاک مبتنی بر مدل ذوزنقه‌ای نوری-حرارتی با استفاده از داده‌های لندست-۸

عاطفه نورکی^۱ | منا گلابی^۲ | محمد الباجی^۳ | عبدعلی ناصری^۴ | سعید همایونی^۵

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: a_nouraki@stu.scu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.golabi@scu.ac.ir
۳. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.albaji@scu.ac.ir
۴. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: abdalinaseri@scu.ac.ir
۵. گروه سنجش از دور محیطی و ژئوماتیک، مرکز آب، زمین و محیط زیست، INRS-کبک، کانادا. رایانامه: saeid.homayouni@inrs.ca

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

رطوبت خاک یک عامل حیاتی در تعامل بین زمین و جو است که نقش مهمی در ارزیابی شرایط خشک‌سالی در مناطق کشاورزی دارد و می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر منابع آب سطحی و تولیدات کشاورزی داشته باشد. این مطالعه با هدف ارزیابی مدل ذوزنقه‌ای نوری-حرارتی (TOTRAM) در برآورد رطوبت سطحی خاک در مقیاس مزرعه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ در اراضی کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی خوزستان، ایران انجام شده است. در این راستا از ۱۶ تصویر ماهواره لندست-۸ در طول دوره رشد گیاه نیشکر در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ استفاده گردید و هم‌زمان رطوبت سطحی خاک در ۲۷ نقطه کنترل زمینی در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی پتانسیل شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در مدل TOTRAM از NDVI، SAVI و kNDVI در مدل‌سازی رطوبت خاک استفاده گردید. توزیع پیکسل‌ها در فضاهای مختلف LST-VI نشان داد که از تاریخ ۲۰ آبان‌ماه ۱۳۹۸ تا هفتم آبان‌ماه ۱۳۹۹، تغییرات قابل توجهی در دمای سطح زمین رخ داده است. این تغییرات دما، باعث تغییرات زیاد توزیع پیکسل‌ها و معادلات لیه مرطوب و خشک در طول یک سال شد. هم‌چنین نتایج نشان از همبستگی بهتر رطوبت خاک با TOTRAM-SAVI (۰/۵۶) در مقایسه با TOTRAM-kNDVI (۰/۴۶) داشت. علاوه بر این، بررسی نقشه‌های رطوبت خاک حاصل از مدل TOTRAM نشان داد که با افزایش رشد گیاه، شاهد افزایش رطوبت خاک و کاهش توزیع ناهمگونی رطوبت خاک در اراضی نیشکر هستیم. به‌طور کلی مدل TOTRAM با وجود نیاز به واسنجی محلی قادر به برآورد مقدار رطوبت خاک در پهنه‌های وسیع جغرافیایی با دقت قابل قبول است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

کلیدواژه‌ها:

رطوبت خاک
سنجش از دور نوری-حرارتی
شاخص پوشش گیاهی
نیشکر

استناد: نورکی، عاطفه؛ گلابی، منا؛ الباجی، محمد؛ ناصری، عبدعلی و همایونی، سعید (۱۴۰۳). برآورد رطوبت سطحی خاک مبتنی بر مدل ذوزنقه‌ای نوری-حرارتی با استفاده از داده‌های لندست-۸. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۴)، ۸۲۷-۸۴۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.376802.1163>



۱. مقدمه

دانش دقیق در مورد وضعیت رطوبت خاک^۱ و پویایی مکانی و زمانی آن برای تولید محصول به‌منظور جلوگیری از تنش آبی، کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از آبیاری بیش از حد و هم‌چنین برای حفظ منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار ضروری است (Tuller et al., 2019; Nouraki et al., 2021). در دو دهه گذشته توانایی روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌طور قابل‌توجهی در مقیاس‌های نقطه‌ای تا جهانی افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، روش‌های سنتی شامل روش‌های وزنی^۲، نوترونی، بازتاب‌سنجی حوزه زمان^۳، ظرفیت خازنی و تانسئومتر^۴، برای اندازه‌گیری نقطه‌ای باوجود دقت بالا در مقیاس محلی، دارای معایبی مانند صرف وقت و هزینه زیاد نمونه‌گیری در مقیاس منطقه‌ای است (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2013). از این‌رو، روش‌های سنتی سنجش رطوبت خاک با توجه به تغییرات مکانی و زمانی زیاد آن، توانایی اندازه‌گیری دقیق رطوبت سطح خاک را به‌نحو مطلوب در مقیاس‌های بزرگ نداشته و هم‌چنین نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی مجهز دارند. درحالی‌که سنجش از دور^۵ داده‌های مقرون‌به‌صرفه را فراهم می‌کند و قادر به ارائه تخمین‌های رطوبت خاک در مقیاس محلی تا جهانی است (Babaeian et al., 2019). مطالعات مختلفی نشان دادند که بازتابش انعکاسی خاک، تشعشع حرارتی و پراکنش امواج مایکروویو به شکل وسیعی با رطوبت خاک همبستگی دارند (Sadeghi et al., 2017; Nouraki et al., 2023; Quintana-Molina et al., 2023). از طرفی توان تفکیک‌پذیری مکانی درشت مقیاس سنسورهای مایکروویو غیرفعال و هم‌چنین اثرات اختلال زبری خاک و پوشش گیاهی بر پراکنش امواج مایکروویو، امکان استفاده از این سنسورها را محدود می‌کند (Baghdadi et al., 2017). درحالی‌که نقاط ضعف این روش را می‌توان تا حد زیادی با استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری-حرارتی برطرف کرد.

یکی از رایج‌ترین مدل‌های به‌کاررفته در سنجش‌ازدور جهت برآورد رطوبت خاک، مدل ذوزنقه‌ای/مثلثی است (Carlson et al., 1994; Moran et al., 1994). مدل ذوزنقه نوری-حرارتی^۶ (TOTRAM) براساس تفسیر توزیع پیکسل در فضای بین دمای سطح زمین^۷ (LST) و شاخص پوشش گیاهی^۸ (VI) تعیین می‌شود. یکی از دلایل موفقیت این مدل متکی‌بودن به داده‌های سنجش‌ازدور حرارتی و نوری و عدم نیاز به اطلاعات جوی و داده‌های جانبی است (Mohammadi Moalezade et al., 2022). هم‌چنین تغییرات رطوبت خاک، تأثیرات فراوان بر ویژگی‌های حرارتی خاک دارد؛ به‌عبارت دیگر، تغییرات روزانه دمای هوا، همبستگی بالایی با مقدار رطوبت خاک دارد. در این میان استفاده ترکیبی از داده‌های دمای سطح زمین و شاخص‌های گیاهی از قبیل شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی^۹ (NDVI) بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Sadeghi et al., 2017; Babaeian et al., 2019; Mohammadi Moalezade et al., 2022). شایان ذکر است که NDVI به‌دلیل همبستگی آن با متغیرهای بیوفیزیکی پوشش گیاهی مانند زیست‌توده، شاخص سطح برگ و پوشش گیاهی کسری، توصیف‌گر معمولی برای پوشش گیاهی در مدل‌های ذوزنقه‌ای/مثلثی حرارتی است (Jiang and Islam, 1999). با این حال، ذکر این نکته ضروری است که NDVI ممکن است در شرایط زیست‌توده بالا اشباع شود و هم‌چنین می‌تواند تحت تأثیر روشنایی خاک قرار گیرد (Taddeo et al., 2019; Alavi et al., 2023).

Babaeian et al. (2019) از شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده با خاک^{۱۰} (SAVI)، به جای NDVI برای رفع این اشکالات در فضای ذوزنقه نوری استفاده کرد. Wang et al. (2011) رابطه NDVI با رطوبت خاک در مناطق نیمه‌خشک را بسیار معتبرتر از مناطق مرطوب ارزیابی کردند و میزان تأخیر زمانی در تأثیر رطوبت خاک بر NDVI را در مناطق مرطوب بیشتر از مناطق نیمه‌خشک بیان نمودند. Krishnan and Indu (2023) برای بازیابی رطوبت خاک بر روی حوضه گانگادر هند از تصاویر ماهواره‌ای مودیس^{۱۱} و مدل TOTRAM استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان از همبستگی بهتر بین رطوبت خاک برآورد شده با استفاده از TOTRAM-EVI در مقایسه با TOTRAM-NDVI داشت. هم‌چنین تغییرات

زمانی رطوبت خاک حاصل از مدل^{۱۲} TOTRAM-EVI تقریباً حداکثر و حداقل تغییرات رطوبت خاک را در اکثر مکان‌ها ثبت کرد.

به‌طور کلی مرور منابع اخیر نشان داد که تخمین بهتر رطوبت خاک توسط مدل TOTRAM به‌طور مؤثری به نوع شاخص پوشش گیاهی بستگی دارد. از طرفی تاکنون پژوهشی جهت برآورد رطوبت خاک حاصل از مدل TOTRAM مبتنی بر شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در شرایط پوشش گیاهی متراکم به‌ویژه در اراضی نیشکر صورت نگرفته است. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی پتانسیل شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی (SAVI، NDVI، و kNDVI^{۱۳}) در تخمین رطوبت سطحی خاک با استفاده از مدل TOTRAM در مزارع نیشکر است. این پژوهش شامل مراحل مختلف رشد محصول بوده و تلاش می‌کند تا دقت و کارایی هر یک از این شاخص‌ها را در شرایط گوناگون زراعی بررسی کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در کشت و صنعت حکیم فارابی در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۶ دقیقه و ۰۸ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۹ دقیقه و ۲۰ ثانیه در ارتفاع ۱۱ متری از سطح دریا واقع شده است. مساحت کل این کشت و صنعت ۱۴۰۰۰ هکتار و سطح زیر کشت آن ۱۲۰۰۰ هکتار است که دارای ۴۸۰ مزرعه ۲۵ هکتاری (۲۵۰×۱۰۰۰) است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. این منطقه دارای اقلیم خشک با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های معتدل می‌باشد. فصل ریزش‌های جوی از آبان‌ماه آغاز می‌شود و گاهی تا اردیبهشت‌ماه ادامه می‌یابد. سردترین و گرم‌ترین دماها در منطقه مورد بررسی به ترتیب در ماه‌های دی و مرداد ثبت شده است.

۲.۲. داده‌های مورد استفاده

۲.۲.۱. داده‌های زمینی

برای مدل‌سازی دقیق تغییرات رطوبت در طول دوره بررسی، رطوبت خاک در بیش از ۴۳۰ نقطه کنترل زمینی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به‌وسیله آگر جمع‌آوری و سپس برای توزین به آزمایشگاه کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی منتقل شدند. پس از اندازه‌گیری اولیه، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در نهایت وزن خشک آن‌ها محاسبه شد. سپس با استفاده از معادله (۱) رطوبت جرمی خاک تعیین شد. در نهایت، برای به‌دست‌آوردن رطوبت حجمی خاک، این مقدار در وزن مخصوص ظاهری ضرب گردید.

$$\theta_m = \frac{M_w - M_s}{M_s} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، θ_m درصد رطوبت جرمی خاک، M_w وزن تر نمونه خاک (گرم) و M_s وزن خشک نمونه خاک (گرم) است. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک، ابتدا نمونه‌های خاک در هوا خشک شدند و پس از خردکردن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس، فراوانی نسبی ذرات خاک شامل درصد رس، سیلت و شن با استفاده از روش هیدرومتر (Day, 1965) و وزن مخصوص ظاهری^{۱۵} (BD) به روش حجمی (Blake, 1965) تعیین شد. سپس اندازه‌گیری مقدار رطوبت جرمی در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به ترتیب با اعمال مکش ۰/۳۳ و ۱۵ بار انجام شد. آمار پایه شامل مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین خصوصیات خاک اندازه‌گیری شده در جدول (۱) ذکر شده است.

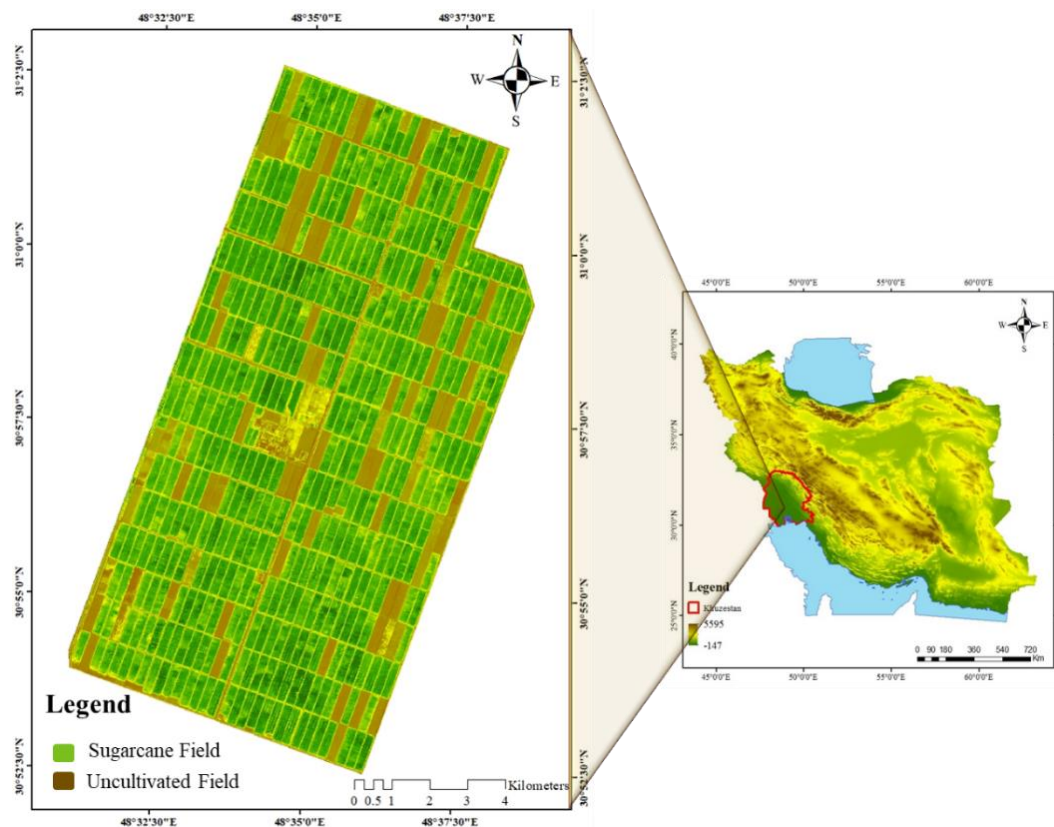


Figure 1. The location of the study area

Table 1. Statistical summary of the studied soil properties

Soli Property	Min	Max	Mean
Sand (%)	7	20	12.8
Silt (%)	45	56	51.1
Clay (%)	33	44	36.1
BD (g cm ⁻³)	1.3	1.5	1.4
θ _{FC} (cm ³ cm ⁻³)	0.33	0.41	0.38
θ _{PWP} (cm ³ cm ⁻³)	0.14	0.19	0.17
θ (cm ³ cm ⁻³)	0.18	0.60	0.34

۲.۲.۲. داده‌های ماهواره و پردازش تصاویر

جهت برآورد رطوبت سطحی خاک از طریق مدل ذوزنقه‌ای نوری-حرارتی، از داده‌های ماهواره لندست ۸^{۱۶} در بازه زمانی ۲۰ آبان ماه ۱۳۹۸ تا هفتم آبان ماه ۱۳۹۹ استفاده گردید. در این مطالعه از ۱۶ تصویر بدون ابر ماهواره لندست ۸- استفاده شد. این تصاویر با دقت زمانی ۱۶ روزه و دقت مکانی ۳۰ متر در ۳۰ متر از مجموعه داده‌های موجود در پلتفرم GEE^{۱۷} با عنوان USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1 استخراج شدند. این مجموعه داده‌ها شامل بازتاب سطحی تصحیح‌شده از نظر جوی برای پنج باند مرئی^{۱۸} و نزدیک به مادون قرمز^{۱۹} (NIR)، دو باند مادون قرمز کوتاه‌موج^{۲۰} (SWIR) و دو باند مادون قرمز حرارتی^{۲۱} (TIR) است. شایان ذکر است برای تولید مدل ذوزنقه‌ای نوری-حرارتی نیاز به برآورد دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی است. بدین منظور شاخص‌های گیاهی (NDVI، SAVI و kNDVI) محاسبه شدند. شاخص‌های گیاهی موردنظر به این دلیل انتخاب شدند که پیاده‌سازی آن‌ها آسان است و وضعیت پوشش گیاهی را در بازه‌های زمانی هفتگی، ماهانه و سالانه به درستی نشان می‌دهند (Burdun et al., 2023).

NDVI در حقیقت نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی است که با نسبت تابش جذب‌شده توسط فتوسنتز مرتبط است و فعالیت کلروفیل گیاهان را منعکس می‌کند و همچنین با تبخیر و تعرق گیاه رابطه قوی دارد (Alavi *et al.*, 2024). بازه مقادیر NDVI بین منفی یک تا مثبت یک متغیر است. عموماً مقادیر کم‌تر از صفر به‌عنوان نواحی مرطوب و آب در نظر گرفته می‌شوند. SAVI یک شاخص گیاهی مشتق‌شده از NDVI است که شامل یک ضریب تصحیح (L) می‌باشد که تغییرات ایجادشده توسط حضور خاک در سطوح ناهمگن را به حداقل می‌رساند (Huete *et al.*, 1994). kNDVI یک شاخص گیاهی مشتق‌شده از NDVI است که برای بهبود دقت و کارایی در تشخیص و تجزیه و تحلیل پوشش گیاهی استفاده می‌شود. kNDVI می‌تواند نویزهای موجود در تصاویر سنجش از دور را کاهش داده و سیگنال‌های مرتبط با پوشش گیاهی را تقویت کند (Burdun *et al.*, 2023). شاخص‌های موردبررسی از طریق معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$\text{SAVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}} + L} (1 + L) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\text{kNDVI} = \tanh(\text{NDVI}^2) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، ρ_{NIR} و ρ_{Red} انعکاس در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است. L فاکتوری جهت از بین بردن تأثیرات پوشش گیاهی می‌باشد که برای پوشش گیاهی بسیار کم مقدار ۱، پوشش گیاهی متوسط مقدار ۰/۵ و برای تراکم بالا مقدار ۰/۲۵ پیشنهاد شده است (Huete *et al.*, 1994). در این پژوهش از مقدار L برابر با ۰/۲۵ استفاده گردید. در ادامه برای محاسبه دمای سطح زمین از الگوریتم تک کانال استفاده شد (رابطه ۴). در الگوریتم تک‌کانال علاوه بر دمای درخشندگی و شاخص انتشار از میزان بخار موجود در جو نیز استفاده می‌شود.

$$T_s = \gamma \times \left[\frac{1}{\varepsilon} \times (\psi_1 \times L_{\text{sensor}} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، T_s دمای سطح زمین، ε انتشار حرارت سطح زمین، L_{sensor} تابش طیفی در بالای اتمسفر، ψ توابع اتمسفری است. برای اطلاعات بیشتر به پژوهش Jimenez-Munoz *et al.* (2014) رجوع شود.

۳.۲. مدل دوزنقه‌ای نوری - حرارتی

رابطه دوزنقه‌ای LST-NDVI در ابتدا توسط Goward and Hope (1989) و سپس توسط Moran *et al.* (1994) برای تجزیه و تحلیل وضعیت تنش آبی پوشش گیاهی و برآورد رطوبت سطحی خاک ایجاد شد. مقدار نسبی مقادیر مربوط به محتوای آب سطحی خاک و شار انرژی سطحی را می‌توان با موقعیت پیکسل در دوزنقه LST-NDVI تعریف کرد. اگرچه موقعیت پیکسل تحت تأثیر عوامل متعددی مانند پوشش گیاهی، زبری سطح، تشعشع خالص و خاصیت حرارتی سطح قرار می‌گیرد، تأثیر غالب معمولاً از تغییرات تبخیر و تعرق ناشی از رطوبت خاک در دسترس گیاه است (Sandholt *et al.*, 2002). همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، پیکسل‌های نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم با رطوبت غیرمحدود در ناحیه سمت راست لبه پایین دوزنقه قرار دارند در حالی که پیکسل‌های خاک خشک و لخت در لبه بالایی دوزنقه جمع می‌شوند. انتقال از پوشش گیاهی متراکم مرطوب به خاک لخت و خشک را می‌توان با حرکت در امتداد لبه خشک مثلث تصور کرد (شکل ۱). یکی از محدودیت‌های قابل توجه فضای ویژگی LST-VI، پارامترسازی پیچیده و محاسباتی فشرده برای مشاهدات زمانی است که به دلیل وابستگی LST به ویژگی‌های خاص منطقه مانند ساختار تاج پوشش و شرایط جوی محیط، باید برای هر روز به‌طور جداگانه پارامتر شود.

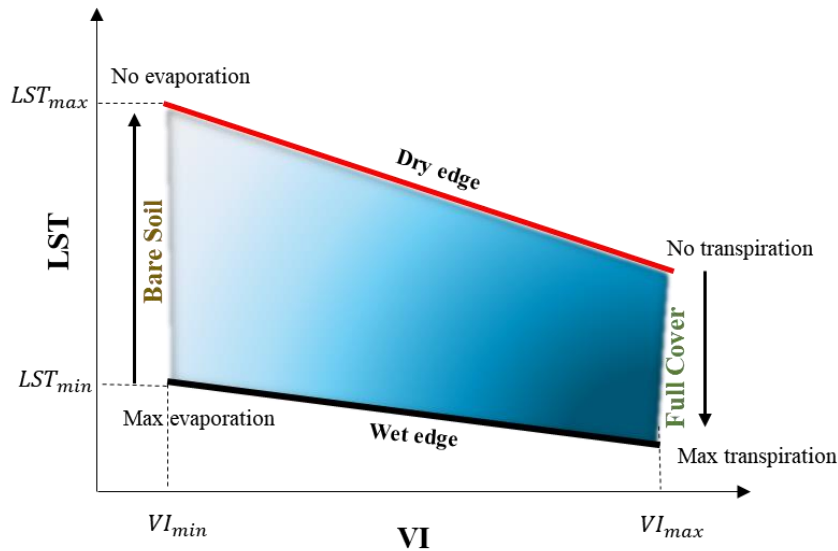


Figure 2. LST-VI trapezoid, describing the transition of full coverage to the bare soil and the interpretation of the pixel's position inside the trapezoid (Sandholt *et al.*, 2002)

در مدل TOTRAM، رطوبت سطحی خاک از طریق یک رابطه خطی معکوس به فضای ذوزنقه دوبعدی LST-NDVI مرتبط است.

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{LST_d - LST}{LST_d - LST_w} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن، W شاخص رطوبت^{۱۴} است؛ LST_d و LST_w به ترتیب LST مربوط به خشک‌ترین و مرطوب‌ترین پیکسل خاک هستند که برای یک تاریخ معین، از فضای ذوزنقه LST-VI به دست می‌آیند (روابط ۶ و ۷).

$$LST_d = i_d + s_d VI \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$LST_w = i_w + s_w VI \quad \text{(رابطه ۷)}$$

در روابط بالا، 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. متداول‌ترین شاخص گیاهی مورد استفاده در TOTRAM، شاخص گیاهی NDVI است که از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

که در آن، ρ_{NIR} و ρ_{Red} انعکاس در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است.

پس از محاسبه دمای سطح زمین و تراکم پوشش گیاهی، رطوبت خاک با استفاده از رابطه (۵) به روش مدل ذوزنقه‌ای نوری-حرارتی محاسبه می‌شود.

$$W = \frac{i_d + s_d NDVI - LST}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

شایان ذکر است که W برای استخراج رطوبت خاک بر حسب پیکسل در مقیاس بین صفر و ۱ (محدوده صفر تا ۱۰۰ درصد) استفاده می‌شود که به عنوان رطوبت نرمال شده خاک نیز نامیده می‌شود (رابطه ۹). با این حال، برای به دست آوردن مقدار رطوبت حجمی خاک از روابط (۵) و (۹) به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$\theta_v = \theta_{min} + W \times (\theta_{max} - \theta_{min}) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

۴. نتایج و بحث

۴.۱. فضای LST-VIs

شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) توزیع پیکسلی فضای LST و شاخص‌های NDVI، SAVI و kNDVI را در طول دوره رشد نیشکر نشان می‌دهد. در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) طیف وسیعی از مقادیر LST و شاخص‌های پوشش گیاهی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی است. تغییرات مشاهده شده را علاوه بر تغییرات دمای هوا و تبخیر، می‌توان به پاسخ‌دهی LST به تغییرات در محتوای آب خاک، در کنار حساسیت شاخص‌های پوشش گیاهی به تغییرات در پوشش گیاهی نسبت داد. در نتیجه، طیف متنوعی از مزارع آیش و پیکسل‌های زمین لخت در محدوده پارامترهای $NDVI < 0.2$ ، $SAVI < 0.2$ و $kNDVI < 0.1$ ظاهر می‌شوند، که نشان‌دهنده تغییرات رطوبت خاک در حداقل محدوده پوشش گیاهی است. در تاریخ‌های ۲۰ آبان‌ماه تا ۱۰ بهمن‌ماه ۱۳۹۸ طیف وسیعی از پیکسل‌ها با مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف مشاهده می‌شود که نشان‌گر وجود مزارعی است که هنوز در آن‌ها برداشت انجام نشده است. در حالی‌که در تاریخ‌های ۱۲ اسفندماه و ۱۵ فروردین‌ماه، بیش‌ترین تراکم پیکسل‌ها مربوط به مزارعی با پوشش گیاهی کم بود. با افزایش آبیاری مزارع نیشکر و رشد مجدد آن‌ها در این محدوده زمانی، افزایش چشم‌گیری در رشد پوشش گیاهی رخ داد. این تغییرات به‌وضوح در توزیع پیکسل‌ها در هر سه فضای طیفی (LST-NDVI، LST-SAVI و LST-kNDVI) قابل مشاهده است (شکل‌های ۴، ۵ و ۶). بنابراین، فضای طیفی LST-VIs می‌تواند به‌طور مؤثر سطوح آبیاری شده، پوشش گیاهی و پیکسل‌های خاک را در طول رشد محصول آشکار کند.

Table 2. Dry and wet edge parameters of NDVI-LST space using Landsat-8 data across different dates of observations

Year	Month	Day	Dry edge		Wet edge	
			i_d	s_d	i_w	s_w
2019	11	11	314.66	-15.63	300.74	-1.58
2019	12	29	297.02	-4.67	292.23	-0.87
2020	1	30	279.89	-5.41	291.70	0.14
2020	3	2	304.56	-8.72	295.88	-1.61
2020	4	3	320.01	-22.72	301.56	-0.53
2020	5	21	336.01	-27.94	312.63	-4.36
2020	6	6	337.29	-22.50	314.51	-6.02
2020	6	22	331.27	-16.94	311.49	-3.97
2020	7	8	338.08	-21.48	317.62	-7.35
2020	7	24	324.85	-12.99	315.24	-7.13
2020	8	9	336.56	-20.39	315.83	-6.17
2020	8	25	331.64	-17.04	311.78	-1.43
2020	9	10	341.58	-36.33	311.78	-3.20
2020	9	26	329.05	-18.29	308.70	0.56
2020	10	12	327.21	-21.10	306.93	-1.03
2020	10	28	317.49	-18.82	301.26	1.67

پیکربندی فضای LST-VIs به‌طور گسترده در طول دوره رشد تحت شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی ثابت باقی ماند و شبیه یک شکل ذوزنقه‌ای بود، همان‌طور که قبلاً در مطالعات مستند شده است (Sadeghi *et al.*, 2017; Quintana-Molina *et al.*, 2023). با این‌حال، تفاوت‌های ظریف قابل تشخیص مشاهده شد. به‌عنوان مثال، فضای LST-kNDVI پیکربندی ذوزنقه‌ای فشرده‌تری را نشان می‌دهند که به‌طور مؤثر مزارع لخت یا مزارع با پوشش گیاهی کم را متراکم‌تر از بقیه فضاها نشان می‌دهد.

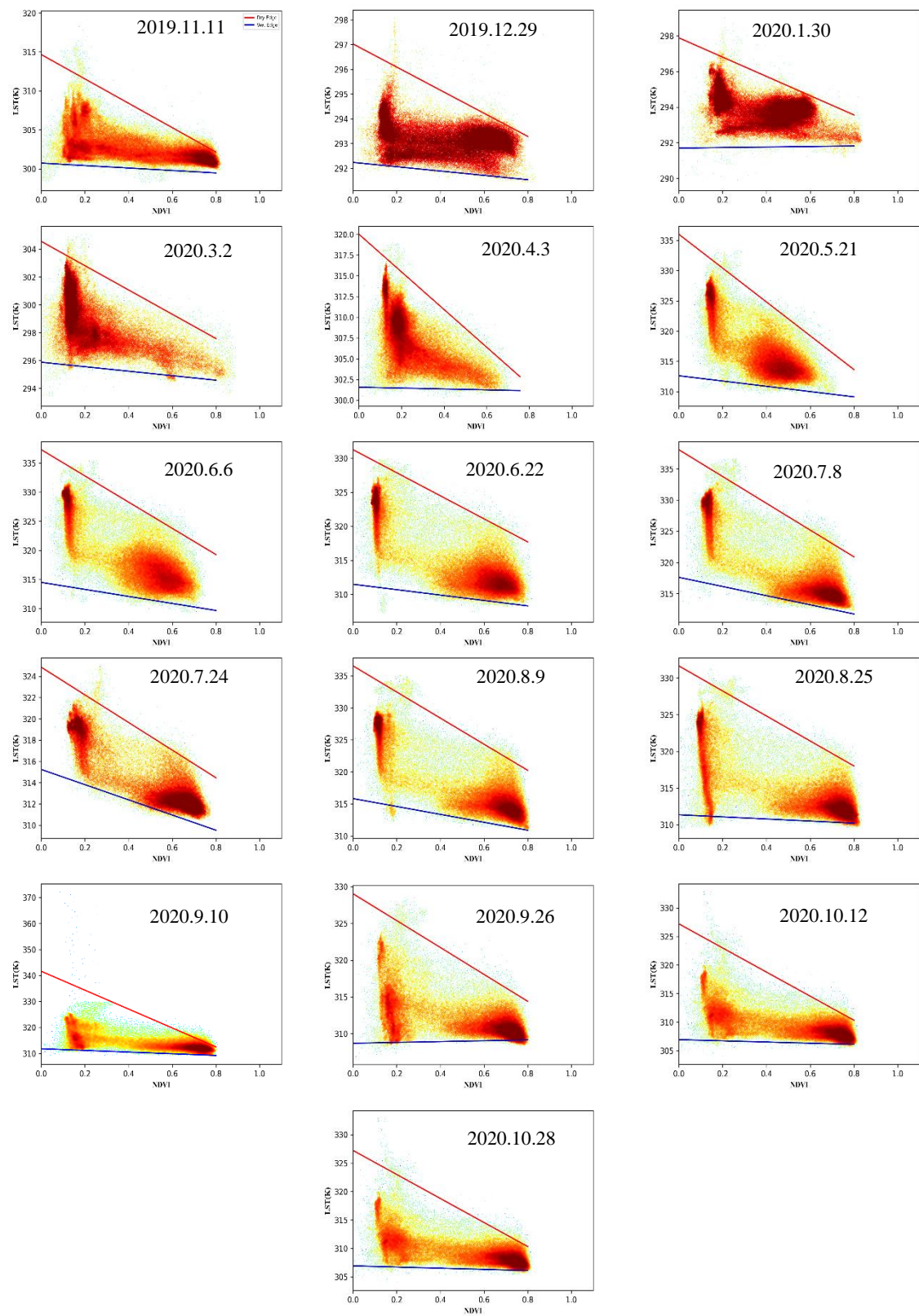


Figure 4. NDVI-LST scatter plots colored by density for 16 sample dates

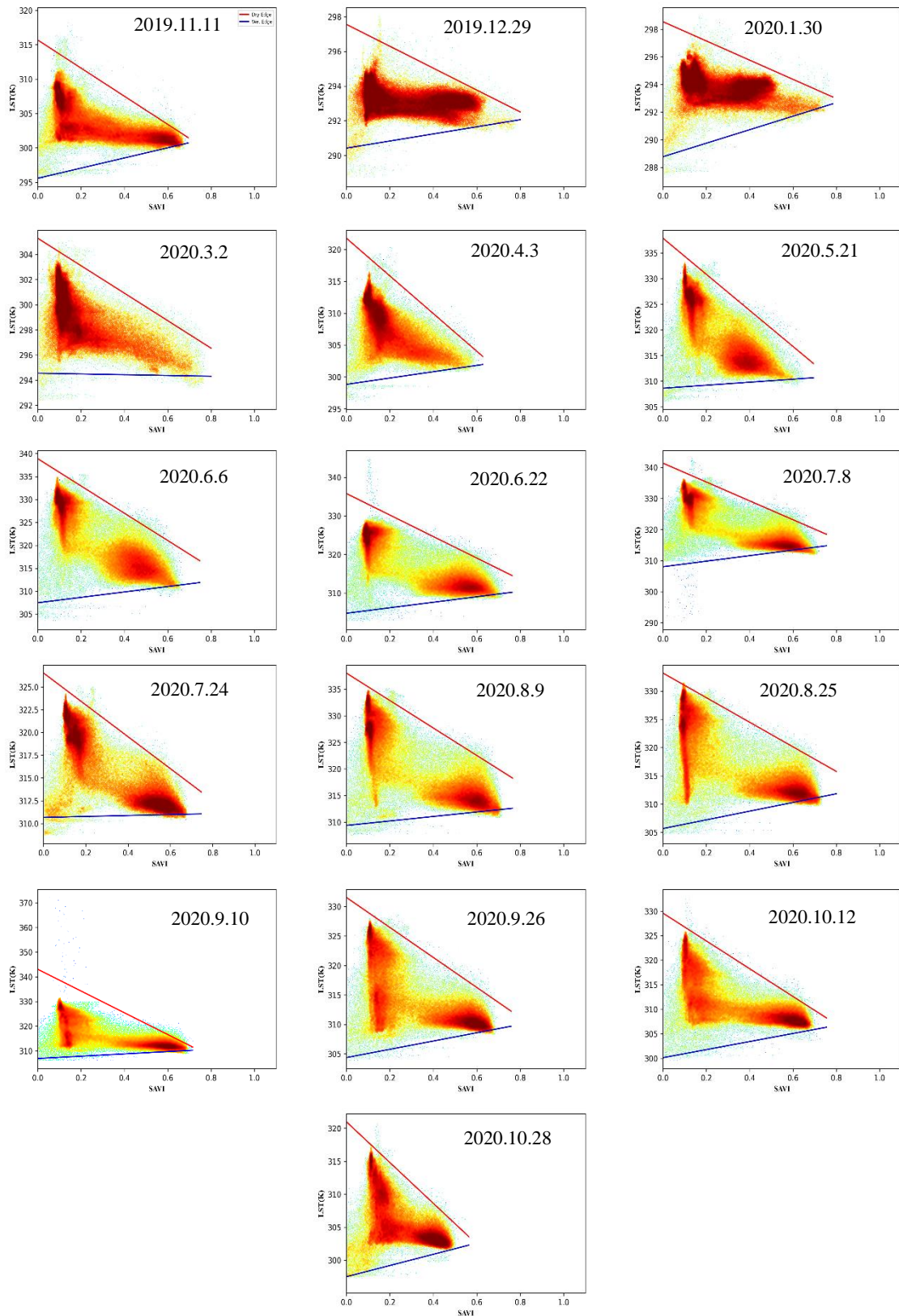


Figure 5. SAVI-LST scatter plots colored by density for 16 sample dates

Table 3. Dry and wet edge parameters of SAVI-LST space using Landsat-8 data across different dates of observations

Year	Month	Day	Dry edge		Wet edge	
			i_d	s_d	i_w	s_w
2019	11	11	315.69	-20.45	295.58	7.39
2019	12	29	297.56	-6.31	290.42	2.05
2020	1	30	298.55	-6.95	288.78	4.88
2020	3	2	305.28	-10.92	294.55	-0.30
2020	4	3	321.76	-29.53	298.85	4.95
2020	5	21	337.87	-35.15	308.63	2.94
2020	6	6	338.88	-29.68	307.53	5.87
2020	6	22	335.81	-27.88	304.76	7.14
2020	7	8	341.34	-30.31	308.03	8.94
2020	7	24	326.52	-17.83	310.67	0.52
2020	8	9	338.04	-25.83	309.37	4.22
2020	8	25	333.04	-25.83	309.37	7.68
2020	9	10	343.05	-44.07	306.88	4.68
2020	9	26	331.55	-25.45	304.37	7.02
2020	10	12	329.59	-28.29	300.14	8.22
2020	10	28	320.99	-30.91	297.50	8.49

در همین حال، توزیع پیکسل‌ها در فضای LST-SAVI نسبت به LST-NDVI قابلیت‌های امیدوارکننده‌ای برای تشخیص ویژگی‌های محیطی مانند رطوبت خاک و تبخیر و تعرق در مراحل مختلف رشد گیاه نشان می‌دهد. شاخص SAVI به دلیل حساسیت بیش‌تر به پوشش گیاهی کم و تصحیح تأثیر روشنایی خاک در تراکم‌های پایین، توانایی بهتری در شناسایی این ویژگی‌ها دارد. این ویژگی باعث کاهش وابستگی لبه‌های مرطوب و خشک در TOTRAM به خصوصیات خاک می‌شود. این نتایج با مشاهدات Babaeian *et al.* (2019) مطابقت دارد.

Table 4. Dry and wet edge parameters of kNDVI-LST space using Landsat-8 data across different dates of observations

Year	Month	Day	Dry edge		Wet edge	
			i_d	s_d	i_w	s_w
2019	11	11	308.19	-8.54	299.42	0.82
2019	12	29	296.17	-5.45	291.96	-0.73
2020	1	30	296.81	-6.13	291.88	-0.23
2020	3	2	301.58	-6.67	295.49	-1.65
2020	4	3	313.99	-21.23	301.03	0.60
2020	5	21	330.82	-34.08	310.59	-1.16
2020	6	6	332.71	-25.74	311.59	-1.77
2020	6	22	327.29	-17.38	309.50	-1.58
2020	7	8	332.27	-20.32	314.48	-3.84
2020	7	24	322.28	-15.14	312.30	-3.62
2020	8	9	329.87	-16.10	313.90	-5.12
2020	8	25	325.99	-13.37	311.51	-2.80
2020	9	10	325.07	-15.53	310.78	-2.73
2020	9	26	323.82	-16.67	309.70	-1.86
2020	10	12	318.42	-11.44	307.15	-2.28
2020	10	28	313.36	-21.42	302.48	-2.25

پارامترهای لبه خشک و مرطوب محاسبه شده در جدول‌های (۲)، (۳) و (۴) یک توصیف کمی جامع از تغییرات در فضاهای مختلف ارائه می‌دهد. داده‌های جدول (۳) یک تغییر قابل توجه در شیب و عرض از مبدأ لبه مرطوب در فضای LST-SAVI نسبت به دیگر فضاهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. در حالی که لبه خشک در هر سه فضا از نوسانات کم‌تری برخوردار بود. به طور کلی در هر سه فضا با افزایش دمای هوا به طور متوسط پارامترهای لبه خشک و مرطوب افزایش یافت (۱ خردادماه تا ۲۰ شهریورماه). این امر نشان می‌دهد که فضای LST-VIS به شدت به دمای هوا وابسته است. علاوه بر این، مطابق با نتایج Mohammadi Moalezade *et al.* (2022)، مدل TOTRAM به شرایط سطح زمین و مزرعه، از جمله درصد رطوبت نسبی هوا، میانگین دمای هوا، آفت‌ها (مانند خشکی برگ) و دمای گیاه، وابستگی زیادی دارد. این وابستگی‌ها می‌توانند باعث ایجاد خطا و عدم قطعیت در زمان بندی آبیاری مزارع نیشکر شوند، به ویژه در مراحل توسعه رشد که معمولاً در خرداد و تیرماه اتفاق می‌افتد.

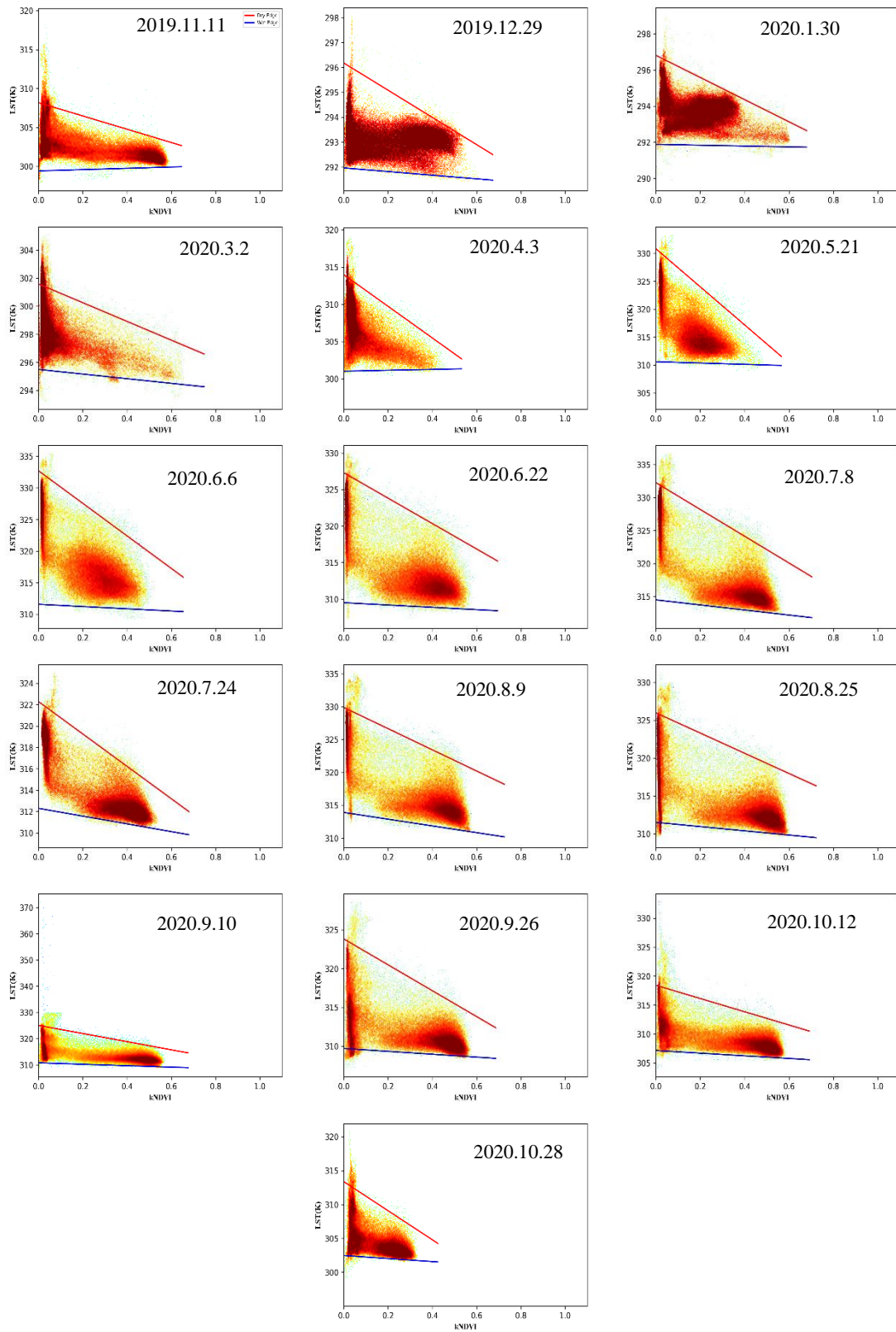


Figure 6. kNDVI-LST scatter plots colored by density for 16 sample dates

۲.۴. برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از مدل TOTRAM

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های TOTRAM-VIs، از رابطه رگرسیونی استفاده شد. براساس ضریب همبستگی، هر سه شاخص پوشش گیاهی نتایج قابل‌مقایسه‌ای را با مقادیر مشاهده‌شده در برآورد رطوبت سطح خاک نشان دادند (شکل ۷). پس از تجزیه و تحلیل بیش‌تر نتایج با استفاده از معیارهای RMSE و MAE، مشخص شد که عملکرد مدل TOTRAM در سطح متوسطی قرار دارد و برخی عدم قطعیت‌ها و ناهماهنگی‌ها در نتایج مشاهده شده است. یکی از دلایل RMSE نسبتاً بالا بین مدل TOTRAM-VIs و داده‌های واقعی، وجود بادهای گرم و تند در فصل تابستان و تأثیر آن بر سبزی‌نگی گیاه (تنش باد) است که باعث خشک‌شدن برگ‌ها و کاهش عددی شاخص‌های پوشش گیاهی و افزایش متغیر LST در سطح مزارع می‌گردد. هم‌چنین بین دمای سطح و رطوبت خاک رابطه معکوس وجود دارد، اما به غیر از رطوبت خاک عوامل مختلف دیگری از قبیل بافت خاک، تراکم گیاه و زمان آبیاری بر دمای سطحی و مدل اثرگذار است.

به‌طور کلی در بین مدل‌ها، TOTRAM-SAVI کم‌ترین مقادیر را برای RMSE و MAE نشان داد، درحالی‌که TOTRAM-kNDVI بالاترین مقادیر را برای هر دو معیار نشان داد. قابل ذکر است که معیار RMSE برای مدل TOTRAM-SAVI کاهش قابل‌توجهی به ترتیب ۱۲ و ۱۶ درصد در مقایسه با شاخص‌های NDVI و kNDVI نشان داد (شکل ۷). Quintana-Molina *et al.* (2023) رطوبت خاک را در مناطق کشاورزی تحت آبیاری شیاری با استفاده از مدل TOTRAM تحت شاخص‌های NDVI، SAVI و MSAVI بررسی کردند. آن‌ها با شاخص‌های SAVI و MSAVI2 بهترین نتایج را به‌دست آوردند، زیرا مکان‌های موردبررسی دارای فاصله‌های کمی بیش‌تر از حد متوسط بین شیاریها بودند که باعث افزایش تأثیر درخشندگی زمین شده بود.

با این وجود، برای ارزیابی اهمیت شاخص‌های پوشش گیاهی در تأثیرگذاری بر عملکرد TOTRAM از آزمون کروسکال-والیس^{۲۴} استفاده شد. نتایج نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در عملکرد TOTRAM براساس شاخص‌های مختلف وجود ندارد. با این‌حال، تجزیه و تحلیل بعدی به‌طور ویژه بر نتایج حاصل از TOTRAM-SAVI متمرکز است، زیرا این شاخص دارای R بالا و RMSE و MAE پایین‌تری نسبت به سایر شاخص‌های پوشش گیاهی است. هم‌چنین در ادامه از این شاخص برای توزیع مکانی رطوبت خاک در طول دوره رشد استفاده می‌شود.

۳.۴. تنوع مکانی - زمانی رطوبت سطحی خاک

نقشه‌های رطوبت خاک که از معادلات استخراج‌شده برای هر تصویر مطابق جدول (۳) به‌دست آمده‌اند، به‌همراه اطلاعات فیزیکی خاک، کمی‌سازی شدند. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در ابتدای رشد گیاه به‌دلیل تراکم کم پوشش گیاهی و اثرات خاک، رطوبت خاک کاهش یافته و بیش‌تر مزارع در مرحله شروع تنش و نیاز به آبیاری قرار می‌گیرند. در اواسط دوره رشد گیاه، به‌دلیل افزایش دمای سطح زمین و توسعه رشد نیشکر، نیاز آبی بیش‌تر شده و رطوبت خاک نیز افزایش می‌یابد. قابل توجه است که ناهمگونی زیادی در تاریخ ۱۷ خردادماه ۱۳۹۹ در مزارع مشاهده شده است (شکل ۸) که این مسئله به‌دلیل تفاوت در سن گیاهان و به تبع آن، دوره‌های رشد مختلف نیشکر و برنامه‌های آبیاری متفاوت در مزارع کشت و صنعت فارابی می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در دوره انتهایی رشد گیاه (هفتم آبان‌ماه ۱۳۹۹) میزان رطوبت خاک به یکنواختی بیش‌تری رسیده که احتمالاً به‌دلیل قطع آبیاری مزارع و نزدیک شدن به مرحله برداشت نیشکر است.

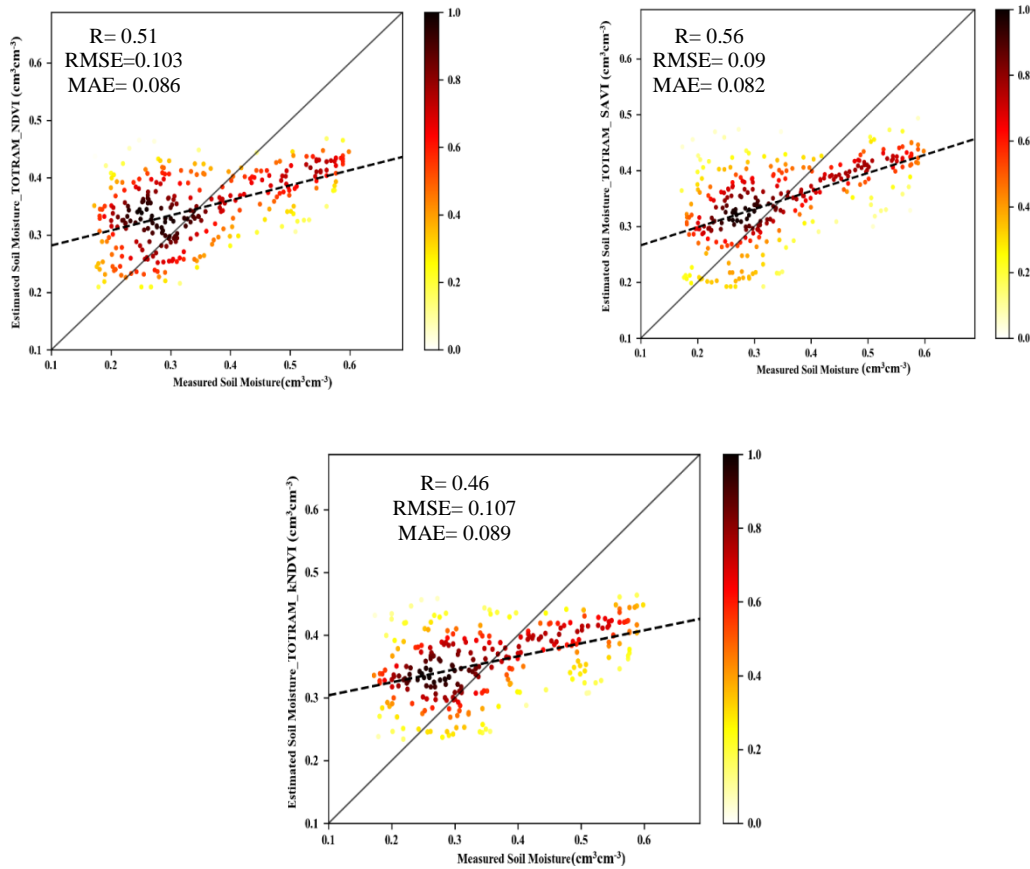


Figure 7. SM estimated by TOTRAM-VI compared to field SM. The color of the points represents the probability density at the specific location. The black dashed lines indicate the fitted linear regression line, and the black lines indicate the 1:1 line.

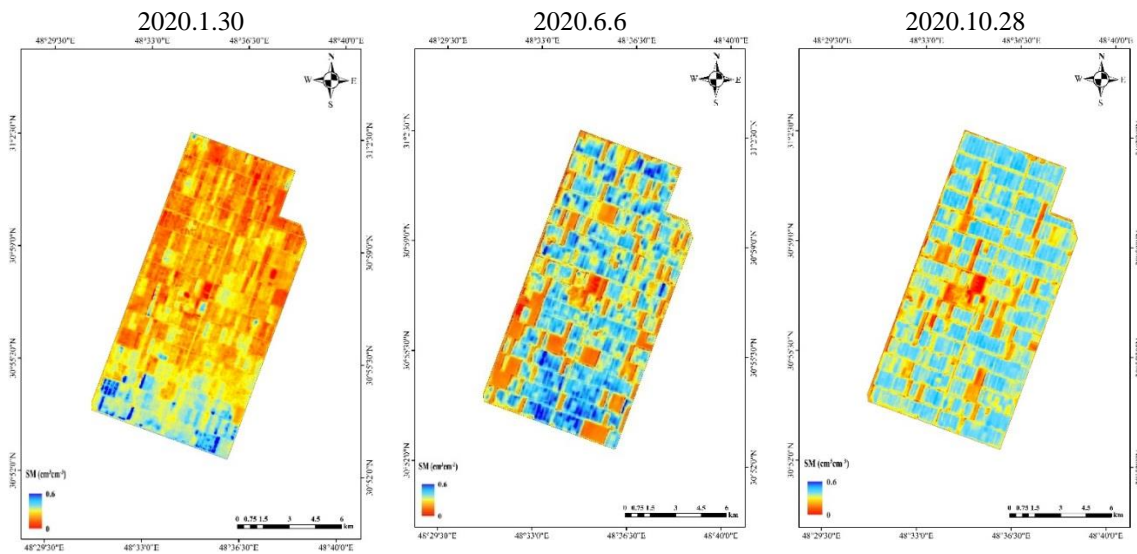


Figure 8. Spatial distribution of surface soil moisture based on SAVI-LST space during the growth period of sugarcane crop

۵. نتیجه گیری

اکثر مطالعاتی که به بازیابی رطوبت خاک با استفاده از مدل TOTRAM پرداخته‌اند، بر شاخص NDVI تمرکز داشته‌اند و هیچ‌کدام اثر شاخص‌های پوشش گیاهی دیگر مانند kNDVI را در این مدل بررسی نکرده‌اند. بنابراین، مطالعه حاضر از مدل TOTRAM مبتنی بر سه شاخص پوشش گیاهی (NDVI، SAVI و kNDVI) برای تخمین رطوبت سطحی خاک در زمین‌های زراعی، به‌ویژه با پوشش گیاهی متراکم استفاده کرده است. برای این منظور، از تصاویر سری زمانی لندست-۸ در طول یک سال زراعی استفاده شد. سپس لبه‌های مرطوب و خشک حاصل از فضاهای مختلف LST-VI برای هر گذر ماهواره محاسبه گردید. بررسی نتایج حاصل از مدل TOTRAM مبتنی بر NDVI، SAVI و kNDVI نشان داد که مدل TOTRAM-SAVI رطوبت خاک را با دقت بیش‌تری در زمین‌های با پوشش گیاهی بالا تخمین می‌زند. مدل TOTRAM به‌طور کلی می‌تواند رطوبت خاک را در مزارع نیشکر با دقت مناسبی تخمین بزند، به‌ویژه در زمین‌هایی که رطوبت در حد ظرفیت زراعی است. با این‌حال، در برخی ماه‌های فصل رشد نیشکر، مدل TOTRAM به‌دلیل تأثیرپذیری زیاد باندهای حرارتی از شرایط سطح زمین و مزرعه (مانند درصد رطوبت نسبی هوا، میانگین دمای هوا، خشکی برگ‌ها و دمای گیاه) با عدم قطعیت مواجه است که می‌تواند منجر به خطا در برآورد رطوبت خاک شود. بنابراین، برای افزایش دقت برآورد رطوبت خاک، توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده از مدل‌های یادگیری ماشین در ترکیب با مدل TOTRAM و همچنین شاخص‌های رطوبتی و خصوصیات فیزیکی خاک استفاده شود.

۶. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه N:SCU.WI1402.281 و همچنین از کارکنان کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی برای تهیه تجهیزات تحقیقاتی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Soil Moisture
2. Soil moisture neutron probe
3. Time-domain reflectometer
4. Tensiometer
5. Remote sensing
6. Thermal-optical TRAapezoid model (TOTRAM)
7. Land surfacetemperature
8. Vegetation index
9. Normalized difference vegetation index
10. Soil-adjusted vegetation index
11. MODIS
12. Enhanced vegetation index
13. Kernel normalised difference vegetation index
14. Wetness index
15. Balk density
16. Landsat-8
17. Google Earth Engine
18. Visible band
19. Near infrared band
20. Short wavelength infrared
21. Thermal infrared
22. Root mean square error
23. Mean absolute error
24. Kruskal-Wallis

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- Alavi, M., Albaji, M., Golabi, M., Naseri, A. A., & Homayouni, S. (2024). Estimation of sugarcane evapotranspiration from remote sensing and limited meteorological variables using machine learning models. *Journal of Hydrology*, 629, 130605.
- Alavi, M., Albaji, M., Golabi, M., Naseri, A. A., & Homayouni, S. (2023). Evaluating remote sensing technique and machine learning algorithms in estimating sugarcane evapotranspiration. *Water and Irrigation Management*, 13(4), 965-982. (In Persian)
- Babaeian, E., Sidike, P., Newcomb, M. S., Maimaitijiang, M., White, S. A., Demieville, J., Ward, R. W., Sadeghi, M., LeBauer, D. S., & Jones, S. B. (2019). A new optical remote sensing technique for high-resolution mapping of soil moisture. *Frontiers in big Data*, 2, 37.
- Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., & Bousbih, S. (2017). Calibration of the water cloud model at C-band for winter crop fields and grasslands. *Remote Sensing*, 9(9), 969.
- Blake, G. (1965). Bulk density. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 374-390.
- Burdun, I., Bechtold, M., Aurela, M., De Lannoy, G., Desai, A. R., Humphreys, E., Kareksela, S., Komisarenko, V., Liimatainen, M., & Marttila, H. (2023). Hidden becomes clear: Optical remote sensing of vegetation reveals water table dynamics in northern peatlands. *Remote sensing of environment*, 296, 113736.
- 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.
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 545-567.
- Goward, S. N., & Hope, A. (1989). Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: Preliminary FIFE results from AVHRR data. *Advances in Space Research*, 9(7), 239-249.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote sensing of environment*, 49(3), 224-234.
- Jiang, L., & Islam, S. (1999). A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical research letters*, 26(17), 2773-2776.
- Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 11(10), 1840-1843.
- Krishnan, S., & Indu, J. (2023). Assessing the potential of temperature/vegetation index space to infer soil moisture over Ganga Basin. *Journal of Hydrology*, 621, 129611.
- Mohammadi Moalezade, J., Hamzeh, S., & Naseri, A. (2022). Estimating Soil Surface Moisture Content and Investigating Irrigation Schedule of Sugarcane Fields Using Thermal Trapezoidal Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(10), 2209-2223. (In Persian)
- Moran, M., Clarke, T., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of environment*, 49(3), 246-263.
- Nouraki, A., Golabi, M., Albaji, M., Naseri, A., & Homayouni, S. (2023). Spatial-temporal modeling of soil moisture using optical and thermal remote sensing data and machine learning algorithms. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(4), 637-653. (In Persian)
- Nouraki, A., Akhavan, S., Rezaei, Y., & Fuentes, S. (2021). Assessment of sunflower water stress using infrared thermometry and computer vision analysis. *Water Supply*, 21(3), 1228-1242.
- Quintana-Molina, J. R., Sánchez-Cohen, I., Jiménez-Jiménez, S. I., Marcial-Pablo, M. d. J., Trejo-Calzada, R., & Quintana-Molina, E. (2023). Calibration of volumetric soil moisture using Landsat-8 and Sentinel-2 satellite imagery by Google Earth Engine. *Revista de Teledetección*(62), 21-38.

- Rahimzadeh-Bajgiran, P., Berg, A. A., Champagne, C., & Omasa, K. (2013). Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 83, 94-103.
- 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.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote sensing of environment*, 79(2-3), 213-224.
- Taddeo, S., Dronova, I., & Depsky, N. (2019). Spectral vegetation indices of wetland greenness: Responses to vegetation structure, composition, and spatial distribution. *Remote sensing of environment*, 234, 111467.
- Tuller, M., Babaeian, E., Jones, S., Montzka, C., Vereecken, H., & Sadeghi, M. (2019). The paramount societal impact of soil moisture. *Eos*, 100.
- 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.