



Estimating Soil Surface Moisture Content and Investigating Irrigation Schedule of Sugarcane Fields Using Thermal Trapezoidal Model

Jamal Mohammadi Moalezade¹, Saeid Hamze^{2✉}, Abed Ali Naseri

1. Sugarcane Development Research and Training Institute, Ahvaz, Iran, Email: jamalmohammadi611@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran Email: saeid.hamzeh@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: abdalinaseri@scu.ac.ir

| Article Info | ABSTRACT |
|---|--|
| Article type: Research Article | <p>Soil moisture is one of the key parameters in water resources studies and irrigation remote planning. Measuring soil moisture on a large scale is costly and very time consuming. Traditional methods of measuring soil moisture at farm level cannot show the spatial changes of moisture in the best way. Various new methods have been developed to use satellite data to model soil moisture based on thermal images. This study was conducted in 2020 with the aim of investigating the ability of thermal satellite imagery to estimate soil moisture and to plan irrigation rounds of lands in sugarcane industry of Amirkabir located in the south of Khuzestan province. For this purpose, during growing season of sugarcane, soil moisture content was calculated for 9 crossings Landsat 8 satellite and evaluated using 180 ground control points, and also daily irrigation data of 32 farms (25-hectare) were recorded during the study period. The results showed that the accuracy of the model is suitable for estimating soil moisture with the measured values at the farm level. The mean square root of normalized error (NRMSE) was 12.9% and the coefficient of determination (R^2) was 0.82. Also, the results of soil moisture in irrigation management of sugarcane fields showed that thermal trapezoidal model is effective due to using thermal bands to environmental factors such as relative humidity percentage, average air temperature, pest (leaf dryness) and plant temperature, and somewhat in June and July causes errors in irrigation planning of sugarcane fields. The mean square root of normalized error (NRMSE) during soil water stress was 24.32%, during irrigation time was 22.20%, at average humidity was 11.7%, during high humidity was 13.20% and during irrigation was 8.86%. Consequently, the accuracy of thermal trapezoidal model for planning irrigation of farms in estimating soil water stress and field irrigation time in some periods of growing season is moderate and for fields having sufficient soil moisture is well.</p> |
| Article history: | |
| Received: Feb. 19, 2022 | |
| Revised: Sep. 28, 2022 | |
| Accepted: Oct. 11, 2022 | |
| Published online: Dec. 22, 2022 | |
| Keywords: Irrigation planning, Thermal trapezoid, Soil moisture, Remote sensing, Sugarcane. | |

Cite this article: Mohammadi Moalezade, J., Hamze, S., & Naseri, A. 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. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338383.669214>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338383.669214>



برآورد رطوبت سطحی خاک و بررسی برنامه‌ریزی آبیاری اراضی نیشکر با استفاده از مدل ذوزنقه حرارتی

جمال محمدی معله‌زاده^۱، سعید حمزه^۲، عبدعلی ناصری^۳۱. مؤسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر، اهواز، ایران، ایمیل: jamal Mohammadi611@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ایمیل: saeid.hamzeh@ut.ac.ir۳. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، ایمیل: abdalinaseri@scu.ac.ir

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|--|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی | رطوبت خاک یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. اندازه‌گیری رطوبت خاک در مقیاس کلان کاری بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. روش‌های سنتی اندازه‌گیری رطوبت خاک در سطح مزرعه نمی‌توانند تغییرات مکانی رطوبت را به بهترین صورت نشان دهند. روش‌های نوین مختلفی در خصوص استفاده از داده‌های ماهواره‌ای جهت مدل‌سازی رطوبت خاک مبتنی بر تصاویر حرارتی توسعه داده شده‌اند. این پژوهش در سال ۱۳۹۹ با هدف بررسی توانایی تصاویر ماهواره‌ای حرارتی در برآورد رطوبت خاک و برنامه‌ریزی آبیاری اراضی کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر واقع در جنوب استان خوزستان انجام شد. به همین منظور در فصل داشت نیشکر درصد رطوبت خاک برای ۹ گذر ماهواره لندست ۸ محاسبه شد و با استفاده از تعداد ۱۸۰ نقطه کنترل زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت، همچنین به منظور بررسی ارتباط رطوبت خاک با زمان آبیاری مزارع، اطلاعات روزانه آبیاری ۳۲ مزرعه طی دوره مورد مطالعه ثبت شده بود استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد، دقت مدل در برآورد رطوبت خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه مناسب است. به طوری که جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برابر ۱۲/۹ درصد و ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۸۲ حاصل شد. همچنین نتایج رطوبت خاک در مدیریت آبیاری مزارع نیشکر نشان داد، این مدل به دلیل استفاده از باند حرارتی به عوامل محیطی از جمله درصد رطوبت نسبی هوا، دمای هوا و آفت مؤثر است. به طوری که (NRMSE) با تنش رطوبتی خاک برابر ۲۴/۳۲٪، زمان آبیاری برابر ۲۲/۲۰٪، رطوبت متوسط برابر ۱۱/۷٪، رطوبت بالا برابر ۱۳/۲۰٪ و در حال آبیاری برابر ۸/۸۶٪ بدست آمد. در نتیجه، دقت مدل ذوزنقه حرارتی جهت برنامه‌ریزی آبیاری مزارع در برآورد تنش رطوبتی خاک و زمان آبیاری مزرعه در برخی از دوره‌های فصل رشد نیشکر متوسط است و برآورد مزارعی که دارای رطوبت مناسب (در حد ظرفیت زراعی)، رطوبت بالا (اشباع) و در حال آبیاری، دقت مناسب می‌باشد. |
| واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، ذوزنقه حرارتی، رطوبت خاک، سنجش از دور، نیشکر. | |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰ | |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۱۶ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۹ | |
| تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱ | |

استناد: محمدی معله‌زاده؛ جمال، حمزه؛ سعید، ناصری؛ عبدعلی، (۱۴۰۱) برآورد رطوبت سطحی خاک و بررسی برنامه‌ریزی آبیاری اراضی نیشکر با استفاده از مدل ذوزنقه حرارتی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۰)، ۲۲۲۳-۲۲۰۹. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338383.669214>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338383.669214>

مقدمه

تنش آبی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. لذا مطالعه و توسعه راه‌کارهای مدیریتی مناسب برای افزایش کارایی مصرف آب و همچنین پیش‌بینی و برنامه‌ریزی زمان آبیاری مزارع از اهمیت زیادی برخوردار است. اما با توجه به وسعت زیاد اراضی تحت کشت و متغیر بودن خصوصیات این اراضی، تعیین زمان آبیاری با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر مشاهدات میدانی بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. تکنیک‌های سنجش از دور برای برآورد رطوبت خاک شامل روش‌های نوری، مادون قرمز حرارتی و ماکروویو فعال و غیر فعال هستند که هر کدام نقاط ضعف و قوت خود را دارند. 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 بازتاب امواج رادار در قطبش‌های مختلف در اثر افزایش رطوبت خاک بهره گرفته می‌شود (Ranjbar et al. 2021; Engman, 1985). طبق نتایج تحقیقات قبلی از ترکیب این ویژگی‌ها و داده‌های ماهواره‌ای مختلف می‌توان جهت برآورد رطوبت خاک با دقت قابل قبولی استفاده کرد (Carlson, 1994). در این میان استفاده ترکیبی از داده‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های گیاهی از قبیل NDVI بسیار مورد توجه واقع شده و در تحقیقات متعددی استفاده گردیده است (Rahimzadeh et al. 2012).

بسیاری از این مطالعات نشان داده‌اند که از تفسیر رابطه موجود بین توزیع پیکسل در فضای دوبعدی دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های پوشش گیاهی (VI) می‌توان اطلاعات رطوبت خاک را فراهم نمود (Y. Han et al. 2010; R. Nemani et al. 1993; Khazaei et al. 2020; Veysi et al. 2017; Veysi et al. 2020; Ebrahimi et al. 2018). مفهوم فضای LST-VI برای بازیابی رطوبت خاک (R. Gillies et al. 1997; K. Mallick et al. 2009) و تبخیر و تعرق (S. Stisen, 2008) استفاده شده که چندین مطالعه رابطه LST-VI را در فضای مثلثی^۱ (T. Carlson et al. 2007) یا دوزنقه‌ای^۲ گزارش کرده‌اند. در واقع این روش‌ها نشان می‌دهند که یک رابطه کلی بین رطوبت خاک، شاخص پوشش گیاهی (به عنوان مثال NDVI) و LST در سرتاسر منطقه مورد مطالعه وجود دارد. اگر تعداد پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه کافی باشد و ابرها و پوشش آب حذف شوند، توزیع فضایی LST و VI فضای ویژگی مثلثی یا دوزنقه‌ای را تشکیل می‌دهد و رطوبت خاک را می‌توان از توزیع پیکسل در فضای ویژگی LST-VI بدست آورد.

در تحقیق برآورد رطوبت سطحی خاک، با شاخص خشکی دما و پوشش گیاهی (TVDI)، به روش مثلثی جنوب استان آذربایجان غربی طی سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ نشان داد، در سال ۱۳۸۸ اردیبهشت ماه و مردادماه با توجه به روش اول مقدار R^2 به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۵۷ است. در سال ۱۳۸۸ مقدار R^2 با توجه به داده‌های زمینی و استفاده از روش دوم در اردیبهشت‌ماه و مردادماه به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۷ می‌باشد. همچنین، در سال ۱۳۹۶ مقدار R^2 با استفاده از روش اول در اردیبهشت‌ماه ۰/۶۶ است. در سال ۱۳۹۶ مقدار R^2 با استفاده از روش دوم در اردیبهشت‌ماه ۰/۴۱ است. 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 (Shahmoradi et al. 2021).

روش دوزنقه‌ای اولین بار توسط (M. S. Moran et al. 2004) ارائه شد، که رابطه بین اختلاف دمای سطح خاک و هوا ($T_s - T_{air}$) و FVC^3 را توصیف می‌کند. این روش برای برآورد میزان تبخیر و تعرق برای هر دو سطح کاملاً پوشیده از گیاه و تا حدی تحت پوشش گیاهی از طریق شاخص کمبود آب^۴ (WDI) اعمال شده است. سپس با تکیه بر اصل بیلان انرژی سطح، فضای دوزنقه‌ای شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک^۵ (SAVI) و اختلاف دما را تشکیل داده و شاخص WDI را مستقیماً از داده‌های سنجش از دور محاسبه می‌شود. پس از آزمون مدل و اعتبارسنجی با داده‌های میدانی، WDI برای برآورد وضعیت کمبود آب در بسیاری از مناطق با پوشش گیاهی کم مورد ارزیابی قرار گرفت (M. S. Moran et al. 2007).

اگرچه ایده فضای دوزنقه‌ای $(T_s - T_{air})/VI$ به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است، اما فقط چند کاربرد برای برآورد رطوبت خاک در مطالعات گذشته ثبت شده است. این تا حدودی به دلیل چالش‌های مرتبط با محاسبه اختلاف دمای سطح خاک و هوا ($T_s - T_{air}$) و بخشی دیگر به دلیل کمبود داده‌های هواشناسی است (به عنوان مثال: دمای هوا، سرعت باد، و رطوبت نسبی). این محدودیت‌ها باعث

1 Triangular

2 Trapezoid

۳ Fractional vegetation cover

4 Water Deficit Index (WDI)

5 Soil Adjusted vegetation index (SAVI)



گردید وانگ و همکاران از فضای LST-VI استفاده کنند. آنها یک روش تکرارشونده را برای کمی‌سازی دوزنقه LST-VI پیشنهاد کردند و WDI را با استفاده از LST و EVI تصاویر MODIS محاسبه کردند. بررسی اعتبارسنجی رطوبت خاک در حوضه آبخیز Walnut Gulch در آریزونا نشان داد که گر چه می‌توان تغییرات زمانی رطوبت خاک را به خوبی پیش نمود، ولی کمیت تغییرات مکانی رطوبت خاک حداقل برای شرایط آب و هوایی نیمه‌خشک محدود است (W. Wang et al. 2011).

مدل دوزنقه‌ای اپتیکی - حرارتی^۱ (TOTRAM) نوع دیگری از مدل دوزنقه‌ای است که یکی از پرکاربردترین رویکردها در مطالعات گذشته برای برآورد رطوبت خاک از داده‌های سنجش از دور به ویژه در خاک‌های بایر بوده است (S. N. Goward et al. 2002; D. Zhang et al. 2014). در ابتدا، این روش برای تفسیر توزیع دوزنقه‌ای شکل مقادیر پیکسل در فضای تعریف شده توسط LST و یک شاخص پوشش گیاهی مانند FVC، NDVI و یا LAI توسعه یافته است (T. N. Carlson et al. 1994; I. Burdun et al. 2020).

برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور در اراضی کشاورزی شهرستان شوشتر نشان داد، براساس 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 نشان دهنده تأثیر قابل توجه این عامل بر مقادیر رطوبت سطحی خاک می‌باشد (Abiyat et al. 2022).

چندین الگوریتم متفاوت از مفهوم TOTRAM وجود دارد. یک نوع الگوریتم، لبه خشک را مستقیماً از LST نسبت به خشک‌ترین مناطق صحنه^۲ می‌گیرد. در نوع دیگری از الگوریتم‌ها، از داده‌های کمکی هواشناسی برای تخمین نظری دمای خشک‌ترین بخش زمین استفاده می‌شود که سپس لبه خشک فضای دوزنقه را تعریف می‌کند (D. Long and V. P. Singh. 2012; Y. Yang et al. 2015). در این مدل لبه‌های خشک و مرطوب ایزوپلت^۳ هستند و نشان دهنده یکنواخت بودن رطوبت خاک برای دو سطح: مرطوب و خشک هستند. از مزایای روش دوزنقه‌ای این است که دارای مبنای فیزیکی مستحکم است، و فضای تعیین شده از چهار رأس محدودکننده اصلی شرایط است که نزدیک به شرایط واقعی سطح زمین است.

با توجه به مرور منابع مشخص شد که مدل TOTRAM از توانایی خوبی در برآورد رطوبت خاک برخوردار است اما تاکنون بصورت عملی از آن برای برنامه‌ریزی آبیاری در اراضی نیشکر استفاده نشده است. بنابراین هدف این مطالعه مدل‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل TOTRAM مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای پیش به هنگام میزان رطوبت خاک و بررسی تنش آبی مزارع به منظور برنامه‌ریزی آبیاری اراضی کشت و صنعت‌های نیشکر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر در ناحیه عرض شمالی از $28^{\circ} 51' 31''$ تا $28^{\circ} 51' 19''$ و طول شرقی از $53^{\circ} 51'$ تا $28^{\circ} 48' 49''$ واقع شده است (شکل ۱). این کشت و صنعت یکی از کشت و صنعت‌های هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی است. مساحت اراضی کشاورزی آن نزدیک به ۱۲۲۰ هکتار است که سالانه حدود ۹۵۰۰ هکتار آن تحت داشت نیشکر اختصاص یافته و ۲۰۰۰ هکتار آن در حال آیش و کشت جدید است. عملیات زیربنایی مرتبط با بخش کشاورزی مشتمل بر ایجاد شبکه آبیاری و زهکشی بوده بطوریکه آب آبیاری توسط پمپ از کانال آبیاری (رودخانه کارون) به سمت لوله‌های فلزی هدایت و از طریق لوله‌ها به باکس‌های دوقلو سیمانی که نقش تأمین فشار جهت حرکت لوله‌های هیدروفوم را دارند هدایت می‌شود. اساس طراحی مزارع نیشکر به صورت ۲۵ هکتاری با طول مزرعه ۱۰۰۰ متر و فاصله فاروها $1/83$ متر است. همچنین دارای یک سیستم مدرن زهکشی مشتمل بر لوله‌های لترال، کلکتور و ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشد. لترال‌ها در عمق ۲ متری از سطح زمین به فواصل مشخص (۸۰-۴۰ متر) جهت خارج کردن بخشی از آب مزرعه تعبیه شده و آب اضافی از طرف لترال‌ها به لوله‌های جمع‌کننده آب (کلکتورها) و در نهایت به ایستگاه‌های پمپاژ به زهکش روباز تخلیه می‌شود.

1 Thermal-Optical TRapezoid Model (TOTRAM)

2 Scene

3 Isopleth



شکل ۱. موقعیت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر

داده‌های مورد استفاده

داده‌های زمینی

داده‌برداری میدانی برای انجام این پژوهش در ۱۸ مزرعه تحت کشت نیشکر با مجموع مساحت ۴۳۰ هکتار انجام شد. بیشترین جذب آب توسط ریشه نیشکر معمولاً در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر است. با توجه به اینکه ماهواره لندست ۸ با منبع نور خورشید می‌باشد، تصاویر دمایی و رطوبت ناشی از محاسبات با آن مربوط به اعماق سطحی خاک (۵ سانتی‌متر) است. بنابراین برای برآورد رطوبت خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر، نمونه‌برداری رطوبت خاک در چهار عمق ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر همزمان با گذر ماهواره لندست ۸ با استفاده از دستگاه قابل حمل TDR350 در فصل داشت نیشکر از فروردین تا مهرماه ۱۳۹۹ اندازه‌گیری شد. هدف از اندازه‌گیری رطوبت خاک در عمق‌های مختلف، بدست آوردن رابطه‌ای بین رطوبت سطحی خاک و عمق ۳۰ سانتی‌متر است. در مجموع تعداد ۱۸۰ نمونه رطوبت سطحی و عمقی خاک برداشت شد که ۸۰ درصد این نمونه‌ها به منظور مدل‌سازی رطوبت خاک و ۲۰ درصد باقی مانده برای صحت‌سنجی نتایج مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردید.



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

داده‌های ماهواره‌ای

جهت انجام این تحقیق از تعداد ۹ تصویر ماهواره ای 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 داده برداری را انجام می‌دهد. همه تصاویر در سطح پردازش یک (LC08_L1TP) و از طریق سایت زمین شناسی آمریکا شامل انجام تصحیحات رادیومتریکی، اتمسفری و سپس استخراج منطقه مورد مطالعه گردید.

پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

از آنجایی که تصاویر ماهواره لندست ۸ دارای تصحیحات هندسی می‌باشد بعد از دریافت تصاویر ابتدا تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH انجام شد. این الگوریتم براساس مدل‌های انتقال تابشی عمل می‌کند، در این مدل مسیر حرکت امواج الکترومغناطیسی از خورشید و زمین به سمت سنجنده مدل‌سازی می‌شود. در این مسیر اتمسفر و زمین اثراتی را بر روی امواج منتشر شده ایجاد می‌کنند که در مدل شبیه‌سازی شده است. سپس اقدام به استخراج شاخص گیاهی NDVI با استفاده از نسبت گیری طیفی انجام شد و در ادامه برای محاسبه دمای سطح زمین از روش الگوریتم Mono Window استفاده شد. در این روش برای محاسبه دمای سطح زمین از پارامترهایی چون دمای درخشندگی، میانگین دمای اتمسفر، ضریب عبور اتمسفری و گسیلمندی استفاده می‌شود (Rongali et al. 2018).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$LST = \frac{BT}{(1 + w(\frac{BT}{\rho})Lne)} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$e = 0.004P_v + 0.986 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad \text{رابطه ۴}$$

BT^1 : 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 ρ برابر با میلی‌کلون $10^{-2} \times 1/438$ است. $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ به ترتیب بیشترین و کمترین NDVI مشاهده شده، P_v : نسبت پوشش گیاهی که با استفاده از مقدار NDVI محاسبه می‌شود و e : توان تشعشعی است. شاخص NDVI از رابطه (۱) به دست می‌آید، $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ 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 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 می‌باشد و از رابطه (۸) قابل محاسبه است (Weng Q et al. 2004).

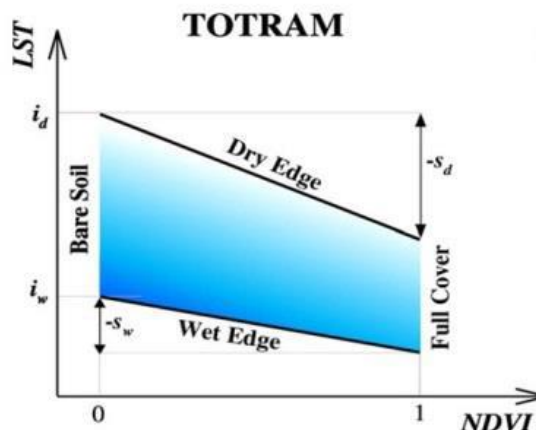
مدل ذوزنقه نوری - حرارتی (TOTRAM^۲)

این مدل بر اساس توزیع پیکسل در فضای دو بعدی دمای سطح زمین و پوشش گیاهی می‌باشد (شکل ۳). برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از یک معادله خطی در فضای دمای سطح زمین (LST^3) و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده ($NDVI^4$) با استفاده از معادلات ذیل برازش داده می‌شود (Sadeghi et al. 2017).

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

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

W: مقدار رطوبت خاک نرمال شده، θ_d : حداقل مقدار رطوبت خاک خشک در شرایط محلی، θ_w : حداکثر مقدار رطوبت خاک مرطوب در شرایط محلی، LST_w و LST_d به ترتیب مربوط به خاک خشک و مرطوب می‌باشند.



شکل ۳. مدل ذوزنقه نوری - حرارتی (Sadeghi et al. 2017)

$$LST_d = i_d + s_d NDVI \quad \text{رابطه ۶}$$

$$LST_w = i_w + s_w NDVI \quad \text{رابطه ۷}$$

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 ۵) رطوبت خاک را می‌توان برای هر پیکسل در فضای $LST - NDVI$ برآورد کرد.

$$W = \frac{i_d + s_d NDVI - LST}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad \text{رابطه ۸}$$

صحت‌سنجی مدل

برای صحت‌سنجی مدل‌ها با شرایط واقعی مزرعه و انتخاب مدل بهینه در طول دوره رشد نیشکر و پایش بهنگام رطوبت خاک در مزارع نیشکر، با استفاده از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) انجام شد. که در آن‌ها P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر مشاهده شده، n تعداد نمونه‌های به‌کاررفته، \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده می‌باشد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

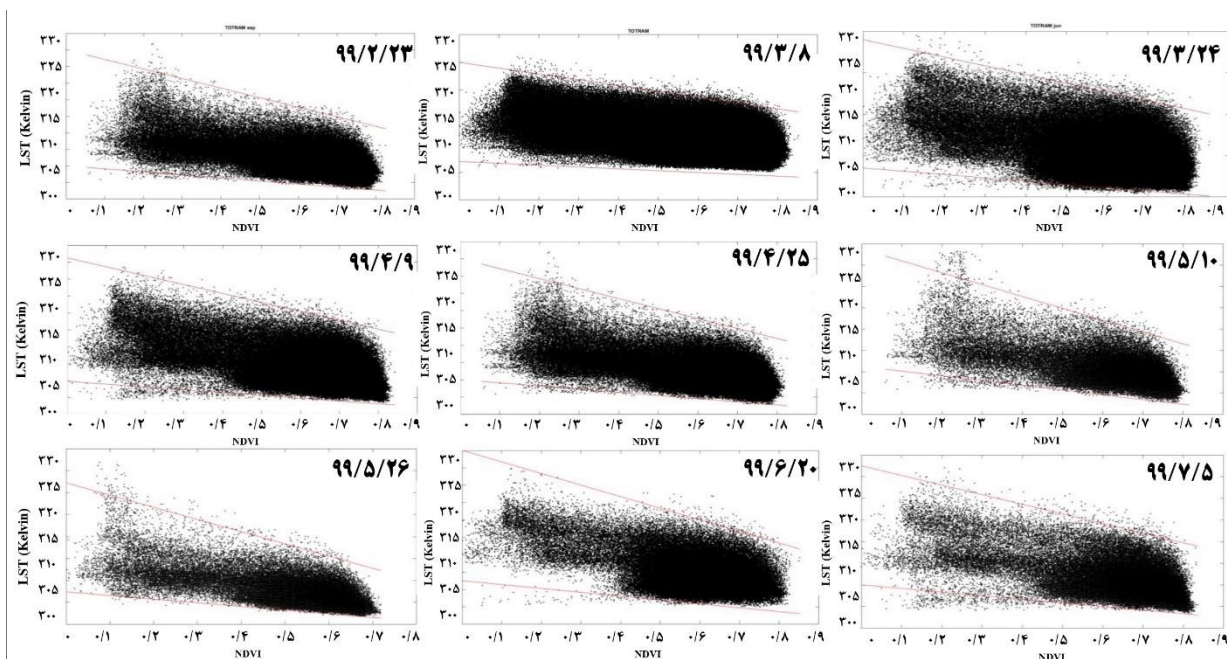
نتایج و بحث

درجه حرارت محیط یکی از عوامل مهم و مؤثر در رشد و نمو نیشکر می‌باشد. این گیاه برای ادامه زندگی به حرارت بالای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد. درجه حرارت متوسط که برای رشد و نمو ساختن قند کافی در ساقه لازم است بین ۳۰ تا ۳۴ درجه سانتی‌گراد است که این درجه حرارت معمولاً در زمین‌های پست مناطق گرم وجود دارد. مقاومت نیشکر در درجات حرارت بالا و در روزهای خیلی گرم تابستان زیاد است. تشکیل ماده خشک در گیاه بستگی کامل به درجه حرارت دارد و در حالتی که حرارت و نور کافی نباشد، ماده خشک تشکیل نمی‌گردد، جذب آب توسط ریشه‌ها بستگی به حرارت و هوای خاک اطراف ریشه دارد. نقشه تغییرات میزان دمای سطح زمین (LST) در شکل (۴) نمایش داده شده است. کمترین متوسط دمای استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای با ۳۰۳ کلوین (۲۹ سانتی‌گراد) مربوط به اردیبهشت ماه و بیشترین آن ۳۱۹ کلوین (۴۵/۵ سانتی‌گراد) مربوط به تیر و مردادماه می‌باشد.



شکل ۴. نقشه تغییرات میزان LST در محدوده مورد مطالعه

جهت انجام محاسبات مدل TOTRAM که براساس توزیع پیکسل در فضای LST و NDVI می‌باشد، ابتدا برای هر تاریخ مقادیر NDVI در برابر LST پلات گردید و سپس با استفاده از نرم افزار متلب، معادلات بهترین خطهای برازش شده بالا و پایین (LST_w و LST_d) برای هر یک از تاریخهای نمونه برداری شده میدانی، مشخص شد. توزیع پیکسلی فضای LST و NDVI در طول دوره داشت نیشکر در شکل (۵) آمده است. رابطه LST و NDVI به صورت معکوس بوده و با افزایش NDVI، کاهش LST را مشاهده می‌کنیم. خط بالای ابر نقاط، LST_d و خط پایین ابر نقاط بیانگر LST_w می‌باشد. همچنین نتایج معادلات LST_d و LST_w برای هر یک از تاریخها و همچنین یک معادله کلی با فرض در نظر گرفتن همه داده‌ها در یک پلات در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۵. تعیین پارامترهای LST_{min} و LST_{max} در مدل TOTRAM با استفاده از نرم افزار MATLAB

جدول ۱. نتایج معادلات LST_w و LST_d در برآورد رطوبت سطحی خاک

| ردیف | تاریخ | LST_d | LST_w |
|------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| ۱ | ۱۳۹۹/۲/۲۳ | -16.825 NDVI + 321.55 | -0.7366 NDVI + 303.1 |
| ۲ | ۱۳۹۹/۳/۸ | -13.636 NDVI + 321.81 | -2.0726 NDVI + 307.83 |
| ۳ | ۱۳۹۹/۳/۲۴ | -9.2137 NDVI + 320.63 | -3.3188 NDVI + 308.48 |
| ۴ | ۱۳۹۹/۴/۹ | -11.192 NDVI + 318.30 | -4.5046 NDVI + 310.14 |
| ۵ | ۱۳۹۹/۴/۲۵ | -13.394 NDVI + 323.38 | -6.3046 NDVI + 312.04 |
| ۶ | ۱۳۹۹/۵/۱۰ | -11.301 NDVI + 320.12 | -5.3016 NDVI + 311.22 |
| ۷ | ۱۳۹۹/۵/۲۶ | -9.1183 NDVI + 323.37 | -5.5474 NDVI + 312.69 |
| ۸ | ۱۳۹۹/۶/۲۰ | -10.05 NDVI + 321.18 | -3.2492 NDVI + 309.62 |
| ۹ | ۱۳۹۹/۷/۵ | -11.215 NDVI + 318.01 | -4.328 NDVI + 308.32 |
| ۱۰ | کل دوره رشد | -11.044 NDVI + 320.95 | -3.1458 NDVI + 308.54 |

پس از محاسبه مقادیر LST_w و LST_d برای هر یک از تاریخ‌های موجود، رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه برآورد شد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود در ابتدای رشد گیاه رطوبت خاک به دلیل تراکم پوشش گیاهی کم و اثرات خاک، بیشتر نقاط در بازه شروع تنش و زمان آبیاری قرار می‌گیرند، همچنین در دوران انتهایی رشد گیاه، میزان رطوبت خاک به دلیل تراکم پوشش گیاهی و دمای سطح پایین‌تر، بیشتر می‌شود و نقاط بیشتر در بازه رطوبت بالا قرار می‌گیرند. سپس مقدار همبستگی، میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده بین داده‌های آموزش (۸۰ درصد نمونه‌ها) و داده‌های آزمون (۲۰ درصد نمونه‌ها)، تصویر TOTRAM و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی ارزیابی گردید که نتایج آن برای تاریخ‌های مختلف در جدول (۲ و ۳) ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آموزش رطوبت سطحی برآوردی با استفاده از مدل TOTRAM

| ردیف | تاریخ | NRMSE % | R^2 |
|------|------------|---------|-------|
| ۱ | ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ | ۵/۱۱ | ۰/۴۰ |
| ۲ | ۱۳۹۹/۰۳/۰۸ | ۴/۳۶ | ۰/۹۸ |
| ۳ | ۱۳۹۹/۰۳/۲۴ | ۱۶/۴۸ | ۰/۸۰ |
| ۴ | ۱۳۹۹/۰۴/۰۹ | ۱۱/۲۳ | ۰/۹۸ |
| ۵ | ۱۳۹۹/۰۴/۲۵ | ۱۰/۷۵ | ۰/۹۶ |
| ۶ | ۱۳۹۹/۰۵/۱۰ | ۸/۴۱ | ۰/۹۸ |
| ۷ | ۱۳۹۹/۰۵/۲۶ | ۷/۳۲ | ۰/۹۱ |
| ۸ | ۱۳۹۹/۰۶/۲۰ | ۵/۳۷ | ۰/۹۶ |
| ۹ | ۱۳۹۹/۰۷/۰۵ | ۷/۷۴ | ۰/۷۶ |

جدول ۳. نتایج آزمون رطوبت سطحی برآوردی با استفاده از مدل TOTRAM

| ردیف | تاریخ | NRMSE % | R^2 |
|------|------------|---------|-------|
| ۱ | ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ | ۶/۵۵ | ۰/۲۵ |
| ۲ | ۱۳۹۹/۰۳/۰۸ | ۲۱/۵۸ | ۰/۷۸ |
| ۳ | ۱۳۹۹/۰۳/۲۴ | ۱۸/۱۳ | ۰/۹۶ |
| ۴ | ۱۳۹۹/۰۴/۰۹ | ۱۲/۱۸ | ۰/۹۶ |
| ۵ | ۱۳۹۹/۰۴/۲۵ | ۱۰/۳۲ | ۰/۹۳ |
| ۶ | ۱۳۹۹/۰۵/۱۰ | ۱۲/۹۹ | ۰/۹۲ |
| ۷ | ۱۳۹۹/۰۵/۲۶ | ۱۱/۵۸ | ۰/۹۳ |
| ۸ | ۱۳۹۹/۰۶/۲۰ | ۱۰/۵۹ | ۰/۹۱ |
| ۹ | ۱۳۹۹/۰۷/۰۵ | ۸/۲۲ | ۰/۷۳ |

نتایج بیانگر آن است که شاخص رطوبت سطحی خاک با ضریب تبیین ۰/۴ تا ۰/۹۸ برای نتایج آموزش و ضریب تبیین ۰/۲۵ تا ۰/۹۶ برای نتایج آزمون، در ماه‌های مختلف رشد نیشکر متغیر است. یکی از دلایل NRMSE نسبتاً بالا بین شاخص TOTRAM و داده‌های

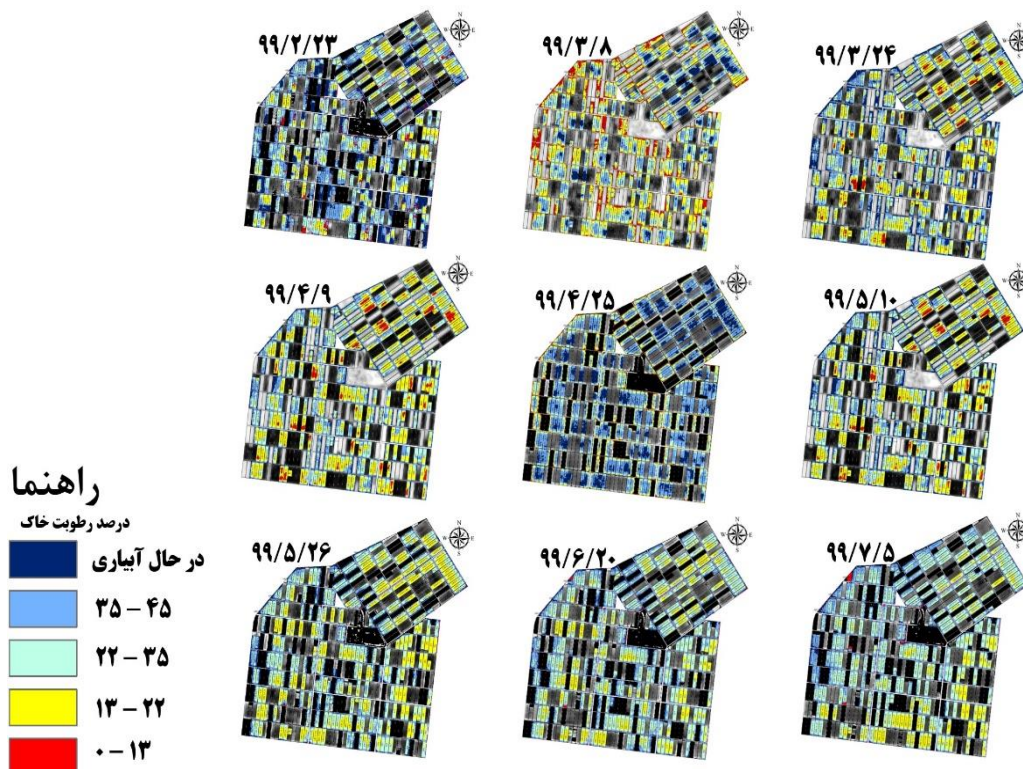
واقعی در برخی از ماه‌ها (خرداد و تیرماه)، شروع بادهای گرم و تند در فصل تابستان و تأثیر آن بر سبزیگی گیاه (تنش باد) است که باعث خشک شدن برگ‌ها و کاهش عددی شاخص NDVI و افزایش پارامتر LST در سطح مزارع می‌گردد. همچنین بین دمای سطح و رطوبت خاک رابطه معکوس وجود دارد، اما به غیر از رطوبت خاک عوامل مختلف دیگری از قبیل بافت خاک، تراکم گیاه و زمان آبیاری بر دمای سطحی و مدل اثر گذار است. در تحقیقی که (Sadeghi et al. 2017) 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 انجام شده در این تحقیق، این محدودیت‌ها برای گیاه نیشکر در برخی از ماه‌ها (نیمه دوم خرداد و تیرماه) است. نتایج آموزش و آزمون رطوبت سطحی برآورد شده به اندازه گیری شده، در طول دوره فصل رشد نیشکر در شکل (۷ و ۸) و جدول (۴) آمده است.

بیشترین جذب آب توسط ریشه نیشکر معمولاً در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر از سطح خاک است. با توجه به شکل (۹)، فضای دوبردی رطوبت اندازه‌گیری شده لایه سطحی و رطوبت اندازه‌گیری شده خاک لایه زیر سطحی رسم شده است، نتایج جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) به ترتیب برابر است با ۱۲/۹ درصد و ۰/۸۲ می‌باشد.

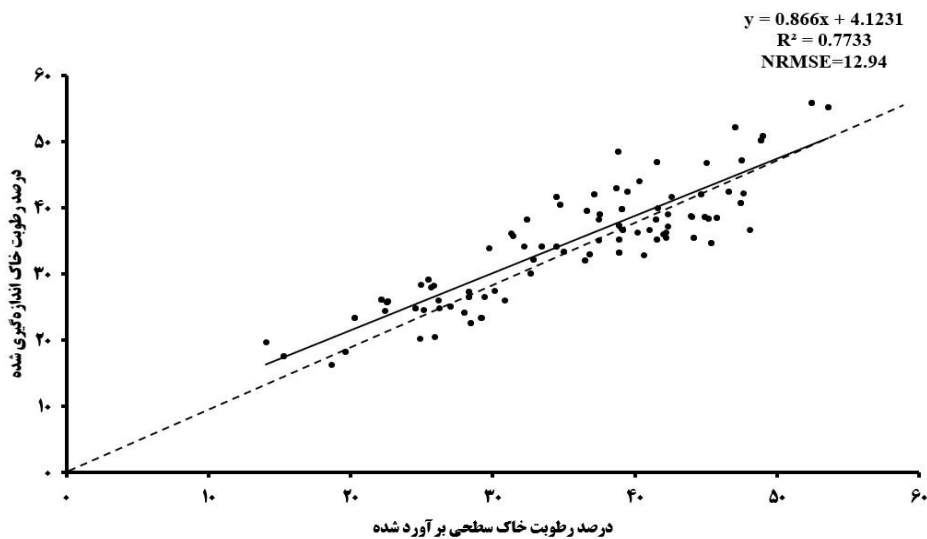
با توجه به اینکه ماهواره لندست ۸ با منبع نور خورشید می‌باشد، تصاویر دمایی و رطوبت ناشی از محاسبات با آن مربوط به سطح خاک است. نتایج بدست آمده از دقت رطوبت سطحی خاک نسبت به رطوبت زیر سطحی خاک نشان می‌دهد با استفاده از این مدل برای برآورد رطوبت خاک می‌توان به رطوبت سطحی خاک استناد کرد و دقت آن قابل قبول می‌باشد.

جدول ۴. شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در برآورد رطوبت حجمی سطح خاک

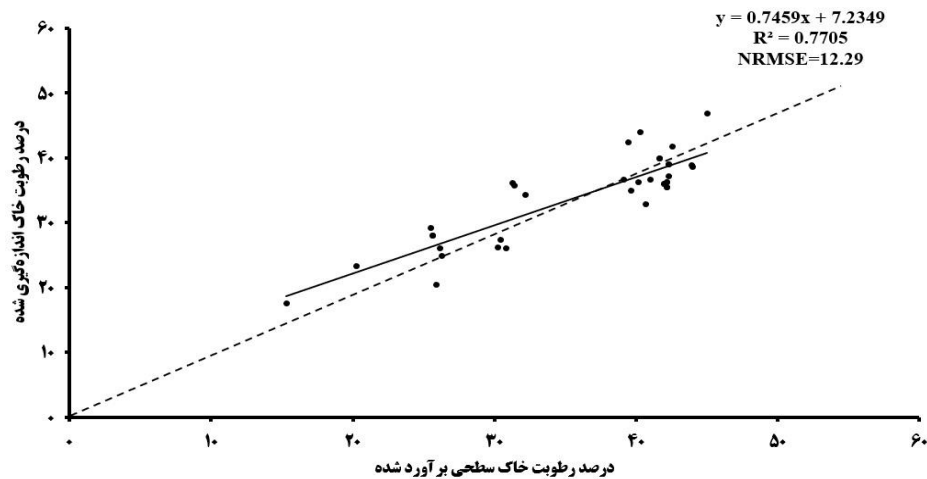
| NRMSE (%) | R^2 | R | P | t | استاندارد خطا | ضرایب معادله رطوبت خاک | TDR % $v = y_0 + a(TOTRAM)$ |
|-----------|-------|------|---------|--------|---------------|------------------------|-----------------------------|
| ۱۲/۹ | ۰/۸۲ | ۰/۹۰ | <۰/۰۰۰۱ | ۵۴/۵۷ | -۰/۹۳۹۸ | ۵۱/۳۰ | y_0 |
| | | | <۰/۰۰۰۱ | -۱۹/۸۲ | ۱/۹۶ | -۳۸/۸۶ | a |



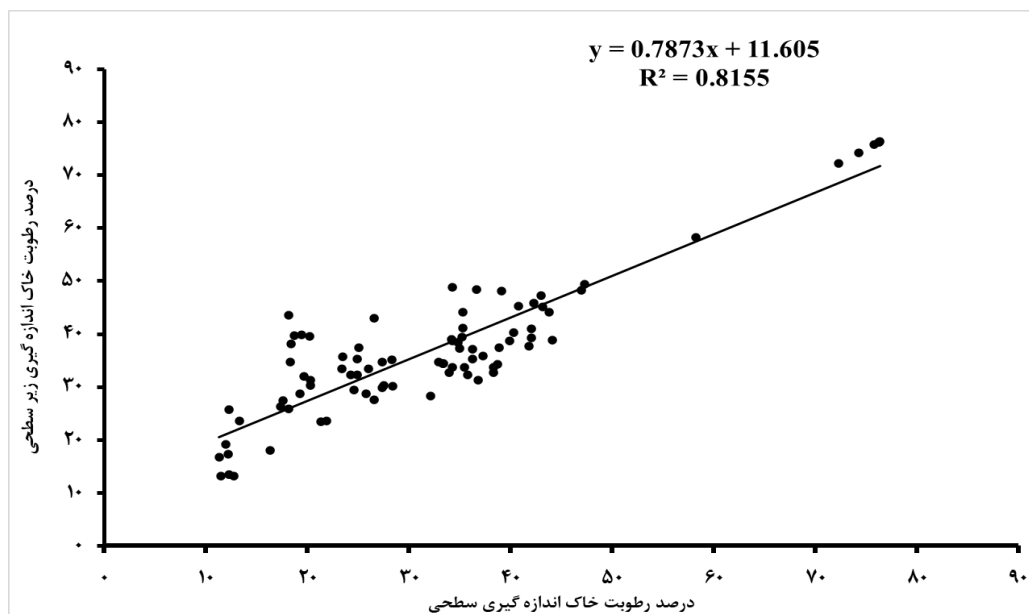
شکل ۶. وضعیت درصد رطوبت سطحی خاک مزارع تحت داشت نیشکر امیرکبیر



شکل ۷. نتایج آموزش رطوبت سطحی برآوردی با استفاده از مدل TOTRAM



شکل ۸. نتایج آزمون رطوبت سطحی برآوردی با استفاده از مدل TOTRAM



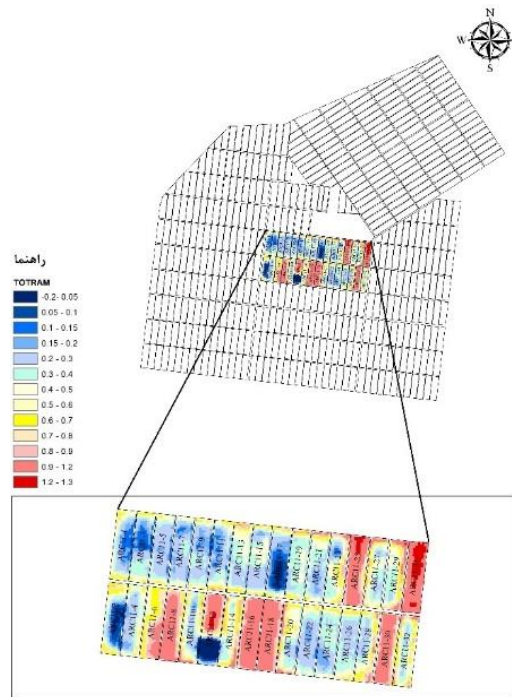
شکل ۹. ارتباط بین درصد رطوبت سطحی اندازه‌گیری شده به زیر سطحی

جدول ۵. شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در برآورد رطوبت حجمی زیرسطحی خاک

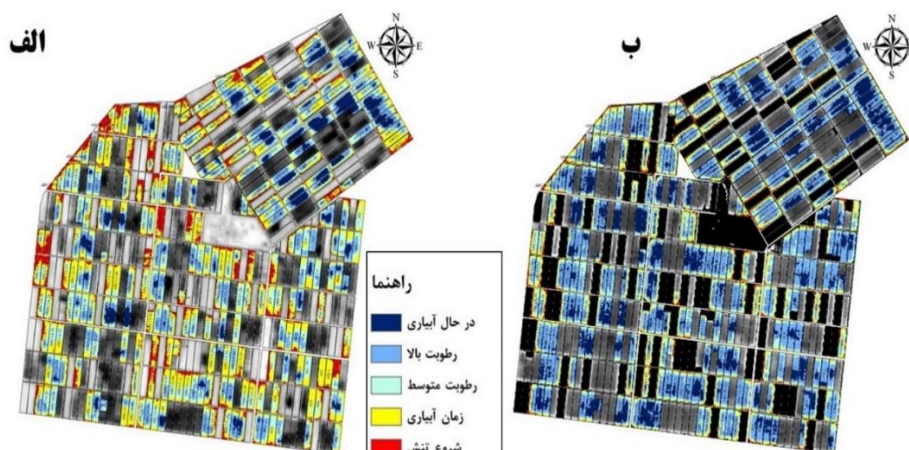
| NRMSE (%) | R ² | R | P | t | استاندارد خطا | ضرایب معادله رطوبت خاک | TDR %v = y ₀ +a(TOTRAM) |
|-----------|----------------|------|---------|-------|---------------|------------------------|------------------------------------|
| ۱۴/۳۴ | ۰/۸۱ | ۰/۹۰ | <۰/۰۰۰۱ | ۱۹/۵۷ | ۱۵/۴۸ | ۱۱/۶۰۵ | y ₀ |
| | | | <۰/۰۰۰۱ | ۲۵/۶۵ | ۱۳/۵۰ | ۰/۷۸۷ | a |

طبقه‌بندی رطوبت خاک

در این مرحله، نقشه‌های رطوبت خاک استخراج شده از معادلات بدست آمده هر تصویر در جدول (۱) و همچنین بر اساس اطلاعات روزانه تاریخ‌های آبیاری ۳۳ مزرعه ۲۵ هکتاری (شکل ۹) در طول دوره رشد نیشکر کمی‌سازی گردید. طبقه‌بندی رطوبت خاک به پنج دسته به ترتیب، در حال آبیاری، رطوبت بالا (مزارعی که بین ۱ تا حدود ۳ روز قبل آبیاری شدند)، رطوبت متوسط (مزارعی که بین ۴ تا ۷ روز قبل آبیاری شدند)، زمان آبیاری (مزارعی که بر حسب رطوبت ۱۵ درصد وزنی زمان آبیاری است) و شروع تنش رطوبتی (مزارعی که زمان آبیاری آن گذشته و دچار تنش می‌شود) انجام شد (شکل ۱۰).



شکل ۹. نقشه رطوبتی در بلوک ۱۱ و اطلاعات روزانه آبیاری

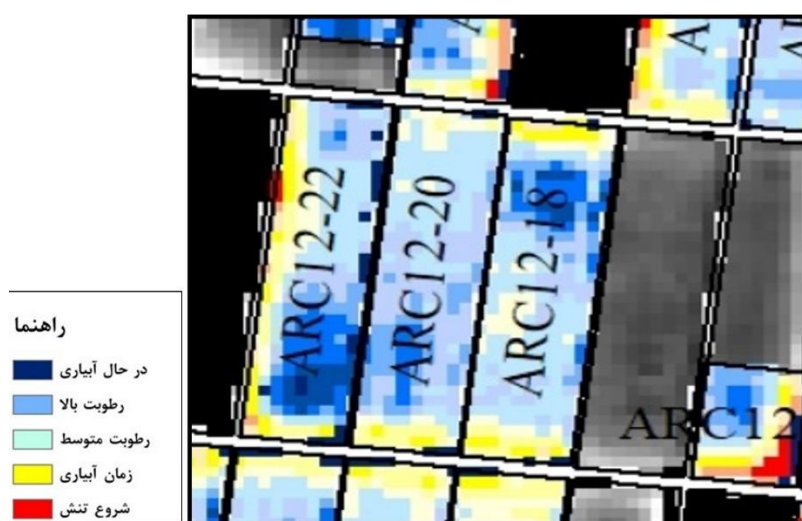


شکل ۱۰. نقشه رطوبت خاک با مدل TOTRAM در تاریخ ۱۷ خرداد ۹۹ (شکل الف) و ۱۸ تیرماه ۹۹ (شکل ب)

نتایج بدست آمده نشان داد، دقت مدل در برآورد برنامه‌ریزی دور آبیاری با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه، برای طبقات شروع تنش و زمان آبیاری متوسط برآورد شد. عدم قطعیت مدل TOTRAM در برآورد دور آبیاری در برخی از ماه‌های فصل رشد نیشکر به دلیل این‌که، باندهای حرارتی بسیار وابسته به شرایط سطح زمین و مزرعه از جمله درصد رطوبت نسبی هوا، میانگین دمای هوا، آفت (خشکی برگ) و دمای گیاه است. به‌طوری‌که جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برای تنش رطوبتی خاک برابر ۲۴/۳۲٪، زمان آبیاری برابر ۲۲/۲۰٪، رطوبت متوسط برابر ۱۱/۷٪، رطوبت بالا برابر ۱۳/۲۰٪ و در حال آبیاری برابر ۸/۸۶٪ بدست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود، دقت مدل دوزنقه حرارتی جهت برنامه‌ریزی آبیاری مزارع در برآورد تنش رطوبتی خاک و زمان آبیاری مزرعه در برخی از فصل رشد نیشکر متوسط است و برآورد مزارعی که دارای رطوبت مناسب (در حد ظرفیت زراعی)، رطوبت بالا (اشباع) و در حال آبیاری، دقت قابل قبول می‌باشد.

به‌عنوان مثال برای روشن‌تر شدن عدم قطعیت مدل TOTRAM در برنامه‌ریزی آبیاری مزارع نیشکر، در شکل (۱۱) 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.

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 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. اما در کل دقت مدل در برآورد رطوبت خاک در طول فصل رشد، قابل قبول است.



شکل ۱۱. نقشه رطوبت خاک با مدل TOTRAM در تاریخ ۱۸ تیرماه ۱۳۹۹

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از برآورد رطوبت سطحی خاک در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر با مدل TOTRAM در این پژوهش نشان داد دقت مدل برای برنامه‌ریزی آبیاری برای تنش رطوبتی خاک و زمان آبیاری مزرعه متوسط است. عدم قطعیت مدل TOTRAM در برآورد دور آبیاری در برخی از ماه‌های فصل رشد نیشکر به دلیل این‌که، باندهای حرارتی بسیار وابسته به شرایط سطح زمین و مزرعه از جمله درصد رطوبت نسبی هوا، میانگین دمای هوا، آفت (خشکی برگ) و دمای گیاه است، که باعث ایجاد خطا و عدم قطعیت زمان آبیاری مزرعه در این فصل رشد نیشکر که معمولاً خرداد و تیرماه است می‌شود. این مدل قادر است برای برآورد مقدار رطوبت خاک در سطح وسیعی از کشت و صنعت‌های نیشکری برای مزارعی که دارای رطوبت مناسب (در حد ظرفیت زراعی) رطوبت بالا (اشباع) و در حال آبیاری است را با دقت قابل قبول برآورد نماید. به‌طوری‌که جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برای کلاسه تنش رطوبتی خاک برابر ۲۴/۳۲٪، کلاسه زمان آبیاری برابر ۲۲/۲۰٪، کلاسه رطوبت متوسط برابر ۱۱/۷٪، کلاسه رطوبت بالا برابر ۱۳/۲۰٪ و کلاسه در حال آبیاری برابر



۸/۸۶٪ حاصل شد. با مقایسه میزان خطای مدل پیشنهادی، تعیین حد بالا و حد پایین به طور دقیق، باعث افزایش میزان دقت در برآورد رطوبت خاک سطحی می‌گردد. به طوری که جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برای کل دوره رشد نیشکر برابر ۱۲/۹ درصد و ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۸۲ حاصل شد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- Abayat; Muhammad, Abayat; Morteza, Abayat; Mostafa. (2022). Estimation of surface soil moisture in agricultural lands using satellite images and remote sensing indicators (case study: Shushtar city). *Iran water and soil research*, 53 (5) 957-970.
- Shah Moradi; Salah, Ghaffarian Malmiri; Hamidreza, Amini; Mohammad. (2021). Derivation of surface soil moisture index (TVDI) using temperature/vegetation scatter diagram and MODIS images. *Remote Sensing and Geographical Information System in Natural Resources*, 12(1), 38-62.
- Liu, Y., Pan, Z., Zhuang, Q., Miralles, D. G., Teuling, A. J., Zhang, T., & Niyogi, D. (2015). Agriculture intensifies soil moisture decline in Northern China. *Scientific reports*, 5(1), 1-9.
- Chen, C. F., Son, N. T., Chang, L. Y., & Chen, C. C. (2011). Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data. *Applied Geography*, 31(2), 463-475.
- 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.
- Khazaei, M., Hamzeh, S., Weng, Q. (2020). Generating high spatial and temporal soil moisture data by disaggregation of SMAP product and its assessment in different land covers. *GIScience & Remote Sensing*, 1(11), 1-11.
- Ebrahimi, M., Alavipanah, S.K., Hamzeh, S., Amiraslani, F., Neysani Samany, N., Wigneron, J. (2018). Exploiting the synergy between SMAP and SMOS to improve brightness temperature simulations and soil moisture retrievals in arid regions. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 557(1), 740-752.
- Veysi, Sh., Naseri. A., Hamzeh S. (2020). Relationship Between Field Measurement of Soil Moisture in the Effective Depth of Sugarcane Root Zone and Extracted Indices from Spectral Reflectance of Optical/Thermal Bands of Multispectral Satellite Images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(7), 1035-1044.
- Veysi, Sh., Naseri. A., Hamzeh S., Bartholomeus. H. (2017). A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 189(189), 70-86.
- Long, D., & Singh, V. P. (2012). A two-source trapezoid model for evapotranspiration (TTME) from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 121, 370-388.
- Zhang, D., Tang, R., Tang, B. H., Wu, H., & Li, Z. L. (2014). A simple method for soil moisture determination from LST-VI feature space using nonlinear interpolation based on thermal infrared remotely sensed data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2), 638-648.
- Sun, H. (2015). Two-stage trapezoid: A new interpretation of the land surface temperature and fractional vegetation coverage space. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 336-346.
- Burdun, I., Bechtold, M., Sagris, V., Komisarenko, V., De Lannoy, G., & Mander, Ü. (2020). A comparison of three trapezoid models using optical and thermal satellite imagery for water table depth monitoring in Estonian bogs. *Remote Sensing*, 12(12), 1980.
- Mallick, K., Bhattacharya, B. K., & Patel, N. K. (2009). Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8), 1327-1342.
- Moran, M. S., Peters-Lidard, C. D., Watts, J. M., & McElroy, S. (2004). Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canadian journal of remote sensing*, 30(5), 805-826.
- Rahimzadeh-Bajgiran, 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.
- 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.
- 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.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., & Goward, S. (1993). Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 32(3), 548-557.
- 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.
- Shafian, S., & Maas, S. J. (2015). Index of soil moisture using raw Landsat image digital count data in Texas high plains. *Remote Sensing*, 7(3), 2352-2372.
- Stisen, S., Sandholt, I., Nørgaard, A., Fensholt, R., & Jensen, K. H. (2008). Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration—Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1242-1255.
- Goward, S. N., Xue, Y., & Czajkowski, K. P. (2002). Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote sensing of environment*, 79(2-3), 225-242.
- 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.
- Carlson, T. (2007). An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 7(8), 1612-1629.
- Wigneron, J. P., Olioso, A., Calvet, J. C., & Bertuzzi, P. (1999). Estimating root zone soil moisture from surface soil moisture data and soil-vegetation-atmosphere transfer modeling. *Water Resources Research*, 35(12), 3735-3745.
- 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.
- Han, Y., Wang, Y., & Zhao, Y. (2010). Estimating soil moisture conditions of the greater Changbai Mountains by land surface temperature and NDVI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(6), 2509-2515.
- Yang, Y., Su, H., Zhang, R., Tian, J., & Li, L. (2015). An enhanced two-source evapotranspiration model for land (ETEML): Algorithm and evaluation. *Remote sensing of Environment*, 168, 54-65.
- 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.