

Presenting a New Method for Soil-moisture Estimation Using Optical Remotely-sensed Imagery

HASSAN FOROUGHI^{1*}, ABDALI NASERI², SAEED BOROOMAND NASAB², SAEED HAMZEH³ AND SCOTT B. JONES⁴

1. PhD student of Irrigation and Drainage, Water Science Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2. Professor of Irrigation and Drainage, Water Science Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

3. Assistant Professor of GIS and RS, Geography Faculty, University of Tehran, Iran

4. Professor of Plant, Soil and Climate, Agriculture Faculty, Utah State University, Logan, USA

(Received: Oct. 21, 2018- Revised: Dec. 25, 2018- Accepted: Jan.6,2019)

ABSTRACT

Optical remote sensing of earth surface processes commonly relies on the Red, Green, Blue (RGB), Near Infrared (NIR) and Shortwave Infrared (SWIR) electromagnetic bands. In soil-moisture estimation method using optical remotely-sensed imagery, by assuming a linear relationship between the Red-NIR reflectance, the line of bare soil (soil line) is established as the base and then moisture isoclines are assumed perpendicular to the soil line. This study is intended to show that this assumption is not consistent with the actual Red-NIR space geometry, which in many cases introduces soil moisture estimation errors. Therefore, a new mathematical transformation method was proposed to the original Red-NIR space followed by newly-defined soil moisture isolines. This new Transformed Red-NIR (TRN) model was compared with the conventional Red-NIR (CRN) model using data from Salman Farsi sugarcane field located in Khozestan province in southwestern of Iran. Twelve Landsat-8 satellite images were used during the sugarcane growing season. For validation of the remotely sensed data, ground reference soil moisture was measured at 22 locations at five different depths. Results of the proposed new method significantly improved accuracy of the Red-NIR approach to remote sensing of soil moisture.

Keywords: Soil moisture estimation, optical remote sensing, red band, near infrared band, triangle method.

ارایه‌ی یک روش نوین تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنش از دور نوری

حسن فروغی^{۱*}، عبدالعلی ناصری^۲، سعید برومندنسب^۳، سعید حمزه^۳ و اسکات ب جونز^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

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

۳. استادیار گروه سنجنش از راه دور و GIS دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، ایران

۴. استاد گروه گیاه‌شناسی، خاک، آب و هوا دانشکده کشاورزی، دانشگاه یوتا، لوگان، آمریکا

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶)

چکیده

بررسی فرآیندهای سطح زمین با استفاده از سنجنش از دور نوری به‌طور عام به باندهای الکترومغناطیسی قرمز، سبز، آبی (RGB)، مادون قرمز (NIR) و موج کوتاه (SWIR) مرتبط می‌شود. در روش تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنش از دور نوری، با فرض ارتباط خطی بین بازتابش‌های قرمز و مادون قرمز (Red-NIR)، خط عاری از پوشش گیاهی (خط خاک) به‌عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده و خطوط هم‌رطوبت به شکل عمود بر این خط مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مطالعه قصد دارد نشان دهد که فرضیه‌ی فعلی برپایه‌ی هندسه‌ی فضای Red-NIR، همواره مستحکم نیست و در پاره‌ای از موارد، تخمین اشتباهی از رطوبت خاک ارائه می‌دهد. بدین منظور یک روش نوین تخمین رطوبت خاک در این فضا پیشنهاد شد که بر پایه‌ی تعریف جدیدی از خطوط هم‌رطوبت خاک است. مدل پیشنهادی این مطالعه به مدل تغییر یافته‌ی فضای Red-NIR (TRN) مصطلح شد. این مدل با مدل رایج فضای Red-NIR (CRN) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست-۸ در مزارع نیشکر سلمان فارسی استان خوزستان مقایسه شد. ۱۲ تصویر لندست ۸ در طول دوره رشد نیشکر مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبار سنجی نتایج سنجنش از دور، رطوبت خاک در ۲۲ نقطه در ۵ عمق مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مدل TRN پیشنهادی تطابق بیشتری با مشاهدات میدانی داشت و به‌طور علمی، صحت و دقت استفاده از فضای Red-NIR در زمینه تخمین رطوبت خاک را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: تخمین رطوبت خاک، سنجنش از دور نوری، باند قرمز، باند مادون قرمز، روش مثلث.

مقدمه

رطوبت خاک، پدیده‌ای بسیار مهم است که بسیاری از فرآیندهای سطح خاک را شامل آب، انرژی و تغییرات کربن کنترل می‌کند (Vereecken et al., 2008; Robinson et al., 2008; Ochsner et al., 2013). امروزه تکنولوژی سنجنش از دور توانایی پایش رطوبت خاک را در سطح وسیع فراهم نموده است. چرا که بازتابش انعکاسی خاک، تشعشع حرارتی و پراکنش امواج میکروویوی به شکل وسیعی با رطوبت خاک همبستگی دارند. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های بی‌شماری در زمینه سنجنش از دور رطوبت خاک بر پایه نوری، حرارتی و امواج میکروویوی توسعه یافته‌اند. (Sadeghi et al., 2017; Mohanty et al., 2017; Babaeian et al., 2016; Shafian and Amani et al., 2016; Maas, 2015; Walker et al., 2001; Das and Mohanty, 2006).

در این میان سنجنش از دور میکروویوی، رایج‌ترین روش سنجنش از دور برای تخمین رطوبت خاک محسوب می‌شود. اما نتایج آن به دلیل اینکه تحت تأثیر ناهمواری زمین قرار می‌گیرد چندان دقیق نیست (Ghulam et al., Zhan et al., 2007). روش‌های سنجنش از دور حرارتی عموماً از همبستگی بالای بین درجه حرارت سطح زمین (LST^۱) و رطوبت خاک بهره می‌برند. مدل مثلث (LST-NDVI) یا دوزنقه‌ای اولین بار توسط پرایس در سال ۱۹۹۰ ارائه شد. روش مثلثی بر پایه رابطه فیزیکی بین نمایه گیاهی و دمای سطح زمین (LST) است که به شکل یک نمودار پراکنش نقطه‌ای نمایش داده می‌شود و در آن از مفهوم فضای مثلثی یا دوزنقه برای استخراج رطوبت خاک استفاده می‌شود (Nemani et al., 1993; Carlson et al., 1994; Moran et al., 1995). این روش به عنوان رایج‌ترین روش سنجنش از دور حرارتی شناخته شده است. در سال‌های

افزایش رطوبت خاک در محدوده NIR (اشعه مادون قرمز) به شکل جداگانه‌ای کاهش می‌یابد، انجام شد و این امر به دلیل جذب قوی مولکول‌های آب اتفاق می‌افتد. بدین طریق، این دو نشان دادند که هر مدل محاسباتی که بر تفاوت بین اشعه NIR و Red باشد می‌تواند برای سنجش رطوبت خاک مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، محققان دیگر فضای Red-NIR را به منظور تخمین سنجش از دور رطوبت خاک مورد استفاده قرار دادند (Ghulam *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008; Qin *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2013; Li and Tan, 2013; Amani *et al.*, 2016; Mobasher and Amani, 2016; Chen *et al.*, 2017). به منظور مدل‌سازی رطوبت خاک بر پایه فضای Red-NIR، یک خط خاک که ارتباط خطی بین بازتابش نور قرمز و اشعه مادون قرمز خاک لخت (بدون پوشش گیاهی) را توصیف می‌کند، مشخص گردیده و پس از آن خطوط هم‌تراز به شکل عمود بر سطح خاک فرض می‌شوند.

دو محدودیت بزرگ در این روش محاسباتی مرسوم Red-NIR وجود دارد. اولین محدودیت، عدم همگنی خط خاک در مناطق وسیعی است که بافتی از ترکیب انواع خاک‌های گوناگون دارند که منجر به خطا در تشخیص خاک می‌گردد. دومین محدودیت، به خطوط هم‌تراز خاک مربوط می‌شوند که عمود بر خط خاک رسم می‌شوند. این خطوط با فضای هندسی Red-NIR فعلی، سازگار نبوده و این امر باعث کاهش دقت برآورد لبه‌های مرطوب و خشک خاک می‌شود و متعاقب آن این امر منجر به ارزیابی‌های اشتباه از رطوبت خاک می‌گردد.

در این تحقیق، روش ریاضی جدیدی (TRN^۳) پیشنهاد می‌گردد که می‌تواند به عنوان راه حلی برای هر دو محدودیت ذکر شده در بالا که مربوط به مدل فضای Red-NIR مرسوم (CRN^۴) است محسوب گردد. در مدل پیشنهادی، نیازی به تعریف خط خاک نمی‌باشد و خطوط هم‌تراز خاک به جای خطی بودن به صورت منحنی تعریف شده‌اند که با مشاهدات در فضای Red-NIR بیشتر سازگار هستند. بنابراین امید است با بکارگیری روش حاضر علاوه بر غلبه بر مشکل مشخص نبودن خط خشک و مرطوب، با استفاده از روشی ساده با دقت بیشتری رطوبت خاک را برآورد کرد.

روش بررسی

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در مزارع نیشکر کشت و صنعت سلمان فارسی واقع در جنوب غربی ایران در عرض جغرافیایی بین ۲۶° ۰۱' ۳۱" و

اخیر، تغییراتی برای بهبود عملکرد این مدل مثلثی مرسوم پیشنهاد شده‌اند. (Rahimzadeh-Bajgiran *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014; Shafian and Maas, 2015; Shafian, 2017; Sun, 2016; Sadeghi *et al.*, 2017).

مدل LST-NDVI دچار دو محدودیت لاینفک می‌باشد (Sadeghi *et al.*, 2017). این مدل نیازمند باندهای نوری انعکاسی و حرارتی هم‌زمان است که کاربرد آن را بدون نوار باند حرارتی در سیستم ماهواره‌ای غیرممکن می‌سازد. علاوه بر این، برای هر سال نیاز به کالیبره کردن دارد. چرا که درجه حرارت سطح زمین (LST) نه تنها به رطوبت خاک بلکه به عوامل جوی دیگر نیز بستگی دارد. به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، LST (درجه حرارت سطح زمین) از اشعه مادون قرمز موج کوتاه (SWIR^۱)، که بازتابش تغییر یافته (STR^۲) است، استفاده می‌کند که این روش بر پایه ارتباط خطی بین رطوبت خاک و STR می‌باشد (Sadeghi *et al.*, 2015).

به دلیل امکان استفاده از ماهواره‌های بیشتر، روش STR-NDVI کاربردی‌تر از روش LST-NDVI است، لیکن، تعداد زیادی از ماهواره‌های سنجش از دور نظیر SPOT1-6, GeoEye, IKONOS, SKYSAT1-2 و Venus وجود دارند که دارای باند SWIR نیستند و از این‌رو نمی‌توانند در روش STR-NDVI مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، اکثریت دوربین‌های استفاده شده در پهبادها که برای شناخت دقت رشد سریع در برنامه‌های اجرایی کشاورزی به کار می‌روند تنها دارای باند مرئی می‌باشند.

محدودیت‌های موجود در این روش‌ها، انگیزه ایجاد پیشرفت در روش‌های سنجش از دور رطوبت خاک که کاربردی آسان و معقولانه بر مبنای باندهای قرمز و مادون قرمز (Red-NIR) دارند، را فراهم می‌کند. مفهوم فضای (Red-NIR) ابتدا توسط Richardson and Wiegand (1977) معرفی گردید و سپس Jackson (1983) این روش را به منظور مشخص کردن درصد پوشش گیاهی مورد استفاده قرار داد. بر طبق این مفهوم، در هنگام رشد پوشش گیاهی، بازتابش طول موج قرمز (RED) و انعکاس NIR افزایش می‌یابد. از آن رو، فاصله عمودی مقدار انعکاس از خط خاک در فضای Red-NIR رابطه‌ای را برای اندازه‌گیری درصد پوشش گیاهی محدود فراهم می‌کند.

(Ghulam *et al.* (2007) و Zhan *et al.* (2007) فضای

Red-NIR را به منظور تخمین رطوبت خاک به مرحله اجرا در آوردند. این آزمایش بر پایه این حقیقت که انعکاسات خاک با

3. Transformed Red-NIR
4. Conventional Red-NIR

1. Shortwave Infrared
2. Shortwave Infrared Transformed Reflectance

میلی‌متر و تبخیر پتانسیل سالانه از تشتک آزاد به میزان ۲۷۸۸،۳ میلی‌متر می‌باشد.

۳۲° ۰۵' ۳۱" درجه و طول جغرافیایی بین ۴۸° ۱۸' ۰۶" و ۲۳° ۲۱' ۴۸" درجه انجام گرفت (شکل ۱). این منطقه دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک با میانگین سالانه بارندگی ۲۶۶

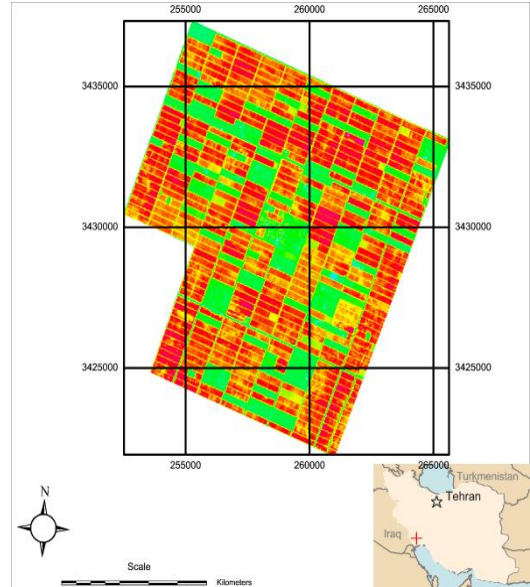
مدل‌های مورد استفاده

مدل‌های برآورد رطوبت مورد استفاده در این تحقیق شامل مدل Red-NIR مرسوم (CRN) و مدل جدید (TRN) Red-NIR است.

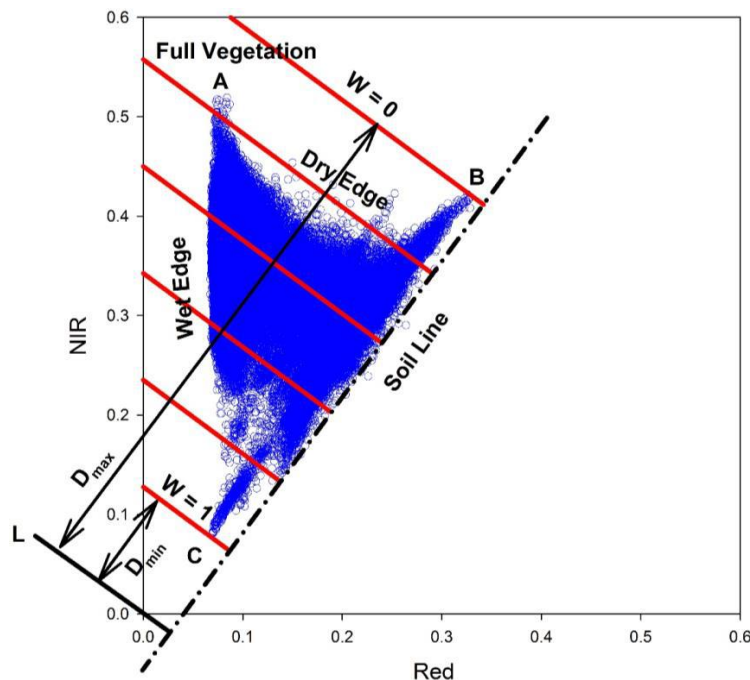
۱- مدل Red-NIR مرسوم (CRN)

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، انتشار تصاویر در فضای Red-NIR معمولاً یک محدوده هندسه مثلثی تشکیل می‌دهد که در آن خط CB خط خاک لخت می‌باشد. داده‌های مشخص شده در لبه خط که منحنی AB را تشکیل می‌دهد خط خاک خشک است و داده‌های مابین لبه AC خط مرطوب محسوب می‌گردد.

به منظور ارزیابی رطوبت خاک بر پایه این هندسه، (Ghulam et al., 2007; Zhan et al., 2007) خطوط هم‌تراز خاک را عمود بر سطح خاک فرض کرده‌اند که در شکل (۲) ترسیم گشته‌اند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزارع نیشکر کشت و صنعت سلمان فارسی



شکل ۲: مدل Red-NIR مرسوم به منظور تخمین رطوبت خاک نقاط مشخص شده، مشاهدات و خطوط رسم شده که به عنوان خطوط هم‌تراز رطوبت خاک فرض گشته‌اند.

مبدأ خط خاک محسوب می‌شوند.

خطوط هم‌تراز رطوبت خاک که با مبدأ تلاقی دارند، این‌گونه تعریف شده است:

$$R_{NIR} = -M^{-1}R_{Red} + I \quad (\text{رابطه ۲})$$

در مدل CRN، خط خاک این‌گونه تعریف شده است:

$$R_{NIR} = MR_{Red} + I \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن R_{Red} به عنوان بازتابش باند قرمز، R_{NIR} بازتابش باند مادون قرمز و M و I به عنوان سطح شیب‌دار و عرض از

مورد این است که هر دو تقریباً منحنی درجه دوم هستند و دومین مسأله تلاقی این دو در نقطه پوشش گیاهی انبوه می-باشد (A). بنابراین، فرض می‌شود که همه خطوط هم‌تراز رطوبت خاک از نوع منحنی درجه ۲ بوده و از نقطه پوشش گیاهی انبوه A می‌گذرند.

با توجه به این حقیقت که انعکاس نور قرمز کاهش و انعکاس نور مادون قرمز با افزایش سطح سبز افزایش می‌یابد، نقطه پوشش گیاهی انبوه A براساس حداکثر بازتابش مادون قرمز و حداقل بازتابش نور قرمز به صورت زیر توصیف گردید.

$$A = \begin{bmatrix} \text{Red}_{\min} \\ \text{NIR}_{\max} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در اولین قدم در ساخت مدل جدید، (TRN) مبدأ مختصات قبل به نقطه پوشش گیاهی A منتقل و در گام دوم، هر دو محورهای x و y به لبه مرطوب انتقال داده شد. در نتیجه، مختصات مبدأ تغییر یافته برای فضای جدید به صورت زیر به دست آمد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{NIR}_{\max} - \text{NIR} \\ \text{Red} - \text{Red}_{\min} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۶})$$

همانطور که در شکل (۲) نمایش داده شد، تابع درجه دو مطرح شده خطوط هم‌تراز رطوبت خاک را که همگی در نقاط پوشش گیاهی انبوه به هم پیوسته‌اند، در سیستم مختصات جدید فرم‌دهی می‌کند.

$$y = ax^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

فواصل خطوط هم‌تراز خاک از خط L که از مبدأ گذشته و عمود بر خط خاک می‌باشد، بر این فرض قرار گرفته‌اند که با رطوبت خاک در ارتباطی منسجم هستند و در این فرمول جای گرفته‌اند.

$$D = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{\text{NIR}} + MR_{\text{red}}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

فاصله D که نرمال شده است، با حداکثر (Dmax) و حداقل (Dmin) که مربوط به خطوط هم‌تراز در نقاط B و C در شکل (۲) هستند، به نمایش در آمده‌اند. و از این رو، درجه خیس‌شدگی خاک، W، به این شکل مطرح گشته است.

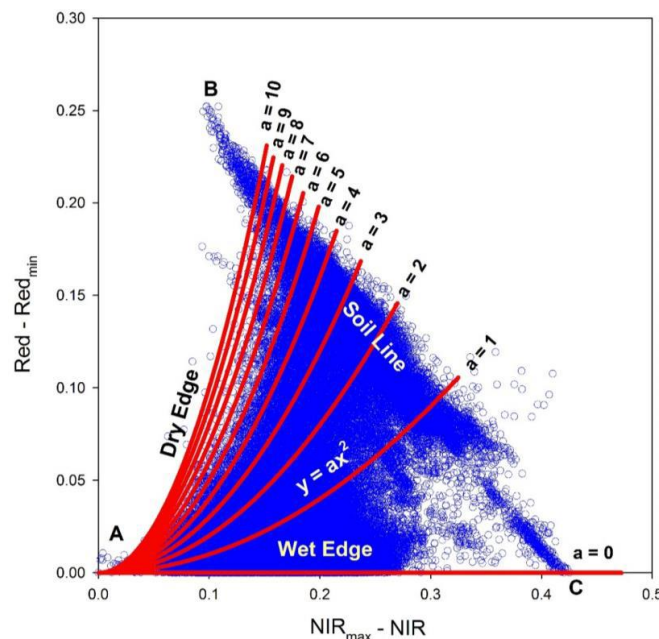
$$W = \frac{D_{\max} - D}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، فرض خطوط هم‌تراز $W=0$ و $W=1$ بر لبه‌های خشک و مرطوب منطبق نیستند (منحنی AB و AC به ترتیب).

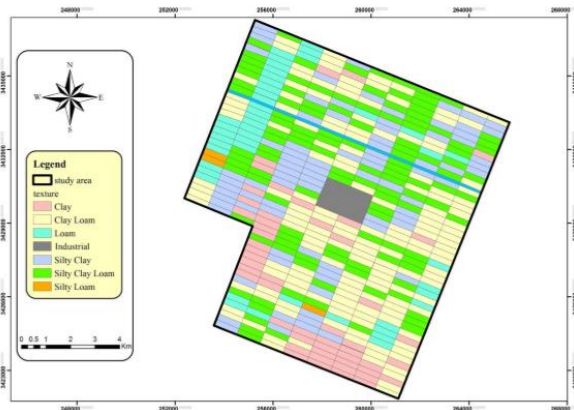
همان‌طور که در قبل ذکر شد روش جدید پیشنهادی، امکان کاهش دادن این انحرافات را فراهم می‌سازد به این صورت که با برازش بهتر $W=0$ در لبه خشک و $W=1$ در لبه مرطوب و ایجاد خطوط هم‌ترازی جدیدی که بهتر بر شرایط هندسی موجود منطبق می‌باشد.

۲-مدل جدید Red-NIR (TRN)

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، لبه‌های خشک و مرطوب در فضای Red-NIR دو مشخصه متمایز دارند. اولین



شکل ۲: مدل Red-NIR پیشنهادی برای تخمین رطوبت خاک، نقاط آبی مشاهدات فعلی و خطوط قرمز به عنوان خطوط هم‌تراز مرطوب خاک فرض گشته‌اند.



شکل ۴. نقشه بافت خاک میانمایی شده برای مزارع کشت و صنعت سلمان فارسی

برای برآورد بازتابش از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شد. به طور کلی از ۱۲ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (با درصد ابرناکی ناچیز)، در طول فصل رشد نیشکر (فروردین ۹۵ تا مهر ۹۵) برای انجام تحقیق استفاده گردیده است. با استفاده از داده‌های متا دیتا تصاویر و داده‌های اندازه‌گیری شده از ایستگاه هواشناسی سلمان فارسی تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر انجام گرفت. کالیبراسیون رادیومتری تصاویر با استفاده از ارقام هر سلول (DN) به نسبت بازتابش بالای اتمسفر (TOA) انجام گرفت (رابطه شماره ۱۲).

$$R_{TOA} = \frac{A_B + M_B DN}{\sin \Phi_s} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

جایی که RTOA با بازتابش TOA برابرند، ضریب تک و چندگانه باندی به ترتیب A_B و M_B می‌باشند. φ ، همان زاویه بلندی خورشید در یک منطقه خاص می‌باشد. مقادیر این پارامترها از داده‌های متادیتای تصاویر استفاده شده استخراج گردیدند.

پردازش تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ERDAS Imagine 2014 (Hexagon Geospatial, Madison, AL, USA) انجام گرفت.

همبستگی W با داده‌های زمینی رطوبت خاک در عمق‌های متفاوت با استفاده از هر دو مدل مورد مقایسه قرار گرفته است. مراحل محاسبه درجه اشباع (خیس‌شدگی) بر پایه تصاویر لندست ۸ با هر دو روش مرسوم و جدید در شکل (۵) به نمایش درآمده است. مدل مرسوم در معادله شماره ۱ تا ۴ و مدل جدید (معادله شماره ۵ تا ۱۰) برای تعیین نقشه خیسی خاک مورد استفاده قرار گرفتند که (W) نامیده می‌شود. این مدل‌ها بر پایه توزیع سلول‌ها در فضای Red-NIR هستند. برای هر تصویر پارامترهای D_{MAX} & D_{MIN} برای مدل مرسوم و پارامتر a_{max} برای مدل جدید به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

با ترکیب معادلات (۶) و (۷)، شاخص a می‌تواند طبق رابطه زیر محاسبه شود. لازم به ذکر است که مقدار a از لحاظ ریاضی برای نقطه پوشش ماکزیمم تعریف نشده است.

$$a = \frac{Red - Red_{min}}{(NIR_{max} - NIR)^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شد، خطوط جدید هم‌تراز رطوبت خاک می‌تواند با لبه مرطوب ($a = 0$) و لبه خشک ($a = a_{max}$) به میزان بسیار زیاد و بهتری از روش مرسوم که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت، مطابقت داشته باشد.

بنابراین، شاخص a اندازه‌گیری مناسبی برای سنجش وضعیت رطوبت خاک فراهم می‌آورد و رابطه معکوس دارد بطوریکه با افزایش آن رطوبت خاک کاهش می‌یابد. رطوبت خاک نرمال شده، W، به همین ترتیب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$W = 1 - \frac{a}{a_{max}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

یا

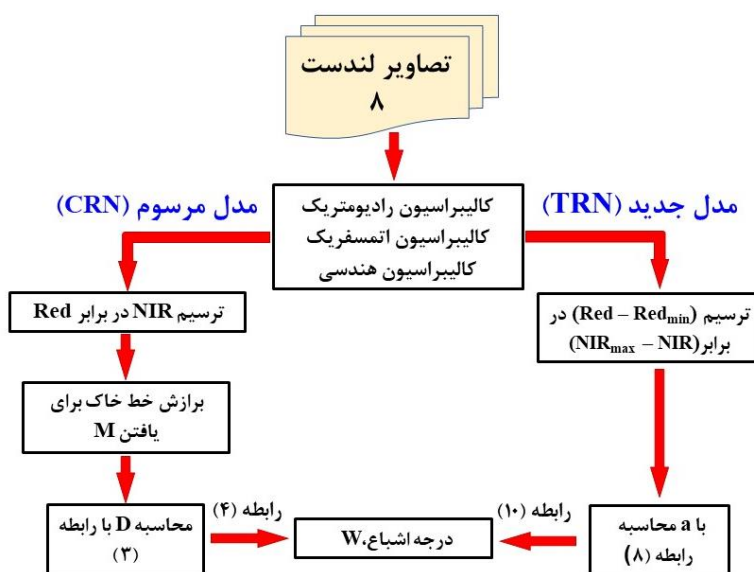
$$W = 1 - \frac{\left[\frac{Red - Red_{min}}{(NIR - NIR_{max})^2} \right]}{\left[\frac{Red - Red_{min}}{(NIR - NIR_{max})^2} \right]_{max}} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

همان‌گونه که در رابطه شماره (۱۰) نشان داده شده است، رطوبت خاک نرمال شده به آسانی می‌تواند با هر نقطه اتفاقی انتخاب شده در فضای Red-NIR، تغییر یافته و بدون هیچ‌گونه نیازی به تعیین خط خاک محاسبه گردد. بنابراین مدل TRN از لحاظ محاسباتی بسیار ساده‌تر از مدل CRN می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده

جهت بررسی دقت نتایج روش معرفی شده از داده‌های رطوبت خاک استفاده شد. بدین منظور از ۲۲ نقطه مختلف در منطقه مورد مطالعه در پنج عمق ۰، ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری نمونه‌گیری انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از اگر برداشت شده و برای اندازه‌گیری رطوبت به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از توزین اولیه، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۸ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری و رطوبت وزنی آن‌ها برآورد گردید.

با توجه به اهمیت نوع خاک در میزان بازتابش، نقشه بافت خاک از مرکز تحقیقات نیشکر و صنایع وابسته اخذ گردید. شکل (۴) بافت خاک مزارع کشت و صنعت سلمان فارسی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مراحل محاسبه درجه اشباع (W) خیس‌شدگی خاک بر پایه تصاویر لندست ۸ استفاده از مدل مرسوم (CRN) و مدل تغییر یافته (TRN)

طول فصل رشد نیشکر می‌باشند.

نتایج

همان‌گونه که در بالا ذکر شد، با توجه به سادگی آن برای تعداد محدودی از تصاویر به شکل جداگانه‌ای مشخص شده‌اند. با این حال، شباهت هندسه مثلثی در تصاویر متفاوتی که در شکل (۶) مشاهده می‌شوند متضمن این نکته است که مشخصه مدل جهانی (یک a ثابت در منطقه مورد مطالعه) می‌تواند شکلی عملی به خود بگیرد و نیز می‌تواند به مقدار زیادی، نیاز محاسباتی در زمانی که مشاهدات بسیاری در یک منطقه مشخص و یکسان نیاز به تحلیل دارد را کاهش دهد.

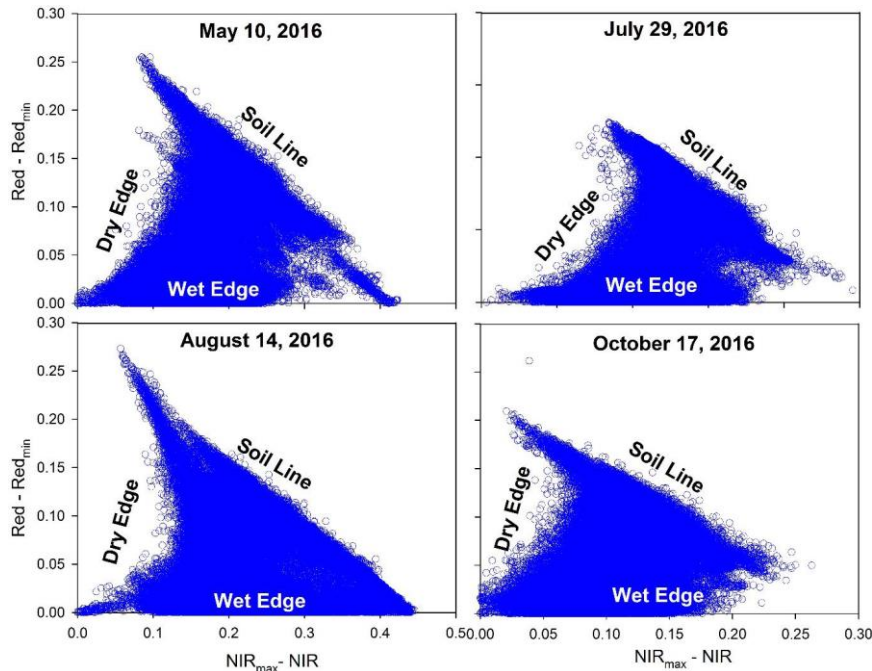
تغییرناپذیری Red-NIR به انعکاس زمان با تغییرناپذیری ارتباط بازتاب رطوبت خاک مطابقت دارد. این موضوع را می‌توان به عنوان یکی از مزیت‌های مدل‌های نوری نسبت به مدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار داد، چنانکه در مطالعه Sadeghi *et al.* (2017) نیز مورد بحث قرار گرفته است.

توزیع پیکسل‌ها در سیستم Red-NIR تغییر یافته در چهار تاریخ جداگانه در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان‌گونه که می‌بینیم شکل هندسی در تمامی تصاویر بسیار به فضای-مثلثی شباهت دارد و لبه خشک و تر بر اساس منحنی درجه ۲ می‌باشد، این موضوع تایید می‌کند که خطوط هم‌تراز رطوبت خاک که در مدل جدید تعریف گشته‌اند بسیار منطبق‌تر بر واقعیت نسبت به مدل مرسوم می‌باشند.

همان‌طور که در بالا ذکر شد، محاسبه رطوبت خاک بر مبنای مدل جدید، تنها به مختصات نقطه پوشش گیاهی انبوه نیازمند است. شاخص جدید a_x در مدل جدید (معادله شماره ۹) بر پایه مقادیر Red_{min} و NIR_{max} محاسبه می‌گردد. مقادیر a_{max} برای تصاویر متفاوت لندست ۸ در جدول (۱) مشخص گردیده است. تغییرات اندکی که بین مقادیر موجود در این جدول مشاهده می‌گردد، به دلیل تغییر در سطح پوشش سبز در

جدول ۱. مبدأ مختصات نقطه تراکم پوشش گیاهی برای تصاویر لندست ۸ آنالیز شده

Redmin	NIRmax	تاریخ	Redmin	NIRmax	تاریخ
۰/۱۲۹	۰/۴۴۸	۲۴ آوریل	۰/۱۰۸	۰/۶۳۸	۲۹ جولای
۰/۰۷۳	۰/۵۰۴	۱۰ می	۰/۱۰۰	۰/۵۶۰	۱۴ اگوست
۰/۰۸	۰/۵۲۲	۲۶ می	۰/۱۰۸	۰/۵۶۰	۳۰ اگوست
۰/۱۰۴	۰/۵۴۶	۱۱ ژوئن	۰/۰۷۶	۰/۵۱۷	۱۵ سپتامبر
۰/۰۸۹	۰/۵۴۸	۲۷ ژوئن	۰/۰۷۴	۰/۳۸۸	۱ اکتبر
۰/۱۳۱	۰/۶۵۶	۱۳ جولای	۰/۰۷۴	۰/۳۸۸	۱۷ اکتبر



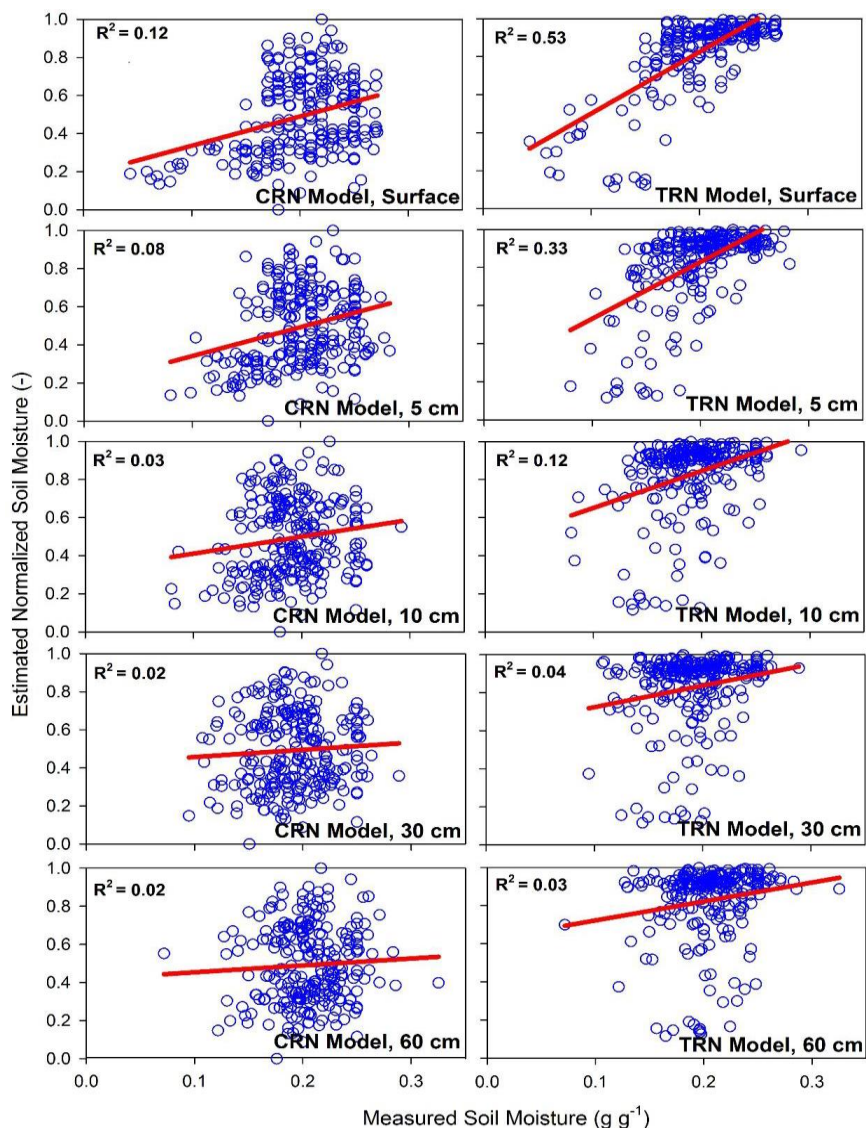
شکل ۶. توزیع پیکسل‌ها در فضای Red-NIR پیشنهادی

داده‌های الکترومغناطیسی قرمز و مادون قرمز NIR توضیح داده شود. البته این نتایج مشابه نتایج تحقیقات قبلی بر پایه سنجش از دور حرارتی است با این تفاوت که در این روش فقط بر پایه استفاده از طول موج قرمز و مادون قرمز استوار است که دسترسی آن بیشتر و آسان‌تر از ماهواره‌ها با باندهای حرارتی است.

بعلاوه، نتایج حاصله در این تحقیق با نتایج مطالعه‌ی Carlson (2007) در هماهنگی است. ایشان خاطر نشان می‌کند که با اندازه‌گیری‌های نوری امکان ندارد که بتوان رطوبت لایه-های عمق خاک را تشخیص داد. با این حال نتایج حاصله با تحقیقات Liu et al. (1997) و Zhan et al. (2007) که به ترتیب ۵ و ۱۰ سانتی‌متر را به عنوان عمق خاک مؤثر برای سنجش از دور رطوبت خاک پیدا کرده‌اند، در تناقض است. این تناقض‌ها در مطالعات مختلف به‌وسیله محمود و Hubbard (2007) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین گونه، ایشان همبستگی انسجام خاک از سطح ضعیف تا متوسط در عمق‌های گوناگون در خاک‌های متفاوت را مشاهده کردند و خاطر نشان کرده‌اند که فرآیندی که با گوناگونی‌های رطوبت خاک در طول تصویر خاک در ارتباط است پیچیده می‌باشد و در واقع مربوط به شرایط عملکرد سطح زمین و آب و هوایی مربوط است.

همبستگی رطوبت خاک نرمال شده به وسیله مدل‌های مرسوم و جدید با مشاهدات واقعی رطوبت خاک در عمق‌های مختلف در شکل (۷) مشخص گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این همبستگی با مدل جدید Red-NIR به خصوص در سطح خاک بهبود پیدا کرده است. همبستگی ضعیف مشاهده شده از مدل مرسوم به‌وسیله دو محدودیت بزرگی که قبلاً در مورد آن بحث شد، توضیح داده شده‌اند. ۱- نامشخص بودن خط خاک به دلیل ناهمگنی فضای خاک و ۲- عدم انسجام خطوط. هم‌تراز رطوبت خاک، فرض شده با هندسه فضایی Red-NIR فعلی می‌باشد. در شکل (۷)، همبستگی بین مشاهدات سنجش از دور و رطوبت خاک در عمق‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌گونه که Zhiming et al. (2002) به شکل مشخصی به آن پرداخته‌اند، پیدا کردن عمق خاکی مؤثر برای سنجش از دور رطوبت خاک همیشه یک مسأله چالش‌خیز بوده است.

نتایج به دست آمده در شکل (۷) به وضوح نشان می‌دهند که داده‌های سطح خاک همبستگی بسیار قوی با سنجش از دور نوری دارد و این همبستگی‌ها به شکلی کاملاً استوار در هنگام افزایش عمق خاک کاهش می‌یابند. همچنین این نتایج شیب زیادی از رطوبت سطح و عمق خاک را نشان می‌دهند و این نشان از همبستگی ضعیف رطوبت در سطح خاک و لایه‌های زیرین می‌باشد. این موضوع می‌تواند به دلیل عمق نفوذ و امواج



شکل ۷. رطوبت خاک نرمال شده در مقایسه با رطوبت خاک سنجیده شده از Red-NIR مرسوم مدل (CRN) و مدل Red-NIR تغییر یافته (TRN)

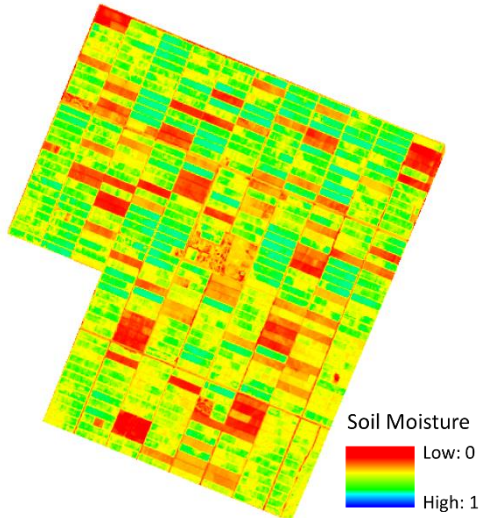
مدل TRN نه تنها دقیق‌تر از مدل CRN است (شکل ۶)، بلکه از لحاظ کاربردی بسیار ساده‌تر و آسان‌تر از مدل مرسوم و مدل‌های دوزنقه‌ای مثلی مثل مدل مثلث LST NDVI Carlson (Carlson *et al.*, 1994) و مدل دوزنقه‌ای STR-NDVI Sadeghi *et al.* (2017) هست که همگی آن‌ها نیازمند خط یا برازش منحنی با فضای متناظر هستند و از طرفی در تعیین لبه‌های تر و خشک نیز ضعیف هستند. مدل جدید دارای دو مزیت کلی نسبت به مدل مثلی (LST-NDVI) هست. ۱- این مدل می‌تواند از تصاویر ماهواره‌هایی که هیچ‌گونه باند حرارتی ندارند (مانند سنتینل ۲) استفاده کند که بعضاً دارای قدرت تفکیک مکانی بالاتری هستند. بنابراین این مدل به نسبت مدل نوری STR-NDVI می‌تواند از ماهواره‌های بیشتری استفاده نماید زیرا فقط از باندهای قرمز و مادون قرمز استفاده می‌نماید. این مدل همچنین

نقشه‌های رطوبت سطح خاک بر پایه تصاویر گرفته شده از لندست ۸ در ماه‌های ژون، جولای و سپتامبر ۲۰۱۶ در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که می‌بینید، درصد رطوبت خاک در نقشه‌هایی که به وسیله مدل جدید به وجود آمده‌اند، عموماً بالاتر از مقدار تولید شده به وسیله مدل مرسوم هستند. در مزارع نیشکر مورد مطالعه، هر قسمت توسط یک جاده خاکی احاطه شده است که سطح آن با توجه به اینکه مکان مطالعه در یک منطقه گرم و خشک قرار دارد و هرگز آبیاری نمی‌شود همیشه خشک است. همان‌گونه که در شکل (۸) به وضوح دیده می‌شود، جاده‌ها از نقشه‌های مدل TRN به هنگام مقایسه با نقشه‌های مدل CRN بسیار مشهود هستند. این مشاهدات نشان می‌دهند که نقشه‌های حاصل از مدل TRN بسیار واقعی‌تر از نقشه‌های CRN می‌باشند.

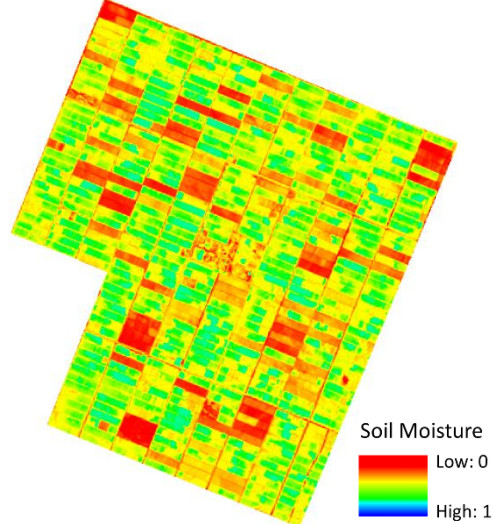
باشد و از لحاظ محاسباتی بسیار دقیق‌تر از مدل ذوزنقه‌ای STR-NDVI است.

می‌تواند به صورت جهانی نه محلی کالیبره گردد. این مدل دچار محدودیت حساسیت بالای باند SWIR در شرایط اشباع نمی-

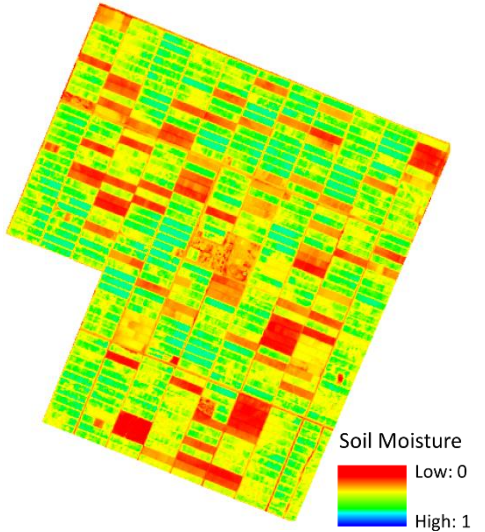
TRN Model, June 11, 2016



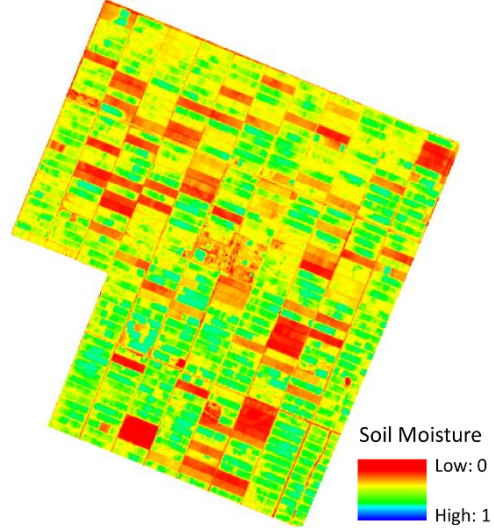
CRN Model, June 11, 2016



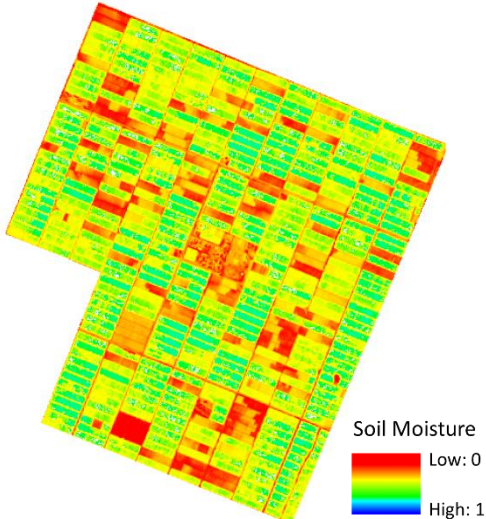
TRN Model, July 13, 2016



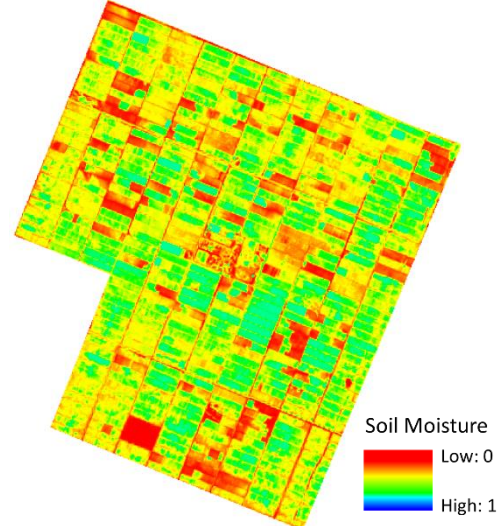
CRN Model, July 13, 2016



TRN Model, September 15, 2016



CRN Model, September 15, 2016



تصویر ۸. نقشه‌های رطوبت خاک تهیه شده به وسیله Red-NIR مرسوم (CRN) و مدل‌های تغییر یافته (TRN) TRN-Red (TRN)

برای هر دو مدل جدید و مرسوم ضعیف تر می‌گردد. به‌طور کلی مهم‌ترین مزیت روش معرفی شده، عدم نیاز به باند حرارتی و متعاقب آن سهولت استفاده از ماهواره‌های بیشتر بدون باند حرارتی و با قدرت تفکیک مکانی بالا مثل سنتینل است. همچنین مزیت دیگر، عدم محدودیت این مدل به حساسیت بالای SWIR در شرایط اشباع است، درحالی‌که از لحاظ محاسباتی نیز بسیار دقیق‌تر از مدل دوزنقه‌ای STR-NDVI می‌باشد. به‌طور کلی تعیین رطوبت سطحی خاک برای پایش خشک‌سالی کشاورزی اهمیت زیادی دارد. همچنین در روش‌های نوین آبیاری مثل آبیاری زیر سطحی یا قطره‌ای تجمع ریشه‌ها در لایه ۰ تا ۱۰ سانتیمتر زیاد است (Hernandez *et al.*, 1991) و با توجه به اینکه بیشترین جذب آب گیاه از ۳۰ درصد اولیه عمق ریشه صورت می‌گیرد، بنابراین این نتایج می‌تواند برای پایش آب و خاک و گیاه مورد استفاده واقع شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از کارکنان کشت و صنعت سلمان فارسی اعلام می‌دارد.

REFERENCES

- Amani, M., Parsian, S., MirMazloumi, S. M., & Aieneh, O. (2016). Two new soil moisture indices based on the NIR-red triangle space of Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 176-186.
- Babaeian, E., Homaei, M., Montzka, C., Vereecken, H., Norouzi, A. A., & van Genuchten, M. T. (2016). Soil moisture prediction of bare soil profiles using diffuse spectral reflectance information and vadose zone flow modeling. *Remote Sensing of Environment*, 187, 218-229.
- Carlson, T. (2007). An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 7(8), 1612-1629.
- Carlson, T. N., Capehart, W. J., & Gillies, R. R. (1995). A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 161-167.
- 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.
- Chen, N., He, Y., & Zhang, X. (2017). NIR-Red Spectra-Based Disaggregation of SMAP Soil Moisture to 250 m Resolution Based on OzNet in Southeastern Australia. *Remote Sensing*, 9(1), 51.
- Das, N. N., & Mohanty, B. P. (2006). Root zone soil

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک روش جدید، مؤثر و ساده به‌منظور ارزیابی رطوبت سطح خاک در فضای Red-NIR معرفی گردید. این تحقیق، با توجه به این حقیقت انجام گرفت که ماهواره و پهباد-های بیشتری دارای باند مرئی و مادون قرمز می‌باشند و به لحاظ اقتصادی هزینه آن‌ها ارزان‌تر است. این مدل، یک شاخص جدید (a) در معادله ۸ را به دست می‌آورد که کاملاً با رطوبت خاک در رابطه عکس می‌باشد. این مدل جدید هنگام مقایسه رطوبت خاک مشاهداتی با رطوبت حاصل از تصاویر لندست ۸ بسیار دقیق‌تر از مدل مرسوم Red-NIR می‌باشد. این در حالی است که مدل جدید به نسبت مدل مرسوم Red-NIR بسیار ساده‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیرا که هیچ‌گونه نیازی به تخمین خط خاک ندارد. برخلاف مدل‌های دوزنقه‌ای/ مثلثی (STR-NDVI یا LST-NDVI) مدل جدید احتیاجی به تخمین لبه‌های خشک و مرطوب ندارد. خروجی‌های هر دو مدل جدید و مرسوم، همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی رطوبت سطح خاک نسبت به عمق داشتند. با افزایش عمق خاک همبستگی

moisture assessment using remote sensing and vadose zone modeling. *Vadose Zone Journal*, 5(1), 296-307.

- Ghulam, A., Li, Z. L., Qin, Q., Tong, Q., Wang, J., Kasimu, A., & Zhu, L. (2007). A method for canopy water content estimation for highly vegetated surfaces-shortwave infrared perpendicular water stress index. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(9), 1359-1368.
- Ghulam, A., Li, Z. L., Qin, Q., Yimit, H., & Wang, J. (2008). Estimating crop water stress with ETM+NIR and SWIR data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11), 1679-1695.
- Ghulam, A., Qin, Q., & Zhan, Z. (2007). Designing of the perpendicular drought index. *Environmental Geology*, 52(6), 1045-1052.
- Jackson, R. D. (1983). Spectral indices in n-space. *Remote Sensing of Environment*, 13(5), 409-421.
- Hernandez, J. M., Bar-Yosef, B., & Kafkafi, U. (1991). Effect of surface and subsurface drip fertigation on sweet corn rooting, uptake, dry matter production and yield. *Irrigation Science*, 12(3), 153-159.
- Liu, F., Qin, Q., Chen, C., Feng, H., Zhang, N., & Chai, L. (2011, July). Designing an improved soil moisture index in the near-infrared and shortwave plane. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International* (pp. 3074-3077). IEEE.
- Liu, P. J., Zhang, L., Kurban, A., Chang, P., Li, L., & Polat Zhao, B. (1997). A method for monitoring soil water contents using satellite remote

- sensing. *J. Remote Sens*, 1(2), 135-138.
- Mahmood, R., & Hubbard, K. G. (2007). Relationship between soil moisture of near surface and multiple depths of the root zone under heterogeneous land uses and varying hydroclimatic conditions. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(25), 3449-3462.
- Mobasheri, M. R., & Amani, M. (2016). Soil moisture content assessment based on Landsat 8 red, near-infrared, and thermal channels. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 026011.
- Mohanty, B. P., Cosh, M. H., Lakshmi, V., & Montzka, C. (2017). Soil moisture remote sensing: State-of-the-science. *Vadose Zone Journal*, 16(1).
- Moran, M. S., Clarke, T. R., 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.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., & Goward, S. (1993). Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 32(3), 548-557.
- Ochsner, T. E., Cosh, M. H., Cuenca, R. H., Dorigo, W. A., Draper, C. S., Hagimoto, Y., ... & Larson, K. M. (2013). State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 1888-1919.
- Qin, Q., Jin, C., Zhang, N., & Yang, X. (2010, July). An two-dimensional spectral space based model for drought monitoring and its re-examination. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International* (pp. 3869-3872). IEEE.
- Rahimzadeh-Bajgirani, 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.
- Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 43(12), 1541-1552.
- Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., ... & Wendroth, O. (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358-389.
- 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.
- Sadeghi, M., Jones, S. B., & Philpot, W. D. (2015). A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 164, 66-76.
- 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.
- Shafian, S. (2014). Estimation of soil moisture status in the Texas High Plains using remote sensing (Doctoral dissertation).
- Sun, H. (2016). 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.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., & Hopmans, J. W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water resources research*, 44(4).
- Walker, J. P., Willgoose, G. R., & Kalma, J. D. (2001). One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface measurements: A simplified soil moisture model and field application. *Journal of Hydrometeorology*, 2(4), 356-373.
- Yin, Z., Lei, T., Yan, Q., Chen, Z., & Dong, Y. (2013). A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement. *Computers and electronics in agriculture*, 99, 101-107.
- Zhan, Z., Qin, Q., Ghulan, A., & Wang, D. (2007). NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(2), 283-289.
- Zhang, D., Tang, R., Zhao, W., Tang, B., Wu, H., Shao, K., & Li, Z. L. (2014). Surface soil water content estimation from thermal remote sensing based on the temporal variation of land surface temperature. *Remote Sensing*, 6(4), 3170-3187.
- Zhang, H., Chen, H., Shen, S., & Zou, C. (2008, September). The application of Modified Perpendicular Drought Index (MPDI) method in drought remote sensing monitoring. In *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability V* (Vol. 7083, p. 70831D). International Society for Optics and Photonics.
- Zh. ZhiMing, Zh., QiMing, Q., Abduwasit, Gh., DongDong, W., (2007), NIR-red spectra space based new method for soil moisture monitoring, *Science in China Series D Earth Sciences* 50(2):283-289, DOI: 10.1007/s11430-007-2004-6