

ریزمقیاس‌سازی داده رطوبت خاک ESA با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA

علی‌اکبر متکان¹، داود عاشورلو² حسین عقیقی³، و غلامرضا گل‌صفتان⁴

تاریخ وصول: 1397/03/10، تاریخ تایید: 1397/06/21

چکیده

رطوبت خاک پارامتری حیاتی در بسیاری از فرآیندهای سطح زمین است، و سنجش از دور مایکروویو به علت برخی مزیت‌هایی که نسبت به روش‌های اپتیک دارد، در برآورد رطوبت سطح زمین موثر واقع می‌شود. با این وجود رطوبت خاک حاصل از سنجش از دور مایکروویو قدرت تفکیک مکانی در حدود چند ده کیلومتر دارد، که این ابعاد برای بسیاری از کاربردهای هیدرولوژیکی مانند پایش کشاورزی و پیش‌بینی خشکسالی و تغییر اقلیم، مناسب نیست. در پژوهش حاضر، هدف، ارائه روشی بر اساس تلفیق داده‌ها، به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی داده‌های رطوبت خاک تولید شده توسط بخش تغییر اقلیم سازمان فضایی اروپا، ESA، می‌باشد. ابتدا داده‌ها با قدرت تفکیک بالاتر با استفاده از تصاویر NOAA و سه شاخص NDVI، LST و آلبدو در رابطه رگرسیون خطی با داده‌های زمینی رطوبت خاک ISMN قرار می‌گیرند. سپس با نسبت‌گیری میان خروجی این داده و داده ESA، به افزایش قدرت تفکیک مکانی اقدام می‌گردد. به علت برخی محدودیت‌ها، مدل مورد نظر در سه منطقه مطالعاتی، منطقه Kyeamba Creek catchment در استرالیا و دو منطقه در پارس‌آباد مغان ایران اجرا شد. نتایج اعتبارسنجی هر منطقه با استفاده از داده زمینی، مورد ارزیابی قرار گرفت به نحوی که متوسط ضریب تعیین به میزان 0/77 در منطقه مطالعاتی استرالیا و 0/58 و 0/34 در دو منطقه مورد مطالعه ایران حاصل شد. با توجه به نتایج، می‌توان گفت که روش ارائه شده، علاوه بر مقیاس-پذیری و سادگی، در مناطق یکنواخت و غیرمختلط نظیر Kyeamba Creek catchment کارایی بالاتری نسبت به زمین‌های کشاورزی نظیر پارس‌آباد دارد.

کلیدواژگان: قدرت تفکیک مکانی، سنجش از دور، NDVI، LST، آلبدو .

1- استاد مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

2- استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

4- نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS تلفن: 09392685366.

g.golsefatan@mail.sbu.ac.ir

مقدمه

رطوبت خاک نقش اساسی را در بسیاری از کاربردهای مرتبط با آب از جمله مدیریت منابع آب، تحلیل خشکسالی، کشاورزی و مطالعات تغییر اقلیم ایفا می‌کند. در کشور ایران به دلیل کمبود منابع آب، اهمیت توجه به مباحث مرتبط با آب، همچون موضوع رطوبت خاک مضاعف می‌شود. روش‌های اندازه‌گیری رطوبت را می‌توان به دو گروه روش‌های میدانی و روش‌های سنجش از دوری تقسیم‌بندی کرد. روش‌های میدانی در عین دقت بالا، دارای معایبی چون زمان‌بر بودن و محدودیت در جمع‌آوری داده می‌باشند (خانمحمدی و همکاران، 1393) و در اغلب مناطق ایران، مقادیر مشاهداتی آن، پوشش زمانی و مکانی لازم در اکثر کاربردها را فراهم نمی‌کند. استفاده از سنجش از دور، می‌تواند باعث ایجاد پوشش مکانی وسیع و پیوستگی زمانی شود. از آنجا که از حساسیت باندهای مرئی، مادون قرمز و حرارتی به رطوبت خاک در شرایط ابرناکی و وجود پوشش گیاهی کاسته می‌شود، این بخش‌های موج الکترومغناطیس چندان در برآورد رطوبت خاک مورد استفاده قرار نمی‌گیرند (بابائیان و همکاران، 1392). داده‌های میکروموج فعال¹ و غیرفعال² برخلاف باندهای فوق‌نه‌تنها تحت تأثیر شرایط اتمسفری قرار نمی‌گیرند، بلکه قادرند تحت شرایط متنوع خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در تخمین رطوبت خاک مورد استفاده واقع شوند (Loew et al., 2006). (Owe et al., 2008)، (Xin et al., 2006). پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که تلفیق رطوبت خاک سنجنده‌های فعال و غیرفعال تخمین بهتری از رطوبت خاک ارائه می‌دهند (Das et al., 2011) و (Njoku et al., 2002). در همین راستا بخش تغییر اقلیم سازمان فضایی اروپا، ESA CCI³ مجموعه‌ای از داده‌های میکروموج سنجنده‌های فعال و غیرفعال در چند دهه اخیر را جمع‌آوری کرده‌است. برخی از تحقیقات و پژوهش‌ها به ارزیابی رطوبت خاک حاصل از ESA به وسیله مشاهدات زمینی پرداخته‌اند که عمدتاً نتیجه آنها همبستگی بالایی میان این دو دسته داده بوده‌است (Ikonen et al., 2018) و (McNally et al., 2016). بنابراین می‌توان گفت که رطوبت خاک ESA، پتانسیل بالایی برای کاربردهای اقلیمی و مسایل مرتبط با آن دارد (Loew et al., 2013). با این وجود، قدرت تفکیک مکانی ضعیف این داده که در حد چندده کیلومتر است، قابلیت استفاده آن را در کاربردهایی که به داده‌هایی با رزولوشن بالای چندین کیلومتر نیاز دارند، محدود کرده‌است (Crow et al., 2000) و (Piles et al., 2011). بسیاری از پژوهش‌ها از داده‌های حاصل از مشاهدات در محدوده مرئی و فرورسرخ، و یا رابطه میان LST⁴ و NDVI⁵ جهت ریزمقیاس‌سازی⁶ داده رطوبت خاک ESA استفاده کرده‌اند (Hain et al., 2009) (Leng et al., 2014). Peng و همکاران (2015) موفق شدند، با ارائه رابطه‌ای میان VTCI و رطوبت خاک داده ESA، ضمن حفظ دقت مقادیر ESA، رزولوشن مکانی این داده را نیز تا حد قابل قبولی افزایش دهند.

از آنجا که محاسبه VTCI نیازمند ترسیم نمودار پراکندگی نقاط و همچنین انتخاب بخشی از نمودار توسط کاربر است و این مسئله می‌تواند باعث طولانی شدن فرآیند محاسبه، کاهش اتوماسیون، و در نتیجه تفاوت در نتایج کاربردهای مختلف گردد، و با توجه به این که بسیاری از پژوهش‌ها رابطه معناداری را میان رطوبت خاک و آلبدو⁷ نشان داده‌اند، در پژوهش حاضر، ضمن استفاده از آلبدو، با برقراری رابطه رگرسیونی میان آلبدو، NDVI، و LST،

1- active

2- passive

3- European Space Agency's Water Cycle Multi-mission Observation Strategy and Climate Change Initiative

4- Land Surface Temperature

5- Normalized Difference Vegetation Index

6- downscaling

7- albedo

سعی شده تا از مشکلات گفته شده کاسته شود. همچنین در پژوهش‌های پیشین، پیکسل‌های کوچک - یعنی پیکسل‌هایی که قرار است در فرآیند ریزمقیاس‌سازی ایجاد شوند - واقع در گوشه پیکسل درشت¹ و پیکسل‌های کوچک واقع در مرکز، به یک نحو در معادلات وارد می‌شدند، در این تحقیق با استفاده از وزن مقادیر پیکسل‌های همسایه تلاش شده تا اثر موقعیت مکانی پیکسل کوچک در پیکسل بزرگ را نیز در تعیین مقدار رطوبت خاک پیکسل مورد نظر دخالت دهیم.

مواد و روش

داده و روش مورد استفاده در این پژوهش به قرار زیر می‌باشند.

داده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو دسته داده‌های سنجش از دوری و داده‌های مربوط به ایستگاه‌های زمینی می‌باشند.

داده‌های ایستگاه‌های زمینی

با توجه به این که در این پژوهش، هدف، محاسبه رطوبت سطحی خاک بود، در صورت موجود بودن داده، داده‌های مربوط به عمق صفر تا 10cm با اولویت داده‌های سطحی‌تر مورد استفاده قرار گرفت که به منظور مدل‌سازی و اعتبارسنجی² مدل به کار برده شد.

داده‌های سنجش از دوری

داده‌های سنجش از دوری اصلی به کار رفته در این پژوهش، شامل دو نوع داده رطوبت خاک سازمان فضایی اروپا، و تصاویر ماهواره NOAA می‌باشد.

داده رطوبت خاک سازمان فضایی اروپا

این مجموعه داده توسط بخش تغییر اقلیم سازمان فضایی اروپا تهیه شده‌است و تلفیقی از داده 7 سنجنده ماکروویو passive و 3 سنجنده ماکروویو active می‌باشد. مجموعه داده passive آن از سال 1978 و مجموعه داده active آن از سال 1991 تا کنون جمع‌آوری شده‌است. داده ترکیبی یا Combine نیز در سال‌هایی که هر دوی این مجموعه داده وجود داشته، تهیه شده‌است. داده ESA، دارای قدرت تفکیک مکانی 0/25×0/25 درجه برای کل کره زمین می‌باشد (ECV Production, 2017). در پژوهش حاضر، این مجموعه داده، به عنوان داده‌ای که قرار است قدرت تفکیک مکانی آن افزایش یابد (ریزمقیاس‌شونده) مورد استفاده قرار گرفته‌است.

تصاویر ماهواره NOAA

ماهواره NOAA تصاویری با ابعاد پیکسل زمینی 1/1×1/1 کیلومتر در محدودی اپتیک، مادون قرمز و حرارتی تولید می‌کند. مزیت اصلی ماهواره NOAA نسبت به سایر ماهواره‌های مشابه و گاه با قدرت تفکیک مکانی بالاتر این است که تصاویر آن در روزهای بیشتری در طول یک ماه و در ساعات بیشتری در طول شبانه‌روز در دسترس است.

داده ماهواره SMAP

ماهواره «رطوبت خاک فعال و غیرفعال» موسوم به SMAP، در 31 ژانویه 2015 به فضا پرتاب شد. این ماهواره تصاویری از رطوبت سطحی خاک تا عمق 5cm را با استفاده از سنجنده‌های راداری فعال و غیرفعال و تصویربرداری در باند L ارائه می‌دهد. این ماهواره تنها چند ماه موفق به تصویربرداری شد. داده‌های رطوبت خاک این ماهواره در

1- coarse

2- Validation

برخی پژوهش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و همبستگی بالایی را با داده‌های زمینی نشان داده‌است (Velpuri et al., 2016)، (Sun et al., 2017). در بخشی از این پژوهش، تصاویر 3 کیلومتری SMAP به جای داده‌های زمینی جایگزین شد.

تصاویر لندست-8

در مناطقی که داده‌های ESA در دسترس نبود، برای استخراج رطوبت خاک، روش‌های دوزنقه‌ی LST-NDVI و LST-STR با استفاده از تصاویر لندست-8 به کار گرفته شد.

روش پژوهش

پژوهش‌های بسیاری بر این مطلب تمرکز کرده‌اند که میزان رطوبت سطحی خاک، با برخی شاخص‌های سطح خاک در ارتباط است و این شاخص‌ها را می‌توان از تصاویر NOAA استخراج کرد (Petroopoulos et al., 2009)، (Peng et al., 2016)، (Srivastava, 2017)، (Zhang and Zhou, 2016). در این تحقیق سه شاخص پوشش گیاهی، دمای سطح خاک و میزان آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرآیند مدل‌سازی این‌گونه برقرار گردید که ابتدا با استفاده از رگرسیون‌گیری، برای مقادیر رطوبت خاک زمینی، رابطه خطی برحسب سه شاخص پوشش گیاهی، دمای سطح، و آلوده تعریف شد و با استفاده از این معادله، رطوبت خاک برای منطقه مورد نظر استخراج و SM_{NOAA} نامیده شد که به عنوان داده با رزولوشن بالا یا SM_{HR} برای افزایش قدرت تفکیک مکانی داده با رزولوشن پایین در رابطه (1) استفاده گردید.

$$\frac{SM_{ratio}}{SM_{CR}} = \frac{SM_{NOAA}}{SM_{NOAA_m}} \quad \text{رابطه (1)}$$

در رابطه بالا SM_{ratio} مقدار جدید برای پیکسل با رزولوشن بالا و SM_{CR} مقدار پیکسل با رزولوشن پایین است. منظور از SM_{NOAA_m} رطوبت خاک بخشی از داده SM_{NOAA} است که به لحاظ مکانی متناظر با پیکسل مورد نظر داده SM_{CR} می‌باشد. ایده اصلی این رابطه از این واقعیت به دست می‌آید که هر پیکسل کوچک به هر نسبتی که در ایجاد مقدار برای مقادیر حاصل از SM_{NOAA} مشارکت کند، به همان نسبت هم در ایجاد مقدار برای رطوبت خاک در داده SM_{CR} یا هر داده مشابه دیگری مشارکت خواهد داشت.

در این مرحله و پس از محاسبه معادله، هر نقطه فقط با توجه به مقادیر خود در معادله وارد می‌شود و رطوبت خاک را برآورد می‌کند؛ و هیچ‌گونه تاثیری را از حیث شباهت به نقاط همسایه‌اش نمی‌پذیرد. هرچند بخشی از این شباهت در مقادیر پوشش گیاهی، دما و آلوده مستتر است، اما این شاخص‌ها قابلیت مدل کردن تمام این شباهت‌ها و تفاوت‌های احتمالی حاصل از دور و نزدیکی دو نقطه را ندارند. در حالی که بر اساس اصل اول جغرافیا دو نقطه نزدیک به هم احتمالاً بیشتر به هم شبیه هستند تا دو نقطه دور از هم (Tobler, 1970). از این رو با در نظر گرفتن همسایگی به شعاع یک پیکسل تصویر از داده SM_{CR} ، و با محاسبه فواصل هر پیکسل تا پیکسل کناری، و اعمال آن به عنوان ضریب وزنی معکوس، مقادیر جدیدی برای رطوبت خاک به دست می‌آید. اگر تعداد پیکسل‌های درشت که در این مرحله برای محاسبه مقدار پیکسل کوچک دخالت داده می‌شوند را n فرض کنید و فاصله مرکز این پیکسل کوچک تا مرکز این n امین پیکسل درشت را به ترتیب d_1 تا d_n بنامید، با فرض این که پیکسل کوچک مورد نظر در پیکسل درشت شماره یک قرار داشته‌باشد، رابطه (2) برقرار است:

$$\frac{SM_{dist}}{SM_{CR_1}} = \frac{SM_{NOAA} \times \left(\frac{1}{SM_{NOAA_{m_1}} \left(\frac{1}{d_1} \right) + \frac{1}{SM_{NOAA_{m_2}} \left(\frac{1}{d_2} \right) + \dots + \frac{1}{SM_{NOAA_{m_n}} \left(\frac{1}{d_n} \right)} \right)}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \dots + \frac{1}{d_n}} \quad \text{رابطه (2)}$$

در رابطه فوق، SM_{diff} مقدار جدید پیکسل با رزولوشن بالا، SM_{CR_1} مقدار پیکسلی از داده درشت پیکسل است که تصویر متناظر پیکسل کوچک مورد محاسبه ما داخل آن قرار می‌گیرد و $SM_{NOAA_m_1}$ تا $SM_{NOAA_m_n}$ به ترتیب مقادیری از داده SM_{NOAA_m} هستند، به نحوی که $SM_{NOAA_m_1}$ پیکسلی است که پیکسل کوچک مورد برآورد ما در آن قرار می‌گیرد و مابقی آنها پیکسل‌های درشت همسایه هستند. در اجرای این مدل، یک بار از خود فواصل یعنی d و بار دیگر از مجذور فواصل یعنی d^2 استفاده می‌شود.

محاسبه سه شاخص LST، NDVI، و آلبدو در تصاویر NOAA برای محاسبه NDVI، از رابطه به کار رفته در تحقیق Rouse et al. (1975) و برای محاسبه LST از رابطه Price (1984) استفاده شد. برای محاسبه آلبدو نیز رابطه پیشنهاد شده توسط Laine and Hiekinheimo (1996) به کار بسته شد.

محاسبه‌ی LST در تصاویر لندست

برای محاسبه‌ی LST در تصاویر Landset-8، الگوریتم پنجره مجزا مورد استفاده قرار گرفت (Rozenstei et al., 2014):

$$T_s = T_{10} + c_1(T_{10} - T_{11}) + c_2(T_{10} - T_{11})^2 + c_0 + c_3(c_3 + c_4 w)(1 - e) + (c_5 + c_6 w)De \quad (3)$$

در رابطه فوق، T_{10} و T_{11} به ترتیب دمای روشنایی در باندهای دهم و یازدهم و C_0 تا C_6 ضرایب الگوریتم پنجره مجزا هستند که از داده‌های شبیه‌سازی به دست آمد. همچنین e میانگین گسیل مندی و Δe تفاضل گسیل مندی در باندهای دهم و یازدهم است.

برآورد مقدار رطوبت خاک از تصاویر لندست

در اینجا از دو روش به کار رفته در تحقیق Sadeghi et al. (2017) برای محاسبه رطوبت خاک استفاده و با توجه به نتایج بهتر روش مبتنی بر LST، نتایج این روش، برای استفاده در ادامه کار برگزیده شد.

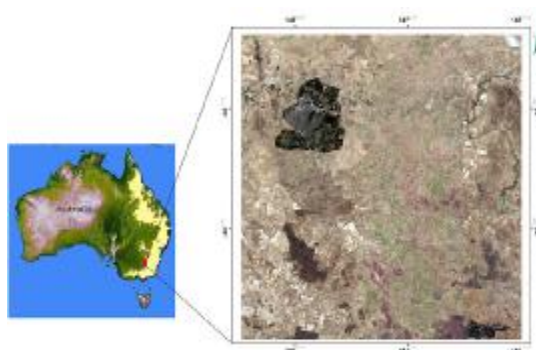
پیاده سازی و مطالعات موردی

در این پژوهش سه منطقه، در ایران و استرالیا مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مورد استفاده در هر منطقه به لحاظ برخی محدودیت‌ها، اندکی با دیگر مناطق تفاوت دارند. از آنجا که هدف، دخالت همسایه‌های پیکسل درشت ریزمقیاس شونده در فرآیند مدل‌سازی است، بایستی منطقه‌ای انتخاب شود که حداقل شامل یک پیکسل به همراه چند پیکسل همسایه باشد. از طرفی با توجه به محدودیت ایستگاه‌های زمینی، که وجود آنها برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی در منطقه مورد مطالعه ضروری بود، وسعت بیش از حد منطقه مورد مطالعه می‌توانست بر پیکسل‌های خالی از ایستگاه زمینی بیفزاید و این به کیفیت نتایج لطمه جدی وارد می‌کرد. بنابراین با توجه به پراکندگی و محل ایستگاه‌ها، حداقل تعداد پیکسل درشت ممکن، یعنی چهار پیکسل، به صورت دو در دو، به عنوان منطقه مورد مطالعه برگزیده شد. بدین صورت بخشی از همسایه‌های هر پیکسل، در منطقه مورد مطالعه ما واقع می‌شود. در نهایت داده‌های مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی مطابق با جدول 1 است:

جدول 1: داده‌های مورد استفاده در الگوریتم‌های پیشنهادی تحقیق حاضر

منطقه مطالعاتی	داده SM_{CR}	داده SM_{HR}	داده اعتبارسنجی
بخش نخست - استرالیا	SM_{NOAA}	SM_{ESA}	ایستگاه زمینی

SM_{SMAP}	SM_{ESA}	SM_{NOAA}	بخش دوم - منطقه وسیع تر مغان
ایستگاه زمینی	رطوبت خاک حاصل از تصاویر لندست	SM_{NOAA}	بخش سوم - منطقه کوچک تر مغان



شکل 1: منطقه مورد مطالعه در بخش نخست

منطقه نخست

منطقه‌ای در جنوب شرق استرالیا، که در آن شبکه‌ای از ایستگاه‌های زمینی وجود دارد، از طول جغرافیایی 147/25 تا 147/75 (شرقی) و عرض 35 تا 35/5 (جنوبی) برای این بخش از کار انتخاب شد. علت انتخاب این منطقه از میان شبکه‌های داده زمینی رطوبت خاک موجود، تراکم بالای داده در عین یکنواختی نسبی منطقه بود. از آنجا که ابعاد هر پیکسل داده ESA، $0/25 \times 0/25$ درجه است، کل تصویر برابر 2×2 پیکسل از داده ESA می‌باشد. تعداد 13 ایستگاه زمینی مربوط به شبکه جهانی رطوبت خاک، $ISMN^1$ ، در این منطقه موجود می‌باشد و چنانچه وسعت منطقه بزرگتر در نظر گرفته شود، به شدت بر تعداد پیکسل‌های خالی از ایستگاه زمینی افزوده می‌گردد، بنابراین محدوده‌ی مورد نظر نمی‌توانست کوچک‌تر یا بزرگتر از این محدوده انتخاب شود. با توجه به این که داده‌های ESA و NOAA و ایستگاه‌های زمینی در بسیاری موارد، فاقد تصویر و یا داده ثبتی بودند و یا تصاویر NOAA در برخی موارد به علت وجود ابر یا خطاهای دیگر، فاقد کیفیت لازم بود، در نهایت 20 تصویر با مشخصات قابل قبول در ماه پنجم از سال‌های 2007 تا 2011 میلادی به دست آمد.

جدول 2: تعداد تصاویر مورد استفاده در بخش نخست به تفکیک سال میلادی

سال (میلادی)	2007	2008	2009	2010	2011
تعداد تصویر	2	8	5	2	3

جدول 3: همبستگی شاخص‌های سه‌گانه با رطوبت خاک در بخش سوم

شاخص	NDVI	LST	آلبدو
میزان همبستگی (r)	0/86	-0/44	0/91

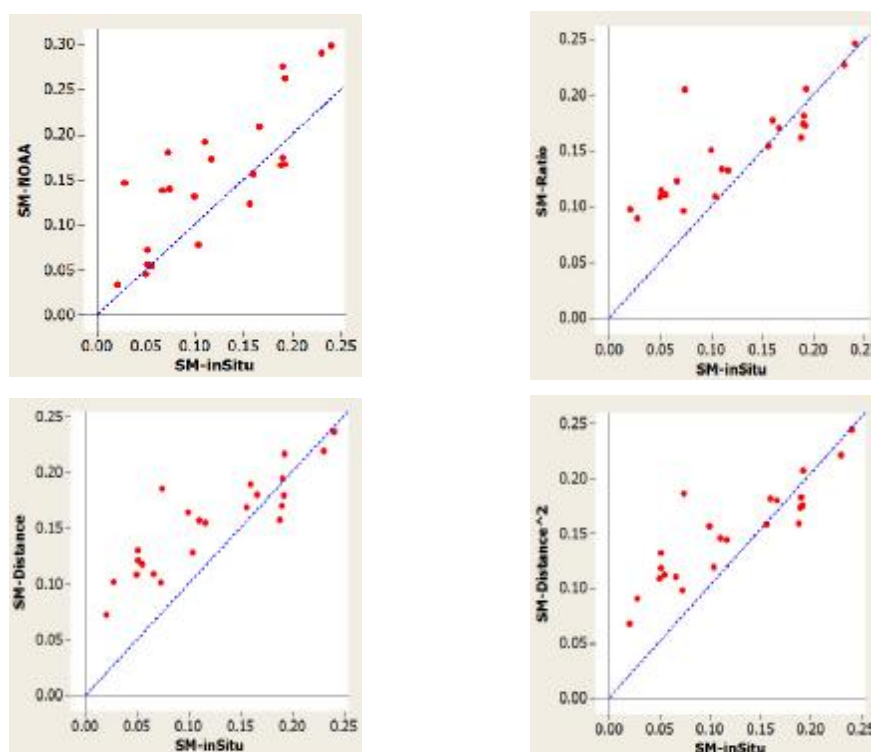
1- International Surface Soil Moisture

در این بخش با قرار دادن داده‌ها در روابط (1) و (2)، و اعتبارسنجی، نتایج زیر به دست آمد.

جدول 4: نتایج حاصل از ارزیابی الگوریتم‌ها در بخش نخست

روش برآورد	R^2 (به درصد)	R^2_{adj} (به درصد)	r (به درصد)	RMSE
SM_{NOAA}	66	64/3	81/2	0/056
SM_{ratio}	72/5	71/2	85/2	0/047
SM_{dist}	78/3	77/3	88/5	0/049
SM_{dist^2}	78/5	77/5	88/6	0/046

با نگاهی به نتایج، به نظر می‌رسد اجرای الگوریتم‌های تشریح شده، در این منطقه توانسته ضمن افزایش قدرت تفکیک مکانی، میزان همبستگی و خطای مقادیر نتایج را نیز در حد معناداری بهبود بخشد.



شکل 2: نمودارهای پراکنش مقادیر برآوردی به ازای مقادیر ایستگاه‌های زمینی در داده‌های اعتبارسنجی بخش نخست به روش‌های: الف - SM_{NOAA} (بالا-چپ)، ب - SM_{ratio} (بالا-راست)، ج - SM_{dist} (پایین-چپ) و د - SM_{dist^2} (پایین-راست)

منطقه دوم

در مورد انتخاب منطقه مورد مطالعه در ایران، تلاش در دسترسی به منطقه‌ای بود که علاوه بر پوشش حداقل چهار پیکسل از داده ESA، به لحاظ تعداد ایستگاه‌های زمینی نیز، پوشش قابل قبولی را ارائه دهد، بنابراین یک بار در منطقه‌ای با ایستگاه‌های زمینی، داده‌ای از جنس رطوبت خاک با پیکسل‌های درشت‌تر از داده NOAA و کوچکتر از داده ESA تولید کردیم و بار دیگر با وسعت دادن همان منطقه، و ایجاد گستردگی کافی برای پوشش داده ESA،

الگوریتم مورد نظر اجرا شد. با جایگزینی داده رطوبت خاک SMAP، به جای داده زمینی، مشکل کمبود داده زمینی نیز بر روی منطقه مورد نظر برطرف گردید.

منطقه پارس‌آباد مغان در شمال استان اردبیل در حد فاصل عرض جغرافیایی 39/25 تا 39/75 شمالی و طول جغرافیایی 47/5 تا 48 شرقی، برای مدل‌سازی در این بخش انتخاب شد. وجود جنگل‌ها و مراتع در کنار کشت‌های دیم و آبی و تنوع ارتفاعی، این مورد مطالعاتی را به منطقه غیریکنواخت تبدیل کرده است. در این بخش از آنجا که دسترسی به داده‌های زمینی غیرممکن بود، از داده‌های ماهواره SMAP به جای داده‌های زمینی استفاده شد.

جدول 5: تعداد تصاویر مورد استفاده در بخش دوم به تفکیک ماه میلادی

ششم	پنجم	چهارم	ماه (میلادی)
2	2	1	تعداد تصویر

پس از انجام عملیات بر روی نقاط آموزشی، رابطه برآورد مقادیر رطوبت خاک با استفاده از تصاویر NOAA به صورت زیر به دست آمد:

$$SM = -0.253 + 0.744 \times NDVI - 0.004 \times LST + 1.32 \times Albedo \quad (4)$$

میزان همبستگی شاخص‌های فوق با رطوبت خاک نیز به شرح زیر است:

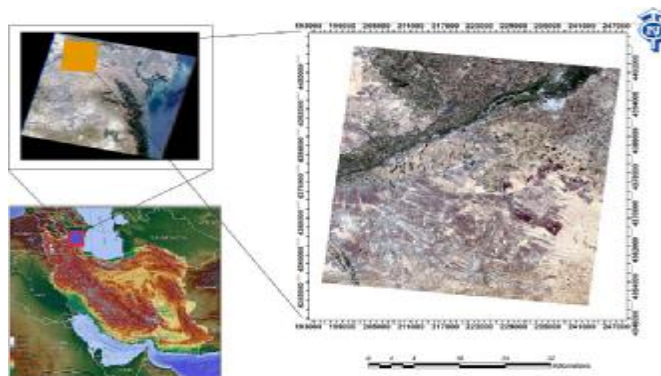
جدول 6: همبستگی شاخص‌های سه‌گانه با رطوبت خاک در بخش دوم

شاخص	NDVI	LST	آلبدو
میزان همبستگی (r)	0/67	-0/26	0/34

همبستگی بسیار بالای Albedo نسبت به بخش قبل در این منطقه بسیار کاهش پیدا کرد. شاید این مسئله را بتوان به بی‌نظمی و غیریکنواختی در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. همبستگی در مورد شاخص پوشش گیاهی، با وجود کاهش چشمگیر نسبت به بخش قبل، همچنان مثبت و قابل توجه است. در این بخش نیز نتایج زیر حاصل شد:

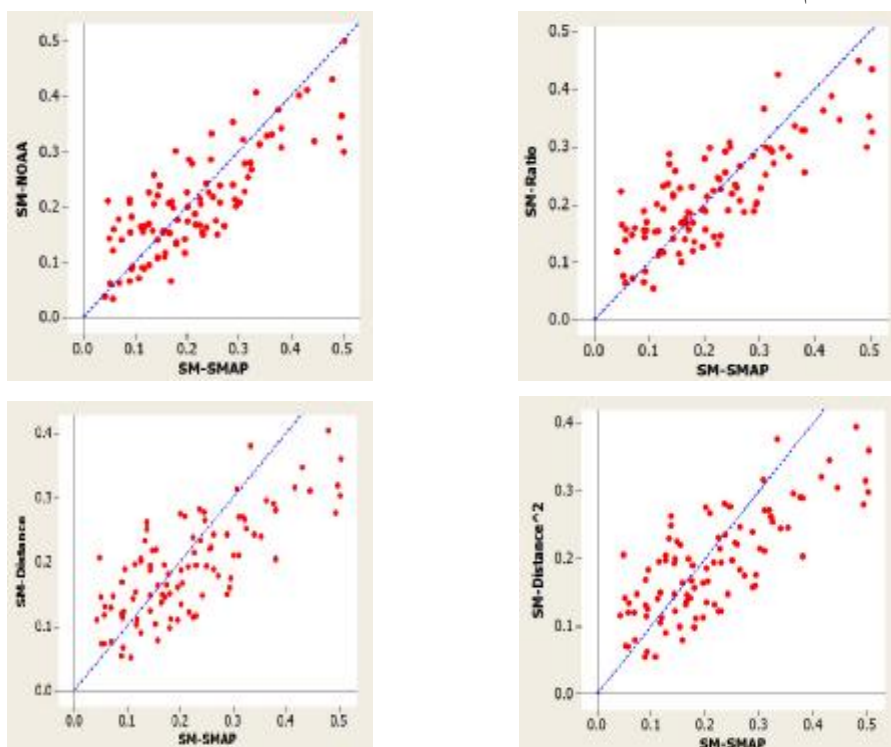
جدول 7: نتایج حاصل از ارزیابی الگوریتم‌ها در بخش دوم

روش برآورد	R^2 (به درصد)	R^2_{adj} (به درصد)	r (به درصد)	RMSE
SM_{NOAA}	64/9	64/6	80/6	0/068
SM_{ratio}	63	62/6	79/4	0/070
SM_{dist}	58/1	57/6	76/2	0/078
SM_{dist^2}	57/7	57/2	75/9	0/079



شکل 3: منطقه مورد مطالعه بخش دوم در شمال غرب کشور

در مجموع درباره نتایج این بخش، می‌توان گفت هر چند الگوریتم‌های افزایش قدرت تفکیک مکانی به میزان اندکی کیفیت تصاویر رطوبت خاک حاصل از تصاویر NOAA را تقلیل داده‌اند، اما این کاهش کیفیت خصوصاً در مورد SM_{ratio} چندان معنی‌دار و تاثیرگذار به نظر نمی‌رسد و می‌توان در مقابل افزایش قدرت تفکیک مکانی داده‌های ESA از آن چشم‌پوشی کرد.



شکل 4: نمودارهای پراکنش مقادیر برآوردی به ازای مقادیر ایستگاه‌های زمینی در داده‌های اعتبارسنجی بخش دوم به روش‌های: الف- SM_{NOAA} (بالا-چپ)، ب- SM_{ratio} (بالا-راست)، ج- SM_{dist} (پایین-چپ) و د- SM_{dist}^2 (پایین-راست)

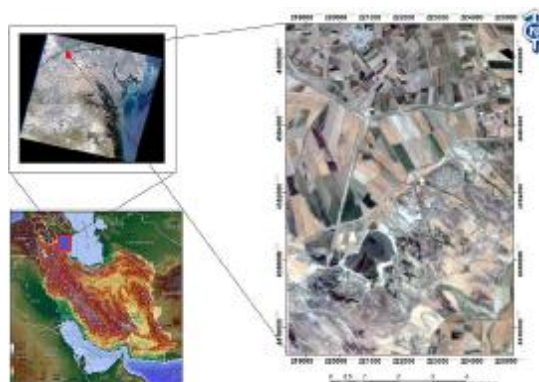
منطقه سوم

منطقه مورد مطالعه سوم محدود به منطقه‌ای بود که ایستگاه‌های زمینی در آن قرار داشت که فاصله طول جغرافیایی 47/72 تا 47/81 شرقی و 39/50 تا 39/59 شمالی را شامل می‌شود. نقشه ارتفاعی این منطقه نشان می‌دهد که به لحاظ ارتفاعی نسبت به منطقه مطالعاتی در بخش قبلی، یکنواخت‌تر است. این مسئله در مورد پراکندگی پوشش گیاهی نیز تا حدود زیادی صادق است.

تعداد 13 ایستگاه در محدوده‌ی مورد مطالعه در این بخش واقع شده که با توجه به داده‌های در دسترس و در نظر گرفتن زمان تصاویر سنجنش از دوری مورد نیاز، تنها 29 مورد داده ثبتی باقی ماند که در طول 5 روز و در ماه‌های ششم تا هشتم میلادی پراکنده بودند. داده رطوبت خاک مستخرج از تصاویر لندست-8 نیز مورد استفاده واقع گردید. نتایج نشان می‌دهد که میزان همبستگی مقادیر شاخص‌های سه گانه گفته شده با مقادیر رطوبت خاک منطقه بسیار پایین است.

جدول 8: تعداد تصاویر مورد استفاده در بخش سوم به تفکیک ماه میلادی

ماه (میلادی)	ششم	هفتم	هشتم
تعداد تصویر	1	2	2



شکل 5: منطقه مورد مطالعه در بخش سوم در شمال غرب کشور

$$SM = -0.189 + 1.05 \times NDVI - 0.046 \times LST - 4.71 \times Albedo \quad (5) \text{ رابطه}$$

این بار همبستگی هر دو شاخص LST و آلبدو با مقادیر رطوبت خاک، با علامت منفی ظاهر شد؛ اگر چه علامت و بزرگی $NDVI$ مانند دو بخش قبل، مثبت و معنی‌دار بود. در اینجا نیز با توجه به قدرمطلق اندک مقادیر همبستگی و سطح تشخیص بسیار ضعیف (به ترتیب 0/16 و 0/77) در مورد آلبدو و LST ، به نظر می‌رسد باید در معنی‌دار بودن مقادیر همبستگی آنها به طور جدی تردید کرد.

جدول 9: همبستگی شاخص‌های سه‌گانه با رطوبت خاک در بخش سوم

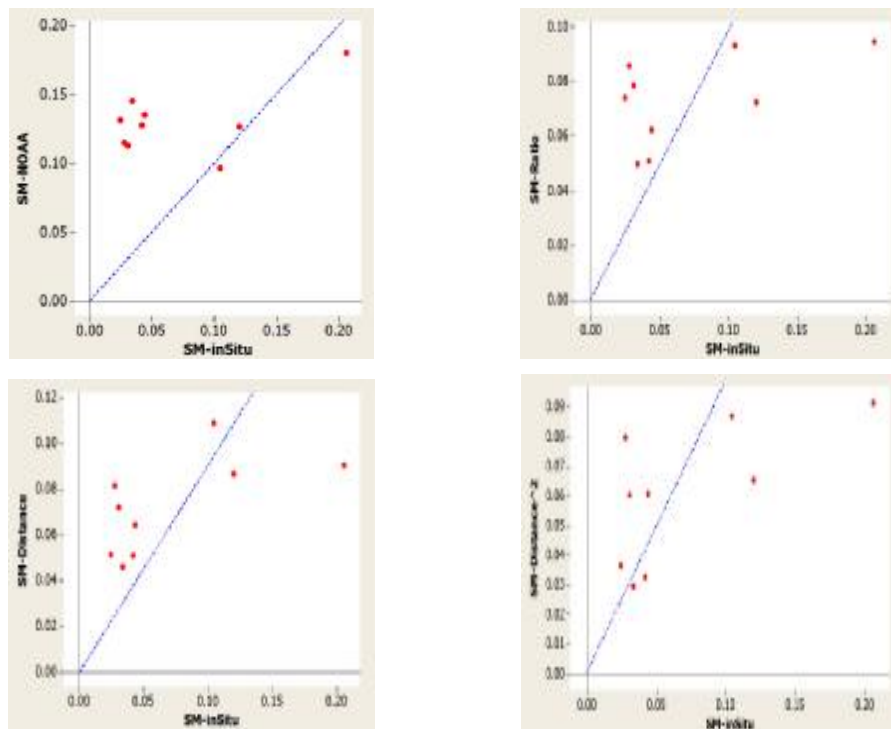
شاخص	$NDVI$	LST	آلبدو
میزان همبستگی (r)	0/47	-0/11	-0/33

با در نظر گرفتن مقادیر موجود در جداول فوق می‌توان با درجه اطمینان بالایی رابطه میان شاخص پوشش گیاهی و رطوبت خاک را رابطه‌ای مستقیم با ضریب همبستگی بالا در نظر گرفت. با اعمال الگوریتم‌هایی که در بخش قبل توضیح داده شد، نتایج زیر به دست آمد:

جدول 10: نتایج حاصل از ارزیابی الگوریتم‌ها در بخش سوم

روش برآورد	R^2 (به درصد)	R^2_{adj} (به درصد)	r (به درصد)	$RMSE$
SM_{NOAA}	27/8	17/5	52/8	0/073

0/051	55/5	21	30/8	SM_{ratio}
0/048	64/8	33/7	42	SM_{dist}
0/048	65/5	34/8	42/9	SM_{dist^2}



شکل 6: نمودارهای پراکنش مقادیر برآوردی به ازای مقادیر ایستگاه‌های زمینی در داده‌های اعتبارسنجی بخش سوم به روش‌های: الف- SM_{NOAA} (بالا-چپ)، ب- SM_{ratio} (بالا-راست)، ج- SM_{dist} (پایین-چپ) و د- SM_{dist^2} (پایین-راست)

بحث

نخستین مطلبی که در نگاه کلی به نتایج ارزیابی جلب توجه می‌کند، نتایج بهتر در بخش اول و نتایج ضعیف‌تر در بخش سوم است. شاید بتوان مهم‌ترین عامل در افزایش کیفیت نتایج در بخش اول را تعداد زیاد تصاویر و ایستگاه‌های مفید (ایستگاه‌های دارای تعداد مقادیر ثبت شده بالاتر) عنوان کرد. با توجه به کامل بودن داده‌های مورد نیاز جهت اجرای مدل، در منطقه نخست، می‌توان نتایج این بخش را با نتایج پژوهش‌های مشابه از جمله پژوهش Peng et al. (2015) مقایسه کرد. ضریب همبستگی متوسط 0/859 و RMSE متوسط 0/05 در مدل‌های اجرا شده در منطقه مطالعاتی استرالیا، در قیاس با ضریب همبستگی متوسط 0/8 و RMSE متوسط 0/055 در پژوهش Peng et al. (2015) می‌تواند نشان دهنده بهبود نسبی نتایج در استفاده از این مدل‌ها باشد.

در منطقه دوم که از پیکسل‌های تصویر SMAP به جای نقاط زمینی استفاده شد، میزان همبستگی در مقایسه با بخش سوم به شکل چشم‌گیری بیشتر است. تعداد نقاط بالا و پیوستگی بسیار زیاد در این بخش باعث شد همبستگی در خروجی مرحله اول (SM_{NOAA}) در این بخش، با مرحله اول از بخش اول با تعداد تصاویر بسیار زیاد برابری کند. یکی از دلایل همبستگی نسبی بالا در تمامی مراحل بخش نخست، تعداد بالای تصاویر می‌باشد. در بخش سوم، تعداد اندک تصاویر می‌توانست با توجه به کیفیت پایین نقاط خروجی مرحله اول، باعث افت قابل توجه خروجی مرحله

دوم شود. اما شاید این افت نکردن نتایج را بتوان به کوچکتر بودن ابعاد پیکسل‌های درشت ساخته شده در این بخش، در مقایسه با پیکسل‌های درشت بخش‌های پیشین نسبت داد.

عامل دیگری که شاید بتوان برای افزایش همبستگی در بخش اول نسبت به بخش دوم برشمرد، یکنواخت‌تر بودن منطقه در بخش اول است. یکنواختی منطقه به لحاظ اقلیمی و جغرافیایی و خصوصاً به لحاظ ارتفاعی بسیار چشمگیر است. تاثیر این مسئله از دو جنبه قابل بررسی است: نخست آنکه مدل‌های رگرسیونی ساده، قادر به مدل‌سازی برخی عوامل (مانند تغییر ارتفاع) نیستند و دوم آنکه یکنواختی منطقه باعث می‌شود، نقاط زمینی معرف بهتری از پیکسلی باشند که در آن قرار می‌گیرند.

یکی دیگر از عوامل افت چشمگیر کیفیت نتایج در بخش سوم نسبت به دو بخش اول، استفاده از داده رطوبت خاک حاصل از لندست، به جای داده ESA است.

بهبود کیفیت نتایج مراحل سوم (SM_{dist}) و چهارم (SM_{dist})، نسبت به نتایج مرحله دوم (SM_{ratio}) را می‌توان به قابلیت الگوریتم آنها در استفاده از مقادیر نقاط پیرامونی و اعمال ضریب متفاوت، برای محاسبه مقدار هر پیکسل کوچک ارتباط داد، در حالی که الگوریتم مرحله دوم، بر کل پیکسل‌های کوچک موجود در هر پیکسل درشت، ضریب یکسانی را اعمال می‌کند.

ملاحظه میزان RMSE نشان می‌دهد که پیوستگی بیشتر ایستگاه‌ها می‌تواند در کاهش خطا و برآورد دقیق‌تر تاثیر بسیار چشمگیری بگذارد. خطاهای بخش دوم که همگی کمتر از 0/08 هستند نسبت به میانگین مقادیر نقاط کنترل این بخش که حدوداً 0/21 است و در مقایسه با دو بخش دیگر به خصوص در مقایسه نتایج مراحل اول تا حدودی بهتر به نظر می‌رسد. هم چنین خطاهای در حد 0/05 در بخش اول با میانگین مقادیر نقاط زمینی 0/12، در مقایسه با خطاهای بخش سوم که حدود 0/06 هستند نسبت به میانگین مقادیر حدود 0/07 در این نقاط قابل توجه می‌باشد. به طور کلی با توجه به تعداد اندک تصاویر و ایستگاه‌های مفید بخش سوم، به نتایج این بخش باید با دیده تردید نگریست. تنها مسئله‌ای که شاید تا حدودی بتوان با اطمینان بیشتری از این بخش نتیجه گرفت، پاسخ‌گو بودن الگوریتم‌های سوم و چهارم در بهبود جزئی نتایج است. در مورد تفاوت نسبتاً زیاد میزان همبستگی در مراحل اول و دوم بخش اول، چندان اظهار نظری نمی‌توان کرد و شاید این مقدار از تفاوت، کمی نامعقول به نظر برسد. اما به طور کلی می‌توان گفت تعداد بالای تصاویر، می‌تواند در افزایش کیفیت نقاط مرحله دوم نسبت به مرحله اول موثر بوده باشد. خصوصاً که علاوه بر افزایش همبستگی، میزان RMSE نیز در حد نسبتاً قابل توجهی کمتر شده است.

در مورد نوع رابطه میان شاخص‌های آلبدو و LST، با میزان رطوبت خاک سطحی، ما نتوانستیم در پژوهش حاضر به جمع‌بندی و نتایج متقن و قابل قبولی برسیم و خصوصاً نوع رابطه میان رطوبت خاک و آلبدو با تغییر منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده، دچار تغییرهای جدی و اساسی شد، هر چند میان رطوبت خاک و LST در مجموع یک رابطه معکوس ضعیف دیده شد.

نتیجه‌گیری

نتایج الگوریتم اول نشان داد که استفاده از مقادیر پوشش گیاهی و دمای سطحی و آلبدو می‌تواند با کمک مقادیر زمینی، برآورد خوبی از مقادیر رطوبت خاک به دست دهد.

به طور کلی می‌توان گفت افزایش تعداد ایستگاه‌های زمینی و کاهش گسستگی و فضاهای خالی میان این ایستگاه‌ها می‌تواند تاثیر مثبت بزرگی بر کیفیت مدل‌های ارائه برآورد رطوبت خاک داشته باشد.

الگوریتم دوم با وجود افزایش رزولوشن مکانی تصاویر، شاخص‌های همبستگی و خطای RMSE را نیز در حد قابل قبولی حفظ کرد و در برخی موارد بهبود بخشید. می‌توان گفت در صورتی که تعداد پیکسل‌ها و تصاویر زیاد باشد الگوریتم دوم می‌تواند نتایج مطلوبی ارائه دهد.

الگوریتم‌های سوم و چهارم در مناطقی که یکنواختی بیشتری داشته باشند، پاسخ بهتری می‌دهند. به عبارت بهتر در مورد استفاده از این الگوریتم‌ها باید نسبت معقولی میان ابعاد پیکسل درشت با میزان یکنواختی منطقه برقرار کرد. همچنین در نتیجه این بحث می‌توان گفت که الگوریتم‌های سوم و چهارم الگوریتم‌های مناسبی برای برآورد در لبه‌ها نیستند.

منابع

1. بابائیان ا، م. همایی، ع.ا. نوروزی، 1392، برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر راداری ENVISAT/ASAR. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ب، جلد 27، شماره 4.
2. خان‌محمدی ف، م. همایی، ع.ا. نوروزی، 1393، برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال‌شده رطوبت با استفاده از تصاویر MODIS. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، شماره 2.
3. رحمانی کم‌ع، 1394، استخراج و روندیابی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود.
4. Chander, G., Markham, B.L., 2003 Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 41:2674–2677
5. Crow, W.T., Wood, E.F., and Dubayah, R., 2000, "Potential for downscaling soil moisture maps derived from spaceborne imaging radar data," *J. Geophys. Res.: Atmos.*, vol. 105, no. D2, pp. 2203–2212, Jan.
6. Das, N.N., Entekhabi, D., and Njoku, E.G., 2011, "An algorithm for merging SMAP radiometer and radar data for high-resolution soil-moisture retrieval," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 5, pp. 1504–1512, Oct.
7. Dianjun, Z., Guoqing, J., 2016, Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing. *Sensors*, 16, 1308; doi:10.3390/s16081308.
- 8.
9. ECV Production, Fusion of Soil Moisture Products: Algorithm Theoretical Baseline Document, Version 2.0, 2017
10. Hain, C.R., Mecikalski, J.R., and Anderson, M.C., 2009, "Retrieval of an available water-based soil moisture proxy from thermal infrared remote sensing. Part I: Methodology and validation," *J. Hydrometeorol.*, vol. 10, no. 3, pp. 665–683, Jun.
11. Holzman, M.E., Rivas, R., and Bayala, M., 2014, "Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 1951–1955, Nov.
12. Ikonen, J., Smolander, T., Rautiainen, K., Cohen, J., Lemmetyinen, J., Salminen, M., and Pulliainen, J., 2018, Spatially Distributed Evaluation of ESA CCI Soil Moisture Products in a Northern Boreal Forest Environment, *Geosciences*, 8, 51; doi:10.3390.
13. Laine, V., Martti, H., 1996, Estimation of surface albedo from NOAA AVHRR data in high latitudes. *Tellus* 48 A. 424-441
14. Leng, P. et al., 2014, "Bare surface soil moisture retrieval from the synergistic use of optical and thermal infrared data," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 35, no. 3, pp. 988–1003, Feb.
15. Loew, A., Ludwig, R., and Mauser, W., 2006, "Derivation of surface soil moisture from ENVISAT ASAR wide swath and image mode data in agricultural areas," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 4, pp. 889–899, Apr.
16. Mallick, K., Bhattacharya, B.K., and Patel, N., 2009, "Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI," *Agricultural Forest Meteorol.*, vol. 149, no. 8, pp. 1327–1342.
17. McNally A., Shukla S., Arsenault KR., Wang S., Peters-Lidard CD., Verdin JP., 2016, Evaluating ESA CCI soil moisture in East Africa, *Earth Obs Geoinf.* 2016 Jun;48:96-109. doi: 10.1016/j.jag.2016.01.001. Jan 21.
18. Njoku, E.G. et al., 2002, "Observations of soil moisture using a passive and active low frequency microwave airborne sensor during SGP99," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 12, pp. 2659–2673, Dec.
19. Njoku, E.G. et al., 2003, "Soil moisture retrieval from AMSR-E," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 2, pp. 215–229, Feb.
20. Owe, M., de Jeu, R., and Holmes, T., 2008, "Multisensor historical climatology of satellite derived global land surface moisture," *J. Geophys. Res., Earth Surface*, vol. 113, no. F1, Art. ID. F01002.
21. Peng, J., Loew, A., Zhang, S., Wang, J., and Niesel J., 2016, Spatial downscaling of satellite soil moisture data using a Vegetation Temperature Condition Index, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54(1), 558–566.

22. Peng, J., Niesel, J., Loew, A., Zhang, S., and Wang, J., 2015, Evaluation of satellite and reanalysis soil moisture products over southwest China using ground-based measurements, *Remote Sens.*, 7(11), 15,729.
23. Petropoulos, G. P., T. N. Carlson, M. J. Wooster, and S. Islam, 2009, A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture, *Prog. Phys. Geogr.*, 33(2), 224–250.
24. Piles, M. et al., 2011, “Downscaling SMOS-derived soil moisture using MODIS visible/infrared data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 9, pp. 3156–3166, Sep.
25. Price, J.C. 1984, Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 89
26. Rouse, J.W., Jr., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Paper presented at the 3rd ERTS-1 Symposium, Greenbelt, Maryland.
27. Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., and Karnieli, A., 2014, Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. *Sensors*, 14(4), 5768-5780.
28. 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.
29. Sandholt, I., Rasmussen, K., and Andersen, J., 2002, “A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 79, no. 2/3, pp. 213–224.
30. Shunlin, L., 2000, Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. Elsevier Science Inc. All rights reserved. PII: S0034-4257(00)00205-4.
31. Srivastava, P.K., 2017, Satellite Soil Moisture: Review of Theory and Applications in Water Resources, *Water Resour Manage* 31:3161–3176, DOI 10.1007/s11269-017-1722-6.
32. Sun, Y., Huang, S., Jianwei Ma, J., Jiren Li, J., Xiaotao Li, X., Hui Wang, H., Sheng Chen, S., and Wenbin Zang, W., 2017, Preliminary Evaluation of the SMAP Radiometer Soil Moisture Product over China Using In Situ Data, *Remote Sens.* , 9(3), 292
33. Taylor, C.M. et al., 2012, “Afternoon rain more likely over drier soils,” *Nature*, vol. 489, no. 7416, pp. 423–426, Sep.
34. Tobler, W.R., 1970, A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography* 46: 234-240
35. Velpuri, N.M., Senay, G.B., Morissette, J.T., 2016, Evaluating New SMAP Soil Moisture for Drought Monitoring in the Rangelands of the US High Plains, *Rangelands*, Volume 38, Issue 4, Pages 183-190, ISSN 0190-0528,
36. Wan, Z., Wang, P., and Li, X., 2004, “Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, no. 1, pp. 61–72.
37. Wang, K., Li, Z., and Cribb, M., 2006, “Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 102, no. 3/4, pp. 293–305, Jun.
38. Wigneron, J.P. et al., 2003, “Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: Current status and future plans,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 85, no. 4, pp. 489–506, Jun.
39. Xin, J. et al., 2006, “Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 27, no. 10, pp. 2071–2075, May.