

توسعه یک مدل رگرسیونی شاخص مبنا به منظور برآورد رطوبت سطح خاک از تصاویر MODIS با در نظر گرفتن اثرات بافت خاک

نبی‌اله غلامی بیدخانی^{۱*}، محمدرضا مباحشری^۲

^۱ دانشجوی دکتری سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
n.gholami@mail.kntu.ac.ir

^۲ استاد دانشکده عمران و محیط زیست - موسسه آموزش عالی خاوران
mohammadreza.mobasheri@khi.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۷، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۸)

چکیده

کمیت رطوبت خاک یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی خشکسالی و تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. پایش بهنگام و دقیق این کمیت در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی به کمک سنجش از دور یک راهکار سودمند محسوب می‌گردد. تاکنون روش‌های مختلفی برای برآورد رطوبت سطح خاک از داده‌های ماهواره‌ای ارائه شده است. استفاده از روش‌های مبتنی بر محدوده کوچکی از طیف الکترومغناطیسی در قالب شاخص‌های منفرد، نمی‌تواند راه حل مناسبی برای برآورد رطوبت سطح خاک در حوزه سنجش از دور مرئی و حرارتی باشد. استفاده منفرد از یک شاخص محدودیت‌های خاص خود را به همراه دارد. این محدودیت‌ها می‌تواند شامل میزان تاثیرپذیری از شرایط جوی، هندسه تصویربرداری، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک باشد. بنابراین استفاده از تمامی پتانسیل محدوده طیف الکترومغناطیسی (باند‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و طول موج کوتاه و حرارتی) در قالب ترکیبی رگرسیونی از شاخص‌های طیفی، می‌تواند در بهبود دقت برآورد رطوبت سطح خاک موثر باشد. در این تحقیق ابتدا میزان همبستگی تعداد ۲۰ شاخص ارائه شده در حوزه تخمین رطوبت سطح خاک با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه شاخص‌ها به ترتیب اولویت قدرمطلق ضریب همبستگی خطی و نمایی و به تدریج به یک مدل خطی افزوده شدند و عملکرد این روند از نقطه نظر دقت برآورد رطوبت سطح خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل بهینه تخمین رطوبت سطح خاک رگرسیونی خطی از شاخص‌های LST-VSDI-NDWI-SASI به دست آمد که با بهبود دقتی به میزان (RMSE=0.048) همراه بود. از طرف دیگر، با توجه به این که خاک‌ها سطح اشباع‌شدگی متفاوتی دارند، منطقی خواهد بود که مدلسازی آن‌ها هم براساس دسته‌بندی نوع بافت خاک صورت پذیرد. بنابراین مدل خطی رطوبت سطح خاک برای سه مجموعه داده با کلاس‌های خاک متوسط بافت، نسبتاً درشت بافت و درشت بافت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که، مدل تخمین رطوبت برای خاک‌های متوسط بافت در مقایسه با خاک‌های درشت بافت خوانش نسبتاً خوبی با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده را دارد (RRMSE=29%..., RRMSE=0.032). به عبارت دیگر مدل برآورد رطوبت به همه انواع خاک‌ها تعمیم‌پذیر نمی‌باشد و خاک‌های درشت‌دانه به واسطه‌ی خاصیت گرانیروی بالا توان حفظ مقادیر محسوسی از رطوبت را نداشته و در تعامل با امواج الکترومغناطیس رفتار کم معناتری را از خود نشان می‌دهند. در نقطه‌ی مقابل، خاک‌های با بافت نرم و ریزدانه به واسطه کاهش محسوس رفتار مویینگی در آن‌ها، تعامل معنادارتری را در هنگام برهمکنش با امواج الکترومغناطیس نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: رطوبت سطح خاک، بافت خاک، شاخص طیفی خاک، سنجش از دور، MODIS

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

به طور کلی رطوبت خاک به محتوای آب موجود در خاک گفته می شود که به دو صورت درصد وزنی (جرمی) و حجمی بیان می شود. میزان رطوبت خاک به عنوان یک پارامتر کلیدی و اساسی در انواع مطالعات کشاورزی، هیدرولوژیکی و هواشناسی شناخته می شود که بر موازنه انرژی سطح زمین و جو تأثیر می گذارد [۱]. پایش بهنگام رطوبت سطح خاک نقش مهمی را در ارزیابی میزان تولید محصول کشاورزی، خشکسالی و پیش بینی رواناب و سیلاب ایفا می کند [۲]. هم چنین رطوبت سطح خاک در کنترل میزان تبخیر و تعرق و استرس رطوبت گیاه نقش بارزی را ایفا می کند [۳].

رطوبت سطح خاک هم از لحاظ مکانی و هم زمانی بسیار تغییرپذیر است؛ اگرچه اندازه گیری و پایش زمینی و مستقیم رطوبت سطح خاک دقیق می باشد اما این روش نسبتاً پیچیده، زمان بر و هزینه بر بوده و از طرفی به صورت نقطه ای و گسسته انجام می پذیرد و به اندازه گیری رطوبت سطح خاک در مقیاس وسیع کمک نمی کند [۴، ۵]. از طرف دیگر آگاهی از میزان رطوبت سطح خاک در مقیاس بزرگ با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب برای بهبود و پیش بینی مدل های هیدرولوژیکی و اقلیمی لازم و ضروری است [۶]. پاسخ های طیفی ثبت شده توسط سنجنده های سنجنش از دوری امکان پایش میزان رطوبت سطح خاک لایه نزدیک سطح زمین (۰-۵ سانتیمتر) را در مقیاس وسیعی با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب فراهم می سازد و نسبت به روش های اندازه گیری زمینی بیشتر مقرون به صرفه می باشد [۷]. سنجنش از دور مرئی و حرارتی از طریق تولید ترکیب باندهای طیفی (باندهایی که به تغییرات رطوبت سطح خاک حساسند) در فرم های مختلف (خطی یا غیرخطی) می تواند ارتباط معناداری را با کمیت رطوبت سطح خاک برقرار سازد.

شاخص ها و مدل های توسعه یافته در زمینه ی برآورد رطوبت سطح خاک زمانی از اعتبار کافی برخوردار می باشند که نتایج تعمیم پذیری را در هر زمان و هر اکوسیستمی به همراه داشته باشند. بدیهی است که این انتظار یک هدف ایده آل محسوب می گردد و محدودیت های تکنولوژیکی رسیدن به چنین هدفی را با چالش های زیادی روبرو می سازند. فن آوری سنجنش از دور به عنوان یکی از مجاری تکنولوژیکی مرسوم در مطالعه

زمین، متأثر از عوامل عدم قطعیت ساز متنوعی بوده که عملاً دستیابی به مدل هایی با کارایی بالا را تحت شعاع قرار می دهد. با این حال به واسطه ی هزینه های پایین استفاده از داده های سنجنش از دوری در مقایسه با سایر روش های میدانی، همواره کسب بیشترین اطلاعات از این منابع به عنوان یک رویکرد جذاب و کاربردی از منظر محققین مطرح بوده است.

از دهه ۱۹۷۰ روش های مختلفی برای ارزیابی و برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از باندهای طیف الکترومغناطیسی متشکل از باندهای مرئی تا مایکروویو ارائه شده است [۳، ۵، ۶، ۸-۱۶]. به طور کلی می توان این روش ها را به سه کلاس طبقه بندی کرد: روش سنجنش از دور فعال، سنجنش از دور غیرفعال و روش هیبریدی بر اساس ترکیب داده های سنجنش از دوری فعال و غیر فعال [۱۷، ۱۸]. هر کدام از این روش ها، مزیت ها و معایبی را به همراه دارند. سنجنده های مایکروویو (فعال و غیرفعال) قابلیت برداشت داده در هر شرایط آب و هوایی و شب و روز را دارند؛ روش های مبتنی بر سنجنش از دور فعال برای برآورد رطوبت سطح خاک عمدتاً به رابطه بین رطوبت سطح خاک، مشخصات دی الکتریکی خاک و میزان بازپراکنش^۱ امواج رادار وابسته اند. این روش ها نتایج خوبی را در برآورد رطوبت سطح خاک در شرایط خاک لخت در مقایسه با دیگر روش ها ارائه می دهد. هرچند این روش ها در برآورد رطوبت در سطوح دارای پوشش گیاهی مؤثر نیست و این مسئله عمدتاً به دلیل زبری سطح و بازپراکنش های حجمی در پوشش گیاهی است [۱۹-۲۱]. به طور کلی در شرایط پوشش مشابه، با کاهش رطوبت سطح زمین، ضریب بازپراکنش راداری افزایش می یابد. عمدتاً سه گروه مدل برای استفاده از داده های سنجنش از دور فعال برای برآورد رطوبت سطح خاک وجود دارد: مدل های باز پراکنش، روش های آنالیز آماری و روش های مبتنی بر شبکه عصبی [۲۲]. ضعف اصلی روش های متداول تخمین رطوبت سطح خاک توسط روش های مایکروویو غیرفعال، قدرت تفکیک مکانی پایین آن (حدود ۴۰ کیلومتر) است [۲۳]. روش های سنجنش از دور غیر فعال به طور معمول داده های محدوده های باندی مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز طول موج کوتاه و حرارتی را برای برآورد رطوبت سطح خاک استفاده می کنند. اگرچه

^۱ Backscattering

زیادی پیکسل در یک منطقه با طیف گسترده‌ای از رطوبت سطح خاک و پوشش گیاهی می‌باشد [۸]. ۳- مدل‌های رگرسیونی که در آن از هر ترکیب درست و مناسب باندهای مرئی/حرارتی و شاخص‌های طیفی برای برآورد رطوبت سطح خاک استفاده می‌گردد [۲۶].

محققین مختلفی از ترکیب شاخص‌های گیاهی و رطوبتی مختلف و دمای سطح زمین برای ارزیابی رطوبت سطح خاک استفاده کرده‌اند. به‌طور کلی یک رابطه منفی قوی بین شاخص‌های گیاهی مانند NDVI و دمای سطح وجود دارد [۲۷، ۲۸]. در این رابطه، چندین مطالعه، کارایی شاخص NDVI در برآورد رطوبت سطح خاک گزارش کرده- اند [۲۹، ۳۰]. [۸] نشان داد، ترکیب رگرسیونی چندجمله‌ای درجه دو NDVI-LST با استفاده از داده‌های تصاویر سنجنده AVHRR^{۱۰} دقتی معادل ۲ درصد رطوبت سطح خاک دارد. [۳۱] علاوه بر NDVI و دمای سطح، مقادیر آلبيدو را جهت بهبود دقت برای مقادیر بالای رطوبت اضافه نمود که با استفاده از داده‌های تصاویر AVHRR دقت کسب شده معادل ۵ درصد رطوبت سطح خاک گزارش شده است. با توجه به عدم قطعیت موجود در برآورد آلبيدو به دلیل وابستگی زاویه‌ای (جهتی)، [۳۲] مقادیر گسیلمندی را جایگزین آلبيدو کردند؛ دقت‌های کسب شده با استفاده از تصاویر ASTER^{۱۱} و AHS^{۱۲} به ترتیب ۶ و ۵ درصد رطوبت سطح خاک گزارش شده است. [۲۲] با استفاده از مدل ترکیب خطی پارامتر فاصله پیکسل‌ها در فضای طیفی RED-NIR حاصل از تصاویر سنجنده OLI^{۱۳}، کسر خاک لخت هر پیکسل، دمای حاصل از سنجنده TIRS^{۱۴} ماهواره Landsat 8 و داده‌های زمینی رطوبت سطح خاک SCAN^{۱۵}، دقتی معادل ۴ درصد رطوبت سطح خاک گزارش نمودند؛ هم‌چنین نشان دادند که رطوبت برآورد شده با داده‌های رطوبت سطح خاک اندازه‌گیری شده در عمق ۵ سانتیمتر همبستگی بالایی دارند. با توجه به حساسیت بالای شاخص NDVI به شرایط جوی، به- کارگیری شاخص‌های مرتبط دیگری می‌تواند دقت بهتری را در برآورد رطوبت سطح خاک فراهم کنند. [۳۳] با استفاده از تصاویر MODIS ترکیب خطی شاخص NDVI-LST-

به دلیل پراکنش بالا در برهمکنش با هواویزها^۱ و اثرات جوی و هم‌چنین قدرت نفوذ کم‌تر به خاک، داده‌های اپتیک و حرارتی در مقایسه با داده‌های مایکروویو و راداری دارای ضعف می‌باشند؛ ولی به دلیل قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا در مقایسه با دیگر داده‌ها (راداری و مایکروویو غیرفعال) و همبستگی بالای رطوبت سطح خاک با محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه و دمای سطح، استفاده و توسعه روش‌های مبتنی بر باندهای بازتابی و حرارتی افزایش یافته است [۲۴]. ماهواره‌های سنجنش از دوری چندطیفی پوشش سراسری خوبی را در دهه‌های اخیر فراهم آورده‌اند و شاخص‌های چندطیفی پهن‌بند متعددی در محدوده‌های اپتیک و حرارتی برای برآورد رطوبت سطح خاک توسعه یافته‌اند [۳]. این شاخص‌ها عمدتاً نرمال شده‌اند تا اثر هندسه سنجنده-خورشید، توپوگرافی و شرایط جوی را کاهش دهند.

تاکنون مدل‌های مختلفی به منظور برآورد رطوبت سطح خاک در محدوده طیفی باندهای مرئی و حرارتی ارائه شده است. به‌طور کلی می‌توان این مدل‌ها به صورت زیر دسته‌بندی نمود: ۱- شاخص‌های رطوبت سطح خاک؛ با افزایش رطوبت سطح خاک، بازتابندگی در کل بخش بازتابی (۲/۵-۴/۰ میکرون) کاهش می‌یابد و این کاهش در محدوده باندهای مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR^۲) به‌طور محسوسی روی می‌دهد [۲۵]. بر همین اساس شاخص‌های طیفی عمدتاً در محدوده باندهای مادون قرمز طول موج کوتاه طیف الکترومغناطیسی تعریف شده‌اند. از مهم‌ترین این شاخص‌ها، می‌توان شاخص‌هایی مانند NMDI^۳، NDWI^۴، PDI^۵ و VSDI^۶ را نام برد. ۲- روش مثلی LST/VI^۷: این روش بر اساس فضای ویژگی LST و شاخص‌های گیاهی مانند NDVI^۸ تعریف شده است. بر اساس شکل مثلی/دوزنقه‌ای این فضای ویژگی، شاخص-های گوناگونی مانند TVDI^۹ برای برآورد رطوبت سطح خاک در مقیاس‌های منطقه‌ای ارائه شده است. محدودیت اصلی این روش، شناسایی شکل مثلی/دوزنقه‌ای در توزیع پیکسل‌ها می‌باشد که نیازمند یک سطح هموار و تعداد

^۱ Aerosols

^۲ Shortwave Infra-Red

^۳ Normalized Multi-band Drought Index

^۴ Normalized Difference Water index

^۵ Perpendicular Drought Index

^۶ Visible and Shortwave infrared Drought Index

^۷ Land Surface Temperature / Vegetation Indices

^۸ Normalized Vegetation Difference Index

^۹ Temperature Vegetation Dryness Index

^{۱۰} Advanced Very High Resolution Radiometer

^{۱۱} Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

^{۱۲} Airborne Hyperspectral Scanner

^{۱۳} Operational Land Imager

^{۱۴} Thermal Infra-Red Sensor

^{۱۵} Soil Climate Analysis Network

NDWI و EVI-LST-NDWI^۱ را برای برآورد توسعه دادند و به ترتیب دقتی معادل ۳ و ۲ درصد رطوبت سطح خاک گزارش نمودند؛ به علاوه نشان دادند که اگر چه هر دو مدل دقت خوبی برای برآورد رطوبت سطح خاک دارند ولی استفاده از شاخص‌های NDWI و EVI به دلیل حساسیت کمتر به شرایط جوی، دقت برآورد رطوبت را در مقایسه با NDVI افزایش می‌دهد.

پایش مداوم و زودهنگام رطوبت سطح خاک در بازه‌های زمانی کوتاه و در گستره وسیع‌تر در مدیریت منابع آب و خاک اهمیت زیادی دارد، لذا استفاده از سنجنده‌هایی که دارای قدرت تفکیک زمانی پایین باشند، ضروری است. در این مقاله دستیابی به راهکاری موثر و با تعمیم‌پذیری بیشتر در حوزه برآورد رطوبت سطح خاک از تصاویر ماهواره‌ای MODIS^۲ در دستور کار قرار دارد.

عرض باندی باریک‌تر سنجنده چندطیفی MODIS، محدوده اسکن عریض‌تر، قدرت تفکیک زمانی بهتر (روزانه) و در دسترس و رایگان بودن آن، انگیزه استفاده از داده‌های این سنجنده را برای پایش روزانه رطوبت سطح خاک در شرایط آسمان صاف، افزایش می‌دهد. با توجه به این که روش‌های مبتنی بر استفاده از اطلاعات طیفی در محدوده کوچکی از طیف الکترومغناطیسی نمی‌تواند راه حل مناسبی برای برآورد رطوبت سطح خاک باشد؛ استفاده منفرد هر شاخص محدودیت‌های خاص خود را به همراه خواهد داشت. این محدودیت‌ها می‌تواند شامل میزان تاثیرپذیری از شرایط جوی، شرایط نورپردازی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک باشد. به علاوه شاخص‌ها برای همه انواع خاک‌ها کالیبره نشده‌اند و به عبارت دیگر استفاده از ضرایب کالیبراسیون مشابه برای خاک‌های مختلف، از اعتبار شاخص‌ها و به تبع آن مدل‌های برآورد شده می‌کاهد. لذا با توجه به تحقیقات گذشته به نظر می‌رسد توسعه مدل‌های ترکیب شاخص‌های مختلف که هریک نقاط ضعف و قوت خاص خود را دارند، می‌تواند کارایی بهتری برای برآورد رطوبت سطح خاک داشته باشد.

تحقیقات صورت گرفته تاکنون عمدتاً از محدودیت فضای جستجو به منظور یافتن شاخص‌های بهینه در روند مدلسازی رطوبت سطح خاک رنج برده و این عامل منجر به عدم دستیابی به یک راهکار جامع در این حوزه شده است. در این تحقیق با گسترش دامنه شاخص‌های مورد استفاده در روند برآورد رطوبت سطح خاک تلاش شده تا

شاخص‌های موثر در این روند رده‌بندی گردد. در این مطالعه ابتدا کارایی منفرد شاخص‌های طیفی موجود به منظور برآورد رطوبت سطح خاک با داده‌های سنجنده MODIS ارزیابی شده و در ادامه با استفاده از ترکیب شاخص‌های طیفی رطوبت سطح خاک، که هرکدام از اطلاعات طیفی محدوده‌های باندی متفاوت بهره می‌برد، یک مدل جدید تخمین رطوبت توسعه یافته است.

از آنجایی که در عمده تحقیقات صورت گرفته در حوزه مدلسازی SMC^۳ داده‌های میدانی از وسعت بالا به تبع آن از تنوع در نوع خاک برخوردار نبوده‌اند؛ بررسی وابستگی این مدلسازی به جنس و بافت خاک به عنوان یکی دیگر از اهداف این تحقیق انتخاب شده است. به عبارت جامع‌تر، بدیهی است که جنس و بافت خاک به عنوان یکی از خصوصیات فیزیکی موثر در میزان جذب و اشباع‌شدگی آن در روند مدلسازی این کمیت موثر باشد. با توجه به این که ایستگاه‌های مرجع زمینی داده‌های اقلیمی خاک کشور آمریکا (SCAN) از بافت و جنس خاک متنوعی برخوردارند این فرصت برای این تحقیق مهیا شده که بتوان میزان وابستگی روند مدلسازی با نوع و جنس خاک نیز مورد بررسی قرار گیرد. انگیزه این اقدام بررسی امکان دخالت جنس و نوع خاک در روند مدلسازی رطوبت سطح خاک می‌باشد.

۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۱- داده‌های SCAN

داده‌های زمینی مورد استفاده در این تحقیق، داده‌های شبکه آنالیز اقلیمی خاک (SCAN) وابسته به مرکز آب و اقلیم ملی کشور آمریکا می‌باشد. داده‌های SCAN در بیش از ۲۲۰ ایستگاه هواشناسی در سراسر خاک ایالات متحده برداشت شده است. این ایستگاه‌ها عمدتاً در مناطق کشاورزی استقرار یافته‌اند. با استناد به اطلاعات مندرج در پایگاه اطلاع رسانی (<http://www.wcc.nrcs.usda.gov>) هدف از برداشت این داده‌ها ارزیابی و پایش خشکسالی، مدیریت آب کشاورزی، کالیبراسیون و بررسی مدل‌های رطوبت سطح خاک داده‌های سنجش از دوری گزارش شده است.

در این ایستگاه‌ها پارامترهایی همچون رطوبت و دمای خاک در عمق‌های مختلف، شوری خاک، هدایت الکتریکی خاک، دما و رطوبت نسبی هوا، میزان بارش، میزان تابش

^۱ Enhanced Vegetation Index

^۲ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

^۳ Soil Moisture Content

Google Earth ایستگاه‌هایی که دارای ضوابط زیر بودند به‌عنوان ایستگاه‌های مناسب جهت مدلسازی رطوبت سطح خاک انتخاب شده‌اند:

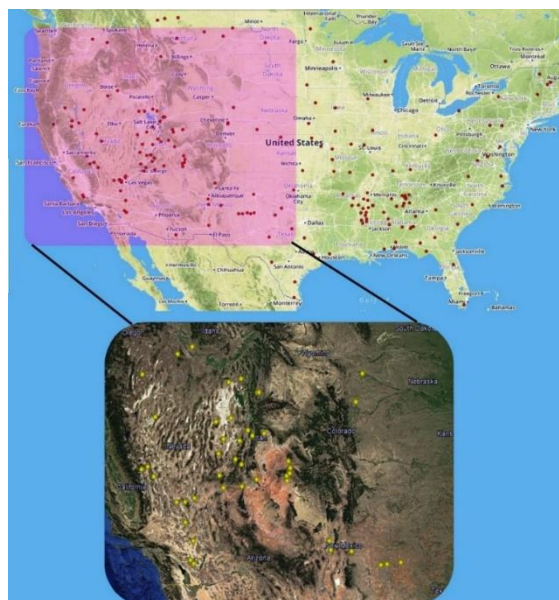
- (۱) عدم وجود بستر آبی و حضور حداقلی سازه‌های مصنوعی در شعاع ۱ کیلومتری اطراف ایستگاه
- (۲) حضور بیش از ۷۵ درصدی از یک نوع جنس خاک (جنس خاک غالب) در شعاع ۱ کیلومتری اطراف هر ایستگاه به-کمک نقشه‌های خاک با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ منتشر شده توسط سازمان کشاورزی ایالات متحده^۱ (USDA)
- (۳) عدم وجود بافت گیاهی متراکم و همواره سبز در شعاع ۱ کیلومتری اطراف ایستگاه‌ها
- (۴) ارزیابی بصری منطقه اطراف هر ایستگاه از نظر عدم وجود سطوح غیرقابل نفوذ و دست‌ساز بشر (آسفالت، سطوح بتنی و ...) به‌کمک Google Earth (کم‌تر از ۱۰ درصد از وسعت یک پیکسل از سنجنده MODIS)
- (۵) عدم وجود توپوگرافی شدید که منجر به تولید سایه با وسعت زیاد در طول روز گردد. ایستگاه‌هایی که در مناطق کوهستانی واقع بودند از روند مدلسازی حذف گردیدند.

با احتساب موارد مطرح شده‌ی فوق، به‌واسطه هم‌وزنی مکانی نسبی اطراف هر ایستگاه انتظار می‌رود که بتوان اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی را به پهنه‌ی مکانی بزرگتری تعمیم داد. بدیهی است که این امر کماکان توأم با عدم قطعیت بوده و نباید انتظار دقیقی معادل سخت‌افزارهای اندازه‌گیری زمینی را برای واقعیت-های زمینی به‌دست آمده در روند مدلسازی داشت.

با توجه به لزوم هم‌زمانی برداشت داده زمینی و اخذ تصویر، سعی شده است از داده‌هایی که زمان برداشت آن‌ها به زمان تصویر نزدیک‌تر است، استفاده گردد. به‌طور کلی اختلاف بین زمان اخذ تصویر و زمان برداشت داده زمینی کمتر از نیم ساعت می‌باشد. در این تحقیق از داده-های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده برای عمق ۵-۰ سانتیمتری برای مدلسازی و ارزیابی دقت رطوبت سطح خاک استفاده شده است.

خورشیدی، سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود. در هر ایستگاه، دستگاه‌های سنجش رطوبت و دمای خاک در عمق‌های ۵ و ۱۰ و ۲۰ و ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتر به‌صورت ساعتی اقدام به اندازه‌گیری می‌نمایند. سنسور استفاده شده برای این منظور، Hydra Probe می‌باشد که میزان رطوبت سطح خاک را به-صورت درصد حجمی (cm^3/cm^3) اندازه‌گیری می‌کند. شکل (۱) موقعیت مکانی کل ایستگاه‌های SCAN کشور آمریکا و ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

تمامی ایستگاه‌های زمینی سایت SCAN شرایط اولیه لازم به‌منظور استفاده در روند تخمین سنجش از دوری رطوبت سطح خاک را برخوردار نبوده که عمده دلیل آن عدم قطعیت بالای آن‌ها از جهت انتساب اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای رطوبت سطح خاک و همچنین یکنواختی بافت خاک در نواحی مجاور ایستگاه‌های زمینی به وسعتی معادل حد تفکیک مکانی سنجنده MODIS می‌باشد. بر این اساس، در این مقاله به‌منظور کاهش عدم قطعیت مربوط به عدم تطابق قدرت تفکیک‌های مکانی داده‌های زمینی و MODIS شرایط و ضوابط خاصی به‌منظور انتخاب ایستگاه‌های دارای اعتبار از سایت SCAN اتخاذ شده که در این روند بیش از ۶۰ درصد از ایستگاه‌های این سایت قادر به کسب شرایط حضور در روند مدلسازی را کسب نکرده و از روند مدلسازی‌های آتی حذف شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت تمامی ایستگاه‌های SCAN در آمریکا. تصویر بزرگنمایی شده موقعیت ۴۷ ایستگاه استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد

در روند به‌کار گرفته، به‌کمک نقشه‌های خاک اطراف هر ایستگاه و همچنین بازدید بصری هر ایستگاه از طریق

^۱ United State Department of Agriculture

جدول ۱- اطلاعات ۴۷ ایستگاه استفاده شده در این تحقیق

نام ایستگاه	محل	(Lat, Lon)	تعداد داده ها	بافت خاک غالب ایستگاه
Orchard Range Site	Idaho, Ada	(43.32, -116)	18	Sandy Loam
Sheldon	Nevada, Washoe	(41.9, -119.44)	9	Loam
Adams Ranch #1	New Mexico, Lincoln	(34.25, -105.42)	10	Loam
Nunn #1	Colorado, Weld	(40.87, -104.73)	11	Sandy Loam
Torrington #1	Wyoming, Goshen	(42.07, -104.13)	8	Sand
Lind #1	Washington, Adams	(47, -118.57)	3	Silty Loam
Levelland	Texas, Hockley	(33.55, -102.37)	5	Sandy Loam
Crossroads	New Mexico, Lea	(33.54, -103.24)	6	Sandy Loam
Willow Wells	New Mexico, Lea	(33.53, -103.63)	5	Loamy Sand
Lovelock NNR	Nevada, Pershing	(40.03, -118.18)	16	Silty Loam
Circleville	Utah, Piute	(38.15, -112.25)	39	Loam
Ephraim	Utah, Sanpete	(39.42, -111.57)	45	Sandy Loam
Holden	Utah, Millard	(39.19, -112.4)	43	Loam
Enterprise	Utah, Iron	(37.63, -113.64)	40	Sandy Loam
Eastland	Utah, San Juan	(37.78, -109.17)	39	Sandy Loam
Price	Utah, Carbon	(39.53, -110.81)	48	Loam
Blue Creek	Utah, Box Elder	(41.94, -112.43)	37	Silty Loam
Nephi	Utah, Juab	(39.65, -111.87)	45	Silty Loam
Alkali Mesa	Utah, San Juan	(37.67, -109.36)	40	Sandy Loam
West Summit	Utah, San Juan	(38.01, -109.13)	38	Loam
Mccracken Mesa	Utah, San Juan	(37.45, -109.34)	41	Sandy Loam
Trough Springs	Nevada, Clark	(36.37, -115.79)	26	Loam
Pine Nut	Nevada, Clark	(36.57, -115.2)	27	Sandy Loam
JordanValleyCwma	Idaho, Owyhee	(42.95, -117.01)	18	Silty Loam
Marble Creek	California, Mono	(37.78, -118.42)	15	Sandy Loam
Chicken Ridge	Utah, Morgan	(41.33, -111.3)	44	Loam
Buffalo Jump	Utah, Morgan	(41.34, -111.19)	45	Loam
Park Valley	Utah, Box Elder	(41.77, -113.26)	35	Loam
Manderfield	Utah, Beaver	(38.37, -112.64)	41	Loam
Spooky	Utah, Kane	(37.51, -111.26)	47	Loamy Sand
Sand Hollow	Utah, Washington	(37.1, -113.36)	38	Loamy Sand
Vermillion	Utah, Kane	(37.19, -112.19)	42	Loamy Sand
Tule Valley	Utah, Millard	(39.24, -113.46)	41	Loam
Hals Canyon	Utah, Millard	(38.59, -113.75)	41	Sandy Loam
Goshute	Utah, Tooele	(39.99, -114)	41	Sandy Loam
Harms Way	Utah, San Juan	(38.31, -109.24)	36	Sandy Loam
Dugway	Utah, Tooele	(40.17, -113.02)	38	Silty Loam
Los Lunas PMC	New Mexico, Valencia	(34.77, -106.76)	14	Loam
Sevilleta	New Mexico, Socorro	(34.36, -106.69)	14	Loamy Sand
Desert Center	California, Riverside	(33.8, -115.31)	19	Sandy Loam
Ford Dry Lake	California, Riverside	(33.65, -115.1)	17	Sand
Essex	California, San Bernardino	(34.67, -115.17)	23	Loamy Sand
Shadow Mtns	California, San Bernardino	(35.47, -115.72)	25	Loamy Sand
Deep Springs	California, Inyo	(37.37, -117.97)	15	Sandy Loam
Death Valley Jct	California, Inyo	(36.33, -116.35)	23	Sandy Loam
Doe Ridge	California, Mono	(37.63, -118.83)	11	Loamy Sand
CPER	Colorado, Weld	(40.82, -104.71)	6	Sandy Loam
Total: 1415				

۲-۲- تصاویر مورد استفاده

وجود ابر در زمان اخذ داده مورد بررسی قرار گرفته است.

عدم وجود ابر در پیکسلی که ایستگاه زمینی واقع شده است، شرط انتخاب آن در روند مدلسازی بوده است.

(۲) با توجه به اخذ محصول بازتابندگی سطح (MYD11

و MODIS (& MOD11، عدم وجود برف از طریق تولید

و آستانه‌گذاری شاخص NDSI پیکسل‌های محتمل

برف از روند مدلسازی و ارزیابی دقت حذف گردیدند.

مقادیر NDSI کوچک‌تر مساوی صفر معرف پیکسل-

های فاقد پوشش برف می‌باشند.

در این تحقیق برای تمامی ایستگاه‌های زمینی مجموعه‌ای از تصاویر اخذ شده توسط سنجنده MODIS در دو سکو TERRA و AQUA و در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ با هدف یافتن تصاویر مناسب جهت انجام مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

معیارهای در نظر گرفته شده در روش انتخاب تصویر مناسب عبارتند از:

(۱) به‌کمک محصول شناسایی ابر سنجنده MODIS

(MOD/MYD35) موقعیت ایستگاه‌های کاندید از حیث

مقادیر بازتابندگی باندهای مختلف تصاویر MODIS برای هر ایستگاه زمینی استخراج شده است.

در گام بعدی با هدف مدلسازی کمیت رطوبت سطح خاک استراتژی مستقیمی به صورت زیر پیشنهاد شده است. ایده اصلی این راهکار حضور تدریجی شاخص‌های طیفی متناسب با اولویت و درجه اهمیت هریک از آن‌ها تبیین شده است. در این رویکرد از مدلسازی خطی شاخص‌های طیفی متناسب با رابطه (۱) به منظور تعیین کمی مقدار رطوبت سطح خاک استفاده است.

$$SMC = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i Par_i \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)؛ a_0 پارامتر بایاس (Bias)، $a_i, i=1,2,...,k$ ضرایب مدل خطی که از طریق فرایند کالیبراسیون برآورد می‌شود، Par_k نیز مبین شاخص‌های طیفی انتخاب شده بر اساس امتیازدهی هر یک از آن‌ها از نقطه نظر وجود ارتباط معنادار با پارامتر رطوبت سطح خاک SMC می‌باشند. به عبارت جامع‌تر، اندیس i در این رابطه مبین ترتیب اهمیت شاخص‌های مدلسازی خطی بوده که در گام قبلی شناسایی شده است.

اساس عملکرد راهکار پیشنهادی افزودن تدریجی شاخص‌های طیفی و پایش عملکرد این روند از نقطه نظر دقت مدلسازی می‌باشد. تعداد و نوع شاخص‌های استفاده شده در روند مدلسازی متناسب با اولویت و تاثیر هر شاخص در بهبود دقت مدلسازی خواهد بود. شرط توقف این روند، پایداری دقت کسب شده در فرایند مدلسازی لحاظ شده است. الگوریتم ۱، شبه کد روند تدریجی افزایش شاخص‌های موثر طیفی را نشان می‌دهد.

(۳) با استفاده از آستانه گذاری شاخص NDVI پیکسل‌های دارای پوشش گیاهی از روند مدلسازی حذف شده‌اند. در این تحقیق مقادیر NDVI بین ۰ تا ۰/۱۵ به عنوان خاک لخت و دارای پوشش گیاهی بسیار کم شناسایی می‌گردند. با در نظر گرفتن شرایط مطرح در انتخاب تصاویر مناسب، تعداد ۵۰ تصویر انتخاب گردید. لازم به ذکر است که در روند مدلسازی از محصولات بازتابندگی سطح (MOD09/MYD09) و دمای سطح (MOD11) سنجنده MODIS استفاده شده است. به منظور تصحیح هندسی و تغییر سیستم مختصات تصاویر از سینوسی به UTM از ابزار MCTK (MODIS Conversion ToolKit) و اطلاعات ذخیره شده در فایل HDF در محیط نرم افزار ENVI استفاده شده است. به واسطه اعمال مدل‌های تصحیح جوی در تولید محصولات سنجنده MODIS از انجام اقدامات مرتبط با تصحیحات اتمسفری صرف نظر شده است.

۳- روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تحلیل همبستگی عملکرد هر شاخص طیفی از نقطه نظر وجود ارتباط معنادار با کمیت رطوبت سطح خاک در قالب شاخص R^2 مورد ارزیابی قرار گرفته است. جدول شماره ۲ شاخص‌های چندطیفی استفاده شده در این تحقیق که تاکنون در حوزه برآورد رطوبت سطح خاک به کار گرفته شده است را نشان می‌دهد. این شاخص‌ها در سه گروه کلی شاخص‌های نرمال شده، شاخص‌های فاصله محور و شاخص‌های زاویه محور طبقه بندی شده‌اند. در محاسبه این شاخص‌ها از

الگوریتم ۱- شبه کد مربوط به افزایش تدریجی شاخص‌های پایه طیفی در روند مدلسازی رطوبت سطح خاک

Input:	Spectral Indices ($PAR=\{Par_1, Par_2, \dots, Par_k\}$) Estimated R^2 of the spectral indices ($R^2=\{R^2_1, R^2_2, \dots, R^2_k\}$)
Output:	Linear Model for Soil Moisture Estimation
$S_PAR = \{Par_j, j=1, 2, \dots, k \mid R^2_j \geq R^2_{j+1}\}$ % Sort the indices based on their R^2 values %	
$\{SMC^0 = a_0 + a_1 \times S_PAR_1\}$ % Set the model estimatesd through the first S_PAR as the 0 th SMC model %	
Precision ⁰ ← Accuracy assessment of the SMC ⁰ %Precisions are estimated via the RMSE%	
i= 0 % Iteration Index %	
BEGIN	
i=i+1;	
$\{SMC^i = a_0 + a_1 \times S_PAR_1 + \dots + a_i \times S_PAR_i\}$ % i th SMC model %	
Precision ⁱ ← Accuracy assessment of the SMC ⁱ	
DO UNTIL (Precision ⁱ / Precision ⁱ⁻¹) ~ 1 % the approximation value was set through a proper threshold %	
Set the SMC ⁱ as the Final Linear Model	

در گام آخر جهت بررسی اثرات بافت خاک بر روی مدل خطی نهایی، داده‌های خاک براساس نوع بافت خاک تفکیک شدند؛ براساس سیستم طبقه‌بندی خاک دپارتمان کشاورزی آمریکا (USDA)، خاک‌ها به ۵ دسته کلی تقسیم می‌گردند: خاک‌های درشت بافت، نسبتاً درشت بافت، خاک‌های متوسط بافت، خاک‌های نسبتاً ریز بافت و خاک‌های ریز بافت [۳۴]. در این تحقیق خاک‌های هر ایستگاه براساس نقشه خاک موجود در سایت نقشه‌برداری خاک آمریکا (<https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov>) تعیین شدند.

بافت خاک غالب تمامی ایستگاه‌های استفاده شده در این تحقیق شامل خاک‌های متوسط بافت، نسبتاً درشت بافت و درشت بافت بودند که به ترتیب تعداد ۱۹، ۱۸ و ۱۰ ایستگاه می‌باشند (جدول شماره ۳). ستون آخر جدول ۳ بافت خاک غالب در هر ایستگاه متناسب با قدرت تفکیک تصاویر MODIS را نشان می‌دهد. مدل خطی به‌دست آمده از مرحله قبلی مجدداً بر اساس هر کدام از مجموعه داده کلاس‌های خاک کالیبره گردید و نهایتاً مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲- شاخص‌های چند طیفی استفاده شده در حوزه برآورد رطوبت سطح خاک

نوع	شاخص	فرمول	مرجع
شاخص‌های نرمال شده	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	[۳۵]
	Enhanced Vegetation Index	$EVI = \frac{2.5 * (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + 6 * \rho_{RED} - 7.5 * \rho_{Blue} + 1}$	[۳۶]
	Enhanced Vegetation Index 2	$EVI2 = \frac{2.5 * (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + 2.4 * \rho_{RED} + 1}$	[۳۷]
	Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}}$	[۳۸]
	Shortwave Infrared Water Stress Index	$SIWSI_{1,2} = \frac{\rho_{SWIR1,2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1,2} + \rho_{NIR}}$	[۳۹]
	Normalized Soil Moisture Index	$NSMI = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{SWIR1}}$	[۴۰]
	Normalized Multi-band Drought Index	$NMDI = \frac{\rho_{NIR} - (\rho_{SWIR2} - \rho_{SWIR1})}{\rho_{NIR} + (\rho_{SWIR2} - \rho_{SWIR1})}$	[۲۱]
	Zhu Index	$\frac{\theta}{\theta_{sat}} = 1 - \sqrt{\frac{\rho - \rho_{sat}}{\rho_{dry} - \rho_{sat}}}$	[۴۱]
	Sadeghi Index	$\frac{\theta}{\theta_{sat}} = \frac{r - r_{dry}}{r_{sat} - r_{dry}}$	[۴۲]
شاخص‌های فاصله مبنا	Perpendicular Drought Index	$PDI = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}(\rho_{RED} + a\rho_{NIR})$	[۴۳]
	Modified Perpendicular Drought Index	$MPDI = \frac{\rho_{RED} + a\rho_{NIR} - f_v(\rho_{v,RED} + a\rho_{v,NIR})}{(1 - f_v)\sqrt{a^2 + 1}}$	[۴۴]
	Soil Moisture Monitoring by Remote Sensing	$SMMRS = 1 - \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}(\rho_{RED} + a\rho_{NIR})$	[۴۵]
	Visible and Shortwave infrared Drought Index	$VSDI = 1 - [(\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}) + (\rho_{RED} - \rho_{Blue})]$	[۴۶]
	Euclidean distance (RED-NIR feature space)	Distance each pixel from origin of scatterplot	[۲۲]
شاخص‌های زاویه مبنا	Angle-based drought index	$ABDI = (\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}) * \tan^{-1}(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{NIR + SWIR1})$	[۴۷]
	Beta-Angle Index	$\beta_{SWIR1} = \cos^{-1}(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2 * a * b})$	[۴۸]
	Shortwave Angle Normalized Index	$SANI = \beta_{SWIR1} * (\frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{NIR}})$	[۴۸]
	Shortwave Angle Slope Index	$SASI = \beta_{SWIR1} * (\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR})$	[۳]
	Soil Moisture Angle Index	$SMAI = \cos^{-1}(\frac{\rho_{dry} * \rho}{ \rho_{dry} * \rho })$	[۲۵]
Note: $SWIR_1 = 1.24\mu m$, $SWIR_2 = 1.64\mu m$, $SWIR_3 = 2.13\mu m$, $r = \frac{(1 - \rho_{SWIR2})^2}{2 * \rho_{SWIR2}}$			

جدول ۳- طبقه‌بندی خاک ایستگاه‌های زمینی براساس سیستم USDA

نوع بافت	شن(%)	سیلت(%)	رس(%)	کلاس بافت	تعداد ایستگاه
درشت بافت	۸۶-۱۰۰	۰-۱۴	۰-۱۰	Sand	۲
	۷۰-۸۶	۰-۳۰	۰-۱۵	Loamy sand	۸
نسبتاً درشت بافت	۵۰-۷۰	۰-۵۰	۰-۲۰	Sandy loam	۱۸
	۲۳-۵۲	۲۸-۵۰	۷-۲۷	Loam	۱۳
متوسط بافت	۲۰-۵۰	۷۴-۸۸	۰-۲۷	Silty loam	۶
	۰-۲۰	۸۸-۱۰۰	۰-۱۲	Silt	بدون داده
نسبتاً ریز بافت	۲۰-۴۵	۱۵-۵۲	۲۷-۴۰	Clay loam	بدون داده
	۴۵-۸۰	۰-۲۸	۲۰-۳۵	Sandy clay loam	بدون داده
	۰-۲۰	۴۰-۷۳	۲۷-۴۰	Silty clay loam	بدون داده
ریز بافت	۴۵-۶۵	۰-۲۰	۳۵-۵۵	Sandy clay	بدون داده
	۰-۲۰	۴۰-۶۰	۴۰-۶۰	Silty clay	بدون داده
	۰-۴۵	۰-۴۰	۴۰-۱۰۰	Clay	بدون داده
مجموع					۴۷

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مدل ارزیابی

در این تحقیق برای ارزیابی دقت مدل‌ها از سه شاخص آماری ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) و $RMSE$ نسبی ($RRMSE^2$) استفاده شده است. مقادیر رطوبت برآورد شده از مدل تخمین رطوبت سطح خاک با داده‌های اندازه‌گیری زمینی مقایسه شده‌اند. مقادیر بالای R^2 و مقادیر کوچک $RMSE$ و $RRMSE$ نشان‌دهنده دقت قابل قبول می‌باشد. مدل تخمین رطوبت به کمک ۷۰ درصد داده‌ها کالیبره شده و ارزیابی دقت آن به کمک ۳۰ درصد باقیمانده از داده‌ها انجام پذیرفته است.

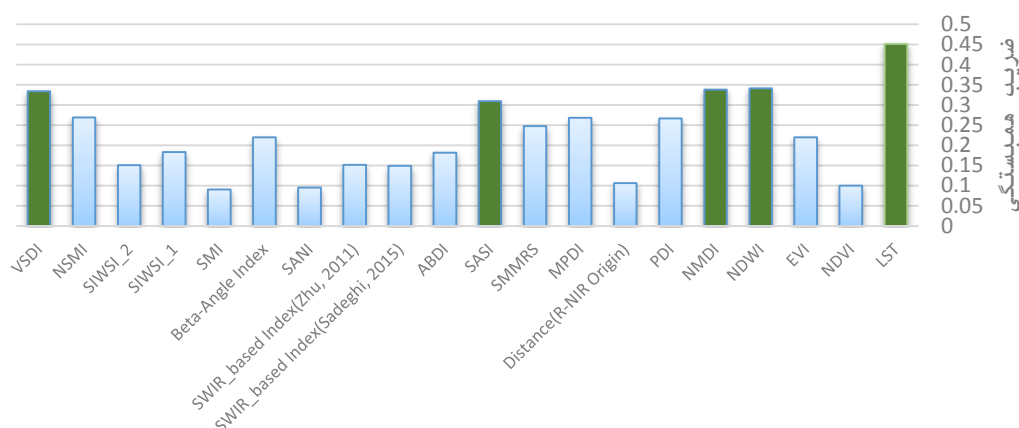
۴-۲- ارزیابی عملکرد منفرد هر یک از شاخص‌های طیفی

در این بخش کارایی منفرد هر یک از شاخص‌های جدول شماره ۲ را از نقطه‌نظر وجود ارتباط معنادار با کمیت رطوبت سطح خاک مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌-

گیرند. شکل ۲ نمودار مقادیر ضرایب همبستگی هر کدام از شاخص‌ها با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری زمینی را نشان می‌دهد. از بین ۲۰ شاخص ارزیابی شده، به ترتیب شاخص‌های LST ، $VSDI$ ، $NDWI$ ، $SASI$ و $NMDI$ در مقایسه با دیگر شاخص‌ها از همبستگی بهتری ($|R| > 0.3$) با داده‌های رطوبت زمینی برخوردار بودند. نتایج بررسی نشان داد که شاخص دمای سطح خاک به دلیل تاثیر آن به فرآیند گرم شدن سطوح زیرین خاک به رطوبت سطح خاک از یک همبستگی معکوس و قوی‌تری نسبت به بقیه شاخص‌ها برخوردار می‌باشد. همچنین با توجه به این‌که در ساختار شاخص‌های $VSDI$ ، $NMDI$ ، $NDWI$ و $SASI$ از باندهای مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) استفاده شده است و به دلیل این‌که این باندها به تغییرات رطوبت سطح خاک حساس هستند، این شاخص‌ها ارتباط معناداری را با رطوبت سطح خاک نشان می‌دهند.

^۱ Root-Mean-Square Error

^۲ Relative Root-Mean-Square Error



شکل ۲- میزان همبستگی هر شاخص با میزان رطوبت اندازه گیری شده زمینی

۴-۳- مدل تخمین رطوبت سطح خاک و ارزیابی اثر بافت خاک بر عملکرد آن

در بررسی هر یک از شاخص‌ها، شاخص‌هایی که همبستگی کمتر از ۰,۳ داشته و ارتباط معناداری را با رطوبت سطح خاک نداشتند از روند مدلسازی حذف شدند. بدیهی است که استفاده توأمان از تمامی شاخص‌های باقیمانده اثراتی همچون تکینگی در برآورد پارامترهای مدل به واسطه وجود ارتباط خطی میان شاخص‌های مورد استفاده را به دنبال داشته باشد. بر این اساس و مطابق با الگوریتم شماره ۱ که در بخش ۳ تشریح شد؛ در یک روند تدریجی، ساختار مدلسازی بهینه برای تخمین رطوبت سطح خاک برآورد شد. این ساختار در رابطه‌ی ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که در بخش متدولوژی بیان گردید؛ در این مرحله شاخص‌ها را براساس ترتیب اولویت (رده‌بندی بر اساس شاخص ضریب همبستگی با کمیت رطوبت سطح خاک) به تدریج به فرایند مدلسازی خطی افزوده گردیدند و این روند تا عدم تغییر محسوس در بهبود دقت مدلسازی ادامه یافته است.

$$SMC = a_0 + a_1 \times LST + a_2 \times VSDI + a_3 \times NDWI + a_4 \times SASI \quad (2)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، شاخص NMDI در مدل نهایی رطوبت مشارکت ندارد؛ این به دلیل ساختار مشابه این شاخص با شاخص NDWI می‌باشد که باعث همبستگی بالای این دو شاخص شده و باعث رخداد تکینگی^۱ در دستگاه معادلات و به تبع آن کاهش دقت

^۱ Singularity

مدلسازی می‌گردد. در مدل خطی نهایی از تمامی پتانسیل محدوده‌های طیفی از باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز طول موج کوتاه و همچنین باندهای حرارتی استفاده شده است و نتایج هم مبین بهبود دقت مدلسازی رطوبت سطح خاک می‌باشد (RMSE=0.048). لذا استفاده از روش‌های مبتنی بر اطلاعات طیفی محدوده کوچکی از طیف الکترومغناطیسی در قالب تک شاخص، نمی‌تواند راه‌حل مناسبی برای برآورد رطوبت سطح خاک باشد؛ استفاده منفرد هر شاخص محدودیت‌های خاص خود را دارد. این محدودیت‌ها می‌تواند شامل میزان تاثیرپذیری از شرایط جوی، شرایط نورپردازی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک باشد. استفاده از ترکیب شاخص‌های طیفی رطوبت سطح خاک، که هر یک از اطلاعات طیفی محدوده‌های باندی متفاوتی بهره می‌برد، می‌تواند کارایی بهتری برای برآورد رطوبت سطح خاک داشته باشد.

از طرف دیگر، با توجه به این که خاک‌ها سطح اشباع-شدگی متفاوتی دارند، بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که مدلسازی آن‌ها هم براساس دسته‌بندی نوع خاک صورت پذیرد. بنابراین مدل خطی رطوبت سطح خاک برای سه مجموعه داده با کلاس‌های بافت خاک متوسط بافت، نسبتاً درشت بافت و درشت بافت مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول شماره (۴) ضرایب مدل را برای کلاس‌های بافت خاک متفاوت نشان می‌دهد. همچنین جدول شماره (۵) و شکل نتایج مدلسازی را با در نظر گرفتن اثر بافت خاک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، دقت مدل برای خاک‌های درشت بافت کاهش می‌یابد. اما بهبود دقت برای خاک‌های متوسط بافت قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۴- ضرایب مدل خطی تخمین رطوبت سطح خاک

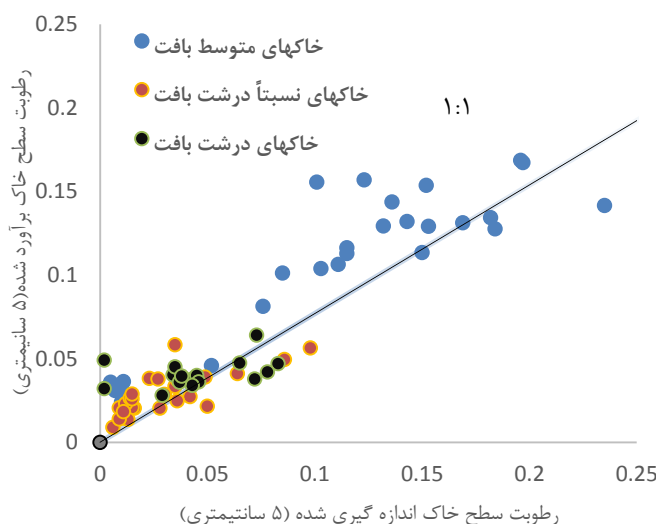
مجموعه داده					ضرایب مدل
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
خاک‌های طبقه‌بندی نشده	۰/۰۳۹	-۰/۰۶۲	۰/۱۷۲	-۰/۲۳۷	-۰/۰۴۶
خاک متوسط بافت	۰/۰۴	-۰/۰۷۱	۰/۱۸۷	-۰/۴۱	-۰/۰۴۹
خاک نسبتاً درشت بافت	۰/۰۱۸	-۰/۰۵۲	۰/۱۱۲	-۰/۳۹	-۰/۰۳۶۲
خاک درشت بافت	۰/۰۰۹	-۰/۰۴۷	-۰/۰۹۴	-۰/۲۸	۰/۰۱۲

حاصل از مدلسازی‌ها هم حاکی از عدم وجود ارتباط معنادار برای برآورد رطوبت در این نوع خاک بوده است. در طرف مقابل خاک‌های متوسط بافت توانایی نگهداری آب بیشتری در بافت‌های خود داشته و به‌علاوه ارتفاع بالآمده‌گی رطوبت بر اثر خاصیت مویینگی در این خاک‌ها نسبت به خاک‌های درشت بافت بیشتر می‌باشد؛ بنابراین تغییرات رطوبتی در این نوع خاک‌ها نسبت به خاک‌های درشت بافت تاثیر بیشتری بر ویژگی‌های طیفی سطح را به‌همراه خواهد داشت. نتایج مدلسازی نیز برای خاک‌های متوسط بافت، نتایج قابل قبولی را از خود نشان داده است. نمودار ارائه شده در شکل ۳ ارتباط میان مقادیر واقعی رطوبت سطح خاک و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل ارائه شده در رابطه ۲ را برای سه دسته خاک استفاده شده در این تحقیق نشان می‌دهد.

جدول ۵- دقت مدل خطی تخمین رطوبت سطح خاک برای کلاس‌های مختلف بافت خاک

مجموعه داده	RRMSE (%)	RMSE
خاک طبقه‌بندی نشده	۷۹	۰/۰۴۸
خاک متوسط بافت	۲۸	۰/۰۳۲
خاک نسبتاً درشت بافت	۵۲	۰/۰۲۷
خاک درشت بافت	۵۷	۰/۰۲۴

خاک‌های درشت بافت به‌واسطه دانه‌بندی درشت‌تر و فضای تخلخل بزرگ‌تری که دارند؛ بخش زیادی از رطوبت سطح خاک را به‌صورت ثقلی به لایه‌های پایینی خاک جریان داده و در نتیجه نمی‌توان انتظار داشت که رطوبت در این نوع خاک در نزدیکی سطح حفظ گردد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که بین ویژگی‌های طیفی سطح در خاک‌های درشت بافت و نسبتاً درشت بافت با میزان رطوبت آن‌ها رابطه معناداری موثری برقرار نگردد. نتایج



شکل ۳- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده زمینی در مقابل رطوبت تخمین زده شده توسط مدل پیشنهادی برای خاک‌های دارای بافت خاک مختلف

گرفته است. در این تحقیق جهت ارزیابی مقایسه‌ای، از ۴ مدل تخمین رطوبت سطح خاک که در تحقیقات گذشته عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده شده است. در جدول ۶ توضیحات مربوط به این ۴ مدل ارائه

۴-۳- مقایسه مدل پیشنهادی با روش‌های پیشین

در این بخش بین نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی و مدل‌های متداول پیشین مقایسه‌ای صورت

شده است. جدول ۷ ارزیابی این مدل‌ها را برای کلاس‌های مختلف خاک ارائه می‌دهد. جدول ۷ نشان می‌دهد، دقت مدلسازی برای خاک‌های متوسط بافت، به‌طور محسوسی افزایش یافته است. همان‌طور که از مقایسه نتایج جداول ۵ و ۷ مشهود است، دقت مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی پیشین بهبود قابل توجه‌ای به‌ویژه برای خاک‌های متوسط بافت را به‌همراه دارد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های توسعه داده شده در محدوده‌های طیفی SWIR (که حساسیت بالایی به رطوبت سطح خاک دارند) به‌جای شاخص‌های گیاهی در فرآیند مدلسازی، می‌تواند دقت برآورد رطوبت

سطح خاک را بهبود بخشد؛ به‌علاوه مدلسازی رطوبت سطح خاک بر اساس جنس آن می‌تواند بخشی از پیچیدگی‌های روند مدلسازی را بکاهد. همان‌طور که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، در مطالعات پیشین میانگین دقت‌های برآورد شده برای روش‌های میکروویو فعال/ غیرفعال و مرئی/ حرارتی بین ۲ تا ۶ درصد گزارش شده است؛ دقت‌های کسب شده برای مدل پیشنهادی برای انواع کلاس‌های خاک بین ۲ تا ۵ درصد می‌باشد که با توجه به قدرت تفکیک زمانی روزانه و در دسترس بودن تصاویر MODIS، این روش می‌تواند در حوزه سنجش از دور اپتیکی و حرارتی قابل قبول باشد.

جدول ۶- مدل‌های رگرسیونی برآورد رطوبت سطح خاک

شماره مدل	مدل	مرجع
۱	$SMC = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ijk} NDVI^{*(i)} LST^{*(j)}$	[۸]
۲	$SMC = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 a_{ij} NDVI^{*(i)} LST^{*(j)} A^{*(k)}$	[۳۱]
۳	$SMC = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 a_{ij} NDVI^{*(i)} LST^{*(j)} \varepsilon^{*(k)}$	[۳۲]
۴	$SMC = aLST + bNDVI + cNDWI + d$	[۳۳]

جدول ۷- ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی برآورد رطوبت سطح خاک برای کلاس‌های مختلف خاک

شماره مدل	خاک طبقه‌بندی نشده	خاک متوسط بافت	خاک نسبتاً درشت بافت	خاک درشت بافت
	RMSE	RRMSE	RMSE	RRMSE
۱	۰/۰۵	۸۱	۰/۰۴۴	۳۸
۲	۰/۰۵۴	۸۴	۰/۰۴۴	۳۸
۳	۰/۰۵	۸۵	۰/۰۴۴	۳۸
۴	۰/۰۶	۹۲	۰/۰۴۴	۳۸

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

استفاده از روش‌های مبتنی بر اطلاعات طیفی محدوده کوچکی از طیف الکترومغناطیسی در قالب شاخص‌های منفرد نمی‌تواند راه‌حل مناسبی برای برآورد رطوبت سطح خاک باشد. استفاده منفرد هر شاخص محدودیت‌های خاص خود را دارد. این محدودیت‌ها می‌تواند شامل میزان تاثیرپذیری از شرایط جوی، شرایط نورپردازی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک باشد. بنابراین، استفاده از ترکیب شاخص‌های طیفی رطوبت سطح خاک، که هرکدام از اطلاعات طیفی محدوده‌های بانندی متفاوت بهره می‌برند، می‌تواند کارایی بهتری برای برآورد رطوبت سطح خاک

داشته باشد. در این تحقیق ابتدا کارایی منفرد (همبستگی) تعداد ۲۰ شاخص استفاده شده در حوزه تخمین رطوبت با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تعداد ۵ شاخص به ترتیب شاخص‌های LST، VSDI، NDWI، SASI و NMDI دارای همبستگی قابل قبولی ($R > 0.3$) با داده‌های رطوبت زمینی دارند. نتایج تاییدکننده وابستگی دمای سطح خاک به تغییرات رطوبت است و به‌علاوه به-کارگیری باندهای حساس به رطوبت SWIR در ساختار دیگر شاخص‌ها موید وجود رابطه معنادار این شاخص‌ها با رطوبت سطح خاک می‌باشد. در گام بعدی تحقیق از ۵

پذیری نتایج مدل‌های برآورد رطوبت به همه انواع خاک- هاست. به عبارت دیگر، تاثیرگذاری دانه‌بندی و بافت در سطح اشباع‌شدگی رطوبت سطح خاک عامل اثرگذار در عملکرد متفاوت انواع خاک در برهمکنش امواج الکترومغناطیس محسوب می‌شود. نتایج این بررسی نشان داد که یک رابطه معکوس بین اندازه ذرات خاک و دقت برآورد رطوبت سطح خاک وجود دارد؛ با افزایش دانه‌بندی خاک، از دقت مدل کاسته شده و در خاک‌های متوسط بافت لومی دقت قابل قبولی قابل استحصال خواهد بود؛ که این امر می‌تواند به واسطه‌ی ظرفیت نگهداری بالای رطوبت و هم‌چنین بالآمدگی زیاد رطوبت لایه‌های زیرین به سطح بر اثر خاصیت مویینگی توسط این دسته از خاک‌ها باشد.

در روش پیشنهاد شده هیچ‌کدام از شاخص‌ها نرمال- سازی نشده‌اند. بدیهی است که عدم توازن در دامنه هر شاخص از طریق تخمین کمترین مربعات ضرایب قابل جبران خواهد بود. اما در زمان وجود اختلاف فاحش در دامنه شاخص‌ها احتمال بروز مشکلات عددی تشدید شده و نرمال‌سازی شاخص‌ها می‌تواند از بروز مشکلات عددی در تخمین پارامترهای مدل جلوگیری کند. به همین دلیل پیشنهاد می‌گردد برای جلوگیری از بروز مشکلات این چنینی، شاخص‌ها نرمال‌سازی شوند.

شاخصی که ارتباط معنادارتری داشتند به ترتیب اولویت و به صورت تدریجی به مدلسازی خطی رطوبت سطح خاک افزوده شدند و عملکرد این روند از نقطه نظر دقت مدلسازی مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل نهایی تخمین رطوبت ترکیب شاخص‌های LST-VSDI-NDWI-SASI می‌باشد که با بهبود دقت همراه بوده است. با توجه به شاخص‌های انتخاب شده در مدل بهینه می‌توان این گونه نتیجه گرفت که استفاده از تمامی پتانسیل محدوده طیف الکترومغناطیسی (باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و طول موج کوتاه و حرارتی) در قالب ترکیب رگرسیونی شاخص‌های طیفی می‌تواند در بهبود دقت برآورد رطوبت سطح خاک موثر باشد.

از طرف دیگر، با توجه به این که خاک‌ها به واسطه این- که سطح اشباع‌شدگی متفاوتی دارند، بنابراین منطقی به- نظر می‌رسد که مدلسازی آن‌ها هم براساس دسته‌بندی نوع بافت خاک صورت پذیرد. بنابراین مدل خطی رطوبت سطح خاک برای سه مجموعه داده با کلاس‌های خاک متوسط بافت، نسبتاً درشت بافت و درشت بافت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل تخمین رطوبت برای خاک‌های متوسط بافت همبستگی نسبتاً خوبی با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده را دارا می‌باشد. مهم‌ترین نتیجه کسب شده در این بررسی عدم تعمیم-

مراجع

- [1] K. L. Brubaker and D. Entekhabi, "Analysis of feedback mechanisms in land-atmosphere interaction," *Water Resources Research*, vol. 32, pp. 1343-1357, 1996.
- [2] S. N. Goward, Y. Xue, and K. P. Czajkowski, "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*, vol. 79, pp. 225-242, 2002.
- [3] S. Khanna, A. Palacios-Orueta, M. L. Whiting, S. L. Ustin, D. Riaño, and J. Litago, "Development of angle indexes for soil moisture estimation, dry matter detection and land-cover discrimination," *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, pp. 154-165, 2007.
- [4] M. S. Moran, D. C. Hymer, J. Qi, and E. E. Sano, "Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semiarid rangeland," *Agricultural and Forest meteorology*, vol. 105, pp. 69-80, 2000.
- [5] P. Rahimzadeh-Bajgiran, A. A. Berg, C. Champagne, and K. Omasa, "Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 83, pp. 94-103, 2013.
- [6] S. Zhao, Y. Yang, G. Qiu, Q. Qin, Y. Yao, Y. Xiong, et al., "Remote detection of bare soil moisture using a surface-temperature-based soil evaporation transfer coefficient," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 12, pp. 351-358, 2010.
- [7] W. Wagner, G. Lemoine, and H. Rott, "A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data," *Remote sensing of environment*, vol. 70, pp. 191-207, 1999.
- [8] T. Carlson, "An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery," *Sensors*, vol. 7, pp. 161. 2007, 1629-2.

- [9] T. N. Carlson, W. J. Capehart, and R. R. Gillies, "A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration," *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, pp. 161-167, 1995.
- [10] R. Jackson, S. Idso, and R. Reginato, "Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data," *Water Resources Research*, vol. 12, pp. 23-26, 1976.
- [11] K. Mallick, B. K. Bhattacharya, and N. Patel, "Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149, pp. 1327-1342, 2009.
- [12] G. Petropoulos, T. Carlson, M. Wooster, and S. Islam, "A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture," *Progress in Physical Geography*, vol. 33, pp. 224-250, 2009.
- [13] I. Sandholt, K. Rasmussen, and J. Andersen, "A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status," *Remote Sensing of Environment*, vol. 79, pp. 213-224, 2002.
- [14] T. Schmugge, "Remote sensing of surface soil moisture," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, pp. 1549-1557, 1978.
- [15] T. Schmugge and T. Jackson, "Mapping surface soil moisture with microwave radiometers," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 54, pp. 213-223, 1994.
- [16] S. Shafian and S. J. Maas, "Improvement of the Trapezoid method using raw Landsat image digital count data for soil moisture estimation in the Texas (USA) High Plains," *Sensors*, vol. 15, pp. 1925-1944, 2015.
- [17] G. P. Petropoulos, G. Ireland, and B. Barrett, "Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 83, pp. 36-56, 2015.
- [18] X. Zhang, B. Chen, H. Zhao, T. Li, and Q. Chen, "Physical-based soil moisture retrieval method over bare agricultural areas by means of multi-sensor SAR data," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 39, pp. 3870-3890, 2018.
- [19] A. Ahmed, Y. Zhang, and S. Nichols, "Review and evaluation of remote sensing methods for soil-moisture estimation," *SPIE reviews*, vol. 2, p. 028001, 2011.
- [20] M. Sahebi, F. Bonn, and Q. Gwyn, "Estimation of the moisture content of bare soil from RADARSAT-1 SAR using simple empirical models," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, pp. 2575-2582, 2003.
- [21] L. Wang and J. J. Qu, "NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing," *Geophysical Research Letters*, vol. 34, 2007.
- [22] M. R. Mobasheri and M. Amani, "Soil moisture content assessment based on Landsat 8 red, near-infrared, and thermal channels," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 10, pp. 026011-026011, 2016.
- [23] O. Merlin, J. P. Walker, A. Chehbouni, and Y. Kerr, "Towards deterministic downscaling of SMOS soil moisture using MODIS derived soil evaporative efficiency," *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, pp. 3935-3946, 2008.
- [24] W. W. Verstraeten, F. Veroustraete, and J. Feyen, "Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation," *Sensors*, vol. 8, pp. 70-117, 2008.
- [25] M. R. Mobasheri and N. O. Gholami Bidkhani, "Development of New Hyperspectral Angle Index for Estimation of Soil Moisture Using in Situ Spectral Measurements," *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, pp. 481-48 2013, 6.
- [26] Gholami Bidkhani, N.O. and M.R. Mobasheri, Influence of soil texture on the estimation of bare soil moisture content using MODIS images. *European Journal of Remote Sensing*, 2018. 51(1): p. 911-920.
- [27] T. N. Carlson, R. R. Gillies, and E. M. Perry, "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*, vol. 9, pp. 161-173, 1994.
- [28] R. R. Gillies and T. N. Carlson, "Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 34, pp. 745-756, 1995.
- [29] A. J. Peters, E. A. Walter-Shea, L. Ji, A. Vina, M. Hayes, and M. D. Svoboda, "Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 68, pp. 71-75, 2002.
- [30] X. Wang, H. Xie, H. Guan, and X. Zhou, "Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions," *Journal of hydrology*, vol. 340, pp. 12-24, 2007.

- [31] N. Chauhan, S. Miller, and P. Ardanuy, "Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, pp. 4599-4622, 2003.
- [32] J. Sobrino, B. Franch, C. Mattar, J. Jiménez-Muñoz, and C. Corbari, "A method to estimate soil moisture from Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) and ASTER data: Application to SEN2FLEX and SEN3EXP campaigns," *Remote sensing of environment*, vol. 117, pp. 415-428, 2012.
- [33] M. Hosseini and M. R. Saradjian, "Multi-index-based soil moisture estimation using MODIS images," *International journal of remote sensing*, vol. 32, pp. 6799-6809, 2011.
- [34] J. W. Rouse Jr, R. Haas, J. Schell, and D. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," 1974.
- [35] A. Huete, H. Liu, K. Batchily, and W. Van Leeuwen, "A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS," *Remote sensing of environment*, vol. 59, pp. 440-451, 1997.
- [36] Z. Jiang, A. R. Huete, K. Didan, and T. Miura, "Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band," *Remote sensing of Environment*, vol. 112, pp. 3833-3845, 2008.
- [37] B.-C. Gao, "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space," *Remote sensing of environment*, vol. 58, pp. 257-266, 1996.
- [38] R. Fensholt and I. Sandholt, "Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near-and shortwave infrared data in a semiarid environment," *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, pp. 111-121, 2003.
- [39] S. N. Haubrock, S. Chabrillat, C. Lemmertz, and H. Kaufmann, "Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, pp. 3-29, 2008.
- [40] Y. Zhu, Y. Wang, M. Shao, and R. Horton, "Estimating soil water content from surface digital image gray level measurements under visible spectrum," *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 91, pp. 69-76, 2011.
- [41] M. Sadeghi, S. B. Jones, and W. D. Philpot, "A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands," *Remote Sensing of Environment*, vol. 164, pp. 66-76, 2015.
- [42] A. Ghulam, Q. Qin, and Z. Zhan, "Perpendicular drought index (PDI): a real time drought monitoring method," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006.
- [43] A. Ghulam, Q. Qin, T. Teyip, and Z.-L. Li, "Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 62, pp. 150-164, 2007.
- [44] Z. Zhan, Q. Qin, A. Ghulan, and D. Wang, "NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring," *Science in China Series D: Earth Sciences*, vol. 50, pp. 283-289, 2007.
- [45] N. Zhang, Y. Hong, Q. Qin, and L. Liu, "VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing," *International journal of remote sensing*, vol. 34, pp. 4585-4609, 2013.
- [46] H. Liu, L. Xu, J. Ding, and X. Deng, "A new angle-based spectral index and its application in drought monitoring," in *Photonics and Optoelectronic (SOPO), 2010 Symposium on*, 2010, pp. 1-4.
- [47] A. Palacios-Orueta, S. Khanna, J. Litago, M. L. Whiting, and S. L. Ustin, "Assessment of NDVI and NDWI spectral indices using MODIS time series analysis and development of a new spectral index based on MODIS shortwave infrared bands," in *Proceedings of the 1st international conference of remote sensing and geoinformation processing*, 2006, pp. 207-209.
- [48] R. R. Weil, N. C. Brady, and R. R. Weil, *The nature and properties of soils*: Pearson, 2016.