



بهبود شاخص‌های روش حرارتی / مرئی به منظور تعیین دقیق و صحیح میزان رطوبت خاک با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجنده MODIS

فرزانه محسنی^۱، مهدی مختارزاده^۲

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده :

رطوبت سطح خاک به عنوان پارامتر مهم بر روی عوامل محیطی بسیاری همچون فرایندهای تعاملی بین سطح زمین و اتمسفر و تغییرات آب و هوایی تاثیر می‌گذارد. اهمیت این پارامتر محیطی در مطالعات هیدرولوژی، کشاورزی، هواشناسی، جنگل داری و پیش بینی بلایای طبیعی بسیار پررنگ است. با وجود اهمیت این موضوع، معمولاً از رطوبت خاک، در مدلسازی فرآیندهای تعاملی استفاده نمی‌شود زیرا عدتاً از مشاهدات میدانی به منظور تعیین این پارامتر استفاده شده است که فرآیندی دشوار و پرهزینه هستند. در سه دهه گذشته محققین بسیاری از داده‌های سنجش از دور برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده کرده‌اند. استفاده از این داده‌ها تا حدود زیادی معایب مشاهدات زمین را کاهش می‌دهد. شاخص تیرگی دما/پوشش گیاهی^۱ (TVDI) یکی از شاخص‌های تعیین رطوبت خاک با استفاده از داده‌های حرارتی و مرئی است. در این تحقیق هدف اصلی بهبود این شاخص با استفاده از تصاویر سری زمانی سنجنده MODIS است. بهمنظور ارزیابی دقت، شاخص پیشنهادی بر روی داده‌های منطقه‌ایی در جنوب کانادا استفاده و نتایج آن با داده‌های زمینی ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های سری زمانی در شاخص پیشنهادی باعث بهبود دقت و صحت میزان رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط آن نسبت به شاخص‌های پیشین شده است. به طوری که از نظر کمی دقت نهایی تعیین میزان رطوبت خاک، با استفاده از این روش تا ۰/۰۹ رسیده که این عدد، زمانی که از تک تصویر و شاخص TVDI تولید شده با استفاده از آن استفاده می‌کنیم، ۰/۰۱۴ است که نشان می‌دهد نتایج شاخص پیشنهادی دقیق‌تر از شاخص TVDI است.

واژه‌های کلیدی : رطوبت موجود در خاک، سنجش از دور، روش مثلثی دما/پوشش گیاهی

۱- مقدمه

رطوبت خاک^۱ (SM)، میزان آبی است که در فضای ما بین ذارت خاک وجود دارد [۱]. در سنجش از دور، آنچه به عنوان رطوبت خاک تشخیص داده می‌شود، میزان آب موجود در خاک تا عمق ۱۰ سانتی متری است که به آن، رطوبت سطحی خاک^۲ گفته می‌شود [۲]. اطلاعات میزان رطوبت خاک و نحوه توزیع آن در فرایندهای آب و هوایی و تغییرات اقلیم، فرایندهای کشاورزی، هیدرولوژیکی، مدیریت کشاورزی و کشت و زرع، مدیریت منابع آبی، نمایش میزان بارندگی، مطالعات آب و هوایی، سیکل کربن- نیتروژن، مطالعه‌ی روند رشد گیاه، تعیین استرس گیاهی، تعیین میزان تبخیر و تعرق، پیش‌بینی خشکسالی، احتمال تبدیل آب باران به روان‌آب در پیش‌بینی سیل، تغییرات اقلیمی آب و هو، تخمین امکان آتش‌سوزی، پیش‌بینی آلودگی و بسیاری از شاخه‌های علمی دیگر، مطالعه و بررسی می‌شود [۳, ۴].

روش‌های تعیین رطوبت خاک را می‌توان به سه دسته‌ی کلی روش‌های میدانی، داده‌های هواشناسی و استفاده از روش‌های سنجش از دوری طبقه‌بندی نمود. اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک دقیق‌ترین راه برای تعیین رطوبت است. اما هزینه‌ی بالا و وقت‌گیر بودن و توزیع مکانی و زمانی نامناسب از جمله معايب این روش هستند [۳]. روش‌های هواشناسی با ندازه‌گیری شاخص‌های رطوبتی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، تخمینی از میزان رطوبت را در اختیار قرار می‌دهند که علاوه بر اندازه‌گیری نقطه‌ای و عدم پیوستگی مکانی و زمانی، شاخص‌های دقیقی نیستند [۴].

از سال ۱۹۷۰، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در ماهواره‌های سنجش از دوری این امکان را فراهم کرد تا برای تعیین میزان رطوبت خاک از مدل‌های سنجش از دوری به عنوان جایگزینی مناسب روش‌های میدانی و هواشناسی استفاده شود و با دقت مکانی، بروز رسانی زمانی و صرفه اقتصادی بیشتری رطوبت خاک را تخمین زنند [۵]. روش‌های سنجش از دور را با توجه به داده‌های مورد استفاده می‌توان به روش‌های مرئی^۶، حرارتی^۷ و مایکروویو فعال^۸ و غیر فعال^۹ طبقه‌بندی کرد [۱].

روش‌های دمای سطح/ شاخص گیاهی^{۱۰} با ترکیبی از شاخص‌های پوشش گیاهی در حوزه مرئی و اندازه‌گیری‌های دمایی در حوزه حرارتی، یکی از روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت محسوب می‌شوند [۶]. شروع استفاده از این روش‌ها به سال ۱۹۹۳ بر می‌گردد. در سال ۱۹۹۳ نمانی^{۱۱} رابطه‌ای بین میزان دمای سطح خاک و شاخص پوشش گیاهی بدست آمده از داده‌ها هواشناسی، پیشنهاد داد [۷]. کارلسون^۹ در سال ۱۹۹۷ به رابطه‌ای معکوس بین میزان خیسی خاک و شیب نمودار پراکندگی دو بعدی بین شاخص تفاوت نرمال شده گیاه^{۱۰} (NDVI) و دمای سطح^{۱۱} (Ts) رسید [۸]. او بیان کرد که خاک‌هایی با میزان رطوبت یکسان در نمودار دما/ شاخص پوشش گیاهی بر روی یک خط قرار می‌گیرند که هرچه شیب این خط بیشتر باشد، خاک خشک‌تر است. با این توجیه تمامی پیکسل‌های یک تصویر در یک نمودار مثلثی همچون شکل (۱) قرار می‌گیرند.

¹ Soil moisture

² Surface soil moisture

³ Optical Techniques

⁴ Thermal methods

⁵ Active Microwave Remote sensing

⁶ Passive Microwave Remote sensing

⁷ Surface Temperature/Vegetation Index

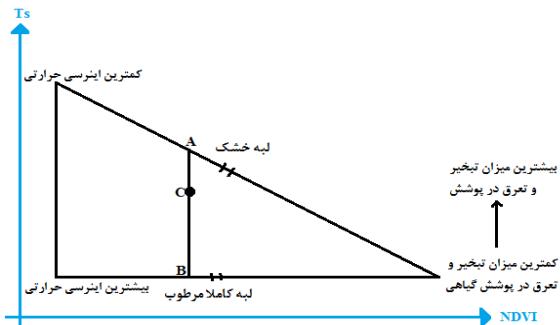
⁸ Nemani

⁹ Carlson

¹⁰ Normalized Difference vegetation index

¹¹ Surface temperature

اگرچه در این رابطه عواملی مثل نوع پوشش گیاهی، توبوگرافی، تابش شبکه و شرایط ابر تاثیر گذار است ولی مطالعات این رابطه‌ی معکوس را در هر شرایطی با کمی تغییر اثبات کرده‌اند [۱۱-۸]. از این نمودار با استفاده از روش‌های مثلثی و ذوزنقه‌ایی، شاخص‌های مختلفی برای تعیین میزان رطوبت بدست می‌آید. یکی از این شاخص‌ها TVDI است که توسط سندھلت^۱ در سال ۱۹۹۹ بیان شده است [۸]. با توجه به شکل (۱) این شاخص توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.



شکل ۱: نمودار پراکندگی و مثلث جهانی شاخص دمایی/پوشش گیاهی [۸]

$$TVDI = \frac{BC}{AB} = \frac{T_S - (a_{min} + b_{min} \times NDVI)}{(a_{max} + b_{max} \times NDVI) - (a_{min} + b_{min} \times NDVI)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه بالا، a_{min} و b_{min} به ترتیب عرض از مبدأ و شیب لبه مرطوب و a_{max} و b_{max} نماینده این پارامترها برای لبه خشک هستند.

آنچه در این روش و شاخص‌های تولید شده توسط آن اهمیت دارد، تعیین دقیق لبه‌ی خشک و مرطوب نمودار دما/پوشش گیاهی است. برای این کار باید منطقه، شامل تمامی انواع پوشش گیاهی و طیف وسیعی از میزان رطوبت باشد [۱۲]. همان‌گونه که در شکل (۴-ب) می‌توان دید، وقتی منطقه کوچک باشد، مثلث کامل شکل نمی‌گیرد. برای حل این مشکل، باید منطقه مورد مطالعه را وسعت داد که این کار باعث افزایش خطای ناشی از تغییر دمای هوا و توبوگرافی می‌شود. در سال ۲۰۱۲، رحیم زاده-باجگیران^۲، با استفاده از اختلاف دمای سطح و دمای هوا شاخص TVDI بهبود یافته را معرفی کرد تا تاثیر توبوگرافی در مناطق وسیع را کاهش دهد [۳]. این روش نیاز به داده‌های هواشناسی دمای هوای منطقه دارد که نیاز به داده‌های میدانی را بیشتر می‌کند.

در سال ۲۰۱۴، ژانگ^۳ با پیش زمینه‌ی تعیین رطوبت خاک با استفاده از شاخص TVDI، این ایده را مطرح کرد که لبه‌های خشک و مرطوب در نمودار به وجود آمده در منطقه، ممکن است لبه‌های واقعی نباشد. در نتیجه برای بهدست آوردن شاخص TVDI، لبه‌های تئوری خشک و مرطوب را محاسبه کرد و با استفاده از آن لبه‌ها، رطوبت را بدست آورد [۴]. برای این کار از یک مدل شبیه سازی استفاده شده است که برای تولید این مدل نیاز به داده‌های همچون دمای هوا، سرعت باد، فشار هوا و برخی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دیگر است.

هدف این مقاله، ارائه روشی برای تعیین دقیق لبه‌های خشک و مرطوب نمودار پراکندگی دما/پوشش گیاهی و همچنین شاخص بدست آمده توسط آنها با استفاده از داده‌های سری زمانی است که بتواند در وسعت منطقه کم نیز بتوان رطوبت خاک را تعیین کرد تا از تاثیرات توبوگرافی و اقلیم و خطای ناشی از آن جلوگیری شود و همچنین بتوان نیاز به داده‌های هواشناسی را به حداقل رساند. در طول یک سال، خاک منطقه تحت تاثیر تغییرات فصل در دوران

¹ Sandholt

² Rahimzadeh_Bajgiran

³ Zhang

متفاوتی از رشد گیاه و تغییرات رطوبت قرار می‌گیرد، در نتیجه، می‌توان انتظار داشت با استفاده از داده‌های سری زمانی، مثل جهانی، دقیق‌تر و لبدهای خشک و مرطوب در آن بهتر تعیین شوند. برای اینکه شاخص دمایی مناسبی در نمودار استفاده شود تا تغییرات تابش خورشید در فصول مختلف سال حذف شود، می‌توان از مفهوم اینرسی حرارتی خاک استفاده کرد.

اینرسی حرارتی خاک، میزان انرژی مورد نیاز برای تغییر دمای سطح است. هرچه رطوبت خاک بیشتر شود، اینرسی حرارتی آن نیز بیشتر می‌شود [۱۲]. می‌توان با استفاده از تغییرات دمایی شب و روز، اینرسی حرارتی خاک را بدست آورد. در نتیجه، تغییرات دمایی شب و روز می‌تواند، شاخصی از میزان رطوبت موجود در خاک باشند [۱۴]. با استفاده از تغییرات دمای شب و روز، به عنوان شاخص دمایی که معرفی از میزان اینرسی حرارتی خاک نیز است، در نمودار دما/شاخص پوشش گیاهی، می‌توان تاثیر تغییر میزان تابش خورشید در فصول مختلف سال نیز حذف خواهد شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در روش پیشنهادی، منطقه نمونه برداری شده در پروژه SMAPVEX12 واقع در موقعیت جغرافیایی $49^{\circ}49'N$ - $50^{\circ}56'S$ شمالی و $97^{\circ}6'E$ - $98^{\circ}56'E$ غربی است [۱۵]. این منطقه به مساحت 1050 کیلومتر مربع در جنوب کشور کانادا قرار دارد که در سال ۲۰۱۲ برای مطالعات امکان تعیین میزان رطوبت با استفاده از تلفیق داده‌های مایکروبیو فعال و غیر فعال به منظور ساخت سنجنده رطوبت خاک فعال غیر فعال (SMAP)، میزان رطوبت و پارامترهای محیطی دیگری در آن اندازه گیری شد. کاربری بخش زیادی از این منطقه، کشاورزی است. علاوه بر آن زمین‌های بسیار مرطوب و جنگلی نیز در آن وجود دارد. این تنوع در پوشش گیاهی و رطوبت این امکان را فراهم می‌کند تا ارزیابی روش پیشنهادی با دقت بیشتری انجام شود [۱۶].

در مطالعات اخیر مناطق جنگلی توسط ماسکی از منطقه حذف شده‌اند. در این مناطق توسط ۵ ایستگاه در فواصل مختلف رطوبت اندازه گیری شده است. در زمین‌های جنگلی دمای سطح اندازه گیری شده توسط سنجنده MODIS متأثر از دمای کانوپی است نه دمای خاک در نتیجه استفاده از مناطق جنگلی و پیکسل‌های مربوط به این مناطق، خطای روش مثبتی را افزایش می‌دهد. ولی وقتی از تغییرات دمای شب و روز استفاده می‌کنیم از آنجایی که تغییرات دمای شب و روز برای زمین‌های مرطوب و زمین‌هایی با پوشش گیاهی جنگلی، ناچیز است، می‌توان انتظار داشت بدون حذف مناطق جنگلی هم به دقت بهینه بررسیم [۱۶]. در شکل (۲)، تصویر طبقه بندی شده منطقه با اندازه پیکسل 20 متر را نشان می‌دهد. نقاط قرمز رنگ، نقاطی است که در آن رطوبت خاک به صورت میدانی از عمق‌های 5 تا 100 سانتی متر در خاک اندازه گیری شده است. نقاطی که به صورت مثلث‌های آبی رنگ نمایش داده شده اند نیز، ایستگاه‌های هواشناسی منطقه هستند.

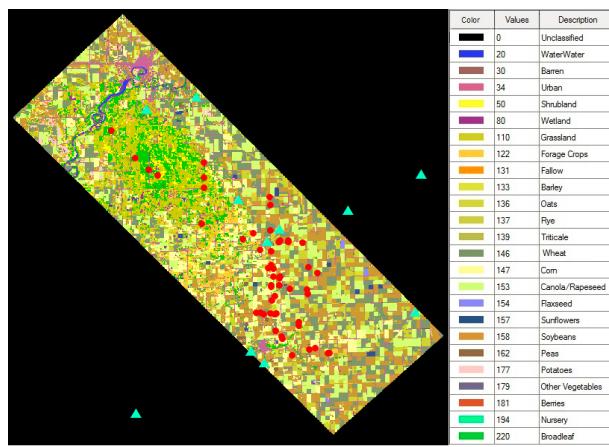
۳- داده‌های مورد استفاده

۳-۱- داده‌های میدانی رطوبت زمینی اندازه گیری شده

برای آموزش دادن الگوریتم و ارزیابی روش پیشنهادی نیاز به داده‌های زمینی میزان رطوبت خاک است. در این پروژه از اطلاعات رطوبت خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه در طول پروژه SMAPVE12 از تاریخ 6 ماه جون تا 7 ماه جولای سال 2012 استفاده کرده‌ایم. در این نمونه برداری از 55 قطعه زمین کشاورزی اطلاعات رطوبت خاک در دو ردیف با فاصله 200 متر و در هر ردیف در 8 نقطه با فاصله 75 را برداشت کردند. از طرفی در 5 فیلد جنگلی، میزان رطوبت خاک و پارامترهای درختان و بیومس را برداشت کردند که از این 5 ایستگاه تنها اطلاعات 4 ایستگاه در

دسترس و قابل استفاده است. برای اطمینان از صحت برداشت اطلاعات رطوبت خاک، در هر نقطه، سه مرتبه و در فواصل یک ساعته در تمامی روزهای بازه زمانی گفته شده رطوبت خاک اندازه گیری شده است [۱۵].

در این مقاله برای ارزیابی روش پیشنهادی از داده‌های برداشت شده در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی متر در ساعت ۱:۳۰ عصر استفاده شده است.



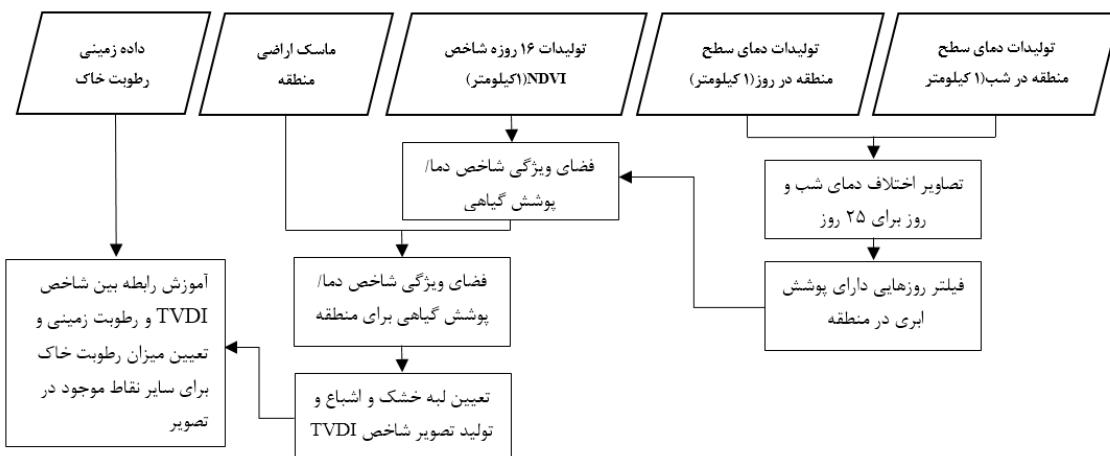
شکل ۲: منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط زمینی نمونه برداری شده

۲-۳- داده‌های سنجش از دور

همانگونه که در مقدمه اشاره شد، برای روش پیشنهادی به داده‌های دمای سطح خاک در شب و روز نیاز است. در نتیجه دمای سطح خاک مورد استفاده، تولیدات یک کیلومتری دمای سطح در شب و روز سنجنده MODIS aqua (MYD11A1) و شاخص پوشش گیاهی تولیدات ۱۶ روزه شاخصهای گیاهی با قدرت تفکیک یک کیلومتر سنجنده MODIS terra (MOD13A2) هستند [۱۲]. این داده‌ها را برای ۲۴ روز بدون احتساب روز مورد نظر برای تعیین رطوبت خاک دانلود شد. باید به این نکته توجه داشت که از میان روزهایی که داده‌های زمینی آن در سال ۲۰۱۲ در دسترس بود روز ۱۹۹۲ ام سال ۲۰۱۲ برای ارزیابی روش استفاده شد. زیرا این روز بدون ابر بوده و به تولیدات شاخص گیاهی پوشش گیاهی MODIS در روز ۱۹۹۳ نزدیکتر است. به همین دلیل جمع آوری داده‌های شاخصهای پوشش گیاهی برای یک سال، از تاریخ ۱۷۷ سال ۲۰۱۱ تا روز ۱۹۹۳ سال ۲۰۱۲ انجام شد.

۴- روش مورد استفاده

مدل مفهومی روش پیشنهادی در شکل (۳) نمایش داده شده است. در روش پیشنهادی داده‌های پوشش گیاهی و دمای شب و روز سطح زمین برای ۲۵ روز در طی یک سال جمع آوری شده است. به این شکل که برای تولیدات ۱۶ روزه شاخص MODIS در طی یک سال تولیدات دمای شب و روز نیز بدست آمد. استفاده از روزهایی که تولیدات شاخص پوشش گیاهی سنجنده در آن روزهاست تنها به دلیل کاهش حجم محاسبات و تولیدات باندهای مختلف است. زیرا در غیر این روزها، باید به جای شاخص پوشش گیاهی منطقه که جزء تولیدات سنجنده است، داده بازتابش را برای ۲۵ روز جمع آوری و با استفاده از آن‌ها، شاخص پوشش گیاهی مناسب محاسبه شود که این کار حجم محاسبات و داده‌های پردازش شده را زیاد می‌کند. در مورد پوشش گیاهی در این مطالعه از شاخص NDVI استفاده شده است که می‌توان آن را با استفاده از تولیدات MOD13A2 به دست آورد.



شکل ۳: مراحل روش پیشنهادی به منظور تخمين میزان رطوبت خاک

پس از جمع آوری داده های دمای شب و روز سطح در منطقه مورد مطالعه و تولید تصاویر اختلاف دمای شب و روز، گام اول حذف روزهایی است که پوشش ابری محدوده تصویر منطقه را پوشانده است. از ۲۵ تصویر استفاده شده در این مطالعه، ۱۵ تصویر، به عنوان تصاویر نویزدار توسط الگوریتم جدا شده اند که پردازش آنها، نه تنها دقیق را افزایش نمی دهد بلکه باعث افزایش زمان اجرای برنامه و کاهش دقیق نیز خواهد شد. در نهایت با استفاده از اختلاف دمای شب و روز برای ۹ روز باقی مانده در روزهای ۱۹۳، ۲۰۹، ۲۴۱، ۲۲۵، ۲۰۹، ۲۸۹، ۱۷۷، ۱۹۲ و ۲۰۱۲ سال در این روزها، نمودار پراکندگی دما/شاخص پوشش گیاهی تشکیل شد.

بعد از تولید مثلث اولیه، با استفاده از حرکت دادن ماسک فیلتر بر روی مثلث ایجاد شده، نقاطی که بصورت نویز توسط الگوریتم تشخیص داده می شوند، شامل نقاطی که اختلاف دمای آنها از یک حد آستانه ایی تجاوز کند و همچنین نقاطی که تراکم در اطراف آن نقاط از حد آستانه تعريف شده کمتر باشد، به عنوان نقاط نویز تشخیص داده و از الگوریتم جدا می شوند.

در مرحله بعد با استفاده از مثلث بدون نویز ایجاد شده و به روش کمترین مربعات و با استفاده از نقاطی با کمترین و بیشترین میزان اختلاف دما در بازه های بسیار کوچک پوشش گیاهی، لبه های خشک و مرطوب تشکیل و رسم می شوند و در نهایت برای پیکسلی با اندازه اختلاف دمای ΔTs و اندازه شاخص پوشش گیاهی NDVI، با استفاده از شبیه و عرض از مبدا این لبه ها، شاخص $TVDI$ با استفاده از فرمول **Error! Reference source not found.** محاسبه می شود.

$$TVDI = \frac{(a_{max} + b_{max} \times NDVI) - \Delta Ts}{(a_{max} + b_{max} \times NDVI) - (a_{min} + b_{min} \times NDVI)} \quad (2)$$

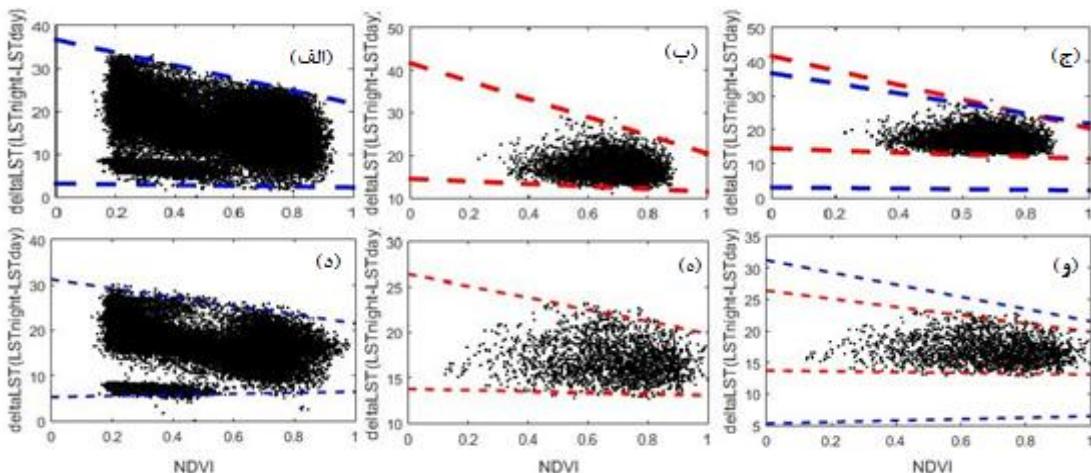
در معادله a_{max} و b_{max} همان پارامترهای تعريف شده در رابطه (۱) هستند با این تفاوت که برای محاسبه این لبه ها از تصاویر سری زمانی استفاده شده است.

بنابراین می توان گفت، تفاوتی که شاخص بدست آمده با شاخص های قبلی دارد، این است که برای تعیین لبه های گرم و سرد که نمایندگانی از لبه هایی با خاک کاملا خشک و کاملا اشباع هستند، از داده های سری زمانی استفاده شده است. از طرفی بجای استفاده از دمای سطح منطقه به عنوان شاخص دما، از اختلاف دمای شب و روز به عنوان نماینده ایی از تغییرات اینرسی حرارتی خاک و همچنین برای حذف اثر تغییرات روزانه و فصلی دمای هوا استفاده شده است.

شاخص بدست آمده معرفی از شب خطي است در محل جاي گيري پيكسل مورد نظر در نمودار مثلثي برآش داده مى شود که شب اين خط رابطه اي خطی با ميزان رطوبت خاک دارد. بنابراین انتظار مى رود رابطه اي خطی بین ميزان رطوبت خاک و شاخص بدست آمده وجود داشته باشد.

۵- بحث و نتائج

همانگونه که در بخش قبل به آن اشاره شد، برای بدست آوردن لبه های خشک و مرطوب در روش پيشنهادي از سري تصاویر يك ساله با فاصله زمانی ۱۶ روزه منطقه استفاده و با استفاده از مثلث جهاني بدست آمده در اين حالت، شاخص TVDI برای روز ۱۹۲ سال ۲۰۱۲ که داده های رطوبت خاک آن در دسترس است، محاسبه شد. در شكل (۴-ب)، نمودار مثلثي و لبه های تعیین شده برای داده های روز ۱۹۲ سال ۲۰۱۲ و تصویر (۴_الف)، نمودار يك ساله تولید شده با استفاده از ۹ تصویر بدون نويز موجود در بين ۲۴ تصویر است که در بازه يك ساله از منطقه بدست آمده است. در اين نمودارها محور افقی، شاخص پوشش گیاهی NDVI و محور عمودی، اختلاف دماي شبانيه روز منطقه است. همانگونه که ديده مى شود، به دليل کوچک بودن منطقه مورد مطالعه برای جلوگيري از تاثير تغييرات ناچيز اقليم، با استفاده از داده های يك روز، چون انواع مختلفی از پوشش گیاهی در منطقه نیست و همین طور خاک تحت تاثير رطوبت های متفاوتی نیست، پيكسل های تصویر تنها بخشی از يك مثلث را تشکيل می دهند. برای تعیین لبه در اين حالت باید بصورت بصری شرط های را اعمال کرد که برای مناطق و شرایط آب و هوایی و پوشش گیاهی مختلف، متفاوت است. اما زمانی که از داده های سري زمانی استفاده مى کنيم، لبه ها کاملا شکل دهی مى شوند طوری که مى توان براحتی و بدون اجرای هیچ شرطی برای انتخاب پيكسل های کاملا خشک و کاملا مرطوب، لبه های خشک و مرطوب را محاسبه کرد. اختلاف لبه های بدست آمده در اين دو حالت را مى توان در تصویر (۴_ج) دید. در اين تصویر لبه قرمز، لبه تعیین شده با استفاده از داده های يك روز و لبه آبی، لبه هایی تولید شده با استفاده از داده های سري زمانی است.



شکل ۴: فضای پراکنده میان شاخص دما/پوشش گیاهی در منطقه smapvex12 در دو محدوده مختلف مطالعاتی.

در مثلث بوجود آمده برای داده های سري زمانی، بخشی از نمودار خالي و بدون داده، ديده مى شوند. اين موضوع، به اين دليل است که برای بازه زمانی ۶ ماهه از روز ۲۸۹ سال ۲۰۱۱ تا روز ۹۷ سال ۲۰۱۲، بدليل وجود نويز در تصاویر استفاده شده برای اين بازدها، داده اي استفاده نشده است. در نتيجه انتظار مى رود بخشی از مثلث ايجاد شده توسط داده های اين روزها، خالي و بدون داده باقی بماند.

روش‌های قبلی برای تعیین میزان رطوبت خاک، نیاز به منطقه‌ایی با حداقل تفاوت‌های رطوبت خاک دارند. در نتیجه با تغییر و کوچک کردن منطقه مورد مطالعه نه تنها دقت روش پایین می‌آید بلکه در برخی از موارد، بدليل محدودیت در تعداد پیکسل‌های فضای پراکندگی، نمی‌توان از روش مثلثی برای تعیین میزان رطوبت خاک استفاده کرد.

برای ارزیابی روش در مناطق کوچک، در واقع برای برآورد محلی میزان رطوبت خاک، بخشی از داده‌های رطوبت خاک منطقه که تقریباً ۰.۲۵٪ از کل منطقه را شامل می‌شوند، استفاده شده است. در این حالت، منطقه کوچک و با استفاده از پیکسل‌های باقی مانده و در دو حالت تصاویر تک روزه و تصاویر سری زمانی، شاخص TVDI اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده از نمودار پراکندگی و لبه‌های بدست آمده برای محدوده کوچکی از منطقه مورد مطالعه را در تصاویر پایین موجود در شکل ۴ مشاهده می‌شود. می‌توان دید، تعیین لبه‌ها در حالت تک تصویر کاری سخت و با استفاده از شرایط انتخاب پیکسل‌های خشک و مرطوب صورت می‌گیرد ولی در حالت استفاده از داده‌های سری زمانی، لبه‌ها، بازهم بصورت کامل قابل تشخیص و جداسازی هستند. در تصاویر (۴)_د لبه‌های بدست آمده در حالت استفاده از داده‌های سری زمانی در حالت کوچک کردن منطقه و شکل (۴)_ه لبه‌ها در این وسعت از منطقه زمانی که از تک تصویر استفاده شده است را نشان می‌دهد و در نهایت تصویر (۴)_۵ و تفاوت میان لبه‌ها در حالت استفاده از تک تصویر و تصاویر سری زمانی برای منطقه کوچک را نشان می‌دهد (لبه‌های قرمز، لبه‌ایی است که با استفاده از داده‌های تک زمانه و لبه‌های آبی، با استفاده از داده‌های سری زمانی تولید شده‌اند.).

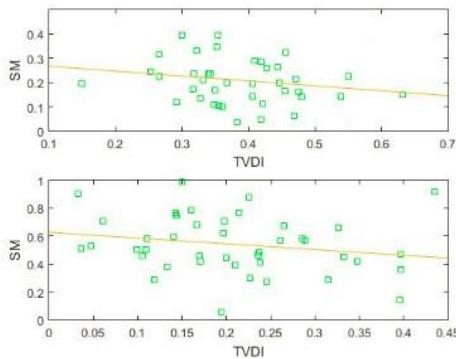
با استفاده از نمودار و لبه‌های تعیین شده، می‌توان شاخص‌های مختلفی از جمله شاخص TVDI را محاسبه و از آن برای تعیین میزان رطوبت خاک استفاده کرد. هر چه تفاوت رطوبت تخمین زده شده با استفاده از این شاخص و رطوبت زمینی اندازه‌گیری شده، کمتر باشد، به این معنی است که شاخص محاسبه شده، معیار مناسبی از میزان رطوبت موجود در خاک است. برای بیان میزان خطأ از معیار خطای جذر میانگین مربع‌ها^۱ (RMSE) بین رطوبت‌های بدست آمده با استفاده از شاخص TVDI و رطوبت اندازه‌گیری شده استفاده شده است. در جدول (۱)، برای هر کدام از محدوده‌های بزرگ و کوچک در منطقه مورد مطالعه، در دو حالت استفاده از داده‌های سری زمانی و استفاده از تک تصویر مربوط به روز اندازه‌گیری، نتایج آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه میان خطوط همبستگی شاخص TVDI و رطوبت زمینی در شرایط مختلف و دقت حاصل از آنها

منطقه مورد مطالعه	تصاویر استفاده شده	شاخص دمای مورد استفاده	رابطه خطی میان شاخص TVDI و رطوبت میدانی	RMSE
تمامی داده‌های منطقه (۱۰۵۰ کیلومتر مربع)	تک زمانه	دماهی هوا در روز	SM=-0.12*TVDI+0.28	۰/۰۱۴۵
		تغییر دمای شباهه روز	SM=-0.16*TVDI+0.32	۰/۰۱۴۹۱
	تصاویر سری زمانی	تغییر دمای شباهه روز	SM=-0.25*TVDI+0.3	۰/۰۰۹۶
۰٪ از محدوده منطقه (۳۰ کیلومتر مربع)	تک زمانه	دماهی هوا در روز	SM=-0.41*TVDI+0.58	۰/۰۳۳
		تغییر دمای شباهه روز	SM=-0.41*TVDI+0.63	۰/۰۵۳
	تصاویر سری زمانی	تغییر دمای شباهه روز	SM=-0.2*TVDI+0.29	۰/۰۰۹۷

همانگونه که در جدول (۱) می‌توان دید، با استفاده از داده‌های سری زمانی، RMSE میان رطوبت خاک‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از مقدار تقریبی ۰/۰۱۴ به ۰/۰۰۹ کاهش یافته است. میزان افزایش همبستگی خطی در روش پیشنهادی را می‌توان در شکل (۵) نیز مشاهده کرد.

^۱ Root means square error



شکل (۵): مقایسه میان رابطه بین شاخص **TVDI** و رطوبت زمینی اندازه گیری شده در حالات استفاده از روش پیشنهادی تصاویر سری زمانی (تصویر بالا) و با استفاده از تک تصویر (تصویر پایین)

این مقدار کاهش خطا در حالت کوچک‌تر کردن منطقه نیز قابل مشاهده است. با کوچک کردن منطقه در حالت تک تصویر، خطای تعیین رطوبت خاک افزایش می‌یابد ولی وقتی از داده‌های سری زمانی استفاده می‌کنیم، خطا در حالت منطقه کوچک و بزرگ با هم تقریباً برابر و بدون تغییر می‌ماند. در این جدول همچنان برای بررسی استفاده از داده‌های سری زمانی و عدم تاثیر منابع خطاهای جانبی بر روی آنها، مقایسه‌ایی از خطا در حالت استفاده از دمای خاک در روز و استفاده از تغییرات دمای شب و روز آورده شده است. همانطور که از اعداد خطاهای مشخص است، در حالت استفاده از داده‌های سری زمانی تصاویر *aqua* و *terra*، تفاوتی در دقیقیت حاصل نمی‌شود در نتیجه می‌توان تغییرات دمای شباهه روز را معیاری مناسب برای استفاده در نمودار پراکندگی، به منظور حذف اثر تغییرات دمای هوای در روزهای مختلف سال دانست.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله، به بررسی امکان بهبود شاخص **TVDI** و لبه‌های مورد نیاز برای محاسبه این شاخص با استفاده از تصاویر سری زمانی مربوط به منطقه در طی یک سال پرداخته شده است. از آنجایی که در طی یک سال، نوع خاک‌های موجود در منطقه، در شرایط رطوبت مختلف و فصول رشد گیاه متفاوتی قرار می‌گیرند، می‌توان گفت با استفاده از تصاویر یک ساله، و استفاده از تمامی تصاویر در یک نمودار پراکندگی دما/پوشش گیاهی، لبه‌های بدست آمده دقیق‌تر و دارای حالات خیلی خشک و خیلی مرطوب خواهند بود.

برای بررسی این موضوع از منطقه مورد مطالعه پروژه SMAPWEX12 شامل داده‌های رطوبت خاک ۵۵ زمین کشاورزی و ۴ داده رطوبت خاک زمین‌های جنگلی بوده است، در روز ۱۹۲ سال ۲۰۱۲ استفاده شده است.

برای تعیین میزان شاخص پوشش گیاهی از تولیدات ۱۶ روزه سنجنده MODIS در مد MOD13A2 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و داده‌های دمای شب و روز تولیدات MYD11A1 با همان قدرت تفکیک استفاده شده است. برای روزهایی که داده‌های پوشش گیاهی آن در دسترس بود، داده‌های دما نیز جمع آوری شد که از میان ۲۴ روز انتخابی، تنها ۹ روز به عنوان روزهای بدون ابر وارد الگوریتم شدند. برای این روزهای، فضای پراکندگی دما/شاخص پوشش گیاهی تشکیل، لبه‌های خشک و مرطوب محاسبه و شاخص **TVDI** بدست آمد.

همانطور که در شکل (۵) می‌توان دید، با وجود افزایش میزان دقت در روش پیشنهاد شده، نمودار به دست آمده بین شاخص **TVDI** و رطوبت خاک منطقه، خطی نیست و همچنان خطای نسبتاً بالایی در برخی از شرایط ایجاد می‌کند. این روش همانند تمامی روش‌های سنجش از دوری متاثر از عواملی همچون پوشش ابر در منطقه، نوع پوشش گیاهی، سرعت باد، میزان نفوذ پذیری امواج در خاک و بسیاری از پارامترهای دیگری است که برای افزایش دقت می‌بایست مدل شوند [۱۷، ۱۸].

از آنجایی که در نمودارهای تولید شده توسط تصاویر سری زمانی، شکل نهایی بدست آمده ذوزنقه ایی است، استفاده از روش ذوزنقه ایی و شاخص های بدست آمده با استفاده از آنها امکان افزایش دقیق و ایجاد یک رابطه خطی را فراهم می کند. این موضوع می تواند در مطالعات بعدی مورد توجه و ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

- [1] L. Wang and J. J. Qu, "Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review," *Frontiers of Earth Science in China*, vol. 3, pp. 237-247, 2009.
- [2] L. Weidong, F. Baret, G. Xingfa, T. Qingxi, Z. Lanfen, and Z. Bing, "Relating soil surface moisture to reflectance," *Remote sensing of environment*, vol. 81, pp. 238-246, 2002.
- [3] P. Rahimzadeh-Bajgiran, K. Omasa, and Y. Shimizu, "Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 68, pp. 1-12, 2012.
- [4] D. Zhang, R. Tang, W. Zhao, B. Tang, H. Wu, K. Shao, et al., "Surface soil water content estimation from thermal remote sensing based on the temporal variation of land surface temperature," *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 3170-3187, 2014.
- [5] D. Zhang, R. Tang, W. Zhao, B. Tang, H. Wu, K. Shao, et al., "Surface Soil Water Content Estimation from Thermal Remote Sensing based on the Temporal Variation of Land Surface Temperature," *Remote Sensing*, vol. 6, p. 3170, 2014.
- [6] J. Bartholic, L. Namkem, and C. Wiegand, "Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress," *Agronomy Journal*, vol. 64, pp. 603-608, 1972.
- [7] R. Nemani, L. Pierce, S. Running, and S. Goward, "Developing satellite-derived estimates of surface moisture status," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 32, pp. 548-557, 1993.
- [8] 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.
- [9] D. Zhang and G. Zhou, "Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing: A Review," *Sensors*, vol. 16, p. 1308, 2016.
- [10] L. Jiang and S. Islam, "Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data," *Water Resources Research*, vol. 37, pp. 329-340, 2001.
- [11] X. Yang, J. Wu, P. Shi, and F. Yan, "Modified triangle method to estimate soil moisture status with MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products," *The International Archives of the Photogrammetry*, vol. 37, pp. 555-560, 2008.
- [12] 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.
- [13] W. W. Verstraeten, F. Veroustraete, C. J. van der Sande, I. Grootaers, and J. Feyen, "Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests," *Remote Sensing of Environment*, vol. 101, pp. 299-314, 2006.
- [14] V. Tramutoli, P. Claps, M. Marella, N. Pergola, and C. Sileo, "Feasibility of hydrological application of thermal inertia from remote sensing," in *2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms*, Siena, Italy, 2000, pp. 16-18.
- [15] H. McNairn, T. J. Jackson, G. Wiseman, S. Belair, A. Berg, P. Bullock, et al., "The Soil Moisture Active Passive Validation Experiment 2012 (SMAPVEX12): Prelaunch calibration and validation of

the SMAP soil moisture algorithms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, pp. 2784-2801, 2015.

- [16] N. Djamai, R. Magagi, K. Goïta, O. Merlin, Y. Kerr, and A. Roy, "A combination of DISPATCH downscaling algorithm with CLASS land surface scheme for soil moisture estimation at fine scale during cloudy days," Remote Sensing of Environment, vol. 184, pp. 1-14, 2016.
- [17] M. S. Moran, C. D. Peters-Lidard, J. M. Watts, and S. McElroy, "Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models," Canadian journal of remote sensing, vol. 30, pp. 805-826, 2004.
- [18] K. P. Czajkowski, S. N. Goward, S. J. Stadler, and A. Walz, "Thermal remote sensing of near surface environmental variables: application over the Oklahoma Mesonet," The Professional Geographer, vol. 52, pp. 345-357, 2000.