



ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه

تلو در استان تهران

مرتضی میری*، علی اکبر نوروزی، عبدالنبی عبده کلاهچی و جهانگیر پرهمت

استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، Morteza.miri64@gmail.com

استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، noroozi.aa@gmail.com

استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، nabi.kolahchi@gmail.com

استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، porhemmat@scwmri.ac.ir

(مقاله پژوهشی)

دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۷ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

اندازه‌گیری مقادیر رطوبت خاک سطحی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه آبی، نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب‌و خاک ایفا می‌کند. هدف پژوهش حاضر ارزیابی دقت شاخص‌های طیفی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در برآورد رطوبت خاک طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۰ در منطقه تلو است. داده‌های این پژوهش شامل: تصاویر روزانه ماهواره سنتینل-۲، مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر و برداشت‌های میدانی با استفاده از دستگاه TDR برای هفت نقطه می‌باشد. شاخص‌های طیفی مورد بررسی شامل: $NDVI^1$ ، $SAVI^2$ ، $NDMI^3$ ، $NDWI^4$ ، $MNDWI^5$ است. بررسی مقادیر رطوبت خاک برداشت‌شده با استفاده از دستگاه TDR در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که متوسط رطوبت خاک منطقه ۰.۱۴ / ۰.۰۷٪ بود. از نظر زمانی، بیشینه مقدار رطوبت خاک ثبت شده در ۱۹ آذرماه ۱۳۹۹ با مقدار ۴۰٪ و کمینه مقدار آن در اوایل تیرماه ۱۴۰۰ با مقدار ۱/۳٪ ثبت گردیده است. محاسبه شاخص‌های طیفی نشان داد که از نظر مکانی، جنوب شرق منطقه مورد مطالعه از مقدار رطوبت و سبزی‌نگی بالاتری برخوردار بود. بررسی روند مقادیر رطوبت خاک و مقادیر شاخص‌های طیفی ثبت شده نشان داد که همانند بسیاری از نقاط کشور، طی فصل گرم به‌تبع از شرایط بارشی و دمایی در این منطقه نیز، از یک طرف به دنبال افزایش دما و تبخیر و از طرف دیگر کاهش بارش، کمترین مقادیر رطوبت خاک، و در فصل سرد سال با شروع دوره بارشی منطقه و کاهش دما، بیشترین مقادیر رطوبت خاک ثبت می‌شود. بررسی ارتباط مقادیر رطوبت خاک ثبت شده با استفاده از دستگاه TDR با شاخص‌های طیفی محاسبه‌شده بر روی تصاویر سنتینل-۲ نشان داد که بین شاخص‌های NDVI و SAVI با مقادیر رطوبت خاک TDR ارتباط بسیار ضعیفی وجود داشت و برای شاخص‌های NDWI با مقدار همبستگی ۰.۲۳/۰، NDMI با مقدار ۰.۳۵/۰ و شاخص MNDWI با مقدار همبستگی ۰.۵۹/۰ به ترتیب بیشترین ارتباط برقرار بود.

کلمات کلیدی: دستگاه TDR، داده‌های ماهواره سنتینل، MNDWI، آب خاک

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول Morteza.miri64@gmail.com



¹ Normalized Difference Vegetation Index

² Soil Adjusted Vegetation Index

³ Normalized Difference Moisture Index

⁴ Normalized Difference Water Index

⁵ Modified Normalized Difference Water Index

مقدمه

رطوبت خاک یک از مهم‌ترین متغیرهای ژئوفیزیکی برای توصیف سطح زمین (لیا و همکاران، ۲۰۱۶) و یک متغیر آب و هواشناسی کلیدی در بسیاری از فرآیندها و مدل‌سازهای هیدرولوژی است (ژائو و هان، ۲۰۱۷؛ دم‌سار، ۲۰۱۵). رطوبت خاک فرآیندهای مختلف هیدرو اقلیم، هیدرو هواشناسی، زیست‌محیطی، بیوژئوشیمیایی را در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی کنترل می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۱۳). از این‌رو اندازه‌گیری دقیق رطوبت خاک و آگاهی از رفتار این پارامتر اهمیت شایانی در مطالعات گوناگون همچون هیدرولوژی، کشاورزی (بغدادی و همکاران، ۲۰۰۷)، اقلیم‌شناسی و هواشناسی (انتخابی و همکاران، ۱۹۹۶؛ پراتولا و همکاران، ۲۰۱۴)، علوم خاک، اکولوژی و زراعت (لانت و همکاران، ۲۰۰۵)، جنگلداری و مهندسی منابع آب (مکونن، ۲۰۰۹)، تبادل جریان انرژی و آب بین سطح زمین و اتمسفر (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹) دارد.

با وجود اهمیت برداشت دقیق این پارامتر و همچنین نیازمندی به داده‌های رطوبت خاک در بسیاری از مطالعات مختلف، ثبت این پارامتر در بسیاری از مناطق به‌ویژه مناطق کمتر توسعه‌یافته، مناطق کوهستانی و بیابانی توسط ایستگاه‌های زمینی با فاصله مکانی زیاد و عدم توزیع یکنواخت انجام می‌شود. مشاهدات میدانی هرچند امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک در اعماق مختلف را فراهم می‌کند، اما پوشش مکانی و زمانی محدودی دارد و در هر شبکه نیاز است که از ابزارها و تکنیک‌های مختلف واسنجی همراه با صرف هزینه‌های زیاد استفاده شود (هاوسر و همکاران، ۱۹۹۸؛ یوان و کویرینگ، ۲۰۱۷). افزون بر دشواری و بعضاً غیرممکن بودن اندازه‌گیری رطوبت خاک به شکل مستقیم، اندازه‌گیری‌های میدانی تنها معرف یک

نقطه و یک زمان می‌باشند که غالباً میانگین اندازه‌گیری‌ها به‌عنوان مشخصه رطوبتی یک ناحیه استفاده می‌شود. این میانگین به‌ندرت اطلاعاتی را که معرف دیگر مشخصه‌های هیدرولوژیکی مانند رواناب باشد را در اختیار می‌گذارند (انگمن و گودنی، ۱۳۸۳). این ویژگی‌ها سبب شده است که استفاده از روش میدانی با چالش‌های بیشتر همراه باشد. از این‌رو طی دهه‌های اخیر پژوهشگران مختلف برای رفع این مشکلات از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های شبکه‌ای برای برآورد رطوبت خاک استفاده می‌کنند. گووارد و همکاران (۲۰۰۲) در فرانسه با کاربرد داده‌های سنجنش از دور نشان دادند که شاخص TVX° ، با استفاده از مدل $SSiB^{\vee}$ قادر به برآورد شرایط رطوبتی خاک می‌باشد. وانگ (۲۰۰۵)، رابطه بین رطوبت مشاهده شده و $NDVI$ حاصل از تصاویر ماهواره مودیس را در منطقه‌ای نیمه‌خشک از کشور آمریکا بررسی کرد و رابطه خوبی بین این دو پارامتر در منطقه توسعه ریشه به دست آورد. ژائو و همکاران (۲۰۱۰) در چین از مقایسه‌ی نتایج میدانی رطوبت خاک با مقادیر برآورد شده و کاربرد تصاویر ماهواره مودیس، به یک مدل لگاریتمی دست یافتند که قادر است در اراضی با پوشش گیاهی ضعیف، رطوبت را با کاربرد شاخص‌های LST^{\wedge} و $NDVI$ تصاویر مودیس، با دقت قابل قبولی برآورد کند. سانچز و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ۴ شاخص $NDVI$ ، $NDMI$ ، LST و BT^{\natural} با کمک ترکیبی از دو سری داده دورسنجی شامل داده‌های مایکروویو $SMOS$ و داده‌های مادون‌قرمز کوتاه و مادون‌قرمز نزدیک از ماهواره مودیس رطوبت سطحی خاک در منطقه‌ای از اسپانیا را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ی این بررسی منجر به ارتباط قابل قبولی بین رطوبت خاک و داده‌های سنجنش از دور شد. آیهو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان رطوبت

$^{\circ}$ the Temperature/Vegetation index

$^{\vee}$ the Simplified Simple Biosphere

$^{\wedge}$ Land Surface Temperature

$^{\natural}$ Brightness Temperature

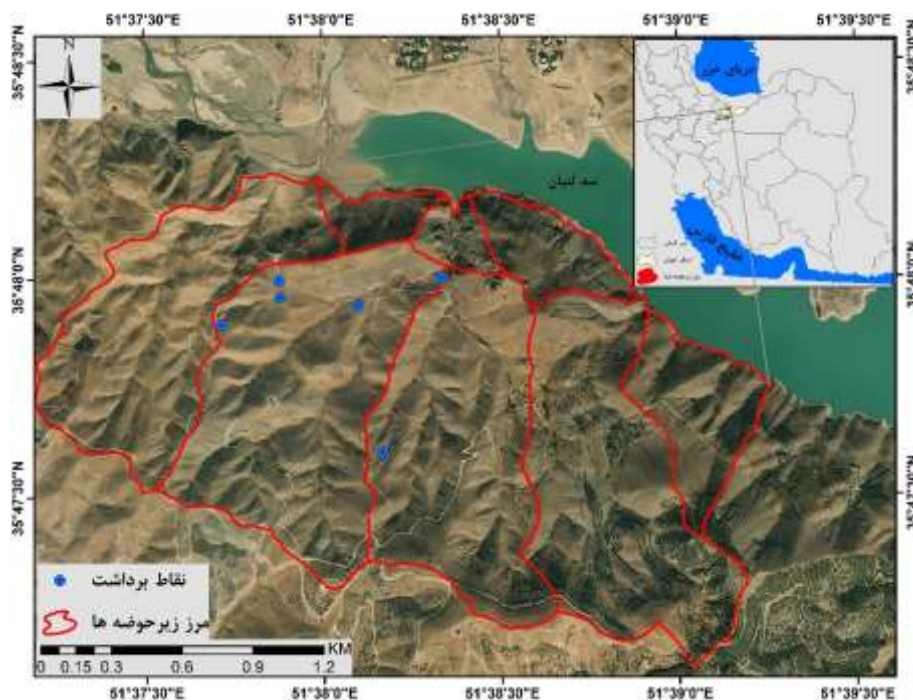
خاک حوضه نیل در محدوده کشور اتیوپی را برآورد کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ترکیبی از داده‌های سنتینل، شاخص NDVI و متغیرهای ارتفاعی قابلیت برآورد رطوبت خاک را با دقت قابل قبول دارند. بابازاده و همکاران (۱۳۹۱) امکان برآورد رطوبت سطحی خاک را با استفاده از ۳ شاخص NDVI، دمای درخشندگی و دمای سطح زمین و تصاویر مودیس در استان خراسان رضوی را مطالعه و نشان دادند که همبستگی معنی‌داری بین NDVI و دمای سطح زمین با رطوبت سطحی خاک وجود دارد. خانمحمدی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس و به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک اقدام به برآورد رطوبت خاک در شهرستان ورامین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های NDVI، NDMI و LST همبستگی معناداری وجود دارد. دادرسی سبزواری و همکاران (۱۳۹۴) مدل‌سازی رطوبت سطحی خاک در حوزه ریوند با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدوری (لندست ۸) را انجام و نتایج آن‌ها نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای، توانایی مناسبی برای برآورد رطوبت سطحی خاک دارند. رنجبر و آخوند زاده هنزائی (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و ۲ و روش‌های شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون، روش رگرسیون بردار و مدل‌های داده محور، رطوبت حجمی سطح خاک ایالت مانیتوبا کانادا را برآورد کردند. نتایج نشان داد که تصاویر سنتینل ۱ از دقت بیشتری در برآورد رطوبت خاک برخوردارند. استفاده از داده‌های رطوبت خاک مدل‌های شبکه‌ای و همچنین دورسنجی با دقت مکانی و زمانی مناسب برای کشوری همانند ایران که با کمبود شبکه ایستگاهی برای برآورد این پارامتر مواجه است و همچنین به دلیل

گسترده‌گی وسعت کشور و وجود مناطق مرتفع و بیابانی زیاد که فاقد ایستگاه ثبت داده‌های هیدرو اقلیم می‌باشند (میری، ۱۳۹۵)، برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. چنانچه بتوان ارتباط مناسبی بین داده‌های رقومی ماهواره و رطوبت خاک برقرار نمود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابلیت این را دارد که، برآورد رطوبت خاک را در سطح گسترده تسهیل، ارزان و سریع نماید. همچنین تعیین وضعیت رطوبتی خاک، اهمیت فراوانی در مطالعات حفاظت خاک دارد (بهمنی و رضائی، ۱۳۹۳) که با تسهیل در محاسبه‌ی رطوبت خاک و استفاده‌ی گسترده‌تر از این پارامتر در مطالعات حوزه‌های آبخیز، نخستین گام در حفاظت منابع آب و خاک در حوزه‌های آبخیز برداشته می‌شود. از این‌رو در این پژوهش سعی بر این شده است که با ترکیبی از مطالعات میدانی، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و تکنیک‌های سنجنش‌ازدوری، دقت تصاویر ماهواره‌ای سنتینل و شاخص‌های طیفی مختلف در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

محدوده مورد مطالعه تلو به مساحت ۳۲۸ هکتار در محدوده $37^{\circ} 8' 31''$ تا $37^{\circ} 51'$ تا $39^{\circ} 17'$ طول شرقی و $47^{\circ} 6'$ تا $35^{\circ} 15' 48''$ عرض شمالی قرار دارد. از نظر سیاسی، محدوده مطالعاتی در استان تهران و در شهرستان‌های تهران و شمیرانات واقع گردیده است. (شکل ۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان تهران و ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی سنسورهای TDR

داده‌ها

۲۰۲۰ الی ژانویه ۲۰۲۲)، تصاویر ماهواره سنتینل ۲ در سطح پردازشی L2A و LC1، تصاویر ذخیره شده در سامانه گوگل ارث و داده‌های فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. جدول ۱ مشخصات جغرافیایی نقاط نصب سنسورهای TDR در سطح حوضه تلو را نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده برای انجام این پژوهش دربرگیرنده داده‌های برداشت شده با استفاده مطالعات میدانی و سنسور TDR در عمق صفر تا ۱۵ سانتی متری سطح زمین طی مهرماه ۱۳۹۹ لغایت دی‌ماه ۱۴۰۰ (سپتامبر

جدول ۱- موقعیت سنسورهای TDR نصب شده در منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
نقطه ۱	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۰۳
نقطه ۲	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۳۲
نقطه ۳	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۱۰
نقطه ۴	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۷۹/۸
نقطه ۵	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۷۹/۸
نقطه ۶	۳۵/۷۹	۵۱/۶۴	۱۷۹۴
نقطه ۷	۳۵/۸۰	۵۱/۶۴	۱۶۸۰

روش کار

برای رسیدن به هدف پژوهش ترکیبی از روش‌های میدانی، آماری و سنجش‌ازدوری استفاده شد. در ابتدا مقادیر رطوبت خاک ثبت شده توسط هفت سنسور رطوبت‌سنج TDR طی دوره مورد بحث دریافت و از نظر کمی و کیفی پردازش شد. طی دوره مورد بحث تعداد ۳۱ برداشت رطوبت خاک برای هر نقطه با استفاده از سنسورهای TDR انجام شد. قابل ذکر است که با توجه به

همچنین در (شکل ۱) پراکنش جغرافیایی این نقاط نشان داده شده است. همان‌طور که روی نقشه مشخص است سعی بر این شد که دستگاه‌ها با پراکنش مناسب جغرافیایی در سطح حوضه نصب شوند. مسیرهای دسترسی، ویژگی‌های فیزیوگرافی و فاصله از هم معیارهای اصلی در انتخاب محل نصب دستگاه‌ها بوده‌اند.

شد. در ادامه شاخص‌های طیفی NDWI، NDVI، SAVI، NDMI، MNDWI (جدول ۲) بر روی تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزاری ENVI 5.3 محاسبه و نقشه‌های مربوط برای هر شاخص طی دوره مورد بحث با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار GIS تهیه شد. قابل ذکر است که در این پژوهش به این دلیل به جای استفاده از مقادیر DN تصاویر، شاخص‌های طیفی محاسبه و استفاده شد که این شاخص‌ها به طور غیرمستقیم با مقادیر آب خاک در ارتباط هستند و در تحلیل و تفسیر نتایج کاربردی‌تر می‌باشند. در نهایت پس از برداشت‌های میدانی و محاسبه شاخص‌های طیفی، با استفاده از آماره‌های آماری R، R²، RMSE ارتباط بین مقادیر شاخص‌های طیفی با مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از سنسورهای زمینی TDR به منظور تعیین بهترین شاخص طیفی از نظر برآورد رطوبت خاک، محاسبه شد.

هدف پژوهش، برداشت‌های زمینی مطابق با زمان گذر ماهواره سنتینل از روی منطقه مورد مطالعه انجام شده است. در ادامه با استفاده از قابلیت‌های تارنمای کوپرنیکوس، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل دو در سطح پردازشی L2A و LC1 طی دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۲۲ (مهرماه ۱۳۹۹ لغایت دی‌ماه ۱۴۰۱) برای تمام روزهای برداشت میدانی از نظر وجود تصویر و همچنین کیفیت آن‌ها بررسی شد. با توجه به اینکه در برخی از روزها منطقه تلو تحت تأثیر ابر قرار داشت و تصاویر ماهواره‌ای قابلیت استفاده نداشت، از این رو سعی بر این شده است که از تصاویر ماهواره‌ای نزدیک به زمان برداشت با کیفیت مناسب استفاده شود. با حذف روزهای ابری در مجموع تعداد ۲۰ تصویر سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای هدف مورد مطالعه از وبسایت (<https://scihub.copernicus.eu/>) دریافت و عملیات پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش در محیط GIS و استفاده از افزونه Sen2cor در محیط SNAP انجام

جدول ۲- لیست شاخص‌های طیفی مورد استفاده

شاخص Indices	فرمول شاخص Formula	رفرنس Reference
NDVI	$NDVI = (NIR - Red) / (Red + NIR)$	(روس و همکاران، ۱۹۷۴)
SAVI	$SAVI = (1 + L) \times (NIR - Red) / (L + NIR + Red)$	(هیت، ۱۹۸۸)
NDWI	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	(گانو، ۱۹۹۶)
MNDWI	$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$	(سو، ۲۰۰۶)
NDMI	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	(گانو، ۱۹۹۶)

نتایج

برداشت رطوبت خاک با دستگاه TDR

در (جدول ۳) مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از TDR در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری از سطح زمین منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. در این جدول سلول‌های خالی بیانگر عدم شرایط مناسب آب و هوایی و سطح زمین برای برداشت رطوبت خاک در کل منطقه مورد مطالعه یا برخی از قسمت‌های آن می‌باشد. در مجموع هفت نقطه، متوسط رطوبت خاک سالانه منطقه مورد مطالعه

با استفاده از برداشت‌های میدانی برابر ۱۴/۰۷ درصد است. از نظر مکانی نقطه شماره چهار در غرب منطقه مورد مطالعه با متوسط ۱۸/۸۶ درصد طی دوره مورد مطالعه از بیشترین مقدار متوسط رطوبت خاک برخوردار بود. از نظر زمانی طی دوره یک‌ساله برداشت، هم‌زمان با فصل مرطوب منطقه مورد مطالعه مقادیر رطوبت خاک با افزایش و طی دوره گرم سال هم‌زمان با افزایش ساعات آفتابی و افزایش میزان تبخیر از سطح زمین مقدار رطوبت سطحی خاک منطقه تلو کاهش پیدا کرده است. همچنین بررسی مقادیر داده‌های

در نقطه شماره ۴ با بالاترین مقدار رطوبت خاک نشان داد که اختلاف رطوبت سطح خاک منطقه طی دوره‌های مرطوب و خشک به ۳۵ درصد می‌رسد. این شرایط بیانگر وابسته بودن مقدار رطوبت خاک منطقه به شرایط اتمسفری و همچنین جریان‌های سطحی ناشی از ذوب برف در اوایل فصل گذر اقلیمی است.

برداشت‌شده نشان داد که بیشترین مقدار رطوبت خاک ثبت‌شده در منطقه مورد مطالعه با استفاده از TDR برای نقطه شماره ۴ در تاریخ ۲۰۲۰/۱۲/۰۹ با مقدار ۴۰ درصد و در مقابل کمترین مقدار رطوبت خاک برای نقطه شماره یک در مرکز منطقه با مقدار ۱/۳ درصد در تاریخ ۲۰۲۱/۰۷/۰۶ ثبت شده است. مقایسه مقادیر رطوبت خاک برداشت‌شده

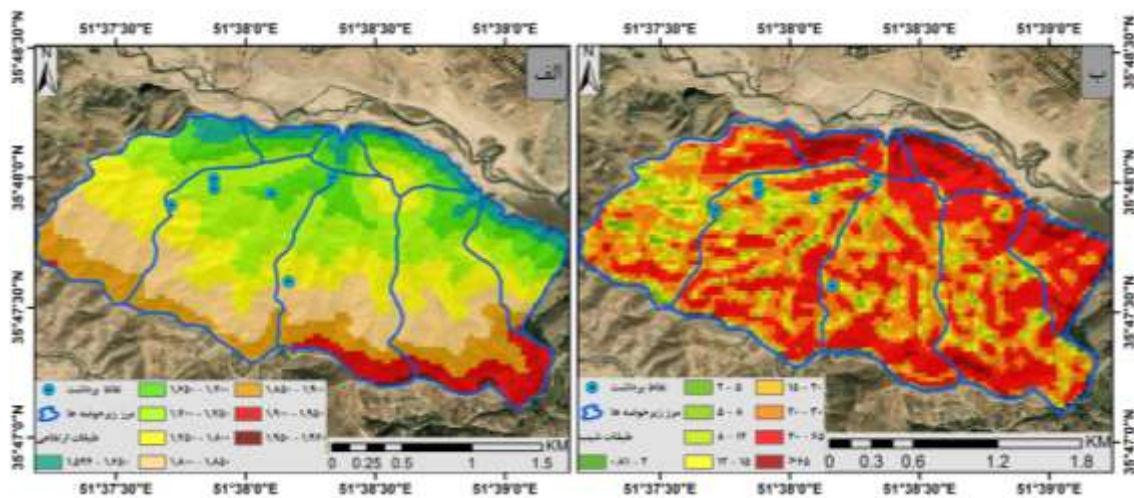
جدول ۳- مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از دستگاه TDR طی دوره یک‌ساله

تاریخ	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	نقطه ۴	نقطه ۵	نقطه ۶	نقطه ۷	متوسط
۲۰۲۰-۱۱-۰۲	۸/۶	۹	۹/۳	۱۴	۱۴			۱۰/۹۸
۲۰۲۰-۱۱-۰۹	۹/۵	۱۰	۷	۱۵/۲	۱۲	۱۴/۴		۱۱/۳۵
۲۰۲۰-۱۱-۱۱	۱۲/۵	۱۲/۲	۱۳/۶	۲۲/۵	۱۲/۸	۲۰		۱۵/۶۰
۲۰۲۰-۱۱-۱۵	۳۶	۲۹/۸	۲۹	۳۷/۲	۲۸/۹	۲۹/۴	۳۲/۵	۳۱/۸۳
۲۰۲۰-۱۱-۲۵	۳۲/۳	۳۳	۳۳/۷	۳۷/۵	۳۴	۳۳/۵	۳۴/۲	۳۴/۰۳
۲۰۲۰-۱۲-۰۹	۳۶		۳۶	۴۰	۳۶	۳۵	۳۸	۳۶/۸۳
۲۰۲۰-۱۲-۱۵	۲۱/۴	۲۰	۱۰	۱۵/۸	۱۶/۲		۲۳/۳	۱۷/۷۸
۲۰۲۰-۱۲-۲۱	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵/۰۰
۲۰۲۱-۰۱-۱۳				۵	۲/۵	۲/۵		۳/۳۳
۲۰۲۱-۰۲-۰۳		۱۲/۴		۶	۱۲/۵			۱۰/۳۰
۲۰۲۱-۰۲-۲۱	۱۲	۸	۱۱	۱۲/۶	۴/۲	۲۱/۵		۱۱/۵۵
۲۰۲۱-۰۲-۲۷	۱۳	۱۰	۶	۲۰/۳	۵/۳	۱۶		۱۱/۷۷
۲۰۲۱-۰۵-۰۸		۲۶/۵	۲۸	۳۱	۲۶			۲۷/۸۸
۲۰۲۱-۰۶-۰۱			۱۰/۶۳	۱۱/۵۳	۱۰/۳	۱۶/۰۳		۱۲/۱۲
۲۰۲۱-۰۶-۱۵	۹/۲	۸/۷	۸/۲	۱۲/۳	۹			۹/۴۸
۲۰۲۱-۰۶-۲۶		۶/۵۳	۹/۴	۱۱/۵	۱۰/۴		۱۱	۹/۷۷
۲۰۲۱-۰۷-۰۶	۱/۳	۳/۵	۴	۲	۲		۷/۵	۳/۳۸
۲۰۲۱-۰۷-۱۴	۷	۶/۸	۷	۳۲/۷	۷/۵۳		۷/۵	۱۱/۴۲
۲۰۲۱-۰۷-۲۸	۶/۱	۵	۶/۶	۱۳/۱	۶/۷		۸/۱	۷/۶۰
۲۰۲۱-۰۸-۰۴	۶/۳	۷/۹	۵/۸	۱۲/۵	۶/۵	۸	۹/۱	۸/۰۱
۲۰۲۱-۰۸-۱۰	۷/۵	۶	۷	۳۶	۷/۵	۷/۴	۸/۷	۱۱/۴۴
۲۰۲۱-۰۸-۱۵	۷/۲	۶	۷	۱۹/۶	۵	۹/۲	۸/۶	۸/۹۴
۲۰۲۱-۰۸-۲۵	۷/۱	۶/۲	۶/۸	۱۲	۷	۷	۸	۷/۷۳
۲۰۲۱-۰۹-۰۷	۴/۲	۶/۶	۶/۹	۲۶/۵	۶/۵	۴/۲	۴/۲	۸/۴۴
۲۰۲۱-۰۹-۲۰	۷	۷	۷	۱۵	۶/۱	۷	۷	۸/۰۱
۲۰۲۱-۰۹-۲۸	۶/۸	۷/۱	۶/۱	۱۱/۱	۷/۶	۶/۵	۱۰/۲	۷/۹۱
۲۰۲۱-۱۰-۱۳	۷	۷	۶	۱۱/۴	۶/۴	۷/۸	۹/۳	۷/۹۸
۲۰۲۱-۱۰-۳۰	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷/۰۰
۲۰۲۱-۱۱-۰۹	۱۸	۱۸		۳۰	۱۸	۲۲/۵	۲۱	۲۱/۹۰
۲۰۲۱-۱۱-۱۴	۱۰	۱۰	۱۵	۲۰	۱۹		۲۰	۱۶/۸۰
۲۰۲۱-۱۱-۲۴	۱۲	۱۲	۱۴	۲۰/۱	۱۵/۵	۱۹	۲۲	۱۷/۱۰
۲۰۲۱-۱۲-۳۰	۲۰	۲۱/۸	۲۲	۲۷	۱۵/۵	۲۷	۲۱	۲۲/۰۴
متوسط	۱۳/۰۰	۱۱/۶۹	۱۲/۲۴	۱۸/۸۶	۱۲/۲۸	۱۵/۲۷	۱۵/۱۵	۱۴/۰۷

ارتفاع و شیب

منطقه مورد مطالعه از شیب بیش از ۳۰ درصد برخوردار است. بر اساس نقشه تهیه شده قسمت‌های شمالی و جنوبی منطقه از بیشینه شیب برخوردار است. بررسی مقادیر شیب و ارتفاع نقاط برداشت نشان داد که نقطه شماره شش با ارتفاع ۱۷۹۴ متر و میزان شیب ۲۰ درصد، بیشینه مقدار ارتفاع و شیب و نقطه شماره ۱ با ارتفاع ۱۷۰۳ متر و نقطه شماره دو با شیب ۱/۸۱ درصد کمینه مقدار ارتفاع و شیب را دارند. نقطه شماره چهار که از بیشینه متوسط رطوبت سطحی خاک برخوردار است دارای ارتفاع ۱۷۷۹ متر و شیب ۱۲/۰۹ درصد است.

با توجه به اهمیت مقادیر شیب و ارتفاع در میزان رطوبت سطحی خاک، نقشه طبقات ارتفاعی و شیب منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر تهیه گردید (شکل ۲). محدوده مورد مطالعه دارای متوسط ارتفاعی ۱۷۷۴ متر، کمینه ۱۵۹۴ و حداکثر ۱۹۷۰ متر است. از نظر مکانی قسمت‌های شمالی منطقه و نزدیک به سد لتیان از کمینه ارتفاع و قسمت‌های جنوبی از بیشینه ارتفاع برخوردار است. از نظر مقادیر شیب سطح قابل توجهی از



شکل ۲- الف: طبقات ارتفاعی؛ ب: طبقات شیب

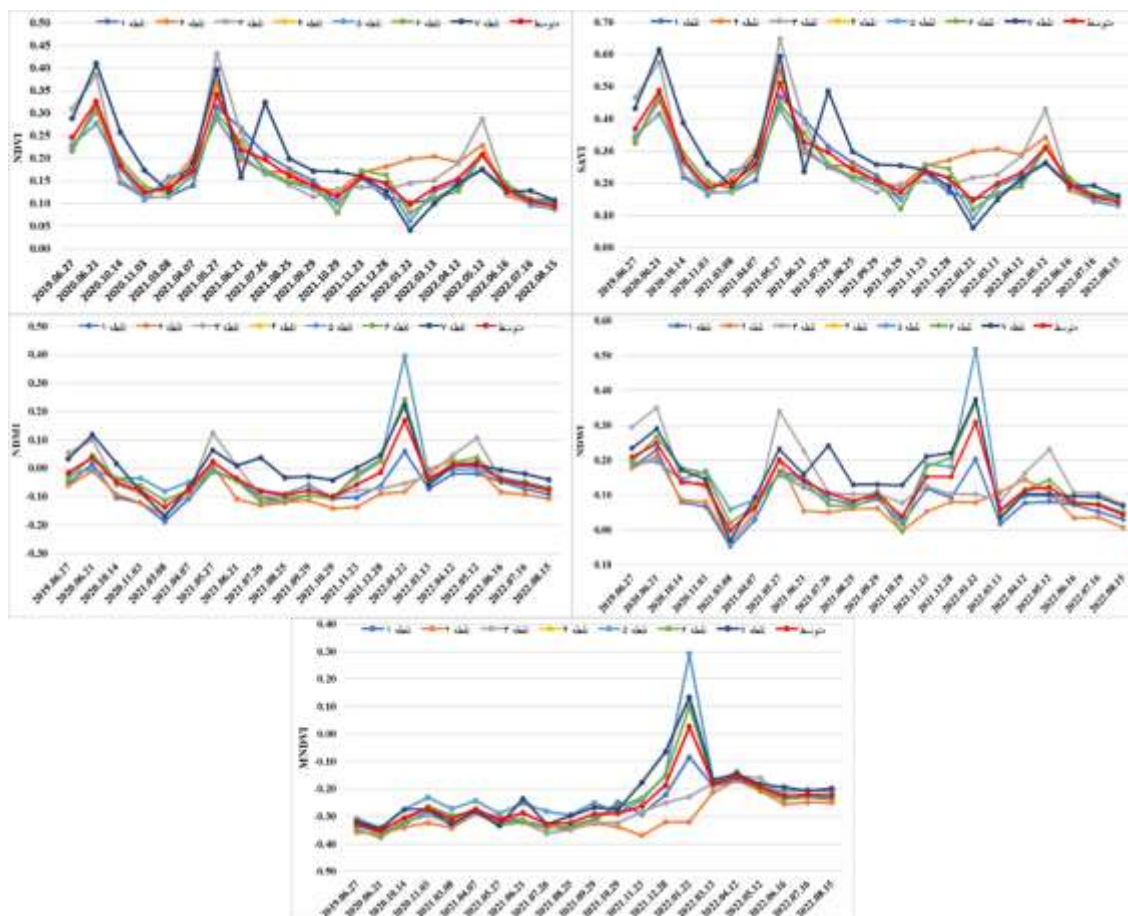
این شاخص نیز همانند شاخص NDVI در مناطق جنوب شرقی و مرکزی منطقه مورد مطالعه به بیشینه مقدار و در شرق و شمال منطقه به حداقل مقدار خود می‌رسد. بررسی مقادیر شاخص تفاضلی نرمال شده رطوبت (NDMI) در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که همانند دو شاخص گیاهی دیگر نواحی شرقی و شمالی منطقه تلو از کمترین رطوبت و نواحی مرکزی و جنوب شرقی از بیشترین مقدار رطوبت برخوردارند. بر اساس محاسبه این شاخص طی دوره مورد بررسی مقادیر NDMI در قسمت جنوب شرق منطقه قابل توجه است. از نظر زمانی بیشینه مقدار این شاخص برای بهمن ماه ۱۴۰۰ با مقدار ۰/۷۳ به دست آمد. نقشه شاخص NDWI نشان داد که همانند شاخص‌های قبلی، از نظر مکانی منطقه جنوب شرق تلو از بیشترین مقدار آب گیاه و شرق و برخی از نواحی شمالی به‌ویژه شمال شرقی از کمینه مقدار این شاخص برخوردارند. از نظر

شاخص‌های طیفی

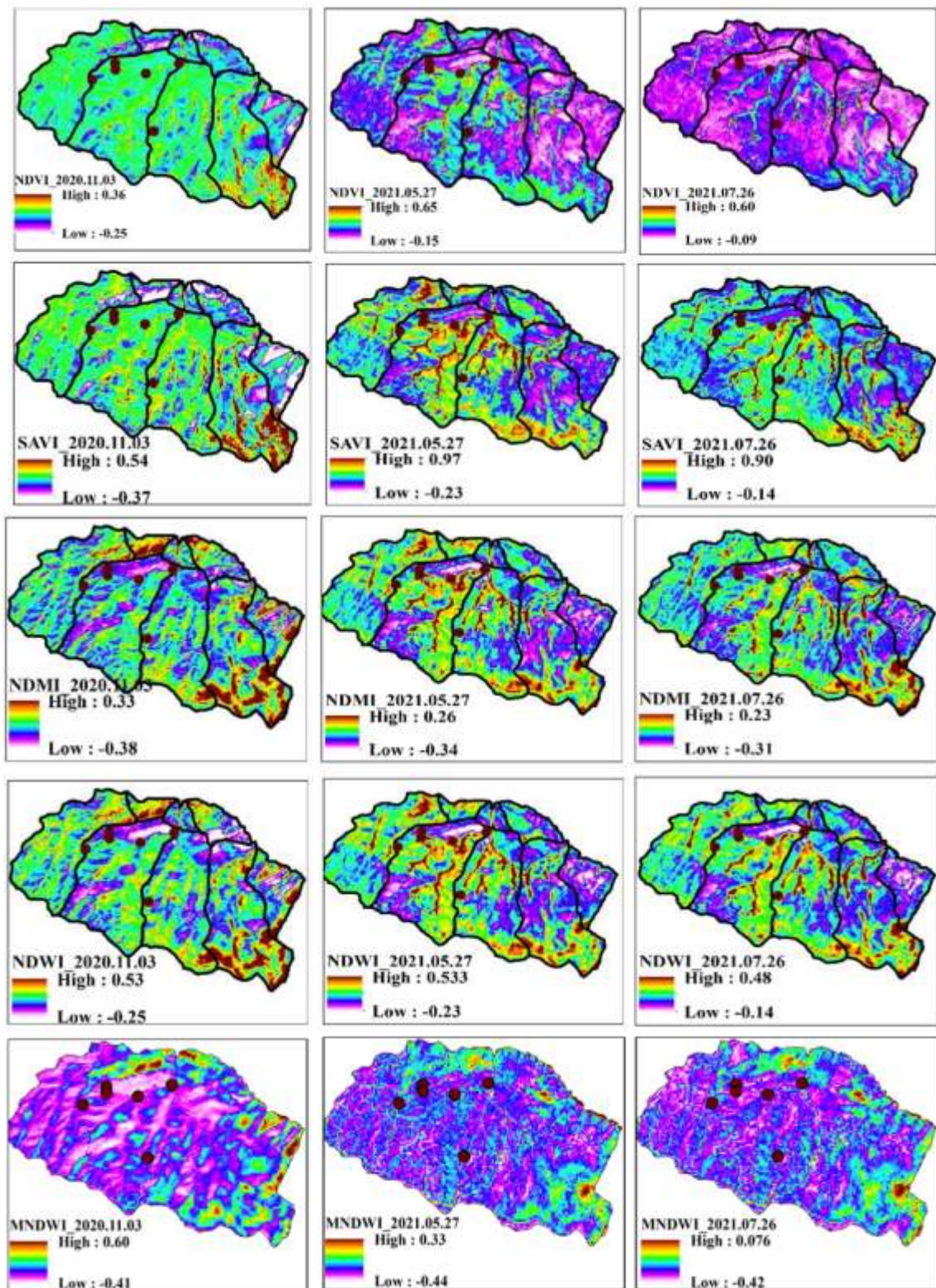
مقادیر شاخص‌های طیفی برای چند تاریخ منتخب طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۰ در (شکل ۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از محاسبه شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی از مقادیر سبزیگی و شادابی بیشتری برخوردارند. از نظر زمانی بیشینه مقدار سبزیگی منطقه برای اواخر اردیبهشت و اوایل خردادماه ثبت شده است. در فصل زمستان منطقه به دنبال برودت هوا و کاهش شدید دما و از بین رفتن پوشش گیاهی کمینه مقدار سبزیگی ثبت می‌شود. یکی از نکات قابل توجه کاهش مقدار سبزیگی پوشش منطقه در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۲۰ می‌باشد. به عبارتی دیگر روند سبزیگی و شادابی پوشش منطقه مورد مطالعه کاهش یافته است. تهیه و بررسی نقشه SAVI منطقه نشان داد که مقدار

تفاوت داشته است. از نظر زمانی بیشینه مقادیر این شاخص در اواخر سال ۲۰۲۱ و شروع سال ۲۰۲۲ و کمینه مقدار آن در ۲۰۲۰ و در فصل تابستان ثبت شده است (شکل ۳). کاهش مقادیر این شاخص در فصل تابستان به دنبال کاهش توده گیاهی سطح زمین و همچنین افزایش دما و تبخیر و از طرفی دیگر کاهش بارش است.

زمانی کمینه مقدار این شاخص برای سال ۲۰۲۱ و بیشینه مقدار آن برای سال ۲۰۲۲ به دست آمد. بررسی مقادیر شاخص بهبودیافته MNDWI نشان داد که در سطح منطقه مورد مطالعه طی زمان‌های مختلف نوسان مقادیر آب پوشش گیاهی منطقه با نوسان قابل توجهی همراه است. به طوری که طی دوره مورد مطالعه مقادیر حداکثر بین ۰/۱۰ تا ۰/۷۸



شکل ۳- روند مقادیر شاخص‌های طیفی طی دوره ۲۰۱۹_۲۰۲۲



شکل ۴- توزیع مکانی مقادیر شاخص‌های طیفی در سطح منطقه تلو با استفاده از تصاویر سنتینل ۲

تصاویر سنتینل ۲ در (جدول ۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در (جدول ۴) قابل مشاهده است، ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک برداشت توسط TDR با مقادیر تمامی شاخص‌های پوشش گیاهی با شدت و ضعف متفاوت از

ارتباط بین مقادیر TDR و شاخص‌های سنجش‌ازدوری مقادیر شاخص همبستگی بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه TDR طی زمین‌های مختلف با مقادیر شاخص‌های مختلف دورسنجی روی

بین مقادیر رطوبت خاک TDR با شاخص MNDVI به دست آمد. برای این شاخص مقدار همبستگی به ۰/۵۹ و مقدار ضریب تعیین به ۰/۳۵ رسیده است. ارتباط بیشتر بین شاخص‌های طیفی NDWI، NDMI و MNDWI در تحقیقات انجام شده در داخل و خارج از کشور نیز همچون مطالعات خانمحمدی و همکاران (۱۳۹۳)، دادرسی سبزواری و همکاران (۱۳۹۴)، کوهبنانی و یزدانی (۱۳۹۷)، حسینی چمنی و همکاران (۱۳۹۸)، سانچز و همکاران (۲۰۱۴) مورد تأکید قرار گرفته است.

نوع مستقیم و مثبت است. با وجود این ارتباط مثبت، اما مقادیر شاخص همبستگی به جزء برای شاخص MNDWI برای سایر شاخص‌ها کمتر از ۰/۵ است به طوری که برای شاخص‌های NDVI و SAVI مقدار ضریب همبستگی به کمتر از ۰/۱۰ می‌رسد که این مقدار از ضریب همبستگی بیانگر ارتباط ضعیف بین مقادیر برداشت شده در مطالعات میدانی با مقادیر شاخص‌های طیفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای است. در بین شاخص‌های مورد بررسی؛ NDVI، SAVI، NDMI، NDWI و MNDWI بیشترین ارتباط

جدول ۴- مقادیر آماره‌های مختلف بین مقادیر رطوبت خاک TDR و شاخص‌های دورسنجی

شاخص	R	R2	RMSE
NDVI	0.04	0.0016	14.74
SAVI	0.02	0.0004	14.6
NDMI	0.35	0.12	14.87
NDWI	0.23	0.05	14.72
MNDWI	0.59	0.35	15.05

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی وضعیت رطوبت خاک منطقه تلو با شرایط توپوگرافی متنوع و شیب بالا در منطقه شمال شرق تهران مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تدوین شده است. بررسی مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از TDR طی زمان‌های مختلف سال برای ۷ نقطه در سطح منطقه نشان داد که برداشت‌های میدانی در این منطقه از تهران به دلیل شرایط خاص توپوگرافی و اقلیمی در تمام زمان‌های سال به ویژه فصل سرد سال امکان‌پذیر نیست. از این رو برداشت میدانی با استفاده از TDR برای دوره گرم سال و همچنین در فصل سرد سال در زمان‌های که سطح زمین خشک باشد، برداشت رطوبت خاک با استفاده از TDR و همچنین روش‌های مشابه مانند PR2 و یا برداشت حجم مشخصی از خاک و انتقال آن به آزمایشگاه با محدودیت همراه است؛ بنابراین برای پایش مستمر رطوبت خاک این منطقه و مناطق مشابه باید از دستگاه‌ها و سنسورهای خودکار با قابلیت برخط

بودن ارسال اطلاعات استفاده شود. نتایج پردازش و تجزیه و تحلیل سری زمانی داده‌های رطوبت خاک برداشت شده نشان داد که در منطقه تلو همانند سایر نواحی کشور مقادیر رطوبت خاک تابع شرایط محیطی (توپوگرافی، خاک و...) و اقلیمی است؛ چراکه با شروع دوره سرد سال و فصل بارش منطقه در نتیجه فعالیت سامانه‌های بارشی مختلف در سطح منطقه مورد مطالعه مقادیر رطوبت خاک افزایش و در مقابل عبور از فصل گذر اقلیمی و وارد شدن به دور گرم سال و افزایش دماهای حداکثری و به دنبال آن افزایش تبخیر از خاک و کاهش بارش‌ها، مقدار رطوبت خاک ثبت شده نیز کاهش پیدا می‌کند. بر اساس مقادیر برداشت شده با استفاده از دستگاه TDR حداکثر مقدار رطوبت منطقه تلو طی دوره زمانی مورد بررسی در ۱۹ آذرماه ۱۳۹۹ با مقدار ۴۰ درصد ثبت شده است. در مقابل کمینه مقدار آن در اوایل تیرماه ۱۴۰۰ با مقدار ۱/۳ درصد ثبت شده است. محاسبه شاخص‌های طیفی نشان داد که از نظر مکانی جنوب شرق منطقه

MNDWI با مقدار همبستگی ۰/۵۹ به ترتیب بیشترین ارتباط به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از هر نوع سنسور سنجش از نزدیک مانند TDR و سنجش از دوری مانند ماهواره‌ها نیازمند داده‌های اندازه‌گیری مستقیم زمینی است که با توجه به کمبود داده‌های رطوبت خاک در سطح کشور ایران، ارزیابی دقت داده‌های دورسنجی و همچنین ترکیب داده‌های رطوبت خاک حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و شبکه‌ای در کاربری‌های مختلف از اهمیت و ضرورت بالایی برخوردار است.

مورد مطالعه از مقدار رطوبت و سبزی‌نگی بالاتری برخوردار است. بر اساس مشاهدات میدانی دلیل بیشتر بودن مقادیر شاخص‌های طیفی در قسمت جنوب شرقی وجود توده گیاهی قابل توجه در اطراف مسیر رودخانه است. بررسی ارتباط مقادیر رطوبت خاک ثبت شده با استفاده از دستگاه TDR با شاخص‌های طیفی محاسبه شده بر روی تصاویر سنتینل ۲ نشان داد که بین شاخص‌های NDVI و SAVI با مقادیر رطوبت خاک TDR ارتباط مشخص و معناداری وجود ندارد و برای شاخص‌های NDWI با مقدار همبستگی ۰/۲۳، NDMI با مقدار ۰/۳۵ و شاخص

فهرست منابع

۱. انگمن، ای تی و گودنی، آر جی. ۱۳۸۳. سنجش از دور در هیدرولوژی، ترجمه فاتحی مرج، ا؛ و حافظی، س.، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۹۹ ص.
۲. بابازاده، ح.، نوروزی اقدم، ا.، عقیقی، ح.، شمس‌نیا، س.ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۱. تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: استان خراسان، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۹، شماره ۱، ص ۱۲۰-۱۳۲.
۳. بابائیان، ا.، همایی، م و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در گستره VIS-NIR-SWIR به منظور تخمین نگهداشت آب در خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره ۳، ص ۲۷-۴۰.
۴. بهمنی، ا و رضوانی، ب. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد توابع انتقالی برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک‌های مختلف با مدل SWRC. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۴)، ص ۷۷۳-۷۸۵.
۵. خانمحمدی، ف.، همایی، م و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، حفاظت منابع آب و خاک، ۴(۳)، ص ۳۷-۴۵.
۶. دادرسی سبزواری، ا.، آخوندعلی، ع.م.، رادمنش، ف و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۴. مدل سازی سطوح مختلف رطوبت خاک سطحی در گستره‌ی داده‌های حرارتی و انعکاسی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۳)، ص ۳۱-۴۹.
۷. کوه‌بنانی، ح.م و یزدانی، م.ر. ۱۳۹۷. پهنه‌بندی رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر لندست ۸ (مطالعه موردی: حومه شهر سمنان)، جغرافیا و پایداری محیط، ۳(۸)، ص ۶۵-۷۷.
۸. میری، م، ۱۳۹۵. واکاوی ارتباط تغییر اقلیم و زوال جنگل‌های زاگرس مطالعه موردی: منطقه‌ی ایلام، رساله دکتری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران. ۱۲۵ص.
9. Ayehu, G., Tadesse, T., Gessesse, B., and Y. Yigrem. 2019. SoilMoisture Monitoring Using Remote Sensing Data and a Stepwise-Cluster Prediction Model: The Case of Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Remote Sensing, 11(2):125.

10. Baghdadi, N., Aubert, M., Cerdan, O., Franchisteguy, L., Viel, C., Martin, E., Zribi, M. and J.F. Desprats. 2007. Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: application to the Touch Basin (France). *Sensors*. 7: 2458-2483.
11. Chen, Y., Yang, K., Qin, J., Zhao, L., Tang, W., and M. Han. 2013, Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 118: 4466–4475.
12. Demsar, U. 2005. a strategy for observing soil moisture by remote sensing in the Murray-Darling basin. Paper presented at AGILE 2005, Estoril, Portugal.
13. Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and F. Castelli. 1996. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes. *Journal of Hydrology*. 184: 3–17.
14. Goward, S. N., Xue, Y., and K.P. Czajkowski. 2002. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*. 79(2–3): 225–242.
15. Houser, P.R., Shuttleworth, J., Famiglietti, J.S., Gupta, H.V., Syed, K.H., and D.C. Goodrich. 1998. Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resources Research*. 34(12): 3405–3420.
16. Li, J., and S. Islam. 2002. Estimation of root zone soil moisture and surface fluxes partitioning using near surface soil moisture measurements. *Journal of Hydrology*. 259:1–14.
17. Lunt, L.A., Hubbard, S.S., and Y. Rubin. 2005. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*. 307: 254-269.
18. Mekonnen, D.F. 2009. Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara Catchment, Ethiopia. MSc. Thesis of Geo-Information Science and Earth Observation, Specialisation: (Integrated Watershed Modelling and Management). WREM Department of ITC, Enschede, the Netherlands. 120 pages.
19. Rebel, K.T., de Jeu, R.A.M., Ciais, P., Viovy, N., Piao, S.L., Kiely, G., and A.J. Dolman. 2012. Global analysis of soil moisture derived from satellite observations and a land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16: 833–847.
20. Sanchez R., S., Piles, M., Snchez, N., Martínez-Fernández, J., Vall-Ilossera, M., and A. Camps. ۲۰۱۴. Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*. ۵۱۶: ۲۷۳–۲۸۳.
21. Wang, L., and J. Qu. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring. *Earth Science*. 3: 237-247.
22. Wang, X. ۲۰۰۵. Relation between ground-based soil moisture and satellite image-based NDVI. Earth and Environmental Science Department, University of Texas at San Antonio, ۱۷ Pages.
23. Yuan, S., and S.M. Quiring. 2017. Evaluation of soil moisture in CMIP5 simulations over the Contiguous United States using in situ and satellite observations. *Hydrology Earth System*. 21: 2203–2218.
24. Zhao, S., Yang, Y., Qiu, G., Qin, Q., Yao, Y., Xiong, Y., and C. Li. ۲۰۱۰. Remote detection of bare soil moisture using a surface-temperature-based soil evaporation transfer coefficient. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12(5): ۳۵۱–۳۵۸.
25. Zhuo, L., and D. Han. 2017, Hydrological Evaluation of Satellite Soil Moisture Data in Two Basins of Different Climate and Vegetation Density Conditions. *Advances in Meteorology*. DOI: 10.1155/2017/1086456.

Performance Evaluation of Satellite Images and Spectral Indices in Estimating Soil Moisture in Telo Region, Tehran Province

M. Miri*, A.A. Noroozi, A. Abdeh Kolahchi, and J. Porhemmat

Assist. Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Morteza.miri64@gmail.com

Professor. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

noroozi.aa@gmail.com

Assist. Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

nabi.kolahchi@gmail.com

Professor. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

porhemmat@scwmri.ac.ir

Received: November 18, 2023 and Accepted: March 11, 2024

Abstract

Measuring the moisture content of surface soil, as one of the most important components of the water cycle, plays a significant role in the optimal management of water and soil resources. The aim of this research was to evaluate the accuracy of spectral indices and Sentinel-2 satellite images for estimating soil moisture during the period of 2020-2022 in the Telo region, Tehran Province, Iran. The data used included the daily Sentinel-2 images, 30-Meters Digital Height Model and field measurements using the TDR. The spectral indices used in this study included NDWI, MNDWI, NDVI, NDMI, and SAVI. Analysis of the amount of surface soil moisture recorded showed that the average soil moisture in the area was 14.07%. In terms of time, the maximum amount of soil moisture with a value of 40% was recorded on December 18, 2020, and the minimum value was recorded with a value of 1.3% in early June, 2021. Analysis of the trend of soil moisture values showed that the minimum soil moisture values were recorded in the warm season due to the increase in temperature and evaporation and the decrease in precipitation, while the maximum soil moisture was recorded in the cold season with the beginning of the rainy season in the region and the decrease in temperature. Investigating the relationship between soil moisture values recorded using TDR and spectral indices calculated on Sentinel-2 images showed that there was no clear and significant relationship between NDVI and SAVI indices with TDR soil moisture values; and the maximum correlation was obtained for NDWI indexes with a correlation value of 0.23, NDMI with a value of 0.35 and MNDWI index with a correlation value of 0.59.

Keywords: TDR, Sentinel-2 images, MNDWI, Soil water content

* Corresponding author's email: Morteza.miri64@gmail.com