



برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل جدید دوزنقه‌ای مرئی برای حوضی سیمینه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸

اردشیر یوسف‌زاده^۱ بتول زینالی^{۲*} خلیل ولیزاده کامران^۳ صیاد اصغری سراسکانرود^۴
وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۸ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱

چکیده

به دلیل ناپیوستگی در برداشت نمونه‌ها و نداشتن دسترسی به اطلاعات کافی در ارتباط با شناخت ویژگی‌های مناطق و نیز، صرف هزینه و زمان زیاد جهت برآورد آب قابل دسترس خاک و تغییرات مکانی آن، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به صرفه است. "مدل دوزنقه‌ای حرارتی- مرئی" بر اساس تفسیر توزیع پیکسل در فضای LST-VI، است که فضای LST-VI برای تخمین رطوبت سطحی خاک یا تبخیر-تعرق واقعی استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه برآورد رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ و با استفاده از توزیع پیکسل در فضای LST-VI (TOTRAM) و STR-VI (OPTRAM) می‌باشد. بر اساس رابطه‌ی رگرسیونی برازش شده برای دو مدل، بیشترین ضریب تعیین به دست آمده برای مدل TOTRAM در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ برابر با ۰/۹۹ می‌باشد و برای مدل OPTRAM در سال ۲۰۱۷ برابر با ۰/۹۷ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی برازش و پراکنش دقیق داده‌ها در فضای LST-VI و STR-VI توسط مدل‌های مورد نظر می‌باشد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل OPTRAM بهتر و دقیق‌تر از مدل TOTRAM توانسته است رطوبت خاک را پیش‌بینی کند. چون ضرایب رگرسیونی به دست آمده برای OPTRAM مثبت و برای TOTRAM منفی است؛ یعنی STR-VI در محدوده‌ی طول موج مرئی نسبت به LST-VI در محدوده‌ی طول موج حرارتی، دقیق‌ترین برآورد از رطوبت خاک را در نواحی فاقد داده‌های کنترل زمینی می‌تواند داشته باشد.

کلمات کلیدی: حوضی آبریز سیمینه، سنجش از دور ماهواره‌ای، OPTRAM، OTRAM، رطوبت خاک، لندست ۸.

۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی- مخاطرات اقلیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، (نویسنده-
۲- دانشیار گروه آموزشی جغرافیای طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده‌ی ادبیات و علوم انسانی، اردبیل، ایران، (نویسنده-
ی مسئول). E-mail: zeynali.b@uma.ac.ir

۳- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشگاه تبریز، دانشکده‌ی جغرافیا و برنامه‌ریزی، تبریز، ایران.
۴- دانشیار گروه آموزشی جغرافیای طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده‌ی ادبیات و علوم انسانی، اردبیل، ایران.

مقدمه

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین متغیرهای چرخه‌ی هیدرولوژیکی است (کورنلسن^۱، ۲۰۱۵). طبق مطالعات امسی نالیتال^۲ (۲۰۱۵) و اسکالت^۳ (۲۰۱۶) این رطوبت نقش کلیدی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی عددی هواشناسی، پایش، وقایع حدی مانند سیلاب- خشکسالی - جنگل‌سوزی‌ها- مطالعات تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب (مطالعات پن^۴ و همکاران، ۲۰۱۲) دارد. ورکن^۵ (۲۰۰۸)، روبینسون^۶ (۲۰۰۸) و اوچسنر^۷ (۲۰۱۳) به رابطه‌ی تغییرپذیری رطوبت خاک از نظر زمانی و مکانی اشاره نمودند به نحوی که کمبود رطوبت خاک در هنگام بارش سبب نفوذ زیاد و کاهش رواناب شده و در صورتی که رطوبت خاک زیاد باشد، رواناب افزایش یافته و احتمال سیلاب بالا می‌رود. طبق تحقیقات مانسون^۸ (۲۰۱۰) رطوبت خاک به عنوان یکی از متغیرهای اساسی اقلیمی توسط سازمان جهانی هواشناسی، سیستم مشاهدات اقلیم جهانی و کمیته ماهواره‌های مشاهداتی زمین معرفی گردید.

سنجش از دور یک ابزار قدرتمند برای مشخص کردن و نظارت بر رطوبت خاک نزدیک به سطح زمین (صفر تا ۵ سانتی‌متر) را فراهم می‌کند. طبق تحقیقات بابائیان^۹ (۲۰۱۵)، تیان فیلوت^{۱۰} (۲۰۱۵)، ویتینق^{۱۱} (۲۰۰۴) و زنگ^{۱۲} (۲۰۰۴) بازتاب نوری خاک

-
- ۱- Kornelsen
 - ۲- Mc Nally
 - ۳- Schalie
 - ۴- Pan
 - ۵- Vereecken
 - ۶- Robinsonet
 - ۷- Ochsner
 - ۸- Mason
 - ۹- Babaeian
 - ۱۰- Tian Philpot
 - ۱۱- Whiting
 - ۱۲- Zeng

و همچنین انتشارحرارتی به استناد تحقیقات الییت^۱ (۱۹۷۹)، اصفهانی (۲۰۱۵) و ریستریتن^۲ (۲۰۰۶) و ماکروویو برگشتی برابر تحقیقات داس^۳ (۲۰۰۸) و انتخابی (۱۹۹۶) با رطوبت خاک رابطه دارند. روش‌های متعددی برای محاسبه‌ی رطوبت خاکی به صورت نوری، حرارتی و ماکروویو وجود دارد که توسط نیکلاس^۴ (۲۰۱۱)، زانگ^۵ (۲۰۱۶) و وانگ^۶ (۲۰۰۹) توسعه داده شده است. روش‌های سنجنش از دور مبتنی بر امواج ماکروویو، تکنیک‌هایی مؤثر برای برآورد رطوبت خاک بوده و با استفاده از شاخص NDVI در تصاویر لندست می‌توان سطوح آب‌های سطحی را با دقت مناسب استخراج نموده (مریم خسرویان و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۱۵) و حتی تغییرات کاربری‌ها را در طی سری‌های زمانی تشخیص داد (مالیان و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۹). با توجه به محدودیت دسترسی به اطلاعات رادار، در این پژوهش تمرکز، بر محدوده‌ی مادون نزدیک و مرئی می‌باشد. در این روش، میزان گسیل گرما از سطح زمین با طول موج‌های ۳/۵ تا ۱۴ میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود (کورران^۷، ۱۹۸۵). تخمین رطوبت خاک با این روش، نیاز به برآورد دمای سطحی خاک و شاخص گیاهی دارد (وانگ و کو^۸، ۲۰۰۹). پوشش گیاهی و دمای سطحی زمین وابستگی پیچیده‌ای برای رطوبت خاک دارند (کارلسون^۹، ۱۹۹۴). طبق نتایج تحقیق گیلیاس^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۷) از ترکیب این دو شاخص می‌توان برای برآورد رطوبت خاک با دقت قابل قبول استفاده کرد. تغییرات روزانه‌ی دما، همبستگی

۱- Ellyett

۲- Verstraeten

۳- Das

۴- Nichols

۵- Zhang

۶- Wang

۷- Curran

۸- Wang and Qu

۹- Carlson

۱۰- Gillies

بالایی با مقدار رطوبت خاک دارد (انگ من^۱، ۱۹۸۵). همچنین وانگ و همکارانش (۲۰۰۹) با تلفیق داده‌های رطوبت خاک زمینی با شاخص‌های NDVI و LST حاصل از محصولات شاخص گیاهی و دمای سطحی تصاویر MODIS، روابط رگرسیونی را برای برآورد رطوبت خاک به دست آوردند که نتایج حاصله همبستگی بالایی را با مشاهدات زمینی نشان داده است. در سال ۲۰۱۷ یک مدل جدید برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور مرئی ارائه گردید که بر اساس رابطه فیزیکی خطی بین رطوبت خاک و بازتابی تبدیل شده مادون قرمز کوتاه (STR) است؛ که بر اساس توزیع پیکسل در داخل فضای دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (STR-VI) بیان می‌شود (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص‌های مختلفی جهت برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور مرئی و حرارتی وجود دارد که در جدول (۱) به چند مورد اشاره شده است.

جدول (۱) شاخص‌های خشک‌سالی و رطوبت خاک برای مشاهدات سنجش از دور مرئی

شاخص	منبع	الگوریتم*
شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک ^۲	Qi et al (1994)	$SAVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED} + L} (1 + L)$
شاخص خشک‌سالی عمودی ^۳	Ghulam et al. (2007)	$SPDI = \frac{R_{SWIR} + MR_{NIR}}{\sqrt{1 + M^2}}$
شاخص خشک‌سالی مرئی و مادون قرمز کوتاه ^۴	Zhang et al. (2013)	$VSDI = 1 - (R_{SWIR} + R_{red} - 2R_{blue})$
شاخص مثلثی رطوبت خاک ^۵	Amani et al. (2016)	$TSMI = C_0 + \sum_i^{10} = 1C_1P_1$

در جدول (۱): NIR: مادون قرمز نزدیک انعکاسی. RED: طیف قرمز انعکاسی. SWIR: طیف مادون قرمز کوتاه انعکاسی. L: فاکتور روشنایی خاک از صفر برای منطقه با پوشش گیاهی بالا تا ۱ برای مناطق بدون پوشش گیاهی تغییر می‌کند.

۱- Engman

۲- soil Adjusted Vegetation index, SAVI

۳- Shortwave-infrared Perpendicular Drought Index, SPDI

۴- Visible and Shortwave-infrared Drought Index, VSDI

۵- Triangle Soil Moisture Index, TSMI

Rred, Rblue, RNIR, RSWIR: باندهای قرمز، آبی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه رادینس شده. α : آلبدو. *NDVI*: شاخص نرمال شده پوشش گیاهی.

مدل "ذوزنقه‌ای"^۱ یا "مثلث"^۲ یکی از مدل‌های به کار رفته در سنجش از دور جهت برآورد رطوبت خاک می‌باشد. "مدل ذوزنقه‌ای حرارتی-مرئی"^۳ براساس تفسیر توزیع پیکسل در فضای LST-VI، جایی که دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی یک شاخص رشد گیاهی است که فضای LST-VI برای تخمین رطوبت سطحی خاک یا تبخیر-تعرق واقعی استفاده می‌شود (کارلسون و همکاران، ۱۹۹۴) (نعمانی^۴ و همکاران، ۱۹۹۳) (موران^۵ و همکاران، ۱۹۹۴). اگر تعداد کافی از پیکسل‌ها وجود داشته باشد، ابر و پیکسل‌های مانده در سطح آب از توزیع پیکسل حذف شوند، شبیه مثلث یا ذوزنقه می‌شوند (کارلسون، ۲۰۱۳). یکی از دلایل موفقیت این مدل متکی بودن به داده‌های سنجش از دور حرارتی و مرئی و عدم نیاز به اطلاعات جوی و داده‌های جانبی است (کارلسون، ۲۰۰۷).

اخیراً، تعدادی از تغییرات در مدل Trapezoid پیشنهاد شده است. رحیم‌زاده و باج‌گیرانی (۲۰۱۳) برای بهبود دقت پیش‌بینی TOTRAM روابط غیرخطی بین رطوبت خاک و LST را به جای روابط خطی مورد نظر در روش اصلی معرفی کردند.

این مدل دارای دو محدودیت اصلی می‌باشد. اول اینکه TOTRAM را نمی‌توان برای ماهواره‌ای بدون باند حرارتی استفاده کرد (به عنوان مثال Sentinel-2). دوم اینکه علاوه بر رطوبت خاک، LST به عوامل محیطی بستگی دارد که برای هر تصویر باید کالیبره شود (مالیک^۶ و همکاران، ۲۰۰۹). برای غلبه بر محدودیت‌های مدل TOTRAM و

۱- trapezoid

۲- triangle

۳- Thermal-Optical Trapezoid Model

۴- Nemani

۵- Moran

۶- Mallick

همچنین تجربی بودن شاخص‌های مرئی، یک مدل ذوزنقه‌ای فیزیکی جدید ارائه شده است که OPTRAM نامیده می‌شود. که بر پایه رابطه‌ی فیزیکی توسعه داده شده بین رطوبت خاک و "بازتاب تبدیل شده‌ی مادون قرمز کوتاه"^۱ است (صادقی و همکاران، ۲۰۱۵). در این مطالعه تفاوت مدل TOTRAM و OPTRAM را برای تصاویر ماهواره لندست ۸ برای استخراج رطوبت خاک بررسی شده است.

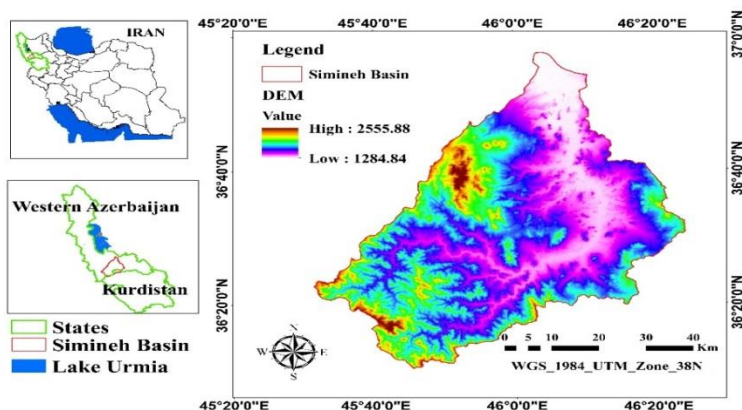
مواد و روش‌ها

– منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مطالعاتی حوضه‌ی رودخانه سیمینه‌رود با مساحتی در حدود ۳۲۷۹ کیلومتر مربع از زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد (شکل ۱). حوضه‌ی مورد مطالعه در اقلیم‌نمای آمبرژه در ناحیه‌ی نیمه‌خشک سرد متمایل به نیمه‌مرطوب سرد قرار دارد. مرتفع‌ترین نقطه‌ی حوضه با ارتفاع ۲۵۸۰ متر از سطح دریا در شمال غرب محدوده و پست‌ترین نقطه‌ی حوضه نیز با ارتفاع ۱۳۰۰ متر از سطح دریا در شمال محدوده در محل خروجی حوضه واقع است. متوسط ارتفاع حوضه ۱۶۱۷ متر می‌باشد. دما از شمال به جنوب کاهش و از غرب به شرق افزایش می‌یابد. بر اساس آمار درازمدت، میانگین بارندگی سالانه در ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر ۴۶۷ و ۳۹۳ میلی‌متر برآورد شده است (شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۱۳۹۶).

۱- Optical Trapezoid Model

۲- shortwave infrared transformed reflectance



شکل (۱) محدوده‌ی مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

داده‌ها

داده‌های ماهواره‌ای

ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی متوسط است (۱۵ متر تا ۱۰۰ متر، بسته به فرکانس طیفی بین ۰/۴۳۳ تا ۱۲/۵ میکرومتر) در طول موج مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز کوتاه و مادون قرمز حرارتی را فراهم می‌کند. این ماهواره از دو سنجنده‌ی (OLI) در ۹ باند، (TIRS) در ۲ باند تشکیل شده است. موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه با توجه به این که در تصاویر ماهواره لندست ۸ در مرز دو گذر ۳۴ و ۳۵ و مسیر ۱۶۸ با سیستم تصویر ۳۸ شمالی و بر مبنای WGS 84 می‌باشند. بعد از دانلود تصاویر از سایت زمین‌شناسی آمریکا با هم موزاییک شده و حوضه‌ی سیمینه‌رود برای سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ استخراج شده است (جدول ۲).

جدول (۲) تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

ردیف	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	مسیر	گذر
۱	۲۰۱۵/۱۲/۲۳	۲ دی ۱۳۹۴	۱۶۸	۳۴ و ۳۵

۱- Operational Land Imager

۲- Thermal InfraRed Sensor

۳۵ و ۳۴	۱۶۸	۱۹ آذر ۱۳۹۵	۲۰۱۶/۱۲/۰۹	۲
۳۵ و ۳۴	۱۶۸	۲۱ آذر ۱۳۹۶	۲۰۱۷/۱۲/۱۲	۳

مأخذ: (<https://earthexplorer.usgs.gov>)

– پیش پردازش داده‌ها

تصاویر ماهواره لندست ۸ دارای تصحیحات هندسی بوده و تصحیحات اتمسفری و رادیومتریک توسط نرم‌افزار ENVI5.1 و با استفاده از متادیتای این تصاویر انجام شده است. نحوه‌ی کالیبراسیون، روش‌ها و الگوریتم‌های مورد استفاده در برآورد رطوبت خاک (شکل (۲) روندنما روش کار) به تفصیل در زیر بیان می‌شود.

– تبدیل درجات خاکستری به رادیانس و انعکاس

برای محاسبه‌ی شاخص دمای سطح زمین ابتدا باید ارزش‌های عددی پیکسل‌ها را به رادیانس^۱ (باندهای حرارتی) و انعکاس^۲ (باندهای غیرحرارتی) واقعی پدیده‌ها تبدیل کنیم (رابطه‌ی ۱ و ۲). مقدار عددی پیکسل‌ها برای تصاویر ماهواره لندست ۸ بین ۰ تا ۴۰۹۵ یعنی ۱۲ بیتی بوده که به قدرت تفکیک تصاویر بستگی دارد. میزان انعکاس بین ۰ و ۱، مقدار رادیانس بین ۸ تا ۱۶ می‌باشد. در این مطالعه باندهای ۴، ۵، ۶ که غیر حرارتی می‌باشند به انعکاس و باند ۱۰ و ۱۱ که حرارتی هستند به تشعشع تبدیل شدند (مرادی، ۱۳۹۳).

$$L_{\phi} = ML * QCAL + AL \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

$$P_{\lambda} = MP * QCAL + AP \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

L_{ϕ} : رادیانس، P_{λ} : مقدار انعکاس، (MP, ML) :^۳ ضریب چندگانه مخصوص هر باند

۱- Radiance

۲- Reflectance

۳- Reflectance Mult Band

(AP,AL): ضریب تجمعی هر باند QCAL: تصویر موردنظر. مقادیر MP-AP-ML-AL در متادیتای تصاویر موجود می‌باشند.

- پردازش داده‌ها

سپس با استفاده از تصویر کالیبره شده NDVI و LST را محاسبه می‌کنیم. شاخص تراکم پوشش گیاهی بین ۱ و -۱ می‌باشد و مقدار LST بر اساس درجه‌ی کلون است که از روی دمای روشنایی به دست می‌آید (تاردی^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). (در این مطالعه دمای سطح زمین بر اساس درجه‌ی سانتی‌گراد بیان شده است).

شاخص NDVI برای اولین بار به وسیله‌ی روسه^۳ و همکاران (۱۹۷۴) برای جداسازی پوشش گیاهی از خاک پس‌زمینه با استفاده از داده‌های سنجنده MSS ارائه شد (رابطه‌ی (۳)). این شاخص براساس تباین بین انعکاس قوی گیاهان در طیف مادون قرمز نزدیک و جذب زیاد کلروفیل در طیف قرمز عمل می‌کند (گاتس^۴ و همکاران، ۱۹۶۵).

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

که در آن R_{NIR} باند مادون قرمز نزدیک و R_{red} باند قرمز به ترتیب باندهای ۵ و ۴ می‌باشند.

برای تبدیل تصاویر رادیانس شده به دمای روشنایی و دمای سطح زمین به ترتیب از رابطه‌ی ۴ و ۵ استفاده شده است (تاردی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$T_b = \frac{hc/k\lambda}{\ln\left(\frac{2hc^2\lambda^{-5}}{L_\lambda} + 1\right)} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

جدول (۳) ضرایب کالیبراسیون دمای روشنایی برای لندست ۸

۱- Reflectance Add Band

۲- Tardy

۳- Rouse

۴- Gates

K2	K1	ضرایب کالیبراسیون
۱۳۲۱/۰۸	۷۷۴/۸۹	باند ۱۰
۱۲۰۱/۱۴	۴۸۰/۸۹	باند ۱۱

مأخذ: (لطیف، ۲۰۱۴)

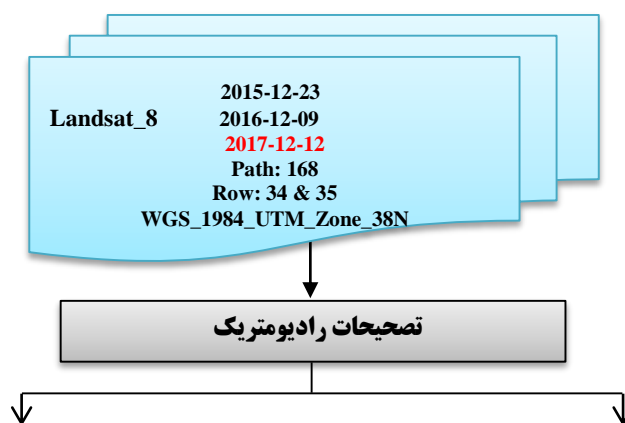
$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda \times \frac{T}{\rho}) \times \ln \varepsilon} \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

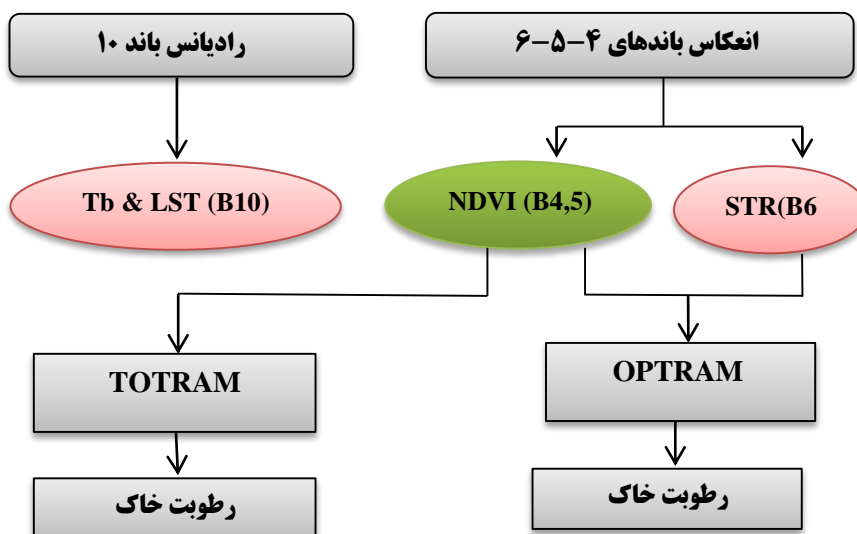
LST: دمای سطح (°K)، λ : طول موج باند حرارتی، p : برابر با $2^{-10} \times 4238$ و ε : توان تشعشعی است. توان تشعشعی (ε) از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید.

$$\varepsilon = \varepsilon_{veg} p_v + \varepsilon_{soil} (1 - p_v) \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

ε_{veg} : برابر با ۰/۹۹، ε_{soil} : برابر با ۰/۹۷ می‌باشد و مقدار p_v از رابطه‌ی ۷ قابل محاسبه است.

$$p_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$





شکل (۲) روندنمای مراحل تحقیق (منبع: نگارندگان)

Tb: دمای روشنایی ($^{\circ}\text{K}$), C: سرعت نور $10^8 * 2998 / \text{ms}^{-1}$, h: ثابت پلانک $10^{-34} * 6.626 / \text{Js}$, K: ثابت بولتزمن $10^{-24} * 1.3807 / \text{JK}^{-1}$, $L\lambda$: تابش طیفی, λ : طول موج مرکزی هر باند (μm), K_1, K_2 : ضرایب کالیبراسیون

NDVI از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید، NDVI_{min} و NDVI_{max} به ترتیب بیشترین و کمترین NDVI مشاهده شده است. در این روش از آستانه‌گذاری NDVI استفاده می‌شود، پیکسل مربوط به خاک خشک با میزان گسیلمندی حرارتی 0.97 برای لندست می‌باشد. اگر NDVI بزرگ‌تر از 0.5 باشد پیکسل‌های با ارزش NDVI بزرگ‌تر از 0.5 بیشترین تراکم پوشش گیاهی را نشان می‌دهند که مقدار ثابت گسیلمندی آن‌ها 0.99 تخمین زده می‌شود. اگر NDVI بین 0.2 و 0.5 باشد پیکسل ترکیبی از پدیده‌های مختلف می‌باشد و از رابطه‌ی (۷) قابل محاسبه است (وَنگ، ۲۰۰۴).

۱- Weng

- مدل سنتی ذوزنقه‌ای حرارتی- مرئی

این مدل بر اساس توزیع پیکسل در فضای دمای سطح زمین و پوشش گیاهی می‌باشد که جهت برآورد رطوبت خاک با استفاده از یک معادله خطی در فضای (LST-VI) (رابطه‌ی ۸-۹-۱۰) برازش داده می‌شود (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷).

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{LST_d - LST}{LST_d - LST_w} \quad \text{رابطه‌ی (۸)}$$

W: مقدار رطوبت خاک نرمال شده، θ_d : حداقل مقدار رطوبت خاک خشک در شرایط محلی، θ_w : حداکثر مقدار رطوبت خاک مرطوب در شرایط محلی، LST_d و LST_w به ترتیب مربوط به خاک خشک و مرطوب می‌باشند.

$$LST_d = i_d + s_d NDVI \quad \text{رابطه‌ی (۹)}$$

$$LST_w = i_w + s_w NDVI \quad \text{رابطه‌ی (۱۰)}$$

i_d و s_d به ترتیب مربوط به بیشترین دمای سطح زمین و کمترین تراکم پوشش گیاهی، i_w و s_w به ترتیب مربوط به کمترین دمای سطح زمین و بیشترین تراکم پوشش گیاهی است، که با استفاده از یک معادله خطی (رابطه‌ی ۱۱) رطوبت خاک را می‌توان برای هر پیکسل در فضای LST-VI تخمین زد.

$$TOTRAM = \frac{i_d + s_d NDVI - LST}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad \text{رابطه‌ی (۱۱)}$$

- مدل جدید ذوزنقه‌ای مرئی

پایه اصلی این مدل جای گذاری دمای سطح زمین در رابطه‌ی ۸، جهت برآورد رطوبت خاک در محدوده طول موج مرئی می‌باشد. این مدل برای اولین بار توسط کوبلکا و مونک^۱ (۱۹۳۱) تحت عنوان مدل انتقال تابشی دوگانه پایه‌گذاری شد سپس توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۵) به عنوان مدل فیزیکی نمایش ارتباط خطی بین رطوبت

۱- Kubelka & Munk

خاک و انعکاس مادون قرمز کوتاه توسعه داده شد.

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad \text{رابطه‌ی (۱۲)}$$

STR: انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه، STR_d و STR_w به ترتیب انعکاس بازگشتی مادون قرمز کوتاه در لبه‌های خشک و تر هستند. STR از طریق معادله ۱۰ محاسبه می‌شود، R_{SWIR} انعکاس باند مادون قرمز کوتاه که برای باندهای ۶ (۱۶۵۰ نانومتر) و ۷ (۲۲۱۰ نانومتر) لندست ۸ می‌باشد.

$$STR = \frac{(1 - R_{SWIR})^2}{2R_{SWIR}} \quad \text{رابطه‌ی (۱۳)}$$

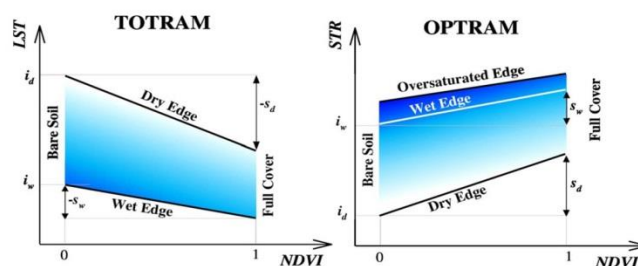
همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است با توجه به رابطه خطی بین خاک و پوشش گیاهی انتظار ایجاد یک شکل مثلثی در فضای STR-NDVI را داریم؛ بنابراین پارامترهای رابطه‌ی ۱۳ را می‌توان برای لبه‌های تر و خشک محدوده‌ی مورد نظر، از تصاویر ماهواره‌ای استخراج کرد. کارلسون (۲۰۱۳) پیشنهاد کرد که لبه‌ها می‌توانند به بهترین وجه توسط بازرسی بصری توزیع‌های پیکسل تعریف شوند.

$$STR_d = i_d + s_d NDVI \quad \text{رابطه‌ی (۱۴)}$$

$$STR_w = i_w + s_w NDVI \quad \text{رابطه‌ی (۱۵)}$$

که در آن i_d : کمترین STR، s_d : کمترین تراکم پوشش گیاهی؛ i_w : بیشترین STR، s_w : بیشترین تراکم پوشش گیاهی می‌باشند. از ترکیب رابطه‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مدل جدید دوزنقه‌ای مرئی (رابطه‌ی ۱۶) به دست می‌آید که می‌تواند رطوبت خاک را در محدوده طول موج مرئی تخمین بزند.

$$OPTRAM = \frac{i_d + s_d NDVI - STR}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad \text{رابطه‌ی (۱۶)}$$



شکل (۳) پارامترهای مدل TOTRAM و OPTRAM (صادقی، ۲۰۱۷)

رابطه‌ی ۸ و ۱۶ مشابه همدیگر می‌باشند با این تفاوت که STR جایگزین LST در رابطه‌ی ۱۶ شده است. همچنین در TOTRAM فضای LST-VI در طول زمان و با تغییرات پارامترهای جوی تغییر می‌کند ولی مدل OPTRAM که از محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک به جای طول موج حرارتی استفاده می‌کند تحت تأثیر پارامترهای جوی نبوده و از اتمسفر تأثیر نمی‌پذیرد زیرا بازتاب، تابعی از خواص سطح است. بنابراین فضای STR-NDVI ثابت بوده و می‌تواند به یک مدل جهانی مبدل شود که برای تمام زمان‌ها و مکان‌ها معتبر است (صادقی، ۲۰۱۷).

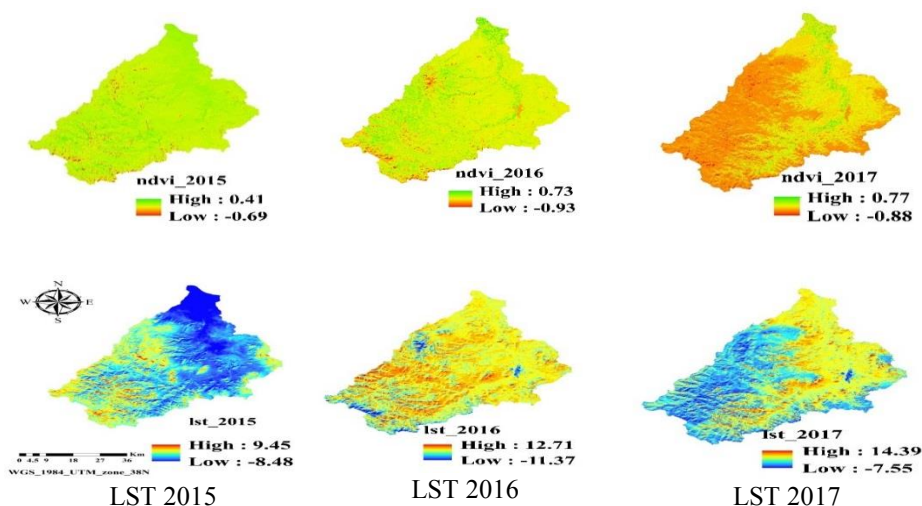
بحث و نتایج

کمترین متوسط دمای استخراج شده از تصاویر ماهواره (جدول ۴) با $3/23$ - سانتی‌گراد مربوط به سال ۲۰۱۵ و بیشترین آن با $2/12$ مربوط به سال ۲۰۱۶ می‌باشد که افزایش دما را نشان می‌دهد که نقشه‌ی پراکنش LST در شکل (۴) نمایش داده شده است. میزان تراکم پوشش گیاهی در سال ۲۰۱۷ با $0/66$ مترکم‌ترین پوشش گیاهی را در بین سال‌های مورد مطالعه دارد (شکل ۴).

جدول (۴) دامنه NDVI و LST

سال	حداکثر تراکم پوشش گیاهی	حداقل تراکم پوشش گیاهی	متوسط تراکم پوشش گیاهی	حداکثر تراکم پوشش گیاهی	حداقل تراکم پوشش گیاهی	متوسط تراکم پوشش گیاهی
۲۰۱۵	۹/۴۵	-۸/۴۸	-۳/۲۳	۰/۳۴	-۰/۶۹	-۰/۰۲
۲۰۱۶	۱۲/۷۱	-۱۰/۷۵	۲/۱۲	۰/۵۶	-۰/۹۳	۰/۱۳
۲۰۱۷	۱۴/۳۹	-۶/۳۵	۱/۲۳	۰/۶۶	-۰/۴۶	۰/۰۴۵

مأخذ: یافته‌های تحقیق

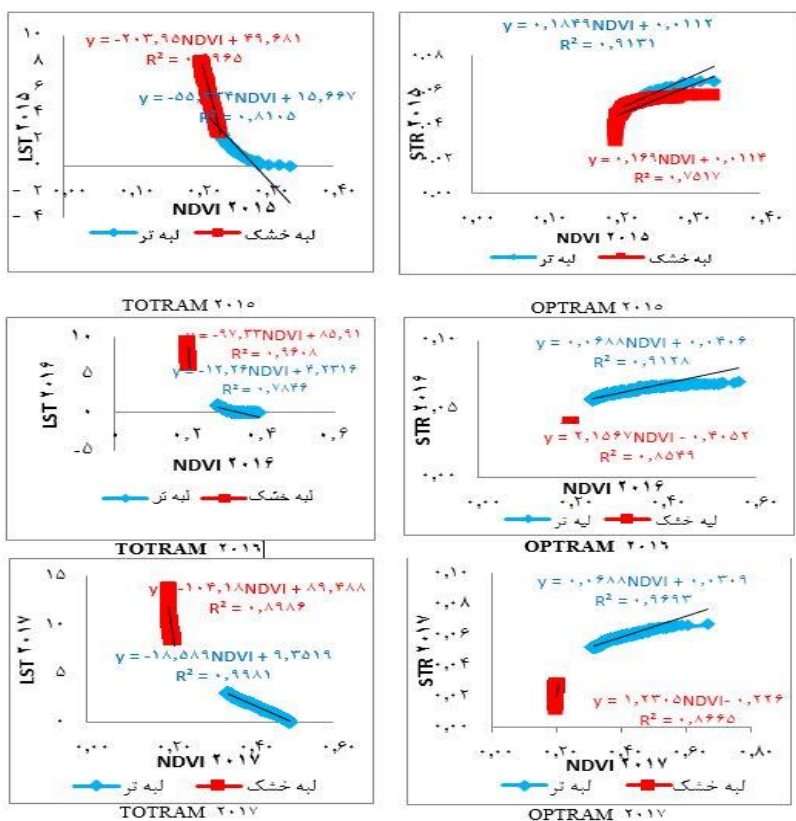


شکل (۴) توزیع NDVI و LST در محدوده‌ی مورد مطالعه

جدول (۵) معادلات رگرسیون خطی به دست آمده از فضای مثلثی LST-NDVI و STR-NDVI برای

شاخص OPTRAM, TOTRAM

شاخص	سال	لبه خشک (LST _d)	R ²	لبه تر (LST _w)	R ²
TOTRAM	۲۰۱۵	y = -203.95NDVI + 49.681	۰/۹۹	y = -55.334NDVI + 15.667	۰/۸۲
	۲۰۱۶	y = -97.33NDVI + 85.91	۰/۹۶	y = -12.26NDVI + 4.2316	۰/۷۸
	۲۰۱۷	y = -104.18NDVI + 89.488	۰/۹۰	y = -18.589NDVI + 9.3519	۰/۹۹
شاخص	سال	لبه خشک (STR _d)	R ²	لبه تر (STR _w)	R ²
OPTRAM	۲۰۱۵	y = 0.169NDVI + 0.0114	۰/۷۵	y = 0.1849NDVI + 0.0112	۰/۹۱
	۲۰۱۶	y = 2.1567NDVI - 0.4052	۰/۸۵	y = 0.0688NDVI + 0.0406	۰/۹۱
	۲۰۱۷	y = 1.2305NDVI - 0.226	۰/۸۶	y = 0.0688NDVI + 0.0309	۰/۹۷

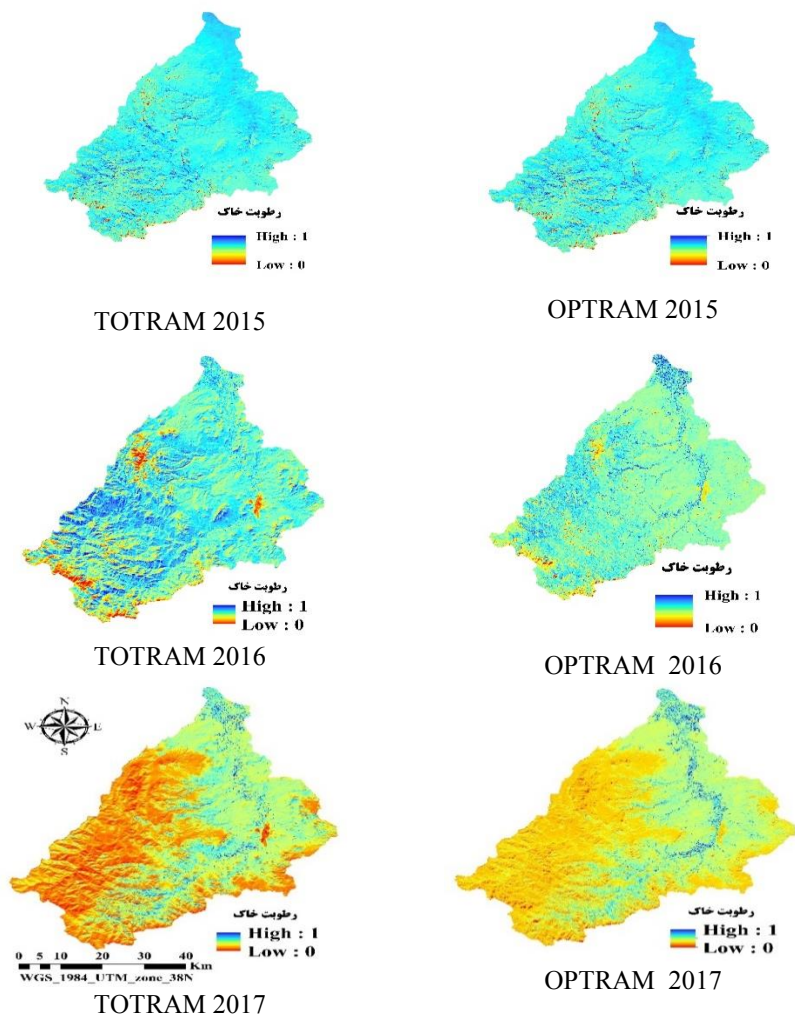


شکل (۵) لبه های تر و خشک به دست آمده از فضای مثلثی LST-NDVI (TOTRAM) و STR-NDVI (OPTRAM)

جدول (۶) ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص OPTRAM، سال ۲۰۱۵

OPTRAM ۲۰۱۵	NDVI ۲۰۱۵	STR ۲۰۱۵		
۰/۷۰۹*	۰/۷۰۹*	۱	همبستگی	STR ۲۰۱۵
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سطح معناداری	
۱*	۱	۰/۷۰۹*	همبستگی	NDVI ۲۰۱۵
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	سطح معناداری	
۱	۱*	۰/۷۰۹*	همبستگی	OPTRAM ۲۰۱۵
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	سطح معناداری	

* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.



شکل (۶) رطوبت خاک به دست آمده از شاخص‌های OPTRAM و TOTRAM برای سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷

با توجه به جدول (۶) مقدار ضریب همبستگی بین OPTRAM و شاخص‌های STR و NDVI به ترتیب برابر با ۰/۷۰۹ و ۱ می‌باشد که نشان از رابطه‌ی بسیار قوی بین

متغیرها را دارد. مقدار معناداری که برابر با ۰/۰۰۰ می‌باشد نشان می‌دهد که بین این متغیرها رابطه خطی معناداری وجود دارد (اگر سطح معناداری کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد رابطه‌ی خطی معناداری برقرار است).

جدول (۷) ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص OPTRAM، سال ۲۰۱۶

OPTRAM ۲۰۱۶	NDVI ۲۰۱۶	STR ۲۰۱۶		
-۰/۶۴۸*	-۰/۶۴۸*	۱	همبستگی	STR ۲۰۱۶
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سطح معناداری	
۱*	۱	-۰/۶۴۸*	همبستگی	NDVI
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	سطح معناداری	۲۰۱۶
۱	۱*	-۰/۶۴۸*	همبستگی	OPTRAM
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	سطح معناداری	۲۰۱۶

* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.

با توجه به جدول (۷) مقدار ضریب همبستگی بین OPTRAM و شاخص‌های STR و NDVI به ترتیب برابر با -۰/۶۴۸ و ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی همبستگی منفی با شاخص STR و مثبت با NDVI است. مقدار معناداری که برابر با ۰/۰۰۰ می‌باشد نشان می‌دهد که بین این متغیرها رابطه‌ی خطی معناداری وجود دارد.

جدول (۸) ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص OPTRAM، سال ۲۰۱۷

OPTRAM ۲۰۱۷	NDVI ۲۰۱۷	STR ۲۰۱۷		
۰/۶۷۲*	۰/۶۷۲*	۱	همبستگی	STR ۲۰۱۷
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سطح معناداری	
۱*	۱	۰/۶۷۲*	همبستگی	NDVI
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	سطح معناداری	۲۰۱۷
۱	۱*	۰/۶۷۲*	همبستگی	OPTRAM
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	سطح معناداری	۲۰۱۷

* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.

با توجه به جدول (۸) مقدار ضریب همبستگی بین OPTRAM و شاخص‌های STR

و NDVI به ترتیب برابر با ۰/۶۷۲ و ۱ می‌باشد که نشان از رابطه‌ی بسیار قوی بین متغیرها را دارد. مقدار معناداری که برابر با ۰/۰۰۰ می‌باشد نشان می‌دهد که بین این متغیرها رابطه‌ی خطی معناداری وجود دارد.

مدل OPTRAM در سال ۲۰۱۵ همبستگی مثبتی را با متغیرهای STR و NDVI نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۰/۷۰۹ و ۱ می‌باشد. این ارقام در سال ۲۰۱۶ برای STR و NDVI به ترتیب برابر با ۰/۶۴۸- و ۱ است که نشان دهنده‌ی همبستگی منفی STR با رطوبت خاک می‌باشد؛ یعنی رطوبت خاک با افزایش STR، کاهش و با افزایش NDVI، افزایش پیدا کرده است و همبستگی مثبت مدل OPTRAM با NDVI این موضوع را تأیید می‌کند. در سال ۲۰۱۷ همبستگی مثبت شاخص‌های STR و NDVI با رطوبت خاک به ترتیب برابر با ۰/۶۷۲ و ۱ می‌باشد.

جدول (۹) ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص TOTRAM، سال ۲۰۱۵

TOTRAM ۲۰۱۵	NDVI ۲۰۱۵	LST ۲۰۱۵		
-۰/۵۷۴*	۰/۵۷۴*	۱	همبستگی	LST ۲۰۱۵
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سطح معناداری	
-۱*	۱	۰/۵۷۴*	همبستگی	NDVI ۲۰۱۵
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	سطح معناداری	
۱	-۱*	-۰/۵۷۴*	همبستگی	TOTRAM ۲۰۱۵
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	سطح معناداری	

* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.

با توجه به جدول (۹) مقدار ضریب همبستگی بین TOTRAM و شاخص‌های LST و NDVI به ترتیب برابر با ۰/۵۷۴- و ۱- می‌باشد که نشان دهنده‌ی همبستگی منفی بین متغیرها می‌باشد. مقدار معناداری که برابر با ۰/۰۰۰ می‌باشد نشان می‌دهد که بین این متغیرها رابطه‌ی خطی معناداری وجود دارد.

جدول (۱۰) ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص TOTRAM، سال ۲۰۱۶

TOTRAM ۲۰۱۶	NDVI ۲۰۱۶	LST ۲۰۱۶		
-۰/۹۷۴*	-۰/۶۰۴*	۱	همبستگی	LST ۲۰۱۶
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سطح معناداری	
۰/۴۰۹*	۱	-۰/۶۰۴*	همبستگی	NDVI ۲۰۱۶
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	سطح معناداری	
۱	۰/۴۰۹*	-۰/۹۷۴*	همبستگی	TOTRAM
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	سطح معناداری	۲۰۱۶

* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.

با توجه به جدول (۱۰) مقدار ضریب همبستگی بین TOTRAM و شاخص‌های LST و NDVI به ترتیب برابر با -۰/۹۷۴ و ۰/۴۰۹ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی همبستگی منفی با LST و مثبت با NDVI می‌باشد. مقدار معناداری که برابر با ۰/۰۰۰ می‌باشد نشان می‌دهد که بین این متغیرها رابطه‌ی خطی معناداری وجود دارد.

جدول (۱۱) ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص TOTRAM، سال ۲۰۱۷

TOTRAM ۲۰۱۷	NDVI ۲۰۱۷	LST ۲۰۱۷		
-۰/۹۴۰*	۰/۵۲۱*	۱	همبستگی	LST ۲۰۱۷
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سطح معناداری	
-۰/۷۸۷*	۱	۰/۵۲۱*	همبستگی	NDVI ۲۰۱۷
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	سطح معناداری	
۱	-۰/۷۸۷*	-۰/۹۴۰*	همبستگی	TOTRAM
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	سطح معناداری	۲۰۱۷

* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.

با توجه به جدول (۱۱) مقدار ضریب همبستگی بین TOTRAM و شاخص‌های LST و NDVI به ترتیب برابر با -۰/۹۴۰ و -۰/۷۸۷ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی همبستگی منفی بین متغیرها می‌باشد. مقدار معناداری که برابر با ۰/۰۰۰ می‌باشد نشان می‌دهد که بین این متغیرها رابطه‌ی خطی معناداری وجود دارد.

مدل TOTRAM در سال ۲۰۱۵ همبستگی منفی را با شاخص‌های LST و NDVI دارد که به ترتیب برابر با $-0/574$ و -1 می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی دقت کم این مدل نسبت به مدل OPTRAM در برآورد رطوبت خاک می‌باشد. در سال ۲۰۱۶ میزان همبستگی LST و NDVI با رطوبت خاک به ترتیب برابر با $-0/974$ و $0/409$ بوده که این مقادیر در سال ۲۰۱۷ به $-0/940$ و $-0/787$ رسیده است.

نتیجه‌گیری

در تحقیقی که (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷) انجام دادند دو محدودیت اصلی مدل TOTRAM (استفاده از باندهای حرارتی، وابسته بودن به عوامل محیطی) را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل OPTRAM می‌تواند این محدودیت‌ها را پشت سر بگذارد. در این تحقیق با توجه به محدودیت اطلاعات میدانی، بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی به استخراج رطوبت خاک اقدام گردید و مقایسه دقت دو مدل در منطقه بررسی شد که نتایج حاکی از قابل استخراج بودن رطوبت خاک از شاخص STR با دقت بالاتر نسبت به LST در فضای مثلثی NDVI می‌باشد. با توجه به هزینه‌ی پایین و در دسترس بودن تصاویر مرئی نسبت به تصاویر راداری دقت به دست آمده و همبستگی بالای مدل OPTRAM (بیشترین همبستگی برای سال ۲۰۱۵ برابر $0/709$) در برآورد رطوبت خاک مورد تأیید است. طبق نتایج استخراجی مدل OPTRAM بهتر و دقیق‌تر از مدل TOTRAM توانسته است رطوبت خاک را برآورد نماید و دلیل دقت بالای OPTRAM، تأثیرپذیری کمتر از عوامل محیطی و پارامترهای جهانی بوده است که قابلیت اجرایی و کاربردی در مناطق دارای محدودیت اطلاعات مکانی را دارد.

فشانی و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی رطوبت خاک و شاخص کمبود آب میزان ضریب همبستگی را ۹۳ درصد برآورد کردند که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای این مدل است. (کازمی پور و همکاران، ۱۳۹۶) نشان دادند که مدل رگرسیونی نقطه‌ای که با استفاده از اطلاعات هیدرولیکی خاک به دست آمده است، تطابق مناسبی بر داده‌های تجربی دارد و ضریب تبیین بالای مدل (۸۹ درصد) نشان‌دهنده‌ی دقت توابع پیشنهادی است.

منابع

- خسرویان، مریم؛ انتظاری، علی‌رضا؛ رحمانی، ابوالفضل و محمد باعقیده (۱۳۹۶)، پایش تغییرات سطح آب دریاچه‌ی پریشان با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۳، صص ۹۹-۱۲۰.
- فشائی، ثنائی‌نژاد و کامران داوری (۲۰۱۵)، تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی مودیس (مطالعه‌ی موردی: محدوده‌ی دشت مشهد)، آب و خاک، شماره ۲۹ (۶)، صص ۱۷۳۵-۱۷۴۸.
- فلاحی، غلامرضا و لقمان جمالی (۲۰۱۷)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبریز سیمینه‌رود بوکان با تلفیق مدل‌های آماری، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه‌ی اطلاعات مکانی، نشریه‌ی علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۶، شماره ۴، صص ۱۸۵-۱۹۹.
- کاظمی‌پور اسفهلان، مهسا؛ محمدی، محمدحسین و علی‌رضا واعظی (۱۳۹۷)، تخمین نقطه-ای منحنی رطوبتی خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۶، شماره ۲.
- مالیان، عباس؛ محمدی، علی؛ علی‌محمدی، عباس و جلال ولی‌اللهی (۱۳۹۵)، آشکارسازی و پایش‌بینی روند تغییرات دریاچه‌ی ارومیه و محیط پیرامونی آن طی نیم‌قرن گذشته بر پایه‌ی تحلیل‌های مکان مبنای دورکاوی، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۹، صص ۶۲-۴۳.
- Amani, M., Parsian, S., MirMazloumi, S.M. and O, Aieneh., (2016), **Two new soil moisture indices based on the NIR-red triangle space of Landsat-8 data**. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf, No. 50, PP. 176-186.
- Babaeian, E., Homae, M., Montzka, C., Vereecken, H., Norouzi, A.A., and M.T, van Genuchten, (2016), **Soil moisture prediction of bare soil profiles using diffuse spectral reflectance information and vadose zone flow modeling**, Remote Sens, Environ, No.187, PP. 218-229.
- Carlson, T.N., (2007), **An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery**, Sensors, No. 7, PP. 1612-1629.

- Carlson, T.N., (2013), **Triangle models and misconceptions**, Int. J. Remote. Sens, Appl, No. 3, PP. 155-158.
- Carlson, T.N., Gillies, R.R. and E.M, Perry., (1994), **A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover**, Remote Sens, Rev. Vol.9 ,No(1-2), PP. 161-173.
- Feng, H., Chen, C., Dong, H., Wang, J. and Q. Meng., (2013), **Modified shortwave infrared perpendicular water stress index: a farmland water stress monitoring method**, J. Appl. Meteorol. Climatol, No. 52 Vol. 9, PP. 2024-2032.
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. and V.R. Weidner., (1965) **Spectral properties of plants**, Applied optics, No. 4, Vol. 1, PP. 11-20.
- Ghulam, A., Li, Z.L., Qin, Q., Tong, Q., Wang, J., Kasimu, A. and L. Zhu, (2007), **A method for canopy water content estimation for highly vegetated surfaces-shortwave infrared perpendicular water stress index**, Sci. China Ser. D Earth Sci, No. 50 (9), PP. 1359-1368.
- Hassan. Esfahani, L., Torres-Rua, A., Jensen, A. and M. McKee., (2015), **Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks**, Remote Sens, No. 7 Vol. 3, PP. 2627-2646.
- Kornelsen K.C., and P. Coulibaly, (2015), **Reducing multiplicative bias of satellite soil moisture retrievals**, Remote Sensing of Environment, No. 165, PP. 109-22.
- Latif, M.S., (2014), **Land Surface Temperature Retrieval of Landsat-8 Data Using Split Window Algorithm-A Case Study of Ranchi District**, International Journal of Engineering Development and Research, No. 2, Vol. 4, PP. 2840-2849.
- Leroux D.J., Kerr Y.H., Al Bitar A., Bindlish R., Jackson T.J. and B. Berthelot., (2014), **Comparison between SMOS, VUA, ASCAT, and ECMWF soil moisture products over four watersheds in U.S.**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, No. 52, Vol. 3, PP.1562-1571.
- Mallick, K., Bhattacharya, B.K. and N.K. Patel., (2009), **Estimating**

volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI, Agric. For. Meteorol, No. 149 (8), PP. 1327–1342.

- McNally A., Husak G.J., Brown M., Carroll M., Funk C., Yatheendradas S., Arsenault K., Peters-Lidard C., and J.P. Verdin., (2015), **Calculating Crop Water Requirement Satisfaction in the West Africa Sahel with Remotely Sensed Soil Moisture**, Journal of Hydrometeorology, No. 16, PP. 295-305.
- Mladenova, I.E., Jackson, T.J., Njoku, E., Bindlish, R., Chan, S., Cosh, M.H., Holmes, T.R.H., DeJeu, R.A.M., Jones, L., Kimball, J. and S. Paloscia, (2014), **Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E**, Remote Sens, Environ. No. 144, PP. 197–213.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. and A.Vidal., (1994), **Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sens**, Environ, No. 49(3), PP. 246–263.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S. and S. Goward., (1993), **Developing satellite-derived estimates of surface moisture status**, J. Appl. Meteorol, No. 32m Vol. 3, PP. 548–557.
- Njoku, E.G. and D. Entekhabi., (1996), **Passive microwave remote sensing of soil moisture**, J. Hydrol, No. 184, Vol. 1, PP. 101–129.
- Ochsner, T.E., Cosh, M.H., Cuenca, R.H., Dorigo, W.A., Draper, C.S., Hagimoto, Y., Kerr, Y.H., Njoku, E.G., Small, E.E. and M. Zreda., (2013), **State of the art in large-scale soil moisture monitoring**, Soil Sci. Soc. Am. J. No. 77, Vol. 6, PP. 1888–1919.
- Pan, M., Sahoo a.K., Wood E.F., Al Bitar A., Leroux D., and Y.H. Kerr (2012), **An Initial Assessment of SMOS Derived Soil Moisture over the Continental United States**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, No. 5, PP. 1448-1457.
- Pratt, D.A. and C.D. Ellyett., (1979), **The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology**, Remote Sens, Environ, No. 8, Vol. 2, PP. 151–168.

- Qi, J., A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr and S.A. Sorooshian, (1994), **modified soil adjusted vegetation index**, Remote Sens, Environ, No. 48, PP. 119-126.
- Rahimzadeh-Bajgiran, P., Berg, A.A., Champagne, C. and K. Omasa., (2013), **Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies**, ISPRS J. Photogramm, Remote Sens, No. 83, PP. 94–103.
- Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. and O. Wendroth., (2008), **Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review**, Vadose Zone J. No. 7, Vol. 1, PP. 358–389.
- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M. and S. B. Jones., (2017), **The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations**, Remote Sensing of Environment, No. 198, PP. 52-68.
- Sadeghi, M., Jones, S.B. and W.D. Philpot., (2015), **A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands**, Remote Sens, Environ, No. 164, PP. 66–76.
- Schalie R.v.d., Kerr Y.H., Wigneron J.P., Rodríguez-Fernández N.J., Al-Yaari A., and Jeu R.A.M.d.(2016), **Global SMOS Soil Moisture Retrievals from the Land Parameter Retrieval Model**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, No. 45, PP. 125-134.
- Tian, J. and W.D. Philpot., (2015), **Relationship between surface soil water content, evaporation rate, and water absorption band depths in SWIR reflectance spectra**, Remote Sens, Environ. No. 169, PP. 280–289.
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., van der Sande, C.J., Grootaers, I. and J. Feyen., (2006), **Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests**, Remote Sens, Environ. No. 101, Vol. 3, PP. 299–314.
- Wang, L. and J.J. Qu, (2009), **Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring**, a review. Front. Earth Sci, China,

No. 3, Vol. 2, PP. 237–247.

- Weng Q, Lu D and J. Schubring, (2004), **Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies**, Remote Sensing Environ, No. 89, Vol. 4, PP. 467-483.
- Zeng J., Li Z., Chen Q., Bi H., Qiu J., and P. Zou, (2015), **Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations**, Remote Sensing of Environment, No. 163, PP. 91-110.
- Zhang, D. and G. Zhou., (2016), **Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: a review**, Sensors, No.16, Vol. 8, 1308.
- Zhang, N., Hong, Y., Qin, Q. and L. Liu., (2013), **VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing**, Int. J. Remote Sens, No. 34, Vol. 13, PP. 4585–4609.