

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۶/۱۰
تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

DOI: 10.22092/ijm.2025.366881



نامه علمی

روند تغییرات تاج پوشش رویشگاه‌های بلوط و ارتباط آن با رطوبت خاک

امین باغانی^۱، اکرم کریمی^۲، محمدرضا فدائی تهرانی^{۳*}

چکیده

رطوبت سطحی خاک، عاملی کلیدی در تعیین میزان تاج پوشش گیاهان جنگلی بوده و به دمای سطح زمین و عوامل دیگری مانند تابش نور خورشید، جهت دامنه و ... وابسته است. در این پژوهش، از فناوری سنجش از دور برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و بررسی همبستگی میزان تاج پوشش جنگلی و رطوبت خاک استفاده شد. به این منظور، با استفاده از تصاویر لندست، مدل رطوبت خاک TOTRAM و مدل میزان تاج پوشش گیاهی FCD، در ناحیه جنگلی سپیددشت استان لرستان تهیه و تصاویر لندست ۸ و ۹ به صورت سری زمانی در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ استخراج شد. در مدل FCD از چهار شاخص پوشش گیاهی، خاک، سایه و شاخص حرارتی با اعمال حد آستانه مناسب و شاخص سایه پیشرفته و شاخص سایه هم‌مقیاس شده استفاده شد. در نتایج به دست آمده، بین متغیر وابسته رطوبت و متغیرهای مستقل دما، پوشش گیاهی و تراکم جنگل، ضریب همبستگی پیرسون در سال ۲۰۱۵ برابر ۰/۸۱۳، ۰/۷۰۹ و ۰/۶۹۱ و در سال ۲۰۲۳ برابر ۰/۸۷۵، ۰/۸۱۶ و ۰/۷۰۲ به دست آمد. بنابراین، الگوی رطوبت خاک انعکاس الگوی تغییرات میزان تاج پوشش گیاهی را نشان داد و بین LST-NDVI و رطوبت خاک، همبستگی کامل مشاهده شد. به طوری که تغییر شرایط و کاهش میزان سبزی‌نگی با توجه به شاخص NDVI از مقدار ۰/۲۴ در سال ۲۰۱۵ به مقدار ۰/۱۹ در سال ۲۰۲۳ به همراه افزایش دما از ۲۹/۹۵ به ۳۳/۶۲ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش میانگین رطوبت خاک از ۵۲ به ۴۳ درصد شد. بنابر تحلیل نتایج حاصل از مدل TATRAMT، رطوبت خاک به تغییرات دما و تاج پوشش وابستگی کامل دارد.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح زمین، رطوبت خاک، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده، پوشش گیاهی.

Investigating Changes in Oak Forest Canopy and Its Relationship with Soil Moisture

A. Baghani¹, A. Karimi² and M.R. Fedai Tehrani^{3*}

Abstract

Soil surface moisture is a crucial factor in determining the extent of forest canopy cover and is influenced by land surface temperature and other factors like solar radiation and slope aspect. This study utilized remote sensing technology to quantify soil moisture and investigate its correlation with forest canopy cover. To this end, the TOTRAM soil moisture model and the FCD vegetation cover model were developed in the Sepiddasht forest area of Lorestan Province, Iran, employing Landsat 8 and 9 imagery acquired as a time series in 2015 and 2023. The FCD model incorporated four vegetation, soil, shadow, and thermal indices, along with the advanced shadow index and co-registered shadow index, utilizing appropriate thresholds. The results demonstrated a strong Pearson correlation coefficient between soil moisture (dependent variable) and temperature, vegetation cover, and forest density: 0.709, 0.813, and 0.691 in 2015, and 0.816, 0.875, and 0.702 in 2023, respectively. These findings indicate a significant relationship between soil moisture patterns and changes in vegetation cover. A strong correlation was observed between LST-NDVI and soil moisture. For example, a decrease in greenness, as evidenced by a decline in NDVI from 0.24 in 2015 to 0.19 in 2023, coupled with an increase in temperature from 29.95 to 33.62 degrees Celsius, resulted in a decrease in average soil moisture from 52% to 43%. Analysis of the results obtained from the TATRAMT model further supports the conclusion that soil moisture is highly dependent on variations in temperature and canopy cover.

Keywords: Earth surface temperature, soil moisture, normalized differential index, vegetation cover.

۱- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ایران

۳- نویسنده مسئول، استادیار و عضو هیئت علمی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران. پست الکترونیک: mfadaei@nri.ac.ir

1- Assistant professor and faculty member of the Mapping Engineering Department, Technical and Engineering Faculty, Golestan University, Iran.

2- PhD student, Faculty of Natural Resources, Malayer University, Iran.

3- *Corresponding author, Assistant professor and faculty member, Niro Research Institute, Tehran, Iran, Email: mfadaei@nri.ac.ir



● مقدمه

به عنوان یک قاعده کلی، میزان رطوبت خاک در مناطق خشک و نیمه خشک بر میزان تاج پوشش گیاهان تأثیرگذار است (Surendran et al., 2017؛ Yu et al., 2021).

رطوبت خاک در حقیقت مقدار آب ذخیره شده در ذرات خاک است و تحت تأثیر عواملی مانند بارش، دما، تابش نور خورشید، جهت دامنه و سایر مشخصات خاک است (Li et al., 2021). از ویژگی‌های شاخص زیست‌بوم‌های خشک و نیمه خشک، توزیع ناهمگن پوشش گیاهی به صورت لکه‌ای است. این ویژگی در ارتباط با الگوهای ناهمگن رطوبت خاک مرتبط با توزیع پوشش گیاهی است. خاک‌هایی با پوشش گیاهی متراکم در مقایسه با خاک‌هایی با تراکم گیاهی کم‌تر، یا خالی از پوشش، از پتانسیل بیشتری برای جذب آب و حفظ رطوبت سطح خاک برخوردارند. بنابراین، افزایش تراکم پوشش گیاهی تأثیر مثبتی بر الگوی رطوبت خاک خواهد داشت (Zhu et al., 2021). بنابر پژوهش‌های اخیر، تغییرات رطوبت خاک را می‌توان براساس تغییرات پوشش گیاهی ردیابی کرد (Niu et al., 2022).

اندازه‌گیری مقدار رطوبت موجود در سطح خاک و میزان تاج پوشش جنگلی با استفاده از دستگاه‌ها و نقاط زمینی نیاز به صرف وقت و هزینه زیاد نمونه‌گیری در مقیاس منطقه‌ای دارد. امروزه، پایش رطوبت سطح خاک و پوشش گیاهی در منطقه‌های بزرگ و در سطح حوزه به کمک علوم سنجش از دور ممکن شده است (Ambrosone et al., 2020). برآورد رطوبت خاک توسط داده‌های سنجش از دور براساس مقدار انرژی حاصل از جذب یا انعکاس رسیده به سنجنده است. ویژگی‌هایی که می‌تواند بر این انرژی تأثیر بگذارد شامل محتوای آب، خصوصیات دی‌الکتریک، زبری سطح و بافت خاک است. یکی از روش‌های تخمین رطوبت خاک در حوزه مرئی، مادون قرمز نزدیک و حرارتی، روش تشکیل فضای دوزنقه‌ای است. ارتباط بین رطوبت خاک و دمای سطح زمین کمینه

و بیشینه و شاخص پوشش گیاهی به مدل TOTRAM (Thermal-Optical Trapezoid Model) معروف است. شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش از دور برای پایش میزان سبزینگی نواحی جنگلی کاربرد بیشتری دارند (Niu et al., 2022). این شاخص‌ها از یک متغیر منفرد مانند NDVI (Normal-Difference Vegetation Index)، یا ترکیبی از این متغیرها در غالب مدل‌هایی مانند FCD (Forest Canopy Density) جهت بررسی میزان تاج پوشش جنگلی، یا مدل TOTRAM برای بررسی میزان رطوبت خاک به کار می‌روند.

مطالعات زیادی توسط پژوهشگران در زمینه تعیین تراکم پوشش گیاهی و عوامل مؤثر در آن از جمله رطوبت خاک با استفاده از داده‌های سنجش از دور انجام شده است (Bhandari, Hanson et al., and Nandy, 2023؛ Vicente-Serrano et al., 2010). Falensky و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی در منطقه Tebo Regency در استان جامبی در اندونزی کاهش سطح تاج پوشش جنگلی را با استفاده از مدل FCD و تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 OLI بررسی کردند. به عنوان نتیجه، نقشه با ۸۰ درصد صحت کلی و ضریب کاپایی معادل ۰/۷۳۲۶ گزارش شد (Falensky et al., 2020).

معین‌آزاد تهرانی و همکاران (۱۳۸۷) مدل FCD را برای تراکم جنگل‌های شمال کشور با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۷ ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، در چنین جنگل‌هایی، کارایی مدل در تفکیک جنگل بسیار انبوه، تا حدودی مناسب است. در حالی که مدل در تفکیک طبقات با تراکم پایین‌تر، دقیق عمل نمی‌کند. طایفی و آزادنژاد (۱۳۹۹) اقدام به تهیه نقشه تراکم تاج پوشش جنگل در جنگل‌های حاشیه دریای خزر با استفاده از مدل FCD طی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶ نمودند و میزان روند تغییرات تاج پوشش جنگلی را بررسی کردند. همچنین، در حیطه سنجش رطوبت خاک فرجی و کاویانی (۱۴۰۲) در پژوهشی در منطقه فاریاب از مدل‌های تخمین رطوبت خاکی TOTRAM برای سنجش و ریزمقیاس‌سازی دمای سطح زمین استفاده کردند. نتایج

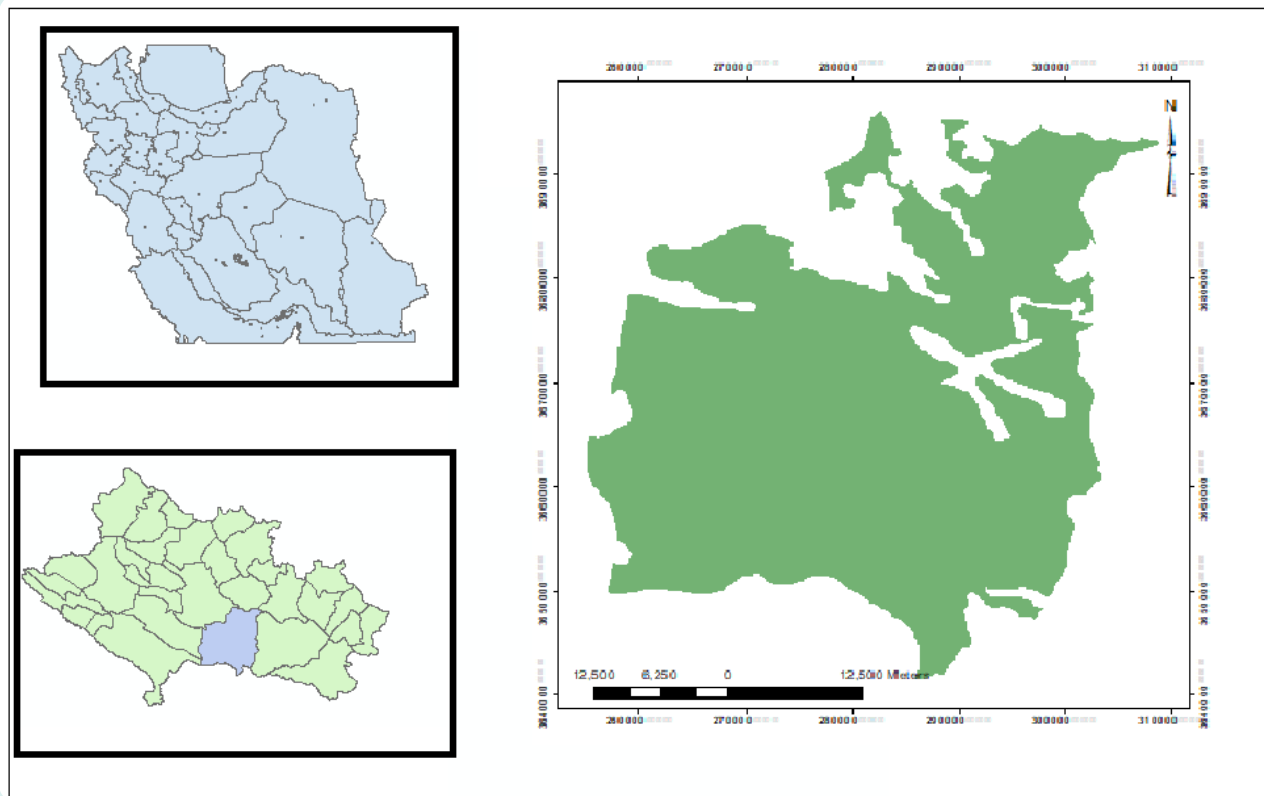
پژوهش ایشان عملکرد مناسب مدل را تأیید کرد. یوسف‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیق برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل جدید دوزنقه‌ای حوزه سیمینه رود مطالعاتی را با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۹ انجام دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند، مدل OPTRAM با ضریب همبستگی ۰/۷۰۹ بهتر و دقیق‌تر از مدل TOTRAM توانسته است رطوبت خاک را برآورد کند. به طوری که در محدوده طول موج حرارتی، می‌تواند برآورد دقیق‌تری از رطوبت خاک در نواحی فاقد داده‌های کنترل زمینی داشته باشد. در پژوهش دیگری، Ambrosone و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای سنجش رطوبت خاک در مزارع دیم و آبیاری مناطق ایتالیا بررسی‌های مسوولی انجام دادند. در این پژوهش میزان رطوبت خاک منطقه از طریق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل با استفاده از مدل دوزنقه نوری (OPTRAM) برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد، تخمین‌های OPTRAM نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری زمینی هستند.

هدف از انجام پژوهش پیش‌رو، استفاده از روش نوری حرارتی (TOTRAM) با استفاده از تصاویر لندست ۹ و ۸ برای برآورد رطوبت خاک و بررسی میزان تغییرات تاج پوشش جنگلی با استفاده از مدل FCD در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ در جنگل‌های بلوط است. منطقه مورد مطالعه، بخشی از جنگل‌های سپیددشت واقع در جنوب استان لرستان است. همه مراحل در نرم‌افزار Google Earth Engine انجام شد.

● اقدامات

الف- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، بخش جنگلی منطقه سپیددشت با مساحت بیش از ۶۰۰ هزار هکتار واقع در جنوب استان لرستان با ارتفاع متوسط ۵۰۰ متر از سطح دریا، متوسط بارندگی سالیانه ۵۲۰ میلی‌متر و طول مدت خشکی پنج ماه در سال بررسی و مطالعه شد (ویس کرمی و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین، منطقه از نظر اقلیمی، دارای آب و هوای نیمه‌مدیترانه‌ای است. حدود یک میلیون و ۲۰۰ هزار هکتار



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه، منطقه جنگلی سپیددشت در جنوب استان لرستان

ج- تبدیل درجات خاکستری به رادیانس و انعکاس

در گام اول ابتدا باید ارزش عددی پیکسل‌ها در باندهای حرارتی به رادیانس (Radiance) بین ۸ تا ۱۶ و در باندهای غیر حرارتی به انعکاس (Reflectance) بین صفر تا یک تبدیل شود. روابط ۱ و ۲ برای ماهواره لندست ۸، ۹ و ۱۲ بیتی است و مقدار عددی پیکسل‌های آن بین صفر تا ۴۰۹۵ نوسان دارد (یوسف‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸):

$$\text{رابطه (۱)} \quad L_p = ML * QCAL + AL$$

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

در این روابط L_p رادیانس، $P\lambda$ مقدار انعکاس، MP و $QCAL$ (Mult Band Reflectance) ضرایب چندگانه مخصوص هر باند، AP و AL (Reflectance Add Band) ضرایب تجمعی هر باند و تصویر مورد نظر را نشان می‌دهد. مقادیر این متغیرها، از متادیتای تصاویر قابل دستیابی است.

د- مدل دوزنقه‌ای نوری حرارتی سنتی (TOTRAM)

مدل به اصطلاح «دوزنقه» یا «مثلث» یکی از روش‌های بسیار کاربردی سنجش از راه دور برای برآورد رطوبت خاک است (Sadeghi et al., 2017). مطابق شکل ۲، مدل TOTRAM براساس توزیع پیکسل بر مبنای یک معادله خطی در فضای دمای سطح زمین (LST) و پوشش گیاهی (NDVI) است (Sadeghi et al., 2017). دامنه شاخص NDVI از ۱ تا ۱- متغیر است (رابطه ۳). مقادیر منفی نشان می‌دهند، زمین توسط ابرها، آب یا برف پوشانده شده است. مقدار صفر نشانگر وجود سنگ‌ها یا خاک‌های برهنه است و مقادیر مثبت

از مساحت استان لرستان پوشیده از جنگل است، این جنگل‌های حوزه رویشی زاگرس از باارزش‌ترین ذخایر جنگلی جهان محسوب می‌شوند. مهم‌ترین گونه گیاهی در جنگل‌های لرستان بلوط است، درختان بلوط به لحاظ زیست‌شناختی اهمیت حیاتی دارند و نقش مؤثری را در حفظ آب و خاک ایفا می‌کنند. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

ب- روش پژوهش

با توجه به مقیاس منطقه مورد مطالعه برای اندازه‌گیری تغییرات رطوبت خاک از تکنیک‌های سنجش از دور استفاده شده است. داده‌های ماهواره لندست با قدرت تفکیک مکانی متوسط ۳۰ متر استفاده شد و بسته به فرکانس، طیفی بین ۸/۴۳۳ تا ۱۲/۲ میکرومتر در طول موج‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز کوتاه و مادون قرمز حرارتی را فراهم می‌کند. برای پژوهش پیش‌رو، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ به صورت سری زمانی در دو سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ استفاده شد. تصاویر اخذ شده پس از حصول اطمینان از نبود خطاهای رایج، در محیط GEE (Google Earth Engine)، براساس محدوده مورد مطالعه، موزاییک و سپس برش داده شد. سپس تصحیحات اتمسفری با محاسبه مقدار رادیانس روی آنها انجام شد و مقادیر رادیانس به مقادیر رفلکس تنکس تبدیل شد. همچنین، برای بررسی همبستگی رطوبت حاصل از روش TOTRAM با متغیرهای LST و NDVI و مدل FCD از همبستگی پیرسون استفاده شد.



جدول ۱- ضرایب الگوریتم split windows (فیضی زاده و همکاران، ۱۳۹۴)

ارزش‌ها	ضرایب ثابت
-۲۶۸۰	C0
۳۷۸۱	C1
۱۸۳۰	C2
۳۰۰/۵۴	C3
-۲۳۸۲	C4
-۲۰۰/۱۲۹	C5
۴۰۰/۱۶	C6

شرایط اتمسفر و سطح به دست آمد که این ضرایب در جدول ۱، ارائه شده است. این الگوریتم با استفاده از رابطه ۷، LST را محاسبه می‌کند (فیضی زاده و همکاران، ۱۳۹۴):

رابطه (۷)

$$LST = TB10 + C1(TB10 - TB11) + C2(TB10 - TB11)^2 + C0 + (C3 + C4W)(1 - m) + (C5 + C6W)\Delta m$$

در این رابطه TB10 و TB11 دمای روشنایی، W مقدار بخار آب موجود و Δm اختلاف بین گسیل‌مندی سطح را نشان می‌دهد.

پس از محاسبه دمای سطح زمین و تراکم پوشش گیاهی، رطوبت خاک با استفاده از رابطه ۸، به روش مدل دوزنقه‌ای نوری حرارتی سنتی محاسبه می‌شود (فتح‌العلومی و همکاران، ۱۳۹۹):

رابطه (۸)

$$TOTRAM = \frac{(id + sdNDVI - LST)}{(id - iw + (SD = SW)NDVI)}$$

د- مدل تراکم تاج پوشش جنگلی FCD

مدل FCD، با استفاده از واکنش طیفی عوارض سطح زمین، تراکم جنگل را محاسبه می‌کند. در مدل FCD نیاز به باند حرارتی و شاخص حرارتی است، که از تصاویر ماهواره لندست ۸ و ۹ استفاده شده است. اجرای مدل FCD دارای ۷ مرحله است. این ۷ مرحله شامل نرمالیزه نمودن تصویر، تهیه شاخص پوشش گیاهی و شاخص گیاهی پیشرفته، تهیه شاخص خاک بایر، تهیه شاخص حرارتی، تهیه شاخص سایه و شاخص سایه پیشرفته و تهیه نقشه مدل است. همه مراحل در محیط GEE انجام شد. ابتدا، برای بررسی صحت هندسی و رادیومتریک تصاویر تمامی باندها به جز باند حرارتی با استفاده از روابط خطی زیر نرمالیزه شد. رابطه (۹)

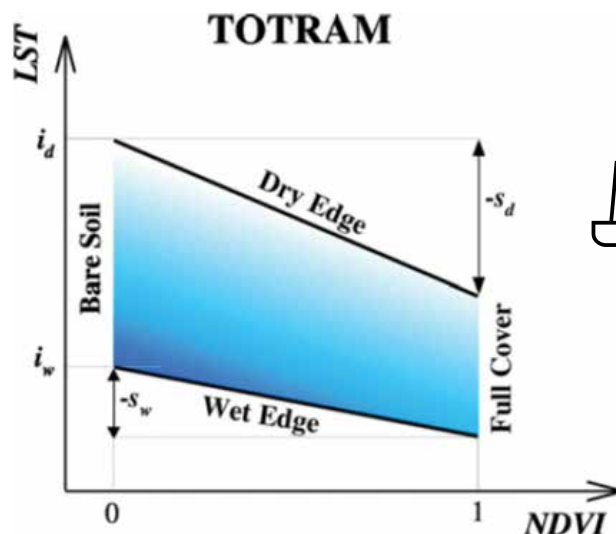
$$X1 = M - 2S, X2 = M + 2S$$

$$Y1 = 20, Y2 = 220$$

$$A = \frac{Y1 - Y2}{X1 - X2} + \frac{20 - 220}{(M - 2S) - (M + 2S)} = \frac{50}{S} \dots$$

$$B = -AX1 + Y1$$

$$Y = AX + B$$



شکل ۲- پارامترهای مدل TOTRAM (Sadeghi et al., 2017)

وجود پوشش گیاهی را نشان می‌دهد (Sadeghi et al., 2017). روابط سه تا هشت مراحل محاسبه رطوبت به روش TOTRAM است. همه مراحل در نرم‌افزار Google Earth Engine انجام شد

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه NIR بازتاب امواج الکترومغناطیس در بازتاب امواج باند مادون قرمز نزدیک و RED بازتاب امواج الکترومغناطیس در باند مادون قرمز است.

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_l - \theta_w} = \frac{LST_d - LST}{LST_d - LST_w} \quad \text{رابطه (۴)}$$

W مقدار رطوبت خاک نرمال‌شده، θ_d حداقل مقدار رطوبت خاک خشک در شرایط عادی، θ_w حداکثر مقدار رطوبت خاک مرطوب در شرایط عادی، LST_w و LST_d به ترتیب مربوط به دمای سطح خاک خشک و مرطوب هستند که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$LST_d = id + sd NDVI \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$LST_w = iw + sw NDVI \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این روابط id و sd به ترتیب مربوط به بیشترین دمای سطح زمین و کمترین تراکم پوشش گیاهی و iw و sw به ترتیب کمترین دمای سطح زمین و بیشترین تراکم پوشش گیاهی را نشان می‌دهند. در تصاویر لندست ۸ و ۹ باندهای ۱۰ و ۱۱ به عنوان باند حرارتی تعریف شده است و برای برآورد دمای سطح زمین قابل استفاده هستند. در مطالعه پیش‌رو برای استخراج نقشه دما از الگوریتم پنجره مجزا استفاده شد که براساس تفاوت رفتار جذب اتمسفری در محدوده ۱۰ تا ۱۲/۵ میکرومتر عمل می‌کند. این الگوریتم یکی از روش‌های با دقت بالا در برآورد دمای سطح زمین به حساب می‌آید که در این مطالعه با توجه به در دسترس نبودن یک پایگاه داده برای اندازه‌گیری LST با لندست ۸ و ۹، ضرایب C از طریق شبیه‌سازی با اعداد مختلف از

هر پیکسل روی زمین بر حسب درجه کلون است که در نهایت به درجه سانتی‌گراد تبدیل واحد می‌شود (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴):
رابطه (۱۴)

$$l = l_{min} + \left\{ \frac{(l_{max} - l_{min})}{255} \right\} \times Q$$

$$T = \frac{K2}{\ln \frac{K1}{L} + 1}$$

$$K1 = 666.09 \frac{WATTS}{M^2 Ster.am}$$

$$K2 = 1282.71 (\text{kelvin})$$

$$l_{min} = 0.1238 \frac{WATTS}{M^2 Ster.am}$$

$$l_{max} = 1.500 \frac{WATTS}{M^2 Ster.am}$$

در این روابط Q مقدار عددی پیکسل در باند، T6 درجه حرارت زمینی بر حسب کلون، K1 و K2 ثابت‌های مربوط به تنظیم سیستم سنجنده و L مقدار رادیانس برگشتی در باند مادون قرمز حرارتی است. در این پژوهش، پس از استخراج شاخص سایه و شاخص حرارتی، با تلفیق این دو شاخص و اعمال آستانه مناسب، مناطق فاقد پوشش گیاهی استخراج شد.

ط - شاخص سایه پیشرفته

(ASI: Advanced Shadow Index)

برای اینکه خطای ناشی از مناطق فاقد پوشش گیاهی و در نظر گرفتن سایه ناشی از عوارضی نظیر کوه‌ها به عنوان سایه تاج پوشش درختان جنگلی کاهش یابد، با انجام آستانه گذاری، شاخص سایه پیشرفته قابل محاسبه است. دستیابی به این شاخص با سه گام پردازش مکانی، آشکار نمودن فضای خالی جنگل و در نهایت آشکار سازی مناطق خاک بایر انجام شد.

ی - شاخص سایه هم‌مقیاس شده

(SSI: Shadow Scaled Index)

شاخص سایه تغییر مقیاس داده شده تبدیل خطی شاخص سایه پیشرفته ASI است که مقادیر آن را از صفر تا ۱۰۰ مرتب می‌کند. SSI= 100 بیانگر وجود حداکثری در میزان تاج پوشش بوده و در مقابل SSI= 0 بیانگر کمترین میزان تاج پوشش جنگلی در منطقه مورد مطالعه است. با توسعه شاخص SSI به راحتی می‌توان تفاوت بین گیاهان تاج پوشش‌دار را با گیاهان موجود روی زمین دریافت.

ک - شاخص تراکم گیاهی

(VD: Vegetation Density)

در شرایطی که شاخص‌های VI و BI همبستگی منفی بسیار بالایی

در این رابطه مقدار 1Y مقدار عددی DNmin و مقدار 2Y مقدار عددی DNmin است. همچنین، M مقدار میانگین، S انحراف معیار داده‌ها، Y مقادیر عددی نرمال و X مقادیر عددی تصویر اولیه در هر باند را نشان می‌دهد. این محاسبات برای تمام باندها انجام شد، ابتدا میانگین و انحراف معیار باندها استخراج و سپس با تبدلات خطی بالا و جایگزینی در فرمول مربوطه تمام باندها به جز باند حرارتی نرمال شد.

ه - شاخص گیاهی پیشرفت

(AVI: Advanced Vegetation Index)

شاخص گیاهی NDVI به دلیل ناتوانی در حذف اثرهای بازتاب پس‌زمینه خاک در تعیین میزان تراکم پوشش گیاهی از دقت کافی برخوردار نیست. به همین دلیل در مدل FCD از شاخص دیگری به نام شاخص AVI استفاده می‌شود که نسبت به تراکم پوشش گیاهی حساس‌تر است و مطابق روابط زیر تعریف می‌شود (فتح‌العلومی و همکاران، ۱۳۹۹):
رابطه (۱۰)

$$b4 - b3 < 0 \Rightarrow AVI = 0$$

$$b4 - b3 > 0 \Rightarrow AVI = \frac{(b4 + 1)(256 - b3)(b4 - b3)^{1.3}}{255}$$

و - شاخص خاک لخت

(AVI: Advanced Vegetation Index)

از این شاخص برای مشخص نمودن نواحی فاقد پوشش گیاهی استفاده می‌شود. اساس آن تأثیر متقابل خاک بدون پوشش و پوشش‌دار استوار است. این شاخص از اطلاعات باند مادون قرمز میانی برای جداسازی پوشش گیاهی از دیگر پوشش‌ها استفاده می‌کند که از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$BI = \frac{(b5 - b3) - (b4 - b1)}{(b5 + b3) + (b4 + b1)} \times 100 + 100 \quad (12)$$

ز - شاخص سایه گیاهان

(SI: Shadow Index)

یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین شاخص‌ها در تعیین میزان تراکم تاج پوشش جنگلی، شاخص سایه گیاهان است. این شاخص در جنگل‌های جوان و تقریباً مسطح مقدار کمتری را در مقایسه با جنگل‌های رشد یافته و قدیمی از خود نشان می‌دهد و مقدار آن از رابطه ۱۳ به دست می‌آید:

$$si = \sqrt[3]{(256 - b1)(256 - b2)(256 - b3)} \quad (13)$$

ح - شاخص حرارتی

(TI: Thermal Index)

برای تهیه نقشه FCD منطقه مورد مطالعه تهیه شاخص حرارتی TI مورد نیاز است. این شاخص با استفاده از داده‌های حرارتی در باند ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آید و خروجی آن از طریق رابطه ۱۴، در واقع، دمای



دارند، با ترکیب آنها و روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، شاخص تراکم گیاهی به دست می‌آید. برای تهیه این شاخص ابتدا این دو شاخص با هم ترکیب و سپس مؤلفه اول این ترکیب به‌عنوان تراکم گیاهی استفاده شد. همانند شاخص سایه مقیاس داده شده، مقادیر این شاخص نیز از ۰ تا ۱۰۰ مرتب شد. مدل FCD از رابطه زیر محاسبه می‌شود (فتح‌العلومی و همکاران، ۱۳۹۹) (رابطه ۱۵)

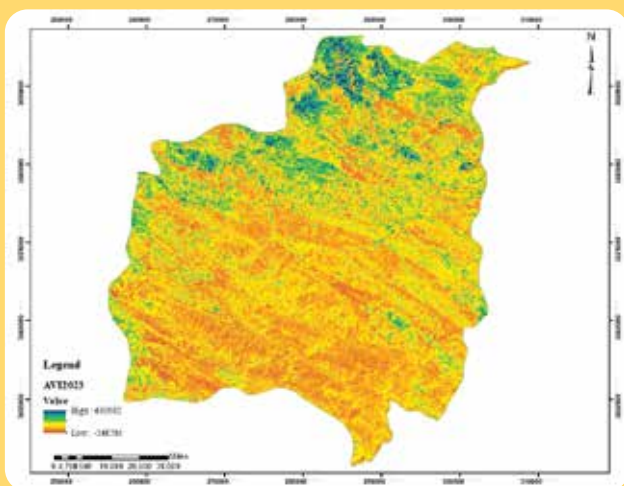
$$FCD = (VD \times SSI)^{1.2-1}$$

● یافته‌ها

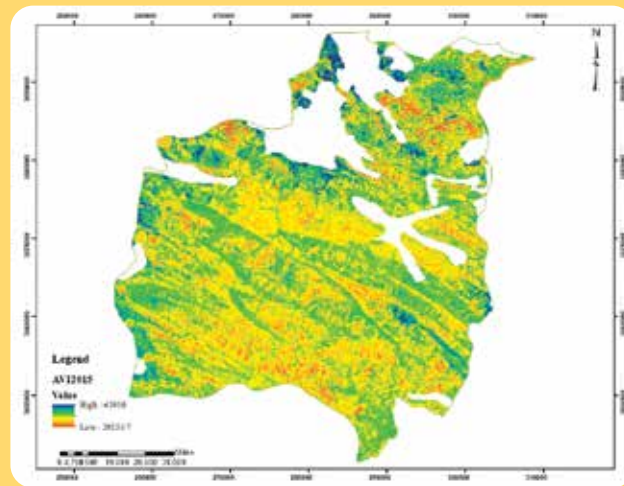
مدل تاج‌پوشش جنگلی (FCD)

مطابق شکل ۳، با استفاده از روابط ارائه شده، شاخص گیاهی پیشرفته (AVI)، شاخص زمین بایر (BI) از منطقه مورد نظر و شاخص حرارتی (TI) به‌صورت میانگین برای سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ تهیه شد. سپس تصویر شاخص سایه پیشرفته (ASI)، شاخص سایه هم‌مقیاس‌شده (SSI) و شاخص تراکم پوشش گیاهی (VD) ایجاد

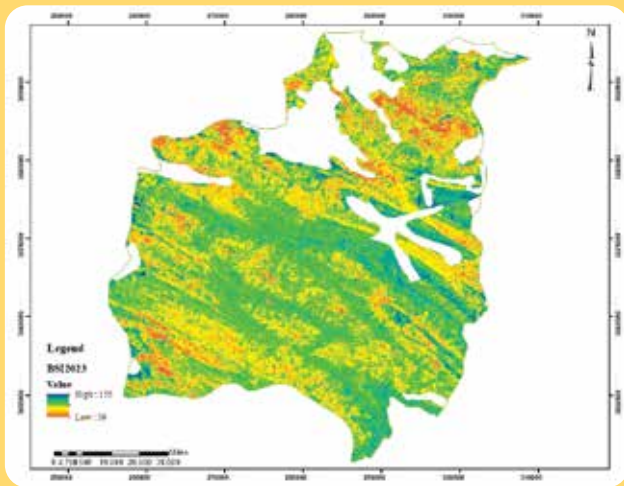
شد. در نهایت، مطابق شکل ۴، نقشه انبوهی تاج‌پوشش گیاهی FCD با استفاده از شاخص‌های سایه و تصویر تراکم گیاهی که مقادیر هر یک آنها از ۰ تا ۱۰۰ مرتب شده بود، برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ حاصل شد. پس از به‌دست‌آوردن نقشه FCD نتایج حاصل با نقشه مرجع منطقه، که در آن طبقه انبوهی کلیه طبقه‌ها مشخص شده است، مقایسه شد و از این مقایسه ماتریس خطایی به‌صورت جدول ۲ به دست آمد. در این مرحله دقت کلی برای سال ۲۰۱۵، ۷۹/۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۶۸ و دقت کلی برای سال ۲۰۲۳، ۷۳/۴ درصد و ضریب کاپا ۰/۶۳ به دست آمد. طبقه تاج‌پوشش ۲۵-۵۰ درصد دارای بیشترین صحت تولیدکننده هستند در حالی که، کمترین میزان صحت تولیدکننده به طبقه بایر مربوط می‌شود. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت، هرچند کارایی مدل در تفکیک جنگل نیمه‌انبوه تا انبوه مناسب است، در تفکیک طبقات با تراکم پایین و بدون پوشش، دقیق عمل نمی‌کند. در پژوهش‌های مشابه (شاهولی کوه‌شور و همکاران، ۱۳۹۱؛ معین آزاد تهرانی، ۱۳۸۷) در جنگل‌های غرب کشور به نتایج مشابهی



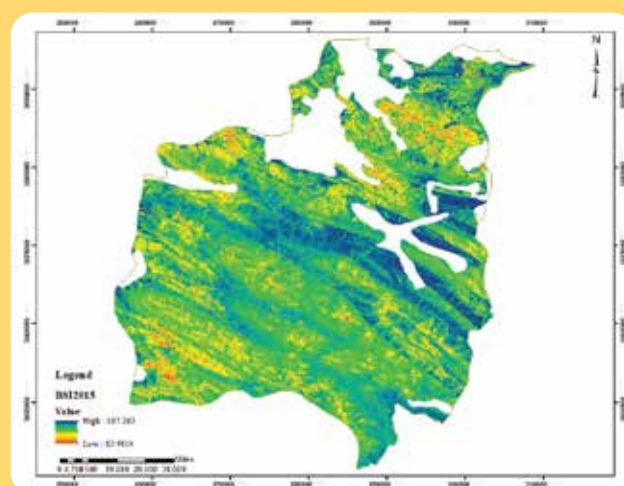
(ب)



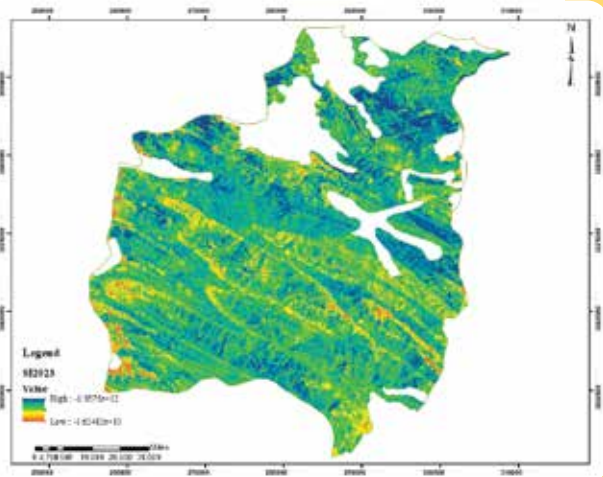
(الف)



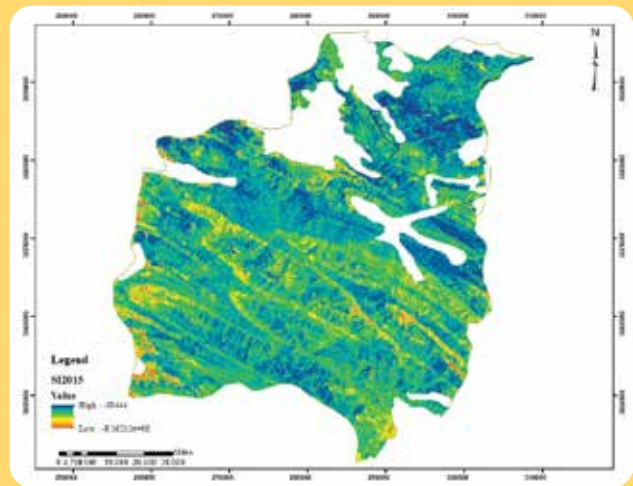
(د)



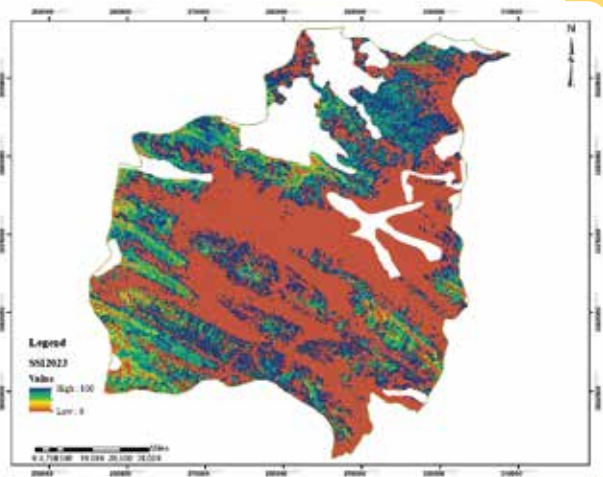
(ج)



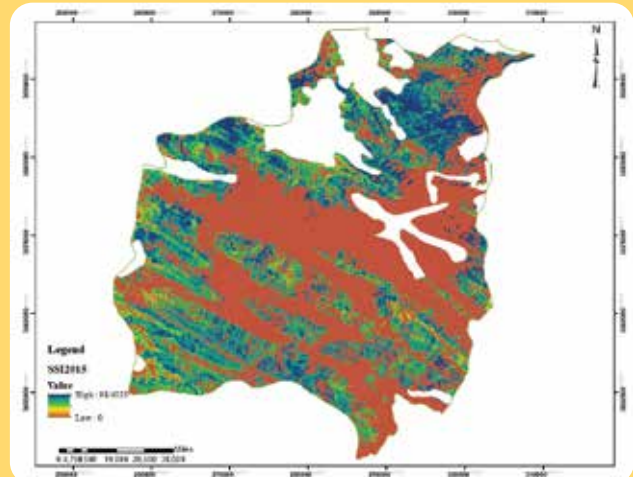
(و)



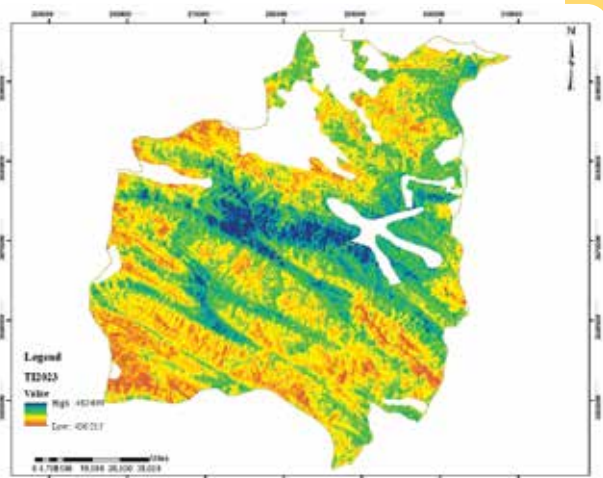
(هـ)



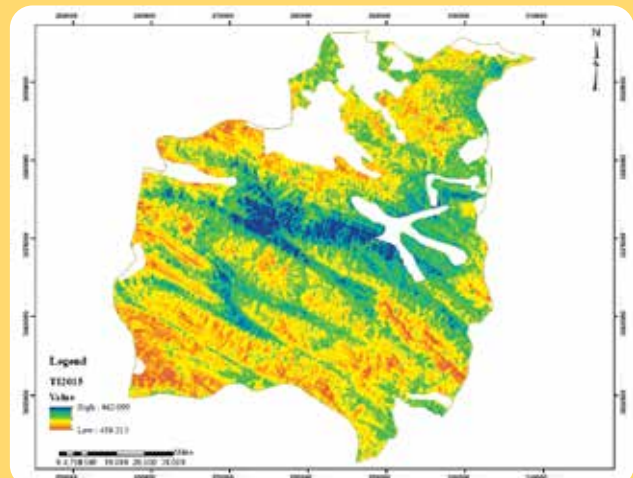
(ج)



(ز)



(ی)



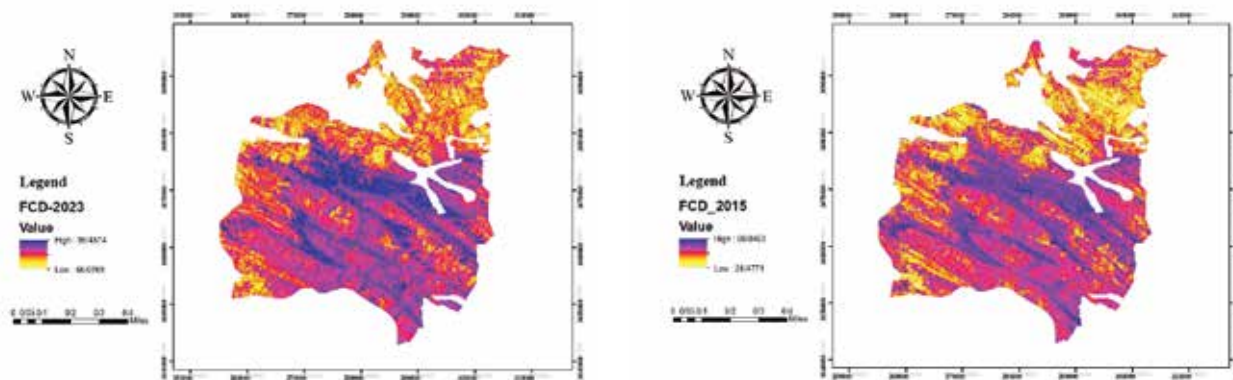
(ط)

شکل ۳- الف) شاخص گیاهی پیشرفته (AVI) سال ۲۰۱۵، ب) شاخص گیاهی پیشرفته (AVI) سال ۲۰۲۳، ج) شاخص زمین بایر (BI) سال ۲۰۱۵، د) شاخص زمین بایر (BI) سال ۲۰۲۳، هـ) شاخص سایه گیاهان (ASI) سال ۲۰۱۵، و) شاخص سایه گیاهان (ASI) سال ۲۰۲۳، ز) شاخص سایه هم‌مقیاس‌شده (SSI) سال ۲۰۱۵، ح) شاخص سایه هم‌مقیاس‌شده (SSI) سال ۲۰۲۳، ط) شاخص حرارتی (TI) سال ۲۰۲۳، ی) شاخص حرارتی (TI) سال ۲۰۱۵



و شاخص سایه استفاده میکند. Sani et al. (2007) Ahmadi و عبداللهی و شتایی جویباری (۱۳۹۱) و عبداللهی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعاتی در جنگل‌های زاگرس با استفاده از الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی نظارت‌شده، نقشه تراکم تاج پوشش در جنگل‌های بلوط را تهیه کردند و به صحت‌های کلی حدود ۷۸ درصد دست پیدا کردند.

دست یافتند و در مطالعه خود این موضوع را تأیید کردند که بیشترین میزان صحت، مربوط به طبقه جنگل بسیار انبوه (۷۵-۱۰۰ درصد) و پایین‌ترین میزان صحت تولیدکننده نیز به طبقات بایر جنگل مربوط می‌شود. این مدل برای برآورد دقیق‌تر وضعیت پوشش جنگلی، از شاخص خاک بدون پوشش



شکل ۴- نقشه تراکم پوشش گیاهی (FCD)، (الف) سال ۲۰۱۵، (ب) سال ۲۰۲۳

جدول ۲- نتایج برآورد صحت حاصل از طبقه‌بندی

صحت مدل FCD2023	صحت مدل FCD2015	صحت تولیدکننده	طبقه (درصد)
-	-	-	۰ تا ۵
۸۷/۵۲	۷۸/۶۴	۱۴/۴۳	۵ تا ۲۵
۱۳/۵۱	۶۲/۴۵	۹۴/۶۷	۲۵ تا ۵۰
۴۶/۶۳	۴۲/۶۸	۰۲/۷۱	۵۰ تا ۷۵
۵۴/۴۰	-	۱۸/۴۲	۷۵ تا ۱۰۰
FCD2015	Overall Accuracy = 79.307%	Kappa Coefficient = 0.68	
FCD2023	Overall Accuracy = 73.451%	Kappa Coefficient = 0.60	

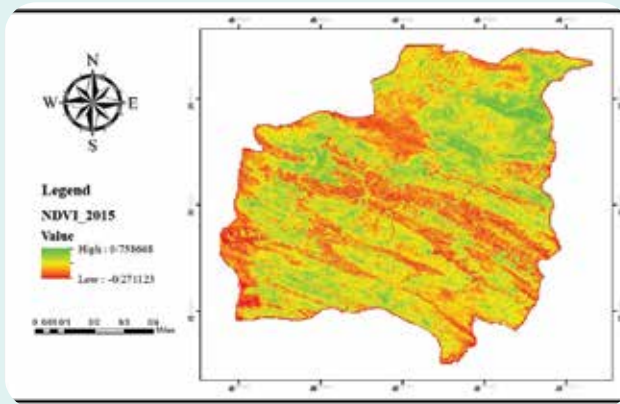
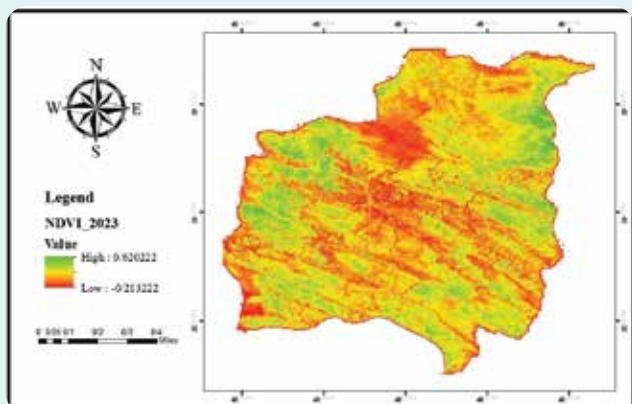
شد و در نهایت، نقشه رطوبت خاک با مدل OTRAM در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ ترسیم شد. شکل ۵، میانگین سالانه شاخص پوشش گیاهی NDVI و شکل ۶، دمای سطح زمین در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ را نشان می‌دهند.

● تخمین رطوبت خاک با روش TOTRAM با استفاده از روابط ارائه شده، شاخص گیاهی (NDVI)، شاخص کمینه و بیشینه دمای سطح زمین (LST) و مقدار رطوبت خاک نرمال شده (W)، به صورت میانگین برای سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ تهیه

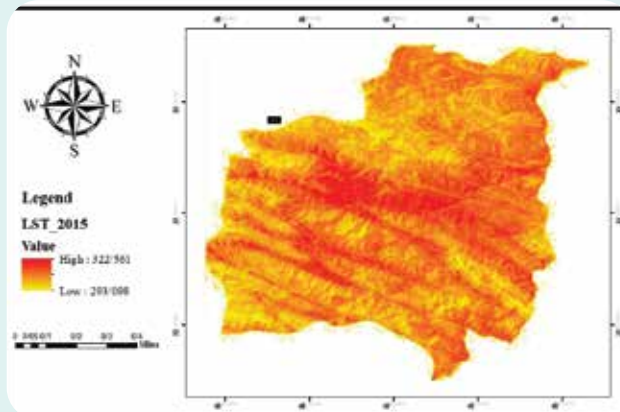
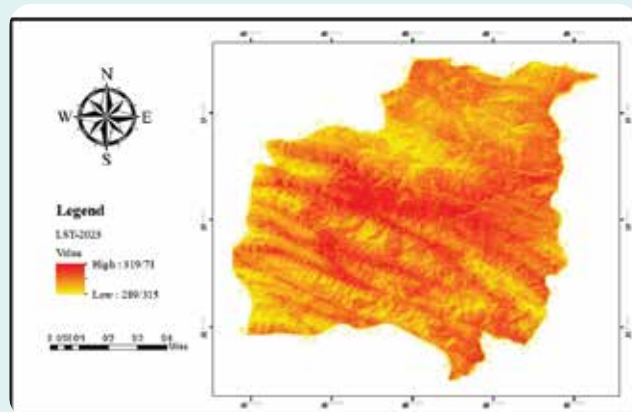
جدول ۳- معادلات رگرسیون خطی به دست آمده از فضای مثلثی NDVI-LST برای TOTRAM

شاخص	سال	لبه خشک (LST _d)	R ²	لبه تر (LST _w)	R ²
TOTRAM	۲۰۱۵	Y=-219.27NDVI+38.176	۰/۹۱	Y=-73.336NDVI+9.823	۰/۸۴
	۲۰۲۳	Y=-93.878NDVI+83.54	۰/۹۷	Y=-27.09NDVI+140	۰/۷۹

مأخذ: یافته‌های تحقیق



شکل ۵- میانگین شاخص پوشش گیاهی سالانه (NDVI)، (الف) سال ۲۰۱۵، (ب) سال ۲۰۲۳

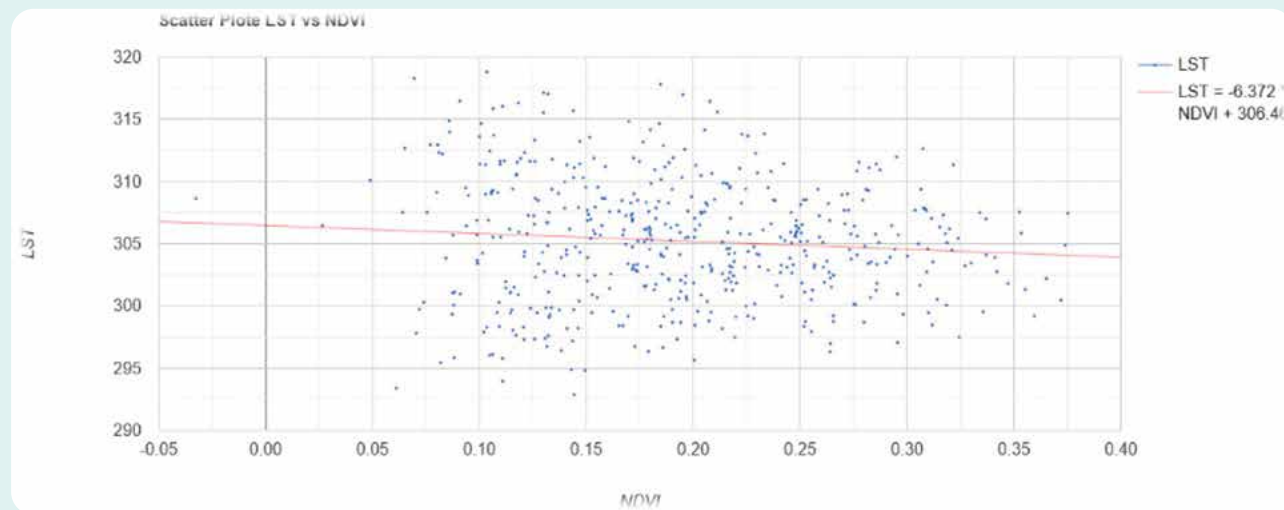


شکل ۶- میانگین شاخص دمای سطح زمین سالانه (LST)، (الف) سال ۲۰۱۵، (ب) سال ۲۰۲۳

● رابطه بین نقشه دمای زمین LST با شاخص گیاهی NDVI

مرطوب و نیمه مرطوب در فصول سرد، به دلیل وجود پوشش گیاهی قدرت نفوذ بیشتری داشته و به دلیل وجود لاش برگ قدرت نگهداری آب در خاک بیشتر است. همچنین، نسبت کربن آلی خاک نسبت به مواد معدنی نقش مهمی در جذب و بازتاب انرژی خورشید دارد، به طوری که با افزایش ماده آلی، رنگ خاک تیره تر میشود و نسبت جذب انرژی خورشید افزایش می یابد. ضمن آنکه در فصول رشد نیز در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب تراکم پوشش گیاهی بر بازتاب طیفی خاک و در نتیجه دمای سطح زمین تأثیر گذاشته است.

مطابق شکل ۷، برای تعیین رابطه بین دو شاخص، تعداد ۵۰۰ نقطه تصادفی در سطح منطقه در نظر گرفته شد که بیانگر رابطه میان این دو شاخص است. نزولات آسمانی در مناطق



شکل ۷- ارتباط بین دمای سطح زمین و پوشش گیاهی

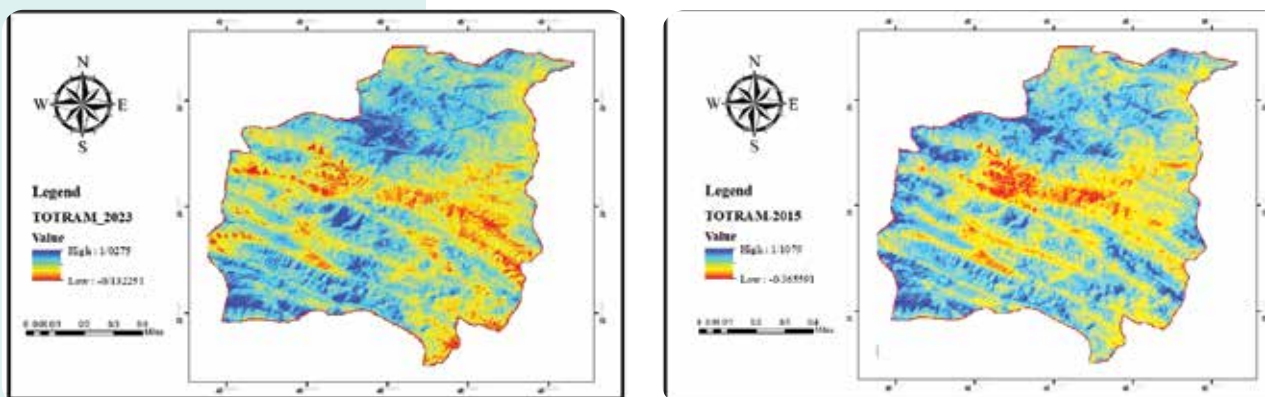


● میزان رطوبت با استفاده از مدل TOTRAM

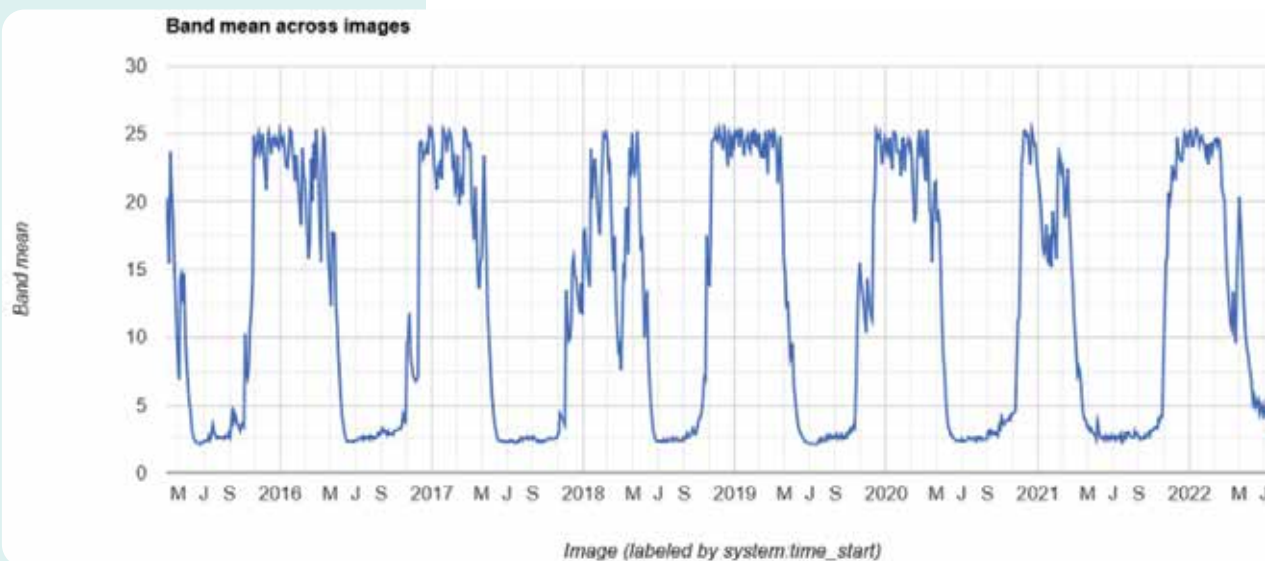
شکل ۸، نقشه‌های مرتبط با رطوبت خاک را با استفاده از روش TOTRAM در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، پوشش گیاهی در سال ۲۰۱۵، متراکم‌تر است و عدد ۷۴/۱۵ درصد را نشان می‌دهد و میانگین میزان رطوبت در سال ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۱۵ کاهش داشته است و از ۵۲ درصد در سال ۲۰۱۵ به ۴۳ درصد در سال ۲۰۲۳ کاهش داشته است. در مورد سال ۲۰۱۵ نیز در مناطقی با حضور پوشش گیاهی و به‌ویژه پوشش گیاهی متراکم میزان رطوبت نیز افزایش داشته، به طوری که بالاترین مقدار

پوشش گیاهی، عددی برابر ۴۵/۹۵ درصد بوده است و بیشترین میزان رطوبت خاک نیز در این مناطق مشاهده شده است. مطابق شکل ۹، مدل‌سازی رطوبت خاک با کمک مدل TOTRAM نشان داد، میزان این شاخص در طول زمان و مکان دارای تغییرات فراوان است و تغییرات فصلی نقش مهمی بر همبستگی رطوبت خاک، دمای سطح زمین و NDVI داشته است. به طوری که در فصل‌های سرد سال نسبت به فصل تابستان مقدار این شاخص بیشتر است. در اوایل فصل رویش به دلیل تراکم و سبزی‌نگی گیاهان، تأثیر خاک زمینه بر شاخص گیاهی NDVI و مقدار LST بیشتر بوده است و به دلیل نبود بارش تابستان ارتباط

میان شاخص یادشده و رطوبت ضعیف می‌شود که بیانگر تأثیرپذیری این شاخص از پوشش گیاهی زمین است. بررسی مدل‌های پردازش‌شده نشان داد، میزان همبستگی بین نقشه‌های رطوبت خاک و تاج‌پوشش گیاهی و به‌طور کلی از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۲۳ در مناطقی که کاهش میزان تاج‌پوشش جنگلی رخ داده، کاهش رطوبت به علت افزایش تبخیر و تعرق ایجاد شده است. در مناطقی که افزایش میزان تاج‌پوشش جنگلی اتفاق افتاده، افزایش میانگین رطوبت نیز مشاهده شده است. Das و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی به نتایج مشابه پژوهش کنونی رسیدند. جدول ۴، نشان‌دهنده حداقل و حداکثر دمای



شکل ۸- نقشه میانگین رطوبت خاک سالانه (TOTRAM)، الف) سال ۲۰۱۵، ب) سال ۲۰۲۳

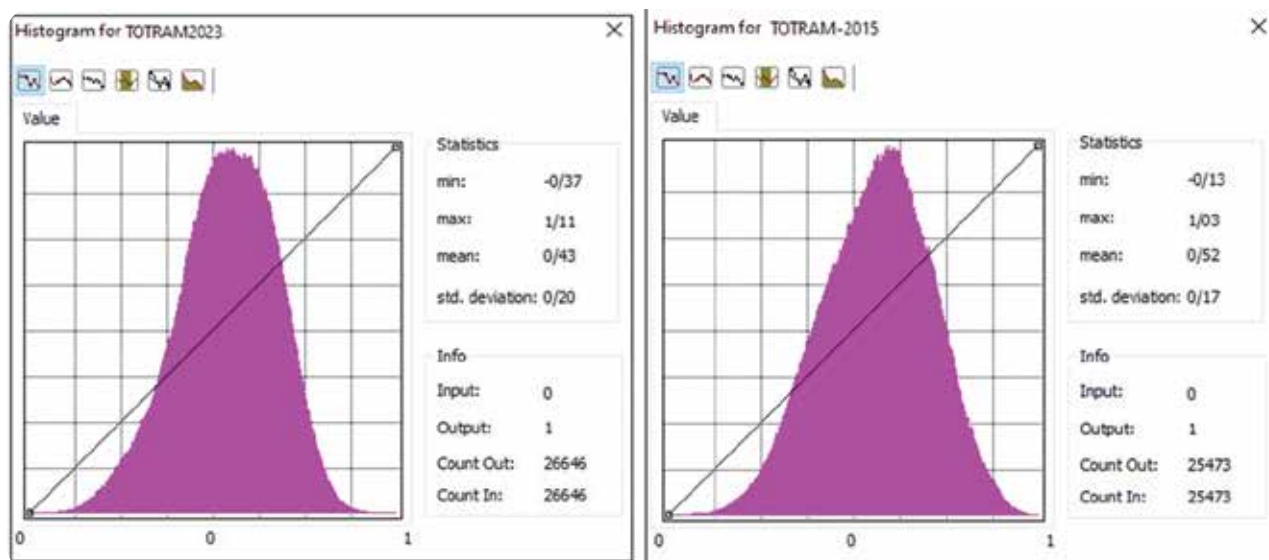


شکل ۹- نوسانات رطوبت خاک طی سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۲۳

جدول ۴- اطلاعات آماری مدل‌ها و شاخص‌های استفاده‌شده

انحراف معیار	بیشینه	کمینه	میانگین	
۰/۸۰	۶۳/۰	-۲۳/۰	۱۹/۰	Ndvi2023
۰/۸۰	۷۶/۰	-۲۷/۰	۲۴/۰	Ndvi2015
۸۹/۳	۴۱/۴۹	۹۵/۱۹	۶۲/۳۳	Lst2023
۴۱/۴	۶۳/۴۶	۱۷/۱۶	۹۵/۲۹	Lst2015
۲۰/۰	۰۳/۱	-۱۳/۰	۵۲/۰	TATROM2015
۱۷/۰	۱۱/۱	۳۷/۰	۴۳/۰	TOTRAM2023
۸۷/۴	۰۴/۵۷	۴۷/۲۴	۷/۵۱	FCD2023
۸۰/۱۶	۴۵/۹۵	۰۷/۶۶	۱۵/۷۴	FCD2015

مأخذ: یافته‌های تحقیق



شکل ۱۰- هیستوگرام مدل TOTRAM، الف) سال ۲۰۱۵، ب) سال ۲۰۲۳

خاک هستند. در پژوهشی مشابه، فتح‌العلمی و همکاران (۱۳۹۹) نیز رابطه قوی بین رطوبت و LST را گزارش کردند و دلیل این امر را کاهش بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک موج مرئی با افزایش رطوبت خاک عنوان کردند. در پژوهش مشابه دیگر، فرجی و کاویانی (۱۴۰۲) به بررسی رطوبت خاک با استفاده از مدل TOTRAM جهت ریزمقیاس‌سازی داده‌های مودیس با استفاده از LST حاصل از ماهواره لندست پرداخت و به

پیرسون را برای سنجش میزان همبستگی بین متغیر وابسته رطوبت خاک و متغیرهای مستقل LST و FCD و NDVI نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، شاخص NDVI به‌ترتیب با مقادیر ۰/۸۱۳ و ۰/۸۷۵ به‌ترتیب در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ بیشترین همبستگی را نسبت به پارامتر وابسته رطوبت نشان داده است و بعد از آن شاخص LST به‌ترتیب با مقادیر ۰/۷۰۶ و ۰/۸۱۹ دارای همبستگی زیادی با مقادیر رطوبت

سطح زمین و پوشش گیاهی مرتبط با میانگین سالانه در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ است که کاهش پوشش گیاهی و افزایش میزان دمای سطح زمین را در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. شکل ۱۰، نشان‌دهنده حداقل و حداکثر رطوبت خاک مرتبط با میانگین سالانه در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ است که کاهش میزان رطوبت را در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد جدول ۵، نتایج حاصل از ضریب همبستگی



جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون برای شاخص TOTRAM

FCD2015	TOTRAM2015	NDVI2015	LST2015		
۰/۵۷۴	۰/۷۰۹	* ۰/۷۶۵	۱	همبستگی	LST2015
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	معناداری	
۰/۶۳۲	۰/۸۱۳	۱	۰/۷۶۵	همبستگی	NDVI2015
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	معناداری	
۰/۶۹۱	۱	۰/۸۱۳	۰/۷۰۹	همبستگی	TOTRAM2015
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	معناداری	
۱	۰/۶۹۱	۰/۶۳۲	۰/۵۷۴		FCD2015
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	معناداری	
FCD2023	TOTRAM2023	NDVI2023	LST2023		LST2023
۰/۵۸۴	۰/۸۱۶	۰/۶۳۴	۱	همبستگی	
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	معناداری	NDVI2023
۰/۶۷۴	۰/۸۷۵	۱	۰/۶۳۴	همبستگی	
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۸۷۵	۰/۸۱۶	معناداری	TOTRAM2023
۰/۷۰۲	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	همبستگی	
۰/۰۰۰	۰/۷۰۲	۰/۴۷۴	۰/۵۸۴	معناداری	FCD2023
۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	همبستگی	

* همبستگی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار است. مأخذ: یافته‌های تحقیق

به نتایج مشابهی با نتایج به دست آمده در پژوهش پیش رو دست یافت. با توجه به جدول ۵ مقدار ضریب همبستگی بین TOTRAM و مدل FCD در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۷۰۲ است که نشان دهنده همبستگی زیاد بین متغیرهای طوبیت خاک و میزان تاج پوشش جنگلی است.

منابع

امین املشی، م. و میرآخورلو، خ. ۱۳۹۸. ارزیابی سطح و تراکم تاج پوشش جنگل‌های استان گیلان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۷ (۱): ۱۰۰-۱۱۱. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2019.119185>

شاهولی کوه‌شور، ا.، پیراوقار، م. و فاتحی، پ. ۱۳۹۱. تهیه نقشه تراکم تاج پوشش جنگل در جنگل‌های نیمه انبوه تا تنک با استفاده از مدل FCD (مطالعه موردی: جنگل‌های مریوان). کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی، ۳ (۳): ۷۳-۸۳.

طایفی فیجانی، م. و آزادزاد، س. ۱۳۹۹. ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه گذاری

تاج پوشش گیاهی متغیر است. تغییر شرایط و کاهش میزان سبزیگی با توجه به شاخص NDVI از مقدار ۰/۲۴ در سال ۲۰۱۵ به مقدار ۰/۱۹ در سال ۲۰۲۳ به همراه افزایش دما از ۲۹/۹۵ درجه سانتی‌گراد به ۳۳/۶۲ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۲۳ سبب کاهش میانگین رطوبت خاک از ۵۲ درصد در سال ۲۰۱۵ به ۴۳ درصد در سال ۲۰۲۳ شده است. مؤلفه LST با تأثیری که بر میزان تبخیر آب از سطح خاک دارد، منجر به کاهش رطوبت می‌شود. همچنین، تأثیر پوشش گیاهی به دلیل اینکه مانعی در مقابل تبخیر و تعرق به‌شمار می‌رود، در حفظ رطوبت خاک، در پژوهش پیش رو نیز تأیید شد، به طوری که با کاهش میزان سطح و تراکم پوشش گیاهی، کاهش رطوبت در سال ۲۰۲۳ مشاهده شد. با توجه به نتایج تحلیل‌های انجام شده، ضرایب همبستگی، بین متغیر دما و سبزیگی گیاه و میزان تراکم تاج پوشش جنگلی و رطوبت ارتباط بیشتری مشاهده شد. با توجه

نتایج مشابهی با نتایج به دست آمده در پژوهش پیش رو دست یافت. با توجه به جدول ۵ مقدار ضریب همبستگی بین TOTRAM و مدل FCD در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۷۰۲ است که نشان دهنده همبستگی زیاد بین متغیرهای طوبیت خاک و میزان تاج پوشش جنگلی است.

نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از تصاویر لندست ۱ و ۲ و مدل تاج پوشش، رطوبت خاک در منطقه جنگلی واقع در استان لرستان بررسی شد. برای برآورد رطوبت خاک و تاج پوشش جنگلی با استفاده از تصاویر اپتیک، از چهار شاخص رطوبتی مختلف استفاده شد تا بهترین نتیجه حاصل شود. تحلیل نتایج حاصل از مدل TATRAM نشان داد، رطوبت خاک تحت تأثیر افزایش یا کاهش دما و افزایش، یا کاهش

- geoderma.2021.115122
- Niu, X., Chen, Z., Pang, Y., Liu, X., and Liu, S., 2022. Soil moisture shapes the environmental control mechanism on canopy conductance in a natural oak forest. *The Science of the total environment*, 857: 159363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159363>
- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., and Jones, S., 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 198: 52-68. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>
- Surendran, U., Kumar, V., Ramasubramoniam, S. and Raja, P., 2017. Development of Drought Indices for Semi-Arid Region Using Drought Indices Calculator (DrinC) – A Case Study from Madurai District, a Semi-Arid Region in India. *Water Resources Management*, 31(11): 3593-3605. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1687-5>
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., and López-Moreno, J. I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23: 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Yu, S., Guo, J., Liu, Z., Wang, Y., Ma, J., Li, J., and Liu, F., 2021. Assessing the Impact of Soil Moisture on Canopy Transpiration Using a Modified Jarvis-Stewart Model. *Water*, 13(19), 2720. <https://doi.org/10.3390/w13192720>
- Zhu, P., Zhang, G., Wang, H., Zhang, B., and Liu, Y., 2021. Soil moisture variations in response to precipitation properties and plant communities on steep gully slope on the Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 256: 107086. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107086>
- Ahmadi sani, N., Darvishsefat, A., Zobieri, M. and Farzaneh, A., 2007. Potentiality of aster images for forest density mapping in zagros forest of Iran (case study: Marivan forests). *Iranian Journal of Natural Resources*, 61 (3):603-614.
- Ambrosone, M., Matese, A., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Tudoroiu, M., Genesio, L., Miglietta, F., Baronti, S., Maienza, A., Ungaro, F., and Toscano, P., 2020. Retrieving soil moisture in rainfed and irrigated fields using Sentinel-2 observations and a modified OPTRAM approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89: 102113. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102113>
- Bhandari, S. K. and Nandy, S., 2023. Forest Aboveground Biomass Prediction by Integrating Terrestrial Laser Scanning Data, Landsat 8 OLI-Derived Forest Canopy Density and Spectral Indices. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01687-z>
- Das, B., Rathore, P., Roy, D., Chakraborty, D., Bhattacharya, B. K., Mandal, D., Jatav, R., Sethi, D., Mukherjee, J., Sehgal, V. K., Singh, A. K., and Kumar, P., 2023. Ensemble surface soil moisture estimates at farm-scale combining satellite-based optical-thermal-microwave remote sensing observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339, 109567. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109567>
- Falensky, M. A., Sulti, A. L., Putra, R. D. and Marko, K., 2020. Application of Forest Canopy Density (FCD) Model for the Hotspot Monitoring of Crown Fire in Tebo, Jambi Province. *Jurnal Geografi Lingkungan Tropik (Journal of Geography of Tropical Environments)*, 4 (1): 59-67. <https://doi.org/10.7454/jglitrop.v4i1.76>
- Hanson, P., Amthor, J., Wullschlegel, S., Wilson, K. B., Grant, R. F., Hartley, A., Hui, D., Hunt, E. R., Johnson, D. W., Kimball, J., King, A., Luo, Y., McNulty, S., Sun, G., Thornton, P. E., Wang, S., Williams, M., Baldocchi, D. and Cushman, R. M., 2004. Oak forest carbon and water simulations: Model intercomparisons and evaluations against independent data. *Ecological Monographs*, 74: 443-489. <https://doi.org/10.1890/03-4049>
- Li, B. B., Li, P. P., Zhang, W.-T., Ji, J. Y., Liu, G. B. and Xu, M. X., 2021. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau. *Geoderma*, 399: 115122. <https://doi.org/10.1016/j>
- مجلسی به منظور برآورد تاج پوشش جنگل در مناطق بزرگ. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۹ (۱۱۴): ۳۷-۴۹.
- عبداللهی، ه.، شتایی جویباری، ش.، سپهری، ع. و زنگنه، ه.، ۱۳۹۸. مقایسه قابلیت داده‌های لندست ۷ و IRS-P6 در تهیه نقشه تراکم تاج پوشش جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی جنگل‌های شهرستان جواترود). مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۱۷ (۳): ۱-۱۸.
- عبداللهی، ه. و شتایی جویباری، ش.، ۱۳۹۱. ارزیابی مقایسه‌ای قابلیت داده‌های LISS-III و LISS-IV ماهواره IRS-P6 در تهیه نقشه تراکم تاج پوشش جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: جنگل‌های شهرستان جواترود). مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۱۹ (۱): ۴۳-۶۰.
- فتح‌العلومی، س.، واعظی، ع.، علوی پناه، ک. و قربانی، ا.، ۱۳۹۹. مدل‌سازی تغییرات کربن آلی خاک با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور در حوضه آبخیز بالیخلی جای اردبیل. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱ (۹): ۲۴۱۷-۲۴۲۹. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.299509.668542>
- فرجی، ز. و کاویانی، ع.، ۱۴۰۲. ریزمقیاس‌سازی مکانی تصاویر دمای سطح زمین (LST) سنجنده مادیس در مناطق فاریاب توسط مدل‌های تخمین رطوبت خاک TOTRAM و OPTRAM. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۷ (۳): ۵۸۵-۵۹۶.
- فیضی‌زاده، ب.، دیدهبان، خ. و غلامنیا، خ.، ۱۳۹۴. برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۵ (۹۸): ۱-۱۲. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2016.22145>
- معین‌آزاد تهرانی، س. م.، درویش صفت، ع. ا. و نمیرانیان، م.، ۱۳۸۷. ارزیابی مدل FCD برای برآورد تراکم جنگل با استفاده از داده‌های لندست ۷ (مطالعه موردی: جنگل‌های چالوس). فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۶ (۱): ۱۲۴-۱۳۸.
- ویس‌کریمی، ا.، پیامی، ک. و جعفرزاده، م. س.، ۱۴۰۱. کاربرد روش‌های زمین آمار در تعیین منحنی‌های عمق-مدت-مساحت بارندگی (استان لرستان). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲ (۳): ۱۷-۲۶. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9843.1067>
- یوسف‌زاده، ا.، زینالی، ب.، ولیزاده کامران، خ. و اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۳۹۸. برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل جدید دوزنقه‌ای مرئی برای حوضه‌ی سیمینه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸. هیدروژئومورفولوژی، ۵ (۱۸): ۱۸۱-۲۰۵.