



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



نشریه فنی

**بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک
با استفاده از محصولات لندست**

شماره ثبت: ۶۷۱۸۸

۱۴۰۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

نشریه فنی:

بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست

نویسندگان:

رضا بیات، مرگان دهقانی و سید محمد توکلی صبور

شماره ثبت:

۶۷۱۸۸

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

عنوان: بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست

نویسندگان: رضا بیات، مژگان دهقانی و سید محمد توکلی صبور

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۴

شمارگان: ۱۰ نسخه

این اثر در مورخه ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ با شماره ۶۷۱۸۸ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطالب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

چکیده.....	۱
فصل یک: بررسی منابع.....	۲
۱-۱ - مقدمه.....	۲
۲-۱ پیشینه تحقیق.....	۴
۱-۳-روش‌های برآورد رطوبت خاک.....	۱۱
ضریب انتقال تبخیر خاک.....	۱۱
فصل دوم: مواد و روش‌ها.....	۱۶
۱-۲ منطقه تحقیق.....	۱۶
۲-۲ داده‌های تحقیق.....	۱۸
۳-۲ نرم‌افزارهای مورد استفاده.....	۲۱
۴-۲ پیش پردازش داده‌ها.....	۲۱
۵-۲ شاخص پوشش گیاهی نرمال شده.....	۲۲
۶-۲ دمای سطح زمین به روش دفتر علوم لندست.....	۲۳
۷-۲ استخراج دمای سطح زمین.....	۲۴
۸-۲ برآورد رطوبت خاک.....	۲۵
۱-۸-۲ شاخص دما و پوشش گیاهی (شیب رابطه TVX).....	۲۵
۲-۸-۲ شاخص‌های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت.....	۲۵
۳-۸-۲ شاخص خیزی خاک.....	۲۶
فصل سوم: نتایج و بحث.....	۳۰
۱-۳ شاخص دما و پوشش گیاهی (شیب رابطه TVX).....	۳۰
۲-۳ نتایج شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت.....	۳۵
۳-۳ نتایج شاخص خیزی خاک.....	۳۶
فصل چهارم: نتیجه‌گیری.....	۴۱
فهرست منابع.....	۴۴
Abstract.....	۴۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه ۱۷
- شکل ۲-۲: روند انجام پژوهش در یک نگاه ۱۸
- شکل ۳-۲: موقعیت نقاط نمونه برداری (بالا: مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران- پایین: مزرعه تحقیقاتی معاونت آب و خاک) ۲۰
- شکل ۳-۲: نمودار مفهومی از رابطه مثلثی LST-NDVI برای تعیین شاخص خیسی خاک ۲۶
- شکل ۱-۳: رابطه دمای سطح زمین و شاخص NDVI در نمونه های مورد مطالعه (شیب رابطه TVX) ۳۱
- شکل ۲-۳: رابطه دمای روشنایی باند ۱۰ و شاخص NDVI در نمونه های مورد مطالعه (شیب رابطه TVX) ۳۱
- شکل ۳-۳: رابطه دمای روشنایی باند ۱۱ و شاخص NDVI در نمونه های مورد مطالعه (شیب رابطه TVX) ۳۲
- شکل ۴-۳: نمودار رطوبت برآوردی به روش شیب رابطه TVX (LST-NDVI) در مقابل درصد رطوبت خاک اندازه گیری شده ۳۳
- شکل ۵-۳: نمودار رطوبت برآوردی به روش شیب رابطه TVX (BT10-NDVI) در مقابل درصد رطوبت خاک اندازه گیری شده ۳۴
- شکل ۶-۳: نمودار رطوبت برآوردی به روش شیب رابطه TVX (BT11-NDVI) در مقابل درصد رطوبت خاک اندازه گیری شده ۳۴
- شکل ۷-۳: پراکندگی مقادیر رطوبت خاک اندازه گیری شده و برآوردی حاصل از مدل LST-NDVI-NDMI ۳۶
- شکل ۸-۴: نمودار پراکنش نقطه ای LST-NDVI از داده های سنجنده لندست ۸ در منطقه مورد مطالعه ۳۷
- شکل ۹-۳: نمودار پراکنش نقطه ای لبه خشک و تر در رابطه بین LST-NDVI از داده های سنجنده لندست ۸ در منطقه ۳۸
- شکل ۱۰-۳: نمودار ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص خیسی خاک ۳۹
- شکل ۱۱-۳: نمودار ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک با مدل به دست آمده از شاخص خیسی خاک ۴۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مشخصات تصویر ۲۰
- جدول ۲-۲: تقسیم‌بندی محدوده‌های NDVI (Zhang و همکاران، ۲۰۰۶) ۲۲
- جدول ۳-۲: ضرایب واسنجی برای باندهای حرارتی لندست ۸ ۲۴
- جدول ۱-۳: ضرایب همبستگی مدل‌های رطوبت لایه سطحی خاک حاصل از شیب رابطه TVX ۳۵
- جدول ۲-۳: مدل حاصل شده از ارتباط بین LST، NDVI و NDMI برای محاسبه درصد رطوبت لایه سطحی خاک ۳۶
- جدول ۳-۳: مدل برآورد شده از بررسی ارتباط بین درصد رطوبت و شاخص خیزی حاصل از تصویر ۳۹

چکیده

رطوبت سطح خاک جزو ویژگی‌های مهم خاک است و تعیین تغییرات زمانی و مکانی آن وقت‌گیر و پرهزینه است. پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان استفاده از محصولات ماهواره لندست ۸ برای برآورد رطوبت سطح خاک طراحی شد. بدین‌منظور رطوبت وزنی ۳۹ نمونه خاک از عمق صفر تا ۵ سانتی‌متری همزمان با عبور لندست ۸ از محدوده دو مزرعه در محمدشهر استان البرز تعیین شد. شاخص‌های LST، NDVI، NDMI و SWI از محصولات لندست ۸ استخراج و با داده‌های زمینی رطوبت خاک مقایسه شدند. نتایج نشان داد که بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های مذکور همبستگی وجود دارد. نتایج نشان داد که در بین مدل‌های برآورد رطوبت خاک، دو روش TVX (BT11-NDVI) با ضریب تبیین ۰/۷۱ و میانگین مربعات خطای ۲/۸۵ و شاخص SWI با RMSE معادل ۲/۸ و ضریب تبیین ۰/۶۷ قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی با دقت نسبتاً خوب هستند.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک سطحی، لندست ۸، LST، NDMI، NDVI، SWI.

فصل یک: بررسی منابع

۱-۱ - مقدمه

رطوبت خاک تغییرپذیری بسیار شدید مکانی و زمانی در سطح چشم انداز نشان می دهد، در حالی که وابستگی های آن به مقیاس ناشناخته است. توزیع و مقدار آب ذخیره شده در خاک نه تنها با توزیع بارندگی تغییر می کند، بلکه به ویژگی های چشم انداز، از قبیل نوع خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی نیز وابسته است. در نتیجه اندازه گیری و مطالعه نوسان های این متغیر در سطح کره زمین، با دشواری های زیادی روبرو خواهد بود. رطوبت خاک به عنوان یک متغیر کلیدی در شناسایی شدت و طول دوره خشکسالی، برنامه ریزی آبیاری، فرسایش خاک، تبخیر و تعرق، خطر آتش سوزی در جنگل و مدیریت جنگل به کار می رود. اگرچه، دقیق ترین روش برآورد رطوبت خاک، اندازه گیری مستقیم و میدانی است، اما این روش پرهزینه و وقت گیر بوده و تنها اندازه گیری نقطه ای را فراهم می کند. اندازه گیری های محلی بیانگر توزیع مکانی رطوبت نبوده و برای ایجاد پوشش پیوسته مکانی و زمانی در مقیاس منطقه ای و جهانی مناسب نیستند. برای تشخیص رطوبت خاک در زمین شبکه متراکمی از نقاط مورد نیاز است که وجود ندارد، لذا هنوز رطوبت خاک را نمی توان به عنوان یک متغیر قابل اندازه گیری در مقیاس های جهانی و ناحیه ای در نظر گرفت (Henderson, ۱۹۹۶). بنابراین نیاز به ابزاری برای برآورد رطوبت خاک در مقیاس زمانی و مکانی ضرورت می یابد تا علاوه بر دقت مناسب، امکان کاربرد عملیاتی آن در مقیاس مختلف وجود داشته باشد.

اطلاع دقیق از میزان رطوبت و نوسان های آن می تواند، راهکارهایی مناسب در جهت تهیه نقشه های رطوبت لایه سطحی خاک، پیش بینی سیل، خشکسالی و سایر پدیده های اقلیمی فراهم کند. در واقع تخمین دقیق رطوبت خاک برای تحقیقات خشکسالی، آب و هواشناسی، هیدرولوژی و فرایندهای سطح زمین بسیار مهم است. همچنین تغییرات رطوبت خاک، تاثیرات مهمی بر پوشش گیاهی، رواناب منطقه ای و فرسایش زمین می گذارند. با بررسی ثبات و یا تغییر حدود بالایی و پایینی رطوبت خاک می توان تغییرات آب و هوایی جهانی را نیز ارزیابی کرد. روش های

سنتی در اندازه‌گیری‌های میدانی رطوبت خاک، قادر به ارائه‌ی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک به نحو مطلوب نیستند، در مقابل استفاده از فناوری سنجش از دور با دقت مکانی و زمانی بیشتر جهت محاسبه رطوبت خاک مطرح و مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که رفتارهای تابشی مواد، اطلاعات مهمی درباره ویژگی‌های آنها ارائه می‌کند و همچنین میزان انرژی تابش شده از هر ماده تابعی از دمای سطحی آن است، بنابراین مطالعه دمای سطح اجسام با استفاده از تصاویر سنجش از دور مادون قرمز حرارتی می‌تواند اطلاعات بسیار سودمندی از وضعیت پدیده‌ها ارائه کند.

سنجش از دور حرارتی شاخه‌ای از سنجش از دور است که پیرامون تفسیر و پردازش داده‌ها و تصاویر به‌دست‌آمده در ناحیه مادون قرمز حرارتی (TIR) طیف الکترومغناطیسی بحث می‌کند. امواج الکترومغناطیسی مورد استفاده سنجش از دور در باندهای طیفی مختلفی مانند نور مرئی (0.4 تا 0.7 میکرومتر)، مادون قرمز انعکاسی (0.7 تا 3 میکرومتر) و مادون قرمز حرارتی (3 تا 14 میکرومتر) قرار می‌گیرند. سامانه‌های سنجش از دور به‌طور معمول در یک یا چند بخش طیف نور مرئی، مادون قرمز انعکاسی و یا حرارتی فعالند. در واقع نور مرئی و مادون قرمز انعکاسی خورشید پس از برخورد با پدیده‌های زمین منعکس می‌شود، اما در بخش مادون قرمز حرارتی، نور خورشید پس از برهم کنش‌های امواج الکترومغناطیسی با سطوح به‌صورت گرما از سطح پدیده‌ها منتشر می‌شود. علاوه بر این تفاوت مهم دیگر این دو شاخه از سنجش از دور این است که در بخش انعکاسی، انرژی انعکاسی به‌وسیله دوربین‌های عکاسی و یا سنجنده ثبت شده و به‌صورت عکس یا تصویر مادون قرمز قابل مشاهده است، در حالی که تشعشعات مادون قرمز حرارتی قابل عکسبرداری نبوده و برای ثبت آن، از دستگاه‌ها و سامانه‌هایی مانند رادیومترها و اسکنرهای حرارتی استفاده می‌شود. از آنجا که حدود ۹۵ درصد از کل انرژی وارد شده به زمین به‌صورت تابش‌های خورشیدی است و به تقریب نیمی از این مقدار پس از جذب به گرما تبدیل می‌شود (Norman و همکاران، ۱۹۹۵).

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست / ۴

اخیراً حتی شاخص‌هایی از قبیل شاخص اختلاف گرد و غبار^۱ در ناحیه ۱۰ تا ۱۲/۵ میکرومتری به‌دست‌آمده است. به این ترتیب کارایی و دقت داده‌های مادون قرمز حرارتی و استفاده از آن‌ها افزایش چشمگیری خواهد داشت. به‌طوری که مولفه‌های بیلان انرژی سطحی شهرها از راه مدل‌های اقلیمی و طیفی بررسی می‌شود. از این رو پیش‌بینی می‌شود که در آینده نه‌چندان دور شاهد پیشرفت‌های بیشتر استفاده از سنجش از دور مادون قرمز حرارتی باشیم (علوی‌پناه، ۱۳۸۵).

۲-۱ پیشینه تحقیق

مطالعات متعددی تاکنون برای تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است. یک ضعف اساسی این مدل‌ها و مطالعات این است که این روش‌ها تاکنون برای مناطقی که دارای پوشش گیاهی ضعیف و یا فاقد پوششی گیاهی هستند ناکارآمد بوده‌اند.

Moran و همکاران ایده استفاده از رابطه دما-پوشش گیاهی را به‌منظور توصیف رابطه اختلاف دمای هوا و سطح زمین در برابر میزان تراکم مختلف پوشش گیاهی در سال ۱۹۹۴ تشریح کردند و از طریق تعریف شاخص کمبود رطوبتی^۲ وضعیت تبخیر-تعرق را در هر دو پوشش گیاهی متراکم و ضعیف بررسی کردند. اگر چه این ایده از نظر علمی مورد تأیید محققان قرار گرفته است اما با توجه به دشواری محاسبه اختلاف دمای هوا و دمای سطحی و همچنین جمع‌آوری کلیه داده‌های هواشناسی موردنیاز برای اجرای این الگوریتم، مطالعات موردی محدودی در سطح بین‌المللی در این خصوص صورت گرفته است (Moran و همکاران، ۱۹۹۴).

در بررسی Sandholt و همکاران در سال ۲۰۰۲، شاخص^۳ TVDI و^۴ NDVI در شمال سنگال نشان دادند که شاخص TVDI، شاخص مناسب‌تری نسبت به شاخص NDVI برای ارزیابی وضعیت رطوبت سطح خاک است (Sandholt و همکاران، ۲۰۰۲).

^۱ IDDI: The Infrared Difference Dust Index

^۲ WDI: Water Deficit Index

^۳ Temperature-Vegetation Dryness Index

^۴ Normalized Difference Vegetation Index

Verstraeten و همکاران در سال ۲۰۰۶، تحقیقاتی پیرامون بازیابی رطوبت خاک با استفاده از اینرسی حرارتی، با استفاده از داده‌های هوابرد مرئی و حرارتی، در جنگل‌های اروپا انجام دادند. مدل انتشار خطا استفاده شده برای رویکرد اینرسی حرارتی نشان می‌دهد که اشتباهات مطلق و نسبی رطوبت خاک حاصله، کمینه $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و با $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ SMC^۱ است.

Mira و همکاران (۲۰۰۷) خاصیت مادون قرمز حرارتی در نفوذ آب در خاک لخت را در سال ۲۰۰۷، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در بررسی‌های خود پس از انتخاب شش نمونه خاک از سطوح مختلف، براساس روش وزن‌سنجی نشان دادند که زمانی که محتوای آب افزایش پیدا می‌کند، افزایش انتشاری رطوبت خاک از ۱.۷٪ به ۱۶٪ به ویژه در خاک‌های شنی در محدوده $8/2 - 9/2$ میلی‌متر می‌رسد. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت طیفی با افزایش محتوای آب خاک کاهش می‌یابد. در نهایت نشان دادند که خطاهای سامانه‌تیک از 0.1 تا 2 k می‌تواند در نتیجه رطوبت منتشرشده در خاک باشد.

Cai و همکاران در سال ۲۰۰۷، در مطالعه‌ای در شمال دشت چین بر طبق مدل اینرسی که این روش برای پایش رطوبت در مقیاس مناطق بزرگ استفاده می‌شود، نشان دادند که تفاوت میانگین بین مقدار رطوبت خاک به‌دست‌آمده از داده‌های سنجنده MODIS و اندازه‌گیری داده‌های رطوبت خاک در محل، $4/32$ درصد است.

در سال ۲۰۰۷، Anderson و همکاران در بررسی خود در اقلیمی از قاره آمریکا براساس تصاویر ماهواره‌ای نشان دادند که از آوریل تا اکتبر، شاخص ESI^۲ همبستگی مکانی و زمانی با شاخص خشکسالی حتی در صورت وجود پوشش گیاهی بالا است. این روش برای کشورهای فاقد شبکه پیش‌بینی برای اندازه‌گیری بارش، مفید است.

پایش رطوبت خاک منطقه ریشه از طریق جذب مبتنی بر سنجش از دور حرارتی در آمریکا، براساس روش ترکیبی RS-SVAT نشان داد که این مدل در برابر TR از مزیت‌های بالقوه‌ای برخوردار است. به‌طور کلی این مدل در بهبود WEB-SVAT^۳ در تعیین رطوبت حمایت می‌کند (Crow و همکاران، ۲۰۰۸).

^۱ Soil Moisture Capacity
^۲ Evaporative Stress Index

^۳ . تعادل آب و انرژی

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۶/

Merlin و همکاران در سال ۲۰۰۹، یک مدل متوالی برای تراکم رطوبت خاک نزدیک سطح با استفاده از مشاهدات سنسور حرارتی با وضوح بالا ارائه دادند. که یک گام مهم در این روش برای شناسایی روش بهینه کاهش مقیاس از نظر دقت جداسازی در زیر پیکسل خاک است. قدرت تفکیک کاهش مقیاس بهینه بسیار سازگار برای MODIS روی MODIS، TERA، Aqua و ASTER، که ۴ تا ۵ برابر وضوح سنسور حرارتی به دست آمد.

Krapez در سال ۲۰۰۹ بیان داشتند، روش مثلثی یا دوزنقه‌ای یک روش مناسب برای تخمین رطوبت خاک از طریق دما و شاخص پوشش گیاهی اندازه گیری شده بوسیله سنجش از دور است. ایشان سه روش مختلف را برای این منظور انتخاب کردند که عبارتند از روش مثلثی تجربی Sandholt و همکاران (۲۰۰۲)، روش دوزنقه‌ای Moran و همکاران (۱۹۹۴) و روش مثلثی Carlson و همکاران (۲۰۰۹). روش مثلثی تجربی در مواقعی که داده‌های هواشناسی کافی وجود ندارد بسیار مناسب است. در غیر این صورت بهره گیری از روابط فیزیکی پنمن مانیتیشیا مدل^۱ SVAT با مبانی تئوری، نتایج دقیق تری به همراه دارند. از مقایسه سه روش مذکور در جنوب فرانسه و با استفاده از داده‌های سنجش از دور مشاهده شد که مثلث کارلسون پتانسیل مناسبی برای توصیف وضعیت رطوبتی خاک و ریشه گیاه دارد.

Wang و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های ۱۶ ایستگاه رطوبت سنجی خاک، ۳ ایستگاه هواشناسی و ۸۷ ایستگاه باران سنجی و همچنین تصاویر سنجنده مودیس، الگوریتم دوزنقه‌ای را اجرا کرده و به این نتیجه رسیدند که رابطه دوزنقه‌ای ابزاری قوی برای محاسبه شاخص کمبود رطوبتی در سطح منطقه است و در عین حال رابطه رگرسیونی آن با رطوبت خاک و پهنه بندی جغرافیایی آن نتایج مناسبی در منطقه نیمه خشکی همچون آریزونا به همراه نداشت. این در حالی بود که رگرسیون زمانی آن از نتایج قابل قبولی برخوردار بود.

تحقیقاتی روی برآورد شاخص رطوبت خاک با اینرسی حرارتی ظاهری از طریق پتانسیل چند زمانه Aqua و Terra MODIS با یک روش انعطاف پذیر چند زمانه به استخراج تقریبی رطوبت خاک از اینرسی حرارتی، با نام

¹ Soil Vegetation Atmosphere Transfer

اینرسی حرارتی ظاهری^۱، از مشاهدات روزانه Aqua و Terra MODIS دست یافتند ((Peters و همکاران، ۲۰۱۱).
Sobrinho و همکاران در سال ۲۰۱۲، در مطالعات خود یک روش برای برآورد رطوبت خاک از اسکندر ابر طیفی^۲
و سنجنده ASTER ارائه دادند. در این مقاله رطوبت خاک در سطح موجود در هوا و در سطح ماهواره‌ای با ترکیب
تصاویر سنجش از دور در اندازه‌گیری‌های درجا برآورد شده است. با این روش، رطوبت خاک از داده AHS را
می‌توان با مربع خطا $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ در مقایسه با اندازه‌گیری زمینی و تصاویر ASTER با RMSE $0.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$
به‌دست آورد.

Lei و همکاران در سال ۲۰۱۴، در تحقیق خود به توسعه مدل رطوبت سطح خاک با قدرت تفکیک مکانی
بهبود یافته پرداخته و با استفاده از اینرسی حرارتی ظاهری مدل ادغام دمای سطح به‌دست‌آمده از TM، میانگین
دمای سطح از تصاویر مادیس و ETM را براساس معادله انتقال حرارت، ادغام کردند. نتایج این تحقیق نشان داد
توسعه مدل سبب افزایش قدرت تفکیک مکانی ATI و SMC شده که ATI ضریب همبستگی قویتری با SMC
دارد.

تأثیر شاخص سطح برگ^۳ برای پیش‌بینی رطوبت خاک برای دو مدل سطح زمین‌های مختلف توسط Chen
و همکاران (۲۰۱۵) بررسی و داده‌های MODIS NDVI مورد استفاده قرار گرفت. نتایج واسنجی از هر دو مدل
به‌طور مداوم نشان می‌دهد که متوسط شاخص سطح برگ در طول زمان، به جای یک زمان مختلف روزانه شاخص
سطح برگ، به تکثیر روزانه رطوبت خاک در سایتشان کافی بود.

بررسی تأثیر رطوبت خاک بر انعکاس اشعه مادون قرمز حرارتی با استفاده از انتشار داده ASTER توسط
Wang و همکاران در سال ۲۰۱۵، انجام شده است و نشان دادند که عدم قطعیت تشعشع بهتر از ۱ درصد است.
مطالعاتی توسط Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۵، بر روی تعیین رطوبت خاک با روش LST-VI با استفاده
از درون‌یابی غیرخطی براساس داده‌های سنجش از دور مادون قرمز حرارتی انجام شده است و نتایج آن نشان داد

^۱ . ATI: Apparent Thermal Inertia

^۲ . AHS

^۳ .LAI: Leaf Area Index

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۸/

که این روش، دقت تخمین بالایی داشته و ضعف ناشی از شرایط اتمسفری را در روزهای مختلف برطرف می‌کند. شاید اولین تحقیقات در ایران را بتوان به تحقیقاتی منابع آب و رطوبت سطح خاک کلوت‌های بیابان لوت با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای توسط علوی‌پناه در سال ۱۳۸۱، اشاره کرد. نتایج حاصل نشان داد که شش باند انعکاسی و یک باند حرارتی سنجنده‌ی TM کارایی زیادی در مطالعات آب و رطوبت خاک و آبراهه‌ها دارند (علوی‌پناه، ۱۳۸۱).

طبق تحقیقات برزگر و همکاران در سال ۱۳۹۰، ضریب انتقال تبخیر خاک^۱ که تنها براساس دما محاسبه می‌شود، برای تخمین رطوبت خاک بخشی از منطقه مرکزی ایران پیاده سازی شده است. در این مطالعات روابط رگرسیونی مختلفی بین رطوبت خاک و ضریب انتقال تبخیر خاک ارزیابی شد که از میان آن روابط رگرسیونی خطی و لگاریتمی نتایج بهتری را نشان دادند.

کشاورز و همکاران (۱۳۹۰) مطالعاتی را در استان اصفهان برای استخراج و روندیابی رطوبت خاک به کمک داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مادیس توسط انجام دادند. در این تحقیق شاخص خیسی خاک^۲ با روش‌های من-کندالف رگرسیون خطی و والد-وولفووتیز در سطح ۵ درصد بررسی شد. نتایج نشان داد که روش والد-وولفووتیز، روش مناسبی برای روندیابی رطوبت در این منطقه نیست.

بابازاده و همکاران (۱۳۹۱) تحقیقاتی بر روی تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی انجام دادند. نتایج حاصل از این تحقیق، همبستگی خوبی بین شیب رابطه $TVx(NDVI, LST)$ و مقادیر رطوبت لایه سطحی خاک نشان داد.

خان‌محمدی و همکاران (۱۳۹۳) برای برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال‌شده رطوبت با استفاده از تصاویر MODIS تحقیقاتی انجام دادند. هدف از انجام این پژوهش، برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از شاخص‌های NDVI, NDMI و LST بود. بدین‌منظور با استفاده از

^۱ . ha

^۲ . SWI: Soil Moisture Index

تصاویر MODIS 1B شاخص‌های موردنظر استخراج و با داده‌های زمینی رطوبت خاک واسنجی و اعتبارسنجی شدند. در این پژوهش، منطقه مورد مطالعه تشریح شد و سپس با استفاده از شاخص‌های استخراج‌شده، مدل برآورد رطوبت خاک به دست آمد. نتایج نشان داد بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های NDMI, NDVI و LST همبستگی مناسبی (۶۶ درصد) وجود دارد. نتایج صحت‌سنجی مدل برآورد رطوبت خاک نیز نشان داد که این مدل با میانگین خطای کمتر از ۰/۰۱۸، قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی است، این مقدار خطای اندک، نشان‌دهنده دقت زیاد مدل پیشنهادی برای برآورد رطوبت خاک سطحی است (خان محمدی و همکاران، ۱۳۹۳).

تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در سال ۱۳۹۴ توسط فشائی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. مدل دوزنقه‌ای دما-پوشش گیاهی قادر است با در نظر گرفتن وضعیت رطوبتی گیاه و محیط و همچنین شرایط پوشش گیاهی، با دقت مناسبی شرایط تنش آبی در گیاه را برای مناطق فاقد پوشش گیاهی و یا دارای پوشش گیاهی ضعیف و همچنین پوشش گیاهی متراکم برآورد کند. در این پژوهش ابتدا توسط تصاویر سنجنده مودیس، پهنه بندی شاخص کمبود آب (WDI) در محدوده مطالعاتی زیر مجموعه دشت مشهد در سال آبی ۹۰-۹۱ صورت گرفته و سپس با استفاده از رابطه تنگاتنگ این متغیر با رطوبت خاک، رابطه‌ای خطی میان این دو متغیر برازش داده شد. هم‌روندی بارندگی و رطوبت نسبی هوا با مقادیر میانگین شاخص کمبود آب، حاکی از انطباق مناسب این شاخص با وضعیت رطوبتی منطقه است. همچنین ضریب همبستگی ۹۳٪ بین شاخص WDI و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در عمق ۵ سانتی‌متر از سطح خاک، تأیید دیگری بر صحت نتایج به دست آمده است (فشائی و همکاران، ۱۳۹۴).

مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح با توجه به ماهیت فیزیکی که دارند، از اهمیت و دقت بالاتری در برآورد رطوبت خاک برخوردارند ولی به دلیل پیچیدگی آنها، کمتر استفاده می‌شوند. نتیجه استفاده از سامانه بیلان انرژی سطح در تالاب شادگان نشان دهنده توانایی مدل موردنظر با ضریب تعیین ۰/۶۹ و مقدار خطای RMSE برابر با ۰/۰۳، در برآورد رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه بود (محرابی و همکاران، ۱۳۹۸).

فروغی و همکاران (۱۳۹۸) بیان کردند که هرچند تشخیص فرآیندهای سطح زمین با استفاده از سنجش از

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۱۰/

دور نوری به‌طور عام به باندهای الکترومغناطیسی قرمز، سبز، آبی (RGB)، مادون قرمز (NIR) و موج کوتاه (SWIR) مرتبط است و در تخمین رطوبت خاک با این فن‌آوری، با فرض ارتباط خطی بین بازتابش‌های قرمز و مادون قرمز (Red-NIR)، خط عاری از پوشش گیاهی (خط خاک) به‌عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده و خطوط هم‌رطوبت به شکل عمود بر این خط قرار می‌گیرند. اما این مطالعه قصد می‌خواهد اثبات کند که فرضیه مذکور، همواره برقرار نیست و در مواردی رطوبت خاک اشتباه تخمین می‌زنند. بدین منظور یک روش نوین تخمین رطوبت خاک در این فضا پیشنهاد شد که بر پایه تعریف جدیدی از خطوط هم‌رطوبت خاک است. مدل پیشنهادی این مطالعه به مدل تغییر یافته فضای Red-NIR (TRN) مصطلح شد. این مدل با مدل رایج فضای Red-NIR (CRN) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ در مزارع نیشکر سلمان فارسی استان خوزستان مقایسه شد. ۱۲ تصویر لندست ۸ در طول دوره رشد نیشکر مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبارسنجی نتایج سنجش از دور، رطوبت خاک در ۲۲ نقطه در ۵ عمق مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مدل TRN پیشنهادی تطابق بیشتری با مشاهدات میدانی داشت و به‌طور علمی، صحت و دقت استفاده از فضای Red-NIR در زمینه تخمین رطوبت خاک را بهبود بخشید.

صداقت و همکاران (۱۴۰۰) رطوبت سطحی خاک را به وسیله مشخصات زود یافت خاک و شاخص‌های طیفی حاصل از سنجنده سنتینل با دو روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVM) با تعداد ۱۲۴ نمونه خاک از تهران، گرمسار و لرستان برآورد کردند. شاخص رنگ خاک نسبت به سایر شاخص‌های طیفی با روش ANN بادقت بالاتری رطوبت خاک را برآورد کرده است؛ بنابراین ANN با ایجاد ارتباط غیرخطی بین رطوبت سطح خاک و پارامترهای ورودی قادر به برآورد رطوبت خاک با دقت قابل قبول است.

اخیراً پژوهشی برای برآورد رطوبت خاک از تصاویر لندست ۸ با داده‌های میدانی انجام شده که ارتباط میان این شاخص و رطوبت خاک بررسی شود. ماحصل پژوهش نشان داد که رطوبت برآورد شده با شاخص عمودی رطوبت خاک وابستگی کامل به دوره رشد و وضعیت پوشش گیاهی دارد، و زمان بالا بودن ضریب سبزی‌نگی، دقت برآورد زیاد، و در فصل نبود پوشش گیاهی، همبستگی ضعیف و متوسطی با داده‌های میدانی دارد. همچنین

می‌توان شاخص مذکور را برای پایش رطوبت خاک در مناطق دارای پوشش گیاهی مناسب، برنامه‌ریزی آبیاری، و تعیین آغاز و پایان فصل چرای دام در مرتع به کار برد (زاهدی و قرمزچشمه، ۱۴۰۱).

۱-۳- روش‌های برآورد رطوبت خاک

رطوبت خاک را با روش‌های مختلفی می‌توان اندازه‌گیری کرد. بطور کلی آن‌ها را میتوان به دو دسته مستقیم و غیر مستقیم تقسیم بندی کرد. در روش‌های غیر مستقیم با استفاده از دستگاه‌های مختلف، میزان رطوبت خاک تعیین می‌شود. مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از:

۱. بلوک گچی
۲. نوترون متر
۳. روش اشعه گاما
۴. میله تتا
۵. روش انعکاس سنج دامنه زمانی
۶. تانسیومتر

اما از روش‌های مهم دیگر می‌توان به موارد ضریب انتقال تبخیر خاک، شاخص دما و پوشش گیاهی (شاخص TVDI)^۱ و اینرسی حرارتی اشاره کرد.

ضریب انتقال تبخیر خاک

ضریب انتقال تبخیر خاک (h_a) که تنها براساس دما محاسبه می‌شود، به دمای سطح خاک، دمای هوا و دمای خاک مرجع (خاک خشک بدون تبخیر) نیاز دارد. رطوبت خاک با دقت زیادی به تبخیر (E) وابسته است. Qiu شاخص h_a را ضریب انتقال تبخیر خاک نامیده است که در بازه‌ی صفر تا یک تغییر می‌کند و می‌تواند نرخ تبخیر خاک و مرزهای بالایی و پایینی آن را مشخص کند. برای خاک خشک $T_s = T_{sd}$ است و در نتیجه $h_a = 1$ و $E = 0$ خواهد بود. زمانی که هیچ کمبود آبی در خاک وجود ندارد، $T_s = T_a$ و h_a به کمینه مقدار خود و E به بیشینه مقدار خواهد رسید. Qiu و همکاران برای تخمین E با توجه به معادله تعادل انرژی و مقاومت آیرودینامیک خاک

¹ Temperature–Vegetation Dryness Index

خشک، یک مدل سه بعدی را پیشنهاد داده‌اند که براساس دمای سطح است.

$$E = R_n + G - (R_{nd} - G_d) \frac{(T_s - T_a)}{(T_{sd} - T_a)} \quad (1)$$

در اینجا R_n تابش زمینه‌ای، G جریان گرمای خاک و T_s دمای سطح است. R_{nd} ، G_d و T_{sd} به ترتیب تابش زمینه‌ای، جریان گرمای خاک و دمای سطح برای خاک خشک مرجع است که نرخ تبخیر آن صفر است. با توجه به معادله بالا h_a به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_a = (T_s - T_a) / (T_{sd} - T_a) \quad (2)$$

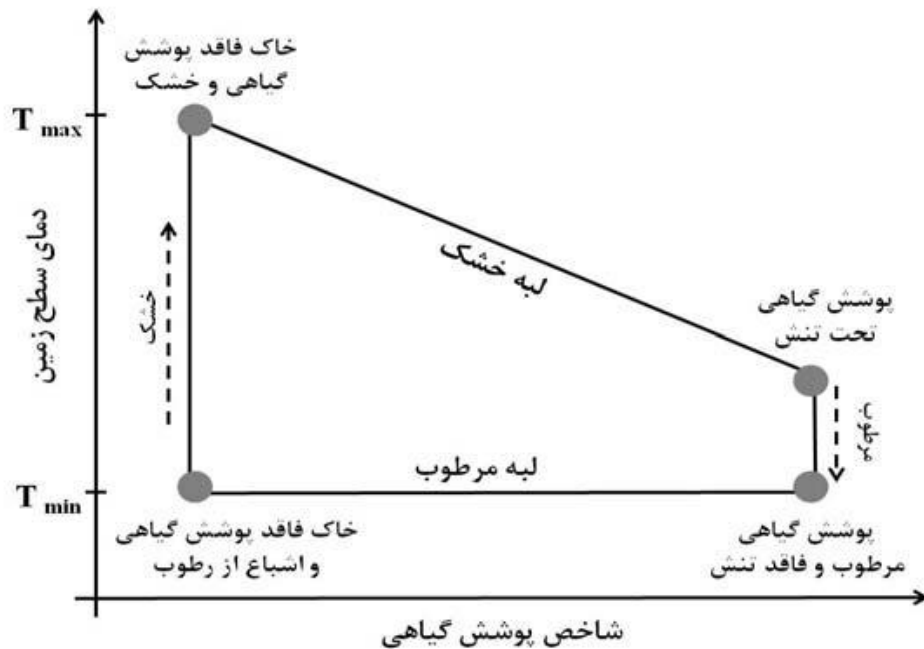
در این روش بهترین نوع رابطه رگرسیونی بین ضریب تبخیر خاک و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در عمق صفر تا ۵ سانتی‌متر تعیین‌کننده نقشه رطوبت خاک است (Qiu و همکاران، ۲۰۰۶). شاخص دما و پوشش گیاهی (TVDI) پوشش گیاهی و دمای سطحی زمین^۱، تأثیر زیادی بر روی رطوبت خاک دارند. Carlson و همکاران (۲۰۰۷) و Gillies و همکاران (۱۹۹۷) نشان دادند که یک رابطه واحد، تحت عنوان "مثلت جهانی" که گاه از آن با عنوان مثلث سراسری یاد می‌شود، بین رطوبت خاک^۲، شاخص پوشش گیاهی^۳ و LST وجود دارد، همچنین از این رابطه با نام شاخص خیسای خاک (SWI^۴) نیز یاد شده است. Price (1990) و Carlson و همکاران (۱۹۹۴) دریافتند که چنانچه پوشش گیاهی در منطقه، از خاک فاقد پوشش تا خاک دارای پوشش گیاهی کامل تغییر کند، از طرفی رطوبت خاک نیز از شرایط خشک تا کاملاً مرطوب در منطقه وجود داشته باشد، داده‌های دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی در نموداری نقطه‌ای که مقابل هم رسم شده‌اند، شکلی دوزنقه‌ای پیدا می‌کنند (شکل ۱-۱). Sandholt و همکاران (۲۰۰۲) بر همین اساس شاخص TVDI را به صورت ذیل تعریف کردند.

^۱ LST: Land Surface Temperature

^۲ W_s

^۳ NDVI

^۴ Soil Water Index



شکل ۱-۱: نمودار شماتیک شاخص پوشش گیاهی در مقابل دمای سطح زمین

$$TVDI = \frac{LST_{(NDVI)} - LST_{Min(NDVI)}}{LST_{Max(NDVI)} - LST_{Min(NDVI)}} \quad (3)$$

$$LST_{Min(NDVI)} = a_2 + b_2 NDVI \quad (4)$$

$$LST_{Max(NDVI)} = a_1 + b_1 NDVI \quad (5)$$

در معادلات بالا، $LST_{(NDVI)}$ دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل تصویر، $LST_{Max(NDVI)}$ و $LST_{Min(NDVI)}$

به ترتیب بیشینه و کمینه دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل هستند که به لبه‌های خشک و مرطوب معروف هستند که این دمای بیشینه و کمینه هر پیکسل از معادلات حاصله از لبه‌های خشک و مرطوب به دست می‌آیند و این جمله به این مفهوم نیست که در یک پیکسل در یک تصویر همزمان هم دمای بیشینه و هم دمای کمینه وجود دارد. a_1, b_1, a_2, b_2 نیز ضرایب معادلات خطی لبه‌های خشک و مرطوب هستند. با توجه به معادلات، مقادیر شاخص TVDI بین صفر و یک متغیر خواهد بود که مقدار صفر معرف شرایط مرطوب، بیشترین میزان تبخیر و تعرق و عدم محدودیت منابع آب و مقدار یک معرف شرایط خشک است.

جزئیات این روش توسط Carlson و همکاران (۲۰۰۷) و Chauhan و همکاران (۲۰۰۳) تشریح شده است.

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست /۱۴

مقادیر رطوبت خاک برآورد شده در این مطالعات گرچه همبستگی خوبی با مقادیر زمینی نشان دادند ولی دارای قدرت تفکیک مکانی پایینی (حدود ۲۵ کیلومتر) هستند. با توجه به تغییرات مکانی سریع در رطوبت خاک این دقت برای برآورد رطوبت خاک مطلوب نیست. روش‌های متعددی براساس شاخص‌های دمایی/گیاهی توسط دانشمندان مختلف ارائه و برای برآورد محتوای رطوبت خاک سطحی و شدت جریان گرمای محسوس و نهان استفاده شده اند. این روش‌ها به پنج دسته تقسیم می‌شوند (Carlson و همکاران، ۱۹۹۴؛ Gillies و همکاران، ۱۹۹۷؛ Chauhan و همکاران، ۲۰۰۳):

(۱) دمای سطح^۱ و شاخص گیاهی ساده^۲

(۲) دمای سطح و آلبیدو^۳

(۳) شاخص گیاهی و اختلاف دمای هوا و سطح^۴

(۴) شاخص گیاهی و اختلاف سطحی روز و شب^۵

(۵) ترکیب داده‌های T_s/VT با مدل انتقال خاک-گیاه-اتمسفر^۶

طی سالیان گذشته، پژوهش‌های زیادی برای تخمین رطوبت خاک با استفاده از دورسنجی انجام و روش‌های متعددی را معرفی کرده یا توسعه داده‌اند. همچنین استفاده از داده‌های مادون قرمز با قدرت تفکیک زمانی بالا، در کنار داده‌های میکروویو غیرفعال که علیرغم پایین بودن قدرت تفکیک زمانی، امکان عبور از ابر برایشان فراهم است. هرچند در خارج از کشور برآورد رطوبت خاک و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن با استفاده از روش‌های مختلف دورسنجی مطالعه شده، اما در داخل ایران به کارگیری شاخص‌های طیفی به منظور برآورد رطوبت خاک و ارزیابی مقادیر برآوردی با استفاده از مطالعات میدانی بسیار محدود است. با توجه به اهمیت مناطق تحت حفاظت محیط زیست، به نظر می‌رسد که بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک با استفاده از این فن‌آوری ضروری

¹ T_s

² Surface Temperature and Simple Vegetation Index

³ Surface Temperature and Albedo

⁴ Surface-Air Temperature Difference and Vegetation Index

⁵ The Day-Night Surface Temperature Difference and Vegetation Index

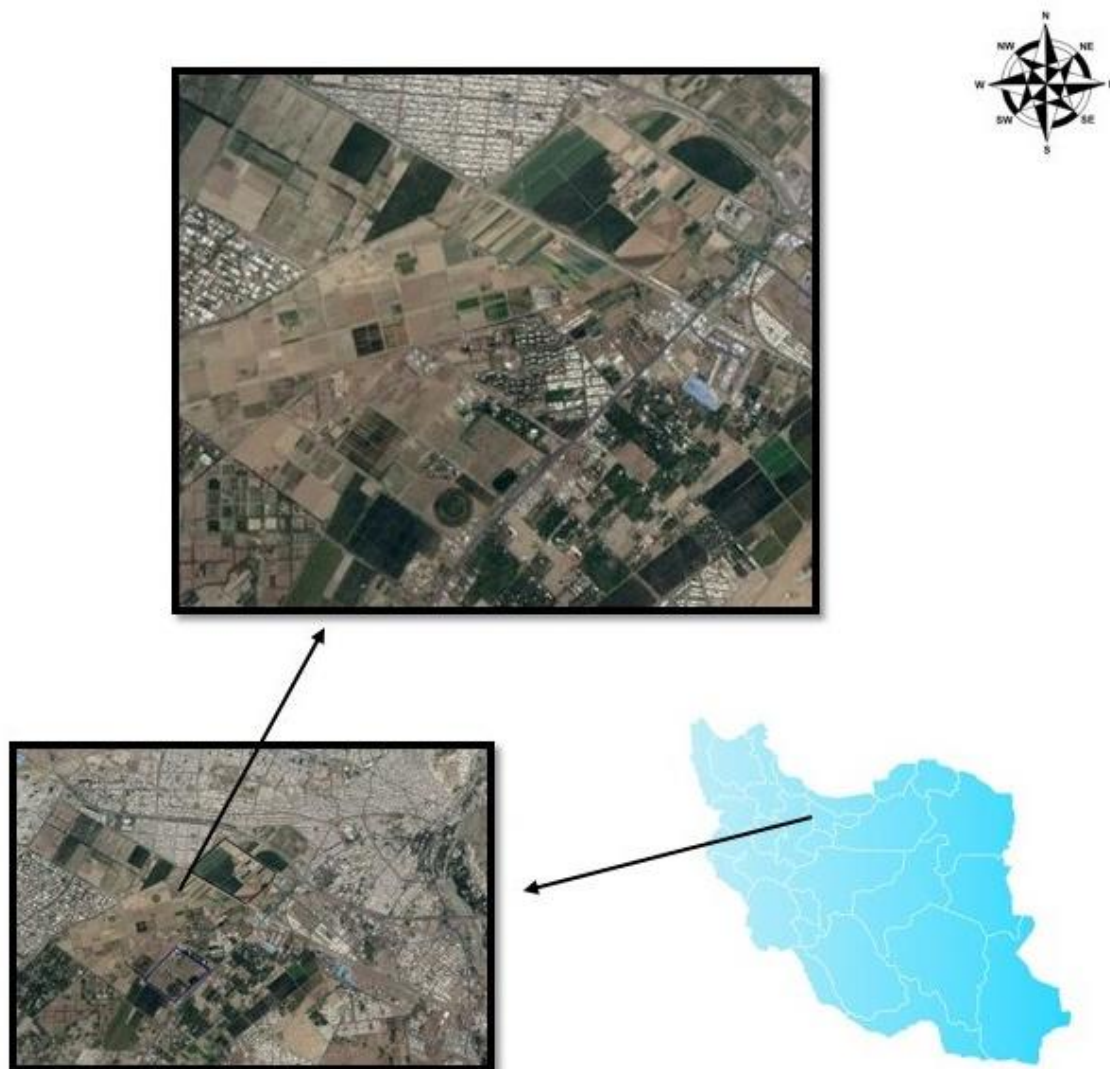
⁶ Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT) Model

و ارزیابی دقت و منطقه‌ای شدن نتایج آنها بسیار مهم است.

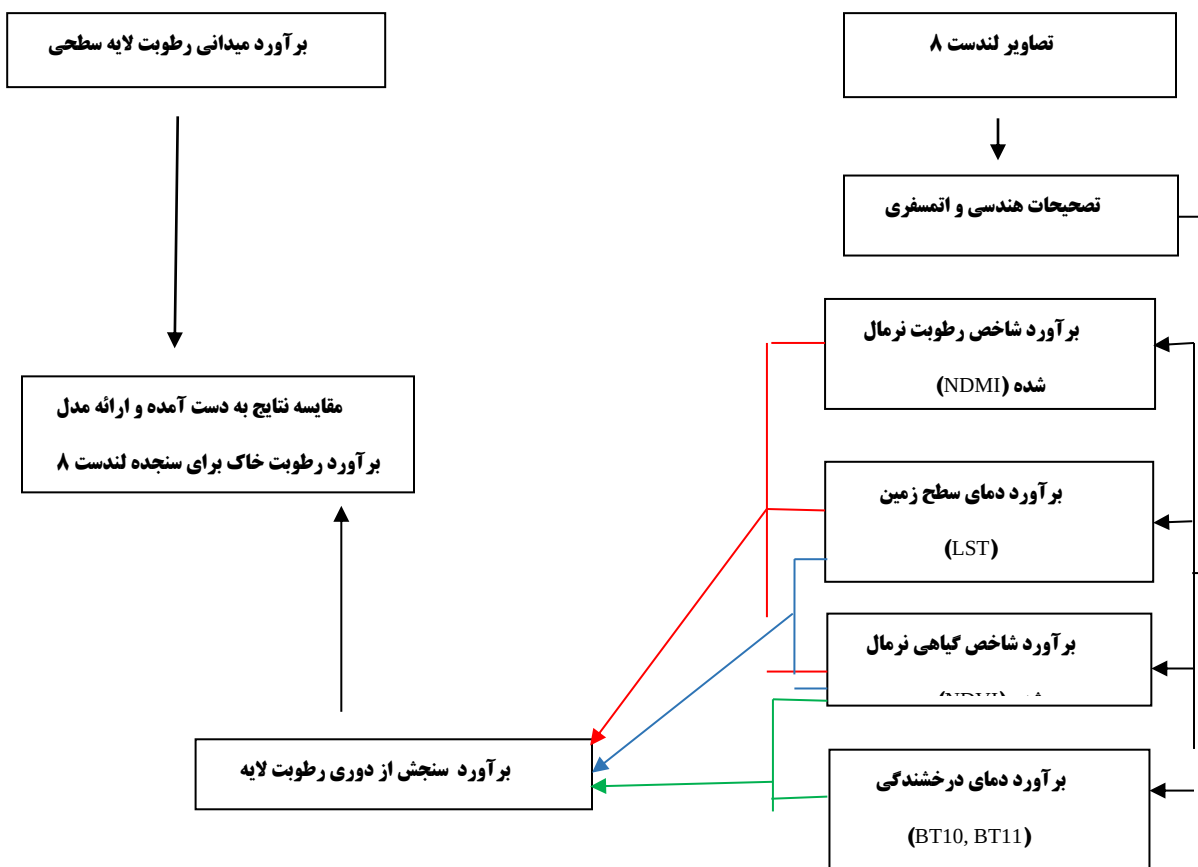
فصل دوم: مواد و روش‌ها

۱-۲ منطقه تحقیق

مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران با مساحت تقریبی پنج کیلومترمربع از ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۴۰/۱۱ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه و ۴۹/۴۶ ثانیه شمالی و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۸/۷۲ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۱۹/۹۹ ثانیه شرقی، و مزرعه تحقیقاتی معاونت آب و خاک با مساحت تقریبی ۳/۵ کیلومتر مربع از ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه و ۲۶/۷۲ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۶۷ دقیقه و ۴۵/۸۶ ثانیه شمالی و ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه و ۱۷/۶۲ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه و ۱۳/۰۱ ثانیه شرقی در محمد شهر واقع در ضلع جنوب شرقی استان البرز منطقه تحقیق بوده است. اقلیم منطقه معتدل نیمه‌خشک بوده و دارای زمستان‌های سخت و تابستان‌های گرم است، همچنین منطقه از لحاظ آب و هوایی تابع دریای مدیترانه و متأثر از آب و هوای این منطقه جغرافیایی است. میزان بارندگی استان از ۹۰۰ میلی‌متر به‌طور میانگین در شمال استان البرز شروع شده و در جنوب استان این مقدار به حدود ۱۵۰ میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۲-۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲-۲ روند انجام پژوهش در یک نگاه

۲-۲ داده‌های تحقیق

در این تحقیق از تصویر ماهواره لندست ۸ و نمونه‌برداری میدانی دمای سطح و عمق ۵ سانتی‌متری خاک و رطوبت خاک سطحی عمق ۵ سانتی‌متری استفاده شد. تعداد نمونه‌های انتخابی برای به‌دست‌آوردن اطلاعات میدانی ۴۶ نقطه است که محل انتخاب نمونه‌ها از روی تصاویر ماهواره‌ای Google Earth با توجه به تنوع پوشش گیاهی منطقه انتخاب شده و مختصات پیکسل‌ها را بر روی زمین‌های مطالعاتی به وسیله GPS ردیابی کرده و برای افزایش دقت نمونه‌ها، در محدوده‌ی زمانی عبور سنجه از روی منطقه موردنظر عملیات زمینی انجام گرفت (شکل ۲-۳). به‌وسیله استوانه مدرج تا عمق پنج سانتی‌متر از سطح خاک نمونه‌ها را استخراج کرده و بلافاصله پس از نمونه‌برداری، هر یک از نمونه‌ها را به‌دلیل حفظ رطوبت درون پلاستیک گذاشته و برای به‌دست‌آوردن

رطوبت حجمی به آزمایشگاه انتقال داده شد. در آزمایشگاه وزن خاک مرطوب با دقت اندازه‌گیری و سپس درون آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت گذاشته شد تا رطوبت خاک به‌طور کامل از بین برود. سپس درصد رطوبت خاک به‌صورت زیر محاسبه شد.

$$(۱-۲) \quad 100 \times \frac{\text{وزن خاک خشک} - \text{وزن خاک مرطوب}}{\text{وزن خاک خشک}} = \text{درصد رطوبت خاک}$$

دمای مربوط به سطح خاک و عمق پنج سانتی‌متر از خاک نیز به وسیله‌ی دماسنج مخصوص خاک با دقت ۰/۱ در زمان نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد. ماهواره لندست در مدارهای خورشید آهنگ در هر ۹۹ دقیقه یک بار از شمال به جنوب به دور زمین گردش می‌کنند. مدار گردش این ماهواره‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که در ساعت ۹:۴۵ دقیقه به وقت محلی از بالای خط استوا عبور می‌کنند. این ماهواره‌ها در هر گذر نواری به عرض ۱۸۵ کیلومتر را پوشش می‌دهند، تهیه پوشش کامل زمین ۱۶ روز طول می‌کشد (ضیائی‌ان فیروزآبادی و پروین، ۱۳۹۲). لندست ۸ ماهواره آمریکایی دیده‌بانی زمین است که ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. لندست ۸ هشتمین ماهواره از سری ماهواره‌های لندست و هفتمین ماهواره از این پروژه است که با موفقیت در مدار قرار گرفت. این ماهواره دارای ۱۱ باند است که همه بجز باندهای ۸، ۱۰ و ۱۱ قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر دارند. باند ۱ در محدوده ماورای بنفش و آبی بوده و می‌تواند اطلاعات مربوط به نور آبی را جمع‌آوری کرده و یکی از عواملی که این ماهواره را از بقیه متمایز می‌کند وجود همین باند است. از مهم‌ترین موارد استفاده این باند می‌توان به نشان‌دادن عمق آب و دنبال کردن ذرات ریزی مثل گردوغبار و دود اشاره کرد. باندهای ۲، ۳ و ۴ جزء باندهای مرئی هستند. باند ۵، باند مادون قرمز نزدیک است. این طیف برای اکولوژی حائز اهمیت است زیرا سلامت گیاهان را نشان می‌دهد. آب موجود در برگ‌های گیاهان طول موج‌ها را به سمت آسمان پراکنده کرده و گیاهان در این باند بیشترین بازتاب را دارند.

باندهای ۶ و ۷ در محدوده مادون قرمز کوتاه قرار دارند. این باندها برای تمایز و تشخیص زمین‌های مرطوب از خشک به‌کار می‌روند و در علوم زمین‌شناسی که صخره‌ها، سنگ‌ها و خاک‌ها در این باندها به‌راحتی قابل تفکیک از یکدیگر هستند. باند ۸ نیز باند پانکروماتیک نامیده می‌شود که طول موج آن همه باندهای مرئی را در بر گرفته

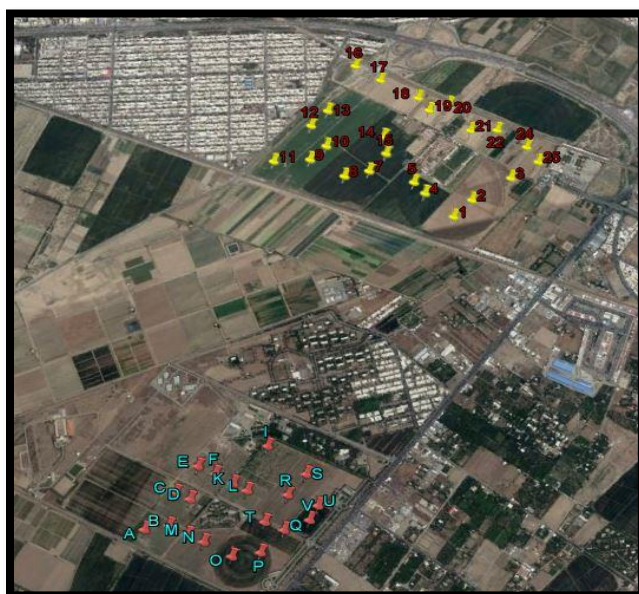
..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۲۰/

است و تفکیک مکانی ۱۵ متر است. باند ۹ کمترین جزئیات را نشان می‌دهد. در این باند سطح زمین دیده نمی‌شود و نمایان‌کننده آنچه در بالای زمین یا بالای اتمسفر است است. همچنین این باند مخصوص نشان دادن ابرهای سیروسی هستند. باندهای ۱۰ و ۱۱ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر مادون قرمز حرارتی هستند که گرمای سطح زمین و اشیای داخل آن را نشان می‌دهند (Landsat، ۲۰۱۳).

محصولات تصاویر سنجنده TIRS OLI مربوطه به تاریخ ۵ اردیبهشت سال ۱۳۹۵ برابر با ۲۴ آوریل سال ۲۰۱۶ برای تحقیق استفاده شد. ساعت گذر سنجنده از محدوده مورد مطالعه ۱۱:۴۳ دقیقه به وقت محلی با احتساب کمترین میزان ابرناکی هوا بود که قبل از انجام نمونه‌برداری زمینی از طریق بررسی روند ابرناکی سازمان هواشناسی در محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات تصویر در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

جدول ۲-۱: مشخصات تصویر

تاریخ اخذ تصویر	ساعت تصویربرداری (به وقت محلی)	تعداد باندها	زاویه ارتفاع خورشیدی (درجه)	آزیموت خورشیدی (درجه)
۱۳۹۵/۰۵/۰۲	۱۱:۴۳	۱۱	۸۶۲/۵۴	۵۴۲/۱۴۲



شکل ۲-۳ موقعیت نقاط نمونه‌برداری (بالا: مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران - پایین: مزرعه

تحقیقاتی معاونت آب و خاک)

۳-۲ نرم افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش برای انجام تحلیل آماری از نرم افزار EXCEL و برای مراحل مربوط به پردازش تصویر و تهیه خروجی ها از نرم افزارهای ARCMAP 10.2، ENVI 4.8 و ENVI 5.3 و برای انجام آزمون های آماری از نرم افزار SPSS و برای انتخاب منطقه برای نمونه برداری زمینی از تصاویر Google Earth استفاده شد.

۴-۲ پیش پردازش داده ها

با توجه به اینکه تصاویر مورد استفاده در این پژوهش تصاویر ماهواره لندست است و از سایت سازمان نقشه برداری و زمین شناسی آمریکا^۱ (USGS) دریافت شده اند، این تصاویر خود زمین مرجع بوده، اما برای اطمینان بیشتر از تصحیح هندسی، تصاویر مورد کنترل قرار گرفت.

از آنجا که برای به دست آوردن دمای هوا به روش های مختلف نیاز به مقادیر واقعی انرژی های ساطع شده از اشیا بوده و در مواردی نیز ممکن است شدت سیگنال های ارسالی از طرف اشیا به دلیل اثرات اتمسفری کمتر از مقدار واقعی باشد، لازم است اثرات اتمسفری بر روری تصاویر حذف و یا کاهش یابد. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار ENVI 5.3 با روش FLAASH تصاویری که تصحیح رادیومتریکی شده بودند، تحت تصحیح اتمسفری قرار گرفتند که خروجی های آن در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گرفت. FLAASH از روش هایی است که از مدل های فیزیکی انتقال انرژی الکترومغناطیسی برای تصحیح اثرات اتمسفر استفاده می کند و برخلاف سایر روش ها که از پارامترهای پیش فرض برای تصحیح استفاده می کنند کلیه پارامترها از جمله ساعت، تاریخ، طول و عرض جغرافیایی، نوع سنسور، ارتفاع متوسط منطقه، باندهای بازتابی بخار آب، نوع مواد معلق در هوا، نوع تصویر، میزان کربن دی اکسید و ... مستقیم توسط خود کاربر قابل تغییر است.

¹ United States Geological Survey

۵-۲ شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۱

گسیل‌مندی^۲ از سطح زمین توسط اندازه‌گیری‌های VNIR تخمین زده می‌شود و یا به‌طور فیزیکی توسط رادیانس‌های TIR^۳ و MIR^۴ تصحیح شده جوی در سطح زمین برآورد می‌شود (حمزه لوثی، ۱۳۹۴). گسیل‌مندی را می‌توان با استفاده از شاخص NDVI برآورد کرد. این شاخص را با نام NDVI می‌شناسیم که می‌توان آن را با استفاده از دو باند مادون قرمز و مادون قرمز نزدیک به‌دست آورد. دلیل استفاده از باندهای مذکور در محاسبه شاخص NDVI، کاهش میزان انرژی انعکاسی در طیف قرمز با رشد و توسعه گیاه به علت جذب انرژی طیف الکترومغناطیسی توسط کلروفیل برگ گیاه در طی فتوسنتز و افزایش میزان انرژی انعکاسی در طیف مادون قرمز نزدیک به علت ساختار سلولی برگ است.

$$NDVI = \frac{band5 - band4}{band5 + band4} \quad (۲-۲)$$

در ماهواره لندست ۸، باند ۴ باند قرمز و باند ۵ بیانگر باند مادون قرمز نزدیک است. محدوده این شاخص بین ۱ تا ۱- است که مقادیر بالای این شاخص نشان دهنده‌ی افزایش پوشش گیاهی است. مقادیر مربوط به آب و ابر معمولاً کمتر از صفر است. سپس از روش آستانه‌گذاری NDVI استفاده شد که با استفاده از جدول ۲-۳ محدوده‌های NDVI برای محدوده‌هایی که گیاه و خاک کمتر دارند برای تعیین گسیل‌مندی تقسیم‌بندی شد.

جدول ۲-۲: تقسیم‌بندی محدوده‌های NDVI (Zhang و همکاران، ۲۰۰۶)

NDVI	گسیل‌مندی سطح زمین (ε)
-1 < NDVI < -0.185	۰/۹۸۵
-0.185 < NDVI < 0.157	۰/۹۵۵
0.157 < NDVI < 0.727	$1.0094 + 0.047LN(NDVI)$
0.727 < NDVI < 0.8	۰/۹۹
0.8 < NDVI < 1	۰/۹۹

^۱ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

^۲ Land Surface Emissivity (LSE)

^۳ Thermal Infrared

^۴ Middle Infrared

در تقسیم‌بندی دیگری که توسط Sobrino و همکاران در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است و بیشتر برای مناطقی که گیاه و خاک وجود دارد مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این پژوهش از این تقسیم بندی به شرح زیر استفاده شده است (Sobrino و همکاران، ۲۰۱۲):

$$۱. \quad (NDVI < 0.2)$$

در این مورد پیکسل مربوط است به خاک خشک و میزان گسیل‌مندی آن براساس آنالیز کتابخانه‌ای نمونه‌های خاک به دست می‌آید. مقدار میانگین آن برای باند حرارتی لندست ۰/۹۷ است.

$$۲. \quad (NDVI > 0.5)$$

پیکسل‌های با ارزش NDVI بزرگتر از ۰/۵ مناطق با پوشش گیاهی کامل را نشان می‌دهد و مقدار ثابت گسیل‌مندی آن‌ها ۰/۹۹ تخمین زده شده است.

$$۳. \quad (0.2 \leq NDVI \leq 0.5)$$

در این مورد پیکسل ترکیبی از پدیده‌های مختلف است و مقدار گسیل‌مندی با استفاده از رابطه ۳-۴ محاسبه شده است:

$$e = 0.004 \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} + NDVI_{min}} \right)^2 + 0.986 \quad (۳-۲)$$

۲-۶ دمای سطح زمین به روش دفتر علوم لندست^۱

برای به دست آوردن دما توسط این روش به ترتیب نیاز به محاسبه رادیانس طیفی، درجه حرارت روشنایی در سطح سنجنده، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و گسیل‌مندی است. این روش تحت عنوان روش Artis نیز شناخته می‌شود (Farina، ۲۰۱۲؛ Feng و همکاران، ۲۰۱۴).

رادیانس طیفی عبارت است تابشی در بالای اتمسفر که توسط سنجنده مشاهده شده است. رادیانس طیفی

¹ Artis

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۲۴/

برای هر باند با رابطه زیر به دست می آید. gain و offset را می توان از فایل مرجع همراه تصویر^۱ استخراج کرد (Qin و همکاران، ۲۰۰۱).

$$L_{\lambda} = gain \times DN \times offset \quad (۴-۲)$$

$$L_{\lambda} = \frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{cal_{max}} - Q_{cal_{min}}} \times (DN - Q_{cal_{min}}) + L_{min} \quad (۵-۲)$$

که در این رابطه پارامترهای رابطه ۳-۴ باید از فایل مرجع همراه تصویر استخراج شود.

$$T_{sensor} = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1)} \quad (۶-۲)$$

BT: دمای مؤثر در سنجنده بر حسب کلونین

K₁: ثابت واسنجی اول (ثابت تصحیح اول) Wm⁻²

K₂: ثابت واسنجی دوم (ثابت تصحیح دوم)

L: رادیانس طیفی سنجنده (Wm⁻²sr⁻¹um⁻¹)

البته برای سری های مختلف ماهواره لندست مقدار ضریب واسنجی متفاوت است که این مقادیر در Headerfile

تصاویر و همچنین Landsat User Handbook که برای هر سری ماهواره لندست منتشر می شود نیز وجود دارد

(Pu و Gong، ۲۰۱۲).

جدول ۲-۳: ضرایب واسنجی برای باندهای حرارتی لندست ۸

K2	K1	ضریب واسنجی
۱۳۲۱/۰۸	۷۴۴/۸۹	OLIBAND10
۱۲۰۱/۱۴	۴۸۰/۸۹	OLIBAND11

۷-۲ استخراج دمای سطح زمین

پس از محاسبه پارامترهای لازم با استفاده از فرمول زیر دمای سطح زمین محاسبه می شود (Farina، ۲۰۱۲).

¹ Header File

$$S_t = \frac{T_{sensor}}{1 + \left(\lambda \times \left(\frac{T_{sensor}}{\rho} \right) \right) \ln \epsilon} \quad (7-2)$$

$$\rho = 14380$$

λ : طول موج رادیانس ساطع شده (۱۱/۵ میکرومتر)

ϵ : توان تشعشعی

سرانجام دمای به دست آمده را با استفاده از رابطه ۳-۸ می توان از درجه کلوین به درجه سانتی گراد تبدیل کرد

(Cengel و Boles، ۱۹۹۴).

$$S = Kelvin - 273.15 \quad (8-2)$$

۸-۲ برآورد رطوبت خاک

در تمام روش های زیر از NDVI و LST بهره برده شده است که به دلیل اینکه پیشتر به آن ها پرداخته شده است از توضیح مجدد آن پرهیز کرده ایم.

۱-۸-۲ شاخص دما و پوشش گیاهی (شیب رابطه TVX)

در این روش شاخص NDVI، دمای درخشندگی باندهای ۱۰ و ۱۱ و دمای سطح زمین از تصاویر استخراج شده و شیب رابطه TVX بین NDVI، دمای سطح زمین و همچنین مقادیر دمای درخشندگی محاسبه می شود. رابطه TVX از رابطه ی بین دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی برای تخمین رطوبت حجمی لایه سطحی خاک استفاده می کند (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۸-۲ شاخص های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت

شاخص NDVI، شاخص NDMI¹ و دمای سطح زمین از تصاویر استخراج و با بررسی ارتباط بین مقادیر رطوبت

¹ Normalization Difference Moisture Index

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۲۶/

خاک و شاخص‌های فوق برای به‌دست‌آوردن رگرسیون انجام می‌گیرد (خان‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۳).

NDMI یا شاخص اختلاف رطوبتی نرمال‌شده، از داده‌های باندهای مادون قرمز نزدیک (ρ_{NIR}) و مادون قرمز

میانی (ρ_{MIR}) با استفاده از رابطه ۹-۲ محاسبه می‌شود.

$$NDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR}} \quad (9-2)$$

باندهای مربوط به طول موج مادون قرمز نزدیک و میانی در سنجنده Landsat8 به‌ترتیب باندهای ۵ و ۶

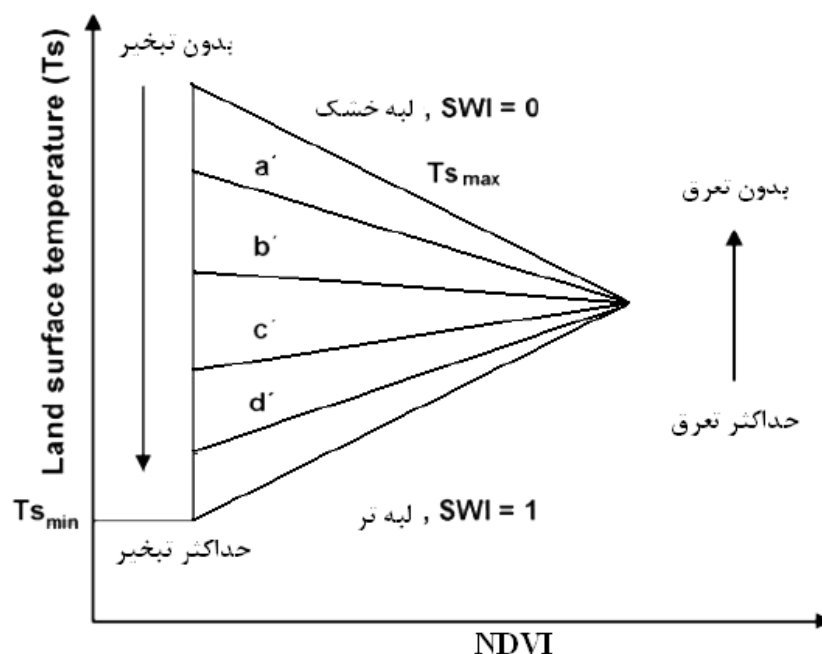
هستند (خان‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۸-۳ شاخص خیسی خاک

بسیاری از محققان رابطه فیزیکی بین نمایه گیاهی و LST را به شکل یک نمودار پراکنش نقطه‌ای نمایش

دادند که در آن از مفهوم فضای مثلثی برای استخراج رطوبت خاک استفاده می‌شود (Carlson, ۲۰۰۷؛ Gillies و

همکاران، ۱۹۹۷). مفهوم فضای مثلثی و ارتباط LST با NDVI در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲: نمودار مفهومی از رابطه مثلثی LST-NDVI برای تعیین شاخص خیسی خاک

مقدار SWI^1 در سراسر لبه خشک صفر و در سراسر لبه تر ۱ است. خطوط همتراز SWI با مقادیر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ به ترتیب با a' ، b' ، c' و d' مشخص شده‌اند (کشاورز و همکاران، ۱۳۹۰). ضلع بالایی مثلث نمایانگر لبه خشک (گرم) شامل گروهی از نقاط است که در مقادیر مختلف $NDVI$ دارای رطوبت خاک صفر هستند. برخلاف لبه تر (سرد) که نمایانگر بیشینه رطوبت خاک در مقادیر مختلف $NDVI$ است. در ناحیه‌ای که لبه خشک نامیده می‌شود مقادیر بیشینه دما وجود دارد که با فرض خطی بودن تغییرات دما در این ناحیه، معرف حالت خشک خاک (رطوبت کمینه) است. در مقابل، کمینه مقادیر دما نیز خطی اریب را تشکیل می‌دهند که لبه تر نام دارد و خاک اشباع یا خیلی مرطوب (رطوبت بیشینه) را نمایش می‌دهند. فرض بر این است که رطوبت بین لبه خشک و تر تغییر می‌کند. بر این اساس شاخص خیزی خاک یا SWI برای هر پیکسل به صورت زیر محاسبه می‌شود (Verstraeten و همکاران، ۲۰۰۶).

$$SWI_i = \frac{T_{\max(i)} - T_{s(i)}}{T_{\max(i)} - T_{\min(i)}} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن اندیس i نماینده شماره پیکسل، $T_{s(i)}$ همان LST پیکسل i ام است، $T_{\min(i)}$ کمینه دمای مشاهده شده و $T_{\max(i)}$ بیشینه دمای مشاهده شده متناظر با پیکسل موردنظر است که براساس مقدار $NDVI$ متغیر هستند. شاخص خیزی خاک در واقع درصدی از بیشینه رطوبت قابل دسترس خاک است که از آب پر شده است. برای یافتن مقدار $T_{\min}$ و $T_{\max}$ در هر پیکسل از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$T_{\max(i)} = b + a(NDVI_{(i)}) \quad (۱۱-۲)$$

$$T_{\min(i)} = d + c(NDVI_{(i)}) \quad (۱۲-۲)$$

که در آن $NDVI_i$ مقدار نمایه گیاهی در پیکسل موردنظر، و a و b به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار لبه خشک و c و d به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار لبه تر هستند که برای هر پراکنش نقطه‌ای $LST-NDVI$ مقادیر ثابتی هستند و با رگرسیون گیری به دست می‌آیند.

¹ Soil Wetness Index

خطوط مربوط به لبه خشک و تر طبق مدل SVAT^۱ به صورت تقریبی رسم می‌شوند. در این مدل روند تغییرات رطوبت خاک در فضای مثلثی یا همان فضایی که بین پوشش گیاهی و دمای سطح زمین برقرار می‌شود به صورت خطی در نظر گرفته شده است. بدین منظور در بالاترین و پایین ترین دمای مشاهده شده در نقاط موجود خطی عمود بر محور دمای سطح زمین (LST) رسم شده، سپس در بیشترین و کمترین میزان پوشش گیاهی نیز خطی عمود بر محور پوشش گیاهی (NDVI) رسم می‌شود. برای رسم این خطوط باید توجه داشت نقاطی که فاصله زیادی از نمونه‌های دیگر دارند و در واقع پراکنده هستند، در رسم این خطوط به علت اینکه ممکن است نقاط مربوط به آب و یا ابر باشند در نظر گرفته نمی‌شوند و نقاط از جایی وارد محاسبات می‌شوند که تراکم نمونه‌ها بیشتر هستند. خطی که ضلع بالایی (وتر) مثلث نشان می‌دهد مربوط به لبه خشک و فضایی که ضلع پایینی (قائده) مثلث نشان می‌دهد لبه تر را شامل می‌شوند.

روند تغییرات رطوبت خاک در مدل SVAT در لبه‌ها بررسی شده و اعدادی که رطوبت در این نواحی نشان می‌دهد تقریباً یکسان است و با رطوبت واقعی به دست آمده از روش میدانی تقریباً یکسان هستند. این بدین مفهوم است که رطوبتی که نقاط در لبه خشک نشان می‌دهد تقریباً با یکدیگر یکسان بوده و همچنین نقاطی که در لبه تر هستند نیز با رطوبت تقریباً یکسانی را نشان داده‌اند. با توجه به شکل ۳-۳ در راستای محور پوشش گیاهی نقاطی را که دارای رطوبت یکسانی بوده‌اند به یکدیگر اتصال داده و روندی که در لبه‌ها مشاهده می‌شود در کل نمونه‌ها به صورت تقریبی مشاهده شده و همان روند صدق می‌کند (Carlson, ۲۰۰۷).

پس از محاسبه شاخص‌ها و آزمون مدل‌های حاصل از شاخص‌های استفاده شده، به منظور برآورد رطوبت خاک با استفاده از شاخص‌های NDVI، LST، NDMI، BT10 و BT11 روابط رگرسیونی بین مقادیر رطوبت خاک و شاخص‌های برقرار شد. برای بررسی آماری صحت پیش‌بینی مدل‌ها، از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) که از رابطه ۲-۱۳ قابل محاسبه است، استفاده شد.

¹ Soil- Vegetation- Atmosphere Transfer

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_m)^2}{n}} \quad (۵-۱)$$

که در این رابطه X_p بیانگر مقادیر برآورد شده به وسیله مدل و X_m بیانگر مقادیر اندازه گیری شده است. مقدار RMSE همواره مثبت یا صفر است و با نزدیک شدن آن به صفر، دقت مدل برای برآورد مقدار متغیر موردبحث افزایش می یابد.

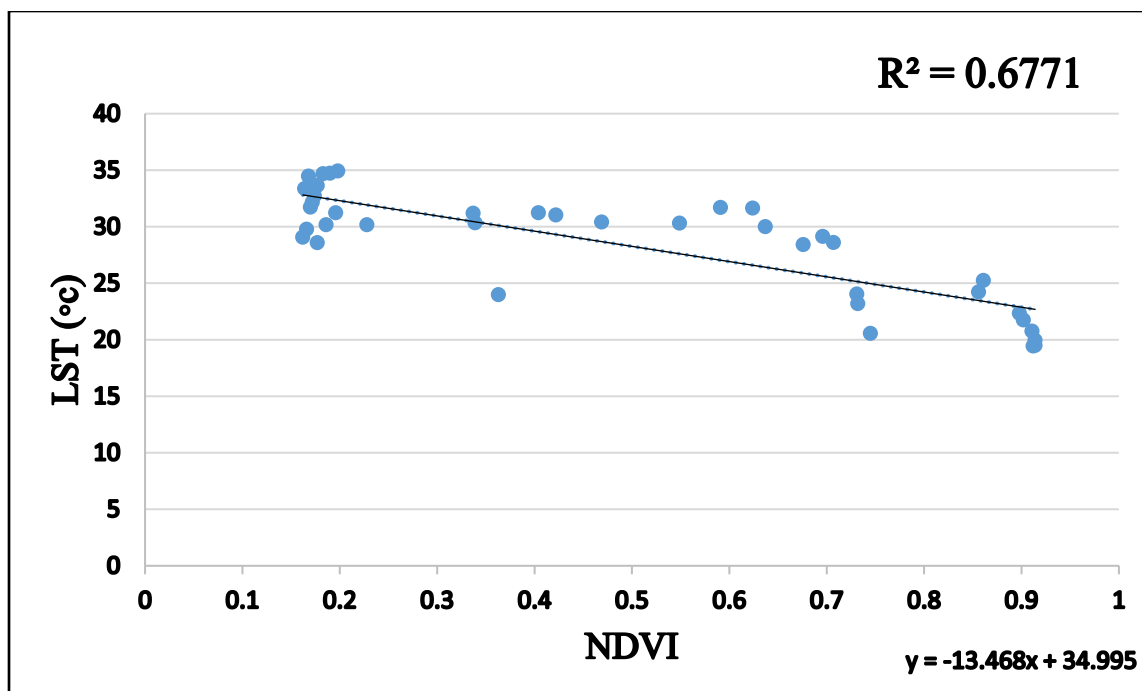
فصل سوم: نتایج و بحث

در این بخش ضمن ارائه نتایج تحقیق، به برآورد دقت مدل‌های برآورد رطوبت با استفاده از روش‌های آماری پرداخته شده است. به منظور یافتن رابطه‌ای رگرسیونی برای تخمین رطوبت لایه سطحی خاک، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، ابتدا شاخص پوشش گیاهی و سپس دمای سطح زمین، دمای درخشندگی و شاخص نرمال‌شده رطوبت به صورت پیکسلی محاسبه شده، سپس طبق روش‌های مختلف برآورد رطوبت، روابط خطی بین شاخص‌های مذکور و داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری‌شده در محدوده مطالعاتی، برآزش داده شد.

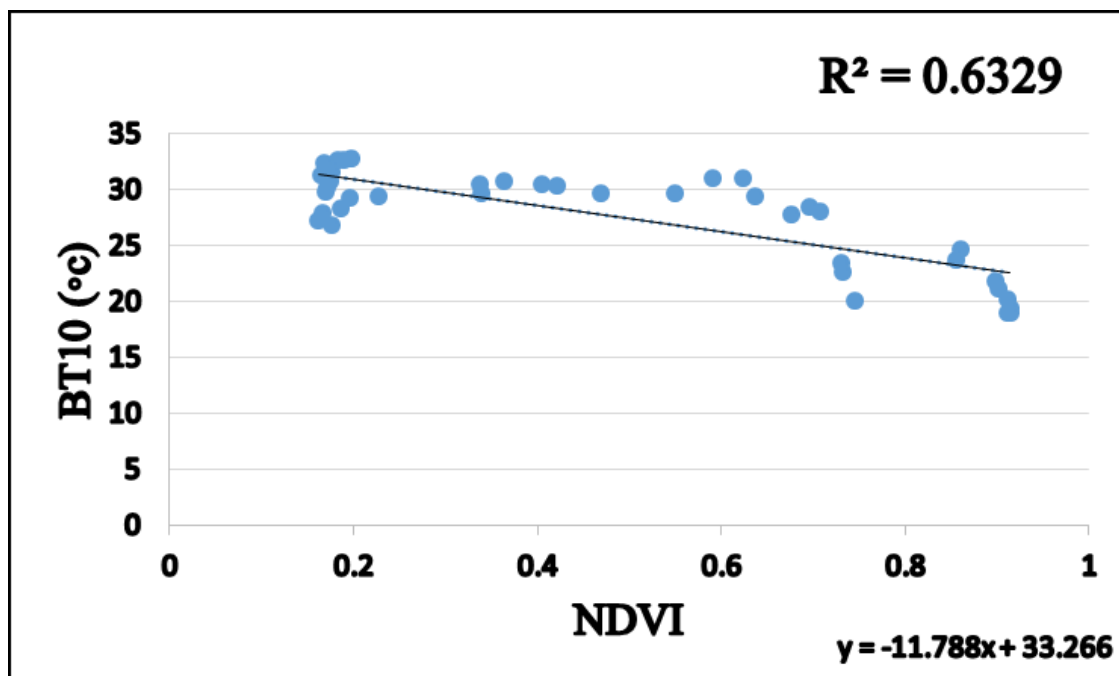
۳-۱ شاخص دما و پوشش گیاهی (شیب رابطه TVX)

این مطالعه از طریق ترکیب داده‌های انعکاسی و حرارتی، رطوبت لایه سطحی خاک را با توجه به وضعیت پوشش گیاهی طبیعی منطقه برآورد کرده است. نتایج به دست آمده نشانگر موقعیت نسبی این روش در پیش‌بینی رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از شیب TVX در منطقه مورد مطالعه است. روش TVX از رابطه بین دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی برای تخمین رطوبت لایه سطحی خاک استفاده می‌کند.

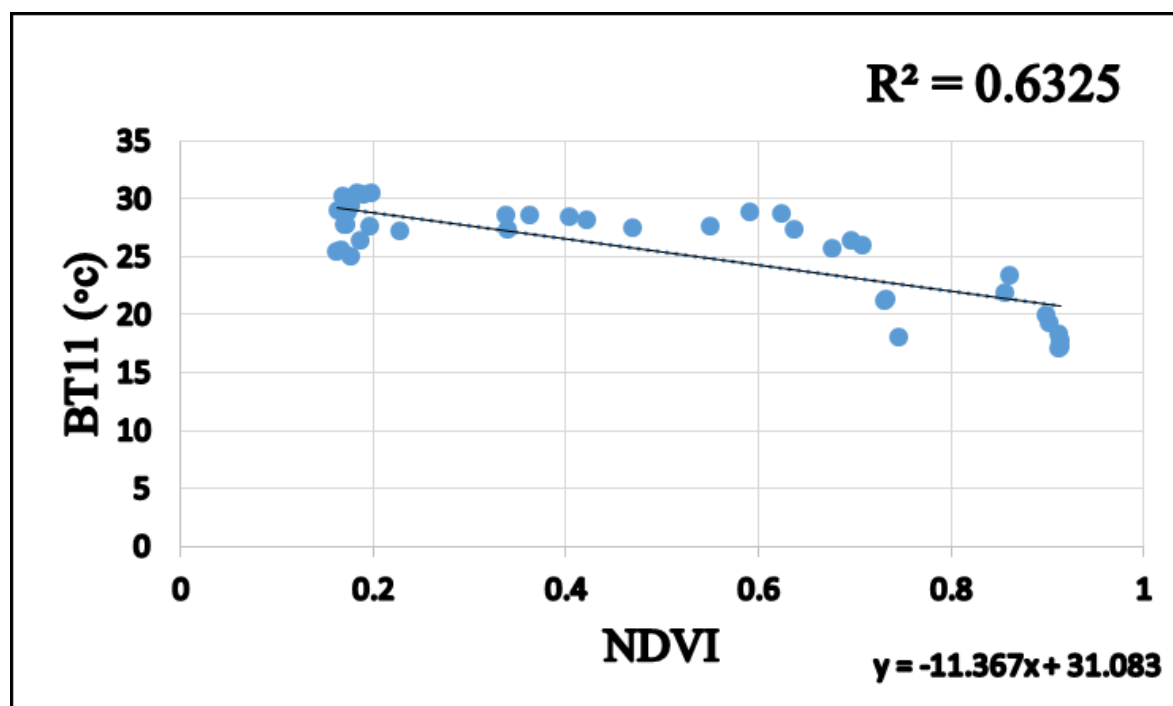
با توجه به عامل‌های مورد نیاز در محاسبه رطوبت خاک به روش TVX، NDVI و عامل‌های LST، BT₁₀ و BT₁₁ از تصاویر سنجنده لندست ۸ استخراج شد و در ادامه اقدام به بررسی شیب رابطه TVX (شیب نمودار همبستگی بین NDVI، LST، BT₁₀ و BT₁₁) شد. شکل ۳-۱، ۳-۲ و ۳-۳ شیب رابطه TVX را در سه حالت (رابطه NDVI با LST، BT₁₀ و BT₁₁) نشان می‌دهد. میری و همکاران (۱۴۰۲) نیز در پژوهشی نشان دادند که بین شاخص‌های NDVI با مقادیر رطوبت خاک ارتباط وجود دارد. همچنین تحقیق دیگری بر روی تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک نشان داد که همبستگی خوبی بین شیب رابطه TVX (NDVI, LST) و مقادیر رطوبت لایه سطحی خاک وجود دارد (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۱).



شک ۳-۱: رابطه دمای سطح زمین و شاخص NDVI در نمونه‌های مورد مطالعه (شیب رابطه TVX)

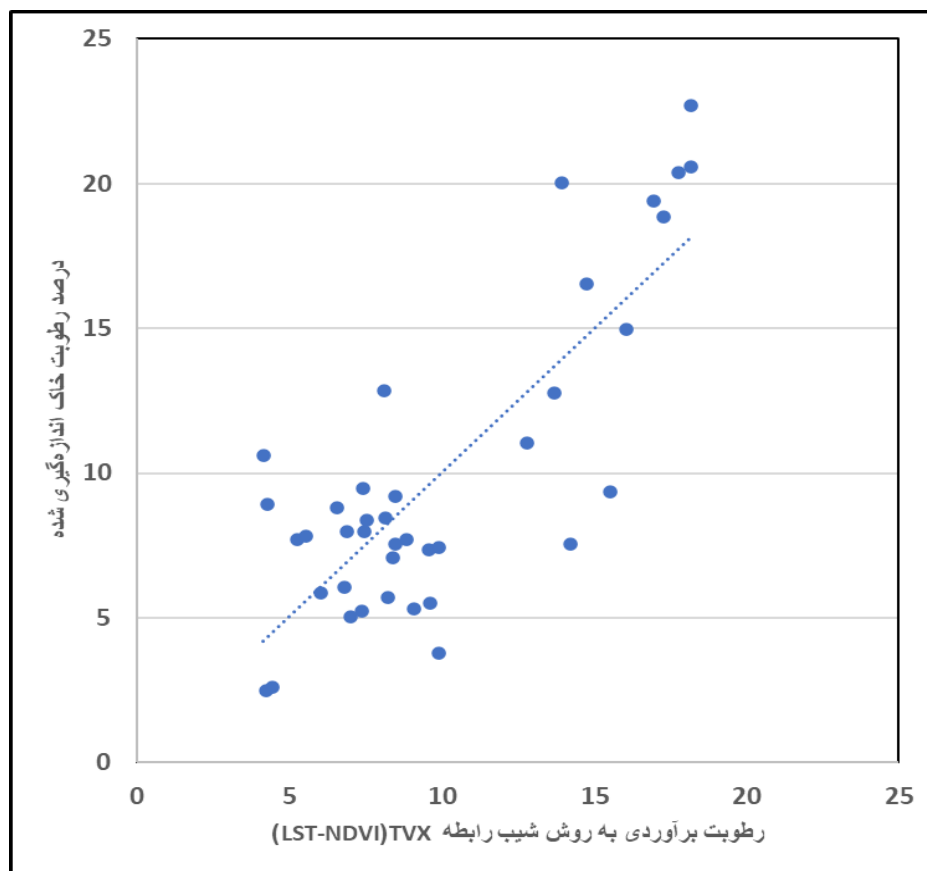


شکل ۳-۲: رابطه دمای روشنایی باند ۱۰ و شاخص NDVI در نمونه‌های مورد مطالعه (شیب رابطه TVX)



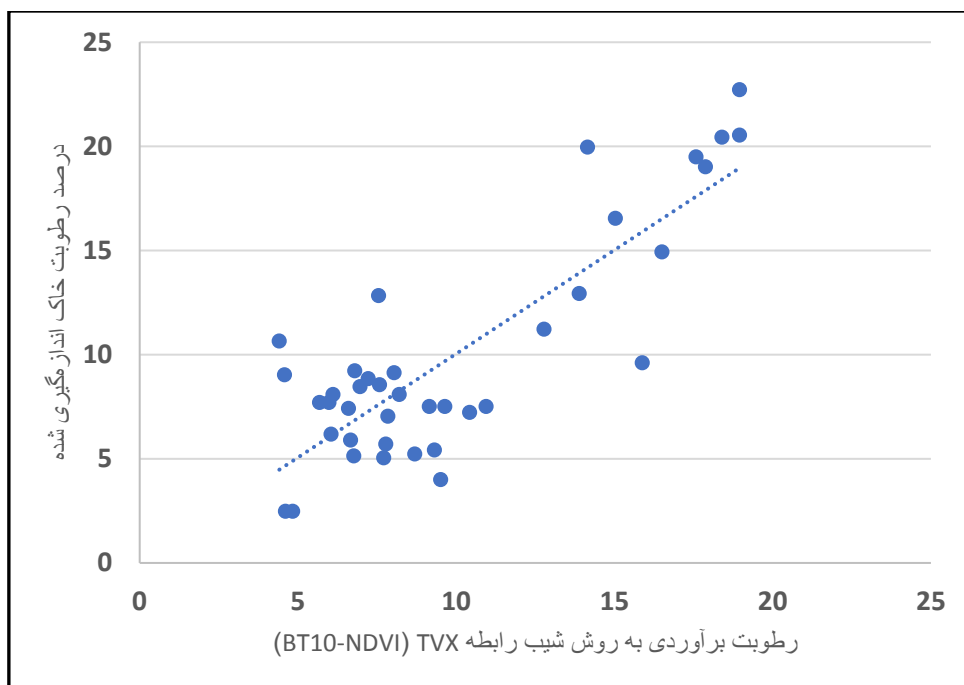
شکل ۳-۳: رابطه دمای روشنایی باند ۱۱ و شاخص NDVI در نمونه‌های مورد مطالعه (شیب رابطه TVX)

آزمون‌های همبستگی به منظور تعیین ارتباط شیب رابطه TVX با داده‌های مشاهده شده رطوبت خاک بین آن‌ها انجام شد. شکل ۳-۴ نمودار رگرسیونی شیب رابطه TVX حاصل از همبستگی LST و NDVI با درصد رطوبت لایه سطحی خاک را در طول دوره مطالعاتی نشان می‌دهد. همانطور که پیشتر اشاره شد در این تحقیق علاوه بر LST از دمای روشنایی باند ۱۰ و ۱۱ نیز برای تعیین شیب رابطه TVX استفاده شده است (شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶). در جدول ۳-۱ مدل‌های برآورد رطوبت لایه سطحی خاک حاصل از شیب رابطه TVX به دست آمده‌اند. با استفاده از مدل‌های به دست آمده، نقشه‌های مربوط به درصد رطوبت خاک حاصل از این سه مدل در شکل‌های ۳-۷، ۳-۸ و ۳-۹ حاصل شده‌اند. همچنین در تحقیق دیگری نتایج صحت سنجی مدل برآورد رطوبت خاک نیز نشان داد که این مدل با میانگین خطای کمتر از ۰/۰۱۸، قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی است، این مقدار خطا، نشان‌دهنده دقت مدل پیشنهادی برای برآورد رطوبت خاک سطحی است (خان‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۳).



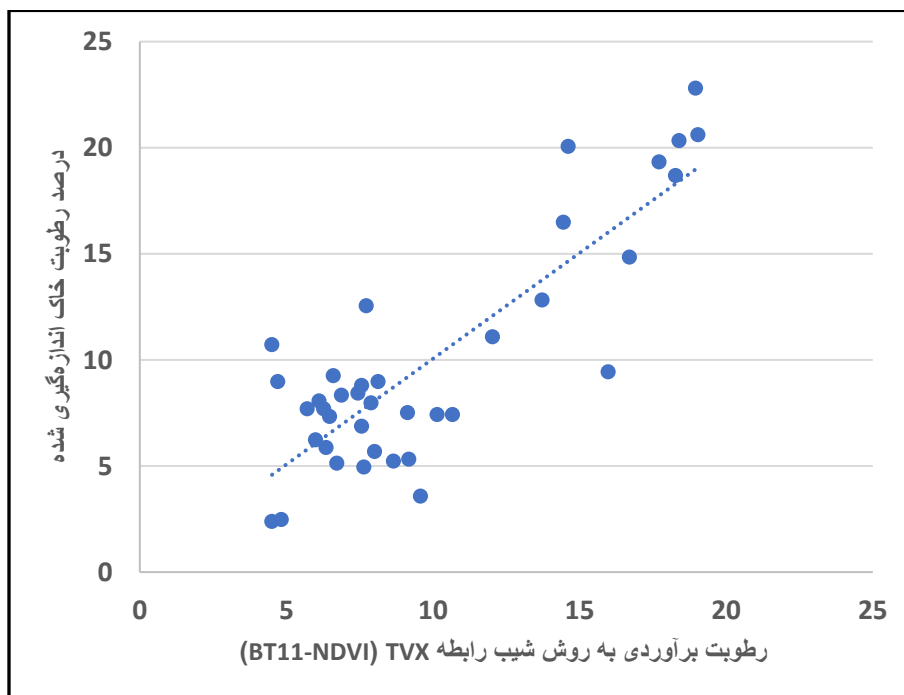
شکل ۳-۴: نمودار رطوبت برآوردی به روش شیب رابطه (LST-NDVI) TVX در مقابل درصد رطوبت خاک اندازه گیری شده

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۳۴/



شکل ۳-۵: نمودار رطوبت برآوردی به روش شیب رابطه TVX (BT10-NDVI) در مقابل درصد رطوبت خاک

اندازه گیری شده



شکل ۳-۶: نمودار رطوبت برآوردی به روش شیب رابطه TVX (BT11-NDVI) در مقابل درصد رطوبت خاک

اندازه گیری شده

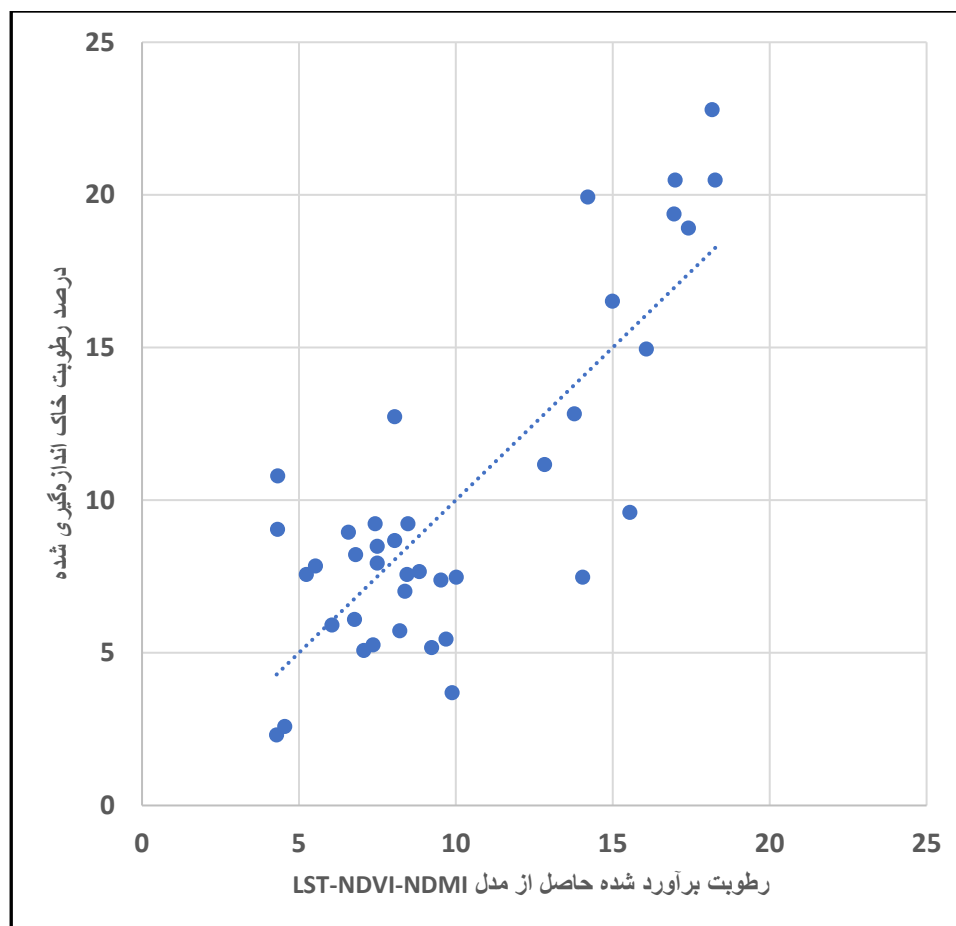
جدول ۳-۱: ضرایب همبستگی مدل‌های رطوبت لایه سطحی خاک حاصل از شیب رابطه TVX

MODEL	Equation	R ² -adj	RMSE
LST-NDVI	%SM=-0.936LST-0.515NDVI+36.7	0.64	3.14
BT10-NDVI	%SM=-0.56NDVI-1.073BT ₁₀ +39.73	0.69	2.91
BT11-NDVI	%SM=-0.84NDVI-1.137BT ₁₁ +39.38	0.71	2.85

۳-۲ نتایج شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت

در این روش پس از استخراج تصویر شاخص NDVI، شاخص NDMI و LST روابط بین این سه شاخص از طریق رگرسیون گیری به دست آمده و همبستگی بین مقدار رطوبت حاصل شده با رطوبت واقعی به صورت شکل ۴-۱۰ نمایش داده شده است. مدل حاصل از این روش در جدول ۳-۴ جهت محاسبه درصد رطوبت خاک برآزش شده است. شکل ۳-۷ نقشه درصد رطوبت خاک را در این مدل با استفاده از جدول ۳-۲ نشان می‌دهد.

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست ۳۶/



شکل ۳-۷: پراکندگی مقادیر رطوبت خاک اندازه گیری شده و برآوردی حاصل از مدل LST-NDVI-NDMI

جدول ۳-۲: مدل حاصل شده از ارتباط بین LST، NDVI و NDMI برای محاسبه درصد رطوبت لایه سطحی خاک

MODEL	Equation	R ² -adj	RMSE
LST-NDVI-NDMI	%SM=1.36NDMI-1.32NDVI-0.92LST+36.47	0.64	3.14

۳-۳ نتایج شاخص خیسی خاک

مقادیر مربوط به لبه خشک و لبه تر به ترتیب از روابط ۳-۱ و ۳-۲ از طریق استخراج مقدار NDVI و LST

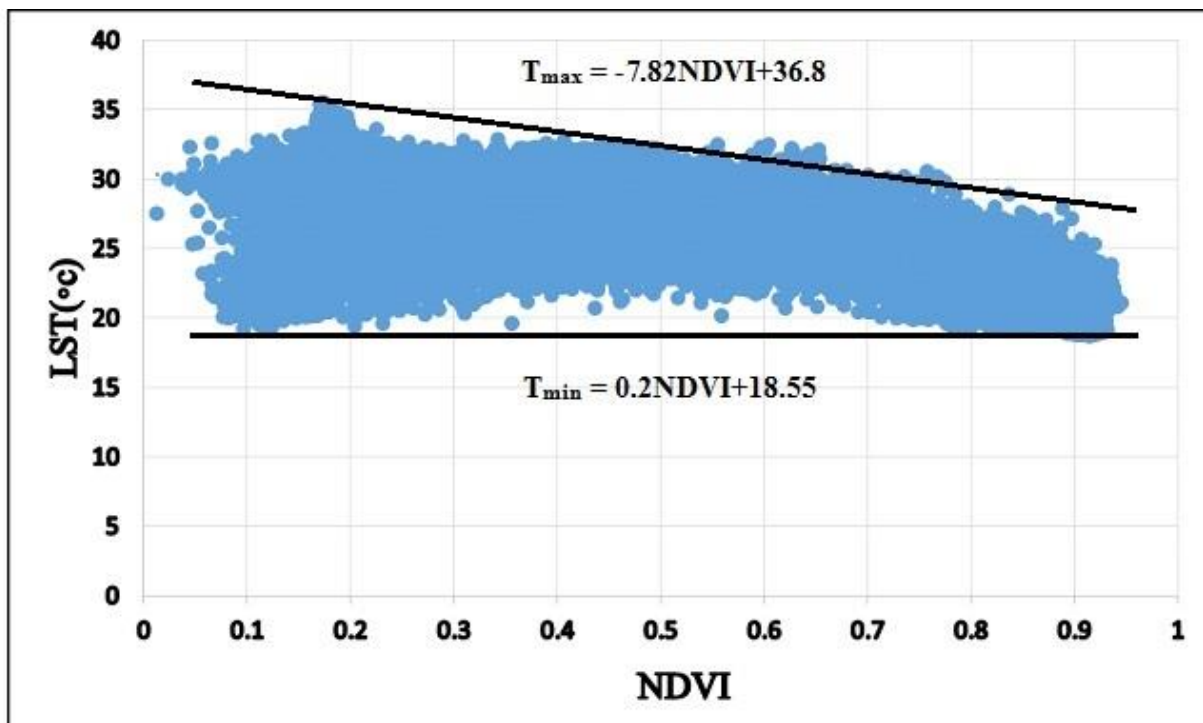
حاصل از تصویر و رسم ارتباط بین این دو شاخص و تشکیل فضای مثلثی به دست آمد.

$$T_{\max} = -7.82NDVI + 36.8$$

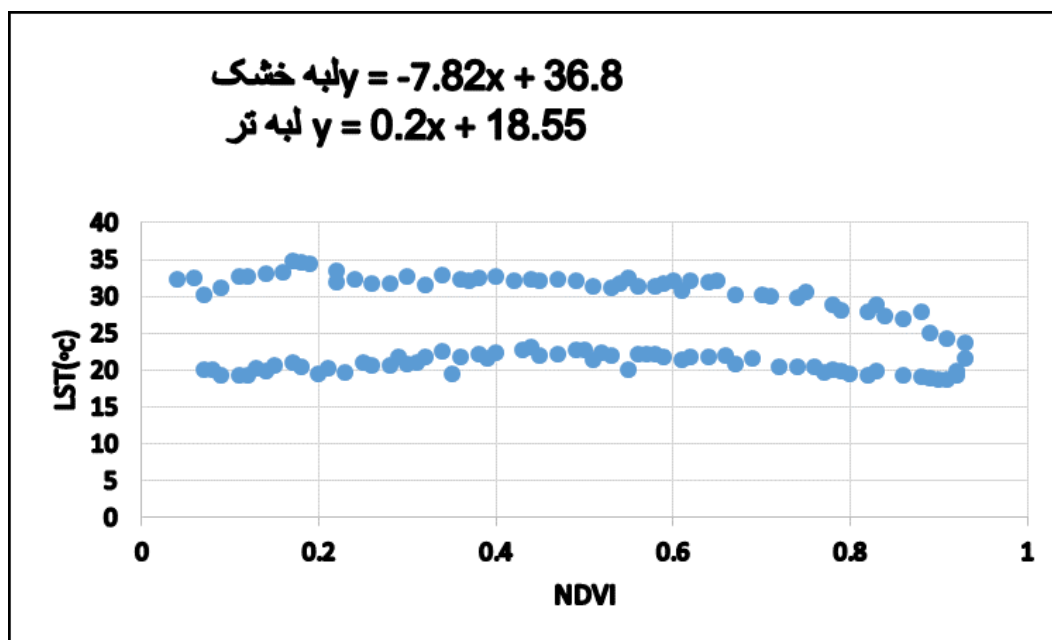
(۳-۱)

$$T_{\min} = 0.2NDVI + 18.55 \quad (2-3)$$

نمودار پراکنش نقطه‌ای حاصل از ارتباط بین LST و NDVI در شکل ۴-۱۲ رسم شده است. خط رسم شده در بالای نمودار مربوط به لبه خشک، و خط پایین منحنی حاکی از لبه تر در نمونه‌های حاضر است. نقاط لبه خشک و تر نیز در شکل ۴-۱۳ به همراه روابط آن‌ها نشان داده شده است.

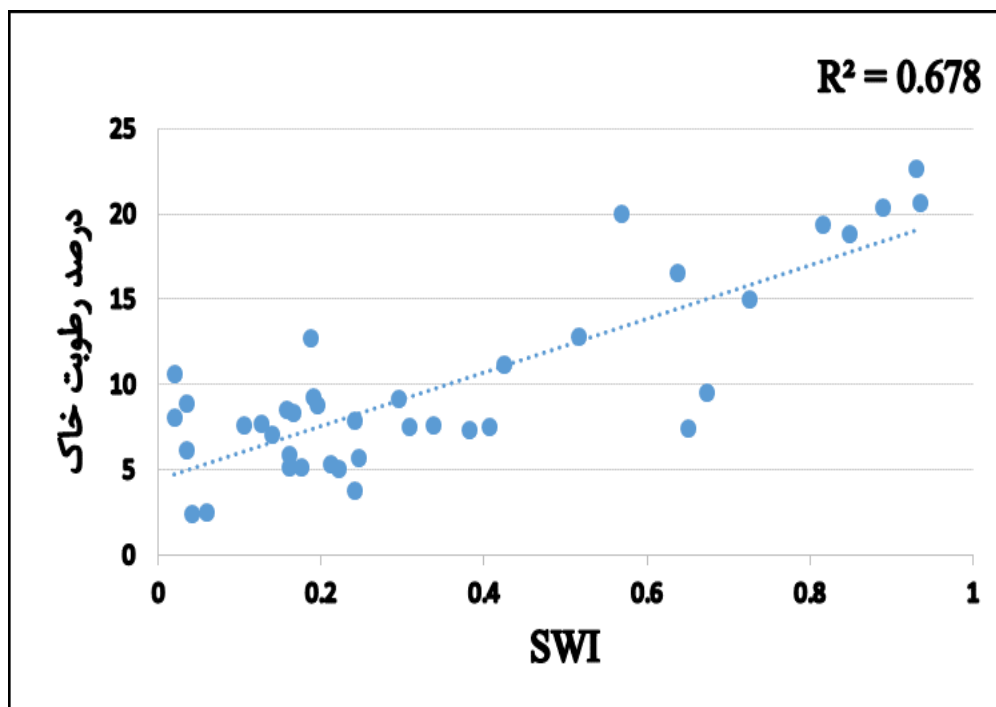


شکل ۴-۸: نمودار پراکنش نقطه‌ای LST-NDVI از داده‌های سنجنده لندست ۸ در منطقه مورد مطالعه



شکل ۳-۹: نمودار پراکنش نقطه‌ای لبه خشک و تر در رابطه بین LST-NDVI از داده‌های سنجنده لندست ۸ در منطقه

مقادیر حاصل از روابط فوق را در رابطه‌ی ۳-۱۰ قرار داده و شاخص خیزی خاک (SWI) برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد. با انجام بررسی‌ها و مقایسه بین شاخص خیزی خاک و رطوبت واقعی به دست آمده رابطه برآورد شده در جدول ۳-۳ برای به دست آوردن درصد رطوبت خاک در این تحقیق ارائه شده است. به ترتیب در شکل‌های ۳-۹ و ۳-۱۰ ارتباط بین مقادیر درصد رطوبت واقعی و شاخص خیزی خاک و ارتباط بین درصد رطوبت واقعی و مدل استفاده شده در ۳-۳ را نشان می‌دهند. این نتایج با تحقیقات خزاعی و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد که در نتایج خود، همبستگی خطی و نمایی معنی‌داری بین نمایه خیزی خاک (SWI) و رطوبت خاک به دست آورده‌اند.

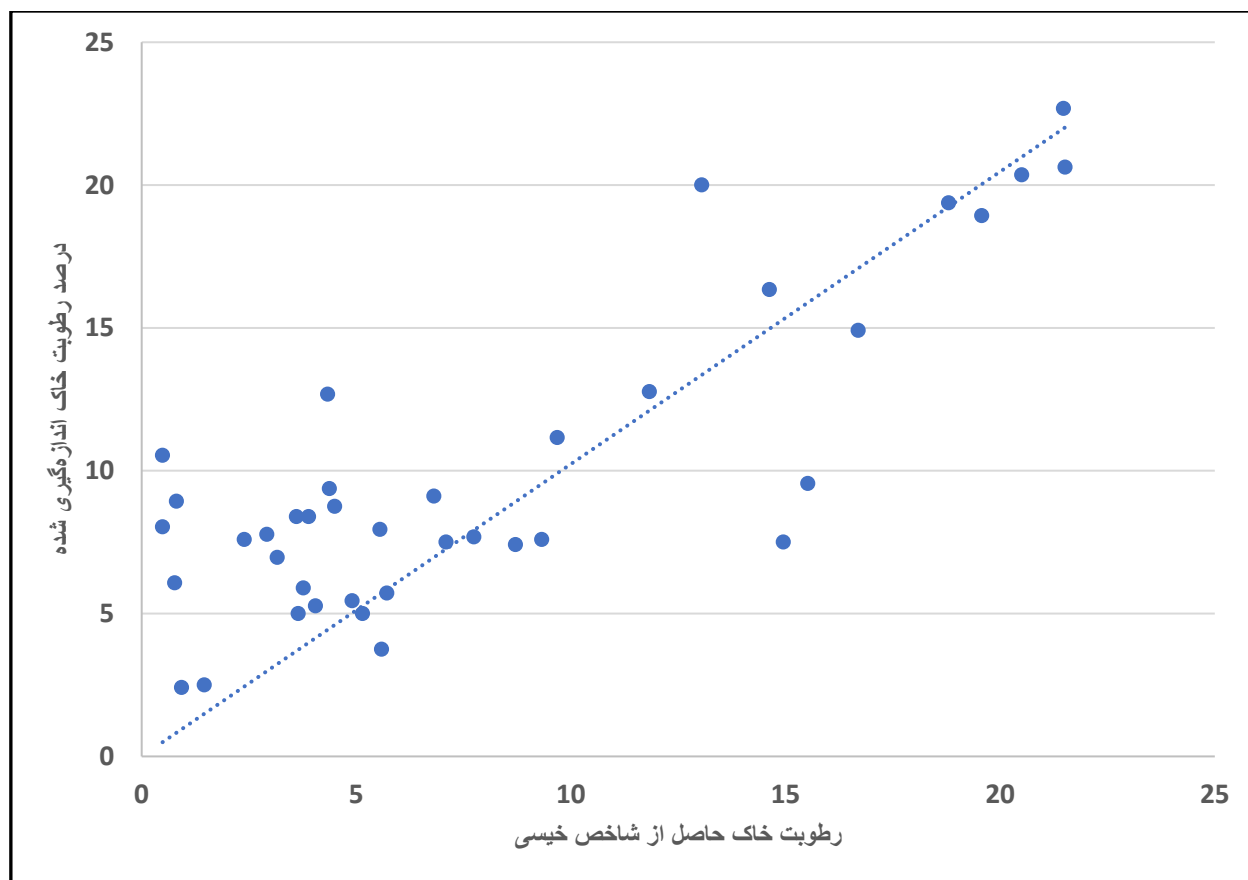


شکل ۳-۱۰: نمودار ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص خیزی خاک

جدول ۳-۳: مدل برآورد شده از بررسی ارتباط بین درصد رطوبت و شاخص خیزی حاصل از تصویر

MODEL	Equation	R ² -adj	RMSE
SWI	SWI۲۳%SM =	۰/۶۷	۲/۸

..... بررسی امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از محصولات لندست / ۴۰



شکل ۳-۱۱: نمودار ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک با مدل به دست آمده از شاخص خیسی خاک

فصل چهارم: نتیجه‌گیری

امکانات، فن‌آوری‌ها و روش‌های تعیین مشخصات سطح خاک، همواره با تغییر و توسعه همراه بوده و هر روز شاهد بهبود روش‌های قبلی و جایگزینی فناوری و روش‌های نوین به‌دست‌آوردن داده‌ها و اطلاعات از پدیده‌های مختلف سطح زمین هستیم. منابع اطلاعاتی جدید و روش‌های بهینه، در برآورد و اندازه‌گیری رطوبت لایه سطحی خاک نیز مؤثر بوده است. تعیین رطوبت لایه سطحی خاک توسط تصاویر سنجنده لندست ۸ از گام‌های نخستین برای شناسایی خصوصیات طبیعی و توان‌های ویژه منطقه موردنظر و بهره‌برداری بهینه از امکانات دقیق از میزان رطوبت و نوسان‌های روزانه آن می‌تواند راهکارهایی مناسب در جهت تهیه نقشه‌های رطوبت لایه سطحی خاک، پیش‌بینی سیل، خشکسالی و سایر پدیده‌های اقلیمی با در اختیار داشتن تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک، مطالعات کشاورزی و منابع طبیعی، مدیریت مرتع و ... فراهم کند.

با استفاده از تصاویر لندست ۸ و انجام مراحل مختلف پردازش و تصحیح داده‌ها، امکان استخراج شاخص‌هایی نظیر اختلاف پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، درجه حرارت سطح زمین (LST)، اختلاف رطوبت نرمال‌شده (NDMI) و دمای درخشندگی (BT) با استفاده از باند‌های حرارتی ۱۰ و ۱۱ فراهم شد. به‌منظور تعیین رابطه هر یک از این شاخص‌ها و همچنین ارزیابی دقت حاصل از مدل‌های حاصل شده، نیاز به داده‌های واقعی رطوبت خاک، همزمان با گذر ماهواره بود که این مهم با استفاده از برداشت‌های میدانی از ایستگاه‌های مطالعاتی انجام شد. بدین ترتیب با استفاده از شاخص‌های به‌دست‌آمده از تصاویر لندست ۸ و مقادیر واقعی رطوبت لایه سطحی خاک، امکان تجزیه و تحلیل داده‌ها به منظور دستیابی به مدل‌های برآورد رطوبت لایه سطحی خاک فراهم شد.

نتایج تحقیق نشان داد که پنج روش استفاده شده برای برآورد رطوبت خاک، دارای همبستگی نزدیک نسبت به یکدیگر هستند و بیشترین همبستگی مربوط به مدلی است که از شاخص NDVI و دمای درخشندگی باند ۱۱ سنجنده لندست ۸ است. در حالی که روش SWI با خطای جزئی کمتری و ضریب تبیین نزدیک به آن، مدل ساده‌تری برای تخمین رطوبت خاک سطحی ارائه داده و می‌توان مقدار رطوبت خاک را به‌وسیله شاخص‌های

ذکرشده به سهولت از طریق تصاویر حرارتی سنجنده لندست ۸ برآورد کرد.

در تمام مدل‌های برآورد شده، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) در تعیین رطوبت خاک حضور داشته و تغییراتی که در شاخص‌های دیگر و یا تغییر در روش‌های استفاده شده سبب تفاوت در دقت رطوبت‌های به‌دست‌آمده و افزایش دقت رطوبت خاک به‌دست‌آمده از تصاویر حرارتی شده است. مقدار RMSE در مدلی که از شاخص خیسی خاک استفاده شده است، نشان می‌دهد که رطوبت خاک با برقراری مدل SVAT برای ایجاد رابطه مثلی بین شاخص‌های NDVI و LST مطرح شده توسط Carlson و همکاران (۱۹۹۵)، می‌تواند سبب تقویت رابطه رگرسیونی برآورد رطوبت خاک شود.

همچنین لازم به ذکر است که برازش داده‌ها در این تحقیق به روش گام‌به‌گام انجام شد. برای آزمایش مدل‌های تولید شده آزمون t در سطح ۰/۰۵ انجام شد و فرض صفر در کلیه مدل‌های ارائه شده، پذیرفته شد (تأیید فرض صفر بدان معناست که تفاوت معنی داری بین مقادیر رطوبت خاک مشاهداتی و تخمینی وجود ندارد).

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد که مدل حاصل از شیب رابطه TVX (مدل‌های LST-NDVI، BT10-NDVI، BT11-NDVI)، مدل حاصل از رابطه رگرسیون خطی بین مقادیر رطوبت خاک و مقادیر شاخص‌های NDVI، LST و NDMI و مدل حاصل از رابطه مثلی و تبدیل شاخص خیسی (SWI) به‌دست‌آمده به درصد رطوبت خاک همبستگی معنی داری با رطوبت لایه سطحی خاک دارند و می‌توانند تخمین خوبی از رطوبت لایه سطحی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک و معتدل نیمه خشک ارائه دهد. در این میان به مدل به‌دست‌آمده از SWI تبدیل شده به درصد رطوبت خاک، از اعتبار بیشتری جهت برآورد رطوبت خاک از لندست ۸ برخوردار بود.

به‌طور کلی تعیین رطوبت سطحی خاک برای پایش خشک سالی کشاورزی اهمیت زیادی دارد. همچنین در روش‌های نوین آبیاری مثل آبیاری زیر سطحی یا قطرهای تجمع ریشه‌ها در لایه ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر زیاد است و با توجه به اینکه بیشترین جذب آب گیاه از ۳۰ درصد اولیه عمق ریشه صورت می‌گیرد، بنابراین این نتایج می‌تواند برای پایش آب و خاک و گیاه مورد استفاده واقع شود.

نکته مهم این است که با توجه به تجربی بودن مدل‌های مورد استفاده نمی‌توان به‌طور مشخص مدل انحصاری را معرفی کرد که بتواند با یک الگوریتم خاص برای همه مناطق کشور به کار گرفت. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای هر منطقه با توجه به تنوع شرایط محیطی و آب و هوایی، مدلی با کمترین خطا و بهترین روش برای برآورد رطوبت سطحی خاک معرفی و توسعه یابد.

از طرفی با توجه به کمبود داده‌های رطوبت خاک در سطح کشور، پیشنهاد می‌شود ارزیابی دقت داده‌های مختلف دورسنجی با داده‌های مستقیم رطوبت خاک در کاربری‌های مختلف با استفاده از سنجش رطوبت با TDR یا هر نوع سنسور سنجش از نزدیک انجام شود. همچنین با تولید بانک اطلاعات رطوبت خاک برای فصول و کاربری مختلف در سطح کشور و بکارگیری هوش مصنوعی، نسبت به توسعه مدل‌های جدید برآورد و پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک اقدام شود تا بتوان در مدیریت خاک، تولید محصول یا مدیریت منابع طبیعی از آن استفاده بهینه کرد.

فهرست منابع

- احسانی، ا.، متین‌فر، ح.، رفیعی امام، ع. و امیری، ر. ۱۳۸۵. مقایسه محتوای اطلاعاتی باندهای سنجنده‌های TM و ETM+ در محیط‌های بیابانی و شهری ایران. پژوهش‌های جغرافیایی. ۶۴-۴۷.
- ادب، ح. ۱۳۹۶. برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در فصل سرد با استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری و حرارتی در شرایط بدون ابرناکی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۲(۲۱): ۱۹۱-۱۷۵.
- بابازاده، ح.، نوروزی اقدام، ا.، عقیقی، ح.، شمس‌نیا، س.ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۱. تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی (مطالعه موردی: استان اصفهان). تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۱(۱۹): ۱۳۲-۱۲۰.
- برزگر، ز.، مؤمنی، م. و یزدانپناه، ح. (۱۳۹۰). برآورد رطوبت خاک بر مبنای داده‌های حرارتی سنجش از دور با استفاده از ضریب انتقال تبخیر خاک. علوم و فنون نقشه برداری. ۱ (۴).
- خان‌محمدی، ف.، همایی، م. و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۳. برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال‌شده رطوبت با استفاده از تصاویر MODIS. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴(۲).
- خزاعی، س.، رائینی سرجاز، م.، ولی‌زاده، ا. و قربانی خ. ۱۳۹۶. برآورد رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نمایه‌های پوشش گیاهی و گرمایی (پژوهشی موردی: گنبدکاووس). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۲): ۱۶۲-۱۵۱.
- زاهدی، ص. و قرمزچشمه، ب. ۱۴۰۱. پایش دگرگونی رطوبت سطحی خاک با تحلیل گروه زمانی داده‌های لندست ۸ در آبخیز گاودره کردستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۵(۴): ۳۳-۲۰. doi: 10.22092/wmrj.2022.356743.1444
- صداقت، آ.، شعبانپور شهرستانی، م.، نوروزی، ع.ا.، فلاح نصرت آباد، ع. و بیات ح. ۱۴۰۰. استفاده از

شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت سطحی خاک براساس الگوریتم یادگیری ماشین. تحقیقات آب و

خاک ایران. ۵۲(۱۲): ۳۰۱-۳۰۱۸. doi: 10.22059/ijswr.2022.333856.669130

– علوی‌پناه، ک. ۱۳۸۱. بررسی منابع آب و رطوبت سطح الارض کلوتهای بیابان لوت با استفاده از داده‌های

ماهواره‌ای. پژوهش‌های جغرافیایی. ۴۷: ۵۷-۶۹.

– علوی‌پناه، ک. ۱۳۸۵. سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ

دوم.

– فروغی، ح.، ناصری، ع.، برومندنسب، س.، حمزه، س. و ب جونز، ا. ۱۳۹۸. ارائه یک روش نوین تخمین

رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجش از دور نوری. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰ (۳): ۶۴۱-۶۵۲.

doi: 10.22059/ijswr.2019.266967.668024

– فشائی، م.، ثنائی‌نژاد، س.ح. و داوری، ک. ۱۳۹۴. تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده

مودیس (مطالعه موردی: محدوده دشت مشهد). ۶(۲۹): ۱۷۳۵-۱۷۴۸.

– کشاورز، م.، وظیفه‌دوست، م.، علیزاده، ا. و اسدی، ع. ۱۳۹۰. استخراج و روندیابی رطوبت خاک به کمک

داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مادیس مطالعه موردی: استان اصفهان. نشریه: آبیاری و زهکشی ایران، ۵:

۲۰۹-۲۱۹.

– محرابی، م.، حمزه، س.، علوی‌پناه، س.ک.، کیاورز مقدم، م. و ضیائی، ر. ۱۳۹۸. برآورد رطوبت خاک با

استفاده از داده‌های سنجش از دور و سامانه بیلان انرژی سطح. مهندسی و مدیریت آبخیز ۱۱(۳): ۷۷۰-

doi: 10.22092/ijwmse.2018.115271.1354. ۷۵۹

– میری، م.، نوروزی ع.ا.، کلاهچی، ع. و پرهمت، ج. ۱۴۰۲. ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های

طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران. پژوهش‌های خاک. ۷ (۴): ۳۴۳-۳۵۴. doi:

10.22092/ijsr.2024.364072.730

- Anderson, M.C., Norman, J.M., Mecikalski, J.R., Otkin, J.A., & Kustas, W.P. 2007. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental

- United States based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012): 112(D11).
- Cai, G., Xue, Y., Hu, Y., Wang, Y., Guo, J., Luo, Y., Wu, C., Zhong, S., Qi, S. 2007. Soil moisture retrieval from MODIS data in Northern China Plain using thermal inertia model. *International journal of remote sensing*. 28(16): 3567-3581.
 - Carlson, T. 2007. An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*. 7(8): 1612-1629.
 - Carlson, T.N., Gillies, R.R., & Perry, E.M. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote sensing reviews*. 9(1-2): 161-173.
 - Chauhan, N.S., Miller, S., & Ardanuy, P. 2003. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing*. 24(22): 4599-4622.
 - Chen, M., Willgoose, G.R., & Saco, P.M. 2015. Investigating the impact of leaf area index temporal variability on soil moisture predictions using remote sensing vegetation data. *Journal of Hydrology*. 522: 274-284.
 - Crow, W.T., Kustas, W.P., Prueger, J.H. 2008. Monitoring root-zone soil moisture through the assimilation of a thermal remote sensing-based soil moisture proxy into a water balance model. *Remote Sensing of Environment*. 112(4): 1268-1281.
 - Gillies, R.R., Kustas, W.P., & Humes, K.S. 1997. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface e. *international journal of remote sensing*. 18(15): 3145-3166.
 - Henderson-Sellers, A. 1996. Soil moisture: A critical focus for global change studies. *Global and Planetary Change*. 13(1): 3-9.
 - Krapez, J.C., Oliso, A., & Coudert, B. 2009. Comparison of three methods based on the Temperature-NDVI diagram for soil moisture characterization. In *SPIE Europe Remote Sensing* (pp. 74720Y-74720Y). International Society for Optics and Photonics.
 - Landsat, U. 8 (L8) Data Users Handbook Version 1.0. 2013. <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook>. NASA PUBLISHER.

"LANDSAT 8 Satellite details 2013-008A NORAD 39084". N2YO. 14 November 2014. Retrieved 15 November 2014.

- Lei, S.G., Bian, Z.F., Daniels, J.L., & Liu, D.L. 2014. Improved spatial resolution in soil moisture retrieval at arid mining area using apparent thermal inertia. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 24(6): 1866-1873.
- Merlin, O., Al Bitar, A., Walker, J.P., & Kerr, Y. 2009. A sequential model for disaggregating near-surface soil moisture observations using multi-resolution thermal sensors. *Remote Sensing of Environment*. 113(10): 2275-2284.
- Mira, M., Valor, E., Boluda, R., Caselles, V., & Coll, C. 2007. Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils: Implication for land surface temperature determination. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012): 112(F4).
- Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., and Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index, *Remote Sens. Environ.* 49: 246–263.
- Norman, J.M., Kustas, W.P., & Humes, K.S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. 77(3): 263-293.
- Peters, J., De Baets, B., De Clercq, E.M., Ducheyne, E., & Verhoest, N.E. 2011. The potential of multitemporal Aqua and Terra MODIS apparent thermal inertia as a soil moisture indicator. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 13(6): 934-941.
- Price J.C. 1990. Using Spatial Context in Satellite Data to Infer Regional Scale Evapotranspiration, *Journal of IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 28: 940-948.
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*. 22(18): 3719-3746.
- Qiu, G., Shi, P. and Wang. L. 2006. “Theoretical analysis of a remotely measurable soil evaporation transfer coefficient.” *Remote Sensing of Environment*. Vol. 101: PP. 390-398.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. 2002. A simple interpretation of the surface

temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of environment. 79(2): 213-224.

- Sobrino, J.A., Franch, B., Mattar, C., Jiménez-Muñoz, J.C., & Corbari, C. 2012. A method to estimate soil moisture from Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) and ASTER data: Application to SEN2FLEX and SEN3EXP campaigns. Remote Sensing of Environment. 117: 415-428.
- Stoner, E.R., & Baumgardner, M.F. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America Journal. 45(6): 1161-1165.
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., van der Sande, C.J., Grootaers, I., & Feyen, J. 2006. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. Remote Sensing of Environment. 101(3): 299-314.
- Wang, H., Xiao, Q., Li, H., Du, Y., & Liu, Q. 2015. Investigating the impact of soil moisture on thermal infrared emissivity using ASTER data. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. 12(2): 294-298.
- Wang, W., Huang, D., Wang, X.G., Liu, Y.R., & Zhou, F. 2010. Estimate soil moisture using trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 7(6): 8703-8740.
- Zhang, D., Tang, R., Tang, B. H., Wu, H., & Li, Z. L. 2015. A Simple Method for Soil Moisture Determination From LST–VI Feature Space Using Nonlinear Interpolation Based on Thermal Infrared Remotely Sensed Data. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. IEEE Journal of. 8(2): 638-648.

Abstract

Soil surface moisture is an important soil characteristic, but determining its temporal and spatial variations can be costly and time-consuming. In a recent study, Landsat 8 satellite products were used to estimate soil moisture content. The study involved determining the soil moisture content of 39 soil samples from 0 to 5 cm depth while Landsat 8 passed over two fields in Mohamadshahr, Alborz province. Various indices (LST, NDVI, NDMI, and SWI) were extracted from Landsat 8, calibrated, and compared with the soil moisture field data. The results showed that among the soil moisture estimation models, the two methods TVX (BT11-NDVI), with a coefficient of determination of 0.71 and a mean square error of 2.85, and the SWI index, with an RMSE of 2.8 and a coefficient of determination of 0.67, can predict surface soil moisture with relatively good accuracy.

Keywords: Landsat 8, LST, NDVI, NDMI, SWI, Surface Soil Moisture, Triangular Spa

**Ministry of Agriculture- Jahad
Agricultural Research, Education, and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute**

Title: Capability evaluation of Landsat products for surface soil moisture estimation

Authors: Reza Bayat, Mozghan Dehghani, Seyed Mohammad Tavakoli Sabour

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Document Formatting: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Date of Publishing: Spring 2025

Circulation: 10 Copies

This publication has been registered with the registration number of **67188** at the date of **2025-04-21** agricultural information and scientific documents center. All rights reserved. No parts of this publication may be reproduced or transmitted without the original reference.

**Ministry of Agriculture- Jahad
Agricultural Research, Education, and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute**

Technical Report:

Capability evaluation of Landsat products for surface soil moisture estimation

Authors:

Reza Bayat, Mozhgan Dehghani, Seyed Mohammad Tavakoli Sabour

Series Number:

67188

2025



Ministry of Agriculture - Jihad
Agriculture Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Technical Report

**Capability evaluation of Landsat products
for surface soil moisture estimation**

Series Number: 67188

2025