

ارزیابی تخمین تنش آبی پنبه با استفاده از تصاویر چند طیفی ماهواره‌ای، مبتنی بر

مدل درخت M5

مریم مزیدی، موسی حسام*، خلیل قربانی و چوقی بایرام کمکی

دانشجوی دکتری، مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

maryam.mazidi@gmail.com

دانشیار، گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

hesamm@gau.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

ghorbani.khalil@gau.ac.ir

استادیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی دانشکده مرتع دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

bkomaki@gau.ac.ir

دریافت: شهریور ۱۴۰۲ و پذیرش: دی ۱۴۰۲

چکیده

تنش آبی در نتیجه عدم تعادل بین آب خاک در محیط ریشه و آب مصرفی گیاه رخ می‌دهد که ضرورت تعیین شاخص تنش آبی گیاه را ایجاد می‌کند. رطوبت خاک سطحی ارتباط مستقیمی با آب موجود در گیاه دارد. در دسترس بودن داده‌های ماهواره‌ای منجر به تفکیک زمانی و مکانی داده‌های مزرعه‌ای شده است و فرصت‌های جدیدی را برای نظارت بر شرایط کشت ارائه می‌دهد. در این پژوهش، پایش دقیق و مستمر رطوبت خاک به‌عنوان نماینده تنش رطوبتی خاک، با اندازه‌گیری های میدانی رطوبت خاک و مقایسه با داده‌های چند طیفی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ و سنتینل ۲ صورت گرفت. ارتباط بین شاخص‌های گیاهی به‌عنوان متغیر مستقل و رطوبت خاک سطحی به‌عنوان متغیر وابسته، با استفاده از روش‌های رگرسیون چند متغیره خطی و رگرسیون درخت M5 بررسی شد. با توجه به غیرخطی بودن رابطه بین رطوبت خاک با بازتاب‌های طیفی، رگرسیون چند متغیره خطی نتایج رضایت‌بخشی را نشان نداد (با ضریب تعیین R^2 ۰/۴۶ و ۰/۳۴ به ترتیب برای ماهواره لندست ۹ و سنتینل ۲ و همچنین جذر میانگین خطا (RMSE) برابر ۰/۰۴۳ و ۰/۰۵۲). ولی، رگرسیون درختی M5، نتایج قابل قبول‌تری را نشان داد، به طوری که با برقراری ۱۶ و ۲۰ رابطه رگرسیونی برای ماهواره‌های لندست ۹ و سنتینل ۲، رطوبت خاک را با ضریب تعیین ۰/۷۰ و ۰/۶۷ و جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۰۳۳ و ۰/۰۳۸ برآورد کرد. نتایج نشان داد که تخمین رطوبت خاک با روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، همچون مدل M5، دقت محاسبات را بالا می‌برد. در رگرسیون درخت تصمیم M5، لزوماً تعداد بالای متغیر، منجر به افزایش دقت تخمین رطوبت خاک نمی‌شود و در تعداد متغیرهای کم هم رابطه‌ای با بالاترین دقت یافت می‌شود. بنا بر این، بدون اندازه‌گیری داده‌های خاک، می‌توان رابطه بدست آمده در سطح مزرعه را برای ارزیابی تنش آبی خاک و تعیین زمان آبیاری در زمین‌های کشاورزی در مقیاس وسیع استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: لندست ۹، سنتینل ۲، داده‌کاوی، رگرسیون درخت تصمیم

تنش آبی گیاه یکی از چالش‌های اصلی امنیت غذایی است که ضرر اقتصادی قابل توجهی را ایجاد می‌کند. اکثراً عملکرد گیاهان زراعی به‌طور عمده به دلیل کمبود آب می‌تواند به بیش از نصف کاهش یابد (لیزار و همکاران، ۲۰۱۲). مدیریت مناسب آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک که آبیاری یک عامل کلیدی برای دستیابی عملکرد کمی و کیفی مطلوب و مصرف آب است، ضروری است. عدم تولید کشاورزی به نوبه خود یک چالش امنیت غذایی ایجاد می‌کند که اقتصاد و معیشت کشاورزان را تهدید می‌کند. تنش آبی که به‌عنوان تنش خشکی نیز شناخته می‌شود، تهدیدی برای بهره‌وری گیاهان و در صورت تداوم در یک دوره طولانی است (اوزاکابه و همکاران، ۲۰۱۴). اندازه‌گیری تنش آبی به‌طور کلاسیک بر اساس اندازه‌گیری‌های در محل محتوای آب گیاهی (VWC) یا محتوای آب خاک (SWC) انجام می‌شود (بارت و همکاران، ۲۰۰۷). این فعالیت‌ها به دلیل ناپیوستگی ذاتی خاک عملاً کاری زمان‌بر و پرهزینه هستند و مشاهدات نقطه‌ای که معمولاً انجام می‌شوند، دارای پوشش مکانی پایینی هستند که نشان‌دهنده ضعف از وضعیت کلی مزارع است (جکسون و همکاران، ۱۹۸۱). امروزه پیشرفت‌های علمی و فناوری مانند تکنیک‌های سنجنش‌ازدور ابزارهای قدرتمندی برای ارزیابی ویژگی‌های پوشش گیاهی ارائه می‌دهند که می‌تواند تصمیمات مدیریت و آبیاری را تسهیل کند (وای و همکاران، ۲۰۱۳). برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور به‌طور بالقوه می‌تواند بر اساس تخمین دمای تاج پوشش یا VWC، به‌عنوان نماینده محتوای آب خاک انجام شود (ویسی و همکاران ۲۰۱۷). محاسبه مستقیم VWC دشوار است و به دلیل چالش در اندازه‌گیری‌های میدانی، عدم قطعیت‌های زیادی دارد. این واقعیت که کاهش VWC منجر به تعرق کمتر محصولات و افزایش دمای تاج پوشش می‌شود (لین و همکاران، ۲۰۱۲ و زوو و همکاران، ۲۰۰۵)، نشانه‌هایی را ارائه کرده است که در کنار محتوای رطوبتی خاک، از دمای تاج نیز به‌عنوان نماینده VWC برای

تخمین تنش آبی و در نهایت برنامه‌ریزی آبیاری استفاده کرد (پنولئوس و همکاران، ۱۹۹۳). عوامل محیطی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و تشعشعات خورشیدی می‌توانند تعرق گیاه و تبخیر آب خاک را تحت تأثیر قرار دهند و در نتیجه محتوای آب کم را در داخل خاک ایجاد کند. از این رو چندین روش ارزیابی تنش آبی گیاه بر اساس اندازه‌گیری‌های اکولوژیک عنوان‌شده است (بریلیانت و همکاران، ۲۰۱۶). تشخیص تنش آبی محصول در فصول مختلف رشد برای پیش‌بینی شرایط عملکرد و برنامه‌ریزی آبیاری ضروری است. متدولوژی‌های مختلف برای تشخیص تنش آبی محصول موردبررسی قرار گرفته‌اند. این روش‌ها بر اساس اندازه‌گیری آب خاک، پاسخ گیاه و سنجنش‌ازدور هستند (شیامال و همکاران، ۲۰۲۰). کرامر (۱۹۶۳) استدلال کرده است که ارزیابی تنش آبی گیاه باید به‌طور مستقیم روی گیاه انجام شود، زیرا رشد گیاه به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط آب بافتی و تنها به‌طور غیرمستقیم تحت تأثیر کمبود آب خاک قرار می‌گیرد. پایین‌حال، بیشتر تکنیک‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری عکس‌العمل در گیاهان، مخرب، وقت‌گیر و فشرده هستند. پیشرفت در فن‌آوری‌های سنجنش، متحول‌کننده تخمین شاخص‌های تنش آبی گیاه است. تکنیک‌های پیشرفته سنجنش‌ازدور نیز برای تخمین سریع وضعیت آب گیاه معرفی شده‌اند (گرهاردز و همکاران، ۲۰۱۹). آلونینو و ماریانو (۲۰۱۷) در مقاله خود در مورد چندین رویکرد سنجنش‌ازدور برای ارزیابی تنش آبی گیاه در محیط کشت برای مدیریت آبیاری اشاره کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از انواع سیستم‌عامل و سنسورهای متعدد، داده‌های ناهمگن نامحدودی را با استفاده از طیف وسیعی از ماهواره‌ها، تجزیه و تحلیل و ارائه کردند. برای کنترل مدیریت آبیاری و زمان‌بندی، باید مقدار و زمان تأمین آب را دانست که آن را می‌توان با ارزیابی مکانی مناسب تنش آبی گیاه تعیین کرد. در مقالات مربوطه شناسایی تنش آبی مبتنی بر دو روش اندازه‌گیری آب خاک و مبتنی بر عکس‌العمل گیاه است (شیامال و همکاران، ۲۰۲۰). روش‌های سنتی برای

(WI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس (زارکو-تجادا و همکاران، ۲۰۰۳)، شاخص تفاضل نرمال شده آب (NDWI) با استفاده از طیف‌سنج‌های تصویربرداری مادون قرمز موج‌کوتاه (راپاپورت و همکاران، ۲۰۱۵)، شاخص بازتاب فتوشیمیایی (PRI) با استفاده از تصاویر چند طیفی پهپاد (زارکو-تجادا و همکاران، ۲۰۱۳)، شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده با استفاده از طیف‌سنج‌های تصویربرداری مادون قرمز موج‌کوتاه (NDVI) (راپاپورت و همکاران، ۲۰۱۵) و شاخص سبزی گیاهی تفاضل نرمال شده (NDGI) با استفاده از تصاویر چند طیفی پهپاد و الگوریتم ادگیری ماشین (رومرو و همکاران، ۲۰۱۸) به‌عنوان چند مورد، به‌طور گسترده برای تخمین تنش آبی در محصولات استفاده شده است.

تاکنون مطالعات متعددی در خصوص رابطه دمای هوا، دمای سطحی و دمای تاج و خصوصیات گیاهی - محیطی از جمله تنش آبی، رطوبت خاک، سبزیگی و نظایر این‌ها صورت گرفته است. در این میان بخشی از مطالعات معطوف به تأثیر میزان رطوبت خاک بر پروفیل دمایی تاج شده که به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد و سلامتی گیاهان است. یک ضعف اساسی مدل‌ها و مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته این است که این روش‌ها برای مناطقی که دارای پوشش گیاهی ضعیف و یا فاقد پوششی گیاهی هستند، ناکارآمد بوده‌اند (فشائی و همکاران، ۱۳۹۴). بطوریکه در بسیاری، تشخیص تنش آبی را در اراضی تحت کشت موردبررسی قرار دادند و تأثیرات آن را بر عملکرد محصول و فعالیت کشاورزان و تصمیم‌گیرندگان برای بهینه کردن سامانه‌های آبیاری حیاتی دانستند (لوپز و همکاران، ۲۰۰۹). در این رابطه فشائی و همکاران (۱۳۹۴) مطالعه‌ای را در زمینه تخمین رطوبت خاک و شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی (VI) در شرایط بدون پوشش گیاهی و پوشش گیاهی ضعیف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام دادند که طی این تحقیق، با پهنه‌بندی شاخص کمبود آب (WDI) به رابطه‌ای تنگاتنگ این متغیر با رطوبت خاک سطحی (عمق ۰-۱۰ سانتی‌متر) دست یافتند. در تحقیقی که

تشخیص تنش آبی گیاه بر اساس اندازه‌گیری رطوبت خاک در محل و متغیرهای هواشناسی برای ارزیابی از دست دادن آب از سیستم خاک-گیاه است (گونزالز-دیگو و همکاران، ۲۰۲۰). نمونه‌های خاک از چند نقطه از کل مزرعه با فرضیاتی همچون، ظرفیت نگهداری آب یکسان، ساختار خاک یکسان و نسبت تبخیر-تعرق یکسان جمع‌آوری می‌شوند. این روش‌ها اطلاعات نقطه‌ای کل منطقه را منعکس نمی‌کند و پرزحمت است. دیگر روش‌های تشخیص تنش آبی محصول مبتنی بر خاک شامل اندازه‌گیری وزنی آب خاک (تانریوردی و همکاران، ۲۰۱۷)، اندازه‌گیری با حس‌گر رطوبتی خاک (انکیزو و همکاران، ۲۰۰۷) و محاسبات تعادل آب خاک (ای هوما و مادراموتو، ۲۰۱۷) است. بعدها، رویکردهای گیاهی اتخاذ شد که حساسیت بیشتری نسبت به رطوبت خاک داشتند، رویکردهای مبتنی بر هدایت روزنه‌ای، پتانسیل آب برگ، محتوای نسبی آب، قطر ساقه و میوه و اندازه‌گیری جریان شیره‌ای (ای هوما و مادراموتو، ۲۰۱۷). چنین روش‌هایی قابل اعتماد هستند؛ باین‌حال، برآورد تنش آبی گیاه در محل، زمان‌بر و فشرده است، زیرا برای هر یک از محصولات ارزیابی می‌شوند. علاوه بر این، به دلیل ناهمگونی در خاک و محصولات، این روش نماینده مناسبی از کل را ارائه نمی‌دهد (شیامال و همکاران، ۲۰۲۰).

با ظهور سنجش‌ازدور، می‌توان اراضی گسترده‌ای را با تکنیک‌های غیر مخرب و سریع برای تشخیص تنوع مکانی در وضعیت آب گیاه با وضوح زمانی بالا پوشش داد (رومرو و همکاران، ۲۰۱۸). بازتاب طیفی، اندازه‌گیری طول موج انرژی الکترومغناطیسی جمع‌آوری شده از اجسام روی زمین است. خواص بیوشیمیایی و بیوفیزیکی گیاهان، مانند زیست‌توده، تبخیر و تعرق محصول و محتوای آب تاج گیاه، مربوط به خواص طیفی است که برای بازتاب طیفی استفاده می‌شود. ترکیبات ریاضی، از دو یا چند باند طیفی به‌عنوان شاخص‌های طیفی استفاده می‌کنند که برای تشخیص تنش آبی در محصولات کشاورزی کاربرد دارند. در میان شاخص‌های طیفی آب و پوشش گیاهی، شاخص آب

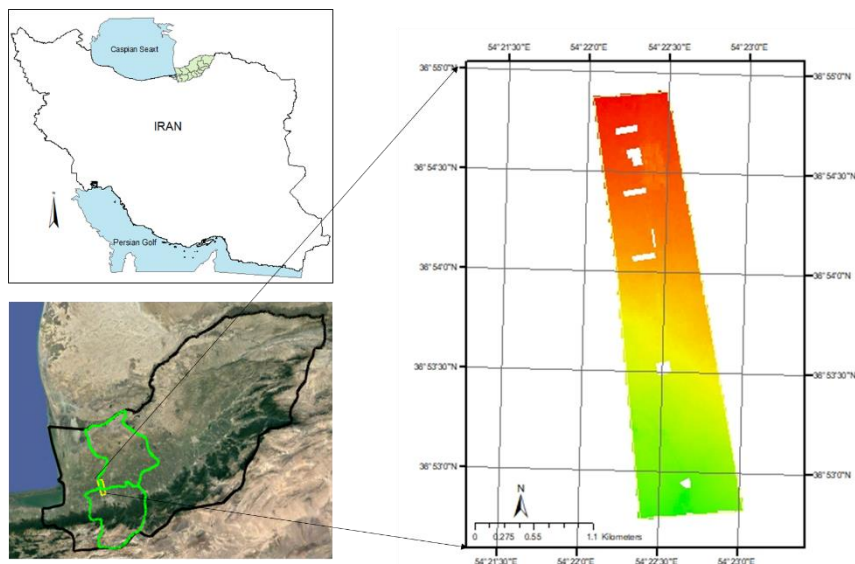
مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان گلستان که در شمال شرق کشور قرار دارد، با مساحتی معادل $20437/74$ کیلومتر مربع معادل $1/3$ درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. از منظر جغرافیایی این استان بین 36 درجه و 24 دقیقه تا 38 درجه و پنج دقیقه عرض شمالی و 53 درجه و 51 دقیقه تا 56 درجه و 14 دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است (پورتال استانداری گلستان). منطقه مورد مطالعه در محدوده شمالی استان گلستان و در اراضی کشاورزی روستاهای شیرعلی‌آباد و سیستانی محله از توابع بخش خدمات کشاورزی انجیر آب شهرستان گرگان در مختصات جغرافیایی $30^{\circ} 52' 36''$ تا $00^{\circ} 55' 36''$ عرض شمالی و $30^{\circ} 21' 52''$ تا $00^{\circ} 23' 54''$ طول شرقی و در طی فصل رشد محصول پنبه (بهار و تابستان ۱۴۰۱) انجام شد. منطقه مورد مطالعه خشک تا نیمه‌خشک با میانگین بارندگی 400 میلی‌متر است که از این میزان چیزی در حدود 150 میلی‌متر در طول دوره رشد پنبه (اوایل خرداد الی اوایل آبان) رخ می‌دهد. نیاز آبی پنبه نیز در این دوره در منطقه مورد مطالعه در حدود 6860 مترمکعب در هکتار در سال است. خاک منطقه با بافت لومی رسی و شوری در حدود $3/78 - 0/65$ دسی‌زیمنس بر متر در طی فصل رشد است. کشاورزان جهت آبیاری از آب چاه با شوری پایین در حدود $0/2$ دسی‌زیمنس بر متر استفاده می‌کنند. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

گاتورگلی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی اثرات تنش آبی بر بازتاب طیفی علف برمودا در جنوب ایتالیا انجام دادند، میزان بازتاب طیفی را با نسل جدید طیف‌سنج دستی برای کشف شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی به‌عنوان ابزاری برای مطالعه تنش آبی در علف برمودا آزمایش کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از تکنیک‌های پردازش چند متغیره برای تمایز شرایط مختلف تنش آبی پتانسیل بالایی در برآورد تنش آبی مؤثر است و مطمئناً مستحق بررسی‌های بیشتر است.

تحقیق حاضر شامل اندازه‌گیری رطوبت خاک به عنوان معیاری از تنش رطوبتی گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چند طیفی لندست ۸-۹ و سنتینل ۲ در بخشی از مزارع پنبه استان گلستان است. هدف از این تحقیق تعیین رابطه‌ای بین اندازه‌گیری رطوبت خاک در مزرعه و شاخص‌های استخراج‌شده از بازتاب طیفی باندهای نوری چند طیفی تصاویر ماهواره‌ای است. بر این اساس در پژوهش حاضر امکان استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-۹ و سنتینل ۲ در تخمین تنش آبی آبیاری گیاه پنبه به‌عنوان یک گیاه صنعتی در استان گلستان، اراضی بخش انجیر آب شهرستان گرگان از طریق مقایسه با روش‌های میدانی مورد بررسی قرار گرفت تا در صورت تأیید دقت هر یک از این دو ماهواره در برآورد میزان تنش آبی، با حداقل هزینه و در کمترین زمان و در سطح وسیعی از مزارع، جایگزین روش‌های معمول گردد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و مزارع نمونه برداری

داده‌های میدانی

داده‌های میدانی شامل نمونه رطوبتی خاک است که هم‌زمان با عبور ماهواره از منطقه، در هشت مزرعه در طول فصل رشد پنبه (اوایل خرداد تا اوایل آبان) و جمعاً در طی ۱۴ روز نمونه برداری معادل ۱۱۲ نمونه اندازه‌گیری شد. رطوبت حجمی خاک، به‌ویژه رطوبت سطحی به‌عنوان نماینده‌ای از وضعیت تنش رطوبتی خاک نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب‌وخاک دارد (ویسی و همکاران ۲۰۱۷). طبق مطالعات ربیعی و تجریشی (۱۳۹۹)، فشائی و همکاران (۱۳۹۴)، رنجبر و آخوندزاده (۱۳۹۸) و غفاری و همکاران (۱۳۹۹) نمونه‌های خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متری و با مختصات معلوم به‌وسیله سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) موقعیت‌یابی و برداشت شدند.

داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق توسط تصویرگر زمین عملیاتی (OLI) ماهواره لندست ۸- توسط ۹ (Landsat 8-9) و ماهواره سنتینل ۲ (Sentinel-2A/B) به دست آمد. داده‌های لندست شامل ۱۱ باند است که هر هشت روز یک بار برداشت می‌شوند. ماهواره OLI به‌عنوان یکی از سنجنده‌های ماهواره لندست، دارای نه باند طیفی

در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز با طول موج کوتاه طیف الکترومغناطیس دارای توان تفکیک ۳۰ متر قرار دارند. داده‌های سنتینل ۲ شامل ۱۳ باند طیفی مشتمل بر محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک، لبه قرمز و طول موج کوتاه است که هر پنج روز یک‌بار برداشت می‌شود. این ماهواره دارای سه توان تفکیکی مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر است؛ به‌طوریکه طیف مرئی و مادون قرمز با توان تفکیک ۱۰ متر، امواج مادون قرمز نزدیک، لبه قرمز و طول موج کوتاه با توان تفکیک ۲۰ متر و امواج مربوط به بخار آب و گرد و غبار دارای توان تفکیک ۶۰ متر هستند.

تشکیل ماتریس داده‌ها

در این تحقیق جهت تخمین تنش آبی گیاه پنبه، از شش باند طیفی ماهواره لندست ۹ و سنتینل ۲ شامل سه باند مرئی، یک باند مادون قرمز و دو باند طول موج کوتاه به همراه هفت شاخص مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای و تعداد ۱۵ نسبت بانندی نیز به‌عنوان دیگر متغیرهای مستقل مطابق جدول (۲) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. در این تحقیق مجموعاً تعداد ۲۸ متغیر مستقل در پیش‌بینی تخمین تنش آبی پنبه در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- شاخص‌های گیاهی (VIs) منتخب و فرمول محاسبه در این تحقیق

VIs	Name	Formula	Reference
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR - Red)/(NIR + Red)$	rouse et al 1974
EVI	Enhanced Vegetation Index	$2.5(NIR - Red)/(NIR + 6Red - 7.5Blue + 1)$	Jackson et al 2002
WI	water index	$NIR/SWIR1$	Penuelas et al., 1993
NDWI	normalized difference water index	$(NIR - SWIR2)/(NIR + SWIR2)$	Gao 1996
NMDI	normalized multiband drough difference index	$(NIR - (SWIR1 - SWIR2))/(NIR + (SWIR1 + SWIR2))$	Wang, 2007
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$1.5(NIR - Red)/(NIR + Red + 0.5)$	Huete 1988
GVMi	Global Vegetation Moisture index	$((NIR + 0.1) - (SWIR + 0.02))/((NIR + 0.1) + (SWIR + 0.02))$	

روش‌های محاسباتی

به منظور بهبود دقت مدل تخمین تنش آبی گیاه پنبه، در این مطالعه از روش‌های مختلفی برای تبدیل طیفی استفاده شده است. سپس باندهای حساس همراه با شاخص‌های پوشش گیاهی که با استفاده از داده‌های چند طیفی و با روش‌های مختلف پردازش، پیش‌بینی شد، غربال شده است. دو الگوریتم یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چند متغیره و رگرسیون درخت تصمیم M5 برای ساخت مدل‌های تخمین استفاده شد و بهترین مدل به منظور ارائه، مبنایی برای مدیریت دقیق مزرعه پنبه در منطقه شناسایی شد.

همبستگی بین متغیرها

در این مطالعه از دو روش رگرسیون چند متغیره خطی و درخت تصمیم M5، به عنوان یکی از مدل‌های یادگیری ماشین، جهت بررسی همبستگی متقابل بین متغیرها و رطوبت خاک به عنوان نماینده تنش آبی گیاه استفاده شد. در مدل‌سازی پدیده‌ها، وجود شرایط محلی ممکن است موجب شود تا استفاده از یک رابطه کلی نتایج خوبی را به همراه نداشته باشد و تغییرات محلی به خوبی دیده نشوند. در صورت امکان، شناسایی محدوده‌های همگن و ارائه روابط ساده خطی برای هر یک از این محدوده‌ها می‌تواند موجب افزایش دقت مدل شود. بر این اساس معمولاً برای حل مسائل پیچیده، آن را به چند مسئله کوچک‌تر و ساده‌تر تقسیم نموده و سپس جواب‌های به‌دست‌آمده را با هم ترکیب می‌کنند. همین ایده ساده در مدل‌های درخت تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این

منظور، فضا یا محدوده مقادیر داده‌های ورودی به چند زیربازه یا ناحیه تقسیم شده و برای هر ناحیه یک معادله یا مدل مناسب استخراج می‌شود (باتاچاریا و همکاران، ۲۰۰۷). درخت تصمیم روشی برای نمایش یک سری از قوانین هستند که منتهی به یک رده یا مقدار می‌شوند. درخت‌های تصمیم به کمک جداسازی متوالی داده‌ها به یک سری گروه مجزا تشکیل شده و سعی می‌شود در فرآیند جداسازی، فاصله بین گروه‌ها افزایش یابد. ساختار یک مدل درختی شامل ریشه، گره‌های داخلی و برگ است. از مدل‌های درخت تصمیم در حل بسیاری از مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده شده است. برای اولین بار کوئینلان (۱۹۹۲) مدل درخت تصمیم موسوم به M5 را برای پیش‌بینی داده‌های پیوسته ارائه نمود. توسعه مدل درختی M5 Stepwise برای تعیین عوامل مؤثر بر پیش‌بینی جهت رفع مشکل الگوریتم توسط قربانی و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد. آن‌ها در کاربرد و توسعه این مدل به این نتیجه رسیدند که مدل درختی M5 ابزاری امیدوارکننده برای مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده و شناخت مهم‌ترین متغیرها است و از یک الگوریتم حریمانه استفاده می‌کند که در آن لزوماً افزایش تعداد متغیرها منجر به افزایش دقت نمی‌شود؛ بلکه با تعداد متغیر وابسته کم هم دقت مدل بهبود می‌یابد. لذا این مدل باید به صورت گام‌به‌گام اجرا شود. این مدل، بر خلاف مدل‌های درخت تصمیم معمول که کلاس یارده‌های گسسته را به عنوان خروجی ارائه می‌نمایند، یک مدل خطی چند متغیره را برای داده‌ها در هر گره از مدل درختی می‌سازد. تشکیل ساختار مدل‌های درخت تصمیم‌گیری شامل مراحل ایجاد درخت و هرس کردن آن است. در مرحله

دقت مدل نشد. لذا لازم است تا این مدل نیز مانند رگرسیون چند متغیره خطی به صورت گام به گام اجرا شود.

معیارهای دقت برازش

به منظور ارزیابی کارایی مدل تخمین تنش آبی گیاه پنبه، ارزیابی کمی از مقادیر حاصله از تصاویر ماهواره ای و اندازه گیری شده در سطح مزرعه ارائه شده و نمایانگر درجه انطباق مشاهدات واقعیت زمینی و شاخص های ماهواره ای است که در جدول (۳) به آن ها اشاره شده است.

ساختن درخت، از یک الگوریتم استنتاجی یا معیار تقسیم (انشعاب) برای تولید یک درخت تصمیم استفاده می شود. در پژوهشی که توسط قربانی و همکاران (۱۴۰۰) بر روی عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره لندست به روش مقایسه رگرسیون چند متغیره و درخت تصمیم M5 انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که با توجه به غیرخطی بودن رابطه بین عملکرد گندم با داده های مستخرج از تصاویر ماهواره ای، بکار بردن مدل درخت تصمیم M5، دقت نتایج را نسبت به مدل رگرسیون چند متغیره خطی به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد. از طرفی در مدل رگرسیون درخت تصمیم M5، لزوماً افزایش تعداد متغیرها باعث افزایش

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مدل

Evaluation criteria	Definition	Equation
RMSE	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error	$NRMSE = \frac{RMSE(O_x, O_y)}{Max(O_x) - Min(O_y)}$
MAE	Mean Absolute Error	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i $
EF	Efficiency	$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$
MBE	Mean Bias Error	$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$
R ²	Coefficient Of Determination	$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$

معیار اصلی ارزیابی خطا است و با این معیار مجموع خطاهای هر نقطه نسبت به مدل ساخته شده ارزیابی می شود. NRMSE در واقع به منظور کمی سازی مقدار مؤثر خطای یک مدل به کار می رود، با این تفاوت که این کار را نسبت به دامنه اعداد به کار رفته در مدل استانداردسازی می کند. در معیار به جای به توان دو رساندن خطاها، از تابع قدر مطلق استفاده می کند و با توجه به اینکه مقادیر به توان نرسیده اند، واحد میانگین قدر مطلق خطا با ویژگی هدف

داده های حاصل از اندازه گیری رطوبت خاک در مزرعه به عنوان معیار ارزیابی داده های حاصل از تصاویر ماهواره ای (شامل بازتاب ها و شاخص های طیفی) جهت ایجاد یک رابطه بهینه بین متغیرها، از تکنیک های میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، کارایی مدل (EF)، میانگین خطای اریب (MBE) و ضریب تعیین (R²) جهت ارزیابی بهره گرفته شد. RMSE به عنوان

یکسان خواهد بود. EF مقادیر برآورد شده را نسبت به مقدار میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. مقدار EF دلالت بر آن دارد که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین بهتری را نسبت به مقادیر برآورد شده ارائه می‌دهند. MBE بیانگر اریبی روش است و در یک تخمینگر نسبتاً دقیق بایستی نزدیک به صفر باشد. R^2 مشخص می‌کند که مدل رگرسیون تا چه میزان روی یک داده سازگار است و این زمانی است که اختلاف بین خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده توسط مدل حداقل باشد.

نتایج و بحث

روش رگرسیون چند متغیره خطی

در مطالعات آماری معمولاً همبستگی یک عامل تنها با یک عامل در نظر گرفته می‌شود و اثر دیگر عوامل و ترکیب این عوامل بر عامل مورد نظر نادیده گرفته می‌شود. در صورتی که بخواهیم اثر چند عامل را بر روی یک عامل در نظر بگیریم یکی از ساده‌ترین راه‌ها استفاده از رابطه خطی چند متغیره است. لذا جهت بررسی رابطه چند متغیره بین رطوبت خاک به‌عنوان نماینده‌ای از تنش آبی در نقش متغیر وابسته و باندها طیفی، شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای و نسبت‌های بانندی به‌عنوان متغیر مستقل، وجود رابطه چند متغیره بین آن‌ها در محیط نرم‌افزار

Minitab بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که با کمک این روش در بهترین حالت در چهار گام و با دخالت دادن چهار متغیر مستقل با ضریب تعیین $46/13$ درصد، در ماهواره لندست، میزان رطوبت خاک را تخمین می‌زند. همچنین در ماهواره سنتینل ۲ در بهترین حالت در پنج گام و با دخالت دادن چهار متغیر مستقل با ضریب تعیین $34/51$ درصد، میزان رطوبت خاک را در مزارع پنبه به‌عنوان نماینده ای از تنش آبی تخمین می‌زند. طبق نتایج روش انتخاب بهترین زیرمجموعه مطابق جدول ۴ و جدول ۵، در صورت افزایش متغیرهای مستقل در رگرسیون چند متغیره، در ماهواره لندست مقدار ضریب تبیین از $23/95$ درصد به $46/13$ درصد و برای ماهواره سنتینل ۲، مقدار ضریب از $15/76$ درصد به $34/51$ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شکل (۲) مقادیر مشاهده شده و تخمینی تنش آبی با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره خطی به روش گام‌به‌گام برای تصاویر ماهواره‌های لندست و سنتینل ۲ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که بازتاب طیفی یک باند، شاخص یا نسبت طیفی به‌تنهایی نمی‌تواند توصیف‌کننده تغییرات تنش آبی باشد؛ بنابراین در ادامه روش رگرسیون درخت تصمیم M5 بر مبنای جداسازی داده‌ها به گروه‌های مجزا و با توانایی مدل کردن رابطه غیرخطی بین داده‌ها ارائه می‌شود.

جدول ۴- ضرایب و نتایج رگرسیون گام‌به‌گام در تخمین تنش آبی پنبه با کمک تصویر ماهواره‌ای لندست

متغیر	گام ۱	گام ۲	گام ۳	گام ۴
عدد ثابت	۰/۰۴۳۷	-۰/۰۲۲۵	-۰/۰۰۵۰	-۰/۱۰۹۴
B5	۰/۳۸۳۰	۰/۹۷۷۰	۱/۰۱۸۵	۱/۰۸۹۹
B5-7		-۰/۰۵۲۷	-۰/۰۸۹۹	-۰/۰۹۸۲
NDWI			۰/۱۶۵۵	۰/۲۹۱۵
B3-5				۰/۱۷۵
R^2	۲۳/۹۵	۴۳/۱۳	۴۵/۳۵	۴۶/۱۳
RMSE	۰/۰۵۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳

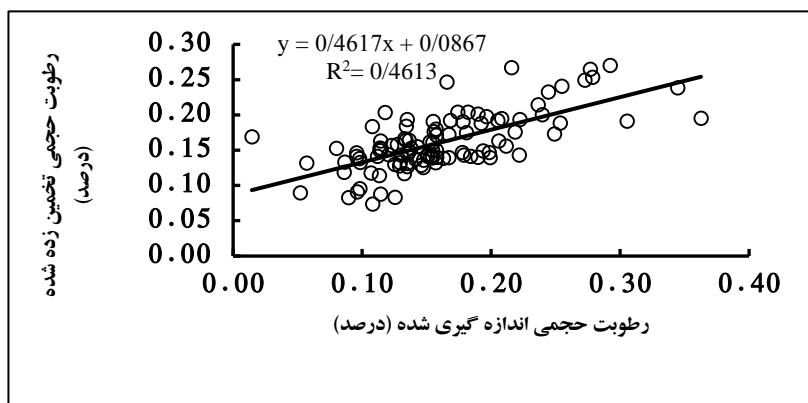
جدول ۵- ضرایب و نتایج رگرسیون گام‌به‌گام در تخمین تنش آبی پنبه با کمک تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲

متغیر	گام ۱	گام ۲	گام ۳	گام ۴	گام ۵
-------	-------	-------	-------	-------	-------

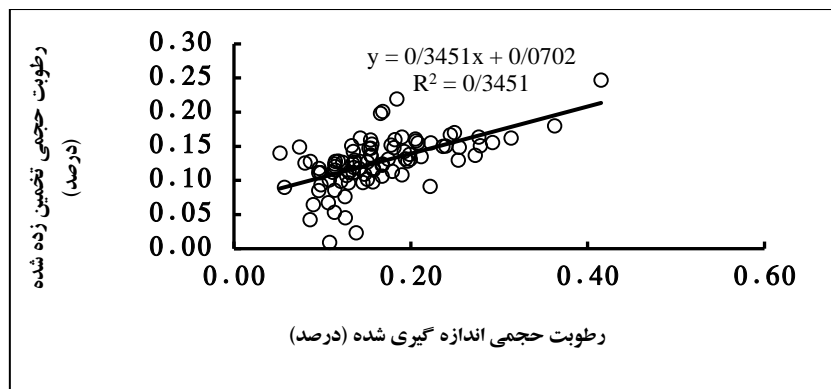
عدد ثابت	۰/۰۲۶۷	۰/۱۱۸۷	۰/۰۳۲۲	۰/۰۸۷	۰/۰۸۵
B8	۰/۳۸۸	۰/۶۳۲	۰/۶۹۳	-۰/۰۲۸	-۰/۰۸۵
B3-12	-۰/۲۶۲۶	-۰/۲۴۳۳	-۰/۲۴۳۳	-۰/۶۱۲	-۰/۶۰۱
B3			۰/۳۹۶	۲/۵۲۱	۲/۴۵۱
NDWI				۰/۶۰۴	۰/۵۸۳۷
R ²	۱۵/۷۶	۲۵/۶۸	۲۹/۷۸	۳۴/۵۰	۳۴/۵۱
RMSE	۰/۰۶۰	۰/۰۵۶	۰/۰۵۵	۰/۰۵۳	۰/۰۵۲

مطابق نتایج مندرج در جدول (۴ و ۵)، در بررسی میزان ریشه مربعات خطا (RMSE)، برای ماهواره لندست میزان خطا در چهار گام از ۰/۰۵۲ به ۰/۰۴۳ کاهش یافته است. مشابه همین نتیجه در میزان خطای کاهشی برآورد در ماهواره سنتینل نیز مشاهده شد. بطوریکه این میزان خطا از ۰/۰۶۰ به ۰/۰۵۲ در پنج گام کاهش یافته است. لذا با افزایش تعداد متغیرها و در گام‌های بالاتر، میزان خطا به طور تقریبی ۱۳ تا ۱۷ درصد برای هر دو ماهواره مطابق نتایج قربانی و همکاران (۲۰۲۲) و قربانی و همکاران (۱۴۰۰) کاهش یافته است.

مطابق نتایج مندرج در جدول (۴ و ۵)، در بررسی میزان ریشه مربعات خطا (RMSE)، برای ماهواره لندست میزان خطا در چهار گام از ۰/۰۵۲ به ۰/۰۴۳ کاهش یافته است. مشابه همین نتیجه در میزان خطای کاهشی برآورد در ماهواره سنتینل نیز مشاهده شد. بطوریکه این میزان خطا از ۰/۰۶۰ به ۰/۰۵۲ در پنج گام کاهش یافته است.



لندست



سنتینل ۲

شکل ۲- رگرسیون چند متغیره در روش گام به گام، تصاویر ماهواره لندست و سنتینل ۲

در این روش به شیوه گام به گام، تمامی حالات رگرسیون درختی یک تا چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت و بهترین زیر مجموعه از متغیرهای مستقل که بهترین تخمین از تنش آبی را ارائه کردند، مشخص شد (جدول ۶ و ۷). در روش رگرسیون درخت تصمیم، برخلاف رگرسیون چند متغیره

روش رگرسیون درخت تصمیم M5

در این تحقیق رابطه بین رطوبت خاک به عنوان متغیر وابسته و باندها، شاخص‌های طیفی به همراه نسبت های باندها به عنوان متغیر مستقل به روش رگرسیون درخت تصمیم M5 در محیط نرم افزار Rapid Miner، بررسی شد.

این متغیر در ریشه قرار گیرد و جداسازی که بر اساس این متغیر صورت می‌گیرد، منجر شود تا داده‌ها به خوبی جدا نشوند. بر این اساس ضرورت ایجاب می‌کند تا تمام حالات ورود متغیرها بررسی شود.

خطی، با افزایش تعداد متغیرها لزوماً دقت مدل افزایش نمی‌یابد. به دلیل اینکه مدل‌های درخت تصمیم از الگوریتم‌هایی استفاده می‌کنند که قادر به برگشت و انتخاب متغیر دیگری نمی‌باشند. بر این اساس اگر متغیری اضافه شود، امکان دارد

جدول ۶- نتایج انتخاب بهترین زیرمجموعه برای تخمین تنش آبی پنبه با استفاده از تصویر ماهواره‌ای لندست

متغیرهای مورد استفاده	تعداد متغیر	R ²	RMSE
B5	۱	۲۲/۹	۰/۰۵۲
B5, NDWI	۲	۵۱/۷	۰/۰۴۲
B3, B3-7, NDWI	۳	۵۴/۹	۰/۰۴۲
B5, B6, B2-7, B4-6	۴	۶۴/۷	۰/۰۳۶
B2, B5, B6, B2-7, B5-6	۵	۶۸/۲	۰/۰۳۵
B5, B6, B2-5, B2-7, B3-4, B3-7	۶	۷۰/۶	۰/۰۳۳
B5, B6, B2-7, B3-6, B5-6, NDVI, EVI	۷	۶۹/۸	۰/۰۳۴
B5, B6, B7, B2-7, B3-4, B4-7, NDWI, NDVI	۸	۶۶/۹	۰/۰۳۵
B5, B6, B7, B2-3, B2-7, B4-5, B4-7, EVI, NDVI	۹	۶۶/۳	۰/۰۳۶
B2, B4, B6, B2-5, B3-7, B4-5, B4-7, NDWI, NDVI, EVI	۱۰	۶۶/۲	۰/۰۳۶
B3, B5-7, B2-4, B2-7, B4-6, B5-7, NDWI, NDVI, EVI, WI	۱۱	۶۶/۲	۰/۰۳۶

جدول ۷- نتایج انتخاب بهترین زیرمجموعه برای تخمین تنش آبی پنبه با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲

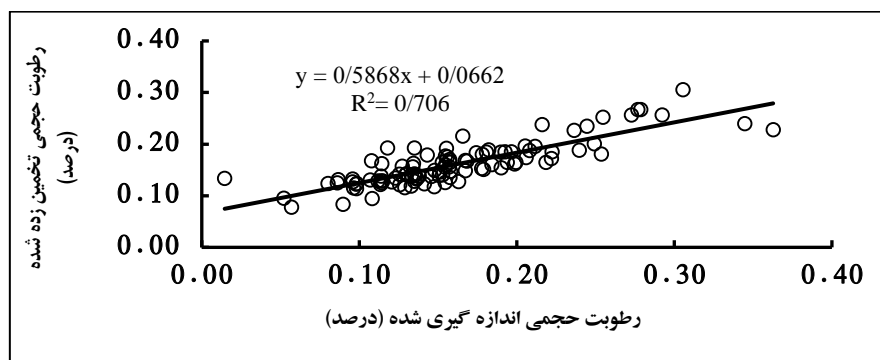
متغیرهای مورد استفاده	تعداد متغیر	R ²	RMSE
B8	۱	۱۵/۸	۰/۰۵۹
NDWI, WI	۲	۴۲/۶	۰/۰۵۰
B12, B2-11, SAVI	۳	۵۷/۲	۰/۰۴۳
B2, B11, B11-12, NDWI,	۴	۶۵/۶	۰/۰۴۱
B8, B2-8, B2-11 NDVI, NDWI	۵	۶۷/۲	۰/۰۳۹
B2, B8, B2-11, B3-12, B11-12, SAVI	۶	۶۷/۵	۰/۰۳۸
B8, B11, B2-4, B3-11, B4-11, NDWI, NMDI	۷	۶۷/۶	۰/۰۳۸
B3, B8, B2-11, B4-11, B8-11, B11-12, NDVI, NDWI	۸	۶۷/۱	۰/۰۳۹
B3, B12, B2-4, B2-8, B3-11, B4-11, B11-12, SAVI, NDWI	۹	۶۶/۹	۰/۰۴۰
B3, B11, B12, B2-12, B3-12, B4-11, B11-12, NDWI, NMDI, EVI	۱۰	۶۶/۷	۰/۰۳۹
B3, B8, B2-8, B2-11, B3-11, B4-11, B8-11, B11-12, NDVI, NDWI, SAVI	۱۱	۶۶/۷	۰/۰۳۹

در رگرسیون درخت تصمیم M5 بکار گرفته شده طبق نتایج مشاهده شده در جدول (۶) و (۷)، مشابه نتایج پژوهش انجام شده توسط دوو و همکاران (۲۰۲۲) بیشترین همبستگی بین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به‌عنوان نماینده تنش آبی و شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای در ماهواره لندست با تعداد شش متغیر، مربوط به امواج مرئی و طول موج کوتاه است که نشان‌دهنده تأثیر میزان طیف حاصل از بازتاب کلروفیل و میزان رطوبت موجود در تاج پوشش گیاهی در تخمین تنش آبی پنبه دارد. در صورتی که در ماهواره سنتینل ۲ با تعداد هفت متغیر در کنار نسبت‌های

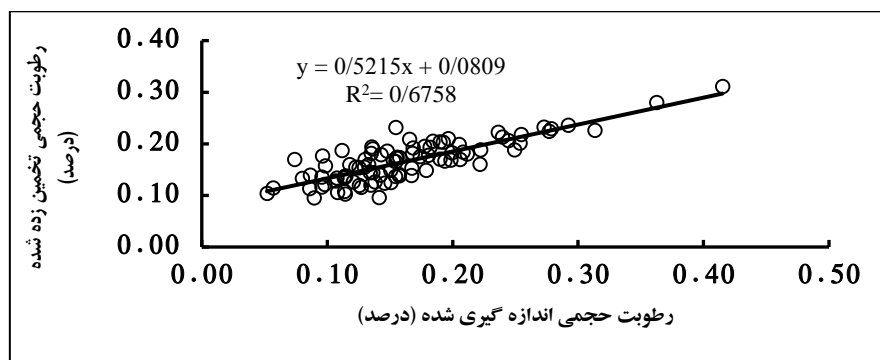
رگرسیون درخت تصمیم M5، می‌تواند با جداسازی داده‌ها به گروه‌های مجزا و ارائه یک رابطه رگرسیون چند متغیره خطی برای هر گروه، توانایی مدل کردن رابطه غیرخطی بین داده‌ها را دارد. در این پژوهش با کد نویسی در محیط نرم‌افزار Miner Rapid، مشابه روش رگرسیون گام‌به‌گام، تمامی حالات رگرسیون درختی یک تا چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت و بهترین زیرمجموعه از متغیرهای مستقل که بهترین تخمین از تنش آبی را ارائه کردند. در مسائل رگرسیونی، افزایش تعداد متغیرها باعث پیچیدگی مدل می‌شود (دوو و همکاران، ۲۰۲۲).

همبستگی بین متغیرها روند کاهش پیدا می‌کند تا جاییکه این روند با تعداد ۱۱ متغیر ثابت می‌شود. در ماهواره سنتینل ۲ هم طبق جدول (۷) ضریب تعیین بین متغیرها از ۱۵/۸ تا ۶۷/۶ درصد به ترتیب تا تعداد هفت متغیر، روند افزایش داشته بطوریکه این روند از تعداد هشت متغیر به بالا، کاهشی می‌شود تا جاییکه از ۱۰ متغیر به بالا این روند تغییر، ثابت می‌ماند.

باندی امواج مرئی به امواج طول موج کوتاه، امواج مادون قرمز و شاخص‌های گیاهی مرتبط با رطوبت موجود در تاج پوشش گیاهی بیشترین همبستگی با رطوبت خاک را دارند. طبق نتایج مشاهده شده در جدول (۶)، مربوط به ماهواره لندست، مشاهده شد که با افزایش تعداد متغیر تا شش متغیر، میزان ضریب تعیین از ۲۳/۹ تا ۷۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. بطوریکه با افزایش بیشتر تعداد متغیر تا ۱۰ متغیر، روند



لندست



سنتینل ۲

شکل ۳- رگرسیون درخت تصمیم M5 در روش گام‌به‌گام، تصاویر ماهواره لندست ۹ و سنتینل ۲

ماهواره سنتینل ۲ میزان خطا از ۰/۰۵۹ تا ۰/۰۳۸ تا ۷ متغیر، روند کاهشی داشته و از این تعداد به بالا میزان خطا به ۰/۰۳۸ رسیده که در نهایت در رابطه‌ای با متغیرهای بالاتر میزان خطا ثابت مانده است.

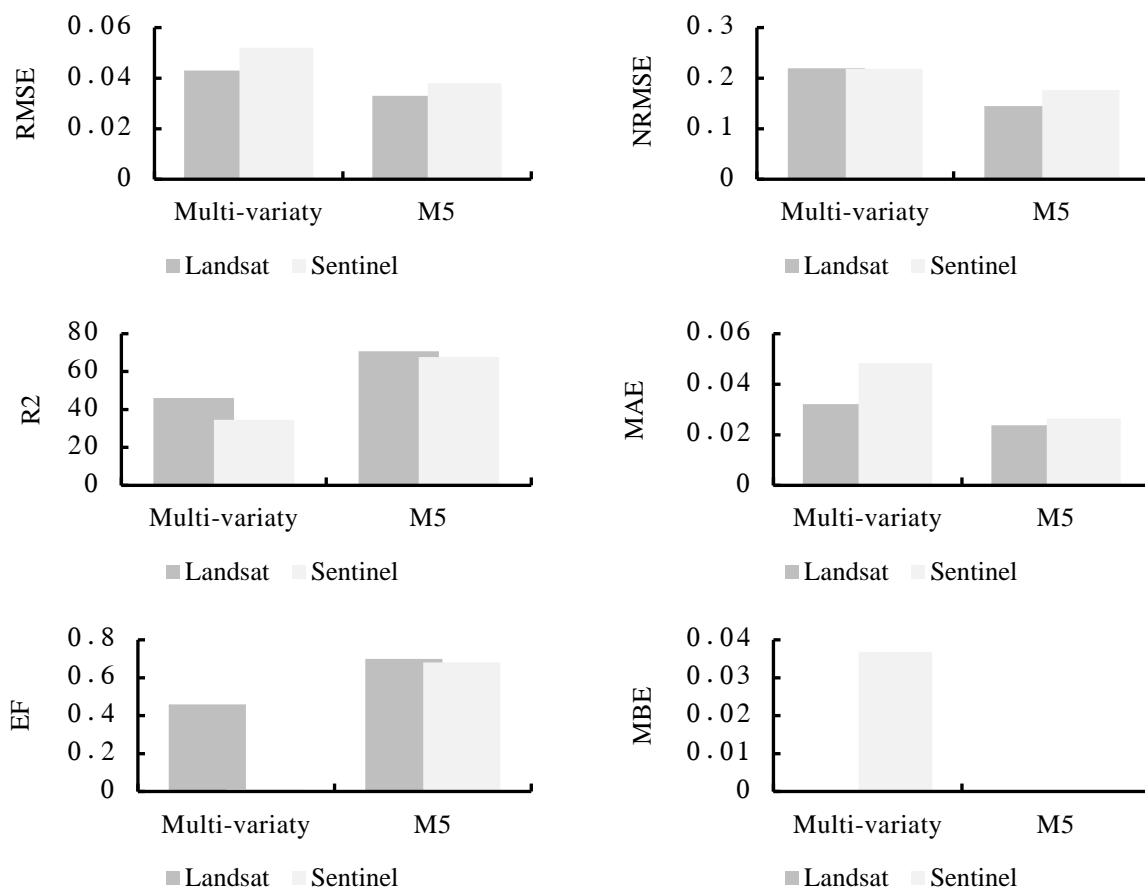
نتایج بررسی برآورد دقت تخمین تنش آبی پنبه

مطابق شکل (۴) مقایسه‌ای بین مدل‌های تخمین رطوبت خاک با معیارهای ارزیابی خطا صورت گرفته است. در بررسی دقت تخمین تنش آبی به دو روش رگرسیون

این نتایج در گزارشی از پژوهش قربانی و همکاران (۲۰۲۲) و قربانی و همکاران (۱۴۰۰) مشاهده شده است. در مسائل رگرسیونی، افزایش تعداد متغیرها باعث پیچیدگی مدل می‌شود. بر این اساس در صورتی که افزایش متغیری باعث افزایش قابل توجهی در دقت مدل نشود، بهتر است مدل با تعداد متغیر کمتر ارائه شود. همچنین در بررسی تغییر خطای برآورد تنش آبی در یک رابطه بهینه بین متغیرها، مشخص شد در ماهواره لندست میزان خطا از ۰/۰۵۲ تا ۰/۰۳۳ تا شش متغیر، روند کاهشی داشته و از این تعداد به بالا میزان خطا به ۰/۰۳۶ رسیده که در نهایت در رابطه‌ای با متغیرهای بالاتر میزان خطا ثابت مانده است. در

تخمین تنش آبی پنبه در نظر گرفته شود. همچنین در مقایسه بین ماهواره لندست و سنتینل ۲ در تخمین تنش آبی با استفاده از مدل درختی M5 این نتیجه حاصل شد که ماهواره لندست ۹ با ضریب تعیین ۷۰/۶ درصد نسبت به ماهواره سنتینل ۲ با ضریب تعیین ۶۷/۶ درصد، ۴/۵۸ درصد متغیر رطوبت خاک را به‌عنوان نماینده‌ای از تنش آبی تخمین می‌زند.

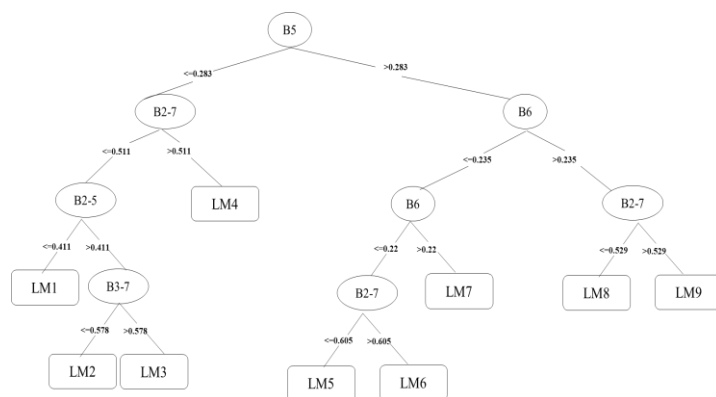
خطی چند متغیره و مدل درختی M5، با توجه به غیرخطی بودن رابطه بین متغیرها، رگرسیون خطی چند متغیره نتایج رضایت‌بخشی را نشان نداد. بطوریکه در هر دو ماهواره لندست و سنتینل ۲ ضریب تعیین بین متغیرها در روش رگرسیون درختی M5 نسبت به رگرسیون خطی چند متغیره در یک رابطه بهینه به ترتیب ۵۳/۲۶ درصد و ۹۵/۸۸ درصد افزایش داشته است (شکل ۴). لذا روش رگرسیون درختی M5 با دقت بالاتر می‌تواند به‌عنوان یک روش بهینه در



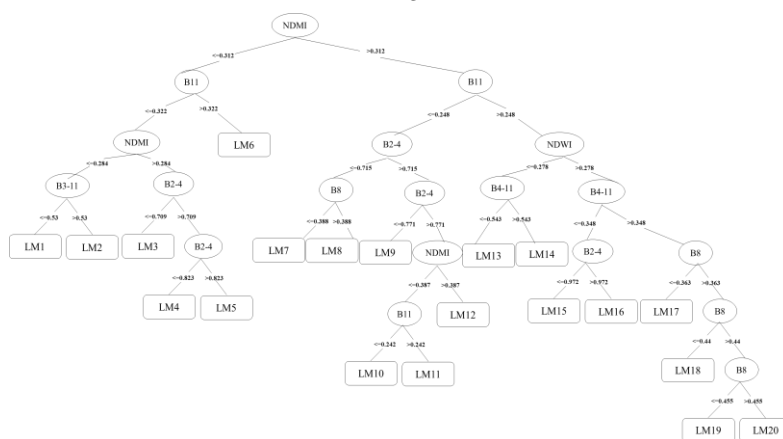
شکل ۴- مقایسه روش‌های رگرسیونی در تخمین تنش آبی پنبه

آبی با شش و هفت متغیر بهینه در نمودار درختی شکل (۵) ارائه شده است.

نحوه تفکیک داده‌ها در ماهواره لندست ۹ و سنتینل ۲ به ترتیب به ۱۶ و ۲۰ زیرمجموعه و روابط رگرسیونی چند متغیره هر یک از آن‌ها برای تخمین تنش



لندست



سنیتیل ۲

شکل ۵- نمودار درختی پیش‌بینی تخمین تنش آبی با روش رگرسیون درختی M5

نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت ماهواره‌های لندست و سنیتیل ۲ با استفاده از شاخص‌های گیاهی و باندهای طیفی مستخرج از این ماهواره‌ها جهت تخمین تنش آبی در رابطه با رطوبت سطحی خاک در مزارع شمالی استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل ترکیبی بهینه با استفاده از رابطه رگرسیونی خطی چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت. در این روش برای ماهواره لندست در چهار گام با ضریب تعیین ۴۶/۱۳ درصد و برای ماهواره سنیتیل ۲ در پنج گام با ضریب تعیین ۳۴/۵۱ درصد بهترین رابطه تخمین زده شد که با توجه به غیرخطی بودن رابطه رطوبت خاک و دیگر متغیرها، نتایج چندان رضایت‌بخشی حاصل نشد. از این رو الگوریتم پیشنهادی بر اساس مدل رگرسیون درخت تصمیم M5 مدلی را با دقت قابل قبول برای ماهواره لندست ۹ و سنیتیل ۲ به ترتیب با ضریب تعیین ۷۰/۶ و ۶۷/۶ درصد تخمین زد. این مطلب نشان دهنده این است که داده‌های

حاصل از ماهواره لندست، اختلاف کمتری را بین خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده توسط نشان می‌دهد. دیگر معیارهای ارزیابی خطا در برآورد دقت مدل پیش‌بینی نتایج مشابهی را اراده دادند. بطوریکه میزان EF که نشان دهنده کارایی مدل هستند نشان داد که روش رگرسیون مدل درختی M5، حاصل از ماهواره لندست، مقادیر برآورد شده را نسبت به مقدار میانگین اندازه‌گیری‌ها، تخمین بهتری را ارائه می‌دهد. در نمودار مقایسه‌ای معیار MBE، ماهواره لندست تقریباً مقادیری نزدیک به صفر دارد که نشان‌دهنده تخمین دقیق‌تری نسبت به ماهواره سنیتیل ۲ است. میزان رطوبت خاک به‌عنوان نماینده تنش آبی بر اساس داده‌های ماهواره‌ای لندست و با روش رگرسیون مدل درختی M5 همبستگی خوبی با شاخص‌های گیاهی و امواج طول موج کوتاه مرتبط با رطوبت تاج پوشش گیاهی و همچنین باند مادون قرمز دارد. به دست آوردن اطلاعات قابل اعتماد با اندازه‌گیری میدانی برای مدیران و برنامه‌ریزان کاری زمان‌بر

و هزینه‌بردار است. لذا ارائه این چنین تکنیک‌هایی مانند مدل های تخمین تنش آبی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور این امکان را برای بهبود مدیریت درازمدت منابع آب فراهم می‌کند.

فهرست منابع

۱. ربیعی، س.، و تجریشی، م.، ۱۳۹۹. بررسی و ارزیابی تأثیرات رطوبت سطحی خاک بر داده‌های تصاویر چند طیفی ماهواره سنتینل ۲ و ارائه الگوریتمی برای برآورد مقدار رطوبت خاک، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی سهند تبریز.
۲. رنجبر، ص.، و آخوندزاده هنزایی، م.، ۱۳۹۸. برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از روش‌های ANN و SVR در تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲، نشریه علمی و پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. سال ۷. شماره ۴. ۲۱۵-۲۳۲.
۳. غفاری، الف.، داوری، ک.، و حسینی، ف.، ۱۳۹۹. توسعه الگوریتم‌های بهبودیافته برای ریز مقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده ماهواره‌های نوری/حرارتی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲. جلد ۱۴. ۶۶۰-۶۵۰.
۴. فشائی، م.، ثنائی‌نژاد، ح.، و داوری، ک.، ۱۳۹۴. تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس (مطالعه موردی: محدوده دشت مشهد). نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۹. شماره ۶. ۱۷۴۸-۱۷۳۵. قربانی، خ.، تیموری، ر.، و سالارجزی، م.، ۱۴۰۰. برآورد عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استان گلستان. نشریه هواشناسی کشاورزی (وابسته به انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران). جلد ۹. شماره ۱. ۳۸-۵۲.
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, 300pp.
6. Alvino, A., and Marino, S., 2017. Remote sensing for irrigation of horticultural crops. Journal of Horticulturae.3:40-76.
7. Baret, F., Houlès, V., Guérif, M., 2007. Quantification of plant stress using remotesensing observations and crop models: the case of nitrogen management. Experimental Botany Journal. 58: 869-880.
8. Bhattacharya, B., Price, R.K., and Solomatine, D.P., 2007. Machine learning approach to modeling sediment transport. Hydraulic Engineering Journal. 133:440-450.
9. Brillante, L., Mathieu, O., Lévêque, J., and Bois, B., 2016. Ecophysiological modeling of grapevine water stress in burgundy terroirs by a machine-learning approach. Frontiers in Plant Science Front Journal. 7: 796-899.
10. Caturegli, L., Matteoli, S., Gaetani, M., Grossi, N., Magni, S., Minelli, A., Corsini, G., Remorini, D., and Volterrani, M., 2020. Effects of water stress on spectral reflectance of bermudagrass. Scientific Report Journal. 16:2-14.
11. Dou, Z., Fang, Z., Han, X., Liu, Y., Duan, L., Zeeshan, M., and Arshad, M., 2022. Comparison of the Effects of Chemical Topping Agent Sprayed by a UAV and a Boom Sprayer on Cotton Growth. Agronomy Journal. 12:7-25.
12. Enciso, J., Porter, D., and Peries, X., 2007. Irrigation monitoring with soil water sensors (Spanish). Fact sheet B-6194. College Station, Texas, USA, Texas AgriLife Extension Service, Texas A&M System.
13. GAO B, 1996. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment Journal. 58: 257-266.

14. Gerhards, M., Schlerf, M., Mallick, K., and Udelhoven, T., 2019. Challenges and Future Perspectives of Multi- /Hyperspectral Thermal Infrared Remote Sensing for Crop Water-Stress Detection: A Review. *Remote Sensing Journal*. 11: 124-138.
15. Ghorbani, K., Salarijazi, M., and Ghahreman, N., 2022. Developing Stepwise m5 Tree Model to Determine the Influential Factors on Rainfall Prediction and to Overcome the Greedy Problem of its Algorithm. *Water Resources Management Journal*. 36:3327-3348.
16. Gonzalez-Dugo, V., L. Testi, F. J., Villalobos, A., Lopez-Bernal, F., Orgaz, P. J., Zarco-Tejada., and Fereres, E., 2020. Empirical Validation of the Relationship between the Crop Water Stress Index and Relative Transpiration in Almond Trees. *Agricultural and Forest Meteorology Journal*. 292:108-128.
17. Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
18. Ihuoma, S. O., and Madramootoo, C. A., 2017. Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture Journal*. 141:267–275.
19. Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., and Pinter, P.J., 1981. Canopy temperature as acropwater stress indicator. *Water Resources Reaserch Journal*. 17:1133–1138.
20. Lin, L., Chen, J., and CAI, C., 2012. High rate of nitrogen fertilization increases the cropwater stress index of corn under soil drought. *Commun Soil Science Plant Journal*. 43:2865–2877.
21. Lisar, S.Y., Motafakkerzad, R., Hossain, M.M., and Rahman, I.M., 2012. Water stress in plants: Causes, effects and responses. In *Water Stress*; InTech: London, UK.
22. López López. 2014. Water stress index as an indicator of irrigation timing in agricultural.
23. Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., and Tran, L.-S. 2014. Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science Front Journal*, 5: 325-339.
24. Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., and Save, R., 1993. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *Remote Sens Journal*. 14:1887–1905.
25. Quinlan, J.R., 1992. Learning with continuous classes. In *5th Australian joint conference on artificial intelligence*. 343-348.
26. Rapaport, T., Hochberg, U., Shoshany, M., Karnieli, A., and Rachmilevitch, S., 2015. Combining leaf physiology, hyperspectral imaging and partial least squares-regression (PLS-R) for grapevine water status assessment. *Photogrammetry and Remote Sensing Journal*. 109: 88–97.
27. Romero, M., Luo, Y., Su, B., and Fuentes, S., 2018. Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. *Computers and Electronics in Agriculture Journal*. 147:109–117.
28. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W., 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation; NASA/GSFC Type III Final Report. NASA: Greenbelt, MD, USA, GSFC: Greenbelt, MD, USA.
29. Shyamal, S., Virnodkar, Vinod K., and Pachghare, V. C., 2020. Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. *Precision Agriculture Journal*, 21:1121–1155.
30. Tanriverdi, C. A., Atilgan, H., and Akyuz, A., 2017. Comparasion of Crop Water Stress Index (CWSI) and Water Deficit Index (WDI) by Using Remote Sensing (RS). *Infrastruktura I Ekologia Terenow Wiejskich*. 3:879-894.
31. Veysi, S., Naseri, A. A., Hamzeh, S., and Bartholomeus, H., 2017. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. *Journal of Agricultural Water Management*, 189, PP. 70–86.
32. Wang, L., and Qu, J.J., 2007. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*. 34:20.
33. Yi, Q.X., Bao, A., Wang, Q., and Zhao, J., 2013. Estimation of leaf water content in cotton by means of hyperspectral indices. *Computing Electronic Agriculture Journal*. 90: 144–151.

34. Zarco-Tejada, P. J., Rueda, C. A., and Ustin, S. L., 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment Journal*. 85:109– 124.
35. Zhou, C.J., Zhang, S.W., Wang, L.Q., and Miao, F., 2005. Effect of fertilization on the canopy Temperature of winter wheat and its relationship with biological characteristics. *Acta Ecologica Sinica*. 25: 18–22.

Evaluation of Cotton Water Stress Estimation Using Multispectral Satellite Images Based on M5 Tree Model

M. Mazidi, M. Hesam*, Gh. Khalili, and Ch B Komaki

Ph.D. candidate, Irrigation and Drainage Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. maryam.mazidi@gmail.com

Associate Prof., Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. hesamm@gau.ac.ir

Associate Prof., Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. ghorbani.khalil@gau.ac.ir

Assistant Prof., Desert Area Management Department, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. bkomaki@gau.ac.ir

Received: September 2023 and Accepted: December 2023

Abstract

Water stress occurs as a result of the imbalance between soil water in the root zone and plant water use, which necessitates determining the water stress index of the plant. Surface soil moisture is directly related to plant water content. Availability of satellite data has led to temporal and spatial resolution of field data and offers new opportunities for monitoring crop conditions. In this research, accurate and continuous monitoring of soil moisture content, as a representative of soil moisture stress, was done with field measurements of soil moisture, and comparison with multispectral data of Landsat 9 and Sentinel 2 satellite images. The relationship between plant indices, as an independent variable, and soil surface moisture, as a dependent variable, was studied using linear multivariate regression and M5 tree regression methods. Considering the non-linearity of the relationship between soil moisture and spectral reflectance, linear multivariate regression did not show satisfactory results with coefficient of determination (R^2) of 0.46 and 0.34 for Landsat 9 and Sentinel 2 satellites, respectively, as well as the root mean square error (RMSE) equal to 0.043 and 0.052. However, M5 tree regression showed more acceptable results, such that by establishing 16 and 20 regression relationships for Landsat 9 and Sentinel 2 satellites, the soil moisture was estimated with R^2 of 0.70 and 0.67 and RMSE of 0.033 and 0.038, respectively. The results showed that the estimation of soil moisture with methods based on machine learning, such as the M5 model, increases the accuracy of calculations. In the M5 decision tree regression, a high number of variables does not necessarily lead to an increase in the accuracy of soil moisture estimation, and a relationship with the highest accuracy was found in the low number of variables. Therefore, the relationship obtained at the field level can be used to evaluate soil water stress and determine irrigation time in agricultural lands on a large scale, without measuring soil data.

Keywords: Landsat 9, Sentinel 2, Data mining, Decision tree regression

* - Corresponding author's email: hesamm@gau.ac.ir