

برآورد عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استان گلستان

خلیل قربانی^{۱*}، رضاتیموری^۲، میثم سالاری جزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۷

چکیده

پیش‌بینی زودهنگام عملکرد گندم چند ماه قبل از برداشت که از چالش‌های مهم در بخش کشاورزی و امنیت غذایی است، مستلزم برآورد میزان تولید در سطح وسیع و این امری زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. استفاده از سنجش از دور یک رهیافت عملی و نسبتاً دقیق برای رفع این مشکل است. تفاوتی که در بازتاب طیفی پدیده‌ها وجود دارد می‌تواند در شناسایی و اندازه‌گیری آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مزارع گندم با توجه به شرایط رشد خود می‌توانند عملکردهای متفاوتی داشته باشند این تفاوت عملکرد بازتاب طیفی مزارع مختلف را تحت تأثیر قرار دهد. در پژوهش حاضر ۲۰۰ مزرعه گندم از شهرستان گنبدکاووس و مزارع زیر سد وشمگیر انتخاب و عملکرد آن‌ها در سال ۱۳۹۶ مدنظر قرار گرفت. پس از تصحیح تصویر ماهواره لندست ۸ مربوط به اردیبهشت، اطلاعات باندهای طیفی آن استخراج و به همراه شاخص‌های مختلف مستخرج از آن‌ها ۱۵ متغیر مستقل تشکیل شد. رابطه آن‌ها با عملکرد گندم به عنوان متغیر وابسته با استفاده از روش‌های رگرسیون چندمتغیره خطی و رگرسیون درختی M5 جستجو شد. با توجه به غیرخطی بودن رابطه بین عملکرد گندم با بازتاب‌های طیفی، رگرسیون چند متغیره خطی نتایج رضایت‌بخشی را نشان نداد و در بهترین شرایط این رابطه دارای ضریب همبستگی ۰/۶۳ و میانگین خطای ۴۲۵ کیلوگرم در هکتار بود. اما رگرسیون درختی M5، نتایج قابل قبول‌تری را نشان داد به طوری که با برقراری ۵ رابطه رگرسیونی، باهمبستگی ۸۹ درصد و خطای ۳۲۵ کیلوگرم در هکتار، عملکرد گندم را برآورد کرد. این میزان دقت با استفاده از باندهای ۱، ۳ و شاخص‌های NDWI، NMDI و نسبت باندهای ۴ به ۳ بدست آمد. وجود خطا در گزارش عملکرد گندم، عدم یکنواختی مزرعه و کوچک بودن برخی از مزارع از منابع خطا می‌باشند که با رفع آن‌ها، امکان برآورد دقیق‌تر وجود خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: گندم، بازتاب طیفی، تخمین عملکرد، رگرسیون درختی M5، سنجش از دور

مقدمه

کشاورزی دنیا حتی در نواحی خشک کشت می‌شود. گندم از نظر ارزش غذایی نقش عمده‌ای در تغذیه انسان دارد. گندم بخاطر نقش مهم و اساسی که در عرصه‌های مختلف سیاسی و اقتصادی کشورها به خصوص کشورهای در حال توسعه نقش‌آفرینی می‌کند، یک محصول راهبردی در تمام دنیا به حساب می‌آید. در ایران نیز گندم از نظر تولید و سطح زیر کشت مهمترین محصول کشاورزی است، پیش‌بینی عملکرد آن به دلیل اهمیتی که در برنامه‌ریزی اقتصادی دارد از اهمیت به‌سزایی برخوردار و از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است. برآورد حجم محصولات کشاورزی برای مدیران و سیاست‌گذاران در سطح منطقه‌ای و ملی از اهمیت بالایی برخوردار است (Anup, 2005). با توجه به کاهش دسترسی به آب، تهدیدات بیشتر از

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات راهبردی و اساسی کشورهای جهان و تأمین‌کننده اصلی قسمت اعظم پروتئین و کالری مورد نیاز افراد در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از جمله ایران به حساب می‌آید (Kamali, 2012). گندم گیاهی است متعلق به خانواده غلات، که در سطح وسیعی از زمین‌های

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

(*نویسنده مسئول: ghorbani.khalil@yahoo.com)

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

نحوه ارجاع مقاله:

قربانی، خ، تیموری، ر. سالاری جزی، م. ۱۴۰۰. برآورد عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استان گلستان. نشریه هواشناسی کشاورزی،

DOI: 10.22125/agmj.2021.266547.1107. ۳۸-۵۲: (۱)۹

Ghorbani, Kh., Teimourey, R., Salarijazi, M. 2021. Wheat yield estimation using satellite images in Golestan province. Journal of Agricultural Meteorology, 9(1): 38-52. DOI: 10.22125/agmj.2021.266547.1107

اثرات تنش کمبود آب بر گسترش سطح برگ، تولید ماده خشک و تجمع نیتروژن شبیه‌سازی می‌شوند. مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و به اطلاعات قابل دسترس درباره هوا (حداقل و حداکثر دما، تشعشع خورشیدی یا تعداد ساعات آفتابی روزانه و بارندگی روزانه) و خاک نیاز دارد. اگرچه پیشرفت‌های زیادی در توسعه مدل‌های آب و هوا-محصول صورت گرفته است، اما واسنجی و اعتبارسنجی آن‌ها در مقیاس‌های زراعی بزرگ نیازمند برداشت نمونه‌های فراوان و عملیات میدانی زیادی است. به همین دلیل، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و فناوری سنجش از دور برای این منظور مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی به واسطه سال ۱۹۷۰ بر می‌گردد. این داده‌ها در مناطق مختلف و خیلی وسیعی از دنیا برای تعیین میزان تغییرات پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفت (Tucker, 1979). تعداد زیادی از داده‌های حاصل از ماهواره‌های مختلف را جهت تعیین شاخص‌های اکولوژیکی مورد استفاده قرار داد، که مهمترین شاخص مورد بررسی او شاخص پوشش گیاهی حاصل از $NDVI^2$ بود. گسترش این علم طی زمان در زمینه‌های گوناگون خدمات کشاورزی شامل روش‌های پهنه بندی اقلیمی محصولات کشاورزی، برآورد تبخیر و تعرق گیاهان، بررسی خسارات پدیده‌های زیان بخش جوی و پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی نظیر ذرت، برنج، گندم و غیره توسعه یافت. اطلاعات باندهای مختلف سنجنده‌ها در قالب شاخص‌های گیاهی و نسبت‌های طیفی نقش عمده‌ای را در این زمینه ایفا می‌کنند (Matsushita et al., 2007). شاخص‌های پوشش گیاهی نوع ویژه‌ای از شاخص‌های طیفی هستند که برای تحلیل اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر یک از این شاخص‌ها با ترکیب باندهای طیفی برای تخمین متغیرهای بیوفیزیکی گیاهی به کار می‌روند (Soleymani et al., 2001). شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) مدت هاست که به عنوان یک روش غیر مستقیم برای تعیین عملکرد محصول استفاده می‌شود (Pinter et al., 1981)؛ (Raun et al., 2001) علاوه بر این شاخص‌های متعدد دیگری نیز برای این

تغییرات آب و هوایی، جمعیت و تقاضای مواد غذایی که به طور مستمر در حال افزایش است، نیاز به پیش‌بینی حجم محصولات کشاورزی نیز افزایش می‌یابد (Ahmad et al., 2004). برآورد حجم محصولات به مدیران اقتصادی در مورد تغییرات عملکرد امکان برنامه‌ریزی مناسب در طول سال‌های متمادی را می‌دهد و می‌توان سیاست‌های اقتصادی شامل قیمت محصول و بازار محصولات چه در امر واردات و چه در امر صادرات را کنترل و راهبری کرد. این برآورد، نقش بسزایی در رشد و توسعه اقتصادی دولت‌ها دارد (Hayes and Decker, 1996). نخستین تلاش‌ها در زمینه مدل‌سازی میزان عملکرد محصولات گوناگون و از جمله محصول گندم دیم بر مبنای ارتباط مستقیم متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش با میزان محصول بوده است. شمار زیادی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول، با استفاده از متغیرهای محصول و متغیرهای اقلیمی که حاصل روابط محصول خاک-جو می‌باشند، برای کسب اطلاعات عملکرد محصول قبل از فصل برداشت ساخته شده‌اند (Montis, 1997). به طور مثال عینی (Nargeseh et al., 2016) به پیش‌بینی عملکرد گندم آبی استان فارس با استفاده از مدل APSIM پرداختند. این مدل توسط پژوهشگران استرالیایی طراحی شده است و از قدرت بالایی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی برخوردار است. ماژول گندم در این مدل، رشد و نمو گندم را با استفاده از عوامل مختلف از جمله آب و هوا، خاک و اطلاعات مدیریت زراعی به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. (Ghorbani and Soltani, 2015) استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد سویا (SSM^1) اثر تغییر اقلیم را بر عملکرد سویا در منطقه گرگان مورد بررسی قرار دادند. این مدل مراحل فنولوژیک را به عنوان تابعی از دما و طول روز پیش‌بینی می‌کند. گسترش و پیر شدن سطح برگ تابعی از دما، تراکم بوته و نیتروژن می‌باشد. تولید ماده خشک به عنوان تابعی از تشعشع دریافت شده و دما تخمین زده می‌شود و ماده خشک تولیدی بر اساس مرحله نمو و روابط مبدا-مقصد بین اندام‌های رویشی (برگ، ساقه و پوسته غلاف) و دانه توزیع می‌شوند. موازنه آب خاک شامل رواناب، رشد ریشه و افزایش عمق موثر استخراج آب، تبخیر از سطح خاک، تعرق و زهکشی و نیز

² NDVI: Normalized Difference Vegetation Index¹ SSM: Simple Simulation Models

منطقه مورد نظر پوشش می‌داد دریافت گردید. بر اساس تشعشع موج کوتاه جذب شده از سنجش از دور و نقشه‌های شاخص سطح برگ بدست آمده با دقت های مکانی مختلف (۲۵۰ و ۳۰ متر) اقدام به واسنجی گردید و مقدار ضریب همبستگی مشاهده شده و برآورد شده بدست آمد. نتایج نشان داد که بکارگیری مدل VSM و استفاده از تصاویر سنجنده مودیس توانسته برآوردهای قابل قبولی از عملکرد برنج در مقیاس منطقه‌ای ارائه کند. Rashede et al., (2009) با استفاده از شاخص سطح برگ تولید شده از تصاویر ماهواره IRS به تخمین عملکرد گندم آبی در دشت قزوین پرداختند. با استفاده از ۸ تصویر ماهواره IRS که تقویم زراعی گندم آبی را در دشت قزوین پوشش می‌داد اراضی زیر کشت گندم و جو در دشت قزوین تفکیک و با استفاده از شاخص‌های تولید شده از تصاویر ماهواره IRS و نمونه برداری‌های زمینی که شاخص سطح برگ و میزان محصول آن اندازه‌گیری شده بود، به برازش مدل‌هایی جهت تخمین عملکرد گندم آبی در دشت قزوین پرداخته شد. بر اساس نتایج بدست آمده بهترین زمان برای تخمین عملکرد با استفاده از IAL حاصل از تصاویر ماهواره IRS در مرحله اواسط ساقه‌دهی می‌باشد. هر چقدر تاج پوشش گندم آبی افزایش یافت شاخص سطح برگ حاصل از تصاویر IRS در تخمین عملکرد کاهش معنی داری پیدا کرد. به منظور تحلیل تصاویر ماهواره‌ای از دو رویکرد تفسیر بصری و مدل‌سازی آماری و هوشمند استفاده می‌شود. حجم زیاد داده‌های سنجش از دوری باعث شده است تا استفاده از داده‌کاوی و بکاربردن الگوریتم‌ها و روش‌های مختلف مدل‌سازی آن بیش از پیش رایج‌تر شود. امروزه داده‌کاوی در خدمت علوم مختلف درآمده است و پژوهشگران زیادی از آن در زمینه پژوهشی خود استفاده کرده‌اند بطور مثال می‌توان به مطالعات (Ghorbani, 2011) اشاره کرد که به مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی با شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای با داده‌کاوی پرداخت. در این پژوهش از روش‌های مدل‌سازی قوانین پیوند و درخت تصمیم استفاده کرد. (Penda et al., 2010) بر اساس شاخص‌های گیاهی و با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به تخمین عملکرد ذرت در داکوتای شمالی آمریکا پرداختند.

منظور به کار می‌رود مانند شاخص نسبت پوشش گیاهی (RVI¹) که برای پیش بینی عملکرد گندم استفاده می‌شود (Aparicio et al., 2000)؛ (Serrano et al., 2000). Ahmad Mahmoodi et al., (2016) به منظور پیش‌بینی عملکرد گندم در برخی از مراحل رشد و مقایسه روش زمین آمار و استفاده از داده‌های سنجش از دور پژوهشی را انجام دادند که ۲۰۲ نمونه گیاهی در مراحل مختلف رشد برداشت و متغیرهای گیاهی اندازه‌گیری شدند. انواع روش‌های درون‌یابی اعمال و مدل مناسب و دقت مناسب روش‌های درون‌یابی با استفاده از معیارهای آماری برازش داده شدند. با برازش مدل لجستیک پیک بین مقادیر عملکرد و متغیرهای گیاهی، نقشه عملکرد با کمک سنجش از دور تهیه و با معیارهای آماری مختلف نقشه های عملکرد بدست آمده مقایسه شدند. با توجه به دقت مناسب فن سنجش از دور نسبت به روش زمین آمار و علاوه بر آن آسان و کم هزینه بودن این روش در مقابل زمین آمار، استفاده از سنجش از دور و شاخص‌های گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌های مربوط می‌تواند تحول جدیدی در برآورد عملکرد در مقیاس منطقه‌ای باشد. (Momen Zadeh et al., 2011) به بررسی تغییرات ماده خشک و عملکرد گندم در استان اصفهان با کمک داده‌های سنجنده مودیس پرداختند که میزان تولیدات گیاهی گندم در دوره‌های ترسالی و خشکسالی در سالهای ۱۳۸۳-۱۳۸۴ و ۱۳۸۰-۱۳۷۹ داده‌های مربوط به انعکاس سطحی و دمای سطح زمین با گام‌های ۸ روزه استخراج شد و شاخص گیاهی و دمای سطح زمین و میزان تنش آبی با یک رابطه خطی برآورد دادند. با محاسبه توزیع مکانی جذب فعال و میزان تنش آبی، تابش فتوسنتزی ماده خشک تجمعی به عنوان بازخوردی از عملکرد گندم محاسبه گردید و سپس ماده خشک بدست آمده با کمک شاخص برداشت به عملکرد تبدیل شد. (Mokhtari et al., 2012) با بهره‌گیری از اطلاعات سنجش از دور و ارزیابی مدل توسعه داده شده بر پایه ی اطلاعات برداشت شده زمینی باهدف توسعه مدل VSM² جهت تخمین منطقه‌ای عملکرد برنج پرداختند. ۱۱ تصویر سنجنده مودیس و یک تصویر سنجنده لندست ۵ که تقویم زراعی برنج را در

¹ RVI: Ratio-Vegetation-Index

² VSM: Vegetative Simulation Model

و در اصطلاح روش‌های جعبه سیاه گفته می‌شوند. در این پژوهش به منظور بررسی و درک بهتر رابطه بین عملکرد گندم با اطلاعات طیفی استخراج شده از تصویر ماهواره لندست، از روش رگرسیون درخت تصمیم M5 در کنار رگرسیون چند متغیره خطی استفاده می‌شود. بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی زمینی تلفیقی مناسب برای ارزیابی عملکرد است، اما اینکه تا چه اندازه می‌توان به خروجی نتایج بدست آمده از این تصاویر اطمینان پیدا کرد، به عنوان سوالی برجسته از مهم‌ترین اهداف این پژوهش است. بررسی شاخص‌های مختلف گیاهی و محاسبه آن‌ها در تاریخ‌های مورد نظر این امکان را ایجاد می‌کند که شاخصی مناسب از بین شاخص‌های موجود برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

تحقیق حاضر در سال ۱۳۹۶ در بخش‌هایی از مزارع استان گلستان واقع در شهرستان‌های مینودشت، گنبد و گرگان اجرا گردید (شکل ۱). استان گلستان از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. مساحت استان ۲۰۴۳۷/۷۴ کیلومتر مربع بوده که معادل ۱/۳ درصد مساحت کل کشور را دارا می‌باشد. این استان از شمال به کشور ترکمنستان، از شرق به استان خراسان شمالی، از جنوب به استان سمنان و از غرب به استان مازندران و دریای خزر محدود می‌شود. از نظر توپوگرافی این استان از نقاط کوهستانی و جلگه‌ای تشکیل شده که قسمت جنوب و شرق را مناطق کوهستانی در بر گرفته که به طور موازی و با جهت تقریباً شرقی- غربی بوده و ادامه سلسله جبال البرز می‌باشند. داده‌های مورد نیاز به دو دسته داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های زمینی تقسیم می‌شوند. داده‌های زمینی شامل موقعیت جغرافیایی مزارع و عملکرد گندم در سال ۱۳۹۶ بود که با پرسش از کشاورزان و همچنین منابع اطلاعاتی سد و شمشگیر تهیه شد. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به ماهواره لندست ۸ مربوط به

شاخص‌های گیاهی مورد استفاده شامل $NDVI^1$ ، GVI^2 ، $SAVI^3$ و PVI^4 بود. این ۴ شاخص گیاهی در طول سه سال با روش پس انتشار خطا در شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی شد و بهترین نتیجه زمانی که از تصاویر میانگین و انحراف معیار شاخص PVI استفاده شد بدست آمد. Becker-Reshef et al., (2010) روش رگرسیون عمومی را برای پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس در کانزاس و اکراین بکار بردند و بترتیب در کانزاس و اکراین با ۷ و ۱۰ درصد خطا ۶ هفته قبل از برداشت عملکرد را پیش‌بینی کردند. Dahikar and Rode, (2014) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی مختلف بر اساس متغیرهای هواشناسی بارش، دما و رطوبت نسبی و همچنین پارامترهای خاک پرداختند و نتیجه گرفتند شبکه عصبی مصنوعی ابزار مناسبی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی می‌باشد. Lobel et al., (2005) با استفاده از رگرسیون درختی، داده‌های صحرایی و سنجنش از دور به بررسی تغییرات عملکرد مزارع گندم تحت آبیاری دره یاکوبی مکزیک پرداختند و نتیجه گرفتند رگرسیون درختی قادر است تا روابط غیر خطی بین داده‌ها را مدل کند. Sharifi, 2021 با استفاده از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین و تصاویر ماهواره‌ای به پیش‌بینی عملکرد جو پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد از بین چهار الگوریتم مختلف مورد بررسی در این تحقیق الگوریتم فرایند گاوسی بهترین نتیجه را داشته است. از این تحقیق نیز می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم‌های یادگیری ماشینی ابزارهای مناسبی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی از جمله جو می‌باشد. در بین روش‌های داده‌کاوی روش‌های وجود دارند که روابط بین داده‌ها را با فرمول‌های ساده ریاضی بیان می‌کنند که به آنها روش‌های جعبه خاکستری گفته می‌شود بطور مثال می‌توان به رگرسیون چند متغیره خطی یا رگرسیون درخت تصمیم M5 اشاره کرد این روش‌ها نقطه مقابل روش‌هایی مانند شبکه عصبی مصنوعی یا ماشین بردار پشتیبان قرار می‌گیرند که رابطه خاصی را ارائه نمی‌کنند

1 NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

2 GVI: Green Vegetation Index

3 SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index

4 PVI: Perpendicular Vegetation Index

1999). پس از دریافت داده‌ها، لازم است بررسی دقیقی در مورد آن‌ها از نظر هندسی و رادیومتری به عمل آید حتی اگر قبلاً تصحیحاتی روی این داده‌ها به عمل آمده باشد. به همین دلیل باید به طور کامل از خطاهای چنین داده‌هایی آگاهی داشت (Alavipanah et al., 2009). این خطاها را می‌توان به دو دسته هندسی و رادیومتری تقسیم نمود. آگاهی از وضعیت هندسی و رادیومتری داده‌های مورد استفاده بسیار ضروری است.

الف - تصحیح رادیومتری

اصلاحات رادیومتری در پژوهش‌ها، با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای دریافتی مربوط به زمان‌های مختلف و با زاویه ارتفاعی و با تصحیحات و روش‌های مختلف تهیه می‌شوند ضروری است. بنابراین نیاز است که ارزش راقومی ثبت‌شده از یک سلول معین که در سال‌های مختلف تحت تأثیر زاویه دید، موقعیت و زاویه خورشید، اثرات توپوگرافی و جوی قرار می‌گیرد، خطاهای آن رفع شود. تصحیحات رادیومتری طی دو مرحله (۱) تبدیل ارزش راقومی به تابش طیفی^۷ بالای جو و (۲) تبدیل تابش طیفی به بازتاب طیفی^۸ بالای جو انجام می‌شود.

ب - تصحیح هندسی

خطای ناشی از نمایش موقعیت ناصحیح پیکسل‌ها در تصویر ماهواره‌ای را خطای هندسی می‌گویند. داده‌های ماهواره‌ای را نیز می‌توان به یکی از روش‌های استفاده از نقاط کنترل زمینی، استفاده از پارامترهای مداری ماهواره‌ای و همبستگی، مورد تصحیح هندسی قرار داد و با یک مینا مطابقت داد. در این پژوهش با توجه به کیفیت بالای تصویر لندست ۸، و برداشت دستی از مزارع دیده شده در تصویر، نیازی به تصحیح هندسی نبود.

باند‌های طیفی و شاخص‌های مستخرج از آن‌ها

جهت استفاده در پیش‌بینی عملکرد گندم

در این پژوهش از ۷ باند طیفی سنجنده لندست شامل باندهای ۱ تا ۷ استفاده شد. شاخص‌های طیفی NDVI، NMDI، NDWI و نیز مطابق روابط ۱ تا ۵ محاسبه و به همراه نسبت‌های طیفی باند ۴ به باند ۳

اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۶ می‌باشد که از سایت <http://earthexplorer.usgs.gov> دانلود شد.

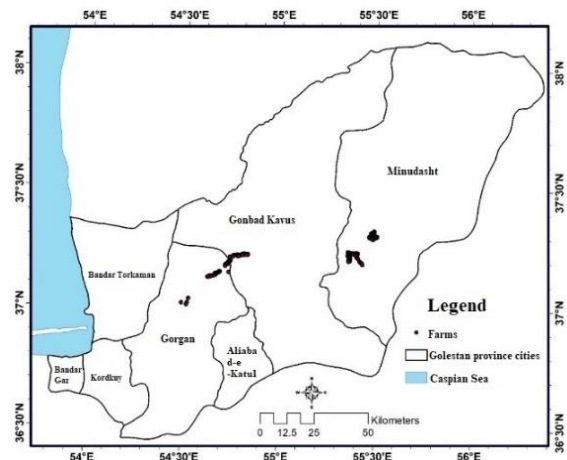


Figure 1- The study area

شکل ۱- منطقه مطالعاتی

داده‌های لندست ۸ شامل ۱۱ باند می‌باشند که هر ۱۶ روز یک‌بار برداشت می‌شوند. این ماهواره از دو سنجنده اصلی تشکیل شده است. (۱) سنجنده OLI^۱ که دارای ۹ باند طیفی در محدوده مرئی^۲ مادون قرمز نزدیک^۳ و مادون قرمز با طول موج کوتاه^۴ طیف الکترومغناطیس قرار دارند. سنجنده OLI یک حس‌گر عملیاتی تصویرساز سرزمین است که اطلاعات تصویر برای ۹ باند موج کوتاه را جمع‌آوری می‌کند. (۲) سنجنده TIRS^۵ که دارای ۲ باند در محدوده مادون قرمز حرارتی^۶ است. داده‌های این سنجنده را داده‌های گرمایی می‌نامند چرا که در محدوده طیف تابش امواج گرمایی قرار دارند. محدوده‌ی طیفی این سنجنده ۱۰/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر با قدرت جداسازی مکانی ۱۰۰ متر (۳۰ متر پس از بازسازی ناسا) می‌باشد.

پیش‌پردازش تصویر ماهواره‌ای

داده‌های خام سنجنش از دور، آن‌چنان‌که به‌وسیله حس‌گرهای موجود در ماهواره دریافت می‌شود، ممکن است که کمبودها و یا پارازیت‌هایی داشته باشند. به جبران کمبودها و یا حذف پارازیت‌های داده‌های دریافتی، قبل از هرگونه استفاده از داده‌ها یا پردازش آن‌ها، پیش‌پردازش گفته می‌شود (Najafi Disfani,)

- 1 Operational Land Imager
- 2 Visible
- 3 Near Infrared
- 4 Short wave Infrared
- 5 Thermal Infrared Sensor
- 6 Thermal Infrared

7 Spectral Radiance
8 Spectral Reflectance

استفاده از نمایه‌های تعریف شده بر اساس باندهای NIR-SWIR تخمین زد زیرا این نمایه‌ها اثر پس‌زمینه‌ای خاک را نمی‌توانند بطور کامل از بین ببرند (Gao, 1996). بازتاب خاک نیز متأثر از رطوبت خاک، ترکیبات معدنی، مواد آلی و بافت خاک می‌باشد (Anser, 1998). (Baret et al., 1993) و (Lobell and Anser, 2002) دریافتند که نسبت جذب مواد آلی و معدنی در طول موج‌های مرئی کوتاه بیشتر است در حالیکه رطوبت خاک بطور معنی‌داری در دامنه طیفی NIR-SWIR تحت تأثیر واقع می‌شود، جایی‌که نمایه‌های آب پوشش گیاهی عمل می‌کنند. معروف‌ترین نمایه‌های آبی پوشش گیاهی در محدوده طیفی NIR-SWIR نمایه اختلاف نرمال شده آب، نمایه اختلاف نرمال شده فروسرخ و نمایه چند باندهی نرمال شده خشکسالی می‌باشند.

شاخص اختلاف آب نرمال شده (NDWI)

نمایه NDWI بوسیله (Gao, 1996) با این حقیقت که SWIR با مرکزیت ۱۲۴۰ nm، لبه جذب آب پوشش گیاهی می‌باشد و همچنین محدوده طیفی NIR با مرکزیت ۸۶۰ nm بعنوان محدوده غیر حساس به تغییرات مقدار آب می‌باشند که باعث می‌شود NDWI نسبت به تغییرات مقدار آب پوشش گیاهی در تاج پوشش حساس شود معرفی شد. این شاخص که به نام شاخص مادون قرمز (Infrared Index. IRI) هم نامیده شده است، با تغییر در محتوی آب برگ تغییر می‌کند و برای تعیین تنش آبی در مواقع خشکسالی بکار می‌رود، برای سنجنده‌های OLI لندست ۸ به صورت معادله ۲ تعریف می‌شود.

$$NDWI = \frac{(Green-NIR)}{(Green+NIR)} = \frac{TM4-TM5}{TM4+TM5} \quad (2)$$

$$= \frac{B5-B6}{B5+B6} = \frac{NIR-MIR}{NIR+MIR}$$
 MIR انعکاس طیفی در محدوده ی مادون قرمز میانی است.

$$NMDI = \frac{\rho_{NIR} - (\rho_{SWIR1} - \rho_{SWIR2})}{\rho_{NIR} + (\rho_{SWIR1} - \rho_{SWIR2})} = \frac{B5 - (B6 - B7)}{B5 + (B6 - B7)} \quad (3)$$

$$NDWI = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}} \quad (4)$$

نمایه اختلاف نرمال شده فروسرخ NDII

(B43)، باند ۴ به باند ۲ (B42)، باند ۵ به باند ۳ (B53)، باند ۶ به باند ۳ (B63)، باند ۷ به باند ۳ (B73) به عنوان متغیرهای مستقل در پیش‌بینی عملکرد گندم استفاده شد. در مجموع ۱۵ متغیر مستقل در نظر گرفته شد.

نمایه اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی NDVI

این نمایه بر اساس اختلاف بازتاب طول موج قرمز از فروسرخ نزدیک در محدوده مرئی (۰/۶۸ تا ۰/۵۸ μm) و فروسرخ نزدیک (۱ تا ۰/۷۲۵ μm) بصورت معادله ۱ تعریف شده است.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

که در آن ρ_{NIR} بازتاب فروسرخ نزدیک و ρ_R بازتاب قرمز می‌باشد. این نمایه در محدوده +۱ تا -۱ تغییر می‌کند. پوشش گیاهی متراکم و سالم مقدار NDVI را مثبت نشان می‌دهد، مقادیر بالای این نمایه بیانگر پوشش گیاهی متراکم و سالم (بدون تنش) و با کاهش مقدار این نمایه از درصد پوشش گیاهی و سلامت آن کاسته می‌شود.

نمایه‌های تنش آبی

تنش آبی تغییرات فیزیولوژیکی در گیاه و خاک ایجاد می‌کند، بطوری که علائم طیفی گیاه و خاک را تغییر می‌دهد. بر اساس اختلافات طیفی و با استفاده از بازتاب‌های باندهای فروسرخ نزدیک و طول موج کوتاه فروسرخ (باندهای حساس به جذب آب) نمایه‌های متعددی برای سنجش مقدار آب گیاه پیشنهاد شده است (Dasgupta, 2007) که می‌توان به نمایه اختلاف نرمال شده فروسرخ (Hardisky et al., 1983)، نمایه مقدار آب برگ (Gao, 1996)، نمایه نسبت ساده آب (Zarco-Tejada and Ustin, 2001) و (Zarco et al., 2003)، نمایه جهانی آب پوشش گیاهی (Ceccato et al., 2001)، نمایه اختلاف نرمال شده رطوبت (Gao, 1996) و نمایه چند باندهی نرمال شده خشکسالی (Wang, 2007) اشاره کرد. بازتاب‌های دریافتی توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای ترکیبی از بازتاب‌های رسیده از سطوح پوشش گیاهی و خاک بدون پوشش می‌باشد و زمانیکه تراکم پوشش گیاهی در سطح کنوبی کم می‌شود تأثیر بازتاب سطح خاک بیشتر می‌شود (Bach and Verhoof, 2003). بنابراین نمی‌توان بطور یقین مقدار آب پوشش گیاهی را با

پتانسیل تخمین مقدار آب هم برای پوشش گیاهی و هم برای خاک توسط این نمایه را مشخص می‌کند. همچنین برای مشخص کردن توانایی نمایه NMDI در سنجش رطوبت خاک و مقدار آب پوشش گیاهی، حساسیت این نمایه نسبت به خاک بدون پوشش گیاهی یا پوشش گیاهی ضعیف، پوشش گیاهی غنی و مخلوطی از خاک و پوشش گیاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که برای خاک بدون پوشش گیاهی خشک، اختلاف بین باند ۶ و ۷ سنجنده مودیس نسبتاً کم می‌باشد و این باعث می‌شود مقدار NMDI زیادی بدست آید. در خاک تر بدون پوشش گیاهی، اختلاف بین باند ۶ و ۷ سنجنده مودیس بیشتر و NMDI کمتر می‌باشد. با شبیه سازی‌هایی که بوسیله مدل جفتی بازتاب کنوپی-برگ-خاک با تغییر رطوبت خاک از مقادیر کم به زیاد در محدوده LAI بین ۰/۰۱ تا ۲ صورت گرفت مشخص شد که در LAI=0.01 که بیانگر خاک بدون پوشش گیاهی یا مناطق با پوشش گیاهی ضعیف می‌باشد مقدار NMDI تابعی از مقدار رطوبت خاک است و افزایش رطوبت خاک باعث کاهش مقدار NMDI می‌شود. NMDI از مقادیر زیاد حدود ۰/۸۵ برای خاک خیلی خشک تا حدود ۰/۱۵ برای خاک مرطوب با مقدار رطوبتی بیشتر از ۰/۳ کاهش می‌یابد (Wang, 2007).

نمایه خشکسالی نرمال شده چند باندهی MNDWI

شاخص MNDWI¹ از ترکیب باندهای سبز و مادون قرمز میانی ایجاد شده است. باند سبز حساس به تفاوت کدورت آب است.

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \quad (8)$$

مدل‌های داده کاوی

در این پژوهش از دو روش رگرسیون چند متغیره خطی و رگرسیون درختی M5 از مدل‌های داده کاوی استفاده شد.

رگرسیون چند متغیره خطی

در اکثر مطالعات آماری عموماً همبستگی یک عامل را فقط با یک عامل در نظر می‌گیرند و اثر دیگر عوامل و ترکیب این عوامل بر عامل مورد نظر نادیده گرفته

(Ceccato et al., 2001) پیشنهاد کردند در نمایه NDII از باند جذب آب قوی‌تری با مرکزیت طول موج ۸۶۰ nm بعنوان باند حساس به آب استفاده شود و نمایه را طبق معادله ۵ پیشنهاد کردند.

$$NDII = \frac{R_{860} - R_{1640}}{R_{860} + R_{1640}} \quad (5)$$

نمایه خشکسالی نرمال شده چند باندهی NMDI

سنجنده مودیس دارای ۳ باند در محدوده طیفی SWIR با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر می‌باشد که دو تا از این باندها با مرکزیت طول موج ۱۲۴۰ و ۱۶۴۰ نانومتر بترتیب در نمایه‌های NDWI و NDII مورد استفاده قرار گرفت. با بکار گرفتن باند اخیر SWIR (باند ۷) نمایه طبق معادله ۶ پیشنهاد شده است.

$$\frac{R_{860} - R_{2130}}{R_{860} + R_{2130}} \quad (6)$$

با شبیه‌سازی که بوسیله مدل‌های جفتی بازتاب کنوپی-برگ-خاک صورت گرفت آنالیز حساسیتی انجام شد تا کمیت تأثیر مقدار آب برگ و خاک بر بازتاب SWIR و نمایه‌های آبی مرتبط مشخص شود. نتایج این مطالعه نشان داد که بازتاب هر کدام از باندهای SWIR سنجنده مودیس به تغییرات مقدار آب برگ و رطوبت خاک پاسخ متفاوتی دارند (Wang, 2007). بر اساس علائم طیفی پوشش گیاهی و خاک، نمایه خشکسالی نرمال شده چند باندهی پیشنهاد شد که از ۳ باند، یکی در محدوده NIR با مرکزیت طول موج ۸۶۰ nm و دو تا در محدوده SWIR بترتیب با مرکزیت طول موج ۱۶۴۰ nm و ۲۱۳۰ nm استفاده کنند.

$$NMDI = \frac{R_{860nm} - (R_{1640nm} - R_{2130nm})}{R_{860nm} + (R_{1640} - R_{2130nm})} = \frac{B5 - (B6 - B7)}{B5 + (B6 - B7)} \quad (7)$$

نمادهای R₈₆₀، R₁₆₄₀ و R₂₁₃₀ بترتیب بازتاب‌های ثبت شده توسط سنجنده مودیس، در باندهای با مرکزیت طول موج ۸۶۰، ۱۶۴۰ و ۲۱۳۰ nm می‌باشد. نمایه NMDI از باند با مرکزیت طول موج ۸۶۰ nm استفاده می‌کند که به تغییرات مقدار آب برگ غیر حساس می‌باشد و بجای استفاده از یک باند جذب آب مایع به تنهایی، این نمایه از اختلاف بین دو باند جذب آب مایع (۱۶۴۰ nm و ۲۱۳۰ nm) بعنوان باند حساس به آب پوشش گیاهی و رطوبت خاک استفاده می‌کند. اختلاف معنی‌داری که بین دو باند جذب آب در پاسخ به مقدار آب برگ و رطوبت خاک وجود دارد

¹ MNDWI: Modified Normalized Difference Water Index

تقسیم (انشعاب) برای تولید یک درخت تصمیم استفاده می‌شود.

معیارهای دقت برازش و انتخاب مدل

به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها در پیش‌بینی عملکرد گندم، یک سری نمایه‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر مقایسه چشمی، برای ارزیابی بهترین برازش بین دبی محاسبه شده و دبی پیش‌بینی شده، نمایه‌های ارزیابی زیر به کار گرفته می‌شود. این اندازه‌گیری‌های آماری، یک ارزیابی کمی از میزان برازش مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده ارائه داده و نمایانگر درجه انطباق مشاهدات و پیش‌بینی می‌باشد. بر مبنای نتایج حاصل از این آزمون‌ها، قابلیت پیش‌بینی مدل تعیین می‌گردد. در زیر به برخی از نمایه‌های ارزیابی اشاره می‌گردد.

Table 1- Model evaluation criteria

جدول ۱- معیارهای ارزیابی مدل

Evaluation criteria	Defenation	Equation
R ²	Coefficient of determination	$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$
SE	Standard error	$SE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{1/2}$
MAE	Mean absolute error	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i $

ضریب همبستگی r معیاری است که قدرت رابطه خطی بین متغیر مستقل x و متغیر وابسته y را نمایش می‌دهد. مقدار این معیار بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده این است که رابطه خطی به شکل مناسبی می‌تواند رابطه بین متغیر وابسته و مستقل را نمایش بدهد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) یک معیار دقت برازش مقایسه ای است که از نظر عددی دارای حداقل برابر با صفر است اما از سمت مقادیر بالاتر محدود شده نمی‌باشد. معیار میانگین قدر مطلق خطا یا MAE معیاری است که مانند RMSE از کران پایین به صفر محدود می‌شود اما از کران بالا محدود شده نیست. ویژگی مشخص این معیار آن است که انتظار خطا را به طور متوسط نشان می‌دهد و از این نظر برای پژوهشگران اهمیت زیادی دارد.

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 می‌باشد که شکل کلی آن به صورت معادله ۹ است.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m \quad (9)$$

مدل درخت تصمیم M5

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 مسأله کوچک‌تر و ساده‌تر تقسیم نموده و سپس جواب‌های به‌دست آمده 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. (Bhattacharya and Solomatine, 2006). درخت‌های 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 می‌باشد. از مدل‌های درخت تصمیم در حل بسیاری از مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده شده است. برای اولین بار (Quinlan, 1992) مدل درخت تصمیم موسوم به M5 را برای پیش‌بینی داده‌های پیوسته ارائه نمود. این مدل، بر خلاف مدل‌های درخت تصمیم معمول که کلاس یا رده‌های 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 (Witten and Frank, 2005). در مرحله ساختن درخت، از یک الگوریتم استنتاجی یا معیار

نتایج و بحث

منحنی بازتاب طیفی مزارع گندم با عملکردهای مختلف به منظور بررسی تغییرات بازتاب طیفی مزارع گندم با عملکردهای مختلف، پس از استخراج اطلاعات باندهای طیفی مزارع از تصاویر (تصحیح شده از لحاظ رادیومتریک) ماهواره لندست ۸، منحنی بازتاب طیفی آنها مطابق شکل ۲ ترسیم شد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات بازتاب طیفی در باند ۴ می‌باشد و پس از آن باندهای طیفی ۳، ۲، ۵، ۶ و ۷ دارای تغییرات قابل توجهی می‌باشند. نکته‌ای که در این شکل دیده می‌شود این است. که لزوماً با افزایش عملکرد، درصد بازتاب باند خاصی پیرو آن افزایش یا کاهش نمی‌یابد و این نشان دهنده پیچیدگی در رابطه بین تغییرات بازتاب

طیفی با تغییرات عملکرد است. برای نشان دادن این موضوع ماتریس همبستگی بین بازتاب باندهای طیفی و شاخص‌های مستخرج از آنها و عملکرد تشکیل شد (جدول ۲). نتایج ماتریس همبستگی نشان می‌دهد بین برخی از باندها همبستگی بالایی وجود دارد. بطور مثال بین باندهای ۵، ۶ و ۷ همبستگی تا ۹۸ درصد وجود دارد و پیرو آن بین شاخص‌های مستخرج از این باندهای طیفی نیز همبستگی بالایی دیده می‌شود بطوری که بین شاخص NMDI با نسبت طیفی B74، ۹۹ درصد همبستگی وجود دارد. اما همبستگی بین عملکرد با درصد بازتاب باندهای طیفی و شاخص‌های مستخرج از آنها کمتر از ۳۰ درصد می‌باشد.

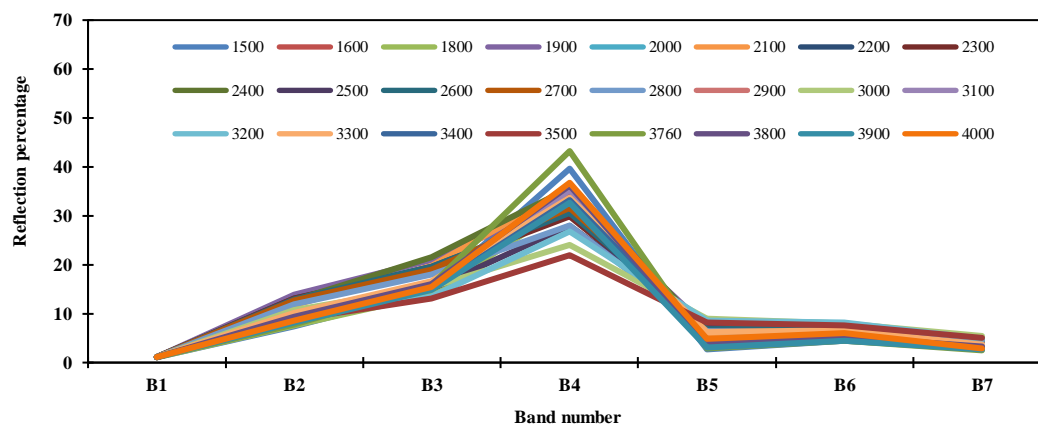


Figure 2- Spectral reflection curve of wheat with different yields (from 1500 to 4000 kg ha⁻¹)
شکل ۲- منحنی بازتاب طیفی گندم با عملکردهای مختلف (از ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلوگرم در هکتار)

Table 2- Correlation coefficients between wheat yield and Landsat satellite spectral reflectance
جدول ۲- ضرایب همبستگی بین عملکرد گندم و بازتاب‌های طیفی ماهواره لندست

	Yield	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Yield	1	0.13	-0.30	-0.26	0.10	-0.09	-0.06	-0.21
B1	0.13	1	0.38	0.61	0.65	-0.45	-0.43	-0.42
B2	-0.30	0.38	1	0.92	-0.03	0.26	0.22	0.42
B3	-0.26	0.61	0.92	1	0.34	-0.07	-0.08	0.08
B4	0.10	0.65	-0.03	0.34	1	-0.63	-0.53	-0.70
B5	-0.09	-0.45	0.26	-0.07	-0.63	1	0.98	0.94
B6	-0.06	-0.43	0.22	-0.08	-0.53	0.98	1	0.88
B7	-0.21	-0.42	0.42	0.08	-0.70	0.94	0.88	1

باندهای طیفی و شاخص‌ها و نسبت‌های طیفی مستخرج از آنها، وجود رابطه چند متغیره بین آنها بررسی شد. در ابتدای امر، با کمک رگرسیون چندمتغیره خطی، اقدام به تخمین عملکرد شد. نتایج این بررسی نشان داد که با کمک این روش در بهترین حالت با دخالت دادن ۶ متغیر

نتایج بررسی رابطه عملکرد با اطلاعات طیفی مستخرج از تصویر ماهواره لندست با روش رگرسیون چند متغیره خطی

پس از بررسی همبستگی متقابل بین متغیرها و عدم وجود رابطه بین عملکرد گندم با هر یک از درصد بازتاب

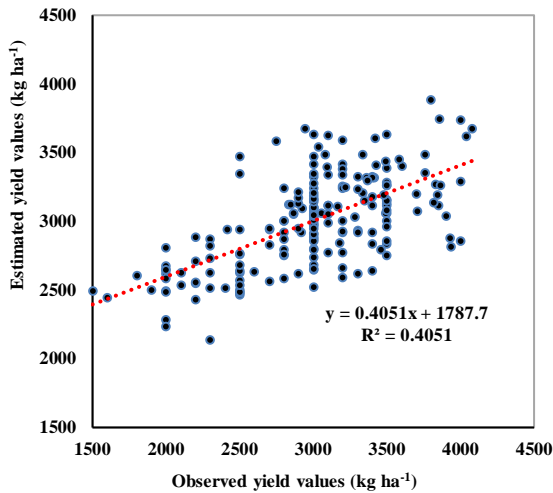


Figure 4- Observed and predicted values of yields using multivariate linear regression by involving all independent variables in the stepwise method

شکل ۴- مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد با استفاده از رگرسیون چند متغیره خطی با دخالت دادن کلیه متغیرهای مستقل در روش گام به گام

نتایج بررسی رابطه عملکرد با اطلاعات طیفی مستخرج از تصویر ماهواره لندست با روش رگرسیون درخت تصمیم M5

رگرسیون درخت تصمیم M5، می‌تواند با جداسازی داده‌ها به گروه‌های مجزا و ارایه 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 RapidMiner، مشابه روش رگرسیون گام به گام، تمامی حالات رگرسیون درختی یک تا چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت و بهترین زیرمجموعه از متغیرهای مستقل که بهترین تخمین از عملکرد را ارایه کردند، مشخص شد. 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. در رگرسیون درخت تصمیم M5 بکار گرفته شده در این پژوهش نیز، تعداد ۵ متغیر در حالت بهینه می‌باشد (شکل ۵) با اینکه افزایش متغیر تا ۱۰ متغیر باعث افزایش دقت مدل می‌شود ولی افزایش ۵ متغیر آخری باعث می‌شود تا خطای مدل از ۳۴۷ کیلوگرم در هکتار (۱۱/۵ درصد) به ۳۲۵/۵ کیلوگرم در هکتار (۱۰/۸ درصد) برسد که کمتر از یک درصد خطای مدل را کاهش می‌دهد.

مستقل با ضریب تبیین ۳۴/۴۲ درصد، عملکرد گندم را تخمین می‌زند. در صورتی که کلیه متغیرهای مستقل در رگرسیون چند متغیره شرکت داده شوند مقدار ضریب تبیین از ۳۴/۴۲ درصد به ۴۰/۵۱ درصد خواهد رسید (شکل ۴) و مقدار خطای تخمین از ۴۲۴ کیلوگرم در هکتار (۱۴/۱۲ درصد) به ۴۰۴ کیلوگرم در هکتار (۱۳/۴۶ درصد) کاهش می‌یابد. همچنین نتایج روش انتخاب بهترین زیرمجموعه مطابق جدول ۴ می‌باشد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که بازتاب طیفی یک باند و یا شاخص یا نسبت طیفی به تنهایی نمی‌تواند توصیف کننده تغییرات عملکرد باشد.

Table 3 - Coefficients and results of stepwise regression in estimating wheat yield using satellite image

جدول ۳- ضرایب و نتایج رگرسیون گام به گام در تخمین عملکرد گندم با کمک تصویر ماهواره‌ای

Var	Step					
	1	2	3	4	5	6
Bias	3422.7	4095	-1463	-2466	-791	-104
NMDI	-1069	-1774	-1876	-1228	-1508	-2116
NDVI		653	1022	1621	3042	3515
B1			5187	6733	6606	6606
B7				-151.5	-215.9	-112.1
B64					-969	-1194
B6						-78.5
R ² (%)	13.18	21.40	26.30	29.87	33.26	34.42

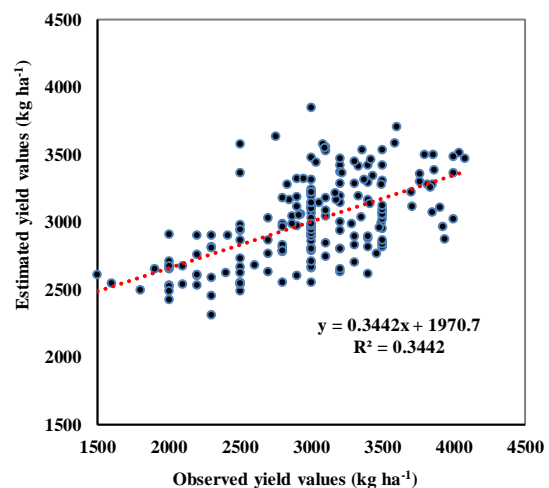


Figure 3- Observed and predicted values of wheat yield using multivariate linear regression model with the inclusion of 6 variables considered in the stepwise method

شکل ۳- مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد گندم با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره خطی با دخالت دادن ۶ متغیر در نظر گرفته شده در روش گام به گام

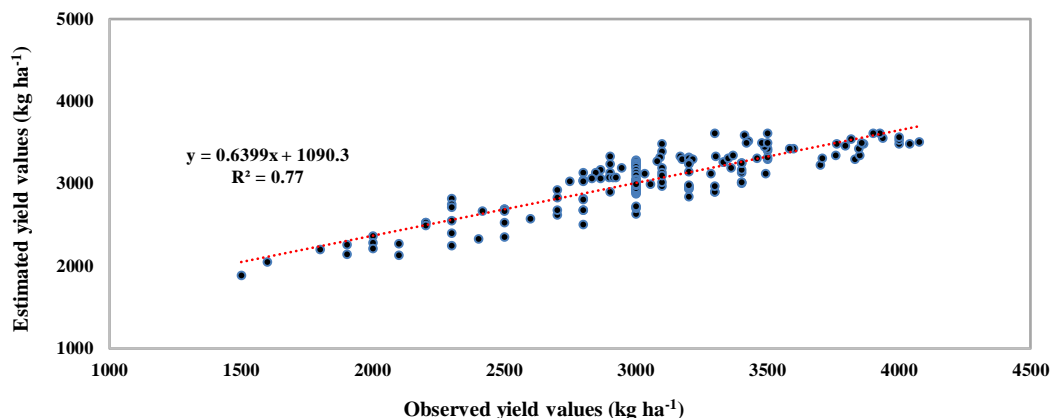


Figure 5 - Observed and predicted values of wheat yield (kg ha⁻¹) using M5 tree regression method with the inclusion of 5 variables

شکل ۵- مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده عملکرد گندم (کیلوگرم در هکتار) با استفاده از روش رگرسیون درختی M5 با دخالت دادن ۵ متغیر در نظر گرفته شده

Table 4- Results of selecting the best subset for estimating wheat yield using satellite images
جدول ۴- نتایج انتخاب بهترین زیرمجموعه برای تخمین عملکرد گندم با استفاده از تصویر ماهواره‌ای

Var num	R ²	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	NDVI	B54	B64	B74	NDII	NDWI	NMDI	B43	B42
1	13.2														X		
2	21.4								X						X		
3	26.3	X							X						X		
4	29.9	X						X	X						X		
5	36.5	X			X							X				X	X
6	37	X			X								X		X	X	X
7	37.7	X			X			X	X		X					X	X
8	38.8	X						X	X		X	X		X		X	X
9	39.6	X			X			X	X		X	X		X		X	X
10	40	X			X	X		X	X		X	X		X		X	X
11	40.3	X			X		X	X	X	X	X	X		X		X	X
12	40.3	X		X	X		X	X	X	X	X	X		X		X	X
13	40.4	X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
14	40.5	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
15	40.5	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
16	40.5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

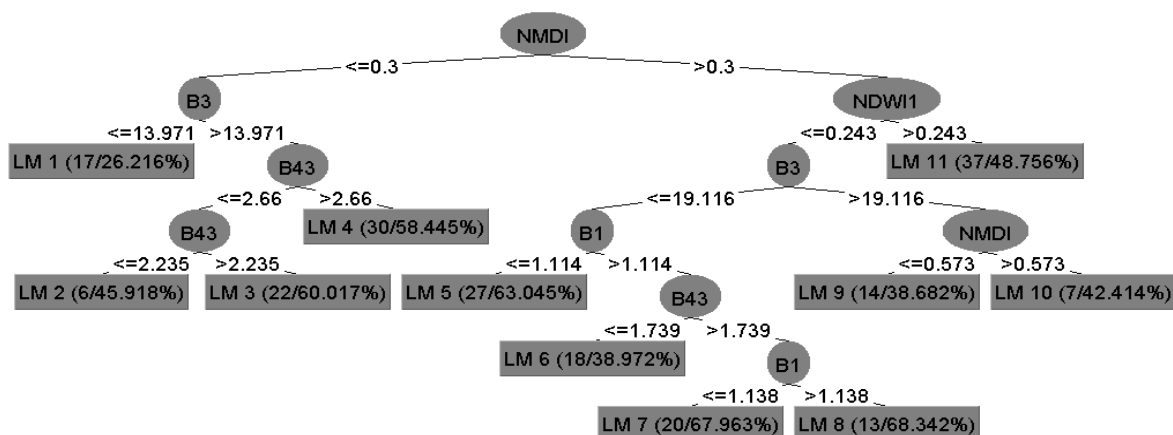


Figure 6- Tree diagram Predicting wheat yield by M5 tree regression method with 5 variables involved
شکل ۶- نمودار درختی پیش‌بینی عملکرد گندم با روش رگرسیون درختی M5 با دخالت دادن ۵ متغیر

مدیریت دراز مدت منابع آب ضروری است. مهم‌ترین نتایجی که از این پژوهش بدست آمد عبارتند از: (۱) تغییرات منحنی بازتاب طیفی مزارع گندم با عملکردهای مختلف نشان می‌دهد محدوده طیفی باندهای ۳ و ۴ ماهواره لندست ۸ از دامنه تغییرات بیشتری برخوردار است بنابراین دخالت دادن این باندها و ساخت نسبت‌های طیفی بر اساس آنها می‌تواند باعث افزایش دقت مدل برآورد عملکرد شود.

(۲) استفاده از شاخص‌ها و نسبت‌های طیفی نقش تعیین کننده‌ای را در دقت مدل برآورد عملکرد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دارد. و در این پژوهش شاخص‌های NDWI، NMDI و نسبت‌های طیفی B43 و B74 از اهمیت بالاتری برخوردار بودند.

(۳) با توجه به غیرخطی بودن رابطه بین عملکرد گندم با داده‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای، بکار بردن مدل درخت تصمیم M5، دقت نتایج را نسبت به مدل رگرسیون چند متغیره خطی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

(۴) در مدل رگرسیون درخت تصمیم M5، لزوماً افزایش تعداد متغیرها باعث افزایش دقت مدل نشد. لذا لازم است تا این مدل نیز مانند رگرسیون چند متغیره خطی بصورت گام به گام اجراء شود.

(۵) در مدل رگرسیون درخت تصمیم M5، ابتدا داده‌ها بر اساس شاخص طیفی NMDI به دو دسته تقسیم می‌شوند. با توجه به اینکه این شاخص از شاخص‌های تنش آبی می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که تنش آبی عامل مؤثری در توجیه تغییرات عملکرد گندم می‌باشد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی به شماره شناسه ۳۵۴-۹۵-۵۰ است که در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. نویسندگان از دانشگاه بابت حمایت مادی و معنوی در راستای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

Ahmad, M.U.D., Masih, I., Turrall, H. 2004. Diagnostic analysis of spatial and temporal variations in crop water productivity: A field scale analysis of the rice-wheat cropping system of Punjab. Journal of Applied

شکل ۷، درصد خطای تخمین عملکرد گندم را برای درصد نمونه‌های (مزارع) مختلف نشان می‌دهد، بطور مثال در این نمودار مشخص می‌شود که عملکرد گندم در ۹۰ درصد مزارع با خطایی کمتر از ۲۰ درصد تخمین زده می‌شود.

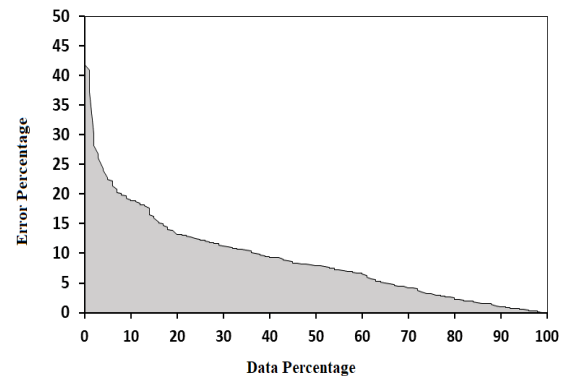


Figure 7- Percentage error of wheat yield estimation with satellite image by M5 decision tree regression method with the inclusion of 5 optimal variables based on the percentage of studied farms

شکل ۷- درصد خطای تخمین عملکرد گندم با تصویر ماهواره‌ای با روش رگرسیون درخت تصمیم M5 با دخالت دادن ۵ متغیر بهینه براساس درصد مزارع مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از یک مدل ترکیبی و با بکارگیری تصویر ماهواره‌ای لندست ۸، اقدام به تخمین عملکرد محصول گندم برای بخشی از اراضی استان گلستان در سال ۱۳۹۶ گردید. ارزیابی‌های انجام شده نشان داد که میزان عملکرد تخمین زده شده بر اساس داده‌های ماهواره‌ای همبستگی خوبی با عملکرد گزارش شده دارد و الگوریتم پیشنهادی که بر اساس مدل رگرسیون درخت تصمیم M5 می‌باشد قادر است عملکرد محصول گندم را در بخش کشاورزی با دقتی مناسب در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان قرار دهد. هم تحلیلگران و هم مدیران در شرایطی کار می‌کنند که به دست آوردن اطلاعات قابل اعتماد با اندازه‌گیری میدانی دشوار است و تکنیک‌هایی مانند ارائه این چنین گام‌هایی برای بهبود

Irrigation Science, 39(1), 43-63.

Amiri, E. 2018. Application of satellite imagery and remote sensing technology to estimate rice yield. Journal of Soil and Water Resources

- Conservation, 7(3),55-69.
- Anup, K. 2005. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, 8, 26-33.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J.L., Royo, C. 2000. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92(1), 83-91 .
- Asner, G.P. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability. *Remote Sensing of Environment*, 64(3), 173-180.
- Bach, H., Verhoef, W. 2003. July. Sensitivity studies on the effect of surface soil moisture on canopy reflectance using the radiative transfer model GeoSAIL. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 3: 1679-1681.
- Baret, F., Jacquemoud, S., Hanocq, J.F. 1993. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 7(1), 65-82 .
- Bausch, W.C., Halvorson, A.D., Cipra, J. 2008. Quickbird satellite and ground-based multispectral data correlations with agronomic parameters of irrigated maize grown in small plots. *Biosystems engineering*, 101(3), 306-315 .
- Becker-Reshef, I., Vermote, E., Lindeman, M., Justice, C. 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote sensing of environment*, 114(6), 1312-1323.
- Bhattacharya, B., Price, R.K., Solomatine, D.P., 2007. Machine learning approach to modeling sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4), 440-450 .
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Gregoire, J. M. 2001. Detecting Vegetation Leaf Water Content Using Reflectance in the Optical Domain. *Remote Sensing of Environment*, 77(1), 22-33.
- Dahikar, S. S., Rode, S. V. 2014. Agricultural crop yield prediction using artificial neural network approach. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 2(1), 683-686.
- Dasgupta, S. 2007. Remote sensing techniques For vegetation moisture and fire risk estimation. Ph.D. dissertation, George Mason University, Virginia, United States.
- Eyni, N.H., Deihimfard, R., Soufizadeh, S., Haghghat, M., Nouri, O. 2016. Predicting the impacts of climate change on irrigated wheat yield in Fars province using APSIM model. *Electronic Journal of Crop Production*, 8(4), 203-224.
- Fakhari, Z.S.E., Nazemosadat, M.J., Fallah, S.S., Kamgar, H.A., 2014. Possibility of estimating wheat canopy temperature by using remote sensing technique. *Scientific Journal of Agriculture*, 36(4), 101-111.
- Gao, B.C. 1996. NDWI - a Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.
- Ghorbani, Kh., Sohrabian, E., Salarijazi, M. 2016. Evaluation of Hydrological and Data Mining Models in Monthly River Discharge Simulation and Prediction (Case Study: Araz-Kouseh Watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(1), 203-217
- Ghorbani, Kh., Soltani, A. A., 2014. 'The effect of climate change on soybean yield in Gorgan', *Journal of Plant Production Research*, 21(2), 67-85.
- Hardisky, M.A., Klemas, V., Smart, R.M. 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77-83.
- Hayes, M.J., Decker, W.L. 1996. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *Remote Sensing*, 17(16), 3189-3200 .
- Hunt, R.E., Rock, B.N., Park, S.N. 1987. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22, 429-435.
- Kamali, G.A., Momenzadeh, H., Vazife, D.M. 2011. Study of wheat yield production over Esfahan province during periods of dry and wet years using MODIS satellite data. *AGROECOLOGY*, 3(2), 181-190.
- Li-Hong, X.U.E., Wei-Xing, C.A.O., Lin-Zhang, Y.A.N.G. 2007. Predicting grain yield and protein content in winter wheat at different N supply levels using canopy reflectance spectra. *Pedosphere*, 17(5), 646-653.

- Lobell, D. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Asner, G. P., Naylor, R. L., Falcon, W. P. 2005. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. *Agronomy Journal*, 97(1), 241-249.
- Lobell, D.B., Asner, G.P. 2002. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 722-727 .
- Martyniak, L., Dabrowska-Zielinska, K., Szymczyk, R., Gruszczynska, M. 2007. Validation of satellite-derived soil-vegetation indices for prognosis of spring cereals yield reduction under drought conditions—case study from central-western Poland. *Advances in Space Research*, 39(1),67-72 .
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G. 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651 .
- Mohammadi Ahmad Mahmoudi, E., Kamkar, B. and Abdi, O., 2015. Comparison of geostatistical-and remote sensing data-based methods in wheat yield predication in some of growing stages (A case study: Nemooneh filed, Golestan province). *Journal of Crop Production*, 8(2), 51-76.
- Mokhtari, S., Pirmoradian, N., Vazifehdost, M., Davatgar, N. 2013. 'Increasing accuracy of regional rice yield estimation by improvement of spatial resolution of leaf area index maps in VSM vegetative model', *Cereal Research*, 2(3), 209-221.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(980), 277-294 .
- Nuarsa, I.W., Nishio, F., Hongo, C. 2011. Rice yield estimation using Landsat ETM+ data and field observation. *Journal of Agricultural Science*, 4(3), 0-45.
- Panda, S. S., Ames, D. P., Panigrahi, S. 2010. Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*, 2(3), 673-696.
- Pinter, P., Jackson, R., Idso, S., Reginato, R. 1981. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in water stressed wheat and barley. *International Journal of Remote Sensing*. 2(1), 43-48.
- Quinlan, J.R. 1992. November. Learning with continuous classes. In 5th Australian joint conference on artificial intelligence, 92: 343-348 .
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1), 131-138 .
- Hamzeh, S. 2019. Modeling the sugarcane crop yield by using a composite model based on remote sensing data. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), pp.141-158.
- Sanaeinejad, H., NASSIRI, M.M., Zare, H., Salehnia, N., Ghaemi, M. 2014. Wheat yield estimation using Landsat images and field observation: A case study in Mashhad. *Journal of agricultural sciences and natural resources*, 20(4), 45-63.
- Serrano, L., Filella, I., Penuelas, J., 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop science*, 40(3), 723-731 .
- Sharifi, A. 2021. Yield prediction with machine learning algorithms and satellite images. *J Sci Food Agric*, 101: 891-896.
- Solaimani, K., Shokrian, F., Tamartash, R., Banihashemi, M. 2011. Landsat ETM+ based assessment of vegetation indices in highland environment. *Journal of Advances in Developmental Research*, 2(1), 5-13.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2),127-150 .
- Wang, L., 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), <https://doi.org/10.1029/2007GL031021> .
- Witten, I. H., Frank, E. 2005. Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. Morgan Kaufmann: San Francisco, p: 664.
- Zanter, K. 2015. Landsat8 (L8) data user's handbook. Department of the Interior U.S. Geological.
- Zarco-Tejada P.J., Ustin, S.L. 2001. Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites. *Proceedings, IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 342-344 .
- Zarco-Tejada, P.J., Rueda, C.A., Ustin, S.L. 2003.

- Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85: 109-124.
- Zheng, H., Chen, L., Han, X., Zhao, X., Ma, Y. 2009. Classification and regression tree (CART) for analysis of soybean yield variability among fields in Northeast China: The importance of phosphorus application rates under drought conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 132(1-2), 98-105.



Wheat yield estimation using satellite images in Golestan province

Kh. Ghorbani^{1*}, R. Teimourey², M. Salarijazi³

Received: 16/09/2020

Accepted: 05/02/2021

Abstract

Early prediction of wheat yield is major challenge in agricultural management and food security. This requires regional estimation of yield which is costly and time consuming. Remote sensing (RS) is a fundamental approach for achieving practical and effective solutions for this problem. The existing differences in the spectral reflectance characteristic of agiven phenomena such as crop canopies, can serve as an identifier attribute . Wheat farms can have different yields based on their various growth and management conditions. These variations can affect the spectral reflectance. In this research, the yields data for year 2017 of 200 wheat farms located in Gonbad-Kavus and Voshmgir Dam regions, Golestan province north of Iran have been studied. After correcting the Landsat 8 satellite images of month of May, spectral bands data were extracted, and 15 spectral indices were calculated. The relation between spectral indices and wheat yield were worked out using multivariate linear regression and M5 regression tree model. According to the nonlinear relation between wheat yield and spectral reflectance, multivariate linear regression did not perform well. The correlation coefficient was about 63%, and the mean error was about 425 kg ha⁻¹. The M5 regression tree model predicted wheat yield with an accuracy of 89 % and root mean square error (RMSE) lower than 325 kg ha⁻¹. This accuracy was obtained using bands 1, 3, and NMDI and NDWI indices and band 4 to band 3 ratios (B43). Inaccurate yield data the non-uniformity and small area of the farms are the main sources of error.

Keywords: Wheat, M5 regression tree, Remote sensing, Spectral reflectance, Yield prediction



¹ Associate Professor, Department of Water Engineering, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Recourses University

(*Corresponding Author: Email: ghorbani.khalil@yahoo.com)

² Ph. D. Student, Department of Water Engineering, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Recourses University

³ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Recourses University

نحوه ارجاع مقاله:

قربانی، خ، تیموری، ر. سالاری جزی، م. ۱۴۰۰. برآورد عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استان گلستان. نشریه هواشناسی کشاورزی،

DOI: 10.22125/agmj.2021.266547.1107. ۳۸-۵۲: (۱)۹

Ghorbani, Kh., Teimourey, R., Salarijazi, M. 2021. Wheat yield estimation using satellite images in Golestan province. Journal of Agricultural Meteorology, 9(1): 38-52. DOI: 10.22125/agmj.2021.266547.1107