



تخمین عملکرد گندم آبی (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی شهرستان شهرکرد)

مریم سلطانیان^{۱*}، مهدی نادری خوراسگانی^۲، علی تدین^۳

^۱دانشجوی دکتری زراعت دانشگاه شهرکرد، ^۲آدانشیار گروه خاکشناسی دانشگاه شهرکرد،

^۳آدانشیار گروه زراعت دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۹

چکیده

سابقه و هدف: پیش‌بینی و تخمین میزان عملکرد گندم، از وظایف تصمیم‌گیران اقتصادی به منظور ایجاد امنیت غذایی و تأمین نیازهای عمده جامعه می‌باشد. از طرف دیگر تولیدات کشاورزی همیشه با احتمال خطر در زمینه‌ی تغییرات آب و هوا و تغییرات بازارهای بین‌المللی همراه بوده است، هر چند که این احتمال خطر هرگز به طور کامل حذف نمی‌شود، اما می‌توان با تخمین میزان محصول قبل از فصل برداشت آن‌ها را به حداقل رساند. یکی از روش‌های تخمین محصول، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. داده‌های سنجش از دور، تخمین عملکرد گیاه را بر اساس شاخص‌های گیاهی امکان‌پذیر می‌سازد. تحقیق حاضر با هدف یافتن روشی سریع همراه با دقتی قابل قبول برای پیش‌بینی مقدار عملکرد در مزارع تحت کشت گندم در منطقه شهرکرد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ می‌باشد.

مواد و روش‌ها: به منظور بررسی امکان‌سنجی تخمین عملکرد مزارع گندم به وسیله تصاویر ماهواره لندست ۸، سه مزرعه زیر کشت گندم به ترتیب به وسعت ۲۰، ۱۳ و ۱۰ هکتار در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری، در نظر گرفته شد. تصاویر مربوط به سه تاریخ ۱۵ و ۳۱ خرداد و ۱۶ تیر و داده‌های زمینی شامل عملکرد مزارع، مرحله رشدی و موقعیت جغرافیایی آن‌ها در تاریخ‌های فوق بود. موقعیت جغرافیایی مناطق به وسیله دستگاه GPS ثبت شد. در مرحله نمونه‌برداری تعداد ۶۰ نمونه از مزارع ذکر شده برداشت شدند. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری عملکرد در داخل مربعات یا کوادرات‌های ۰/۲۵ مترمربعی انجام گرفت. هم‌زمان تعداد بوته در سطح ۰/۲۵ مترمربع شمارش و تراکم در مترمربع محاسبه شد. سپس شاخص‌های گیاهی به کمک باندهای ماهواره‌ای تشکیل و روابط همبستگی بین داده‌های عملکرد و نتایج شاخص‌ها محاسبه شد. توابع رگرسیونی مختلفی برای برآورد عملکرد از شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شد که بر اساس بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2) و کمترین مقدار خطای استاندارد، بهترین مدل مشخص شد. به منظور اعتبارسنجی مدل از واریانس کاهش یافته (RV) و میانگین خطای تخمین (MEE) استفاده شد. کلیه پردازش‌های تصویری در محیط نرم‌افزار ILWIS 3.3 و تجزیه و تحلیل‌ها و محاسبات آماری توسط نرم‌افزار SigmaPlot 10.0 انجام شد.

یافته‌ها: نتایج تحقیق حاضر نشان داد که از بین تصاویر، بالاترین همبستگی در تصویر ۳۱ خرداد (هم‌زمان با مرحله خمیری شدن دانه گندم) به دست آمد. شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، NRVI، OSAVI، RVI، SAVI، RDVI، DVI، EVI و GNDVI به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۳، ۰/۸۱، ۰/۸۰، ۰/۷۸ بیشترین همبستگی را با میزان عملکرد نشان دادند. در نهایت مناسب‌ترین رابطه برای این شاخص‌ها، معادله رگرسیون غیرخطی و مطلوب‌ترین مدل، مدل چند

*نویسنده مسئول: msoltanian91@gmail.com

جمله‌ای درجه دو بود. نتایج نشان داد که قبل از برداشت، این شاخص‌ها این قابلیت را دارند که عملکرد مزارع را بیش از ۸۰ درصد پیش‌بینی نمایند

نتیجه‌گیری: براساس مطالعه حاضر، بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی زمینی در مرحله خمیری گندم به تخمین عملکرد در مناطق نیمه خشک کمک می‌کند. مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تخمین عملکرد، NDVI، NRVI و OSAVI بودند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عملکرد، تصاویر ماهواره‌ای، سنجش از دور، شاخص‌های گیاهی، NDVI.

مقدمه

فناوری‌های سنجش از دور به علت استفاده از داده‌های مکانی در مقیاس وسیع، قابلیت تکرار در دوره‌های زمانی مشخص در طول دوره رشد گیاه از توانایی چشمگیری برای کسب اطلاعات زمینی پویا برخوردار است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان مطالعه گسترده پوشش گیاهی را فراهم می‌سازد (۱۵، ۱۶ و ۱۷). به منظور کاهش اثر عوامل ناخواسته روی اطلاعات پوشش گیاهی از شاخص‌های گیاهی^۱ مختلفی استفاده می‌کنند. در واقع این شاخص‌های گیاهی برای متمایز ساختن پوشش‌های گیاهی از سایر پدیده‌ها و کاهش تأثیر سایر پدیده‌های موجود در سطح زمین استفاده می‌گردد (۲).

یکی از کاربردهای مهم سنجش از دور در پژوهش‌های محیط زیست و کشاورزی، ارزیابی کمی تغییرات رشد، عملکرد و تولید پوشش‌های گیاهی است. برای همین هدف شاخص‌های گیاهی گسترش یافتند. شاخص‌های گیاهی به منظور ارزیابی کمی و کیفی غیرتخریبی پوشش‌های گیاهی با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیفی پیشنهاد و معرفی شده‌اند (۶ و ۱۲). این شاخص‌ها با ترکیب باندهای طیفی برای تخمین متغیرهای بیوفیزیکی گیاهی به کار می‌روند (۳۳). شاخص پوشش گیاهی در واقع شامل دو یا چند ارزش طیفی است که توسط عملیات ریاضی یک مقدار عددی بدون واحد را برای هر پیکسل^۲ بیان می‌-

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات راهبردی و اساسی کشورهای جهان و تأمین‌کننده کالری مورد نیاز افراد در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از جمله ایران به حساب می‌آید (۱۹). این گیاه با تأمین بیش از ۴۰ درصد کالری و ۵۰ درصد پروتئین مورد نیاز، در جیره غذایی جامعه ایرانی از اهمیت بسزایی برخوردار است (۱).

تخمین عملکرد گندم در برنامه‌ریزی کشاورزی و اقتصادی کشور از اهمیت بسزایی برخوردار است. این گیاه راهبردی دارای بیشترین سطح زیر کشت در ایران است، به طوری که حدود ۶۰-۷۰ درصد اراضی زیر کشت محصولات زراعی در کشور به گندم اختصاص دارد. امروزه روش‌های متعددی به منظور تخمین عملکرد گندم و سایر محصولات زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به روش‌های مرتبط با سنجش از دور اشاره کرد (۳۹). داده‌های سنجش از دور برای پیش‌بینی میزان عملکرد محصولات می‌توانند به دو روش به کار گرفته شوند. در روش اول تمرکز بر روی مدل‌های رشد گیاه است که این مدل‌ها نیازمند داده‌های زراعی و هواشناسی می‌باشند که معمولاً به راحتی قابل دسترس نبوده و در مقیاس‌های مکانی دلخواه موجود نمی‌باشند. در روش دوم تخمین عملکرد گیاه بر اساس شاخص‌های گیاهی امکان‌پذیر می‌گردد (۴۱).

1. Vegetation Index

2. Pixel

دوروم مناسب‌تر از شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده بود (۴). وضعیت مشابهی برای شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده سبزی‌نگی^۶ برای برآورد عملکرد دانه ذرت به‌دست آمد (۳۱).

شنایی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای با عنوان، تخمین عملکرد گندم آبی به وسیله تصاویر لندست در برخی از مزارع شهرستان مشهد، نشان دادند که بالاترین همبستگی شاخص‌ها با عملکرد در مرحله خمیری شدن دانه می‌باشد. همچنین بهترین همبستگی با عملکرد در این مطالعه به وسیله رگرسیون خطی چند متغیره حاصل شد (۲۹). ظهیرنیا و متین‌فر (۲۰۱۶) نشان دادند که با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ از حدود چهل روز قبل از برداشت، شاخص‌هایی مانند NDVI و GNDVI می‌توانند برای پیش‌بینی مقدار عملکرد گندم در منطقه جنوب غربی خوزستان مورد استفاده قرار گیرند (۳۹).

سیال و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل رگرسیونی بر اساس مقادیر NDVI و RVI به‌دست آمده از لندست ۷، یک رابطه مثبت با ضریب تبیین $R^2 = 0.94$ بین عملکرد برنج و NDVI و R^2 برابر 0.875 بین عملکرد برنج و RVI در اوج فصل رشد به‌دست آوردند (۳۲). نتایج بررسی ال-گادی و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که اختلاف بین مقادیر عملکرد پیش‌بینی شده و عملکرد واقعی (خطای پیش‌بینی) بین $7/9$ و $13/5$ درصد برای تصاویر لندست ۸ و بین $3/8$ و $10/2$ برای تصاویر Sentinel-2 می‌باشد. ارتباط بین مقادیر عملکرد واقعی و پیش‌بینی شده مقادیر R^2 بین 0.39 و 0.65 را برای لندست ۸ و بین 0.47 و 0.65 برای Sentinel-2 ایجاد کرد (۳).

محمدی احمد محمودی و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای با هدف مقایسه روش زمین‌آمار و استفاده از

می‌نماید تا بتوان آن را به آسانی و سرعت تفسیر نمود و نتیجه‌گیری کرد (۶ و ۹). این شاخص‌ها نسبت به کاربرد جداگانه هر طیف، اطلاعات دقیق‌تر و سودمندتری را ارائه می‌نماید (۵). ساده‌ترین شکل شاخص پوشش گیاهی نسبت انعکاس دو باند طیفی است. مهم‌ترین بخش از امواج طیف الکترومغناطیس^۱ مورد استفاده در کشاورزی طول موج‌های قرمز^۲ و مادون قرمز نزدیک^۳ هستند. در برگ و یا پوشش گیاهی سالم، کلروفیل و دیگر رنگدانه‌ها مقدار زیادی از طیف قرمز را جذب و سلول‌های مزوفیل داخلی طیف مادون قرمز نزدیک را به شدت بازتاب می‌نمایند (۳۴).

در زمینه استفاده از سنجش از دور در برآورد عملکرد مطالعات زیادی صورت گرفته است. در بسیاری از تحقیقات شواهدی از همبستگی بالا بین عملکرد ذرت و محصول سویا و شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده^۴ ارائه شده است (۳۹). همچنین نتایج تحقیقات نیز نشان می‌دهد که با محاسبه شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده در طول مرحله پر شدن دانه می‌توان به بهترین شکل عملکرد گیاهان خانواده غلات را تخمین زد (۳۹).

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده مدت‌هاست که به‌عنوان یک روش غیرمستقیم برای تعیین عملکرد محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (۲۴ و ۲۵). علاوه بر این، شاخص‌های متعدد دیگری نیز برای این منظور به کار می‌رود. برای مثال، شاخص نسبت پوشش گیاهی^۵ برای پیش‌بینی عملکرد گندم به کار برده شد (۴ و ۳۰). برخی محققین گزارش کردند که شاخص نسبت گیاهی در تخمین عملکرد گندم

1. Electromagnetic wavelength
2. Red
3. Near Infrared
4. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
5. RVI (Ratio Vegetation Index)

6. GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)

واقع شهرستان شهرکرد در محدوده عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه انجام شد (شکل ۱). بر اساس آمار سازمان جهاد کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری در سال زراعی ۹۴-۹۵ سطح زیر کشت گندم آبی در شهرستان شهرکرد ۴۹۳۹ هکتار بود. متوسط بارش سالانه منطقه ۳۱۹/۵ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه منطقه بر اساس ایستگاه سینوپتیک شهرکرد حدود ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع متوسط منطقه ۲۰۶۱ متر از سطح دریا می‌باشد. خاک غالب منطقه در گروه Typic Calcixerepts قرار دارد و سیمای اراضی منطقه دشت و دامنه می‌باشد (۲۳).

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ماهواره‌ای: جهت انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۸ قابل دسترس در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ استفاده گردید. در طول مراحل رشد گندم، هم‌زمان با عبور ماهواره به فاصله هر ۱۶ روز در تاریخ‌های ۲۹ فروردین، ۱۴ و ۳۰ اردیبهشت، ۱۵ و ۳۱ خرداد، و ۱۶ تیر سال ۱۳۹۵ تصاویر گذر ۱۶۴ و ردیف ۳۸ از سایت مربوطه^۱ اخذ گردید. تصاویر مربوط به سه تاریخ ۱۵ و ۳۱ خرداد و ۱۶ تیر مورد استفاده قرار گرفت. روش انتخاب تصاویر، تشکیل شاخص‌های ذکر شده در تاریخ‌های ۱۵ و ۳۱ خرداد و ۱۶ تیر و محاسبه همبستگی شاخص‌ها با عملکرد نهایی بود که بالاترین همبستگی در تاریخ ۳۱ خرداد بود.

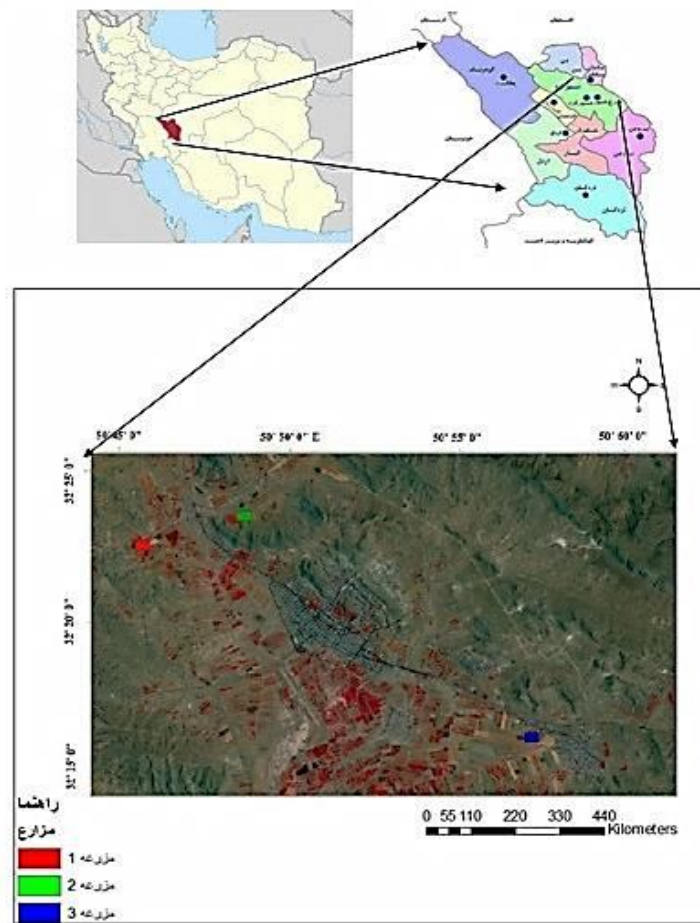
داده‌های سنجش از دور به منظور پیش‌بینی عملکرد گندم در برخی مزارع استان گلستان در برخی مراحل رشد گیاه انجام دادند. نتایج بررسی شاخص‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای ارتباط معنی‌دار در سطح آماری ۹۹ درصد بین متغیرهای گیاهی و شاخص‌های به دست آمده از تصاویر در اواخر مرحله پنجه‌زنی نشان داد. همچنین ارزیابی نقشه‌های عملکرد پیش‌بینی شده برتری قاطع روش سنجش از دور را نسبت به زمین‌آمار نشان داد. نتایج بیانگر قابلیت تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی عملکرد گندم در اواخر پنجه‌زنی با ۷۱۵ کیلوگرم در هکتار خطای برآورد است (۲۲).

امروزه اهمیت پیش‌بینی میزان عملکرد به‌منظور ایجاد امنیت غذایی بیش از پیش احساس می‌شود. کشور ما در یک منطقه خشک و نیمه خشک قرار گرفته و تغییرات آب و هوایی به شدت میزان تولیدات گیاهی گندم که به صورت دیم و آبی کشت می‌شود، را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نیل به این اهداف مستلزم استفاده وسیع از تصاویر ماهواره‌ای است که تاکنون از توجه کافی در کشور برخوردار نبوده است. بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی زمینی، تلفیقی مناسب برای ارزیابی عملکرد است، اما این‌که تا چه اندازه می‌توان به خروجی نتایج به دست آمده از این تصاویر اطمینان کرد، از مهم‌ترین اهداف این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این تحقیق در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری در مزارع زیر کشت گندم آبی رقم پیشگام

1. <http://earthexplorer.usgs.gov>



شکل ۱- تصویر ترکیب رنگی مجازی استاندارد موقعیت منطقه دشت شهرکرد و مزارع نمونه برداری در استان چهارمحال و بختیاری، ایران (منبع: نویسندگان مقاله)

Figure 1. Standard virtual color composite image of the geographical position of Shahrekord plain and sampling farms in Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran (Source: paper authors)

(جدول ۱). دوره زمانی برداشت تصاویر در این سنجنده ۱۶ روز می باشد.
 نمونه برداری و جمع آوری داده های میدانی: به کمک کارشناسان سازمان جهاد کشاورزی استان، در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ مناطق عمده کشت گندم آبی در شهرستان شهرکرد، استان چهار محال و بختیاری مشخص شد. برای اجتناب از آثار حاشیه ای مزارع و نداشتن پیکسل های مخلوط (Mixed pixels) با دیگر پوشش ها و تأثیر گذاری آنها به انعکاس واقعی اراضی از انتخاب مزارع کوچک خودداری شد و با گرفتن مجوز قطع و توزین بوته ها، از بین کشتزارهای گندم سه مزرعه با کشت وسیع گندم به ترتیب با

داده های لندست ۸ شامل ۱۱ باند می باشند که هر ۱۶ روز یکبار برداشت می شوند. 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 ۲) سنجنده TIRS^۵ که دارای ۲ باند در محدوده مادون قرمز حرارتی^۶ است

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

وسعت‌های ۲۰، ۱۳ و ۱۰ هکتار مربوط به شرکت‌های کشت و صنعت خصوصی برای نمونه‌برداری انتخاب گردید. موقعیت جغرافیایی مناطق به وسیله دستگاه GPS ثبت شد.

جدول ۱- خصوصیات باندهای طیفی سنجنده‌های لندست ۸ (Zanter, 2015).

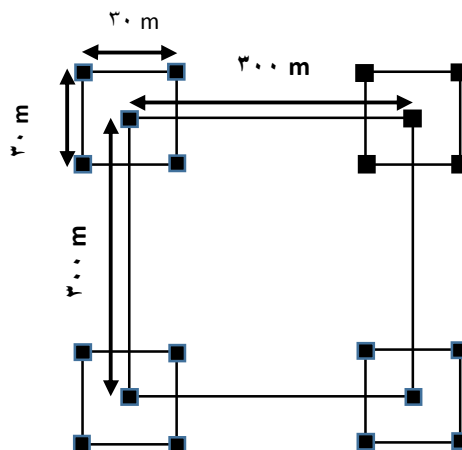
Table 1. Spectral bands properties of landsat 8 sensors (Zanter, 2015)

نام سنجنده Sensor name	باند طیفی Spectral bands	طول موج (میکرومتر) Wavelength (μm)	قدرت تفکیک (متر) Resolution (m)
تصویرساز عملیاتی زمین OLI (Operational land imager)	Coastal/Aerosol - ۱	0.433-0.453	30
	۲- آبی (Blue)	0.450-0.515	30
	۳- سبز (Green)	0.525-0.600	30
	۴- قرمز (Red)	0.630-0.680	30
	۵- مادون قرمز نزدیک (NIR)	0.845-0.885	30
	۶- مادون قرمز کوتاه (SWIR)	1.560-1.660	30
	۷- مادون قرمز کوتاه (SWIR)	2.100-2.300	30
	۸- پانکروماتیک (Pan)	0.500-0.680	15
	۹- سیروس (Cirrus)	1.360-1.390	30
سنجنده مادون قرمز حرارتی TIRS (Thermal infrared sensor)	۱۰- مادون قرمز حرارتی (Thermal infrared)	10.30-11.30	100
	۱۱- مادون قرمز حرارتی (Thermal infrared)	11.50-12.50	100

برآورد شاخص‌های پوشش گیاهی: به‌طور کلی شاخص‌های گیاهی حاصل روابط ریاضی بین باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک هستند که در ماهواره لندست ۸ به‌ترتیب در باندهای ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. روابط ریاضی لازم برای محاسبه شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. در این مطالعه تعداد ۹ شاخص گیاهی مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت که این شاخص‌ها شامل شاخص‌های گیاهی $^{1}NDVI$ ، $^{2}NRVI$ ، $^{3}OSAVI$ ، $^{4}RVVI$ ، $^{5}SAVI$ ، $^{6}RDVI$ ، ^{7}DVI ، ^{8}EVI و $^{9}GNDVI$ بودند و با کمک نرم افزار ILWIS محاسبه شدند.

در مرحله نمونه‌برداری تعداد ۶۰ نمونه از مزارع مختلف برداشت شد. به منظور نمونه‌برداری مطابق شکل ۲ در هر مزرعه یک مربع با طول ۳۰۰ متری در نظر گرفته شد و در هر گوشه این مربع، ۴ کوادرات 0.5×0.5 متر در چهارگوشه یک مربع ۳۰ متری و یک نمونه در مرکز آن مربع منظور گردید. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری عملکرد در داخل مربعات یا کوادرات‌های 0.25 مترمربعی انجام گرفت. هم‌زمان تعداد بوته در سطح 0.25 مترمربع شمارش و تراکم در مترمربع محاسبه شد. از هر کوادرات ۵ بوته برداشت شد. مقدار عملکرد ۵ بوته با جداسازی دانه‌های گندم از غلاف و توزین دانه‌ها به دست آمد. سپس میانگین عملکرد ۵ بوته محاسبه شد. عملکرد گندم در هر کوادرات از ضرب میانگین ۵ بوته در تعداد بوته‌های گندم در هر کوادرات به دست آمد (۲۲). برای هر نقطه مقادیر شاخص‌های گیاهی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای محاسبه شد.

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Normalized Ratio Vegetation Index
3. Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index
4. Ratio Vegetation Index
5. Soil Adjusted Vegetation Index
6. Renormalized Difference Vegetation Index
7. Difference Vegetation Index
8. Enhanced Vegetation Index
9. Green Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۲- روش نمونه برداری و استقرار کوادرات در هر مزرعه

Figure 2. The sampling methods and the establishment of plot in each field

جدول ۲- شاخص های پوشش گیاهی استفاده شده در این پژوهش و معادلات آنها

Table 2. Applied vegetation indices in the study and corresponding equations

شاخص Index	معادله Equation	منبع Reference
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(NIR-Red)/(NIR+Red)^*$	(28)
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$(NIR-Green)/(NIR+Green)$	(10)
Ratio Vegetation Index (RVI)	NIR/Red	(18)
Normalized Ratio Vegetation Index (NRVI)	$(RVI-1)/(RVI+1)$	(7)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$[(NIR-Red)/(NIR+Red+0.5)] \times 1.5$	(13)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$(NIR-Red)/(NIR+Red+0.16) \times 1.6$	(26)
Difference Vegetation Index (DVI)	$NIR-Red$	(35)
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	$(NIR^2-Red)/(NIR^2+Red)^{0.5}$	(27)
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$2.5 * ((NIR-Red)/(NIR+6*Red-7.5*Blue+1))$	(14)

*کلمات NIR, Red, Green و Blue به ترتیب به مفهوم باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز، سبز و آبی می باشند.

رگرسیون از طریق سعی و خطا با در نظر گرفتن مقدار ضریب تبیین (R^2) و تخمین خطای استاندارد (SEE) معرفی شدند.

برای بررسی دقت و انتخاب بهترین روش از تکنیک اعتبارسنجی حذفی استفاده شد، این تکنیک بر این اساس است که هر بار یک نقطه مشاهده ای به طور موقت حذف شده و برای آن از روی نقاط مجاور، مقداری برآورد می گردد. سپس مقدار حذف شده به جای خود برگردانده شده و برای بقیه نقاط شبکه

تجزیه و تحلیل های آماری

برای بررسی توانایی داده های ماهواره ای برای برآورد عملکرد، ابتدا ماتریس همبستگی بین داده های عملکرد و شاخص های گیاهی محاسبه شد. در مرحله بعد به کمک شاخص هایی که ضریب همبستگی معنی داری با عملکرد داشتند مدل های رگرسیونی برای برآورد عملکرد تشکیل شد. داده های عملکرد به منزله متغیر وابسته و شاخص های گیاهی به عنوان متغیر مستقل در مدل ها قرار گرفتند. مناسب ترین مدل

تصاویر برداشت شده در زمان پر شدن دانه به دست آمده است (۳۹).

برای بررسی امکان برآورد عملکرد به کمک شاخص‌های گیاهی، مقادیر ضرایب تبیین و خطای استاندارد تخمین معادلات رگرسیون مورد توجه قرار گرفتند. تلاش به عمل آمد تا با عملیات آماری و سعی و خطا مناسب‌ترین معادله برای تخمین عملکرد از طریق این شاخص‌ها حاصل شود.

جدول ۴ مناسب‌ترین مدل برای تخمین عملکرد و همچنین ضرایب تبیین را نشان می‌دهد. مناسب‌ترین مدل برای تخمین عملکرد با استفاده از شاخص‌های گیاهی مورد بررسی در این تحقیق مدل‌های رگرسیون غیرخطی می‌باشند. این معادلات رابطه مستقیمی را بین میزان عملکرد و شاخص‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد (جدول ۴). از بین شاخص‌ها در همین تاریخ، بالاترین همبستگی در شاخص NDVI، NRVI و RVI با ضرایب تبیین ۰/۸۶ و کمترین همبستگی در شاخص GNDVI با ضریب تبیین ۰/۷۸ مشاهده شد. در شکل ۳ نمودارهای برازش شده نشان داده شده است.

لوپرستی و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای با هدف بررسی رابطه میان NDVI و عملکرد گندم در استان بوئنوس آیرس کشور آرژانتین انجام دادند (۲۱). بررسی‌های آن‌ها، پیش‌بینی عملکرد گندم را ۳۰ روز قبل از برداشت امکان‌پذیر می‌سازد که با تحقیق حاضر مطابقت دارد. برخی محققین با استفاده از رادیومترهای طیفی زمین پایه، رابطه میان شاخص NDVI و عملکرد محصول را شناسایی کردند و نتیجه گرفتند که همبستگی بالایی میان NDVI و عملکرد نهایی دانه وجود دارد (۳۶ و ۳۸).

به صورت مجزا این برآورد صورت می‌گیرد (۳۷). با در دست داشتن این دو مقدار در نهایت با توجه به مقادیر مشاهده شده و برآورد شده، اعتبار سنجی مدل‌ها با محاسبه واریانس کاهش یافته^۱ و میانگین خطای تخمین^۲ از طریق معادله‌های ۱ و ۲ انجام شد (۳۷).

(معادله ۱)

$$RV = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma(x_i)} \right\}^2$$

(معادله ۲)

$MEE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z(x_i) - Z^*(x_i))$
در این معادلات $Z(x_i)$ و $Z^*(x_i)$ به ترتیب عبارتند از عملکرد اندازه‌گیری شده، عملکرد تخمینی و انحراف معیار عملکرد اندازه‌گیری شده.

کلیه پردازش‌های تصویری در محیط نرم‌افزار ILWIS 3.3 و تجزیه و تحلیل‌ها و محاسبات آماری توسط نرم‌افزار SigmaPlot 10.0 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که از بین تصاویر، بهترین همبستگی بین شاخص‌های گیاهی ناشی از تصاویر گرفته شده در تاریخ ۲۰ ژوئن ۲۰۱۶ (۳۱ خرداد ۱۳۹۵) و عملکرد بود (جدول ۳). در تاریخ فوق مزارع گندم تقریباً در مرحله خمیری شدن قرار داشتند. در تحقیقی برای تخمین عملکرد گندم آبی در مشهد به وسیله تصاویر ماهواره لندست سنجنده TM و ETM⁺ نیز نشان داده شد که بالاترین همبستگی شاخص‌ها با عملکرد در مرحله خمیری شدن دانه می‌باشد و بالاترین ضریب تبیین با عملکرد به وسیله رگرسیون خطی چند متغیره حاصل شد (۲۹). محققین متعددی نیز در بررسی‌های خود بیان نمودند که بالاترین همبستگی بین عملکرد و شاخص‌های

1. Reduced Variance (RV)
2. Mean Estimation Error (MEE)

جدول ۳- ضرایب تبیین شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه در تصاویر با عملکرد مزارع گندم

Table 3. The coefficients of determination of vegetation indices studied in the images with the wheat yield

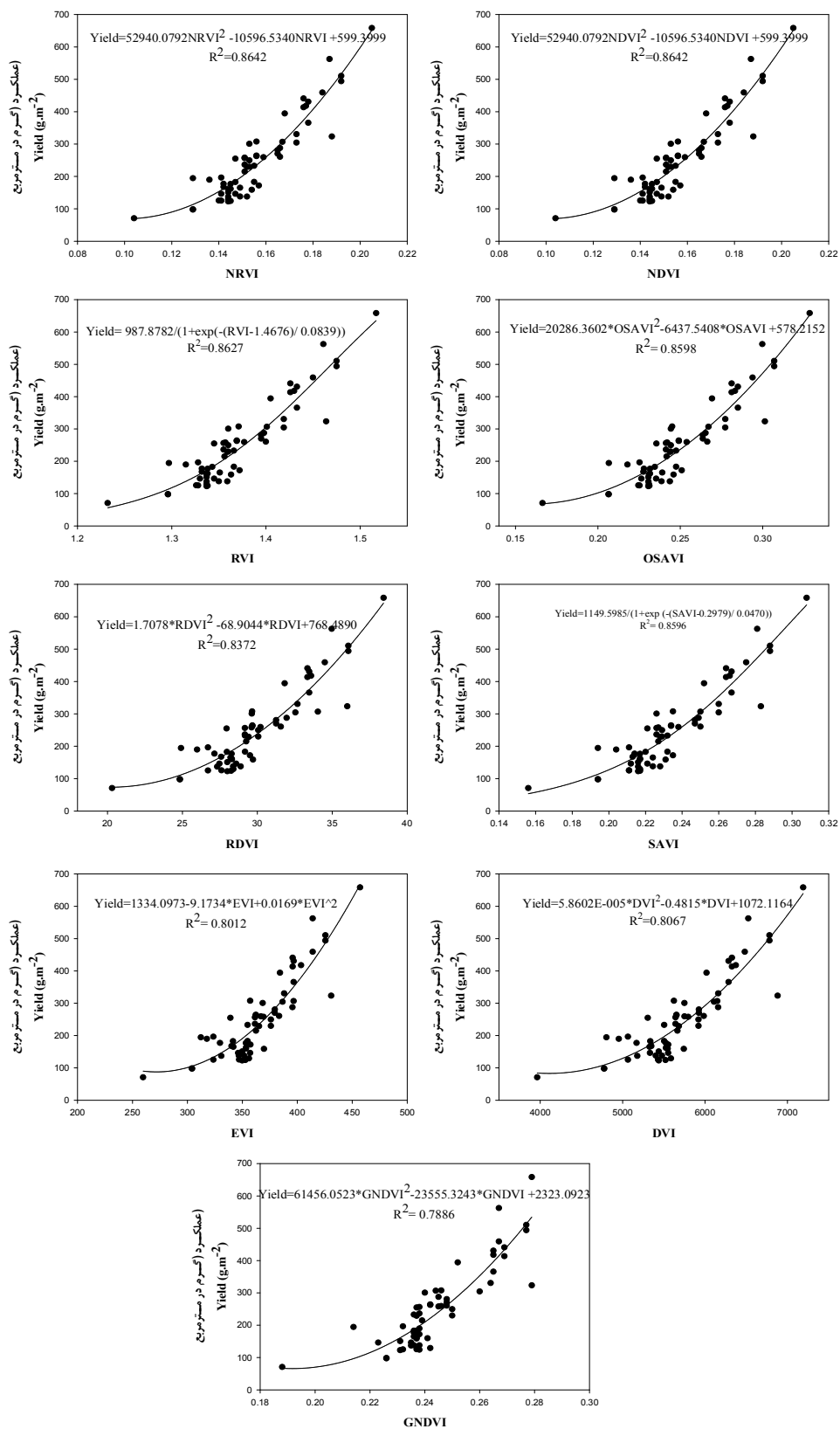
شاخص گیاهی Vegetation index	۱۵ خرداد 4 June	۳۱ خرداد 20 June	۱۶ تیر 6 July
NDVI	0.51	0.86	0.48
NRVI	0.52	0.86	0.48
OSAVI	0.52	0.86	0.43
RVI	0.53	0.86	0.48
SAVI	0.53	0.86	0.50
RDVI	0.37	0.86	0.42
DVI	0.36	0.81	0.40
EVI	0.38	0.80	0.41
GNDVI	0.47	0.78	0.50

هنگام نمودن یکی از شاخص‌های عملکرد ذرت، پژوهشی در یک مرکز تحقیقات کشاورزی نزدیک به منطقه فورت کولین آمریکا انجام شد. بررسی‌ها بین برآوردهای مبتنی بر تصاویر ماهواره لندست (۶ هفته قبل از برداشت) و برآوردهای میدانی (در برداشت) یک خطای نسبی ۲/۳ درصدی را نشان داد (۸). در مطالعه‌ای که برای تخمین عملکرد دو رقم گندم در منطقه نانجینگ چین انجام شد، محققین گزارش کردند که همبستگی مثبت و قابل توجهی بین ۴ شاخص پوشش گیاهی و عملکرد وجود داشته است، به طوری که قوی‌ترین رابطه بین شاخص گیاهی نسبت سبز (GRVI) در اواسط پر شدن دانه و عملکرد گندم مشاهده شد (۲۰).

در تحقیقی با استفاده از داده‌های به دست آمده از ماهواره لندست ۸ نیز نشان داده شد که شاخص‌هایی مانند GNDVI، NDVI، SAVI و EVI این قابلیت را دارند که عملکرد مزارع گندم را به ترتیب با تخمین ۸۶/۷۲، ۷۳/۸۶، ۷۳/۸۶ و ۶۳/۰۳ درصد پیش‌بینی نمایند (۳۹). در مطالعه زینوند و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های به دست آمده از ماهواره لندست ۸، در بین شاخص‌های مورد مطالعه، شاخص GNDVI دارای بالاترین همبستگی با عملکرد بوده و پس از آن به ترتیب شاخص‌های NDVI، SAVI و EVI بالاترین همبستگی را با عملکرد داشتند (۴۱). به‌منظور آزمون داده‌های سنجش از دور با مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی عملکرد برای دقت و به

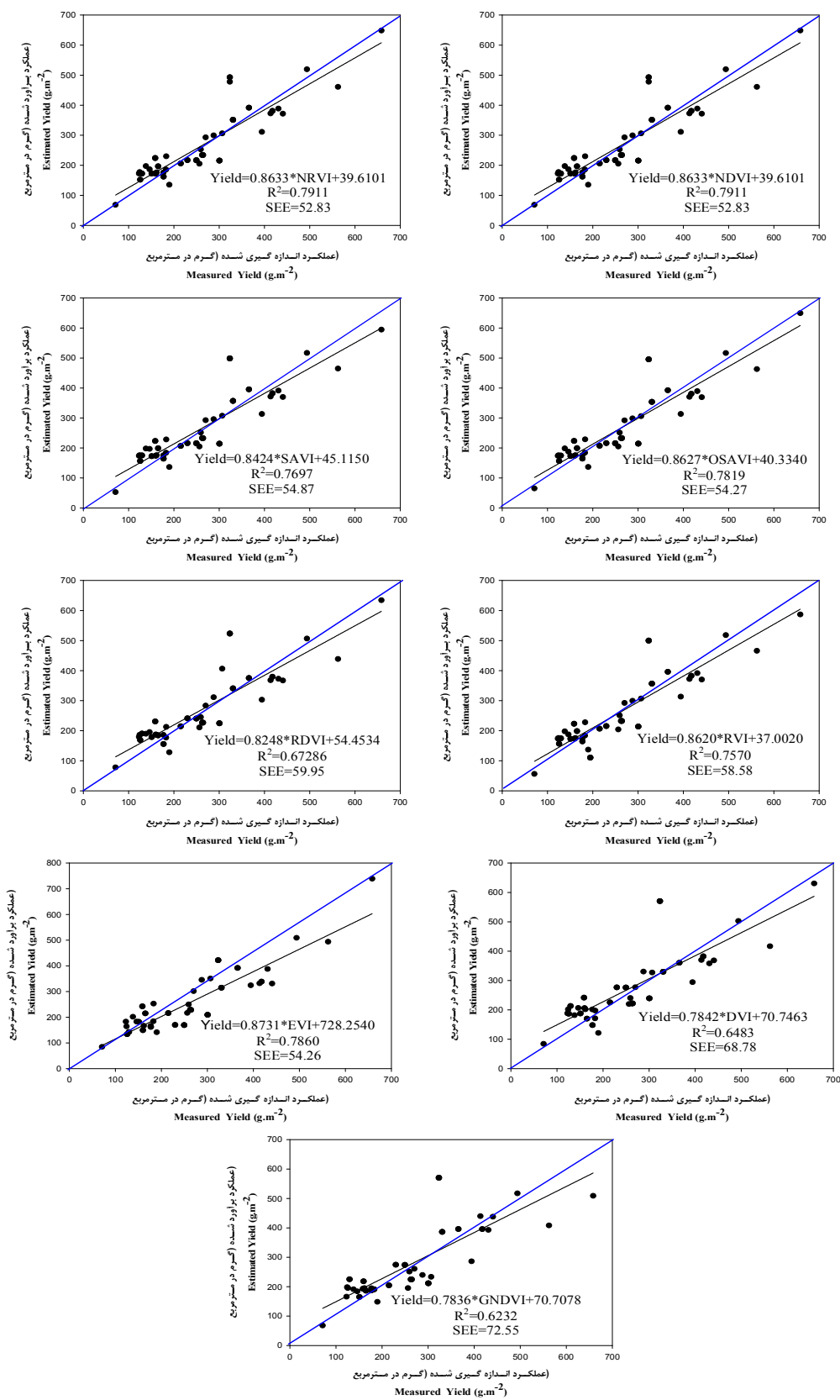
جدول ۴- ضرایب تبیین، تخمین خطای استاندارد، آماره F، واریانس تقلیل یافته و میانگین تخمین خطای مدل‌های رگرسیونی تخمین عملکرد بر اساس شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه.
 Table 4. The coefficients of determination, standard error of estimation, F value, reduced variance and Mean estimation error of regression models of yield estimation based upon different vegetation indices

شاخص گیاهی Vegetation Indices	مدل model	ضریب تبیین Coefficient of determination (R ²)	تخمین خطای استاندارد Standard error of estimation (SEE)	آماره F F value	واریانس تقلیل یافته Reduced variance (RV)	میانگین تخمین خطا Mean estimation Error (MEE)
NDVI	Yield = 52940.08 * NDVI ² - 10596.53 * NDVI + 599.4	0.86	46.87	181.41***	0.33	-3.31
NRVI	Yield = 52940.08 * NDVI ² - 10596.53 * NDVI + 599.4	0.86	46.87	181.41***	0.33	-3.31
OSAVI	Yield = 20286.36 * OSAVI ² - 6437.54 * OSAVI + 578.21	0.86	46.87	174.82***	0.33	-3.31
RVI	Yield = 987.87 / (1 + exp(-(RVI - 1.46) / 0.08))	0.86	47.13	179.14***	0.32	-0.41
SAVI	Yield = 1149.6 / (1 + exp(-(SAVI - 0.2979) / 0.047))	0.86	47.67	174.46***	0.33	-0.32
RDVI	Yield = 1.7078 * RDVI ² - 68.9044 * RDVI + 768.49	0.83	53.32	146.60***	0.29	1.01
DVI	Yield = 5.68 * E - 0.05 * DVI ² - 0.4815 * DVI + 1072.1164	0.81	55.93	118.91***	0.17	2.44
EVI	Yield = 0.17 * EVI ² - 9.1734 * EVI + 1334.1	0.80	56.72	114.85***	0.31	2.74
GNDVI	Yield = 61456.0523 * GNDVI ² - 23555.3243 * GNDVI + 2323.1	0.78	56.72	106.32***	0.25	-0.65



شکل ۳- رابطه عملکرد گندم با شاخص‌های مورد مطالعه

Figure 3. Relationships of wheat yield with different vegetation indices



شکل ۴- رابطه بین مقادیر عملکرد اندازه گیری شده و برآورد شده گندم
Figure 4. Relationships of measured and estimated wheat yield

بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی زمینی تلفیقی مناسب برای ارزیابی عملکرد 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. به علاوه محاسبه شاخص‌ها در زمان‌های مختلف رویش گندم، امکان بررسی پایش رشد گیاه را فراهم می‌کند و می‌توان صحت عملکرد شاخص‌ها را با توجه به مرحله رشد گیاه مورد بررسی قرار داد.

با بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از این پژوهش، در نهایت باید متذکر شد که تصاویر ماهواره لندست ۸ قادر به تولید داده‌های مطلوب با کارایی مناسب با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی می‌باشند. برآورد منطقه‌ای عملکرد محصول از جنبه‌های متفاوتی دارای اهمیت است. از آن جمله می‌توان به مدیریت اراضی کشاورزی، تعیین قیمت‌گذاری محصولات تولیدی، سیاست‌های تجاری و تولید نقشه‌های عملکرد اشاره کرد.

باید خاطر نشان کرد که ضمن این‌که شاخص NDVI که یکی از اساسی‌ترین شاخص‌ها در مبحث پوشش‌های گیاهی است سایر شاخص‌های مورد مطالعه در این پژوهش، یعنی OSAVI، NRVI، RVI، SAVI، RDVI، DVI، EVI و GNDVI با عملکرد همبستگی قابل قبولی داشتند. نتایج تحقیق حاضر تأیید می‌کند که روش برآورد عملکرد گندم بر اساس شاخص‌های پوشش گیاهی روشی علمی و کاربردی است که جهت برآورد عملکرد پیش از برداشت قابل استفاده است.

شکل ۴ نمودار بین مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد گندم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مقادیر برآورد شده و مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد از پراکنش خوبی در اطراف خط یک به یک برخوردارند.

مقایسه عملکرد برآورد شده و عملکرد اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که ارتباط قوی و معنی‌داری بین شاخص‌ها و عملکرد گندم وجود دارد و بنابراین این مدل از توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه برخوردار است. در بررسی ال-گادی و همکاران (۲۰۱۶) ارتباط بین مقادیر عملکرد واقعی و پیش‌بینی شده با مقادیر R^2 بین ۰/۳۹ تا ۰/۶۵ برای ماهواره لندست ۸ و بین ۰/۴۷ تا ۰/۶۵ برای Sentinel-2 به دست آمد (۳).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به این‌که کشاورزی یکی از پایه‌های اقتصادی کشور محسوب می‌شود، لذا برآورد مقدار تولید محصولات زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کسب آگاهی و دانش در رابطه با کیفیت و کمیت پوشش گیاهی نقش مهمی در مدیریت صحیح و علمی مزارع ایفا می‌کند. به منظور بررسی و پایش عملکرد در مقیاس جهانی و ناحیه‌ای دسترسی به هنگام به داده‌های میدانی یا صحرایی معمولاً دشوار، محدود، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. همچنین برآورد کیفیت و کمیت پوشش گیاهی به روش معمول اطلاعات چندان دقیقی را به دست نمی‌دهد. استفاده از داده‌های سنجنش از دور در بررسی خصوصیات طیفی پوشش گیاهی مناطق می‌تواند به صرف هزینه و زمان کمتر و دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر منجر گردد.

منابع

- Ahmadi, J., Khatibi, M., Amirshakari, H., and Amini Dehagi, M. 2011. Evaluation of the effective morpho-physiological indices on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) using multivariate statistical methods. *Agron. J.*, 4: 55-66. (In Persian).
- Alavipanah, K. 2006. Thermal remote sensing and its application in earth sciences. Tehran University Press, 524p. (In Persian).
- Al-Gaadi, K.A., Hassaballa, A.A., Tola, E., Kayad, A.G., Madugundu, R., Ablewi, B., and Assiri, F. 2016. Prediction of potato crop yield using precision agriculture techniques. *PLoS One.*, 11(9): 1-16.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J.L., and Royo, C. 2000. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agro. J.*, 92(1): 83-91.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E., and Hatfield, J. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.*, 76: 300-306.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., and Huete, A. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sens. Reviews.* 13: 95-120.
- Baret, F., and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, 35: 161-173.
- Bausch, W.C., Halvorson, A.D., and Cipra, J. 2008. Quick bird satellite and ground-based multispectral data correlations with agronomic parameters of irrigated maize grown in small plots. *Biosyst Eng. IOI.* 306-315.
- Campbell, J.B. 2011. Introduction to Remote Sensing. Guilford Press. 667p.
- Gitelson, A.A. 1996. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *J. Plant Physiol.*, 161: 165-173.
- Goel, N.S., and Qin, W. 1994. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: a computer simulation. *Remote Sens. Reviews.* 10: 309-347.
- Hoffmann, C., and Blomberg, M. 2004. Estimation of leaf area index of *Beta vulgaris* L. based on optical remote sensing data. *J. Agro. Crop Sci.*, 190: 197-204.
- Huete, A.R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25: 295-309.
- Huete, A.R., Liu, H., Batchily, K., and Leeuwen, W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 59(3): 440-451.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., and Zhang, X. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.*, 101: 366-378.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K., and Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.*, 112: 3833-3845.
- Jimen'ez-Mu'noz, J.C., Sobrino, J.A., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J., and Martinez, P. 2009. Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and mixture analysis: case study of PROBA/CHRIS data over an Agricultural area. *Sensors.* 9: 768-793.
- Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on forest floor. *Ecol. J.*, 50: 663-666.
- Kamali, G.A., Momenzadeh, H., and Vazifeh Doust, M. 2011. Study of wheat yield production over Esfahan province during periods of dry and wet years using MODIS satellite data. *J. Agro.*, 2: 181-190. (In Persian).
- Li-Hong, X., Wei-Xing, C., and Lin-Zhang, L. 2007. Predicting grain yield and protein content in winter wheat at different supply levels using canopy reflectance spectra. Published by Elsevier Limited Science Press. 17(5): 646-653.
- Lopresti, M.F., Di Bella, C.M., and Degioanni, A.J. 2015. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat

- yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. *Inform. Process. Agri.*, 2: 73-84.
22. Mohammadi Ahmad Mahmoudi, E., Kamkar, B., and Abdi, O. 2015. Comparison land- statistic methods and the use of remote sensing data to predict wheat yield in some stage of growth (Case study: field lands of Golestan province). *J. Crop Prod.*, 8(2): 51-76. (In Persian).
 23. Mosleh Ghahfarokhi, Z. 2016. Soil digital mapping, land suitability and optimization cultivation model for major products plains of Shahrekord. PhD thesis pedology, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran. (In Persian)
 24. Pinter, P., Jackson, R., Idso, S., and Reginato, R. 1981. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in water stressed wheat and barley. *Int. J. Remote Sens.*, 2(1): 43-48.
 25. Raun, W.R., Solie, J.B., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., and Schepers, J.S. 2001. In season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.*, 93: 131-138.
 26. Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. 1996. Optimization of soil- adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 55: 98-107.
 27. Roujean, J.L., and Breon, F.M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 51: 375-384.
 28. Rouse, J.W. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFS Type III, Final Report, Greenbelt, MD.
 29. Sanaeinejad, H., Nassiri Mahallati, M., Zare, H., Salehnia, N., and Ghaemi, M. 2014. Wheat yield estimation using landsat images and field observation: A case study in Mashhad. *J. Plant Prod.*, 20(4): 45-63. (In Persian).
 30. Serrano, L., Filella, I., and Penuelas, J. 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Sci.*, 40(3): 723-731.
 31. Shanahan, J.F., Schepers, J.S., Francis, D.D., Varvel, G.E., Wilhelm, W.W., Tringe, J.M., Schlemmer, M.R., and Major, D.J. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron. J.*, 93: 583-589.
 32. Siyal, A.A., Dempewolf, J., and Becker-Reshef, I. 2015. Rice yield estimation using Landsat ETM+ Data. *J. Appl. Remote Sens.*, 9: 1-16.
 33. Solaimani, K., Shokriani, F., Tamartash, R., and Banihashemi, M. 2011. Landsat ETM+ based assessment of vegetation indices in highland environment. *J. Adv. Res. Dev.*, 2(1): 5-13.
 34. Tucker, C.J., Holben, B.N., Elgin, Jr, J. H., and McMurtrey, J.E. 1981. Remote sensing of total dry -matter accumulation in winter wheat. *Remote Sens. Environ.*, 11: 171-189.
 35. Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8: 127-150.
 36. Tucker, C.J., Holben, B.N., Elgin Jr, J.H., and McMurtrey III, J.E. 1980. Relationship of spectral data to grain yield variation. *Photogramm. Photogramm. Eng. Rem S.*, 46: 657-666.
 37. Webster, R. and Oliver, M.A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey.* Spatial Information Systems, Oxford University Press, Oxford.
 38. Wiegand, C.L., Richardson, A.J., Escobar, D.E. and Gerbermann, A.H. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sens. Environ.*, 35: 105-119.
 39. Zahirnia, A.R. and Matinfar, H.R. 2016. Evaluate the yield of irrigated wheat fields on the basis of data obtained from Landsat 8 in the southwestern province of Khuzestan. First National Conference on Remote Sensing and GIS in the earth sciences. Atmospheric and Oceanic Sciences Research Center-in. College of Agriculture, Shiraz University. (In Persian).
 40. Zanter, K. 2015. Landsat8 (L8) data users handbook. Department of the Interior U.S. Geological

41. Zeinvand, M., Matinfar, H.R. and Zahirnia, A.R. 2016. Alfalfa yield estimation based on data obtained from Landsat 8, in plain Jaydar Poldokhtar of Lorestan province. First National

Conference on Remote Sensing and GIS in the earth sciences. Atmospheric and Oceanic Science Research Center-in. College of Agriculture, Shiraz University. (In Persian).