اثر فشرده‌سازی تصاویر بر سنجش نیتروژن و ویژگی‌های زیست توده گندم با استفاده از یک دوربین دیجیتال

حامد توکلی[1]

[1]استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک؛ h-tavakoli@araku.ac.ir

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی اثر فشرده‌سازی تصاویر دیجیتال بر تخمین وضعیت نیتروژن و دیگر ویژگی‌های زیست توده‌ای محصول گندم بود. برای این منظور طرح‌های آزمایشی‌ای در فصل‌های زراعی ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ میلادی با تیمارهای مختلف کوددهی و آبیاری محصول پیاده‌سازی شد. در هر فصل زراعی سه مرتبه از محصول نمونه‌برداری شد. قبل از نمونه‌برداری‌ها، تصاویر دیجیتال در شرایط مزرعه‌ای با استفاده از یک دوربین دیجیتال از محصول گرفته شد و به فرمت خام ذخیره گردد. سپس تصاویر به دو فرمت مختلف JPEG و TIFF فشرده شد و مورد پردازش قرار گفت. شاخص‌های مختلفی از تصاویر استخراج شد و به کمک دو روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون جنگل تصادفی، برای تخمین محتوای نیتروژن، زیست توده تر و خشک و محتوای آب محصول بکار برده شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین نتایج فرمت JPEG و TIFF وجود نداشت. هر دو الگوریتم پیش‌بینی کننده بکار رفته نتایج قابل توجهی را ارائه دادند. اما نتایج روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی بهتر بود. با استفاده از این روش، ضریب تبیین برای تخمین محتوای نیتروژن، زیست توده تر، زیست توده خشک و محتوای آب به ترتیب در محدوده ۰/۷۷-۰/۷۹، ۰/۹۲-۰/۹۷، ۰/۸۹-۰/۹۵ و ۰/۵۵-۰/۹۵ بدست آمد. استفاده از دوربین دیجیتال بعنوان یک ابزار ارزان قیمت و غیرمخرب به همراه الگوریتم تخمین کننده مناسب، پتانسیل بسیار بالایی برای تخمین ویژگی‌های زیست توده‌ای محصولات دارد.

کلمات کلیدی: پردازش تصویر، نیتروژن، رگرسیون حداقل مربعات جزئی، جنگل تصادفی

Effect of image files compression on sensing of Nitrogen and crop biomass parameters of wheat using a digital camera

Hamed Tavakoli[1]

[1]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Arak University;
E-mail: tavakoli@araku.ac.ir

ABSTRACT

The objective of this research was to assess effect of digital image files compression on estimation of Nitrogen status and other biomass properties of wheat. For this purpose, field experiments were conducted during growing seasons of 2013 and 2014, with different N fertilization and water supply treatments. At each growing season, biomass sampling was done three times. Before the samplings, digital images of the crop were taken by a digital camera in field condition and saved in raw format. Then the images were compressed into two different formats, JPEG and TIFF, and were processed. Different features were extracted from the images and were used to estimate N content, fresh and dry biomasses, and water content of the crop, using the two algorithms, Partial Least Square Regression and Random Forest Regression. The results showed that there are no significant differences between estimations of JPEG and TIFF images. Both the predictive algorithms presented remarkable results. However the performance of the Partial Least Square Regression was better. Using this algorithm, coefficient of determination for estimation of N content, fresh and dry biomasses, and water content was in the range of 0.77−0.79, 0.92−0.97, 0.89−0.95 and 0.55−0.95, respectively. Using a digital

[1] نویسنده مسئول: حامد توکلی؛ آدرس: اراک-خیابان شهید بهشتی-دانشگاه اراک-گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم. شماره تماس: ۰۸۶۳۲۶۲۳۸۰۰

camera as an inexpensive and non-destructive tool in combination with an appropriate predictive algorithm has a high potential to estimate crop biomass parameters.

Keywords: Image Processing, Nitrogen, Partial Least Square Regression, Random Forest

۱- مقدمه

نیتروژن یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار در رشد گیاه، عملکرد و کیفیت محصول است. نیاز محصولات به نیتروژن در نقاط مختلف مزرعه به دلیل تفاوت در شرایط خاک، متغیر است. عدم تطابق بین نیتروژن داده شده به محصول و نیاز آن، می‌تواند باعث مختل شدن رشد گیاه، آسیب رسیدن به محیط زیست و زیان‌های اقتصادی گردد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در حوزه کشاورزی دقیق برای مدیریت موضعی اعمال کود نیتروژن در مزرعه با کمک اطلاعات جمع‌آوری شده از وضعیت و نیاز نیتروژن محصول صورت گرفته است. ویژگی‌های زیست توده‌ای محصولات نیز می‌توانند شاخصی برای وضعیت نیتروژن باشند.

روش مستقیم و دقیق تعیین نیتروژن محصول، نمونه‌برداری به صورت دستی و اندازه‌گیری محتوای نیتروژن نمونه‌ها با تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی می‌باشد؛ که بخصوص برای مزارع بزرگ، بسیار زمان‌بر، هزینه‌بر و پر زحمت است.

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای توسعه و بکارگیری روش‌های سنجش غیر مخرب، مقاوم، کم هزینه و ترجیحاً زمان واقعی[1] برای تعیین وضعیت نیتروژن محصولات، در کشاورزی دقیق انجام شده است. از آن جمله می‌توان حسگرهای طیفی-نوری مانند Yara N-Sensor (Tremblay et al., 2009)، حسگر مکانیکی Crop-Meter (Ehlert and Dammer, 2006) و حسگرهای فاصله‌سنج لیزری (Gebbers et al., 2011) را نام برد.

دوربین‌های دیجیتال نیز به دلیل قیمت مناسب و دقت قابل قبول، برای این منظور مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات موفقیت آمیزی برای بکارگیری دوربین‌های دیجیتال به منظور تعیین وضعیت نیتروژن محصولاتی نظیر جو (Pagola et al., 2009)، برنج (Lee and Lee, 2013, Wang et al., 2013)، گندم (Li et al., 2010; Baresel et al. 2017) و ذرت (Rorie et al., 2011)، صورت گرفته است.

روش استفاده از دوربین‌های دیجیتال، شامل تهیه تصاویر دیجیتال، پردازش آنها، استخراج شاخص‌هایی از تصاویر، و در نهایت استفاده از الگوریتم‌ها و روش‌های آماری برای تخمین ویژگی‌های محصول (نظیر محتوای نیتروژن) به کمک این شاخص‌ها می‌باشد. فرمت خام (دارای اطلاعات کامل) تصاویر تهیه شده توسط دوربین‌های دیجیتال دارای حجم بالایی است و در نتیجه پردازش آنها زمان‌بر می‌باشد و نیاز به پردازنده‌های قوی‌تری نیز وجود دارد. بنابراین با فشرده‌سازی تصاویر، فرمت‌های کم حجم‌تری نظیر JPEG یا TIFF تهیه شده و برای پردازش استفاده می‌شود. در فرمت JPEG فشرده‌سازی با از دست رفتن قسمتی از اطلاعات[2] تصویر صورت می‌گیرد ولی در فرمت TIFF فشرده‌سازی بدون از دست رفتن اطلاعات[3] تصویر انجام می‌شود. هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر این دو نوع فشرده‌سازی تصاویر در سنجش وضعیت نیتروژن و ویژگی‌های زیست توده نظیر زیست توده تر، زیست توده خشک و محتوای آب محصول گندم می‌باشد.

از روش‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی[4] (PLSR) (Breiman, 2001) و رگرسیون جنگل تصادفی[5] (RF) (Wold et al., 1983) برای تخمین ویژگی‌های محصول به کمک شاخص‌های استخراج شده از پردازش تصویر استفاده شد.

[1] Real-time
[2] lossy compression
[3] lossless compression
[4] Partial Least Square Regression (PLSR)
[5] Random Forest

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طرح آزمایشی

در طول فصل‌های زراعی ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، در مزرعه تحقیقاتی مارکوات[1] متعلق به اداره گونه‌های گیاهی دولت آلمان[2] واقع در شهر پتسدام[3] آلمان، دو طرح آزمایشی روی محصول گندم پیاده شد. در هر دو طرح تیمارهایی با نرخ‌های مختلف کود نیتروژن و آبیاری به محصول اعمال شد. میانگین بارش سالانه در این مزرعه در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ به ترتیب ۴۸۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و میانگین دما ۸/۱۲ و ۸/۸۰ درجه سانتیگراد بود. خاک مزرعه تحقیقاتی از نوع شنی کامبیسول[4] که در آخرین عصر یخبندان (حدود ۱۰۰۰۰ سال پیش) شکل گرفته است، بود. در هر دو طرح آزمایشی گندم زمستانه (رقم کوبوس[5]) با نرخ ۳۸۰ دانه بر متر مربع با فاصله ردیف ۱۴ سانتی‌متر کاشته شد.

۲-۱-۱- طرح آزمایشی اول

طرح آزمایشی بلوک‌های خرد شده تصادفی با شش بلوک تصادفی طراحی شد. تیمارهایی شامل سه نرخ کوددهی نیتروژن (۰، ۶۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار) و دو رژیم آبیاری (آبیاری و عدم آبیاری) به محصول اعمال شد. در مجموع مزرعه آزمایشی شامل ۳۶ پلات با ابعاد ۴/۵ در ۹ متر بود. هر کدام از ۳۶ پلات نیز شامل ۱۸ زیرپلات[6] (بعنوان شبه تکرار) به ابعاد ۱/۲۵ در ۱/۵ متر بودند. گندم زمستانه در تاریخ ۱۰ اکتبر ۲۰۱۲ کاشته شد. کوددهی نیتروژن در چهار تاریخ مختلف (۱۸۱، ۱۹۷، ۲۱۸ و ۲۴۶ روز پس از کاشت) انجام شد. در طول فصل زراعی، پلات‌های بخشی که باید آبیاری می‌شد، ۲۰ میلی‌متر آب از طریق یک سیستم آبیاری آبفشان متحرک در دو تاریخ (۱۹۷ و ۲۰۸ روز پس از کاشت) دریافت کردند. نمونه‌برداری از زیست توده محصول در سه مرتبه در مراحل مختلف رشد گیاه (BBCH 32, 41 and 57) (۱۹۸، ۲۱۷ و ۲۳۸ روز پس از کاشت) صورت گرفت. در هر مرتبه نمونه‌برداری، ۲/۲۵ مترمربع از هر کدام از ۳۶ پلات بطور دستی، با استفاده از یک قیچی چیده شد. محصول در روز ۲۸۷ بعد از کاشت برداشت شد.

۲-۱-۲- طرح آزمایشی دوم

طرح آزمایشی‌ای مشابه طرح سال ۲۰۱۳، در سال ۲۰۱۴ روی محصول گندم زمستانه پیاده‌سازی شد. تنها تفاوت این طرح با طرح سال قبل، این بود که هر کدام از ۳۶ پلات به ۱۲ زیرپلات تقسیم شدند. محصول در تاریخ ۱۹ اکتبر ۲۰۱۳ کاشته شد. کوددهی نیتروژن به چهار قسمت تقسیم شد و هر قسمت در یک تاریخ (۱۴۶، ۱۷۹، ۲۰۱ و ۲۲۰ روز پس از کاشت) انجام گرفت. پلات‌های بخش آبیاری، در کل ۳۰ میلی‌متر آبیاری در سه تاریخ مختلف (۱۶۰، ۱۸۷ و ۲۰۰ روز پس از کاشت) دریافت کردند. در طول فصل زراعی سه مرتبه نمونه‌برداری از زیست توده محصول در مراحل مختلف رشد گیاه (BBCH 30, 32 and 43) و تاریخ‌های مختلف (۱۸۰، ۱۹۱ و ۲۰۷) انجام شد. در مرتبه اول، نمونه‌برداری از ۲/۲۵ مترمربع و در مرتبه‌های بعدی از ۱/۲۵ مترمربع صورت گرفت. محصول در روز ۲۷۳ بعد از کاشت برداشت شد.

۲-۲- جمع‌آوری داده‌ها و پردازش اولیه

۲-۲-۱- نمونه‌برداری از محصول

زیست توده تر و خشک، محتوای آب و نیتروژن هر کدام از نمونه‌های زیست توده اندازه‌گیری شد. بعد از نمونه‌برداری، زیست توده تازه در درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد، بلافاصله وزن شد و سپس در داخل آون در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. زیست توده تر (FB[7]) و خشک (DB) بر حسب گرم بر مترمربع و محتوای آب نمونه‌های زیست توده نیز بصورت نسبت وزن آب (اختلاف وزن زیست توده تر و خشک) بر وزن زیست توده تر، بر حسب درصد محاسبه شد. نمونه‌های محصول خرد شد و محتوای نیتروژن (بر حسب درصد ماده خشک) با

[1] Marquardt
[2] German Plant Variety Office
[3] Potsdam
[4] Sandy cambisol
[5] Cubus
[6] Subplot
[7] Fresh Biomass

استفاده از روش استاندارد کجدال[1] در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد.

۲-۲-۲- تهیه تصاویر دیجیتال و آنالیز آنها

تصاویر دیجیتال از محصول در شرایط مزرعه‌ای با استفاده از دوربین دیجیتال کانن[2] مدل EOS 550D که دارای تفکیک‌پذیری ۱۸ مگا پیکسل می‌باشد، گرفته شد. تصاویر در حالت عکسبرداری Program AE دوربین گرفته شد. دوربین در حالت تنظیم اتوماتیک سرعت شاتر[3] و ایزو[4] قرار داده شد. اما فوکوس[5] به صورت دستی انجام شد. لنز[6] مورد استفاده از نوع Sigma 28mm F1.8 EX DG ASP Macro بود که فاصله کانونی آن ۲۸ میلی‌متر و اندازه دیافراگم آن F1.8 می‌باشد. تصاویر با فرمت خام CR2 ذخیره شد و سپس با استفاده از نرم افزار DPP[7] شرکت کانن به فرمت‌های JPEG و TIFF تبدیل شد. تصاویر JPEG دارای حجم حدود ۵ مگابایت و تصاویر TIFF دارای حجم حدود ۱۵ مگابایت بودند.

تصاویر از ارتفاع ۱/۸ متر و به صورت عمودی رو به پایین با کمک یک کنترل از راه دور[8] گرفته شد. با این نحوه قرارگیری دوربین، سطحی مستطیلی از زمین به ابعاد ۱×۱/۵ متر عکسبرداری می‌شود. عکس‌ها برای هر زیر پلات قبل از هر نمونه‌برداری گرفته شد. یک چیدمان[9] با استفاده از پروفیل‌های کشویی آلومینیومی[10] برای نصب دوربین و نگه داشتن آن در ارتفاع ثابت و یکسان برای همه زیر پلات‌ها و همه تاریخ‌های اندازه‌گیری تهیه شد.

تصاویر تهیه شده در محیط نرم افزار متلب (Version 9.1, R2016b, Mathworks Company, USA) مورد پردازش قرار گرفت و ویژگی‌هایی از تصاویر استخراج شد. دوربین دیجیتال تصاویر در محدوده مرئی طیف نور با استفاده از کانال‌های قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B) ذخیره می‌کند که هر کانال دارای ۸ بیت (۲۵۶ سطح شدت نور) است. در فرآیند پردازش تصاویر، ابتدا گیاه از پس‌زمینه (بقایای گیاهی و خاک) جدا شد. برای جداسازی از اختلاف باندهای قرمز و سبز هر تصویر استفاده شد. مقدار آستانه[11] بر اساس روش اتسو[12] (Otsu, 1979) محاسبه شد. ویژگی‌های مختلفی از بخش جدا شده تصاویر که فقط شامل گیاه بودند، استخراج شد که ۲۳ ویژگی برای این تحقیق انتخاب شد. پوشش محصول[13] (CC) بعنوان نسبت تعداد پیکسل‌های محصول به کل پیکسل‌های تصویر محاسبه شد. و شاخص‌های دیگری که بر اساس باندهای قرمز و سبز و آبی محاسبه شدند و در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

[1] Kjeldahl
[2] Canon
[3] Shutter speed
[4] ISO
[5] Focus
[6] Lens
[7] Digital Photo Professional
[8] Remote control
[9] Setup
[10] T-slotted aluminum profile
[11] Threshold
[12] Otsu
[13] Crop Coverage

جدول۱- لیست ویژگی‌ها و شاخص‌های استخراج شده از پردازش تصویر

Table 1. The list of features and indices extracted from the image processing

نام شاخص	رابطه/علامت	نام شاخص	رابطه
شدت قرمز نرمال شده	$NRI=\frac{R}{R+G+B}$	باقیمانده رابطه خطی قرمز و سبز	GR_res
شدت سبز نرمال شده	$NGI=\frac{G}{R+G+B}$	عرض از مبدأ رابطه خطی آبی و سبز	GB_int
شدت آبی نرمال شده	$NBI=\frac{B}{R+G+B}$	شیب رابطه خطی آبی و سبز	GB_slp
اختلاف قرمز و سبز نرمال شده	$NGMR=\frac{G-R}{G+R}$	باقیمانده رابطه خطی آبی و سبز	GB_res
اختلاف آبی و سبز نرمال شده	$NGMB=\frac{G-B}{G+B}$	عرض از مبدأ رابطه خطی آبی و قرمز	RB_int
اختلاف آبی و قرمز نرمال شده	$NRMB=\frac{R-B}{R+B}$	شیب رابطه خطی آبی و قرمز	RB_slp
نسبت سبز به قرمز	$GDR=\frac{G}{R}$	باقیمانده رابطه خطی آبی و قرمز	RB_res
نسبت سبز به آبی	$GDB=\frac{G}{B}$	اصل رنگ	$\text{Hue}=\begin{cases}\theta & if\ B\le G\\ 360-\theta & if\ B>G\end{cases}$ $\theta=cos^{-1}\left\{\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\}$
نسبت قرمز به آبی	$RDB=\frac{R}{B}$	اشباع	$\text{SAT}=1-\frac{3}{(R+G+B)}[min(R,G,B)]$
عرض از مبدأ رابطه خطی قرمز و سبز	GR_int	آنتروپی محلی (ویژگی بافت عکس)	ENT
شیب رابطه خطی قرمز و سبز	GR_slp	انحراف معیار محلی (ویژگی بافت عکس)	SD

این شاخص‌ها برای همه‌ی تصاویر JPEG و TIFF محاسبه شد.

۳-۲- آنالیز آماری داده‌ها

آنالیز واریانس (ANOVA) برای بررسی اثر تیمارهای طرح‌های آزمایشی دو فصل زراعی بر محصول (پارامترهای زیست توده محصول) برای داده‌های نمونه‌برداری زیست توده انجام شد. میانگین‌ها در سطح ۱ و ۵ درصد معنی‌داری با استفاده از آزمون توکی مقایسه شد.

از آنجائیکه این تحقیق شامل چندین متغیر پیشگو (ویژگی‌های مستخرج از تصاویر) بود، استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون جنگل تصادفی (RF) می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

رگرسیون PLSR در واقع ترکیبی از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA[۱])، آنالیز همبستگی بنیادی (CCA[۲]) و رگرسیون خطی چندگانه است. این الگوریتم، متغیرهای پیشگو را ادغام و چندین متغیر پنهان تولید می‌کند بطوریکه کوواریانس بین متغیرهای پنهان و متغیر وابسته ماکزیمم شود. تعداد بهینه متغیرهای پنهان با استفاده از روش اعتبارسنجی K-fold cross-validation، (K=10)، تعیین می‌شود؛ همچنین خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بایستی بیش از ۲ درصد با اضافه کردن متغیر پنهان اضافی به مدل کاهش یابد (Kooistra et al., 2004).

روش RF در واقع توسعه یافته‌ی روش درخت تصمیم است. RF شامل ترکیبی از تعدادی درخت (یعنی جنگل) است که در آن برای هر درخت، زیر مجموعه‌ای تصادفی از متغیرهای پیشگو (در رگرسیون جنگل تصادفی یک سوم کل متغیرهای پیشگو) استفاده می‌شود. بعلاوه، هر درخت با استفاده از بخشی از نمونه‌ها (حدود دو سوم کل نمونه‌ها) ساخته می‌شود. بقیه نمونه‌ها بعنوان مجموعه تست استفاده می‌شود که نمونه‌های خارج از کیسه (OOB[۳]) نامیده می‌شوند. هر درخت تصمیم تا رسیدن به تعداد گره از پیش تعریف شده‌ای (در مسائل رگرسیون مقدار استاندارد ۵ گره است)

---

۱ Principal Component Analysis
۲ Canonical Correlation Analysis
۳ Out-Of-Bag samples

توسعه می‌یابد. با استفاده از پیش‌بینی‌های داده‌های OOB هر درخت، میانگین مربعات خطا از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Liaw and Wiener, 2002):

$$MSE_{OOB}=n^{-1}\sum_{i=1}^{n}(Z_i-\hat{Z}_i^{OOB})^2 \quad (1)$$

که Z_i مقدار محاسبه شده متغیر وابسته و $\hat{Z}_i^{OOB}$ میانگین همه‌ی پیش‌بینی‌های OOB است. تخمینی که توسط نمونه‌های OOB صورت می‌گیرد تقریباً معادل آنچه توسط روش اعتبارسنجی K-fold cross-validation انجام می‌شود، می‌باشد (Hastie et al., 2013).

در این تحقیق تعداد ۲۵ تا ۱۰۰ درخت را استفاده شد و بهترین نتیجه انتخاب گردید. هر مدل نیز ۱۰ بار تکرار شد و میانگین مقادیر گزارش شد.

برای اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته توسط PLSR و RF به ترتیب از K-fold cross-validation، (K=10) و پیش‌بینی‌های OOB استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، تعدادی پارامتر آماری برای مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی (مشاهده شده یا اندازه‌گیری شده) متغیرهای وابسته، محاسبه شد. این پارامترها عبارتند از خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و انحراف پیشگوی باقیمانده (RPD) (نسبت انحراف معیار به RMSE). هر چه مقادیر RPD بالاتر باشد، قدرت تخمین مدل بالاتر است. مدل‌های با RPD کمتر از ۱/۴ برای پیش‌بینی مناسب نیستند، بین ۱/۴ تا ۲ دارای پتانسیل پیش‌بینی هستند و بالای ۲ دارای توانایی پیش‌بینی مناسب هستند (Chang et al., 2001).

آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم افزارهای SAS (version 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, N.C., USA) و متلب (Version 9.1, R2016b, Mathworks Company) انجام شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که در هر دو طرح آزمایشی، اثر کوددهی نیتروژن بر اندازه‌گیری‌های زیست توده محصول و عملکرد نهایی محصول قویاً معنی‌دار بود ($P<0/01$). در اکثر نمونه‌برداری‌ها، اثر رژیم آبیاری بر محتوای آب محصول معنی‌دار بود ($P<0/05$)، در حالی که این تیمار فقط در چند مورد اثر معنی‌داری بر سایر ویژگی‌های محصول داشت (بدلیل بزرگ بودن جداول مربوط به این تحقیق، از ارائه جدول آنالیز واریانس صرف نظر شد و تنها داده‌های ضروری ارائه می‌شود). این نتایج نشان دهنده موفقیت آمیز بودن پیاده‌سازی طرح‌های آزمایشی در هر دو فصل زراعی است.

جدول۲ خلاصه‌ای از عملکرد الگوریتم‌های بکار رفته برای تخمین ویژگی‌های زیست توده‌ای محصول گندم با استفاده از شاخص‌های مستخرج از تصاویر دیجیتال با دو فرمت JPEG و TIFF را نشان می‌دهد. در کل تفاوت معنی‌داری بین دو فرمت تصویر مورد استفاده در تخمین ویژگی‌های محصول در هر دو الگوریتم مشاهده نشد. ولی روش استفاده از دوربین دیجیتال به همراه الگوریتم‌های PLSR و RS پتانسیل بالایی را در سنجش وضعیت نیتروژن و دیگر ویژگی‌های محصول نشان داد.

نتایج نشان داد که روش بکار رفته کارایی بالایی در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری و در فصل‌های مختلف زراعی دارد.

در بین الگوریتم‌ها، روش PLSR نتایج بهتری را ارائه داد. با استفاده از این الگوریتم، برای کل داده‌ها، R^2 برای پیش‌بینی محتوای نیتروژن، زیست توده تر، زیست توده خشک و محتوای آب به ترتیب در محدوده ۰/۷۷-۰/۷۹، ۰/۹۲-۰/۹۷، ۰/۸۹-۰/۹۵ و ۰/۵۵-۰/۹۵ بدست آمد؛ در حالی که با استفاده از روش RF، R^2 برای پیش‌بینی ویژگی‌های ذکر شده به ترتیب از ۰/۶۲ تا ۰/۶۹، ۰/۷۴ تا ۰/۹۵، ۰/۷۴ تا ۰/۹۰ و ۰/۳۶ تا ۰/۹۳ متغیر بود (جدول۲).

[1]Residual Predictive Deviation

جدول۲- عملکرد مدل‌های پیشگو برای تصاویر JPEG و TIFF در دو فصل زراعی ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴

Table 2. The performance of the predictive models for JPEG and TIFF images in the two growing seasons of 2013 and 2014

فصل زراعی	۲۰۱۳				۲۰۱۴			
	نمونه‌برداری اول				نمونه‌برداری اول			
	n_{LV}/n_{tree}*	R^2	RMSE	RPD	n_{LV}/n_{tree}	R^2	RMSE	RPD
محتوای نیتروژن (*DB* ٪)								
PLSR (JPEG)	–	–	–	–	۳	۰/۷۹	۰/۱۹	۲/۲۰
PLSR (TIFF)	–	–	–	–	۳	۰/۷۸	۰/۱۹	۲/۱۷
RF (JPEG)	–	–	–	–	۶۸	۰/۶۲	۰/۲۵	۱/۶۵
RF (TIFF)	–	–	–	–	۴۷	۰/۶۲	۰/۲۵	۱/۶۵
زیست توده تر ($g\ m^{-2}$)								
PLSR (JPEG)	۳	۰/۹۶	۱۶/۲۸	۵/۵۷	۲	۰/۹۲	۳۷/۹۰	۳/۶۵
PLSR (TIFF)	۳	۰/۹۷	۱۵/۰۱	۶/۰۵	۲	۰/۹۲	۳۸/۰۶	۳/۶۳
RF (JPEG)	۵۰	۰/۷۵	۴۳/۷۴	۲/۰۸	۱۰۰	۰/۸۶	۵۱/۰۷	۲/۷۱
RF (TIFF)	۵۱	۰/۷۴	۴۴/۵۲	۲/۰۴	۶۱	۰/۸۵	۵۲/۱۶	۲/۶۵
زیست توده خشک ($g\ m^{-2}$)								
PLSR (JPEG)	۲	۰/۹۴	۳/۱۰	۴/۳۲	۳	۰/۸۹	۸/۹۸	۳/۰۳
PLSR (TIFF)	۲	۰/۹۵	۲/۹۷	۴/۵۱	۳	۰/۸۹	۹/۰۶	۳/۰۰
RF (JPEG)	۹۸	۰/۸۰	۵/۷۹	۲/۳۲	۸۲	۰/۷۷	۱۲/۹۶	۲/۱۰
RF (TIFF)	۷۸	۰/۷۹	۵/۹۵	۲/۲۵	۱۰۰	۰/۷۵	۱۳/۳۴	۲/۰۴
محتوای آب (*FB* $g\ g^{-1}$)								
PLSR (JPEG)	۱	۰/۹۵	۰/۳۶	۴/۷۵	۴	۰/۵۶	۱/۶۶	۱/۵۳
PLSR (TIFF)	۱	۰/۹۵	۰/۳۶	۴/۷۴	۴	۰/۵۵	۱/۶۸	۱/۵۱
RF (JPEG)	۹۶	۰/۷۴	۰/۸۶	۲/۰۲	۴۱	۰/۳۷	۱/۹۹	۱/۲۸
RF (TIFF)	۶۸	۰/۷۴	۰/۸۵	۲/۰۳	۹۵	۰/۳۶	۲/۰۰	۱/۲۷
	نمونه‌برداری دوم				نمونه‌برداری دوم			
محتوای نیتروژن (*DB* ٪)								
PLSR (JPEG)	–	–	–	–	۳	۰/۷۷	۰/۲۵	۲/۱۱
PLSR (TIFF)	–	–	–	–	۳	۰/۷۷	۰/۲۵	۲/۱۰
RF (JPEG)	–	–	–	–	۹۹	۰/۶۹	۰/۲۹	۱/۸۳
RF (TIFF)	–	–	–	–	۱۰۰	۰/۶۸	۰/۳۰	۱/۷۸
زیست توده تر ($g\ m^{-2}$)								
PLSR (JPEG)	۵	۰/۹۳	۱۲۹/۷۰	۳/۸۶	۲	۰/۹۴	۷۱/۴۷	۴/۱۷
PLSR (TIFF)	۵	۰/۹۳	۱۲۸/۴۴	۳/۹۰	۲	۰/۹۴	۷۱/۸۴	۴/۱۵
RF (JPEG)	۴۴	۰/۸۱	۲۱۲/۷۴	۲/۳۵	۹۱	۰/۹۰	۹۰/۹۰	۳/۲۸
RF (TIFF)	۳۷	۰/۸۱	۲۱۴/۳۰	۲/۳۴	۹۶	۰/۹۰	۹۰/۷۷	۳/۲۹
زیست توده خشک ($g\ m^{-2}$)								
PLSR (JPEG)	۵	۰/۹۲	۲۰/۷۶	۳/۵۲	۲	۰/۹۴	۱۵/۴۸	۴/۰۸
PLSR (TIFF)	۵	۰/۹۲	۲۰/۵۸	۳/۵۵	۲	۰/۹۴	۱۵/۵۰	۴/۰۷
RF (JPEG)	۴۱	۰/۷۴	۳۶/۳۱	۲/۰۱	۹۱	۰/۸۸	۲۱/۲۰	۲/۹۸
RF (TIFF)	۳۵	۰/۷۵	۳۵/۷۰	۲/۰۵	۹۰	۰/۸۸	۲۱/۱۷	۳/۰۰
محتوای آب (*FB* $g\ g^{-1}$)								
PLSR (JPEG)	۵	۰/۹۱	۰/۸۸	۳/۴۷	۳	۰/۷۹	۰/۹۰	۲/۲۰
PLSR (TIFF)	۵	۰/۹۱	۰/۸۹	۳/۴۶	۳	۰/۷۹	۰/۹۱	۲/۲۰
RF (JPEG)	۷۱	۰/۸۰	۱/۳۴	۲/۲۹	۵۸	۰/۷۲	۱/۰۳	۱/۹۳
RF (TIFF)	۵۴	۰/۸۰	۱/۳۴	۲/۳۰	۹۶	۰/۷۲	۱/۰۴	۱/۹۱

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

	نمونه‌برداری سوم				نمونه‌برداری سوم			
زیست توده تر ($g\ m^{-2}$)								
PLSR (JPEG)	۴	۰/۹۶	۲۴۹/۱۵	۵/۱۴	۴	۰/۹۶	۱۲۸/۰۳	۵/۰۶
PLSR (TIFF)	۴	۰/۹۶	۲۵۶/۶۵	۵/۰۰	۴	۰/۹۵	۱۳۸/۸۰	۴/۶۷
RF (JPEG)	۷۷	۰/۹۵	۲۸۷/۲۲	۴/۴۷	۷۹	۰/۸۷	۲۳۰/۲۸	۲/۸۲
RF (TIFF)	۷۰	۰/۹۵	۲۸۲/۹۱	۴/۵۴	۶۸	۰/۸۷	۲۲۶/۱۸	۲/۸۷
زیست توده خشک ($g\ m^{-2}$)								
PLSR (JPEG)	۲	۰/۹۳	۵۵/۹۰	۳/۷۷	۴	۰/۹۵	۳۴/۸۹	۴/۴۱
PLSR (TIFF)	۲	۰/۹۳	۵۵/۲۳	۳/۸۱	۴	۰/۹۴	۳۵/۹۷	۴/۲۸
RF (JPEG)	۸۱	۰/۸۹	۶۷/۶۸	۳/۱۱	۶۴	۰/۸۵	۵۸/۵۱	۲/۶۳
RF (TIFF)	۶۶	۰/۹۰	۶۶/۷۸	۳/۱۶	۹۷	۰/۸۶	۵۷/۳۱	۲/۶۹
محتوای آب ($g\ g^{-1}\ FB$)								
PLSR (JPEG)	۴	۰/۹۳	۰/۸۷	۳/۹۹	۴	۰/۷۴	۰/۸۸	۱/۹۹
PLSR (TIFF)	۴	۰/۹۲	۰/۹۵	۳/۶۴	۴	۰/۷۵	۰/۸۷	۲/۰۲
RF (JPEG)	۸۷	۰/۹۳	۰/۹۱	۳/۸۰	۹۳	۰/۵۹	۱/۱۱	۱/۵۸
RF (TIFF)	۶۸	۰/۹۳	۰/۹۳	۳/۷۵	۹۶	۰/۶۰	۱/۰۹	۱/۶۰

* n_{tree}: تعداد درخت‌ها در الگوریتم جنگل تصادفی؛ n_{LV}: تعداد متغیرهای پنهان در رگرسیون حداقل مربعات جزئی؛ R^2: ضریب تبیین، RMSE: خطای جذر میانگین مربعات؛ RPD: انحراف پیشگوی باقیمانده؛ PLSR: رگرسیون حداقل مربعات جزئی؛ RF: رگرسیون جنگل تصادفی

همچنین پارامتر آماری RPD برای اکثر پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط روش PLSR بالای ۲ بدست آمد که نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای این روش است (Chang et al., 2001).

محققان دیگر نیز قدرت روش PLSR برای ارزیابی وضعیت محصولات را اثبات کرده‌اند (Kusnierek and Korsaeth, 2015; Zeng et al., 2017; Thorp et al., 2017).

روش RF نتایج خوب و قابل توجهی را ارائه داد ولی در کل عملکرد آن ضعیف‌تر از روش PLSR بود. دلیل این امر می‌تواند به تعداد کم نمونه‌ها در داده‌های مورد استفاده ربط داده شود؛ چرا که تعداد کم نمونه‌ها منجر به تعداد کم داده‌های OOB شده و نتایج ضعیف‌تری بدست می‌آید. در تحقیقات گذشته نیز نشان داده شده است که با افزایش تعداد نمونه‌ها (اندازه مجموعه داده)، دقت روش RF نیز افزایش می‌یابد (Loosvelt et al. 2012).

نتایج بدست آمده در این تحقیق موافق با نتایج تحقیقات گذشته بود که روش استفاده از دوربین دیجیتال بعنوان یک ابزار ارزان قیمت برای تخمین وضعیت نیتروژن محصول را روشی کارآمد و مناسب معرفی کرده بودند (Liang-liang et al., 2009; Rorie et al., 2011; Li et al., 2010; Wang et al., 2013; Baresel et al. 2017).

در اکثر تحقیقات گذشته، از شاخص‌های تکی که از پردازش تصاویر بدست آمده بود برای تخمین ویژگی‌های محصولات استفاده شده بود (Lee and Lee, 2013; Wang et al., 2013; Baresel et al. 2017)؛ اما در این تحقیق از آنالیزهای چند متغیره استفاده شد و از چندین شاخص برای تخمین متغیرهای وابسته استفاده شد که نتایج بسیار خوبی هم بدست آمد. همچنین تفاوت دیگر این تحقیق با تحقیقات گذشته، بررسی اثر نوع فشرده‌سازی تصاویر بر سنجش ویژگی‌های محصول بود، که نتایج بدست آمده نشان داد، این امر تأثیر معنی‌داری ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از پردازش تصاویر دیجیتال با دو فرمت JPEG و TIFF برای تخمین ویژگی‌های زیست توده‌ای محصول گندم از قبیل محتوای نیتروژن، زیست توده تر و خشک و محتوای آب با کمک دو روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون جنگل تصادفی (RF) استفاده شد. برا اساس نتایج بدست آمده، نتیجه‌گیری‌های زیر را می‌توان داشت:

استفاده از دوربین دیجیتال بعنوان یک روش ساده، ارزان قیمت و غیر مخرب به همراه الگوریتم‌های پیش‌بینی کننده مناسب مانند PLSR و RF دارای پتانسیل بسیار بالایی برای تخمین وضعیت نیتروژن و دیگر ویژگی‌های محصول می‌باشد.

نوع فشرده‌سازی تصاویر (JPEG یا TIFF) تأثیر معنی‌داری در نتایج بدست آمده با استفاده از روش توصیف شده در این تحقیق نداشت.

با توجه به اینکه گوشی‌های هوشمند امروزی دارای قدرت پردازش نسبتاً خوب و دوربین مناسب هستند، این روش را می‌توان بر روی این ابزار

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

فراگیر نیز پیاده‌سازی کرد.

۵- تقدیر و تشکر

این تحقیق بخشی از پروژه‌ای است که از سال ۲۰۱۲ توسط اینجانب در موسسه تحقیقاتی Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy e.V. (ATB), کشور آلمان شروع شده است. بدینوسیله از کارشناسان و اعضای هیأت علمی این موسسه و بطور خاص آقای Dr. Robin Gebbers برای کمک در جمع‌آوری اطلاعات و حمایت مالی انجام این پروژه کمال تشکر را دارم.

۶- مراجع

Baresel, J. P., Rischbeck, P., Hu, Y., Kipp, S., Hu, Y., Barmeier, G., & Mistele, B. (2017). Use of a digital camera as alternative method for non-destructive detection of the leaf chlorophyll content and the nitrogen nutrition status in wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, *140*, 25–33.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5–32.

Chang, C., Laird, D. A., Mausbach, M. J., & Hurburgh, C. R. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, *65*, 480–490.

Ehlert, D., & Dammer, K-H. (2006). Wide-scale testing of the Crop-Meter for site-specific farming. *Precision Agriculture*, *7*(2), 101–115.

Gebbers, R., Ehlert, D., & Adamek, R. (2011). Rapid Mapping of the Leaf Area Index in Agricultural Crops. *Agronomy Journal*, *103*(5), 1532–1541.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2013). *The Elements of Statistical Learning*. Second Edition. Springer-Verlag New York.

Kooistra, L., Salas, E. A. L., Clevers, J. G. P. W., Wehrens, R., Leuven, R. S. E. W., Nienhuis, P. H., & Buydens, L. M. C. (2004). Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, *127*(2), 281–290.

Kusnierek, K., & Korsaeth, A. (2015). Simultaneous identification of spring wheat nitrogen and water status using visible and near infrared spectra and Powered Partial Least Squares Regression. *Computers and Electronics in Agriculture*, *117*, 200–213.

Lee, K. J., & Lee, B. W. (2013). Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis. *European Journal of Agronomy*, *48*, 57–65.

Li, Y., Chen, D., Walker, C. D., & Angus, J. F. (2010). Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research*, *118*(3), 221–227.

Liang-liang, J., Ming-sheng, F., Fu-suo, Z., Xin-ping, C., Shi-hua, L., & Yan-ming, S. (2009). Nitrogen status diagnosis of rice by using a digital camera. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, *29*(8), 2176–2179.

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by Random Forest. *R News*, *2*(3), 18–22.

Loosvelt, L., Peters, J., Skriver, H., Lievens, H., Van Coillie, F. M. B., De Baets, B., & Verhoest, N. E. C. (2012). Random forests as a tool for estimating uncertainty at pixel-level in SAR image classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *19*, 173–184.

Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Transactions* on *Systems*, *Man*, and *Cybernetics*, *9*, 62–66.

Pagola, M., Ortiz, R., Irigoyen, I., Bustince, H., Barrenechea, E., Aparicio-Tejo, P., Lamsfus, C., & Lasa, B. (2009). New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image color analysis: Comparison with SPAD-502. *Computers and Electronics in Agriculture*, *65*(2), 213–218.

Rorie, R. L., Purcell, L. C., Mozaffari, M., Karcher, D. E., King, C. A., Marsh, M. C., & Longer, D. E. (2011). Association of "Greenness" in Corn with Yield and Leaf Nitrogen Concentration. *Agronomy Journal*, *103*(2), 529–535.

Thorp, K. R., Wang, G., Bronson, K. F., Badaruddin, M., & Mon, J. (2017). Hyperspectral data mining to identify relevant canopy spectral features for estimating durum wheat growth, nitrogen status, and grain yield. *Computers and Electronics in Agriculture*, *136*, 1–12.

Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B-L., Belec, C., & Vigneault, P. (2009). A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precision Agriculture*, *10*, 145–161.

Wang, Y., Wang, D., Zhang, G., & Wang, J. (2013). Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method. *Field Crops Research*, *149*, 33–39.

Wold, S., Martens, H. & Wold, H. (1983). The multivariate calibration problem in chemistry solved by the PLS method. In: Kågström, B., Ruhe, A. (Eds.), Matrix Pencils, Lecture Notes in Mathematics, vol. 973. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 286–293. http://dx.doi.org/10.1007/BFb0062108.

Zeng, W., Xu, C., Zhao, G., Wu, J., & Huang, J. (2017). Estimation of Sunflower Seed Yield Using Partial Least Squares Regression and Artificial Neural Network Models. *Pedosphere*, in press.