



تخمین عملکرد گندم با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شده از

اندازه‌گیری‌های یک اسپکترورادایومتر

حامد توکلی^{۱*}، فرشاد وصالی^۲

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک

۲- دانش آموخته دکتری رشته‌ی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: h-tavakoli@araku.ac.ir

چکیده

تخمین عملکرد محصول، قبل از برداشت آن، می‌تواند ابزار بسیار مفیدی برای تولیدکنندگان محصولات و پیش‌بینی بهره‌وری محصول باشد. هدف از این تحقیق، بررسی امکان استفاده از شاخص‌های طیفی مستخرج از اندازه‌گیری‌های یک اسپکترورادایومتر، برای پیش‌بینی عملکرد محصول گندم زمستانه (رقم کوبوس) است. طرح آزمایشی بلوک‌های خرد شده تصادفی شامل چهار نرخ کوددهی نیتروژن (۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار) و دو نوع رژیم آب‌دهی (آبی و دیمی) برای داشتن عملکردهای متفاوت و متغیر بر روی گندم پیاده شد. یک اسپکترومتر در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر برای اندازه‌گیری نور تابیده شده از خورشید و نور منعکس شده از محصول و زمین استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در مراحل مختلف رشد محصول صورت گرفت. سپس شاخص‌های پوشش گیاهی مختلفی محاسبه گردید. نتایج آنالیز رگرسیون گام به گام رو به جلو نشان داد شاخص اختلاف نسبتی (RDVI) و شاخص تفاضلی نرمال شده لبه قرمز (NDRE) کاراترین شاخص‌ها در پیش‌بینی عملکرد گندم بودند. بر اساس نتایج بدست آمده، شاخص‌های طیفی عملکرد مناسب و دقت بالایی در مراحل مختلف رشد محصول داشتند. نتیجه‌گیری می‌شود که شاخص‌های پوشش گیاهی بدست آمده از اندازه‌گیری‌های طیفی قادر به تخمین عملکرد گندم با دقت زیاد در طول دوره رشد محصول می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی محصول، شاخص‌های پوشش گیاهی، عملکرد محصول

مقدمه:

تخمین عملکرد محصول، قبل از برداشت آن، می‌تواند ابزار بسیار مفیدی برای تولیدکنندگان محصولات و پیش‌بینی بهره‌وری محصول باشد (Ferrio *et al.*, 2005). عملکرد محصول شاید مهم‌ترین بخش اطلاعات برای مدیریت محصول در کشاورزی دقیق باشد. چرا که در برگیرنده اثرات متغیرهای مکانی مختلفی از قبیل خواص خاک، توپوگرافی، تراکم محصول، حاصلخیزی، آبیاری و هجوم آفات می‌باشد (Lee *et al.*, 2010).

بر اساس تحقیقات صورت گرفته، اندازه‌گیری بازتاب طیفی محصولات در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR) طیف الکترومغناطیس، قابلیت تخمین و آشکارسازی شرایط رشد محصول را داراست (Yang *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010; Fitzgerald *et al.*, 2010).

در زمینه تخمین غیر مخرب عملکرد محصولات کشاورزی با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیفی نیز تحقیقاتی انجام شده است. عملکرد محصولاتی مثل گندم (Aparicio *et al.*, 2000; Ferrio *et al.*, 2005; Babar *et al.*, 2006)، ذرت (Weber *et al.*, 2012)، برنج (Chang *et al.*, 2005)، سویا (Ma *et al.*, 2001) و چغندر قند (Lofton *et al.*, 2012) با استفاده از این روش، تخمین زده شده است.

از آنجائیکه نیاز به انجام تحقیقات بیشتری برای بررسی امکان تخمین عملکرد در محصولات مختلف و شرایط محیطی مختلف وجود دارد (Lee *et al.*, 2010)؛ بنابراین هدف از این تحقیق مقایسه تخمین عملکرد محصول گندم زمستانه با کمک شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی که از اندازه‌گیری‌های طیفی محصول گندم، محاسبه شده‌اند، می‌باشد. همچنین تخمین عملکرد در مراحل مختلف رشد گیاه صورت گرفته و اثر این فاکتور نیز بررسی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در طول فصل زراعی ۲۰۱۲، اندازه‌گیری‌های طیفی از محصول گندم زمستانه (رقم کوبوس) در مزرعه تحقیقاتی مارکوات^۱ متعلق به اداره گونه‌های گیاهی دولت آلمان^۲ واقع در شهر پتسدام^۳ در کشور آلمان انجام شد. طرح آزمایشی بلوک‌های خرد شده تصادفی با دو تکرار برای کاشت محصول طراحی شد. طرح آزمایشی شامل چهار نرخ کوددهی نیتروژن (۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن بر

¹ Marquardt

² German Plant Variety Office

³ Potsdam

هکتار) و دو نوع رژیم آب‌دهی (آبی و دیمی) در مجموع ۱۶ پلات به ابعاد ۴/۵×۹ متر بود. هر کدام از ۱۶ پلات شامل ۱۸ زیر پلات^۱ به ابعاد ۱/۵×۱/۲۵ متر تحت عنوان مشاهده بودند.

تاریخ، مراحل رشد گیاه و فعالیت‌های انجام شده در این تحقیق در جدول ۱ خلاصه شده است. اندازه‌گیری‌ها در مراحل مختلف رشد گیاه شامل مرحله توسعه ساقه^۲ (هفته‌های ۱۸ و ۱۹)، مرحله بوتینگ^۳ (هفته‌ی ۲۰)، مرحله ظهور خوشه^۴ (هفته‌ی ۲۱)، مرحله گلدهی^۵ (هفته‌ی ۲۲) و مرحله توسعه دانه^۶ (هفته‌های ۲۳ و ۲۴) انجام شد.

جدول ۱- تاریخ، مراحل رشد گیاه، و فعالیت‌های مربوط به این تحقیق

تاریخ	04.10.2011	02.05.2012	09.05.2012	15.05.2012	22.05.2012	29.05.2012	07.06.2012	12.06.2012	26.07.2012
شمارش									
روز بعداز کاشت	۰	۲۱۱	۲۱۸	۲۲۴	۲۳۱	۲۳۸	۲۴۷	۲۵۲	۲۹۶
هفته سال	۴۰	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۳۰
BBCH*	-	۳۶	۴۱-۳۹	۴۳	۵۸-۵۶	۶۹-۶۵	۷۱	۷۳	۹۹
نوع	کاشت محصول	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری	برداشت
فعالیت		طیفی	طیفی	طیفی	طیفی	طیفی	طیفی	طیفی	محصول

*BBCH: شاخصی که برای شناسایی مراحل رشد گیاه استفاده می‌شود (Meier, 1997).

برای اندازه‌گیری بازتاب طیفی گیاه و خاک نسبت به نور خورشید و محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف، از یک اسپکترورادایومتر ساخته شده از قطعات تولیدی شرکت tec5^۷ استفاده شد (شکل ۱). قسمت‌های اصلی این دستگاه طیف‌سنج را دو عدد حسگر با آرایش دیدی "Zeiss MMS 1 NIR enhanced" با محدوده طیفی اسمی ۳۰۰ تا ۱۱۵۰ نانومتر و محدوده طیفی

¹ Sub-plot

² stem elongation

³ booting stage

⁴ Inflorescence emergence

⁵ flowering

⁶ Development of fruit

⁷ tec5-Technology for Spectroscopy (tec5 AG, Oberursel, Germany)

مؤثر ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر که تفکیک‌پذیری آنها ۳ نانومتر است، تشکیل می‌دهند. یکی از حسگرها به حالت عمودی به سمت بالا (آسمان) و دیگری به سمت پایین (زمین) نگه داشته می‌شد تا نور تابیده شده از خورشید و نور منعکس شده از زمین را اندازه بگیرند (شکل ۱). مقدار بازتاب^۱ از نسبت نور منعکس شده از گیاه و خاک به نور تابیده شده بدست آمد. از یک سامانه تحصیل داده (شکل ۱) نوع SDACQ32MP و قطعات الکترونیکی tec5 LOE-2 USB CT ساخت شرکت tec5 برای ثبت داده‌ها استفاده شد. سامانه تحصیل داده به یک کامپیوتر فضای آزاد^۲ متصل می‌شد تا رابط کاربر را فراهم آورد.

اندازه‌گیری‌ها در مراحل مختلف رشد گیاه (جدول ۱) و با ۱۰ تکرار برای هر زیر پلات و میانگین‌گیری از آنها صورت گرفت. بر اساس اندازه‌گیری‌های بازتاب در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر توسط این اسپکترورادیومتر، شاخص‌های پوشش گیاهی مختلفی محاسبه گردید. با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های اولیه، تعدادی از این شاخص‌ها که نتایج بهتری را فراهم می‌آوردند، انتخاب شدند. در جدول ۲ این شاخص‌ها آورده شده است.



شکل ۱- اسپکترورادیومتر مورد استفاده برای اندازه‌گیری بازتاب طیفی گیاه و خاک

¹ Reflectance

² Outdoor

جدول ۲- شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های اسپکتروراد یومتر

رابطه ریاضی	شاخص*
$NDVI = \frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670}}$	شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده ^۱
$GNDVI = \frac{R_{800} - R_{550}}{R_{800} + R_{550}}$	شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده سبز ^۲
$SR = \frac{R_{780}}{R_{670}}$	نسبت ساده ^۳
$NDRE = \frac{R_{780} - R_{720}}{R_{780} + R_{720}}$	شاخص تفاضلی نرمال شده لبه قرمز ^۴
$RDVI = \frac{R_{800} - R_{670}}{\sqrt{R_{800} + R_{670}}}$	شاخص پوشش گیاهی اختلاف نسبی ^۵
$REIP = 700 + \frac{40(0.5(R_{670} + R_{780}) - R_{700})}{R_{740} - R_{700}}$	شاخص نقطه انحناء لبه قرمز ^۶
$SAVI = \frac{(1 + L)(R_{800} - R_{670})}{(R_{800} + R_{670} + L)}, \text{ with } L=0.5$	شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک ^۷
$OSAVI = \frac{(1 + L)(R_{800} - R_{670})}{(R_{800} + R_{670} + L)}, \text{ with } L=0.16$	شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک بهینه شده ^۸

مدل‌های رگرسیونی با کمک نرم افزار (MATLAB (Ver. 7.13, R2011b, Mathworks Company) توسعه یافت. همچنین از

نرم افزار Microsoft Excel 2013 برای ترسیم منحنی‌ها استفاده شد.

¹ Normalized Difference Vegetation Index
² Green Normalized Difference Vegetation Index
³ Simple ratio
⁴ Normalized Difference Red Edge
⁵ Ratio Difference Vegetation Index
⁶ Red Edge Inflection Point
⁷ Soil Adjusted Vegetation Index
⁸ Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

نتایج

عملکرد محصول در هنگام برداشت با وزن کردن مقدار گندم برداشت شده‌ی هر پلات برحسب دسی تن بر هکتار ثبت شد. در ابتدا از کل داده‌های ۷ هفته و همه‌ی شاخص‌های محاسبه شده برای تخمین عملکرد محصول با استفاده از روش رگرسیون گام به گام رو به جلو^۱ استفاده شد. مدل رگرسیونی خطی زیر برای پیش‌بینی عملکرد گندم با استفاده از کل داده‌ها بدست آمد:

$$Yield = -6.866*RDVI_W19 + 10.107*RDVI_W21 + 213.903*NDRE_W22 - 17.443 \quad (1)$$

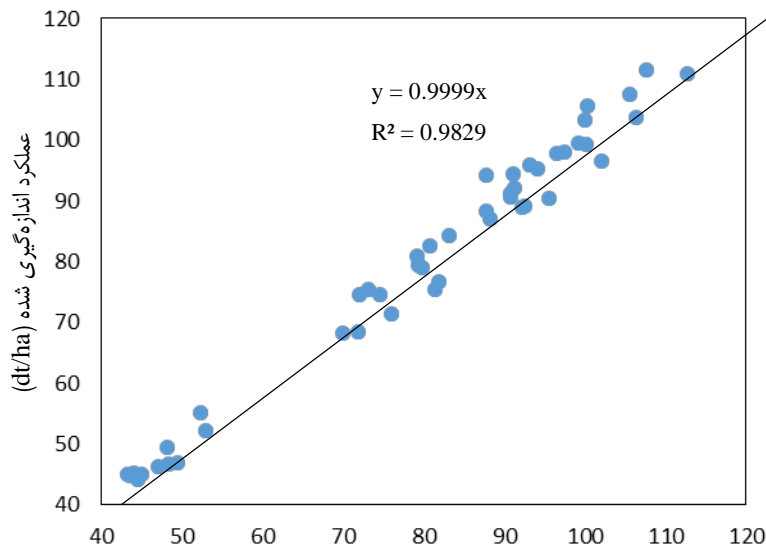
$$R^2 = 0.98$$

$$RMSE = 2.75$$

که در آن $Yield$ عملکرد محصول (dt/ha)، $RDVI$ شاخص پوشش گیاهی اختلاف نسبتی، $NDRE$ شاخص تفاضلی نرمال شده لبه قرمز، $W19$ ، $W21$ و $W22$ به ترتیب هفته‌های ۱۹، ۲۱ و ۲۲ داده برداری می‌باشند.

رابطه ۱ نشان می‌دهد که شاخص $RDVI$ در مقایسه با شاخص‌های دیگر استفاده شده در این تحقیق، کارایی بیشتری در پیش‌بینی عملکرد محصول دارد. شاخص $NDRE$ نیز در رابطه فوق ظاهر شده که نشان دهنده مؤثر بودن آن در تخمین عملکرد گندم می‌باشد. شکل ۲ رابطه بین مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده در هنگام برداشت و مقادیر عملکرد تخمین زده شده با استفاده از رابطه ۱ را نشان می‌دهد.

¹ Forward Stepwise Regression



شکل ۲- رابطه‌ی بین عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در موقع برداشت و عملکرد پیش‌بینی شده

در رابطه ۱، اندازه‌گیری‌هایی از هفته‌ها و مراحل مختلف رشد گیاه وجود دارد؛ بنابراین نمی‌توان نتیجه گرفت که چه مرحله‌ای از رشد گیاه برای تخمین عملکرد مناسب‌تر است. برای بررسی اثرات مرحله رشد گیاه در پیش‌بینی عملکرد، آنالیز رگرسیون گام به گام رو به جلو با استفاده از همه شاخص‌های محاسبه شده برای هر هفته بطور جداگانه انجام شد. پارامترهای روابط بدست آمده برای هر هفته در جدول ۳ ارائه شده است.

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، دقت مدل‌های رگرسیونی در پیش‌بینی عملکرد گندم در تمامی مراحل رشد در نظر گرفته شده در این تحقیق، بالاست. با این حال، هر چه به مراحل رشد نهایی محصول نزدیک‌تر می‌شویم، دقت پیش‌بینی نیز بیشتر می‌شود.

جدول ۳- پارامترهای روابط رگرسیونی بدست آمده برای پیش‌بینی عملکرد گندم در هر هفته

هفته (مرحله رشد گیاه)	R^2	RMSE
۱۸ (توسعه ساقه)	۰/۹۲۷	۵/۷۱۷
۱۹ (توسعه ساقه)	۰/۹۲۹	۵/۶۱۲
۲۰ (بوتینگ)	۰/۹۴۸	۴/۸۲۹
۲۱ (ظهور خوشه)	۰/۹۵۶	۴/۴۴۷
۲۲ (گلدهی)	۰/۹۶۸	۳/۸۰۳
۲۳ (توسعه دانه)	۰/۹۶۷	۳/۸۳۴
۲۴ (توسعه دانه)	۰/۹۶۷	۳/۸۳۳

آپاریسیو و همکاران (۲۰۰۰)، کارایی دو شاخص SR و $NDVI$ را در پیش‌بینی عملکرد گندم در شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای، محدود به مراحل از رشد گیاه که در آنها شاخص سطح برگ کمتر از ۳ است، گزارش کردند (Aparicio *et al.*, 2000).
بابار و همکاران (۲۰۰۶) نیز نتیجه گرفتند که شاخص‌های طیفی پتانسیل تخمین عملکرد گندم را دارند. آنها مراحل ظهور خوشه و توسعه دانه را بعنوان بهترین مراحل برای پیش‌بینی عملکرد معرفی کردند (Babar *et al.*, 2006).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌بینی عملکرد محصول گندم در طول دوره رشد و قبل از برداشت، با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیفی از محصول و محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی، با دقت بالا امکان‌پذیر است. پیشنهاد می‌شود این تحقیق برای شرایط کشاورزی ایران نیز پیاده‌سازی شود. همچنین پیشنهاد می‌شود امکان استفاده از ابزارهای ارزان قیمت مانند دوربین‌های دیجیتال برای این منظور مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- Aparicio, N., D. Villegas, J. Casadesus, J.L. Araus, and C. Royo. 2000. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92: 83–91.
- Babar, M.A., M.P. Reynolds, M. Van Ginkel, A.R. Klatt, W.R. Raun, and M.L. Stone. 2006. Spectral reflectance indices as a potential indirect selection criteria for wheat yield under irrigation. *Crop Science*, 46: 578–588.
- Chang, K-W., Y. Shen, and J-C. Lo. 2005. Predicting Rice Yield Using Canopy Reflectance Measured at Booting Stage. *Agronomy Journal*, 97: 872–878.
- Ferrioa, J.P., D. Villegasb, J. Zarcob, N. Apariciob, J.L. Arausc, and C. Royob. 2005. Assessment of durum wheat yield using visible and near-infrared reflectance spectra of canopies. *Field Crops Research*, 94: 126–148.
- Fitzgerald, G., D. Rodriguez, and G. O’Leary. 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research* 116(3):318-324.

- Lee, W.S., V. Alchanatis, C. Yang, M. Hirafuji, D. Moshou, and C. Li. 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1): 2–33.
- Lofton, J., B.S. Tubana, Y. Kanke, J. Teboh, H. Viator, and M. Dalen. 2012. Estimating Sugarcane Yield Potential Using an In-Season Determination of Normalized Difference Vegetative Index. *Sensors*, 12: 7529-7547.
- Ma, B.L., L.M. Dwyer, C. Costa, E.R. Cober, and M.J. Morrison. 2001. Early Prediction of Soybean Yield from Canopy Reflectance Measurements. *Agronomy Journal*, 93: 1227–1234.
- Meier, U. 1997. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Weber, V.S., J.L. Araus, J.E. Cairns, C. Sanchez, A.E. Melchinger, and E. Orsini. 2012. Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes. *Field Crops Research*, 128: 82–90.
- Yang, C., J.H. Everitt, and J.M. Bradford. 2007. Airborne hyperspectral imagery and linear spectral unmixing for mapping variation in crop yield. *Precision Agriculture* 8(6): 279–296.