

## ارزیابی مدل همانندسازی و پیش‌بینی عملکرد دانه گیاه لوبیاچیتی (*Phaseolus vulgaris* L.)

الیاس آریاکیا<sup>۱\*</sup>، بنیامین ترابی<sup>۲</sup> و آزیتا آریاکیا<sup>۳</sup>

۱. عضو هیات علمی، مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران (IBRC)، جهاد دانشگاهی (ACECR)

۲. استادیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. کارشناس، تولیدات گیاهی، بانک گیاهی مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران، جهاد دانشگاهی (ACECR)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۸ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۱۳)

### چکیده

در این پژوهش، برای همانندسازی و پیش‌بینی عملکرد گیاه لوبیاچیتی در شهرستان خمین با استفاده از مدل، تغییرات روزانه مربوط به گذارشناسی (فنونولوژی)، ماده خشک، سطح برگ و موازنه آب خاک، از طریق آمار روزانه هواشناسی (دمای کمینه و بیشینه، میزان تابش و بارندگی) و با استفاده از داده‌های استانی و داده‌های دیگر پژوهشگران در نقاط مختلف جهان، محاسبه شد و عملکرد در پایان فصل پیش‌بینی شد. عملکرد مشاهده‌شده دامنه تغییرپذیری ۲۵۱۸ تا ۳۰۶۶ کیلوگرم در هکتار داشت و با میانگین ۲۸۳۲ کیلوگرم در هکتار بود؛ درحالی‌که دامنه تغییرپذیری عملکرد پیش‌بینی‌شده ۲۲۶۰ تا ۲۷۸۰ کیلوگرم در هکتار و میانگین ۲۶۴۳ کیلوگرم در هکتار داشت. مقدار  $R^2$ ، ضریب تغییرپذیری (CV) و جذر میانگین مربعات انحرافات (RMSD) مدل به ترتیب ۸۳ درصد، ۱/۶ درصد و ۲۰۵ کیلوگرم در هکتار بود. بنابراین استنباط می‌شود که این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی رشد و عملکرد لوبیا در شرایط شهرستان خمین دقت مناسبی داشته باشد. همچنین این امکان وجود دارد تا در صورت فراهم بودن داده‌های مربوط به زیرمدل‌های نام‌برده و نیز نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های منطقه‌ای مربوط به تراکم و تاریخ‌های کشت دیگر گیاهان بذر محصول، بتوان از این مدل، برای همانندسازی و پیش‌بینی رشد و عملکرد آن‌ها استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: عملکرد، گذارشناسی، لوبیاچیتی، مدل و همانندسازی.

## Evaluating the simulate and prediction model of chitti bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grain yield

Elyas Aryakia<sup>1\*</sup>, Benjamin Torabi<sup>2</sup> and Azita Aryakia<sup>3</sup>

1. Instructor, Plant bank, Horticultural Sciences, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), I.R. Iran

2. Assistant Professor, Department of Agronomy, Gorgan university of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

3. Expert, Plant bank, Plant production, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), I.R. Iran

(Received: Oct. 30, 2014 - Accepted: Nov. 4, 2015)

### ABSTRACT

In this study, for simulation and prediction the yield of chitti bean, it is necessary to assess sub models include of phenology, production and dry matter distribution, leaf area changes and equilibrium of water-soil. The sub model parameters were estimated by using information of date plantings, different plant densities and different years at khomein Research Station and data results of Scientists around the world. Using this model, daily changes of sub models were calculated based on daily meteorological statistics (minimum temperature, maximum temperature, radiation and rain) and finally the yield was predicted. The resulting range of observed yield was 2518 to 3066 kg.h<sup>-1</sup> with average of 2832 kg.h<sup>-1</sup>; whereas the resulting range of predicted yield was 2260 to 2870 kg.h<sup>-1</sup> with average of 2643 kg.h<sup>-1</sup>.  $R^2$ , CV and RMSD were %83, %1.6 and 205 kg.h<sup>-1</sup>, respectively. Therefore, it can be concluded that this model have appropriate accuracy for prediction of the growth and yield of common bean in khomein. Also it is possible to predict growth and yield responses of other crops if the data of sub models and regional data results of density and planting date of seed crops are available.

**Keywords:** Bean, model, phenology, simulation, yield.

\* Corresponding author E-mail: elyasaryakia@yahoo.com

### مقدمه

گیاه لوبیا با تولید بالغ‌بر ۲۰۰ میلیون تن در سال، مقام نخست را در بین حبوبات دارد (Anonymous, 2008) و در ایران پس از نخود و عدس مقام سوم را داشته است (Anonymous, 2009). طول دوره رویشی و زایشی بر عملکرد دانه تأثیر دارد. دوره رشد تا گلدهی و غلاف‌دهی، شمار غلاف و دانه در بوته را تعیین می‌کند و شمار غلاف و دانه تعیین‌کننده عملکرد نهایی دانه هستند (Egli, 1998). پیش‌بینی نمو و عملکرد لوبیا برای هر دولت، شرکت و یا فرد کشاورزی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تولیدی به‌شمار می‌آید. برای بهبود راهبرد (استراتژی) پیش‌بینی نمو و عملکرد محصول، ممکن است نیاز به روش‌های جدید باشد. از حدود ۴۰ سال پیش مدل‌سازی گیاهان زراعی آغاز شده است و توسعه رایانه‌های پر قدرت و کارآمد، در پیشرفت این رشته سهم عمده‌ای داشته است (Soltani, 2009). نخستین تلاش‌ها در مدل‌سازی گیاهان، تهیه مدل‌هایی بود که دریافت نور و نورساخت (فتوسنتز) را در جامعه‌های گیاهی برآورد می‌کردند (Lomis & Williams, 1963; De Wit, 1965). مدل‌های همانندسازی گیاهی یک مکمل مؤثر برای تحقیقات آزمایشی است (Soltani & Hoogenboom, 2007) و اجرای آن، نیاز به صرف وقت و هزینه اجرای تحقیقات مزرعه‌ای را کاهش داده (Pannkuk *et al.*, 1998)، و می‌تواند اثربخشی نتایج آزمایش‌های زراعی را بیشتر کنند (Soltani, 2009; Torabi & Soltani, 2013). از مدل‌های همانندسازی گیاهان برای انجام بررسی‌های مختلف از جمله پیش‌بینی عملکرد محصول (Torabi & Soltani, 2013)، برآورد ظرفیت تولید (Marcelis *et al.*, 1998)، تعیین بهترین مدیریت زراعی و پیش‌بینی اثرگذاری‌های تغییر اقلیم استفاده شده است (Soltani & Hoogenboom, 2007). استفاده از یک مدل همانندسازی برای پیش‌بینی رشد و عملکرد، به میزان دسترسی به مشخصه (پارامتر)های ورودی مدل در منطقه مورد نظر بستگی دارد. برای پیش‌بینی رشد و عملکرد یک محصول با مدل، باید سازگاری معادله‌ها یا رابطه‌ها بین فرآیندهای مختلف رشد و عملکرد با شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر، میزان دسترسی به مشخصه‌های ورودی مدل و میزان کارایی مدل در پیش‌بینی رشد و

عملکرد را مدنظر قرار داد (Torabi & Soltani, 2013). مدل‌های پرشماری برای کمی کردن مراحل رشد و عملکرد وجود دارند، ولی در بیشتر مواقع در مکان‌هایی با شرایط محیطی مختلف این مدل‌ها پیش‌بینی‌های درستی را نشان نمی‌دهند. یک دلیل می‌تواند این باشد که مشخصه‌های استفاده‌شده در این مدل‌ها از یک مجموعه داده‌های محدود، برآورد شده باشند (Soltani *et al.*, 2006). برای بهبود راهبرد پیش‌بینی نمو و عملکرد محصول، نیاز به روش‌های جدیدی است. در این روش‌ها سعی بر این است تا با به‌کارگیری عامل‌های کمی، دقت برآورد را افزایش داد. به‌عنوان مثال مدل BEANGRO Version 1.01 رشد رویشی، نمو زایشی و عملکرد لوبیا (*Pisaseolus vulgaris* L.) را همانندسازی می‌کند. این نسخه با تغییرات زیادی در نسخه اولیه مدل‌های دانه لگوم یعنی SOYGRO و PNUYGRO توسعه یافته است. مدل BEANGRO از سال ۱۹۸۶ تاکنون در حال ارتقا است. مدل BEANGRO Version 1.01، مدل تغییر یافته BEANGRO Version 1.00 است و با توجه به مشخصه‌های دما و کمی تغییرات کوچک، ارتقا یافته است. در این مدل نورساخت به‌صورت ساعتی پیش‌بینی می‌شود. مدل نام‌برده گزینه‌های مربوط به ورودی آب‌وهوا برای همانندسازی تأثیرات تغییر اقلیم جهانی روی ظرفیت تولید لوبیا نیز دارد. دمای کمینه و بیشینه، تشعشع خورشیدی، بارش و طول روز قابل تغییر است. این مدل همچنین به تغییرات غلظت دی‌اکسید کربن تحت تأثیر نورساخت و تبخیر نیز پاسخگو است (Hoogenboom *et al.*, 1991). مدل‌های همانندسازی به‌طور معمول حاوی زیرمدل‌هایی‌اند که باهدف کاربرد فرآیندهای مختلف به‌کاررفته در سامانه خاک-گیاه-اتمسفر هستند تا رشد، نمو و عملکرد محصول را همانندسازی کنند. زیرمدل‌ها، اجزای کوچک‌تر مدل اصلی هستند که ایفای نقش آن‌ها در ارتباط با ایفای نقش مدل اصلی و مرتبط با آن است. در طول دو دهه اخیر، مدل‌های همانندسازی رشد و نمو بسیار پیچیده گیاهان، توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها شامل گذارشناسی گیاه به‌عنوان تابعی از واحد گرمایی تجمعی (همچون EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) و جزئیات مربوط به فرآیندهای زیست-زمین-شیمیایی

زیرمدل تشکیل شده است و رشد و نمو گیاه، تولید و توزیع ماده خشک، میزان رشد برگ و موازنه آب خاک را پیش‌بینی می‌کند. با استفاده از مشخصه‌های ورودی، می‌توان محاسبه‌های مربوط به کاشت تا رسیدگی را به صورت روزانه انجام داد، زمان رخداد مراحل مختلف نمو، سرعت رشد روزانه گیاه، عملکرد دانه، شاخص برداشت و سطح برگ را پیش‌بینی کرد. در این مدل، اجزای موازنه آب، آب موردنیاز آبیاری و بارهای آبیاری نیز برآورد می‌شوند. همه ورودی‌های لازم و مشخصه‌های موردنیاز مدل لوبیا که از منابع مختلف گرفته شده است در جدول ۱ آورده شده است.

کربن و نیتروژن (همچون مدل DNDC (DeNitrification-DeComposition) و EPIC هستند (Oliveira *et al.*, 2012). هدف از این پژوهش، ارزیابی مدل عملکرد گیاه لوبیاچیتی در شهرستان خمین در ارتباط با زیرمدل‌های گذارشناسی، تولید و توزیع ماده خشک، میزان رشد برگ و موازنه آب و خاک است تا بتوان از این مدل برای پیش‌بینی عملکرد لوبیا استفاده کرد.

## مواد و روش‌ها

مدل مورد استفاده بر پایه مدل ترابی و سلطانی (Torabi & Soltani, 2013) است. این مدل از چهار

جدول ۱. نام، واحد اندازه‌گیری، میزان برآورد و منبع برآورد مشخصه‌های ورودی در مدل لوبیا

Table 1. Name, unit, amount and source of estimate of the model input parameters

Reference of estimate	Estimate	Unit	Parameter
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	6.8	°C	Base temperature for development (TBD)
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	24	°C	Optimum temperature for development (TOD)
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	34.1	°C	Ceiling temperature for development (T)
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	106.3	°C day	Sowing-emergence (TEMR)
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	614.7	°C day	Sowing to first flowering (TTTLG)
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	821.4	°C day	Sowing to pod development (TTTLG)
(Ferreira <i>et al.</i> , 1997)	920.3	°C day	Sowing to pod filling (TTTSG)
(Mahlogi <i>et al.</i> , 2000)	965	°C day	Sowing to harvest (TTHAR)
(Meireles <i>et al.</i> , 2002)	5	°C	Base temperature for radiation use efficiency (TBRUE)
(Meireles <i>et al.</i> , 2002)	22.5	°C	Lower optimum temperature for radiation use efficiency (TO1RUE)
(Meireles <i>et al.</i> , 2002)	35	°C	Upper optimum temperature for radiation use efficiency (TO2RUE)
(Meireles <i>et al.</i> , 2002)	45	°C	Ceiling temperature for radiation use efficiency (TCRUE)
(Tsubo <i>et al.</i> , 2001)	1	Gram per mega joule	Ratio radiation use efficiency after growth grain than before it (RRUE)
(tesfaye <i>et al.</i> , 2006)	2.44	Gram per mega joule	Radiation use efficiency under optimal growth conditions (IRUE)
(Marrou <i>et al.</i> , 2014)	0.7	--	Extinction coefficient for photosynthetically active radiation (KPAR)
(kamelmanesh <i>et al.</i> , 2012)	0.096	Gram per day	Daily harvest index (DHI)
(Marrou <i>et al.</i> , 2014)	0.015	mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup>	Leaf area index specific (SLAI)
(ghadiri and bayat, 2004)	33.33, 0.41	Plant per square, -- meter)	Point 1, relative maximum leaf area index versus density (P1)
(ghadiri and bayat, 2004)	16.16, 0.25	Plant per square, -- meter)	Point 2, relative maximum leaf area index versus density (P2)
(Walker and Ogindo, 2003)	0.15, 0.11	(--, --)	Point 1, relative leaf area index versus normalized development stage (D1)
(Walker and Ogindo, 2003)	0.5, 0.98	(--, --)	Point 2, relative leaf area index versus normalized development stage (D2)
(ghadiri and bayat, 2004)	5.9	--	Maximum leaf area index (LAIMAX)
(Soltani, 2009)	0.4	--	FTSW threshold when leaf area development starts to decline (WSSL)
(Soltani, 2009)	0.3	--	FTSW threshold when dry matter production starts to decline (WSSG)
(Rezaei & KamgarHaghighi, 2009)	1080	mm	Soil depth (STRSDEP)
(Soltani, 2009)	0.5	--	Leaf area index at harvest (RMATLAI)
(Soltani, 2009)	0.5	--	Extinction coefficient for global solar radiation (KET)
(Soltani, 2009)	0.23	--	Crop albedo (CALB)

۱. محاسبه‌گر اثر فرسایش و بهره‌وری

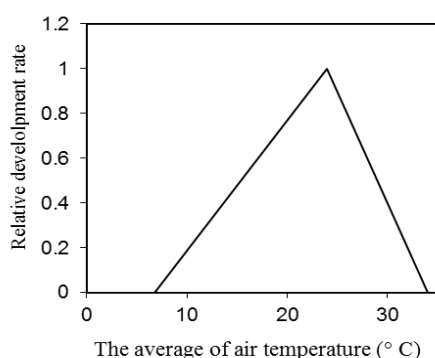
۲. نیترات‌زدایی-تجزیه

## گذارشناسی

$GDD = T - TB$  اگر  $TB < T < TO$

$GDD = TO - TB$  اگر  $T \Rightarrow TO$

که در آن  $T$ ،  $TB$  و  $TO$  به ترتیب میانگین دمای هوا، دمای پایه و دمای مطلوب برحسب درجه سلسیوس هستند. شکل ۱ معادله بالا را نشان می‌دهد.  $GDD$  برای مراحل مختلف نمو به صورت تجمعی بیان شد. بنابراین، از آغاز هر مرحله نمو تا پایان آن مرحله،  $GDD$  به صورت روزانه محاسبه و سپس باهم جمع شد و در نهایت به صورت تجمعی ارائه شد. در این بررسی، برای پیش‌بینی مدت‌زمان از کاشت تا مراحل مختلف نمو، با استفاده از معادله ۱، از داده‌های مربوط به لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) در شهرستان خمین در تاریخ‌های کشت متفاوت استفاده شد (جدول ۲).  $GDD$  برای مراحل نمو مورد پیش‌بینی از کاشت تا مراحل سبز شدن، پایان رشد برگ، آغاز رشد دانه، پایان رشد دانه و رسیدگی برداشت به ترتیب ۱۰۶، ۳، ۶۱۴، ۷، ۸۲۱، ۴، ۹۲۰، ۳ (Ferreira et al., 1997) و ۹۵۶ (Mahlogi et al., 2000) درجه سلسیوس در روز بودند.



شکل ۱. واکنش سرعت نمو نسبی به دما در گیاه لوبیا  
Figure 1. Response of relative development rate versus temperature in bean

بررسی نمو گیاه در ارتباط با شرایط آب و هوایی را در اصطلاح گذارشناسی گویند (Perry et al., 1987). شناخت گذارشناسی گیاه باعث می‌شود تا فرآیندهای رشد و نمو، ظرفیت عملکرد و پیش‌بینی گذارشناسی گیاه شایان درک باشد (Hammer et al., 1982). با توجه به اینکه شمار زیادی از فرآیندهای فیزیولوژیک و مورفولوژیک با مرحله گذارشناسی گیاه تغییر می‌کنند، کمی کردن دقیق مراحل نمو گذارشناختی برای هر یک از مدل‌های همانندسازی رشد ضروری است. امروزه استفاده از روش‌های مدل‌سازی و همانندسازی مراحل رشدونمو، به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت بهینه گیاهان زراعی در سراسر جهان شناخته شده‌اند (Bouman et al., 1996). بر پایه نوع گیاه، مراحل مهم و پایه گذارشناسی شامل سبز شدن، آغاز گلدهی، زمان بیشینه شدن شاخص سطح برگ، پایان گلدهی، آغاز پر شدن دانه و رسیدگی فیزیولوژیک است (Ferreira et al., 1997). پیش‌بینی مراحل مختلف رشد و نمو گیاه لوبیا، هم بر پایه زمان گرمایی و هم بر پایه زمان تقویمی صورت می‌گیرد. دما مهم‌ترین عامل تحریک‌کننده نمو گذارشناختی است. دماهای اصلی یا کاردینال لوبیا شامل دمای پایه ( $T_b$ )، دمای مطلوب برای رشد ( $T_o$ ) و دمای سقف ( $T_c$ ) به ترتیب عبارت‌اند از ۶/۸، ۲۴، ۳۴/۱ درجه سلسیوس (Ferreira et al., 1997). متداول‌ترین شاخص گرمایی مورد استفاده،  $GDD$  است که برای پیش‌بینی مراحل مختلف نمو در دامنه محدودی از تاریخ‌های کاشت و عرض‌های جغرافیایی استفاده می‌شود. محاسبه  $GDD$  به صورت زیر انجام شد:

$$GDD = 0 \text{ اگر } T \leq TB \quad (1)$$

جدول ۲. داده‌هایی که از آن برای ارزیابی مدل استفاده شده است

Table 2. The data used for estimating some model parameters or model evaluation

Reference	Estimated yield (t/ha)	Observed yield (t/ha)	Treatment	Latitude	Year and Location
(bayat et al., 2010)	2.49	2.558	Cultivar, irrigation	33° 39'	Khomein, 2007
(Lak et al., 2009)	2.26	2.518	Sowing date	33° 39'	Khomein, 2006
	2.78	2.91			
	2.87	3.022			
(Ghanbari&taheri mazandarani, 2003)	2.47	2.696	Sowing date, Density	33° 39'	Khomein, 1999
	2.63	2.978			
	2.76	2.233			
	2.87	3.066			

## تولید و توزیع ماده خشک

همانندسازی تولید ماده خشک به احتمال بخش مرکزی هر مدل همانندسازی گیاهی به شمار می آید که خود تحت تأثیر مدل سازی نمو گذارشناختی و تغییرپذیری سطح برگ نیز قرار می گیرد و در نتیجه عملکرد دانه را مشخص می کند. مدل سازی موفق رشد گیاهان بستگی زیادی به توصیف کامل شاخص سطح برگ (Leaf Area Index)، ضریب استهلاک نوری (Light Extinction Coefficient) و کارایی کاربرد نور (Radiation Use Efficiency) دارد (O'Connell *et al.*, 2004). کارایی کاربرد نور (RUE) یک راهکار مؤثر و کارا برای کم کردن تجمع ماده خشک و به صورت افزایش ماده خشک به ازای جذب هر واحد تابش فعال نورساختی تعریف می شود (Kiniry *et al.*, 1999) و هر چه مقدار RUE (گرم بر مگا ژول تابش دریافت شده) بیشتر باشد، یعنی گیاه در تبدیل نور به ماده خشک بهتر عمل می کند. مقدار RUE با توجه به گونه گیاهی، شرایط آب و هوایی، مدیریت زراعی، مرحله رشدی گیاه، نحوه اندازه گیری و ترکیبات گیاهی تغییر می کند (O'Connell *et al.*, 2004). میزان RUE برای گیاه لوبیا ۱/۶ گرم بر مگا ژول گزارش شده است (Coulson, 1985). درحالی که دیگر منابع مقدار RUE را برای گیاه لوبیا ۲/۲ گرم بر مگا ژول گزارش کرده اند (Meireles *et al.*, 2002). اختلاف در ساختار تاج پوششی که با ضریب استهلاک نوری (K) در قانون لامبرت-بیر شرح داده می شود، به همراه شاخص سطح برگ می تواند دلایل اختلاف گونه ها در کارایی کاربرد نور را روشن تر کنند (Kiniry *et al.*, 1999). تحت شرایط مختلف محیطی، ضریب استهلاک نوری (k) در لوبیا از ۰/۴ تا ۰/۸ متغیر است (Pengelly *et al.*, 1999). ضریب استهلاک نوری (k) برای لوبیا معمولی ۰/۷ (Wien, 1982) و ۰/۶۴ (Tsubo *et al.*, 2001) گزارش شده است. مقدار K کمتر از ۱ بیانگر برگ های عمودی تر یا پراکنش فشرده و K بزرگ تر از ۱ نشان دهنده برگ های افقی یا پخش منظم آنها است (Jones, 1992). کاهش مقدار ضریب استهلاک (برگ های عمودی تر) برای اجازه نفوذ نور به درون تاج پوشش و برخورد نور به برگ های بیشتر در

میزان های کم تابش، باعث افزایش سرعت تبادل کربن می شود. این عامل باعث افزایش کارایی کاربرد نور در گیاهانی که منبع در آنها محدود است، خواهد شد (Kiniry *et al.*, 2004).

در این مدل تولید ماده خشک روزانه با استفاده از فرمول زیر محاسبه شده است (Soltani *et al.*, 1999):

$$BDM = PAR \times FINT \times RUE \quad (2)$$

که در آن PAR کل تابش فعال نورساختی روزانه رسیده به گیاه ( $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ )، FINT کسر تابش دریافت شده توسط گیاه است. مقدار PAR به ضریب خاموشی (KPAR) و شاخص سطح برگ (LAI) بستگی دارد و برابر رابطه مانسی و سایکی (به نقل از Kiniry & Knievel, 1995) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$FINT = 1 - \exp(-KPAR \times LAI) \quad (3)$$

در این مدل با استفاده از دماهای گزارش شده برای کارایی کاربرد تابش و نیز با توجه به رابطه زیر، کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی در شرایط نامطلوب دمایی تصحیح شد:

$$RUE = IRUE1 \times DVRUE \times TCFRUE \quad (4)$$

که در آن RUE کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی در شرایط مختلف دمایی، IRUE1 کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی در طول دوره رشد رویشی در شرایط مطلوب دمایی، DVRUE ضریب کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی است و مقدار آن پیش از پر شدن دانه برابر یک و پس از پر شدن دانه برابر RRUE است. مقدار RRUE برابر با نسبت کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی در پس از پر شدن دانه به پیش از پر شدن دانه است. TCFRUE ضریب تصحیح کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی برای میانگین دمای روزانه است. واکنش ضریب تصحیح کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی (TCFRUE) به دما در لوبیا در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در این مدل تجمع عملکرد دانه به عنوان تابعی از تجمع ماده خشک و افزایش خطی شاخص برداشت روزانه (DHI) توصیف شده است. سلطانی و همکاران (Soltani *et al.*, 2006) از مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت برای پیش بینی عملکرد دانه در مدل های همانندسازی گیاهان زراعی استفاده کردند.

### شاخص سطح برگ

سطح برگ یک جزء فیزیولوژیک عمده در میزان عملکرد و سرعت رشد گیاه زراعی است که خود ویژگی‌های پیچیده‌ای دارد و اجزای اصلی آن شمار و اندازه برگ‌ها هستند. شاخص سطح برگ عبارت است از میزان سطح برگ گیاه در واحد سطح زمین (Watson, 1974). شاخص سطح برگ بهینه در گیاهان متفاوت است و وابسته به شرایط محیطی و ژنوتیپ است (Fageria, 1992). در شرایطی که کمبود آب و مواد غذایی وجود نداشته باشد و در صورت نبود مشکل آفات و بیماری‌ها، تولیدات گیاهی اغلب یک رابطه خطی با میزان تابش تجمعی دریافتی دارند و تابش فعال نورساختی جذب شده به‌عنوان مهم‌ترین عامل رشد گیاه خواهد بود (Alimadadi *et al.*, 2006). مدل‌های مختلفی وجود دارند که در آن عملکرد دانه بر پایه شاخص سطح برگ همانندسازی شده، پیش‌بینی شده است (Khaledian *et al.*, 1997; Mailhol *et al.*, 2009). شاخص سطح برگ در رقم‌های مختلف لوبیا متفاوت بوده و بین ۲ تا ۴/۲ متغیر است (Soghani *et al.*, 2010). شاخص سطح برگ ۶/۵ (Alimadadi *et al.*, 2006) و شاخص سطح برگ ویژه ۰/۱۵ برای گیاه لوبیا گزارش شد (Marrou *et al.*, 2014). در این مدل شاخص سطح برگ در هر روز از کاشت تا برداشت از معادله زیر محاسبه شد:

$$LAI = RLAI \times LAIMAX \quad (5)$$

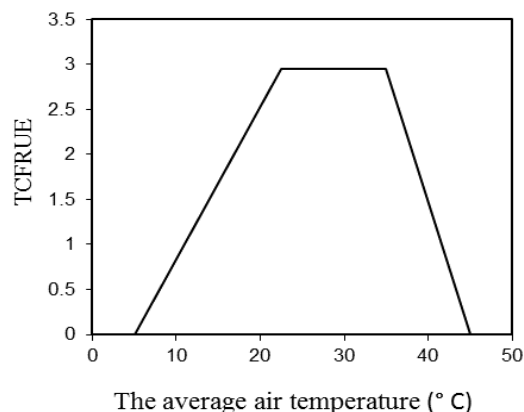
که در آن LAIMAX بیشینه شاخص سطح برگ برای تراکم موردنظر و RLAI نسبت LAI موجود به بیشینه LAI قابل دستیابی توسط گیاه است. LAIMAX با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$LAIMAX = \quad (6)$$

$$(P2EN/PDEN + EXP(A1 - B1 \times PEN))$$

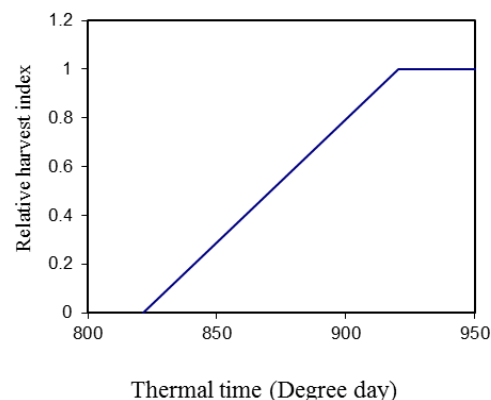
در این معادله PDEN تراکم گیاه در مترمربع است. A1 و B1 ضریب‌های معادله هستند که با در دست بودن دو نقطه P1 و P2 و با حل هم‌زمان معادله بالا برای آن دو نقطه به دست می‌آید. در این مدل مقدار P1 = (۰/۴۱، ۳۳/۳۳) و مقدار P2 = (۰/۲۵، ۱۶/۱۶) در نظر گرفته شده است (Ghadiri & Bayat, 2004). P1 نشان می‌دهد که در تراکم ۳۳/۳۳ بوته در مترمربع، شاخص سطح برگ برابر ۰/۴۱ است و P2

آن‌ها تغییرات شاخص برداشت را در مقابل روز فیزیولوژیکی پس از گلدهی با استفاده از یک مدل سه تکه‌ای خطی در نخود بیان کردند. از آنجاکه شاخص برداشت، نسبت وزن دانه به کل ماده خشک است، افزایش شاخص برداشت تا زمانی صورت می‌گیرد که بیشینه وزن دانه به دست آید. شاخص برداشت (HI) از تقسیم وزن خشک دانه‌ها بر وزن خشک کل در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک تعیین می‌شود (Confalon *et al.*, 2010؛ شکل ۳). شاخص برداشت رقم‌های مختلف لوبیا بین ۱۳/۶ درصد تا ۴۳/۹ درصد متغیر است (Soghani *et al.*, 2010).



شکل ۲. واکنش ضریب تصحیح کارایی کاربرد تابش فعال نورساختی (TCFRUE) به دما در لوبیا

Figure 2. Response of correction factor of radiation use efficiency versus daily temperature in bean



شکل ۳. واکنش تغییرپذیری میزان شاخص برداشت در مقابل زمان گرمایی تجمعی از آغاز تا پایان پر شدن دانه در لوبیا

Figure 3. Response of the harvest index versus cumulative thermal time from beginning of seed growth to termination of seed growth

Tri میزان تعرق روزانه گیاه است. برای موازنه آب خاک، آب‌های ورودی به خاک از آب‌های خروجی از خاک کسر می‌شود (Soltani, 2009). مشخصه‌های مربوط به موازنه آب خاک شامل ضریب تصحیح تولید ماده خشک برای تنش آب (WSSG)، ضریب تصحیح گسترش سطح برگ برای تنش آب (WSSL)، ضریب خاموشی برای کل تابش خورشیدی در محاسبه تقسیم تبخیر-تعرق (KET)، ضریب آلبیدوی گیاه (CALB) و عمق مؤثر استخراج آب از خاک (SOLDEP) هستند که میزان آن‌ها برای این مدل در محاسبه‌ها آورده شده است.

### نتایج و بحث

عملکرد همانندسازی شده و عملکرد مشاهده شده در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین در این شکل خط ۱:۱، خط رگرسیون و حدود اطمینان خط رگرسیون آورده شده‌اند. عملکرد مشاهده دامنه تغییر ۲۵۱۸ تا ۳۰۶۶ کیلوگرم در هکتار و با میانگین ۲۸۳۲ کیلوگرم در هکتار را داشت؛ درحالی‌که دامنه تغییر عملکرد پیش‌بینی شده ۲۲۶۰ تا ۲۸۷۰ کیلوگرم در هکتار و میانگین ۲۶۴۳ کیلوگرم در هکتار دارد. کارایی مدل با توجه به مشخصه‌های مختلف ارزیابی شد. مقدار  $R^2$  (ضریب تبیین) برای مدل ۸۳ درصد بود. در به کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد، مقدار  $R^2$  باید بیش از ۶۰ درصد باشد (Soltani *et al.*, 2006) که این شرط در این مدل وجود دارد. جذر میانگین مربعات انحرافات (RMSD)، ۲۰۵ کیلوگرم در هکتار و ضریب تغییرپذیری (CV) برابر با ۱/۶ درصد به دست آمد درحالی‌که در آزمایش‌های مزرعه‌ای ضریب تغییرپذیری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است. Torabi & Soltani (2013) نیز از مدل یادشده برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت دورگ سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط اصفهان استفاده کردند. ارزیابی مدل نشان داد عملکرد مشاهده دامنه تغییرپذیری ۱۱۳۷۰ تا ۱۵۷۷۰ کیلوگرم در هکتار و با میانگین ۱۳۱۳۰ کیلوگرم در هکتار داشت؛ درحالی‌که دامنه تغییرپذیری عملکرد پیش‌بینی شده ۱۲۴۴۰ تا ۱۵۴۴۰ کیلوگرم در هکتار و میانگین ۱۳۳۶۰ کیلوگرم در هکتار را داشت. مقدار  $R^2$  و ضریب تغییرپذیری برای مدل ذرت به ترتیب ۹۲ درصد و ۳/۴ درصد بود.

نشان می‌دهد که در تراکم ۱۶/۱۶ بوته در مترمربع، شاخص سطح برگ برابر ۰/۲۵ است. مقدار RLAI با توجه به مرحله نمو استاندارد شده (NGS)، نسبت زمان گرمایی موجود به زمان گرمایی از کاشت تا رسیدگی برداشت) با معادله‌های زیر به دست آمد: اگر  $RLAI = NGS / (NGS + EXP(a + B \times NGS))$  اگر  $NGS < BLS$  اگر  $(Y) RLAI = BSLAI \times ((1 - NGS) / (1 - BLS))$  اگر  $NGS \geq BLS$  BLS مرحله نمو استاندارد شده در آغاز پر شدن دانه است که در آن بیشینه شاخص سطح برگ (BSGLAI) حاصل می‌شود و پس از آن شاخص سطح برگ کاهش می‌یابد. A و b ضریب‌های معادله هستند و با در دست بودن آن دو نقطه به دست می‌آید. مقدار D1 و D2 در این بررسی به ترتیب (۰/۱۱، ۰/۱۵) و (۰/۹۸، ۰/۵) در نظر گرفته شد (Walker & Ogindo, 2003). D1 نشان می‌دهد که پس از طی شدن ۱۵ درصد زمان گرمایی از کاشت تا برداشت، LAI به ۱۱ درصد بیشینه خود می‌رسد و D2 نشان‌دهنده آن است که LAI با سپری شدن ۵۰ درصد زمان گرمایی به ۹۸ درصد بیشینه خود می‌رسد.

### موازنه آب خاک

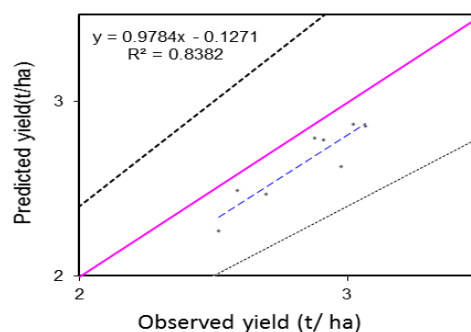
زیر برنامه موازنه آب خاک، برای همانندسازی تغییرپذیری آب خاک در این مدل گنجانده شده است. موازنه یا بیلان آب خاک، میزان آب موجود در هر روز را معین می‌سازد. برای پیش‌بینی میزان آب مصرفی مرتبط با رشد و عملکرد، لازم است که موازنه آب در عمق خاک صورت گیرد. در این معادله مشخص خواهد شد در هر روز از چه راه‌هایی و به چه میزانی آب از خاک خارج گشته است. برای موازنه آب خاک از فرمول زیر استفاده شد (Soltani *et al.*, 1999):

$$SWC_i = SWC_i + ERAIN + IRGW_i - DRAIN_i - SEVP_i - Tri \quad (8)$$

که در آن  $SWC_i$  میزان آب موجود در خاک در روز  $i$ ام،  $SWC_{i-1}$  میزان آب موجود در روز  $i-1$ ام،  $ERAIN$  میزان بارندگی مؤثر،  $IRGW_i$  میزان آب با آبیاری در روز  $i$ ام،  $DRAIN_i$  میزان زهکشی عمقی که از محل ریشه خارج شده است،  $SEVP_i$  میزان تبخیر از سطح خاک و

### نتیجه‌گیری

با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده از همانندسازی با مدل یادشده می‌توان نتیجه گرفت این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد لوبیا در محدوده تاریخ‌های کاشت مرسوم در شهرستان خمین و نیز با در نظر گرفتن تراکم‌های مختلف، به کار گرفته شود. همچنین این امکان وجود دارد تا در صورت فراهم بودن داده‌های مربوط به زیرمدل‌های گذارشناسی، تولید و توزیع ماده خشک، تغییرات سطح برگ و موازنه آب خاک و نیز نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های منطقه‌ای مربوط به تراکم و تاریخ کشت دیگر گیاهان بذر محصول، بتوان از این مدل، برای همانندسازی و پیش‌بینی رشد و عملکرد آن‌ها استفاده کرد.



شکل ۴. عملکرد همانندسازی‌شده در مقابل عملکرد پیش‌بینی‌شده در لوبیا. خط توپر، خط چین و نقطه‌چین به ترتیب خط ۱:۱، معادله رگرسیون و حدود اطمینان خط رگرسیون هستند.

Figure 4. Simulated yield versus predicted yield. Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are 1:1.15 and 1:0.85, respectively.

### REFERENCES

- Alimadadi, A., Jahansooz, M. R., Ahmadi, A., Tavakol, R. & Rostamza, M. (2006). Cowpea, common bean and mung bean radiation use efficiency, light extinction coefficient and radiation interception in double cropping. *Pajouhesh- Va- Sazandegi*, 71, 67-75. (in Farsi)
- Amini, R., Alizadeh, H. & Yousefi, A. R. (2014). Interference between red kidneybean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars and redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.). *European Journal of Agronomy*, 60, 13-21.
- Anonymous. (2008). FAO. Statistics of Agriculture Crops in the World. <http://www.fao.org>.
- Anonymous. (2009). Statistics of Agricultural Crops. Center of Statistics and Information, Ministry of Jihad-e-Agriculture, Tehran, Iran (in Persian).
- Bayat, A. A., Sepehri, A., Ahmadvand, G. & Dorri, H. R. (2010). Effect of water deficit stress on yield and yield components of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 12(1), 42-54. (in Farsi)
- Behboudi, F., Allahdadi, E. & Mohamadi, E. (2013). The effect of vermicompost containing copper oxide (CuO) and zinc oxide (ZnO) nanoparticles on some characteristics of the wax bean. *Electronic Journal of Crop Production*, 6(2), 33-49. (in Farsi)
- Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laar, H. H. & Rabbinge, R. (1996). The School of de Wit crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 52(2/3), 171-198.
- Confalon, A., Lizaso, J., Ruiz-nogueira, B., Lopez-cedron, F. X. & Sau, F. (2010). Growth, par use efficiency, and yield components of field-grown vicia faba under different temperature and photoperiod regimes. *Field Crop Research*, 115, 140-148.
- Coulson, C. L. (1985). Radiant energy conversion in three cultivars of *Phaseolus vulgaris*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35(1-4), 21-29.
- De Wit, C. T. (1965). *Photosynthesis of leaf canopies*. Agriculture Research Reports. PUDOC, Wageningen, Netherlands.
- Egli, D. B. (1998). *Seed biology and the yield of grain crops*. CAB International, Wallingford, UK.
- Fageria, N. K. (1992). *Maximizing Crop Yields*. CRC Press.
- Ferreira, M. E., Abreu, J. P. de M., Bianco, V. V. & Monteiro, A. (1997). Predicting phasic development of green beans for processing using a model with high temperature reduction of thermal time accumulation. *Scientia Horticulturae*, 69(3/4), 123-133.
- Ghadiri, H. & Bayat, M. L. (2004). Effect of Row and Plant Spacings on Weed Competition with Pinto Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agriculture Science and Technology*, 6, 1-9.
- Ghanbari, A. & Taheri mazandarani, M. (2003). Effects of sowing date and plant density on yield of spotted bean. *Seed and Plant Improvement Journal*, 19(4), 483-496. (in Farsi)
- Hammer, G. L., Goyne, P. J. & Woodruff, D. R. (1982). Phenology of sunflower cultivars. III. Models for prediction in field environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 33, 263-274.
- Hoogenboom, G., White, J. W., Jones, J. W. & Boote, K. J. (1991). Dry bean crop growth simulation model user's guide. Florida Agricultural Experiment Station Journalno. N-00379, University of Florida, Gainesville.



18. Jones, H. G. (1992). *Plants and Microclimate*, (2<sup>nd</sup> Edition). A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, Cambridge. pp.428.
19. Kamelmanesh, M. M., Namayande, A., Dori, H. R. & Bihamta, M. R. (2012). Effects of Bean common mosaic virus on Seed Yield, Yield Components and Phenological Phases of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Under Field Conditions. *Seed and Plant Improvement Journal*, 28(1), 39-52. (in Farsi)
20. Khaledian, M. R., Mailhol, J. C., Ruelle, P. & Rosique, P. (2009). Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: the case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management*, 96(5), 757-770.
21. Kiniry, J. R. & Knievel, D. P. (1995). Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agronomy Journal*, 87, 228-234.
22. Kiniry, J. R., Simpson, C. E., Schubert, A. M. & Reed, J. D. (2004). Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. *Field Crops Research*, 91, 297-306.
23. Kiniry, J. R., Tischler, C. R. & Van Esbroeck, G. A. (1999). Radiation use efficiency and leaf CO<sub>2</sub> exchange for diverse C4 grasses. *Biomass and Bioenergy*, 17, 95-112.
24. Lak, M. R., Ghanbari, A. A., Dorri, H. R. & Gahadiri, A. (2009). Effect of Planting Date on Seed Yield and Fusarium Root Rot Disease Severity in Chitti Bean in Khomein. *Seed and Plant Production Journal*, 25(3), 275-286. (in Farsi)
25. Loomis, R. S. & Williams, W. A. (1963). Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Science*, 3, 67-72.
26. Mailhol, J. C., Olufayo, A. A. & Ruelle, P. (1997). Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management*, 35, 167-182.
27. Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E. & Goudriaan, J. (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 74(1), 83-111.
28. Marrou, H., Sinclair, T. R. & Metral, R. (2014). Assessment of irrigation scenarios to improve performances of Lingotbean (*Phaseolus vulgaris*) in southwest France. *European Journal of Agronomy*, 59, 22-28.
29. Meireles, E. J. L., Pereira, A. R., Sentelhas, P. S., Stone, L. F. & Zimmermann, F. G. P. (2002). Calibration and test of the cropgro-dry bean Model for edaphoclimatic conditions in the savanas of central Brazil. *Scientia Agricola*, 59(4), 723-729.
30. O'Connell, M. G., O'Leary, G. J., Whitfield, D. M. & Connor, D. J. (2004). Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Research*, 85(2/3), 111-124.
31. Oliveira, E. C., Costa, J. M. N., Paula Júnior, T. J., Ferreira, W. P. M., Justino, F. B. & Neves, L.O. (2012). The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. *Acta Scientiarum*, 34(3), 239-246.
32. Pannkuk, C. D., Stockle, C. O. & Papendick, R. I. (1998). Evaluating CropSyst Simulations of Wheat Management in a Wheat-Fallow Region of the US Pacific Northwest. *Agricultural Systems*, 57(2), 121-134.
33. Pengelly, B. C., Blamey, F. P. C. & Muchow, R. C. (1999). Radiation interception and the accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. *Field Crops Research*, 63(2), 99-112.
34. Perry, M. W., Siddique, K. H. M. & Wallace, J. F. (1987). Predicting phenological development of Australian wheats. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38, 809-819.
35. Rezaei, A. & KamgarHaghighi, A. (2009). The effect of water stress at different growth stages on the yield of cowpeas. *Journal of soil research (soil and water science)*, 23(1), 17-124. (in Farsi)
36. Soghani, M., Vaezi, S. H. & Sabaghpour, S. H. (2010). Evaluation of morpho-physiological characteristics, grain yield and its components in common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 12 (4), 436-451. (in Farsi)
37. Soltani, A. (2009). *Mathematical Modeling in Field Crops*. JDM Press. (in Farsi)
38. Soltani, A. & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103(3), 198-207.
39. Soltani, A., Ghasemi, K., Rahimzad, F., Moghadam, M. & Mirnia, M. (1999). CICER: A computer model for simulation of growth, yield of cicer. *Agricultural Knowledge journal*, 89-106. (in Farsi)
40. Soltani, A., Robertson, M. J., Rahemi-Karizaki, A., Pooreza, J. & Zarei, H. (2006). Modeling biomass accumulation and partitioning in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192, 379-389.
41. Soltani, A., Robertson, M. J., Rahemi-Karizaki, A., Poorreza, J. & Zarei, H. (2006). Modeling Biomass accumulation and partitioning in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 92, 379-389.

42. Soltania, A. F., Zeynali, E. & Galeshi, S. A. (2000). A computer program for simulation of canopy photosynthesis and transpiration in crops. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 7(1), 35-44. (in Farsi)
43. Tesfaye, K., Walker, S. & Tsubo, M. (2006). Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment *European Journal of Agronomy*, 25(1), 60-70.
44. Torabi, B. & Soltani, A. (2013). A Simple Model for Predicting Grain Yield of Maize Single Cross Hybrid. *Journal of Crop Production and Processing*, 3(7), 47-59. (in Farsi)
45. Tsubo, M., Walker, S. & Mukhala, E. (2001). Comparison of radiation uses efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crop Research*, 71(1), 17-29.
46. Walker, S. & Ogindo, H. O. (2003). The water budget of rained maize and bean intercrop. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(20-27), 919-926.
47. Watson, D. J. (1974). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties and within and between years. *Annual Botany*, 11, 41-46.
48. Wien, H. C. (1982). Dry matter production, leaf area development and light interception of cowpea lines with broad and narrow leaflet shape. *Crop Science*, 22(4), 733-737.