



## پایش عملکرد گندم و چغندر قند در استان خراسان: ۱- تجزیه و تحلیل روش‌های پیش‌بینی عملکرد پتانسیل

مهدی نصیری محلاتی<sup>۱\*</sup> - علیرضا کوچکی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

### چکیده

پیش‌بینی عملکرد پتانسیل در شرایط بدون محدودیت آب و عناصر غذایی و عاری از آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز اولین قدم در تخمین خلاء عملکرد محصولات زراعی است. عدم دسترسی به داده‌های کامل و دقیق محدودیت اصلی در استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی برای برآورد عملکرد پتانسیل است و در این صورت استفاده از مدل‌های ساده شده جایگزین مناسبی محسوب می‌شود. البته پیش از استفاده از این مدل‌های ساده اطمینان از قدرت پیش‌بینی آنها در مقایسه با مدل‌های شبیه‌سازی ضروری می‌باشد. در این پژوهش عملکرد پتانسیل گندم و چغندر قند در سه منطقه از استان خراسان رضوی (تربت حیدریه، مشهد و نیشابور) با استفاده از سه روش ساده محاسباتی و نیز با دو مدل شبیه‌سازی برآورد و دقت روش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. محاسبات ساده بر اساس روش فائو (FAO)، مدل تغییر یافته فائو (FAO-M) و روشی مبتنی بر کارایی مصرف نور (RUE) انجام شد که در آنها عملکرد پتانسیل به وسیله دو معادله و با استفاده از میانگین ماهانه داده‌های آب و هوایی برآورد می‌شود. عملکرد پتانسیل دو محصول در همان مناطق توسط مدل‌های LINTUL و SUCROS که بر اساس داده‌های روزانه آب و هوایی اجرا می‌شوند و قبلاً برای مطالعات در مقیاس منطقه‌ای و اسنجی شده بودند نیز پیش‌بینی شد و قدرت پیش‌بینی ۵ روش بر اساس شاخص‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین عملکرد مشاهده شده گندم در سه منطقه تحت بررسی ۷/۱۸ تن در هکتار بود و در ۵ روش تحت بررسی میانگین عملکرد پتانسیل گندم سه منطقه بین ۶/۹۲ تا ۷/۶۳ تن در هکتار پیش‌بینی شد. بر این اساس خطای پیش‌بینی در مورد مدل‌های شبیه‌سازی ۱/۳۹ و برای سه روش ساده کمتر از ۵ درصد (۴/۶۴٪) به دست آمد. با وجودی که مقدار نسبی جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE_n$ ) برای سه روش ساده بیشتر از مدل‌های شبیه‌سازی بود ولی بین ۷/۱۱ تا ۱۰/۱۶ درصد و در محدوده مطلوب قرار داشت. به علاوه کارایی مدل‌سازی (ME) نیز مثبت و به جز در روش RUE بالاتر از ۰/۶۰ بود. میانگین عملکردهای اندازه‌گیری شده چغندر قند ۸۲/۵ تن در هکتار بود در حالی که میانگین عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده به روش‌های مختلف در محدوده ۸۹-۹۱ تن در هکتار قرار داشت. دقت پیش‌بینی عملکرد چغندر به وسیله روش‌های ساده کمتر از مدل‌های شبیه‌سازی بود ولی قابلیت پیش‌بینی آنها بر اساس شاخص‌های آماری قابل قبول محسوب شد به طوری که  $RMSE_n$  محاسبه شده برای این روش‌ها از ۱۱/۵ درصد تجاوز نکرد. در تعیین اعتبار متقابل روش‌های ساده با مدل‌های شبیه‌سازی نیز همبستگی معنی‌داری بین عملکردهای پیش‌بینی شده توسط روش‌های ساده و مدل‌های پیچیده به دست آمد که نشان‌دهنده انطباق مطلوب آنهاست. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از روش‌های محاسباتی ساده و حداقل داده‌های آب و هوایی می‌توان عملکرد پتانسیل محصولات زراعی را با دقت قابل قبولی برآورد کرد. چنین روش‌هایی در صورت عدم دسترسی به مدل‌های شبیه‌سازی که به طور دقیق و اسنجی شده باشند و در اختیار نداشتن داده‌های کامل آب و هوایی روزانه جهت تخمین خلاء عملکرد در مقیاس منطقه‌ای و نیز در پهنه‌بندی‌های اگرواکولوژیک مفید خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عملکرد، کارایی مدل‌سازی، مدل‌های خلاصه، مدل‌های شبیه‌سازی

### مقدمه

بیماری‌ها و علف‌های هرز) قرار گیرند عملکرد آنها توسط میزان تشعشع خورشیدی، درجه حرارت، غلظت دی اکسید کربن و خصوصیات ژنتیکی ارقام تعیین می‌شود. این عملکرد اصطلاحاً به عملکرد بالقوه (پتانسیل<sup>۲</sup>) موسوم است (van Ittersum *et al.*, 2003) و بدیهی است که برای یک گونه زراعی مشخص در مناطق

چنانچه گیاهان زراعی در شرایطی بدون وجود محدودیت عوامل غیر زنده (آب، عناصر غذایی و آلاینده‌ها) و عوامل زنده (آفات،

۱- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
\* - نویسنده مسئول : (Email: mnassiri@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/gsc.v16i4.62556

2- Potential yield

مشاهده شده، حتی در شرایط پتانسیل تفاوت خواهد داشت (Boote et al., 1996). به علاوه واسنجی (کالیبراسیون) و تعیین اعتبار این مدل‌ها به داده‌های دقیق آزمایشی نیاز دارد. موچو و کراپف (Muchow and Kropff, 1997) بیان داشتند که حتی مدل‌های بسیار قوی نیز بدون وجود داده‌های دقیق حاصل از آزمایشات مزرعه‌ای جهت تعیین پارامترها و سنجش اعتبار پیش‌بینی، قابلیت مطلوبی در برآورد عملکرد بالقوه ندارند. بنابراین در صورت عدم دسترسی به داده‌های دقیق و صحیح استفاده از محاسبات پیچیده ریاضی به کار رفته در مدل‌های رشد چندان سودمند نخواهد بود. عدم دسترسی به داده‌های کامل و صحیح از مهمترین مشکلات محققین کشور هنگام استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در برآورد عملکرد بالقوه، خلاء عملکرد و نیز در مطالعات مربوط به پهنه‌بندی می‌باشد. در چنین شرایطی به کارگیری مدل‌های ساده شده<sup>۳</sup> که در آنها الگوریتم محاسباتی مدل‌های رشد در قالب دو یا چند معادله ساده ارائه می‌شود راهکاری جایگزین محسوب می‌شود (Brooks and Tobias, 1999). نمونه‌ای از این روش‌های ساده توسط فائو برای برآورد عملکرد پتانسیل در پهنه‌بندی‌های آگرواکولوژیکی ارائه شده است (FAO, 1978; FAO, 1981). البته نحوه انجام محاسبات در این مدل‌های خلاصه شده در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته و موارد کاربرد آن‌ها توسط محققین کشور بسیار محدود است. در این تحقیق عملکرد بالقوه دو محصول مهم استان خراسان یعنی گندم (*Triticum aestivum*) به‌عنوان محصولی زمستانه و دانه‌ای و چغندر قند (*Beta vulgaris*) به‌عنوان گیاهی بهاره و ریشه‌ای در شرایط بدون محدودیت به نحوی که تنها میزان تشعشع خورشیدی و درجه حرارت تعیین‌کننده عملکرد باشند با استفاده از چند روش محاسباتی ساده و نیز به‌وسیله مدل‌های شبیه‌سازی پیش‌بینی شده و قابلیت روش‌های ساده نسبت به مدل‌های پیچیده مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه سه روش محاسباتی ساده برای برآورد عملکرد پتانسیل گندم و چغندر قند به کار رفته است، در هر سه روش فرض بر این است که رشد محصولات زراعی الگویی سیگموئیدی داشته و دارای سه مرحله متمایز شامل رشد کند اولیه (رشد نمایی<sup>۴</sup>)، رشد خطی<sup>۵</sup> و در نهایت ثابت شدن تجمع ماده خشک می‌باشد. رشد نمایی و خطی به ترتیب ۴۵ و ۴۰ درصد از کل دوره رشد را شامل می‌شود و در ۱۵ درصد باقی‌مانده، سرعت رشد کند شده و به صفر می‌رسد. با

مختلف متفاوت خواهد بود. در برنامه‌ریزی‌های تولید محصولات زراعی آگاهی از میزان عملکرد بالقوه و تفاوت آن با عملکرد واقعی یعنی محصول واقعی قابل برداشت از مزارع که نشان‌دهنده خلاء عملکرد<sup>۱</sup> می‌باشد بسیار مفید خواهد بود (Licker et al., 2010). در واقع خلاء عملکرد تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل زنده و غیر زنده محیطی به وجود می‌آید که از طریق پایش<sup>۲</sup> قابل تخمین می‌باشند (Caldiz et al., 2002). بر این اساس در صورت پیش‌بینی عملکرد بالقوه، پایش عملکرد و کمی کردن تأثیر عوامل محیطی مؤثر بر آن، و تحلیل خلاء عملکرد امکان ارائه راهکارهای اجرایی برای پر کردن این خلاء و نزدیک کردن عملکرد واقعی به عملکرد بالقوه فراهم می‌گردد. (Kropff et al., 2001; Bhatia et al., 2008). کالدیز و همکاران (Caldiz et al., 2002) در بررسی جامعی چارچوبی را برای آنالیز خلاء عملکرد در مقیاس وسیع ارائه کردند. اساس این روش پیش‌بینی عملکرد پتانسیل و مقایسه آن با عملکرد واقعی است. بنابراین برآورد عملکرد پتانسیل اولین گام در تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد می‌باشد.

برآورد عملکرد بالقوه مستلزم کاشت ارقام مختلف گیاهان زراعی در آزمایشات مکرر در مناطقی با شرایط اقلیمی مختلف و در عین حال ایجاد شرایط کاملاً مطلوب برای رشد و نمو گیاه می‌باشد و بدیهی است که اجرای این نوع پژوهش‌ها از نظر زمانی طولانی و بسیار پرهزینه می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی ابزار بسیار قوی جهت پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی در شرایط مختلف محیطی هستند. افزایش قابلیت‌های مدل‌های رشد باعث شده تا از این مدل‌ها در مقیاس‌های مختلف برای پیش‌بینی عملکرد استفاده شود. در واقع مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی رشد قادرند تا نوسانات عملکرد را در سطح مزرعه (Batchelor et al., 2002)، منطقه (Jagtap and Priya and Kiniry et al., 2004; Jones 2002) کشور (Priya and Stehfest et al., 2001) و یا حتی در مقیاس جهانی (Shibasaki, 2001) پیش‌بینی کنند. این مدل‌ها در ایران نیز در مطالعات مختلف در سطح ملی و منطقه‌ای با نتایج مطلوب به کار برده شده‌اند (Koocheki et al., 2006; Nassiri Mahallati et al., 2006; Soltani et al., 2001).

علی‌رغم کاربردهای بسیار وسیع مدل‌های شبیه‌سازی در مطالعات مختلف و در مقیاس‌های متفاوت از کرت تا منطقه یا حتی جهانی، قابلیت پیش‌بینی آنها به شدت تابع داده‌های ورودی است. لذا در شرایطی که داده‌های آب و هوایی و گیاهی مورد نیاز برای اجرای مدل در اختیار نباشد پیش‌بینی مدل‌ها به میزان قابل توجهی با مقادیر

3- Summary model

4- Exponential growth

5- Linear growth

1- Yield gap

2- Monitoring

روش فائو محسوب می‌شود کل ماده خشک تولید شده (TDM)، کیلوگرم در هکتار) از معادله ۳ به دست می‌آید:

$$TDM = 2500 + DM_L + DM_F \quad (3)$$

که در آن ۲۵۰۰ میزان ماده خشک تولید شده در مرحله نمایی (کیلوگرم در هکتار)،  $DM_L$  و  $DM_F$  به ترتیب ماده خشک تولیدی در مراحل خطی و نهایی (کیلوگرم در هکتار) می‌باشند. بنابراین مقدار TDM با جای گذاری  $DM_L$  و  $DM_F$  از معادله ۴ به دست می‌آید:

$$TDM = 2500 + (0.4 \times p \times LGR) + (0.15 \times p \times 0.5 \times LGR) \quad (4)$$

که در آن LGR سرعت رشد در مرحله خطی (کیلوگرم در هکتار در روز) p طول دوره رشد (روز) می‌باشد. ضرایب ۰/۴ و ۰/۱۵ به ترتیب نشان دهنده سهم دوره رشد خطی و رشد نهایی از کل دوره رشد بوده و سرعت رشد در مرحله نهایی نصف LGR در نظر گرفته شده است. معادله ۴ را پس از ساده شدن می‌توان به صورت معادله ۵ بازنویسی کرد:

$$TDM = 2500 + (0.475 \times p \times LGR) \quad (5)$$

در صورت عدم دسترسی به داده‌های آزمایشی، سرعت رشد در مرحله خطی از معادله ۶ برآورد می‌شود:

$$LGR = GPHOT \times (1 - C_m \times C_p) \times E_c \times C_L \quad (6)$$

GPHOT میانگین سرعت فتوسنتز ناخالص کانوبی (کیلوگرم گلوکز در هکتار در روز) می‌باشد که نحوه به دست آوردن آن قبلاً در روش فائو توصیف شد.  $C_m$  ضریب تنفس نگهداری (کیلوگرم گلوکز به ازای کیلوگرم ماده خشک) در طی دوره رشد خطی است، این ضریب تابع درجه حرارت بوده و مقدار آن برای میانگین درجه حرارت در طی دوره رشد خطی و بر حسب سرعت تنفس نگهداری محصولات مختلف از شکل ۴ به دست می‌آید.

برای استفاده از شکل ۴ ابتدا باید مقدار  $R_m$  را بسته به نوع محصول تحت بررسی از جدول ۱ مشخص ساخت برای مثال مقدار  $R_m$  برای چغندر قند معادل ۰/۰۱ کیلوگرم گلوکز به ازای کیلوگرم ماده خشک در روز می‌باشد. در شکل ۴ مقدار  $C_m$  چغندر قند از منحنی ۱ قرائت می‌شود و در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد (۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای مرجع) برابر با ۰/۲۰ خواهد بود.

$C_p$  ضریب تصحیح تنفس نگهداری برای شرایطی است که طول دوره رشد خطی بیشتر یا کمتر از طول استاندارد این دوره (۴۶ روز) باشد. مقدار این ضریب از شکل ۵ به دست می‌آید.

$E_c$  ضریب تبدیل گلوکز به ماده خشک می‌باشد و مقدار آن برای محصولات مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.  $C_L$  ضریب تصحیح مربوط به بسته بودن کامل کانوبی در طی رشد خطی است، مقدار آن در  $LAI=5$  برابر یک، در  $LAI=4$  معادل ۰/۹ و در  $LAI=3$ ، ۰/۷ بوده و میانگین آن برای استفاده در معادله ۳ برابر ۰/۹۵ می‌باشد.

این فرضیات محاسبات مربوط به سه روش به شرح زیر است.

### برآورد عملکرد بالقوه به روش فائو

در این روش که توسط فائو برای استفاده در پهنه‌بندی‌های اگرواکولوژیکی محصولات زراعی ارائه شده (FAO, 1978; FAO, 1981) سرعت رشد در مرحله خطی (LGR)، کیلوگرم در هکتار در روز) و کل ماده خشک تولید شده (TDM)، کیلوگرم در هکتار) در شرایط پتانسیل از معادلات ۱ و ۲ به دست می‌آید:

$$LGR = \frac{0.72 \times GPHOT}{(1 + 0.25 \times C_i \times p)} \quad (1)$$

$$TDM = \frac{0.36 \times GPHOT}{\left(\frac{1}{p} + 0.25 \times C_i\right)} \quad (2)$$

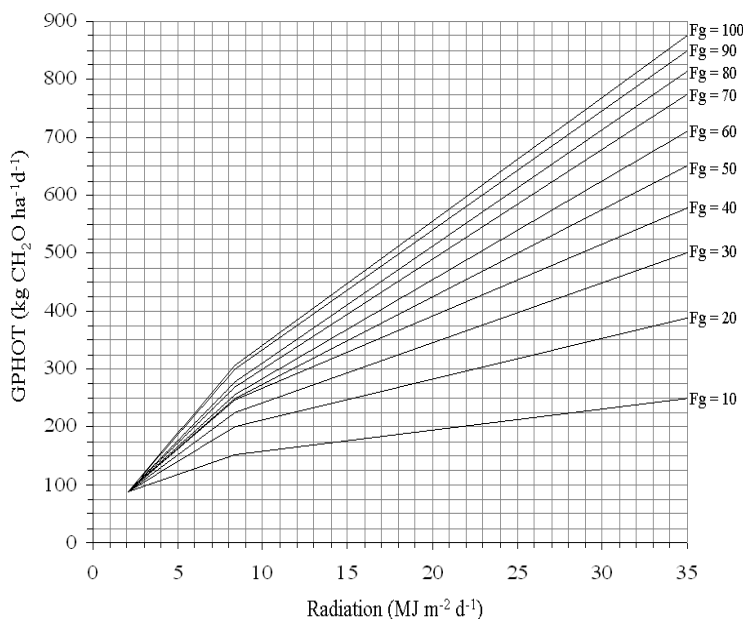
در این معادلات GPHOT میانگین سرعت فتوسنتز ناخالص کانوبی (کیلوگرم گلوکز در هکتار در روز) p طول دوره رشد (روز) و  $C_i$  ضریب تنفس نگهداری<sup>۱</sup> است و مقادیر ثابت این معادلات مربوط به تنفس رشد<sup>۲</sup> و تصحیح ضریب تنفس نگهداری می‌باشد. مقدار GPHOT در هر سطحی از تشعشع روزانه خورشیدی از شکل ۱ قرائت می‌شود. در این شکل مقدار GPHOT براساس حداکثر سرعت فتوسنتز ناخالص برگ در شرایط اشباع نوری<sup>۳</sup> ( $F_g$ ، کیلوگرم  $CO_2$  در هکتار در ساعت) برآورد شده است و برای استفاده از آن ابتدا باید مقدار  $F_g$  معلوم باشد.

سرعت فتوسنتز برگ علاوه بر گونه گیاهی تابعی از درجه حرارت نیز می‌باشد و در واقع  $F_g$  حداکثر سرعت فتوسنتز تک برگ در درجه حرارت‌های مختلف است. در شکل ۲ مقدار  $F_g$  برای گروه‌های مختلف محصولات زراعی در دامنه وسیعی از درجه حرارت ارائه شده است، بر اساس این شکل در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار  $F_g$  برای چغندر قند معادل ۴۰ کیلوگرم  $CO_2$  در هکتار در ساعت می‌باشد. با مراجعه به مقادیر سمت راست شکل ۱ مقدار GPHOT چغندر قند در تشعشع روزانه ۲۰ مگاژول در متر مربع معادل ۴۲۰ کیلوگرم گلوکز در هکتار در روز به دست خواهد آمد.  $C_i$  نابع درجه حرارت بوده و مقدار آن برای گونه‌های لگوم و غیر لگوم از شکل ۳ استخراج می‌شود.

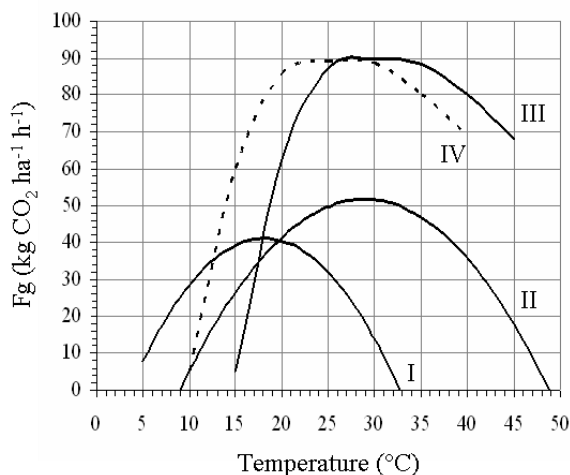
### برآورد عملکرد بالقوه با روش تغییر یافته فائو

در این روش که مدل خلاصه شده ورستیخ و ون کیولن (Versteeg and van Keulen, 1986) می‌باشد و نوع تغییر یافته

- 1- Maintenance respiration
- 2- Growth respiration
- 3- Light saturated leaf photosynthesis rate

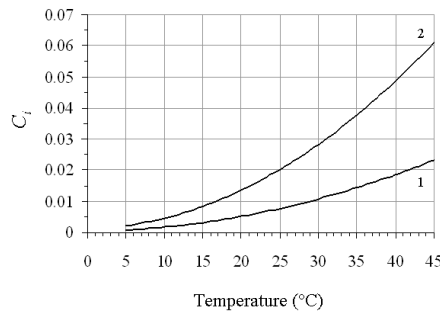


شکل ۱- سرعت فتوسنتز ناخالص روزانه (GPHOT, kg CH<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) برای کانوپی بسته (دوره رشد خطی) به عنوان تابعی از حداکثر سرعت فتوسنتز تک برگ در اشباع نوری (Fg, kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) و میزان تشعشع روزانه (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>) در عرض‌های جغرافیایی بین صفر تا ۴۰ درجه  
 Figure 1- Daily gross photosynthesis rate (GPHOT, kg CH<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) for closed canopy (linear growth period) as function of maximum photosynthesis rate of single leaf at light saturation (Fg, kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) and daily radiation (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>) in latitudes between 0-40. Source: Versteeg and van Keulen, 1986.



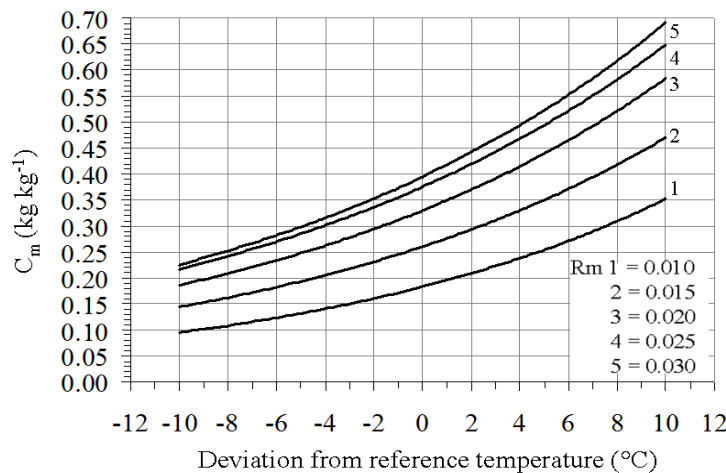
شکل ۲- رابطه بین حداکثر سرعت فتوسنتز تک برگ در شرایط اشباع نوری (Fg, kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) و درجه حرارت در چهار گروه از گیاهان زراعی: I گونه‌های C3 مناطق معتدله (گندم، جو، سیب زمینی، چغندر قند)، II گونه‌های C3 مناطق گرم (برنج، سویا، پنبه، کاساوا)، III گونه‌های C4 (ذرت، سورگوم، ارزن، نیشکر)، IV واریته‌هایی از گونه‌های C4 (ذرت، سورگوم) که به دمای پایین سازگار هستند، Fg در این گروه مشابه گروه III ولی در دمای 5° C پایین تر است.

Figure 2- Relation between maximum photosynthesis rate of single leaf at light saturation (Fg, kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) and temperature in 4 groups of crop species: I) Temperate C3 species (wheat, barley, potatoes, sugar beet), II) Warm climate C3 species (rice, soybean, cotton, cassava), III) C4 species (corn, sorghum, millet, sugarcane) IV) cultivars of C4 species (corn, sorghum) adapted to lower temperature, Fg is the same as group III but in 5 C° lower temperature. Versteeg and van Keulen, 1986



شکل ۳- رابطه بین ضریب تنفس نگهداری ( $C_i$  در معادلات ۱ و ۲) و میانگین درجه حرارت در طی فصل رشد برای (۱) گونه‌های غیر بقولات و (۲) گونه‌های بقولات

Figure 3- Relation between coefficient of maintenance respiration ( $C_i$  in Equations 5 and 6) and average growth period temperature for 1) non-leguminous species and b) leguminous species. Source: Versteeg and van Keulen, 1986



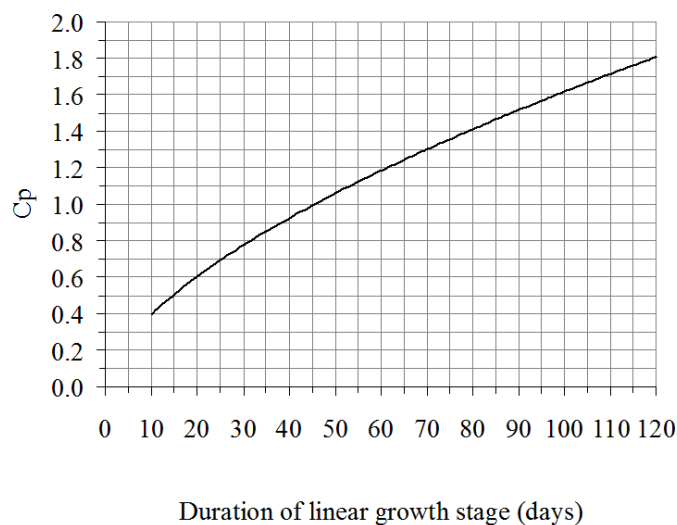
شکل ۴- تصحیح ضریب تنفس نگهداری ( $C_m$ ,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) بر اساس تغییر درجه حرارت نسبت به دمای مرجع (ref) در طی دوره رشد خطی ۴۶ روزه برای ۵ گروه از گیاهان زراعی (جدول ۱) با مقادیر مختلف سرعت تنفس روزانه ( $R_m$ ,  $\text{kg CH}_2\text{O kg DM}^{-1} \text{d}^{-1}$ ، دمای مرجع برای گونه‌های C3 و C4 به ترتیب ۲۰ و ۳۰ °C می‌باشد).

Figure 4- Correction of maintenance respiration coefficient ( $C_m$ ,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) for deviation from reference temperature (ref) during linear growth period (46 days) in 5 groups of crop species (Table 1) with different daily respiration rates ( $R_m$ ,  $\text{kg CH}_2\text{O kg DM}^{-1} \text{d}^{-1}$ ), reference temperature for C3 and C4 species is 20 and 30 °C, respectively. Source: Versteeg and van Keulen, 1986

جدول ۱- سرعت تنفس نگهداری ( $R_m$ ,  $\text{kg CH}_2\text{O kg DM}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) و ضریب تبدیل گلوکز به ماده خشک ( $E_c$ ,  $\text{kg DM kg}^{-1} \text{CH}_2\text{O}$ ) در دمای مرجع (به ترتیب ۲۰ و ۳۰ °C برای گیاهان زراعی معتدله و گرمسیری)

Table 1- Maintenance respiration rate ( $R_m$ ,  $\text{kg CH}_2\text{O kg DM}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) and conversion efficiency ( $E_c$ ,  $\text{kg DM kg}^{-1} \text{CH}_2\text{O}$ ) at reference temperature (20 and 30 °C for temperate and tropical species, respectively). Source: Versteeg and van Keulen, 1986

نوع محصول	Crop group	$R_m$	$E_c$
گیاهان ریشه‌ای/غده ای	Root/tuber crops	0.010	0.75
غلات	Cereals	0.015	0.70
دانه‌های پروتئینی	Protein-rich seed crops	0.025	0.65
دانه‌های روغنی	Oil-rich seed crops	0.030	0.50



شکل ۵- ضریب  $C_p$  برای تصحیح ضریب تنفس نگهداری ( $C_m$ ) در مقادیر مختلف طول دوره رشد خطی، مقدار  $C_p$  در رشد خطی ۴۶ روزه برابر ۱ است.

Figure 5-  $C_p$  factor for correction of maintenance respiration coefficient ( $C_m$ ) at different durations of linear growth period,  $C_p$  is equal 1 for liner growth period of 46days. Source: Versteeg and van Keulen, 1986.

کاهش یافته و مجدداً به صفر خواهد رسید (شکل ۶). این الگو تقریباً در تمام گیاهان زراعی مشاهده می‌شود البته در محصولات نظیر چغندر قند که در زمان برداشت هنوز کانوبی بسته‌ای دارند، کاهش  $F_{abs}$  صورت نمی‌گیرد. در روش نان هبل سرعت رشد در مرحله خطی (LGR، کیلوگرم در هکتار در روز) و کل ماده خشک تولید شده (TDM، کیلوگرم در هکتار) از معادلات ۷ و ۸ برآورد می‌شوند:

$$LGR = RUE \times I_{abs} \times 10 \quad (7)$$

$$TDM = \sum I_{abs} \times RUE \times 10 \quad (8)$$

در این معادلات RUE کارایی مصرف نور (گرم بر مگاژول) و  $I_{abs}$  میزان تشعشع جذب (مگاژول در متر مربع در روز) می‌باشند و عدد ۱۰ واحدها را به کیلوگرم در هکتار تبدیل می‌کند.

یادآوری می‌شود که در معادله ۷  $I_{abs}$  معادل تشعشع روزانه در بالای کانوبی است زیرا فرض بر این است که در مرحله رشد خطی  $F_{abs}$  برابر ۱ بوده (شکل ۶) و در نتیجه نور به‌طور کامل توسط کانوبی جذب می‌شود. در این روش نیز داده‌های مورد نیاز ساده و شامل RUE گونه زراعی و میزان تشعشع روزانه است. در این مطالعه کارایی مصرف نور برای گندم ۱/۶۰ گرم بر مگاژول (O'Connell *et al.*, 2011; Nassiri Mahallati *et al.*, 2004) و برای چغندر قند ۱/۴۸ گرم بر مگاژول (Parsa, 2008; Richter *et al.*, 2001) منظور شده است.

در هر یک از سه مدل خلاصه شده فوق مقدار کل ماده خشک تولید شده در انتهای دوره رشد (TDM) در شاخص برداشت ضرب می‌شود تا عملکرد ماده خشک به‌دست آید، شاخص برداشت برای

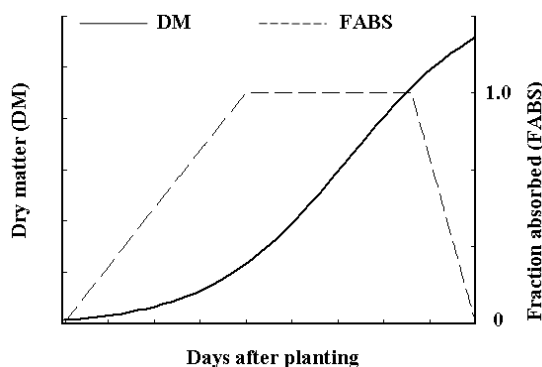
به‌طور خلاصه در روش فائو و روش تغییر یافته فائو (روش ورستیخ و ون کیولن) سرعت رشد در مرحله خطی و مقدار ماده خشک تولید شده در شرایط پتانسیل را می‌توان با دو معادله ساده برآورد کرد. داده‌های لازم برای اجرای روش فائو طول دوره رشد (تعداد روز از سبز شدن تا رسیدگی)، میانگین درجه حرارت و تشعشع روزانه در طی دوره رشد خطی است. برای اجرای روش تغییر یافته فائو نیز برای هر محصول به داده‌های طول دوره رشد، میانگین درجه حرارت ( $^{\circ}C$ ) و میانگین روزانه تشعشع خورشیدی ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) در طی دوره رشد خطی نیاز می‌باشد.

#### برآورد عملکرد بالقوه بر اساس کارایی مصرف نور

در مدل‌های پیشرفته رشد، محاسبه میزان تشعشع جذب شده روزانه مستلزم شبیه‌سازی کسری از تشعشع روزانه ( $F_{abs}$ ) است که به‌وسیله برگ‌ها جذب می‌شود،  $F_{abs}$  معمولاً بر اساس ضریب خاموشی نور و پیش‌بینی رشد روزانه شاخص سطح برگ برآورد می‌شود. نان هبل (Nonhebel, 1997) روش ساده‌ای را به‌عنوان جایگزین ارائه کرد که در آن تولید ماده خشک از حاصلضرب میزان تشعشع جذب شده در کارایی مصرف نور ( $RUE$ ) به‌دست می‌آید. در این روش فرض بر این است که  $F_{abs}$  از سبز شدن تا زمان بسته شدن کانوبی بصورت خطی افزایش یافته و از صفر به ۱ می‌رسد، در طی دوره رشد خطی معادل ۱ بوده و از پایان این دوره تا زمان رسیدگی به‌صورت خطی

حالی که در مدل (van Delden, 2001) LINTUL ماده خشک بر اساس تشعشع جذب شده و کارایی مصرف نور به دست می‌آید که با روش RUE مشابهت دارد. مدل‌های SUCROS و LINTUL قبلاً برای پیش‌بینی عملکرد گندم (Koocheki and Nassiri, 2012; Mahallati, 2016; Mondani, 2012) و چغندر قند (Koocheki *et al.*, 2010; Parsa, 2010) در شرایط پتانسیل برای استان خراسان واسنجی و تعیین اعتبار شده‌اند. لازم به ذکر است که مدل‌های SUCROS و LINTUL برای گندم بهاره طراحی شده‌اند و نیاز ورنالیزاسیون در آنها در نظر گرفته نشده است، در این تحقیق فرآیند ورنالیزاسیون به روش ارائه شده توسط کوچکی و نصیری محلاتی (Koocheki and Nassiri Mahallati, 2016) در هر دو مدل تعریف گردید.

گندم ۰/۴۵ (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2017) و برای چغندر قند ۰/۸۵ (Parsa, 2008; Nonhebel, 1997) در نظر گرفته شد. در نهایت عملکرد دانه گندم بر اساس ۱۲ درصد رطوبت و عملکرد ریشه چغندر قند بر مبنای ۲۵ درصد ماده خشک محاسبه شد. علاوه بر سه روش فائو، فائو تغییر یافته و نان هیل که در ادامه به ترتیب روش FAO-M، FAO و RUE نامیده خواهند شد دو مدل استاندارد شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی SUCROS و LINTUL نیز جهت برآورد عملکرد پتانسیل گندم و چغندر قند مورد استفاده قرار گرفت تا از این طریق بتوان قدرت پیش‌بینی روش‌های ساده را با مدل‌های پیچیده مقایسه کرد. مدل Van SUCROS (Laar *et al.*, 1997) تولید ماده خشک را بر اساس فتوسنتز ناخالص کانبوی و کسر کردن تنفس نگهداری و رشد از آن محاسبه می‌کند بنابراین با روش‌های FAO و FAO-M قابل مقایسه است در



شکل ۶- کسر تشعشع جذب شده ( $F_{abs}$ ) توسط گیاهان زراعی در طی مراحل مختلف رشد زمان شروع و پایان دوره رشد خطی با پیکان نشان داده شده است.

Figure 6- Fraction of absorbed radiation ( $F_{abs}$ ) by crops during different growth stages, arrows shows start and the end of linear growth phase

### مقایسه روش‌های مختلف

داده‌های مورد نیاز برای تعیین اعتبار روش‌های پیش‌بینی عملکرد از نتایج آزمایشات اجرا شده در شرایط بهینه رشد برای گندم در ایستگاه‌های تحقیقاتی استان خراسان و نیز عملکردهای گزارش شده از مزارع رکورگیری جمع‌آوری شد (زارع فیض آباد، مکاتبات شخصی).

جهت ارزیابی دقت روش‌های مختلفی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت مقادیر پیش‌بینی شده برای عملکرد پتانسیل گندم و چغندر قند توسط هر روش با عملکردهای مشاهده شده در آزمایشات ایستگاهی مقایسه شدند و اعتبار روش‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری تعیین گردید. میانگین اریبی<sup>۱</sup> (MB) که میانگین تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده ( $P_i$ ) از مشاهدات ( $O_i$ ) می‌باشد (معادله ۹) معیاری از

در ادامه عملکرد پتانسیل گندم در شهرستان‌های مشهد، تربت حیدریه و نیشابور و در مورد چغندر قند در شهرستان‌های مشهد، تربت حیدریه و فریمان به وسیله ۵ روش فوق برآورد گردید. لازم به ذکر است که این شهرستان‌ها بر مبنای دسترسی به مقادیر عملکرد در آزمایشات ایستگاهی و نیز عملکردهای ثبت شده از مزارع پر محصول در فاصله سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۹۲ انتخاب شدند. داده‌های هواشناسی (درجه حرارت و تعداد ساعات آفتابی) برای اجرای مدل‌ها از ایستگاه‌های هواشناسی شهرستان‌های تحت بررسی جمع‌آوری شد. برای اجرای مدل‌های شبیه‌سازی از داده‌های روزانه و در مدل‌های خلاصه شده از میانگین ماهانه استفاده شد. میزان تشعشع روزانه خورشیدی بر مبنای عرض جغرافیایی و با احتساب تعداد ساعات آفتابی به روش ارائه شده توسط خودریان وفان لار (Goudiraan and van Laar, 1993) برآورد گردید.

1- Mean bias

منطبق باشد. مقایسه آماری عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون با خط ۱:۱ به سهولت از طریق آزمون t امکان پذیر می‌باشد.

## نتایج و بحث

### توزیع عملکردهای مشاهده شده

توزیع عملکرد اندازه‌گیری شده گندم در آزمایشات ایستگاهی و مزارع پرمحصول (شکل a7) نشان داد که تفاوت‌های نسبتاً اندکی بین سه منطقه تحت بررسی وجود دارد. در تربت حیدریه ۷۵ درصد داده‌ها در محدوده ۷/۸۰-۶/۷۱ تن در هکتار قرار داشتند و در مشهد دامنه ۷۵ درصد عملکردها بین ۷/۶۵-۶/۹۵ تن در هکتار و در نیشابور بین ۷/۳۳-۶/۶۰ تن در هکتار بود.

این نتایج نشان‌دهنده نزدیک بودن دامنه عملکرد بین سه منطقه است به طوری که ۹۵ درصد از عملکردهای مشاهده شده گندم در این مناطق بالاتر از ۶ تن در هکتار می‌باشد. بنابراین می‌توان صدک‌های بالای توزیع را به‌عنوان تخمینی از عملکرد پتانسیل در نظر گرفت که بر اساس نتایج ارائه شده در شکل a7 برای مناطق تربت، مشهد و نیشابور به ترتیب ۸/۱، ۷/۹ و ۷/۶ تن در هکتار می‌باشد. به روشی مشابه می‌توان دامنه عملکردهای اندازه‌گیری شده را برای چغندر قند نیز ارزیابی کرد، نتایج نشان داد که تقریب عملکرد پتانسیل این محصول در تربت، مشهد و فریمان به ترتیب ۹۱، ۸۸ و ۹۰ تن در هکتار می‌باشد (شکل b7).

استفاده از نتایج آزمایشات ایستگاهی تحت مدیریت دقیق و مزارع پرمحصول از جمله روش‌های رایج در تخمین عملکرد پتانسیل محصولات زراعی محسوب می‌شود (Bell and Fischer, 1994; Lobell et al., 2009). البته باید توجه داشت که برآورد آزمایشات ایستگاهی در صورتی قابل استناد خواهد بود که طی چند سال و نیز در مناطق مختلف تکرار شده باشد (Cassman et al., 2003).

بدیهی است که حذف کلیه تنش‌های زنده و غیر زنده از محیط آزمایش در سال‌های متوالی و در چند منطقه برای دستیابی به عملکرد پتانسیل بسیار دشوار می‌باشد. عملکرد مزارع پرمحصول نیز در طی زمان ثابت نخواهد بود به‌علاوه کشاورزان هر سال روش‌های مدیریت از جمله تاریخ کاشت، رقم و میزان مصرف نهاده‌ها را تغییر می‌دهند و این امر باعث خواهد شد تا تغییرات مشاهده شده در عملکرد مزارع پرمحصول هم ناشی از شرایط اقلیمی و هم روش مدیریت باشد (Lobell et al., 2009). در نتیجه عملکرد این مزارع نیز معیار دقیقی از عملکرد پتانسیل نمی‌باشد. علی‌رغم این کاستی‌ها محققین از نتایج آزمایشات ایستگاهی و عملکرد مزارع پرمحصول و انتخاب صدک‌های بالای توزیع آنها به‌عنوان عملکرد پتانسیل در مطالعات استفاده می‌کنند (van Ittersum et al., 2013). به‌علاوه این داده‌ها تنها منبع موجود برای تعیین اعتبار نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشند (van Wart et al., 2013).

خطای مدل بوده و نزدیک بودن آن به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر در پیش‌بینی است.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (9)$$

جزر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) که از طریق معادله ۱۰ محاسبه می‌شود نیز از معیارهای رایج در تعیین اعتبار مدل‌ها می‌باشد (Loague and Green, 1991; Wilmut, 1982): که در آن  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مشاهده نام و مقدار شبیه‌سازی شده آن،  $n$  تعداد مشاهدات است. RMSE (%) نیز معیار دیگری است که در آن انحراف معیار خطای پیش‌بینی (RMSE) به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات ( $\bar{O}$ ) بیان می‌شود (معادله ۱۱) و بنابراین توصیف بهتری از قابلیت مدل را ارائه می‌کند. چنانچه مقدار RMSE (%) کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۲۰-۱۰ درصد خوب، بین ۳۰-۲۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف خواهد بود (Jamieson et al., 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (11)$$

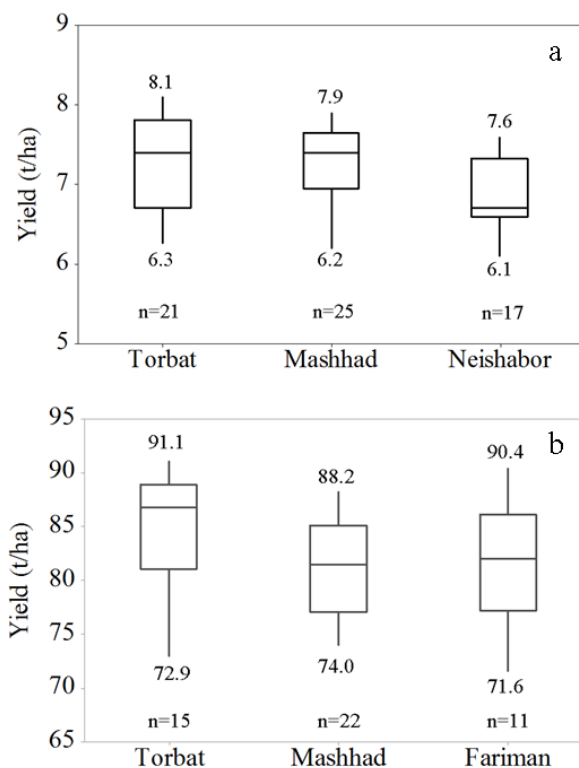
کارایی مدلسازی<sup>۲</sup> (ME) شاخص دیگری در ارزیابی اعتبار مدل‌هاست که تغییرات درون داده‌های شبیه‌سازی شده را با تغییرات موجود در داده‌های آزمایشی (مشاهدات) مقایسه می‌کند (معادله ۱۲). مقدار مطلوب ME معادل یک می‌باشد و مقادیر منفی نشان‌دهنده واریانس بیشتر در نتایج شبیه‌سازی نسبت به مشاهدات است (Loague and Green, 1991).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

برآزش رگرسیون خطی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ از جمله رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های تعیین اعتبار مدل‌هاست (Soltani et al., 2001; Nassiri, 2006). مدل در صورتی از دقت کافی در پیش‌بینی مشاهدات برخوردار خواهد بود که خط رگرسیون دارای عرض از مبدأ صفر و شیب برابر یک بوده و بر خط ۱:۱ ( $y=x$ )

1- Root Mean Squared Error  
2- Modeling Efficiency





شکل ۷- توزیع عملکردهای اندازه‌گیری شده گندم (a) و چغندر قند (b) در آزمایشات ایستگاهی و مزارع پر محصول در سه منطقه مختلف، حد پایین و بالای مستطیل به ترتیب چارک اول و سوم و خط میان مستطیل میانه را نشان می‌دهد و بر این اساس ۷۵ درصد از داده‌ها در محدوده مستطیل قرار دارند، خطوط خارج شده از مستطیل نشان‌دهنده دامنه ۹۵ درصد می‌باشند.

Figure 7- Distribution of measured yields of wheat (a) and sugar beet (b) in experimental plots and high yielding farms in 3 different regions. Lower and upper limits of the box (rectangle) shows the first and third quartiles and the inner line is median, provided that 75% of the data are covered by the box, outer lines (whiskers) show 95% interval.

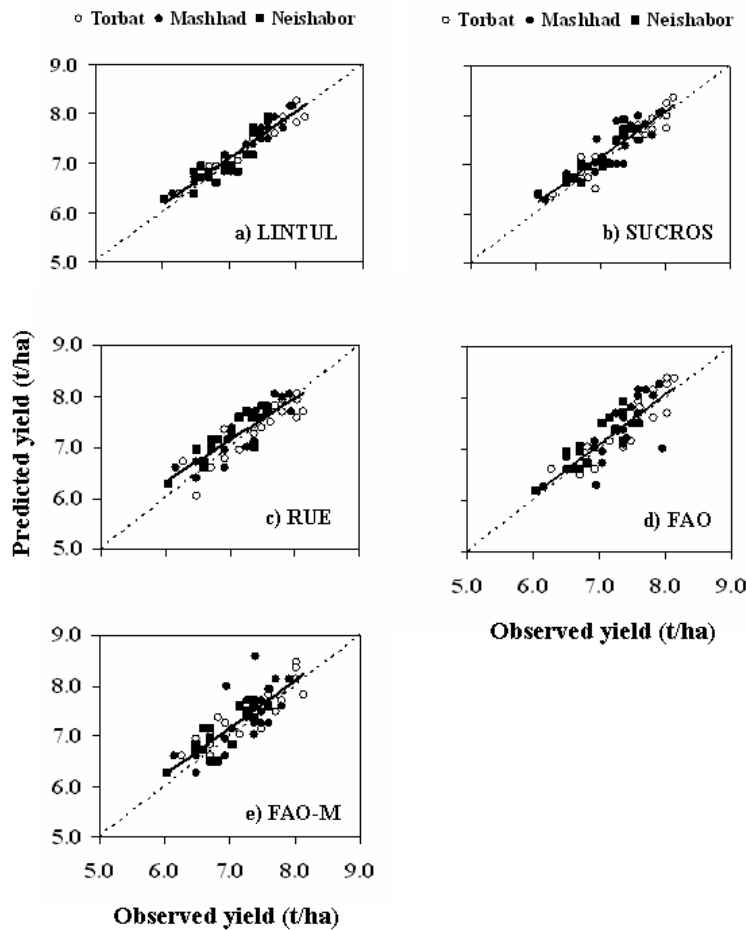
ساده را در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم تأیید می‌کند. البته درصد خطای پیش‌بینی روش‌های ساده بین ۲/۵ تا ۶ درصد بیشتر از مقدار این خطا در مدل‌های LINTUL و SUCROS بود. کارایی مدل‌سازی نیز در روش‌های ساده کمتر از مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی بود با این وجود کلیه مقادیر به‌دست آمده برای ME مثبت و بیشتر از ۰/۶ بود و تنها در روش FAO-M به کمترین مقدار یعنی ۰/۴۷ رسید. نتایج آنالیز رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده نیز نشان داد که در هر ۵ روش تحت بررسی عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون تفاوت معنی‌داری با خط ۱:۱ نداشت و این روش‌ها بین ۸۸ تا ۶۷ درصد از تغییرات موجود در عملکردهای مشاهده شده را توصیف کردند (جدول ۲). بر اساس این نتایج روش‌های RUE و FAO در مقایسه با روش FAO-M به‌طور نسبی از قابلیت بالاتری برای پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم برخوردار بودند.

### تعیین اعتبار روش‌ها

**پیش‌بینی عملکرد گندم:** در شکل ۸ نتایج مقایسه عملکردهای پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده گندم در سه منطقه از استان خراسان و در جدول ۲ شاخص‌های آماری مربوط به این مقایسات ارائه شده است. میانگین عملکرد مشاهده شده معادل ۷/۱۸ تن در هکتار بود و ۵ روش تحت بررسی عملکرد بالقوه گندم را در دامنه ۶/۹۲ تا ۷/۶۳ تن در هکتار پیش‌بینی کردند در نتیجه خطای پیش‌بینی نسبت به میانگین مشاهدات بین -۰/۳۸ تا +۰/۴۲ تن در هکتار قرار داشت.

بر اساس شاخص‌های آماری مورد استفاده در تعیین اعتبار روش‌ها، کمترین مقدار RMSE مربوط به مدل‌های شبیه‌سازی بود و در مورد روش‌های FAO، RUE، FAO-M و مقدار  $RMSE_n$  به ترتیب ۷/۱۱، ۹/۲ و ۱۰/۱۶ درصد به‌دست آمد (جدول ۲).

این مقادیر در محدوده‌ای قرار دارند که قابلیت مطلوب روش‌های



شکل ۸- مقایسه عملکرد مشاهده شده گندم در شهرستان‌های تربت حیدریه، مشهد و نیشابور و عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش شامل مدل SUCROS، مدل LINTUL، روش (RUE)، روش فائو (FAO)، روش فائو تغییر یافته (FAO-M) خطوط توپر و منقطع به‌ترتیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی و خط ۱:۱ می‌باشند.

Figure 8- Comparison of observed wheat yields in Torbat, Mashhad and Neishabor cities with predicted potential yield using 5 methods: SUCROS model, LINTUL model, RUE method, FAO method and FAO modified (FAO-M) method. Regression (solid) and 1:1 (broken) lines are also shown.

بود و کمترین مقدار این شاخص در پیش‌بینی‌های مدل‌های شبیه‌سازی به‌دست آمد (جدول ۳). کارایی مدل‌سازی (ME) نیز بین سه روش ساده تحت بررسی قابل قبول و بین ۰/۵۴ تا ۰/۶۰ قرار داشت. به‌علاوه شیب خط رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده چغندر قند در هیچ‌یک از روش‌ها تفاوت معنی‌داری با شیب خط ۱:۱ نداشت و ضریب تبیین ( $R^2$ ) خط رگرسیون نیز بین ۰/۶۰ تا ۰/۷۸ به‌دست آمد (جدول ۳).

همان‌گونه که انتظار می‌رفت مدل‌های شبیه‌سازی واسنجی شده توانایی بسیار بالایی در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل دو محصول تحت بررسی داشتند. در عین حال برآوردهای حاصل از سه روش ساده به‌ویژه روش‌های RUE و FAO نیز بر اساس شاخص‌های آماری

**پیش‌بینی عملکرد چغندر قند:** میانگین مشاهده شده عملکرد چغندر قند ۸۲/۵ تا در هکتار بود و مقادیر عملکرد بالقوه توسط ۵ روش تحت بررسی بین ۸۰/۹۱ تا ۸۴/۰۱ تن در هکتار پیش‌بینی شد. نتایج تعیین اعتبار (شکل ۹) نشان می‌دهد که روش‌های ساده مورد استفاده در این مطالعه در مقایسه با مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد بالقوه چغندر قند را با دقت خوبی برآورد کردند. میزان آریبی در هیچ‌یک از روش‌های تحت بررسی از ۱/۹۱ تن در هکتار تجاوز نکرد (جدول ۳) و در نتیجه حداکثر مقدار مطلق خطا<sup>۱</sup> (نسبت آریبی به میانگین مشاهدات) ۲/۳ درصد بود. بالاترین مقادیر  $RMSE_{II}$  معادل ۱۱/۰۳ و ۱۰/۳ درصد به‌ترتیب مربوط به پیش‌بینی روش FAO و FAO-M

1- Absolute error

به داده‌های روزانه نیار دارند. نان هیل (Nonhebel, 1994) و سلطانی و همکاران (Soltani *et al.*, 2004) نشان دادند که اجرای مدل‌های شبیه‌سازی بر اساس داده‌های ماهانه باعث شود که این مدل‌ها عملکرد را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کنند.

قابل قبول بود. البته ارزیابی آماری نتایج حاکی از آن بود که روش‌های ساده محاسباتی نیز از قابلیت خوبی برای پیش‌بینی عملکرد پتانسیل برخوردارند. باید توجه داشت که روش‌های ساده مورد استفاده در این مطالعه تولید ماده خشک را بر اساس میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی برآورد می‌کنند در حالی که مدل‌های شبیه‌سازی برای تخمین عملکرد

جدول ۲- شاخص‌های آماری جهت مقایسه ۵ روش استفاده شده برای برآورد عملکرد گندم در شرایط پتانسیل، O میانگین مشاهدات، P میانگین پیش‌بینی‌ها، MB میانگین اریبی، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، RMSE<sub>n</sub> جذر میانگین مربعات خطا نسبت به میانگین مشاهدات و ME کارایی مدل‌سازی می‌باشند. a و b به ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده و R<sup>2</sup> ضریب تبیین معادله است.

Table 2- Statistical measures for comparison between 5 methods used for estimation of potential wheat yield, mean observed yields (O), mean predicted yields (P), MB mean bias, RMSE root mean square error, RMSE<sub>n</sub> ratio of root mean square error to mean-O, ME modeling efficiency. a, b show intercept and slope of the regression line between observed and predicted yields and R<sup>2</sup> is the coefficient of determination.

	LINTUL	SUCROS	RUE	FAO	FAO-M
Mean-O (t ha <sup>-1</sup> )	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
Mean-P (t ha <sup>-1</sup> )	7.26	7.30	7.29	7.27	7.33
MB (t ha <sup>-1</sup> )	-0.08	-0.12	-0.12	-0.09	-0.16
RMSE (t ha <sup>-1</sup> )	0.19	0.25	0.28	0.31	0.37
RMSE <sub>n</sub> (%)	2.72	3.49	3.91	4.39	5.15
ME	0.85	0.76	0.70	0.62	0.47
a	0.49	0.57	1.41	0.24	0.6
b	0.94	0.93	0.81	0.97	0.93
R <sup>2</sup>	0.88	0.82	0.75	0.73	0.67

مقادیر a و b در هیچ‌یک از روش‌ها تفاوت معنی‌داری با عرض از مبدأ و شیب خط ۱:۱ (Y=X) ندارد (P<۰/۰۵)

In all methods the values of a and b are not significantly different from the intercept (a=0) or slope (b=1) of the 1:1 line (P<0.05).

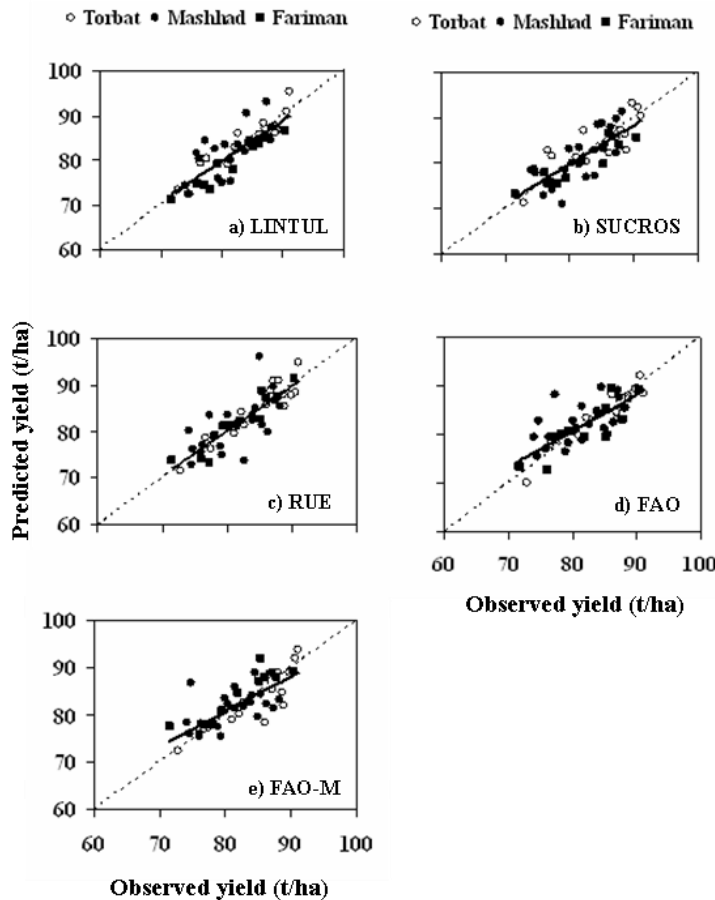
جدول ۳- شاخص‌های آماری جهت مقایسه ۵ روش استفاده شده برای برآورد عملکرد چغندر قند در شرایط پتانسیل، O میانگین مشاهدات، P میانگین پیش‌بینی‌ها، MB میانگین اریبی، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، RMSE<sub>n</sub> جذر میانگین مربعات خطا نسبت به میانگین مشاهدات و ME کارایی مدل‌سازی می‌باشند. a و b به ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده و R<sup>2</sup> ضریب تبیین معادله است.

Table 4- Statistical measures for comparison between 5 methods used for estimation of potential sugar beet yield, mean observed yields (O), mean predicted yields (P), MB mean bias, RMSE root mean square error, RMSE<sub>n</sub> ratio of root mean square error to mean-O, ME modeling efficiency. a, b show intercept and slope of the regression line between observed and predicted yields and R<sup>2</sup> is the coefficient of determination.

	LINTUL	SUCROS	RUE	FAO	FAO-M
Mean-O (t ha <sup>-1</sup> )	82.50	82.50	82.50	82.50	82.50
Mean-P (t ha <sup>-1</sup> )	82.09	81.91	82.50	82.56	82.55
MB (t ha <sup>-1</sup> )	0.40	0.59	-0.01	-0.06	-0.05
RMSE (t ha <sup>-1</sup> )	3.14	3.43	3.28	3.29	3.54
RMSE <sub>n</sub> (%)	3.80	4.16	3.98	3.99	4.29
ME	0.64	0.57	0.60	0.60	0.54
a	7.25	10.97	3.59	20.89	20.77
b	0.91	0.86	0.95	0.74	0.75
R <sup>2</sup>	0.7	0.64	0.69	0.62	0.58

مقادیر a و b در هیچ‌یک از روش‌ها تفاوت معنی‌داری با عرض از مبدأ و شیب خط ۱:۱ (Y=X) ندارد (P<۰/۰۵)

In all methods the values of a and b are not significantly different from the intercept (a=0) or slope (b=1) of the 1:1 line (P<0.05).

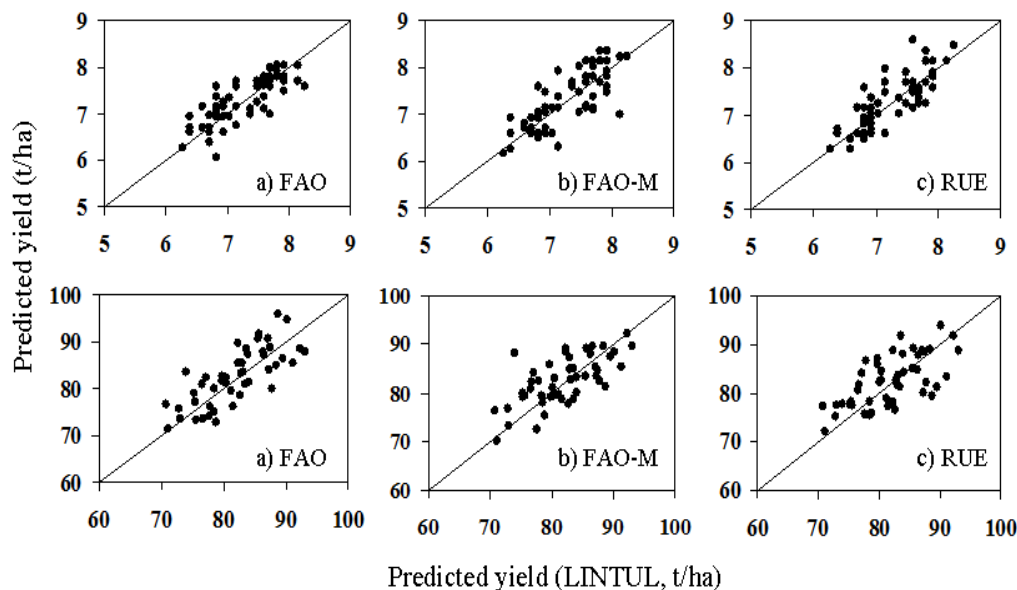


شکل ۹- مقایسه عملکرد مشاهده شده چغندر قند در شهرستان‌های تربت حیدریه، مشهد و نیشابور و عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده به‌وسیله روش شامل مدل SUCROS، مدل LINTUL، روش (RUE)، روش فائو (FAO)، روش فائو تغییر یافته (FAO-M) خطوط توپر و منقطع به ترتیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی و خط ۱:۱ می‌باشند.

Figure 9- Comparison of observed sugar beet yields in Torbat, Mashhad and Neishabor cities with predicted potential yield using 5 methods: SUCROS model, LINTUL model, RUE method, FAO method and FAO modified (FAO-M) method. Regression (solid) and 1:1 (broken) lines are also shown.

با وجودی که شبیه‌سازی تولید در شرایط پتانسیل در مقایسه با شرایط محدودیت آب یا نیتروژن ساده به‌نظر می‌رسد ولی مشکلات عمده‌ای در این مسیر وجود دارد (Goudriaan, 1996). پیچیدگی مدل‌های شبیه‌سازی را می‌توان بر اساس تعداد پارامترهای موجود در آنها ارزیابی کرد زیرا مدل‌ها از این نظر بسیار متنوع بوده و در نتیجه داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای آنها نیز بسته به مدل متفاوت خواهد بود. انتظار عمومی برای این است که مدل‌های پیچیده‌تر به دلیل پرداختن به جزئیات مربوط به فرآیندهای رشد و نمو از دقت بیشتری برخوردار باشند ولی در عمل معمولاً مدل‌های ساده عملکرد را به‌مراتب دقیق‌تر از مدل‌های پیچیده برآورد می‌کنند (Jamieson *et al.*, 1998; Brooks and Tobias, 1996; Brooks and Tobias, 1999). خودریان (Goudriaan, 1996) با استفاده از داده‌های آب و هوایی مشابه قابلیت ۱۲ مدل را در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم در محیط‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد.

از سوی دیگر پیش‌بینی مدل‌های شبیه‌سازی بر مبنای میانگین‌های ماهانه داده‌های هواشناسی در بسیاری از مطالعات در مقیاس منطقه‌ای، ملی و حتی جهانی قابل قبول بوده است (van Bussel *et al.*, 2011; Deryng *et al.*, 2011; Neumann *et al.*, 2010). بروکس و همکاران (Brooks *et al.*, 2001) نوع خلاصه شده‌ای از مدل Sirius را برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط پتانسیل ارائه کردند که ماده خشک نهایی را با استفاده از میانگین ماهانه درجه حرارت و تشعشع خورشیدی بر مبنای دو معادله پیش‌بینی می‌کند و نتایج حاصل از این مدل ساده با مدل کامل Sirius قابل مقایسه است. البته فان فارت و همکاران (van Wart *et al.*, 2013) بیان داشتند که میانگین‌های ماهانه، واریانس متغیرهای آب و هوایی در ماه‌های مختلف را نشان نداده و در نتیجه جهت پیش‌بینی عملکرد به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند.



شکل ۱۰- تعیین اعتبار عملکرد پیش‌بینی شده توسط روش‌های FAO، FAO-M، RUE در مقابل عملکرد پیش‌بینی شده گندم (a، b و c) و چغندر قند (d، e، f) توسط مدل شبیه‌سازی LINTUL، در شکل عملکردهای مربوط به سه منطقه تحت بررسی تفکیک نشده‌اند.

Figure 10- Cross validation of the predicted yield of wheat (a, b and c) and sugar beet (d, e, and f) by using FAO, FAO-M and RUE methods against predicted yield using LINTUL simulation model, data from 3 regions are not separated.

ضریب همبستگی بین نتایج مدل با روش‌های FAO (شکل 10a)، FAO-M (شکل 10b) و RUE (شکل 10c) به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۸۰ و ۰/۷۴ و در مورد چغندر قند (شکل‌های 10d، 10e و 10f) به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۶۸ و ۰/۶۶ بود که همگی به لحاظ آماری معنی‌دار هستند. این نتایج نشان می‌دهد که روش‌های ساده محاسباتی جایگزین مطمئنی برای مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی جهت پیش‌بینی عملکرد پتانسیل می‌باشند.

با وجودی که مدل‌های خلاصه شده اغلب در پیش‌بینی عملکرد در مقیاس منطقه‌ای موفق عمل کرده‌اند ولی این تردید وجود دارد که ممکن است به دلیل ساده‌سازی، فرآیندهای مهمی از سیستم حذف شده باشند (Brooks and Tobias, 1996). تعیین اعتبار متقابل روشی رایج برای مقایسه یک مدل جدید با مدلی دیگر (مدل مرجع) است (Gommez, 2000) به این ترتیب با ارزیابی همبستگی بین نتایج مدل ساده شده و مدل مرجع (مدل پیچیده) می‌توان قابلیت مدل ساده شده را مورد آزمون قرار داد. بروکس و همکاران (Brooks *et al.*, 2001) از استفاده از این روش قابلیت مدل خلاصه شده رشد گندم را با یک مدل کامل بر مبنای ضریب همبستگی بین پیش‌بینی دو مدل مورد مقایسه قرار دادند. البته باید توجه داشت که این روش کاربردهای دیگری نیز در پژوهش‌های مدل‌سازی دارد. برای مثال تعیین اعتبار متقابل به روش "حذف یک گروه" (Efron, and )

نتایج نشان داد که عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل‌های بسیار پیچیده تا نسبتاً ساده به ترتیب در دامنه‌ای بین ۴/۲ تا ۱۲/۵ تن در هکتار قرار داشت در حالی که میانگین عملکرد اندازه‌گیری شده در حدود ۱۲ تن در هکتار بود. وی نتیجه‌گیری کرد مدل‌های پیچیده‌ای که از نظر ساختاری برای شبیه‌سازی عملکرد در شرایط محدودیت آب و عناصر غذایی طراحی شده‌اند پیش‌بینی ضعیف‌تری از عملکرد پتانسیل به دست خواهند داد بنابراین استفاده از این مدل‌ها مستلزم واسنجی و تعیین اعتبار آنها بر اساس آزمایشات دقیق مزرعه‌ای می‌باشد.

### تعیین اعتبار متقابل<sup>۱</sup>

ارزیابی اعتبار مدل‌ها (شکل‌های ۸ و ۹) قابلیت آنها را در پیش‌بینی مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد ولی در این نوع ارزیابی قدرت مدل‌ها به‌طور مستقیم با هم مقایسه نمی‌شود. تعیین اعتبار متقابل روش مطمئن‌تری برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده به‌وسیله دو مدل مختلف است. در شکل ۱۰ نتایج پیش‌بینی عملکرد پتانسیل توسط مدل LINTUL با روش‌های ساده و برای گندم و چغندر قند مقایسه شده‌اند. پیش‌بینی روش‌های ساده از عملکرد هر دو محصول انطباق قابل قبولی با مدل شبیه‌سازی داشت. در مورد گندم

2- Leave-one-out (LOO)

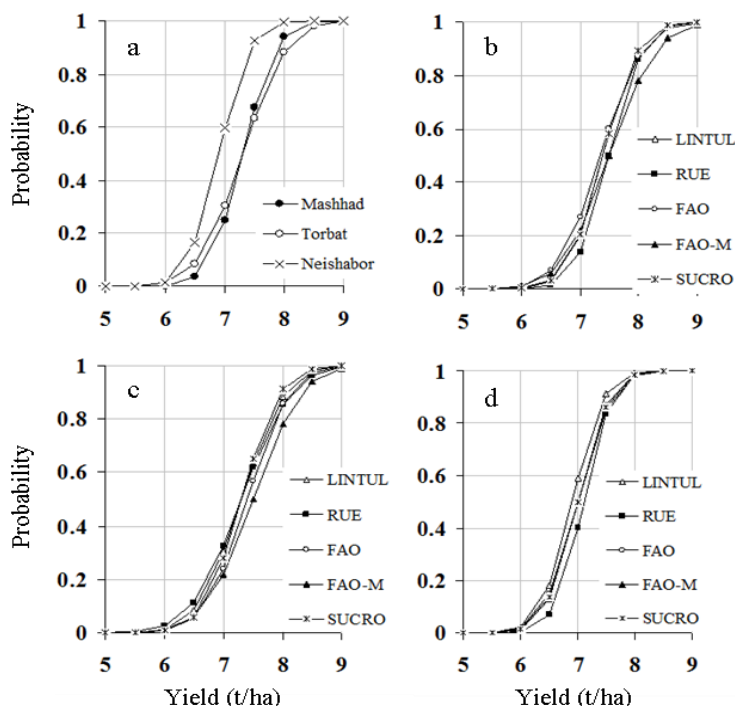
1- Cross validation

مزارع پرمحصول و آزمایشات ایستگاهی به‌عنوان پتانسیل منطقه در نظر گرفته شوند، عملکرد پتانسیل در هر سه منطقه تحت بررسی بالاتر از ۷ تن در هکتار و با احتمال ۹۰ درصد در نیشابور، مشهد و تربت به ترتیب ۷/۵، ۷/۸ و ۸/۲ تن در هکتار می‌باشد (شکل a11). مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های ساده مورد استفاده در این تحقیق احتمالات مشابهی را برای عملکرد پتانسیل گندم در مناطق تحت بررسی پیش‌بینی کردند.

(Gong, 1983) برای واسنجی و تعیین اعتبار مدل‌ها در شرایطی که تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده اندک باشد بسیار مفید خواهد بود.

### توزیع احتمال عملکرد

**عملکرد گندم:** بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده توزیع احتمالات عملکرد در مشهد و تربت تقریباً مشابه و با نیشابور متفاوت بود (شکل a11). چنانچه صدک‌های بالای عملکرد مشاهده شده در



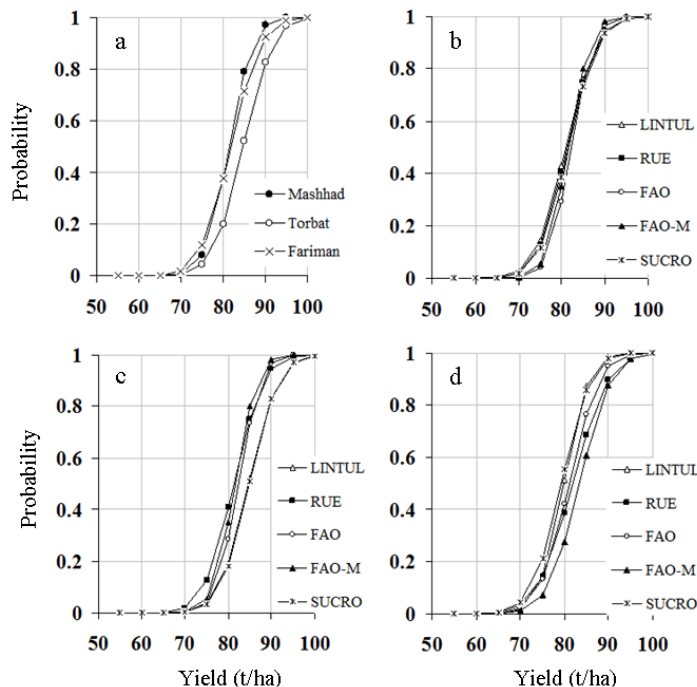
شکل ۱۱- احتمال تجمعی عملکردهای مشاهده شده گندم در سه منطقه تحت بررسی (a) و احتمال تجمعی عملکردهای پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش مختلف در تربت حیدریه (b)، مشهد (c) و نیشابور (d).

Figure 11- Cumulative probability of observed yields of wheat in 3 studied regions (a) and cumulative probability of predicted yields using 5 different methods for Torbat (b), Mashhad (c) and Neishabor (d).

داده‌های اندازه‌گیری شده در مشهد و فریمان مشابه بود و در تربت تا حدودی به سمت راست کشیده شد که نشان‌دهنده بالاتر بودن عملکرد در این منطقه می‌باشد (شکل a12). به این ترتیب بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد پتانسیل چغندر قند با احتمال ۹۵ درصد در تربت، مشهد و فریمان به ترتیب ۸۲، ۸۴ و ۹۲ تن در هکتار برآورد شد (شکل a12). مشابه گندم احتمالات عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده چغندر توسط مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های ساده بیشتر از مشاهدات بود و با احتمال ۹۵ درصد برای تربت بین ۹۲ تا ۹۷ تن در هکتار (شکل b12) در مشهد بین ۸۵ تا ۹۰ تن در هکتار (شکل c12) و در فریمان ۸۷ تا ۹۲ تن در هکتار به‌دست آمد (شکل d12).

در تربت (شکل b11) عملکرد پتانسیل گندم با احتمال ۹۵ درصد بین ۸/۵ تا ۸/۸ تن در هکتار برآورد شد در حالی که این عملکرد برای مشهد (شکل c11) با احتمال ۹۵ درصد ۸/۱ تا ۸/۴ تن در هکتار و برای نیشابور (شکل a11) در همین سطح احتمال ۷/۶ تا ۷/۹ تن در هکتار به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده برای مناطق تحت بررسی بین ۰/۵ تا ۰/۸ تن در هکتار بیشتر از حداکثر عملکرد برآورد شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. به‌علاوه احتمالات به‌دست آمده برای عملکرد پتانسیل به‌وسیله روش‌های ساده محاسباتی انطباق قابل قبولی با مدل‌های شبیه‌سازی دارد.

**عملکرد چغندر قند:** توزیع احتمال عملکرد چغندر قند بر اساس



شکل ۱۲- احتمال تجمعی عملکردهای مشاهده شده چغندر قند در سه منطقه تحت بررسی (a) و احتمال تجمعی عملکردهای پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش مختلف در تربت حیدریه (b)، مشهد (c) و فریمان (d)

Figure 11- Cumulative probability of observed yields of sugar beet in 3 studied regions (a) and cumulative probability of predicted yields using 5 different methods for Torbat (b), Mashhad (c) and Fariman (d).

باید توجه داشت که با بزرگ شدن مقیاس مطالعه عوامل مؤثر بر یک فرآیند مشخص تغییر خواهند کرد (Viglizzo *et al.*, 2004). برای مثال در مقیاس کرت آزمایشی تغییرات عوامل محیطی به دلیل کوچک بودن مقیاس اندک است و فرآیندی نظیر تبخیر و تعرق علاوه بر متغیرهای آب و هوایی به‌وسیله خصوصیات گیاهی مانند عمق توسعه ریشه، هدایت روزنه‌ای و هدایت هیدرولیکی خاک کنترل می‌شود در حالی که همین فرآیند در مقیاس منطقه‌ای از خصوصیات گیاهی مستقل بوده و تابع درجه حرارت و تشعشع است (Gardner, 1998). بر این اساس دقت مدل‌های شبیه‌سازی که برای پیش‌بینی عملکرد در مقیاس کوچک (کرت تا مزرعه) ساخته شده‌اند در گرو تعیین دقیق پارامترهای گیاهی تعریف شده در مدل است. بدیهی است که تعیین این پارامترها در مقیاس منطقه‌ای دشوار خواهد بود و در نتیجه دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد (De Wit *et al.*, 2005). بنابراین در انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی عملکرد علاوه بر میزان دسترسی به داده‌ها مقیاس مطالعه نیز حائز اهمیت است (Kravchenko *et al.*, 2000; Batchelor *et al.*, 2002). در واقع در بررسی‌هایی که هدف آنها پیش‌بینی عملکرد پتانسیل در مقیاس بزرگ است بسیاری از خروجی‌های حاصل از اجرای مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی بی‌استفاده می‌باشند لذا تحت این شرایط مدل‌های ساده‌ای

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های خلاصه شده از نظر قدرت پیش‌بینی، در تعیین اعتبار متقابل و در برآورد احتمالات عملکرد محصولات تحت بررسی در مقیاس منطقه‌ای در مقایسه با مدل‌های پیچیده رشد از دقت قابل قبولی برخوردارند و به نظر می‌رسد که این امر تا حد زیادی ناشی از مقیاس مطالعه است. ویت و همکاران (Wit *et al.*, 2005) با بررسی تأثیر مقیاس در قدرت پیش‌بینی مدل‌ها بیان داشتند که مدل‌های رشدی که برای شبیه‌سازی در مقیاس مزرعه ساخته می‌شوند معمولاً در مقیاس منطقه‌ای و ملی دقت خوبی ندارند. این امر عمدتاً به دلیل زیاد بودن تعداد پارامترهای تعریف شده در این مدل‌هاست. برای مثال مدل‌های LINTUL و SUCROS که در تحقیق حاضر به کار رفته‌اند به ترتیب دارای ۱۱۴ و ۵۶ پارامتر گیاهی بوده و مدل WOFOST (Boogaard *et al.*, 1998) که بر پایه SUCROS ساخته شده بسته به گونه زراعی تا ۱۵۴ پارامتر گیاهی دارد. بدیهی است که تعیین این پارامترها در مرحله واسنجی مدل مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق آزمایشی است و در غیر این صورت پیش‌بینی عملکرد از اعتبار کافی برخوردار نخواهد بود (Kropff *et al.*, 2001). یادآوری می‌شود که بالا بودن دقت پیش‌بینی مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به این دلیل است که مدل‌ها قبلاً بر اساس داده‌های آزمایشی واسنجی شده‌اند.

مناسبی محسوب می‌شود. در این تحقیق جزئیات مربوط به سه روش ساده محاسباتی که نوع خلاصه شده‌ای از مدل‌های رشد می‌باشند و به حداقل داده‌های آب و هوایی نیاز دارند جهت پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم و چغندر قند ارائه شد و نتایج پیش‌بینی آنها در سه منطقه از استان خراسان با دو مدل پیچیده شبیه‌سازی که قبلاً واسنجی شده بودند مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس یافته‌های این تحقیق روش‌های ساده به لحاظ آماری قابلیت مطلوبی در پیش‌بینی عملکرد دو محصول در مناطق مختلف داشتند و بنابراین می‌توان از این مدل‌های ساده در شرایط عدم دسترسی به داده‌های کامل آب و هوایی و در اختیار نبودن پارامترهای لازم برای اجرای مدل‌های رشد به‌عنوان جایگزینی برای مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی استفاده کرد.

### سپاسگزاری

بودجه این تحقیق از محل اعتبارات طرح پژوهش مورخ ۱۳۸۷/۰۷/۳۰ توسط معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

که هدف مطالعه یعنی پیش‌بینی عملکرد را با دقت قابل قبولی تأمین کنند ارجحیت خواهند داشت (Brooks *et al.*, 2001; Brooks and Tobias, 1999).

### نتیجه‌گیری

برآورد عملکرد پتانسیل محصولات زراعی در مطالعات مربوط به پهنه‌بندی اگرواکولوژیکی و تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد ضروری است و محققین روش‌های مختلفی را برای این منظور ارائه کرده‌اند که استفاده از عملکرد اندازه‌گیری شده در آزمایشات کنترل شده ایستگاهی، عملکرد مزارع پرمحصول و عملکرد پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل‌های شبیه‌سازی از مهمترین این روش‌ها می‌باشند. باوجودی که نتایج مدل‌های شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار است ولی به‌کارگیری آنها مستلزم واسنجی دقیق مدل بر اساس داده‌های آزمایشی و دسترسی به داده‌های آب و هوایی روزانه است و در غیر این صورت پیش‌بینی مدل‌ها از دقت کافی برخوردار نخواهد بود و به همین دلیل در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های ساده شده گزینه

### References

1. Batchelor, W. D., Basso, B., and Paz, J. O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 141-158.
2. Bell, M. A., and Fischer, R. A. 1994. Using yield prediction models to assess yield gains: a case study for wheat. *Field Crops Research* 36: 161-166.
3. Bhatia, V. S., Singh, P., Wani, S. P., Chauhan, G. S., Kesava Rao, A. V. R., Mishra, A. K., and Srinivas, K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rain fed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1252-1265.
4. Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Rouitter, R. P., Cabrera, J. C. M. A., and Van Laar, H. H. 1998. WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 5.1. Techn. Doc. 52, Alterra, WUR, Wageningen, The Netherlands, pp. 144.
5. Boote, K. J., Jones, J. W., and Pickering, N. G. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88: 704-716.
6. Brooks, R. J., Semenov, M. A., and Jamieson, P. D. 2001. Simplifying Sirius: sensitivity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction. *European Journal of Agronomy* 14: 43-60.
7. Brooks, R. J., and Tobias, A. M. 1996. Choosing the best model: Level of detail, complexity and model performance. *Mathematical and Computer Modeling* 24 (4): 1-14.
8. Brooks, R. J., and Tobias, A. M. 1999. Methods and benefits of simplification in simulation. In: Al-Dabass, D., Cheng, R.C.H. (Eds.), UK Sim 99 Fourth National Conference of the U.K. Simulation Society, 7-9 April 1999. UK Simulation Society, St Catharines College, Cambridge, pp. 88-92.
9. Caldiz, D. O., Haverkort, A. J., and Struik, P. C. 2002. Analysis of a complex crop production system in interdependent agro-ecological zones: a methodological approach for potatoes in Argentina. *Agricultural Systems* 73: 297-311.
10. Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., and Yang, H. S. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environmental Resources* 28: 315-358.
11. Deryng, D., Sacks, W. J., Barford, C. C., and Ramankutty, N. 2011. Simulating the effects of climate and agricultural management practices on global crop yield. *Global Biogeochemical Cycling*, 25: 18.
12. De Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., and van Diepen, C. A. 2005. Spatial resolution of precipitation and radiation: the effect on regional crop yield forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology* 135: 156-168.
13. Efron, B., and Gong, G. 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. *The American Statistician* 37 (1): 36-48.
14. FAO, 1978. Report on the Agro ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48/1. FAO, Rome, 158cpp.



15. FAO, 1981. Report on the Agro ecological Zones Project. Vol. 3. Methodology and results for South and Central America. World Soil Resources Report 48/3. FAO, Rome, 251 pp.
16. Gardner, R. H. 1998. Pattern, process and analysis of spatial scales. In: Peterson, D.L., Parker, V.T. (eds.). Ecological Scale: Theory and applications. Columbia State University Press, New York.
17. Gommez, R. 2000. Crop-yield weather modeling. FAO-WMO Roving Seminar, Lecture notes and exercises, FAO, Rome.
18. Goudiraan, J., and van Laar, H. H. 1993. Modeling Crop Growth Processes. Kluwer Academic Press, The Netherlands.
19. Goudriaan, J. 1996. Predicting crop yields under global change. In: Walker, B.H., Steffen, W.L. (Eds.), Global Change and Terrestrial Ecosystems. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series 2. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 260-274.
20. Hoogenboom, G. 2000. Contribution of agro meteorology to the simulation of crop production and its applications. Agricultural and Forest Meteorology 103: 137-157.
21. Jagtap, S. S., and Jones, J. W. 2002. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. Agriculture Ecosystems and Environment 93: 73-85.
22. Jamieson, P. D., Porter, J. R., and Wilson, D. R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Fields Crops Research 27: 337-350.
23. Jamieson, P. D., Porter, J. R., Goudriaan, J., Ritchie, J. T., Keulen, H., and van Stol, W. 1998. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. Field Crops Research 55: 23-44.
24. Kravchenko, A. N., and Bullock, D. G. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil. Agronomy Journal, 92: 73-85.
25. Kiniry, J. R., Bean, B., Xie, Y., and Chen, P. 2004. Maize yield potential: critical processes and simulation modeling in a high-yielding environment. Agricultural Systems 82: 45-56.
26. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Soltani, A., Sharifi, H., and Ghorbani, R. 2006. Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. Climate Research 30: 247-253.
27. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2016. Effects of climate change on agricultural production of Iran: II. Predicting productivity of field crops and adaptation strategies. Iranian Journal of Field Crops Research 14: 1-20. (in Persian with English abstract).
28. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2007. Impacts of climate change and CO<sub>2</sub> concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. Iranian Journal of Field Crops Research 6 (1): 139-153. (in Persian with English abstract).
29. Kropff, M. J. Bouma, J., and Jones, J. W. 2001. Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. Agricultural Systems 70: 369-393.
30. Licker, R., Johnston, M., Foley, J. A., Barford, C., Kucharik, C. J., Monfreda, C., and Ramankutty, N. 2010. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the 'yield gap' of croplands around the world? Global Ecological Biogeography 19: 769-782.
31. Loague, K., and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal Contaminant Hydrology 7: 51-73.
32. Lobell, D. B., Cassman, K. G., and Field, C. B. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environmental Resources 34: 179-204.
33. Mondani, F. 2012. Simulating the effect of climate change on wild oat and sunn pest damage on wheat under Mashhad weather conditions. PhD thesis, Ferdowsi University of Mashhad.
34. Muchow, R. C., and Kropff, M. J. 1997. Assessing the potential yield of tropical crops: role of field experimentation and simulation. In: Kropff, M. J., Teng, P. S., Aggarwal, P. K., Bouma, J., Bouman, B. A. M., Jones, J. W., Van Laar, H.H. (Eds.), Applications of Systems Approaches at the Field Level. Vol. 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 101-112.
35. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., and Jahan, M. 2011. Radiation absorption and use efficiency in relay intercropping and double cropping of winter wheat and maize. Iranian Journal of Field Crops Research 8 (6): 878-890. (in Persian with English abstract).
36. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Kamali, G. A., and Shahandeh, H. 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. Archives in Agronomy and Soil Science 52: 113-124.
37. Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2017. Trend analysis of nitrogen use and productivity in cereal production systems of Iran. Journal of Agroecology 9: 360-378. (in Persian with English abstract).
38. Neumann, K., Verberg, P. H., Stehfest, E., and Muller, C. 2010. The yield gap of global grain production: a spatial analysis. Agricultural Systems 103: 316-326.
39. Nonhebel, S. 1997. Harvesting the sun's energy using agro ecosystems. DLO Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility, Wageningen, the Netherlands. 96 pp.
40. Nonhebel, S. 1994. The effects of use of average instead of daily weather data in crop growth simulation-models.

- Agricultural Systems 44: 377-396.
41. O'Connell, M. G., O'Leary, G. J., Whitfield, D. M., and Connor, D. J. 2004. Interception of photo synthetically active radiation and radiation use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Research* 85: 111-124.
  42. Parsa, S. 2008. Modeling spatial and temporal variation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield in Khorasan province. PhD thesis. Ferdowsi University of Mashhad.
  43. Priya, S., and Shibasaki, R. 2001. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modeling* 135: 113-129.
  44. Richter, G. M., Jaggard, K. W., and Mitchell, R. A. C. 2001. Modeling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: 13-25
  45. Soltani, A., Khoorie, F. R., Ghassemi-Golezani, K., and Moghaddam, M. 2001. A simulation study of chickpea crop response to limited irrigation in a semiarid environment. *Agricultural Water Management* 49: 225-237.
  46. Soltani, A., Meinke, H., De Voil, P. 2004. Assessing linear interpolation to generate daily radiation and temperature data for use in crop simulations. *European Journal of Agronomy* 21: 133-148.
  47. Stehfest, E., Heistermann, M., Priess, J. A., Ojima, D. S., and Alcamo, J. 2007. Simulation of global crop production with the ecosystem model Day Cent. *Ecological Modeling* 204: 345-361.
  48. van Bussel, L. G. J., Müller, C., Van Keulen, H., Ewert, F., and Leffelaar, P. A. 2011. The effect of temporal aggregation of weather input data on crop growth models' results. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 607-619.
  49. van Delden, A. 2001. Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands, ISBN 90 5808 519\_/8, pp. 197.
  50. van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., and Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research* 143: 4-17.
  51. van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., and Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
  52. van Laar, H. H., Goudriaan, J., and Van Keulen, H. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands, pp. 52.
  53. van Wart, J., Kersebaum, Ch., Peng, Sh., Milner, M., and Cassman, K. G. 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research* 143: 34-43.
  54. Viglizzo, E. F., Podomingo, A. J., Castro, M. G., Lertora, F. A., and Bernardos, J. N. 2004. Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 101: 39:51.
  55. Versteeg, M. N., and van Keulen, H. 1986. Potential crop production prediction by some simple calculation methods, as compared with computer simulations. *Agricultural Systems* 19: 249-272.
  56. Wilmot, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorological Society* 64: 1309-1313.
  57. Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., and Diepen, C. A. 2005. Spatial resolution of precipitation and radiation: the effect on regional crop yield forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology* 135: 156-168.



## Yield Monitoring for Wheat and Sugar beet in Khorasan Province: 1- Analysis of Methods for Estimating Potential Yield

M. Nassiri Mahalati<sup>1\*</sup> - A. Koocheki<sup>1</sup>

Received: 12-02-2017

Accepted: 10-06-2018

### Introduction

Potential production condition is defined as situation where water and nutrients are supplied in ample with no damage from weeds, pests and diseases. Under this situation potential yield ( $Y_p$ ) which is defined by solar radiation, temperature,  $CO_2$  concentration and genotypic characteristics of the crop species could be achieved. Closing the gap between  $Y_p$  and actual yield ( $Y_a$ ) harvested by farmers is considered as the main challenge of agronomic sciences all around the world. Crop simulation models provide a powerful tool for prediction of  $Y_p$  at regional and national scales. However, the accuracy of these models is highly dependent on the quality of input data which are usually not fully available even in developed countries. Simplified models designed based on few simple equations may be considered as an alternative where accurate data sets are lacking. In this research,  $Y_p$  of wheat and sugar beet were estimated using some simple methods and the results were compared with those of complex simulation models under the same climatic and management conditions in Khorasan province, north east of Iran.

### Materials and Methods

Potential yields of wheat and sugar beet were estimated by three simple calculation methods including FAO method (FAO, 1981), modified FAO, FAO-M (Versteeg and van Keulen, 1986) and RUE-based method (Nonhebel, 1997) at three different regions (Torbat, Mashhad and Neishabor) in Khorasan province. In these methods total above ground dry matter (DM) is calculated using two equations and  $Y_p$  is estimated as the product of DM and harvest index with minimum weather data requirements. In addition,  $Y_p$  for both crops and at the same locations was predicted using LINTUL and SUCROS simulation models which were previously calibrated for yield estimation of wheat and sugar beet at regional level. The accuracy of predicted potential yields by five methods was compared statistically against the measured yields obtained from the field experiments and high yielding farms at the studied regions.

### Results and Discussion

Mean observed yield of wheat over the three studied regions was  $7.18 \text{ t ha}^{-1}$  and the estimated potential yield in the same regions using two simulation models and three simplified models was ranged between  $6.92$  and  $7.63 \text{ t ha}^{-1}$ . Prediction error for the simulation models was 1.39 and for simple methods less than 5% (4.64%). Relative root mean squared error ( $RMSE_n$ ) for the simple methods was higher than that of complex models. However, it was between 7.11 and 10.16 % of the mean measured wheat yield which could be statistically considered as reasonable. Calculated values of modeling efficiency (ME) were positive and higher than 0.60 except for FAO-M method ( $ME=0.48$ ). Measured sugar beet yield averaged over regions was  $82.5 \text{ t ha}^{-1}$  and estimated potential yield by different methods was between  $89$  and  $91 \text{ t ha}^{-1}$ . Simple calculation methods had lower accuracy in predicting sugar beet yield compared to simulation models but  $RMSE_n$  of simple methods never exceeded 11.5% showing statistically acceptable prediction. Cross validation indicated significant correlation between the results of three simple methods and that of complex simulation models.

### Conclusions

Results of this study showed that potential yields of different crops can be estimated accurately using simple calculation methods with minimum weather data requirements. Such methods may be used as an alternative for agroecological zoning and yield gap analysis at regional level where calibrated simulation models and complete daily weather data sets are not available.

**Keywords:** Modeling efficiency, Simulation models, Summary models, Yield prediction

1- Professor, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad  
(\*- Corresponding Author Email: mnassiri@um.ac.ir)