

Estimation of potato yield gap and determining the contribution of water and nitrogen across Khorasan Razavi province using modeling approach

Introduction

Reducing the gap between the actual yield currently achieved on farms and the yield that could be achieved using the best environmentally compatible cultivars and the best water, soil and plant management practices is a key solution to overcome the challenge of feeding the world's growing population. The first step in addressing the yield gap is to determine how much and how it is distributed.

Materials and Methods

To estimate the potato yield gap in Khorasan Razavi province and to determine the contribution of water and nitrogen to it, two separate field experiments were conducted based on randomized complete block design (RCBD) with water and nitrogen limitation conditions for potato cultivars in the city of Quchan during the growing season of 2018-2019. The first experiment was conducted with three irrigation levels of 100, 75, and 50% water requirement, and used two potato cultivars. The second experiment was conducted with four levels of nitrogen, including 0, 50, 100, and 150 kg of pure nitrogen, and also included two potato cultivars.

Results and Discussion

The results showed that increasing nitrogen fertilizer application improved many of the evaluated characteristics of two potato varieties. However, with the increase in nitrogen use, nitrogen use efficiency (productivity) decreased. The potential yield of potatoes in different regions of Khorasan Razavi province was estimated using the DSSAT model. The data obtained from one of the field experiments, including dry matter, leaf area, phenology (developmental stages), and yield, were used to calibrate the model. After determining the potential yield and estimating the yield gap, the contribution of water and nitrogen to the yield gap was identified. Based on the protocol provided by the Global Yield Gap Atlas, the province was clustered into three regions. Region 1 (R1) includes the cities of Quchan and Fariman; Region 2 (R2) comprises Golmakan, Neyshabour, Torbat-e Hydarie, Mashhad, and Dargaz, which lie between regions 1 and 3; and Region 3 (R3) includes the cities of Torbat-e Jam, Gonabad, Khaf, Kashmar, Sabzevar, Sarakhs, and Bardaskan. The model was calibrated and validated with the data obtained from the field experiment. Long-term weather data and average actual yield were collected for each station, and the potential yield in each station was simulated using the model. Then, the difference between the potential yield and the actual yield was calculated, and the yield gap was determined for each area. Afterward, using the model, the potential yield was recalculated under water and nitrogen limitation conditions, and the contribution of water and nitrogen to the yield gap was assessed.

In R1, the yield gap varied between 40.5 and 57.7 t ha⁻¹. The average yield gap during 10 years was estimated at 48.8, and 31.7 t ha⁻¹ for R1 and R2, respectively. According to the DSSAT model's results, R3 had a lower potential yield than the other two regions. The average contribution of water and nitrogen limitations to the potato yield gap in R1 and R2 was calculated. Accordingly, in R1, the impact of water and nitrogen limitations was 12.1 and 18 t ha⁻¹, and in R2, it was 10.9

and 8.3 t ha^{-1} , respectively. While filling part of the yield gap varies with the climatic conditions of each region, choosing a compatible crop variety, planting date, and appropriate plant density are among the most important crop management options to reduce part of the yield gap, regardless of climatic differences.

Keywords: Calibration and Validation, DSSAT, Food security, Potential yield, Zoning.

برآورد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی و تعیین سهم آب و نیتروژن در آن با استفاده از رهیافت مدل‌سازی

محسن جهان^۱، محسن نوری^۲، حمیدرضا خزاعی^۳، مهدی نصیری محلاتی^۴، کوروش شجاعی نوفرست^۵، محمد حسن فلاح^۶

۱- استاد، گروه اگرو تکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول)

۲- دانش آموخته دکترای اگرو اکولوژی

۳- استاد، گروه اگرو تکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استاد، گروه اگرو تکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی، مشهد

۶- دانش آموخته دکترای اگرو اکولوژی

چکیده

خلاء عملکرد سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی براساس شیوه‌نامه اطلس جهانی خلاء عملکرد و با استفاده از مدل SUBSTOR-Potato برنامه DSSAT برآورد شد. مدل گیاهی با استفاده از داده‌های دو آزمایش مزرعه‌ای که در شرایط محدودیت آب و نیتروژن طراحی و اجرا شدند و همچنین اطلاعات جمع‌آوری شده از سایر آزمایشات زراعی در مناطق مورد مطالعه مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. استان بر اساس شیوه‌نامه اطلس جهانی خلاء عملکرد به سه ناحیه اقلیمی کشاورزی کلاستر بندی شد. سپس، با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی بلندمدت (۲۰۲۰-۲۰۱۱) و میانگین عملکرد واقعی هر ایستگاه، پتانسیل عملکرد برای هر ناحیه شبیه‌سازی شد و میزان خلاء عملکرد محاسبه گردید. در نهایت، در شرایط محدودیت‌های آب و نیتروژن، پتانسیل عملکرد مجدداً بررسی شد و سهم هر یک از این عوامل در ایجاد خلاء عملکرد تعیین گردید. بیشترین عملکرد پتانسیل در سطح استان مربوط به ناحیه یک و در شهرستان فریمان (در سال ۲۰۱۲) با مقدار $۸۶/۷$ تن در هکتار برآورد گردید. کمترین مقدار عملکرد پتانسیل برای شهرستان بردسکن واقع در ناحیه اقلیمی ۳ با مقدار $۸/۳$ تن در هکتار برآورد شد. میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در ناحیه ۱، $۴۸/۸$ و در ناحیه ۲، $۳۱/۷$ تن در هکتار برآورد شد. میانگین تأثیر محدودیت آب و نیتروژن در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه یک به ترتیب، $۱۲/۱$ و ۱۸ تن در هکتار و در ناحیه ۲ به ترتیب، $۱۰/۹$ و $۸/۳$ تن در هکتار بود. پُر کردن بخشی از خلاء عملکرد با توجه به شرایط اقلیمی هر ناحیه متفاوت است، با اینحال انتخاب رقم زراعی سازگار، تاریخ کاشت و تراکم بوته مناسب از جمله مهمترین گزینه‌های مدیریت زراعی به منظور جبران بخشی از خلاء عملکرد، صرف نظر از تفاوت‌های اقلیمی توصیه می‌شود.

مقدمه

امنیت غذایی بیانگر وضعیتی است که تمام آحاد مردم در تمام زمان‌ها یا ایام سال از نظر فیزیکی و اقتصادی برای تأمین نیازهای یک زندگی سالم، به غذای کافی، سالم و با کیفیت دسترسی داشته باشند (Coates, 2013). به منظور کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و آب و هوایی بر امنیت غذایی، اگر واگوسیستم‌ها باید از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار باشند (IISD Report, 2012). در این ارتباط، گزینه‌های فناوری نیز بسیار مهم است، اما شواهد روشن مبتنی بر حمایت از تصمیم‌گیری در قالب فناوری نسبتاً کمیاب است (Rosegrant et al., 2014).

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) بعد از گندم، برنج و ذرت بیشترین سهم را در تولید محصولات غذایی دارد و نقش مهمی در تغذیه و سبب غذایی جهان ایفا می‌کند (FAO, 2017). بر این اساس، سازمان خواروبار جهانی این محصول زراعی را با توجه به روند روبه رشد جمعیت و پیامدهای ناشی از آن شامل افزایش تعداد گرسنگان و نیاز به غذا، به‌عنوان یک گیاه امنیت غذایی معرفی و توصیه نموده است (Devaux, Kromann & Ortiz, 2014). ایران با تولید ۴/۵ میلیون تن غده سیب‌زمینی، رتبه ۱۹ را در بین کشورهای تولیدکننده سیب‌زمینی در سال ۲۰۲۰ داشته است. مقایسه عملکرد این محصول در ۲۰ کشور اصلی تولیدکننده، تفاوت‌های زیادی را نشان می‌دهد، به‌نحوی که ایالات متحده آمریکا با ۵۱ تن در هکتار، بیشترین عملکرد و اوکراین با ۱۶ تن در هکتار، کمترین عملکرد را در بین این کشورها داشته است. متوسط عملکرد این محصول در کل کشورهای جهان، ۱۸/۵ تن و در ایران ۳۴ تن در هکتار بوده که رتبه ۲۱ را در عملکرد نشان می‌دهد (FAO, 2021). در استان خراسان رضوی در حال حاضر بیش از ۱۰۴ هزار تن سیب‌زمینی از سطحی برابر با ۲۸۸۳ هکتار زمین زراعی با میانگین عملکرد ۳۶/۲ تن برداشت می‌شود (Ministry of Agriculture, 2022).

کودهای نیتروژنی بیش از ۶۱ درصد از مصرف کودهای شیمیایی را در کشور به خود اختصاص داده و کود اوره با سهم ۹۰ درصد، حائز رتبه اول در مصرف کودهای نیتروژنی می‌باشد (Tavakkoli-Kakhki, 2016). در مقیاس جهانی ۵۰ تا ۷۰ درصد از نیتروژن خاک، از دسترس خارج شده و جذب گیاه نمی‌شود که حاصل آن علاوه بر آلودگی محیط، کاهش کارایی مصرف آن است (Dobermann & Cassman, 2002). کاربرد کودهای شیمیایی اثرات مهمی بر عملکرد کمی و کیفی

سیب‌زمینی دارند (Westermann, 2005). مصرف کود نیتروژن گاهی بیش از حد نیاز گیاه بوده، از این رو بهبود کارایی مصرف زراعی نیتروژن یک راهبرد کلیدی در جهت پیشبرد سیاست‌های کشاورزی پایدار محسوب می‌شود که این امر می‌تواند منجر به دستیابی به حداکثر عملکرد در ازای مصرف حداقل نهاده‌ها و کاهش هدررفت نیتروژن گردد (Fageria & Baligar, 2005). در صورتی که آب و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه فراهم و محیط رشد عاری از هر گونه علف هرز، آفت یا بیماری باشد، سرعت رشد محصول توسط عوامل محیطی تعیین می‌شود. عملکرد در این شرایط به عملکرد بالقوه یا پتانسیل^۱ موسوم است. عملکرد واقعی^۲، عملکرد برداشت شده در مزرعه را نشان می‌دهد. اختلاف بین عملکرد پتانسیل و عملکرد واقعی، خلاء عملکرد^۳ نام داشته و شامل عواملی است که هدف از مدیریت و پژوهش‌های زراعی، کنترل آن‌هاست.

تحلیل خلاء عملکرد یک روش کمی برای افزایش احتمالی ظرفیت تولید گیاهان زراعی در یک ناحیه مشخص می‌باشد و یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی راهبردهای تأمین غذا در مقیاس منطقه‌ای، ملی و جهانی است (Van Wart et al., 2013). تعیین میزان خلاء عملکرد جهت شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد ضروری می‌باشد. کم کردن فاصله بین عملکرد واقعی که در حال حاضر در مزارع بدست می‌آید و عملکردی که می‌تواند به‌وسیله‌ی استفاده از بهترین ارقام سازگار با محیط و بهترین روش‌های مدیریت آب، خاک و گیاه بدست آید، راهکاری کلیدی جهت غلبه بر چالش تغذیه‌ای جمعیت در حال رشد جهان است. نخستین گام جهت رفع خلاء عملکرد، تعیین مقدار و نحوه توزیع آن می‌باشد (Hochman, Gobbett, 2016). وان ایت‌رسام و همکاران (Van Ittersum et al., 2013) شیوه‌نامه گیگا (GYGA)^۴ را برای محاسبه خلاء عملکرد محصولات عمده زراعی جهان ارائه کردند. هدف گیگا در دسترس قرار دادن اطلس برخطی است که شامل اطلاعات پتانسیل عملکرد، پتانسیل عملکرد آب‌محدود، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد گیاهان زراعی باشد. عملکردها در سطح ملی و پهنه‌های اقلیمی نمایش داده می‌شوند. در این شیوه‌نامه از ترکیب اطلاعات روزانه داده‌های هواشناسی، اطلاعات خاک و مدل‌های گیاهان زراعی استفاده شده و به دلیل انجام رویکرد مشابه در تمامی کشورها، نتایج حاصل از اجرای شیوه‌نامه در کشورهای مختلف با یکدیگر قابل مقایسه می‌باشد. نتایج این اطلس می‌تواند برای شناسایی مناطقی استفاده شود که پتانسیل بالایی برای سرمایه‌گذاری توسعه کشاورزی و انتقال تکنولوژی دارند. باوجود اهمیتی که موضوع

¹ - Potential yield

² - Actual yield

³ - Yield gap

⁴ - Global Yield Gap Atlas

پتانسیل‌یابی تولید محصولات زراعی دارد، تحقیقات محدودی در ایران انجام شده که عمدتاً بر محصول گندم تمرکز دارد (Kamali & Bazgir, 2009; Taei et al., 2013; Koocheki, Nassiri-Mahallati, Mansoori & Moradi, 2017).

نظر به اهمیت امنیت غذایی و ارائه راهکارهای مناسب جهت افزایش تولید سیب‌زمینی در واحد سطح در استان خراسان رضوی، این پژوهش با هدف واسنجی^۱ و تعیین اعتبار^۲ مدل DSSAT برای پیش‌بینی مراحل نمو و عملکرد پتانسیل در نظام کشت بهاره سیب‌زمینی استان، تعیین عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد محصول سیب‌زمینی در این نظام و درنهایت تعیین سهم آب و نیتروژن در ایجاد خلاء انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در سطح استان خراسان رضوی انجام شد. استان خراسان رضوی با وسعت ۱۲۷۰۰۰ کیلومترمربع، به‌عنوان چهارمین استان پهناور ایران در شمال شرق کشور بین عرض جغرافیایی ۳۴ تا ۳۸ درجه شمالی و طول ۵۷ تا ۶۱ درجه شرقی قرار دارد. بارش متوسط سالانه آن ۲۰۸ میلی‌متر است که توزیع آن از دامنه‌های شمالی استان به سمت جنوب، کاهشی و عمدتاً در فصول زمستان و بهار به‌صورت برف و باران است (Fallah-Ghalhari, Moosavi-Baygi & Habibi- Nokhandan, 2000).

آزمایش‌های مزرعه‌ای

دو آزمایش مزرعه‌ای با شرایط محدودیت آب و محدودیت نیتروژن برای دو رقم سیب‌زمینی آگريا و آریندا، در سال ۱۳۹۹ در شهرستان قوچان در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه عرض شمالی و ۵۸ درجه طول شرقی اجرا شد. ارتفاع از سطح دریای این شهرستان، ۱۳۵۰ متر و دارای آب‌وهوای معتدل و سرد با میانگین بارش سالانه ۲۹۶ میلی‌متر است. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. در آزمایش اول سه سطح آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در کرت اصلی و دو رقم سیب زمینی شامل رقم آگريا که نیمه‌دیررس با رنگ گوشت و پوست زرد و مقاوم به ویروس پیچیدگی برگ و حساس به بیماری ساق سیاه و اسکب معمولی و رقم آریندا نیمه زودرس

¹ - Calibration

² - Validation

با رنگ پوست زرد و گوشت زرد کم‌رنگ با عملکرد بالا در کرت های فرعی قرار گرفتند. آزمایش دوم با چهار سطح نیتروژن صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص به عنوان عامل کرت اصلی و دو رقم سیب زمینی (آگria و آریندا) به عنوان عامل کرت فرعی اجرا شد (از نتایج این آزمایش شامل ماده خشک، سطح برگ، فنولوژی و عملکرد، در ادامه جهت واسنجی مدل استفاده گردید).

آماده سازی زمین، عملیات کاشت و داشت

جهت تعیین بافت و سایر ویژگی های خاک، قبل از اجرای آزمایش نمونه برداری انجام شد. برای این منظور در چند نقطه از مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک نمونه گیری انجام شد. نمونه ها با هم ترکیب و نمونه ای مرکب به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج آزمون خاک در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Some physicochemical properties of the soil of the experiment site

بافت خاک Soil texture	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS m ⁻¹)	درصد اشباع (%) Saturation percent (%)	اسیدیته pH	کربن (%) C (%)	نیتروژن (%) Total N (%)	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم خاک) Available P (mg kg ⁻¹ soil)	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم خاک) Available K (mg kg ⁻¹ soil)
لوم رسی Clay loam	2.1	36	7.62	1.3	0.13	19	147

به منظور آماده سازی بستر کاشت، پس از شخم عمیق، کلوخه ها توسط دیسک خرد و زمین به وسیله لولر کاملاً تسطیح شد. سپس کرت های اصلی به ابعاد ۱۲×۴ متر ایجاد شدند. قبل از کشت، طبق عرف منطقه، کود سوپر فسفات تریپل به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به همراه ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار به طور یکنواخت در زمین پخش و تا عمق ۳۰ سانتی متری با خاک مخلوط شد. در تاریخ ۱۰ خردادماه و همزمان با تاریخ کشت رایج در منطقه، اقدام به کشت غده شد. ضد عفونی غده ها توسط قارچ کش کاپتان انجام شد. چهار ردیف سیب زمینی به طول ۴ متر در هر کرت کشت شد که ردیف ها از یکدیگر ۷۵ سانتی متر فاصله داشته و فاصله غده ها روی ردیف ۱۵ سانتی متر بود. تراکم ۹ بوته در مترمربع و عمق کاشت ۱۵ سانتی متر بود. مراحل داشت سیب زمینی شامل آبیاری، مبارزه با علف های هرز، بیماری ها و آفات به موقع انجام شد. علف کش سنکور (متری بوزین) جهت کنترل علف های هرز به کار گرفته شد و جهت پاکسازی کامل علف های هرز، وجین

دستی در یک مرحله قبل از گلدهی سیبزمینی انجام شد. جهت پیشگیری از بیماری‌های قارچی، سمپاشی در دو نوبت شامل قبل و بعد از گلدهی توسط قارچ‌کش‌های استروبی و متالاکسیل-مانکوزب انجام شد. جهت مبارزه با حشره مکنده تریپس، حشره‌کش دیمتوات به میزان یک لیتر در هکتار قبل از گلدهی مصرف شد. نیتروژن مورد نیاز در تیمارهای کودی از طریق مصرف کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) تأمین شد. اوره با توجه به سطوح کاربرد آن در سه نوبت (۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز بعد از کاشت) و تا قبل از مرحله گلدهی سیبزمینی در مزرعه مصرف شد. آبیاری مزرعه مطابق عرف منطقه، هر ۸ روز یک مرتبه به صورت جویچه‌ای (توسط سیفون) با حجمی معادل ۴۰۰ مترمکعب آب در هکتار (برای تیمار آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی) انجام شد.

نمونه گیری، اندازه گیری و محاسبات

همزمان با رسیدگی فیزیولوژیک سیبزمینی و خشک شدن حدود ۸۰ درصد برگ‌های پایینی گیاه، برداشت انجام شد. دو خط کناری در هر کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای حذف گردید و از دو خط وسطی (به مساحت دو متر مربع) نمونه‌برداری‌ها انجام شد. ویژگی‌های مورد بررسی شامل: ارتفاع بوته، تعداد غده در بوته به تفکیک سایز ریز، متوسط و درشت، وزن خشک اندام هوایی، عملکرد غده به صورت تر و خشک و همچنین میزان نیتروژن موجود در غده و اندام‌های هوایی گیاه در مرحله برداشت سیبزمینی بود. برای اندازه‌گیری نیتروژن از دستگاه کجلدال و روش برمنر و مولوانی استفاده شد (Bremner & Mulvaney, 1982). قطر غده‌ها با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. غده‌های ریز با قطر کمتر از ۳۵ میلی‌متر (کوچک)، غده‌های متوسط با قطر ۳۵ تا ۵۵ میلی‌متر و غده‌های درشت با قطر بیشتر از ۵۵ میلی‌متر ثبت و گزارش شدند. با توجه به تعداد غده‌های کوچک، متوسط و بزرگ، درصد هر کدام از آن‌ها تعیین شد.

شبیه سازی رشد و نمو سیب زمینی بوسیله مدل SUBSTOR-Potato

جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز

اطلاعات مورد نیاز ورودی مدل، شامل حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، بارندگی و تعداد ساعات آفتابی روزانه مربوط به دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۱۱-۲۰۲۰) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. پارامترهای گیاهی لازم برای واسنجی مدل از جمله اطلاعات مراحل نمو سیبزمینی از داده‌های ایستگاه‌های تحقیقاتی، و پژوهش‌های انجام شده استخراج شد. ورودی‌های اصلی خاک شامل حجم آب خاک در نقطه پژمردگی، مقدار اولیه آب خاک، ضرایب زه‌کشی و رواناب، پارامترهای

رشد ریشه، ظرفیت زراعی و اشباع، تبخیر اولیه و آلودگی خاک که از منابع علمی، مقالات منتشر شده و پرسشنامه‌های تکمیل شده توسط کشاورزان، استخراج گردید. داده‌های مدیریت زراعی شامل تراکم، تاریخ و عمق کاشت، مقدار و زمان مصرف کود شیمیایی و آب آبیاری و همچنین شرایط اولیه آب و محتوای نیتروژن خاک است که از مقالات منتشر شده و پرسشنامه‌های تکمیل شده توسط کشاورزان تهیه شد.

تعیین ناحیه های اقلیمی-کشاورزی استان خراسان رضوی (کلاستر بندی منطقه)

از بین ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی، ۱۴ شهرستان شامل قوچان، فریمان، گلستان، نیشابور، تربت حیدریه، مشهد، درگز، تربت جام، گناباد، خواف، کاشمر، سبزوار، سرخس و بردسکن دارای داده‌های بیش از ۱۰ سال بودند که انتخاب شدند (شکل ۱). داده‌های مورد استفاده شامل بارندگی و تعداد ساعات آفتابی روزانه و حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، مربوط به دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۱) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. به توجه به اینکه برخی از داده‌ها در سال‌های مختلف ناقص بود، داده‌های گم شده به وسیله ابزار WeatherMan در برنامه DSSAT برآورد شد. میزان تشعشع روزانه با استفاده از داده‌های تعداد ساعات آفتابی و بر اساس معادله آنگستروم ضریب نشر اتمسفر برای روزهای سال، محاسبه شد. تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه به روش Priestley-Taylor، و بر اساس داده‌های هواشناسی در DSSAT برآورد شد.

بر اساس شیوه‌نامه ارائه شده توسط اطلس جهانی خلاء عملکرد، طبقه‌بندی نواحی اقلیمی کشاورزی بر اساس سه معیار، شامل مجموع درجه روزهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد ((Growing degree days (GDD)) (معادله ۱)، شاخص خشکی سالانه ((Annual aridity index (AI)) (نسبت بارندگی کل سالانه به مجموع کل تبخیر و تعرق بالقوه سالانه) (معادله ۲) و شدت فصلی بودن درجه حرارت (Seasonality Temperature) (انحراف معیار ۱۲ ماهه میانگین درجه حرارت ماهانه) انجام شد (van Bussel et al., 2015). در ادامه، نواحی اقلیمی-کشاورزی استان خراسان با اجرای آنالیز خوشه‌ای روی معیارهای فوق تعیین (شکل ۱) و موقعیت آنها بر روی نقشه نشان داده شد (شکل ۲).

$$\text{Equ. 1} \quad GDD = \sum_{i=1}^{365} \max(0, T_i - T_b) \quad \text{معادله (۱)}$$

$$\text{Equa. 2} \quad AI = \frac{MAP}{MAE} \quad \text{معادله (۲)}$$

در معادله ۱، T_i دمای روزانه (بر حسب درجه سانتی‌گراد) و T_b دمای پایه (بر حسب درجه سانتی‌گراد) است (دمای پایه صفر درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد). در معادله ۲، MAP میانگین بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر و MAE میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه بر حسب میلی‌متر است.

عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل

عملکرد واقعی: میزان عملکرد واقعی سیب‌زمینی، برای دوره ۱۰ ساله‌ی (۲۰۲۰-۲۰۱۱) شهرستان‌های واقع در هر ناحیه اقلیمی از سالنامه‌های آماری جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی و تکمیل پرسشنامه جمع‌آوری شد. میانگین عملکرد واقعی با استفاده از داده‌های واقعی و معادله ارائه شده توسط مرلوسا و همکاران (Merlos et al., 2015) برآورد شد. میانگین عملکرد واقعی برای هر ناحیه اقلیمی با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد:

$$\text{Equ. 3} \quad Y_k = \sum_{j=1}^n (\mu_j \times \frac{a_j}{a_k}) \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن Y_k میانگین عملکرد واقعی محصول در ناحیه اقلیمی K ، n تعداد شهرستان‌های ناحیه k ، μ_j میانگین عملکرد واقعی محصول در شهرستان j ، a_j سطح زیر کشت محصول در شهرستان j و a_k سطح زیر کشت محصول در کل ناحیه اقلیمی k می‌باشد.

عملکرد پتانسیل: عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی در مناطق مختلف استان خراسان رضوی با استفاده از برنامه DSSAT (مدل SUBSTOR-Potato) برآورد گردید. در این مدل زمان غده‌زایی بر اساس هر دو عامل طول و روز دما تعیین می‌شود. رشد ساقه بر اساس ۷۵ درصد رشد برگ محاسبه گردیده و رشد ریشه به‌عنوان تابعی از رشد برگ و ریشه تخمین زده می‌شود (Arora, Nath & Singh, 2013). اگرچه ضرایب ژنتیکی خاص ارقام، تقریباً شبیه به هم هستند، ولی یافته‌ها نشان می‌دهد که ارقام به عوامل اقلیمی واکنش‌های متفاوت می‌دهند.

واسنجی^۱ و اعتبارسنجی^۲ مدل

^۱ - Calibration

^۲ - Validation

از روش واسنجی، برای برآورد پارامترهای مدل استفاده شد. تعیین پارامترها، بر مبنای آزمون و خطا و با توجه به تعریف و مفهوم هر پارامتر در محدوده‌ی معقول آن‌ها انجام شد. همچنین از ابزار Sensitivity نرم‌افزار DSSAT برای رسیدن به حداقل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. از داده‌های حاصل از مزرعه آزمایشی (چهار سطح نیتروژن: صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و دو رقم سیب‌زمینی شامل اگریا و آریندا) شامل تعداد دفعات آبیاری، حجم کل آب آبیاری، زمان و مقدار مصرف کود نیتروژن، تراکم، تاریخ کاشت، فنولوژی (مراحل نمو شامل تاریخ سبز شدن، تاریخ شروع غده‌زایی، تاریخ رسیدگی) و عملکرد، جهت واسنجی مدل استفاده گردید. برای واسنجی اکثر مدل‌های رشد گیاهی، یک روش سیستماتیک ارائه شده و آن بدین گونه است که ابتدا باید تاریخ گلدهی و تاریخ رسیدگی و سپس، تجمع ماده خشک و شاخص سطح برگ و در پایان، اجزای عملکرد و عملکرد غده مورد واسنجی قرار گیرد (Hoogenboom, et al., 1999). در این آزمایش، ابتدا پارامترهای مربوط به ضرایب ژنتیکی رقم که جزء مهم‌ترین پارامترها در بخش واسنجی مدل محسوب می‌شود با استفاده از نرم‌افزار GenCalc محاسبه شد. مقادیر ضرایب ژنتیکی G2 و G3 با استفاده از اطلاعات مزرعه‌ی آزمایشی نیز محاسبه شد که مقدار آن‌ها به مقدار تخمین زده شده با ابزار GenCalc بسیار شبیه بود.

مدل پس از واسنجی، بوسیله اطلاعات حاصل از آزمایشات انجام شده در ایستگاه‌های تحقیقاتی در شرایط بهینه رشد (بدون محدودیت آب و عناصر غذایی و آفات و بیماری‌ها) تعیین اعتبار شد. شاخص‌های آماری که برای مقایسه نتایج اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی مدل با داده‌های واقعی مورد استفاده قرار گرفت شامل شاخص توافق ویلموت (d)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب تبیین (R^2) بود. هر چقدر مقدار d برآورد شده توسط مدل به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است پیش‌بینی را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده، انجام دهد (Wilmott, 1982).

پهنه بندی عملکرد و آنالیز خلاء عملکرد

عملکردهای پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل و نیز مقادیر عملکرد واقعی در فواصل بین شهرستان‌های تحت بررسی در سطح استان، میان‌یابی شده و نتایج به سیستم اطلاعات جغرافیایی در نرم‌افزار ARC/INFO منتقل و نقشه‌های مربوط به پهنه‌بندی در شهرستان‌های تحت بررسی تهیه شدند.

نتایج پیش‌بینی‌شده برای پتانسیل عملکرد سیب‌زمینی (Y_p) در پهنه‌های مختلف استان و نیز مقادیر عملکرد واقعی (Y_a) خراسان جهت تخمین خلاء عملکرد مورد استفاده قرار گرفت، به این منظور ضریب عملکرد منطقه‌ای^۱ (RYF) بر اساس معادله ۴ محاسبه گردید:

$$\text{Equ. 4} \quad RYF = \frac{Y_a}{Y_p} \quad \text{معادله (۴)}$$

ضریب عملکرد منطقه‌ای بین صفر و ۱ متغیر است و نشان دهنده توسعه نظام تولید در یک منطقه است. با مدیریت صحیح آب، آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، عناصر غذایی و بهینه‌سازی عملیات زراعی مانند تاریخ کاشت و تراکم، مقدار عملکرد واقعی به عملکرد پتانسیل نزدیک خواهد شد.

با استفاده از مدل و اطلاعات اقلیمی بلندمدت، عملکرد پتانسیل برای سال‌های مختلف محاسبه و با توجه به عملکرد واقعی منطقه در همان سال‌ها، خلاء عملکرد در هر سال محاسبه گردید. خلاء عملکرد (Y_g) اختلاف بین عملکرد پتانسیل (Y_p) و عملکرد واقعی (Y_a) خواهد بود (معادله ۵).

$$\text{Equ. 5} \quad (Y_g) = (Y_p) - (Y_a) \quad \text{معادله (۵)}$$

پس از محاسبه عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل، مجدداً در شرایط محدودیت آب، عملکرد پتانسیل محاسبه و اختلاف دو عملکرد نشان دهنده سهم آب در ایجاد خلاء است. همچنین در شرایط محدودیت آب و نیتروژن مجدداً عملکرد پتانسیل محاسبه گردید و اختلاف عملکرد بدست آمده در شرایط محدودیت آب و نیتروژن با عملکرد پتانسیل بدون محدودیت، نشان دهنده سهم آب و نیتروژن در ایجاد خلاء است. سپس با توجه به اقلیم و نوع مدیریت مزرعه در هر منطقه، پیشنهاداتی در جهت کاهش خلاء عملکرد ارائه شد. همچنین با استفاده از مدل پس از واسنجی و تعیین اعتبار آن، می‌توان بهترین تاریخ کاشت، تراکم، آبیاری و سایر عوامل مدیریتی را در جهت افزایش تولید در واحد سطح و افزایش بهره‌وری در مناطق مختلف ارائه نمود.

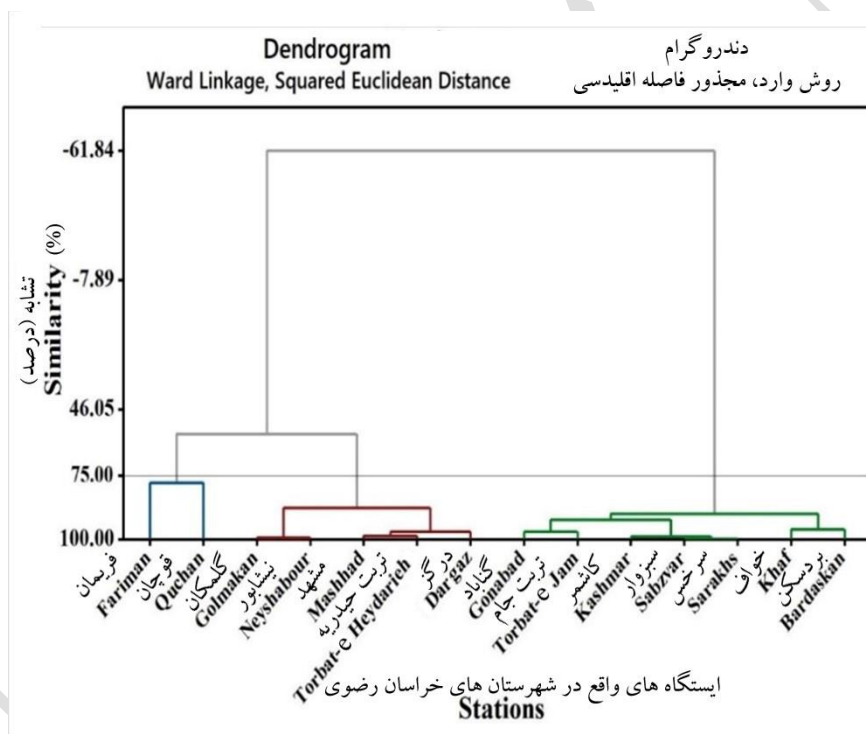
نتایج و بحث

نواحی اقلیمی-کشاورزی استان خراسان با اجرای آنالیز خوشه‌ای تعیین و موقعیت آنها بر روی نقشه نشان داده شد (شکل های ۱ و ۲). ناحیه ۱ ($R1$: معتدل و نیمه‌خشک) شامل شهرهای قوچان و فریمان، دارای بیشترین میزان بارش و کم‌ترین

¹ - Regional Yield Factor

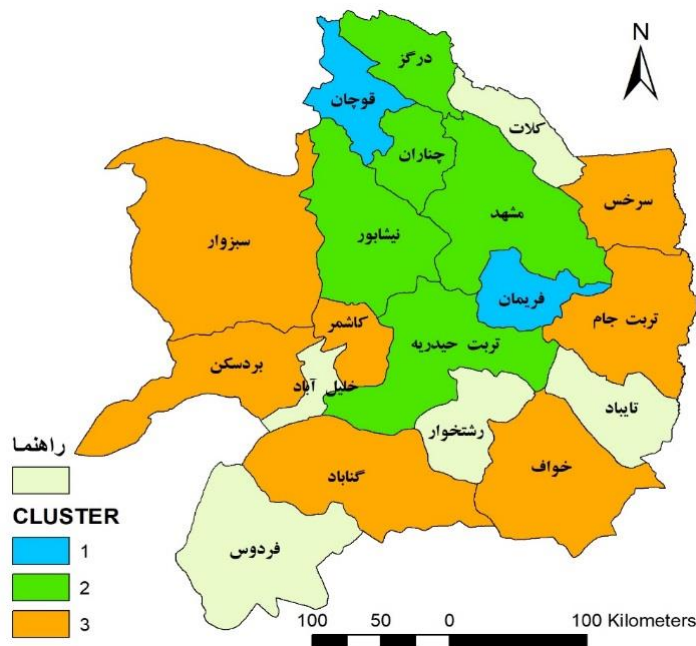
میانگین دمای ماهانه بوده، میانگین مجموع درجه روزهای رشد بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد در این ناحیه 4659°C و میانگین شاخص خشکی آن $0/204$ است که بر اساس طبقه‌بندی متزگر و فلاناگین (Metzger & Flanagan, 2013) منطقه‌ای معتدل و نیمه‌خشک می‌باشد.

ناحیه ۲ ($R2$: گرم و نیمه‌خشک)، شهرهای گل‌مکان، نیشابور، تربت‌حیدریه، مشهد و درگز در حداصل ناحیه‌های یک و سه بوده و با میانگین مجموع درجه روزهای رشد سالانه برابر با 5651°C و میانگین شاخص خشکی حدود $0/163$ بر اساس طبقه‌بندی متزگر و فلاناگین (Metzger & Flanagan, 2013)، منطقه‌ای گرم و نیمه‌خشک می‌باشد.



شکل ۱- دندروگرام حاصل از اجرای آنالیز خوشه‌ای بر روی متغیرهای اقلیمی-کشاورزی شهرستان‌های استان خراسان رضوی و تفکیک ۳ ناحیه اصلی ($R3$ و $R2$, $R1$). خوشه‌بندی بر مبنای ۷۵ درصد تشابه.

Fig. 1- Dendrogram of cluster analysis for agroclimatic variables of studied cities across Khorasan province resulted in 3 main area ($R1$, $R2$, $R3$). Clustering was done based on 75% similarity.



شکل ۲- موقعیت شهرستان‌های استان خراسان رضوی و خوشه‌بندی آن‌ها در سه گروه بر اساس درجه حرارت روزهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد، شاخص خشکی سالانه و شدت فصلی بودن درجه حرارت

Fig. 2- Location of studied cities across Khorasan province were clustered in 3 groups based on days with temperature above zero, annual aridity index and severity of temperature seasonality

ناحیه ۳ (R3: گرم و خشک) شامل شهرهای تربت‌جام، گناباد، خواف، کاشمر، سبزوار، سرخس و بردسکن از بالاترین میانگین دما و کمترین میزان بارندگی برخوردار است، میانگین مجموع درجه روزهای رشد سالانه آن 6765°C بوده و با میانگین شاخص خشکی حدود $0/096$ ناحیه‌ای گرم و خشک محسوب می‌شود.

واسنجی و تعیین اعتبار مدل

واسنجی مدل: مهم‌ترین ضرایب ژنتیکی برای تعیین عملکرد در مدل DSSAT، پارامترهای G2 و G3 بودند که مقادیر

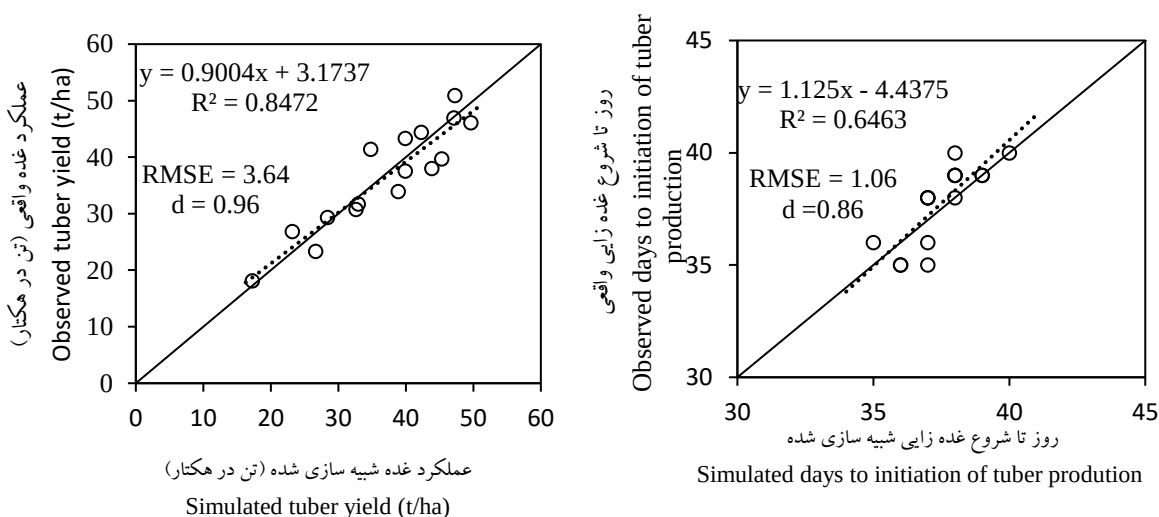
تنظیم‌شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی گیاهی در مدل DSSAT برای محصول سیب زمینی

Table 2- Genetic coefficients of potato in DSSAT model

رقم Cultivar	G2 (سرعت توسعه‌ی برگ) Leaf expansion rate (cm ² m ² d ⁻¹)	G3 (سرعت رشد غده) Tuber growth rate (gm ⁻² d ⁻¹)	PD (شاخص القای غده‌زایی) Index of induction of tuber production	P2 (حساسیت آغازش غده به فتوپریود) Sensitivity of initiation of tuber to photoperiod	TC دمای بحرانی Critical temperature (°C)
آگريا Agria	1100	22	1	0.3	18

عملکرد غده مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، همچنین روزهای کاشت تا غده‌زایی بعد از واسنجی در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج حاکی از همبستگی قوی بین مقادیر روزهای کاشت تا غده زایی مشاهده شده (۳۸ روز) و شبیه‌سازی شده (۳۸ روز) می باشد. تعداد روزهای کاشت تا شروع غده‌زایی سیب‌زمینی در نواحی مختلف اقلیمی به‌خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شد. میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل، به مقادیر مشاهده شده در نواحی مختلف اقلیمی بسیار نزدیک بود، همچنین مقدار RMSE، CV و d به ترتیب (۳/۶۴۲ روز، ۰/۵ و ۰/۹۵۸) بود که نشان دهنده واسنجی مناسب مدل است (شکل ۳).

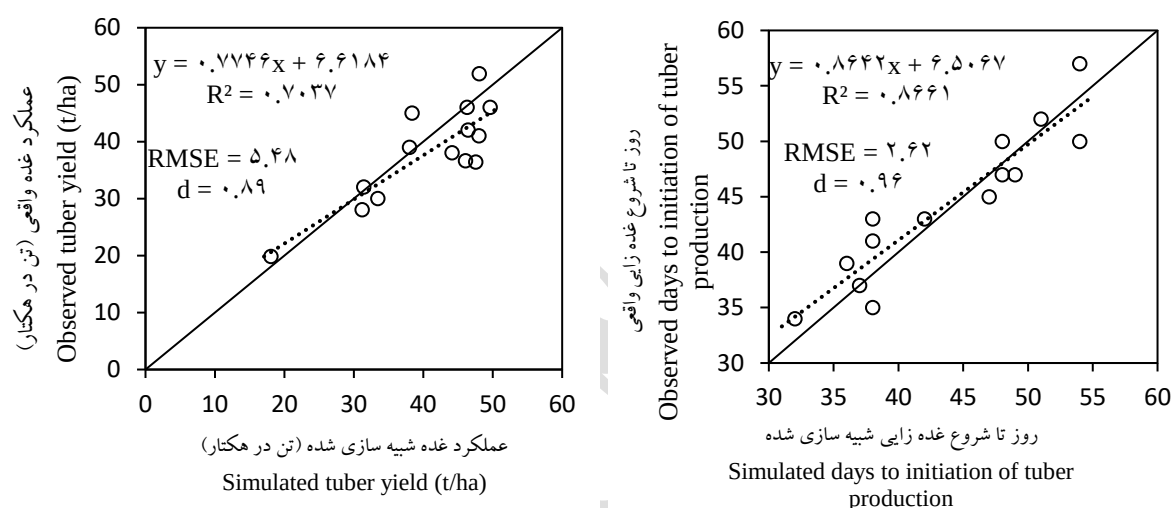


شکل ۳- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی و روز تا شروع غده زایی شبیه‌سازی شده و روز تا شروع غده‌زایی واقعی (براساس داده های بکار رفته برای واسنجی مدل).

Fig. 3- Comparison of simulated yield with actual yield, simulated days to initiation of tuber production and observed days to initiation of tuber production (based on data input for model calibration)

باقری و همکاران (Bagheri, Gharineh & Bakhshandeh, 2015) در تحقیقی دریافتند که علی‌رغم تفاوت‌های ناشناخته در سن فیزیولوژیک قطعات بذری، مدل SUBSTOR-Potato به‌طور دقیق آغازش غده (TI) را شبیه‌سازی می‌کند. این شبیه‌سازی با شرایط رشد سریع (غده‌زایی ۳۰ تا ۴۰ روز پس از کاشت) و تاخیر در غده‌زایی تا اواسط فصل رشد (۸۰ تا ۹۰ روز پس از کاشت) انجام شد.

تعیین اعتبار مدل: مدل با دقت قابل‌قبولی تعداد روز تا شروع غده‌زایی را شبیه‌سازی کرد. نتایج تعداد روز تا شروع غده‌زایی شبیه‌سازی‌شده و تعداد روز تا شروع غده‌زایی واقعی، همچنین مقایسه عملکرد شبیه‌سازی‌شده و عملکرد واقعی سیب‌زمینی در شکل ۴ نشان داده شده است.



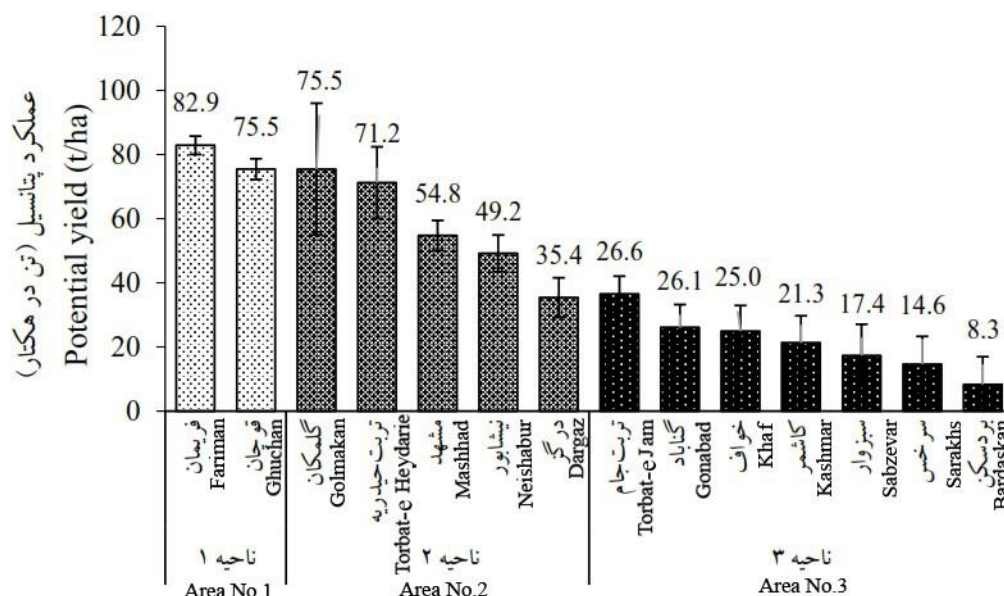
شکل ۴- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی‌شده و عملکرد واقعی و روز تا شروع غده‌زایی شبیه‌سازی‌شده و روز تا شروع واقعی (بر اساس داده‌های بکار رفته برای اعتبار سنجی مدل)

Fig. 4- Comparison of simulated yield with actual yield, simulated days to initiation of tuber production and observed days to initiation of tuber production (based on data input for model validation)

ارزیابی مدل با پارامترهای کالیبره شده ارقام، نشان از تطبیق دقیق بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده شده دارد (شکل ۴). معیارهای ارزیابی شامل $RMSE$ ، R^2 و d به ترتیب ۲/۶۲، ۰/۸۶۶ و ۰/۹۶ برای روز تا شروع غده‌زایی و ۵/۶۳ تن در هکتار، ۰/۷۷۹ و ۰/۹۰ برای عملکرد غده نشان داد که مدل در شبیه‌سازی مراحل رشد فنولوژیکی (غده‌زایی و رسیدگی)

سیب‌زمینی بسیار قوی بوده و از دقت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی است، پیش‌بینی مراحل نمو گیاه یا نمو فنولوژیک اهمیت زیادی دارد. پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها، وابسته به پیش‌بینی نمو فنولوژیک است. کارایی مدلی دینامیک برای شبیه‌سازی رشد سیب‌زمینی در شرایط مختلف نیتروژن توسط گرین‌وود و همکاران (Greenwood, Neeteson & Draycott, 1985) بررسی گردید که انطباق بسیار خوبی بین عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده مشاهده شد.

عملکرد پتانسیل: مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله در سطح استان در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس پیش‌بینی مدل، بیشترین عملکرد پتانسیل در سطح استان مربوط به ناحیه یک و در شهرستان فریمان (در سال ۲۰۱۲) با مقدار ۸۶/۷ تن در هکتار بود. کمترین مقدار عملکرد پتانسیل برای شهرستان بردسکن واقع در ناحیه اقلیمی ۳ با مقدار ۸/۳ تن در هکتار برآورد شد. کشت سیب‌زمینی در ناحیه ۳، رواج نداشته و تنها در بخش نصرآباد در شهرستان تربت‌جام کشت انجام می‌گردد (Ministry of Agriculture, 2022). میانگین ده ساله عملکرد پتانسیل برای این ناحیه ۲۱/۶ تن در هکتار بود.

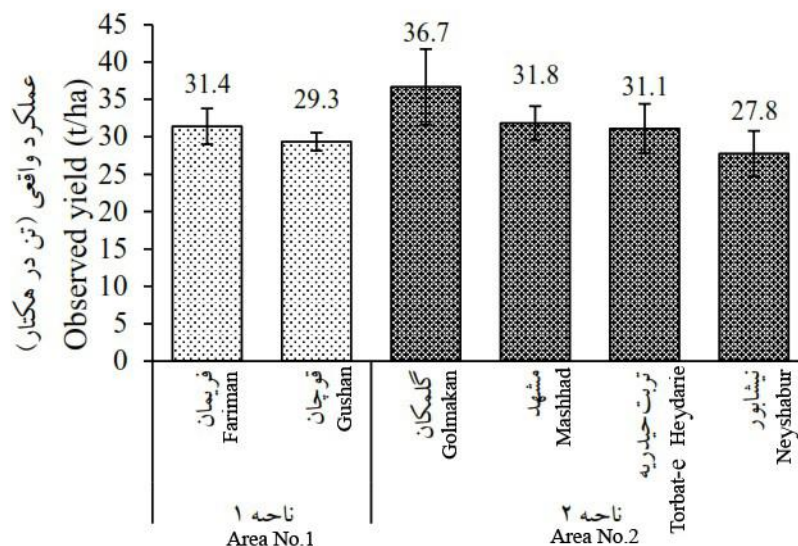


شکل ۵- مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۱۱-۲۰۲۰) در سه ناحیه اقلیمی در استان خراسان رضوی

Fig. 5- Simulated potential yield of potato across three climatic zones during 10 years of study

عملکرد پتانسیل می‌تواند تحت تأثیر تغییر شرایط اقلیمی قرار گرفته و این تغییرات ممکن است از تحقق پتانسیل ژنتیکی ارقام ممانعت نموده و یا باعث بهبود آن شود (Neumann, Verburg, Stehfest & Muller, 2010; Hall & Richards, 2013). برای مثال هاچمن و همکاران (Hochman, Gobbett, Horan & Garcia, 2016) در تحقیقی عنوان نمودند کاهش عملکرد پتانسیل ارقام پرمحصول گندم دیم در استرالیا به دلیل کاهش میزان بارش سالانه است، این در حالیست که جاگارد و همکاران (Jaggard, Qi & Ober, 2010) گزارش نمودند که به دلیل بهبود شرایط اقلیمی به‌ویژه درجه حرارت فصل بهار به علت گرمایش جهانی، عملکرد پتانسیل چغندر قند در انگلستان افزایش یافته و اصلاح ژنتیکی ارقام چغندر قند نقشی در افزایش پتانسیل عملکرد ندارد. با توجه به نوع منطقه و اقلیم عملکرد بالقوه (پتانسیل) نیز متفاوت است. رسیدن به عملکرد پتانسیل برای طیف گسترده‌ای از کشاورزان یک منطقه غیرممکن است، چون در بسیاری از اوقات، دستیابی به آن با توجه به نهاده‌های مصرفی توجیه اقتصادی ندارد (Van Ittersum et al., 2013). لذا برآورد عملکرد پتانسیل معمولاً از طریق مدل‌سازی و بر اساس فرضیات مبتنی بر بهینه بودن شرایط انجام می‌شود.

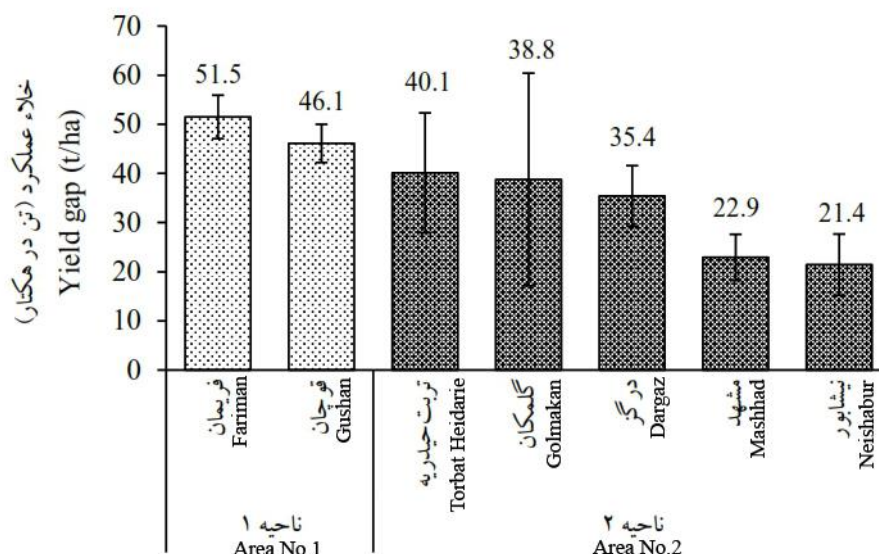
عملکرد واقعی: میانگین عملکرد واقعی سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ از آمارنامه جهاد کشاورزی و داده‌های اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی استخراج گردید. بر این اساس میانگین عملکرد واقعی ۱۰ ساله شهرستان فریمان در این ناحیه ۳۱/۴ تن در هکتار و میانگین عملکرد واقعی ۱۰ ساله شهرستان قوچان ۲۹/۳۵ تن در هکتار برآورد گردیده است. میانگین عملکردهای واقعی در ناحیه ۲، از ۲۷/۸ تن در هکتار تا ۳۶/۷ تن در هکتار متغیر بود. در بین شهرستان‌های واقع شده در ناحیه ۲، بیشترین میانگین عملکرد واقعی مربوط به سال ۲۰۱۵ در شهرستان گلستان با ۴۸/۷ تن در هکتار و کمترین میانگین عملکرد واقعی مربوط به سال ۲۰۱۲ در شهرستان نیشابور با ۲۲ تن در هکتار می‌باشد. بر این اساس میانگین عملکرد واقعی ۱۰ ساله شهرستان گلستان، مشهد، تربت‌حیدریه و نیشابور به ترتیب ۳۶/۷، ۳۱/۸، ۳۱/۱ و ۲۷/۸ تن در هکتار گزارش شده است (شکل ۶). همان گونه که قبلاً بیان شد، در ناحیه اقلیمی ۳ کشت سیب‌زمینی در مساحت بسیار محدود انجام می‌شود و اطلاعات درستی از آن در دست نیست.



شکل ۶- مقادیر میانگین عملکرد واقعی سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۱۱-۲۰۲۰) در ناحیه های اقلیمی ۱ و ۲
 Fig. 7- The mean of potato actual yield in climatic zones 1 and 2 during 10 years of study

خلاء عملکرد سیب‌زمینی

میانگین خلاء عملکرد در ناحیه ۱ که حاصل اختلاف عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی است، در شکل ۷ نشان داده شده است. میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در شهرستان فریمان ۵۱/۵ تن در هکتار و در شهرستان قوچان ۴۶/۱ تن در هکتار برآورد گردید. همچنین میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در ناحیه ۱، ۴۸/۸ تن در هکتار برآورد شد. در ناحیه ۲، خلاء عملکرد بین ۲۱/۴ تا ۴۰/۱ تن در هکتار متغیر می‌باشد. میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در شهرستان‌های تربت‌حیدریه، گلکان، درگز، مشهد و نیشابور به ترتیب ۴۰/۱، ۳۸/۸، ۳۵/۴، ۲۲/۹ و ۲۱/۴ تن در هکتار برآورد گردید. همچنین میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در ناحیه ۲، ۳۱/۷ تن در هکتار برآورد شد.



شکل ۷- میانگین خلاء عملکرد سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۱۱-۱۰۲۰) در ناحیه‌های اقلیمی ۱ و ۲

Fig. 7- The mean of potato yield gap in climatic regions 1 and 2 during 10 years study

عوامل مختلفی می‌تواند در ایجاد خلاء عملکرد نقش داشته باشند. در تحقیق هاورکورت (Haverkort, 2014) بیان شد که در مناطقی که خلاء عملکرد سیب‌زمینی حدود ۶۰ درصد عملکرد پتانسیل است، با افزایش مقدار عملکرد واقعی، خلاء عملکرد کاسته می‌شود. پایین بودن عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه شمال شرق ایران به علت عدم استفاده از بذور گواهی‌شده، بافت نامناسب خاک، تنش خشکی، خاک‌دهی نامناسب پای بوته، آماده‌سازی نامناسب بذر (عدم ترمیم زخم) و تراکم کم بوته می‌باشد (Sepahvand, 2007). خلاء عملکرد سیب‌زمینی در مناطق مختلف کشور ژاپن توسط دگوچی و همکاران (Deguchi, Iwama & Haverkort, 2016) بررسی شد. نتایج نشان داد خلاء عملکرد بر اساس نسبت عملکرد واقعی به پتانسیل بین ۰/۲۱ و ۰/۶۳ با متوسط ۰/۴ می‌باشد. ایشان وضعیت غده بذری (رقم، سن فیزیولوژیک، میزان بذر، سلامت بذر) و مدیریت مزرعه (تغذیه، وضعیت خاک، مقابله با عوامل کاهنده) را از مهم‌ترین دلایل خلاء عملکرد عنوان نمودند. اسوویبیور و همکاران (Svubure, Struik, Haverkort & Steyn, 2015) در تحقیقی در زیمبابوه نشان دادند که میانگین عملکرد واقعی سیب‌زمینی ۸ تا ۳۵ درصد عملکرد پتانسیل بود و خلاء عملکرد ۶۵ تا ۹۲ درصدی مشاهده شد که نشان می‌دهد این

منطقه، از پتانسیل بالایی برای افزایش تولید برخوردار است. مصرف بالای کود در این منطقه و عدم حصول عملکرد مطلوب، نشان از ناکارآمدی استفاده از کود در تولید سیب زمینی در زیمبابوه است.

ضریب تغییرات عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد

ضریب تغییرات پتانسیل عملکرد در نواحی سه گانه استان خراسان رضوی در جدول ۳ آورده شده است. بیشترین ضریب تغییرات مربوط به شهرستان بردسکن با ۱۰۴ درصد و کمترین ضریب تغییرات مربوط به شهرستان فریمان با ۳ درصد می باشد. تشابه داده های هواشناسی ده ساله و یا اختلاف آن ها باعث کاهش و یا افزایش ضریب تغییرات خواهد شد. در شهرستان بردسکن به علت اختلاف زیاد بین داده های هواشناسی ده ساله، ضریب تغییرات بالا بدست آمده است. شهرستان گلستان با دامنه تغییرات عملکرد واقعی ۳۰-۴۸/۷ تن در هکتار بیشترین نوسانات عملکرد (ضریب تغییرات ۱۴) و شهرستان مشهد با دامنه تغییرات عملکرد واقعی ۲۹-۳۵ تن در هکتار کمترین ضریب تغییرات را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). با توجه به اینکه عملکرد پتانسیل پیش بینی شده توسط مدل برای شهرستان گلستان از ۴۷/۴ تا ۹۶/۷ تن در هکتار متغیر بود، ضریب تغییرات خلاء عملکرد این شهرستان با عدد ۵۵/۸ درصد، بیشترین ضریب تغییرات را در این ناحیه به خود اختصاص داد. ضریب تغییرات خلاء عملکرد برای شهرستان های تربت حیدریه، نیشابور، مشهد و درگز به ترتیب ۳۰/۴، ۲۹/۱، ۲۰/۵ و ۱۷/۴ درصد بود (جدول ۳).

جدول ۳- ضریب تغییرات عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد سیب زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۱۱-۲۰۲۰) برای شهرستان های واقع در ناحیه های اقلیمی ۱، ۲ و ۳

Table 3- Coefficients of variation of potential yield, actual yield and yield gap of potato during 10 years study for cities located across climatic regions 1 and 2

شهرستان/ض ریب تغییرات (%) City/Coefficient of variation	فریمان Fari man	قوچان Guc han	گلستان Golm akan	تربت حیدریه Torba t Heyd arieh	مشهد Mash had	نیشابور Neysh about	درگز Darg az	تربت جام Tor bat Jaa m	گناباد Gona bad	خوا ف Kh aaf	کاشمر Kash mar	سبزوار Sabz evar	سرخ س Sar akh s	بردسکن Bard askan
عملکرد پتانسیل Potential yield	3	4	37	16	9	12	17	15	27	32	39	56	59	104
عملکرد واقعی Actual yield	7.6	4.1	13.8	10.6	7.1	11								

17.4 29.1 20.5 30.4 55.8 8.4 8.6 خلاء عملکرد

Yield gap

ناحیه ۱: فریمان و قوچان. ناحیه ۲: گلماکان، تربت حیدریه، مشهد و نیشابور، درگز. ناحیه ۳: تربت جام، گناباد، خواف، کاشمر، سبزوار، سرخس و بردسکن

Area 1: Freeman and Guchan. Area 2: Golmakan, Torbat Heidarie, Mashhad, Neishabur, and Dargaz. Area 3: Torbat Jaam, Gonabad, Khaf, Kashmar, Sabzevar, Sarakhas, and Bardaskan

گزارش شده است که در منطقه شمال شرق، نوسانات عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی در محدوده‌ی ۶۳/۵ تا ۵۶ تن در هکتار با ضریب تغییرات ۱۳ درصد بود. ولی عملکرد واقعی در محدوده‌ی ۳۶/۱۱ تا ۱۵/۷۴ تن در هکتار با ضریب تغییرات ۱۲۹/۵ درصد نوسان داشت. کمترین عملکرد در نواحی غربی منطقه شمال شرق وجود دارد. لذا عملکرد پایین سبب گردیده تا خلاء عملکرد سیب‌زمینی در مناطق با عملکرد پتانسیل کم، زیاد باشد (Mohammadi, Koocheki & Nassiri- Mahallati, 2018). در تحقیق محمدی و همکاران (Mohammadi, Koocheki & Nassiri-Mahallati, 2018) خلاء عملکرد سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی بررسی گردید که بر اساس نتایج آن، خلاء عملکرد نواحی مورد بررسی در محدوده ۳۵/۳۳ تا ۳۲/۳۳ تن در هکتار برآورد شد. خلاء نسبی بین ۵۶-۵۲ درصد و عملکرد واقعی در محدوده ۴۸-۴۴ درصد عملکرد پتانسیل قرار داشت. خلاء قابل‌مهار عملکرد (خلاء ۸۵٪) سیب‌زمینی در شهرستان قوچان، نیشابور، فریمان و تربت‌حیدریه به ترتیب برابر ۴۹، ۴۸، ۴۳ و ۴۷ درصد بود که نشان می‌دهد به ترتیب ۵۱، ۵۲، ۵۷ و ۵۳ درصد از عملکرد پتانسیل قابل‌مهار در این نواحی محقق نشده است. در نتیجه می‌توان گفت با برنامه‌ریزی در شهرستان‌های قوچان، نیشابور، فریمان و تربت‌حیدریه می‌توان عملکرد را به ۵۳/۲۵، ۵۰/۳۰، ۵۲/۹۹ و ۵۱/۲۷ تن در هکتار افزایش داد.

نسبت بین عملکرد واقعی و خلاء عملکرد

طبق آمار بدست آمده از آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۹، بیشترین سطح زیر کشت سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی در ناحیه ۱ و ۲ شامل شهرستان‌های فریمان، قوچان، تربت‌حیدریه، نیشابور، گلماکان و مشهد واقع گردیده است. نسبت بین عملکرد واقعی و خلاء عملکرد در این دو ناحیه محاسبه گردید (شکل ۸-آ).



شکل ۸- نسبت بین میانگین عملکرد واقعی و خلاء عملکرد در ناحیه های ۱ و ۲ (آ) و شهرستان های واقع در ناحیه ۱ و ۲ استان خراسان رضوی (ب)

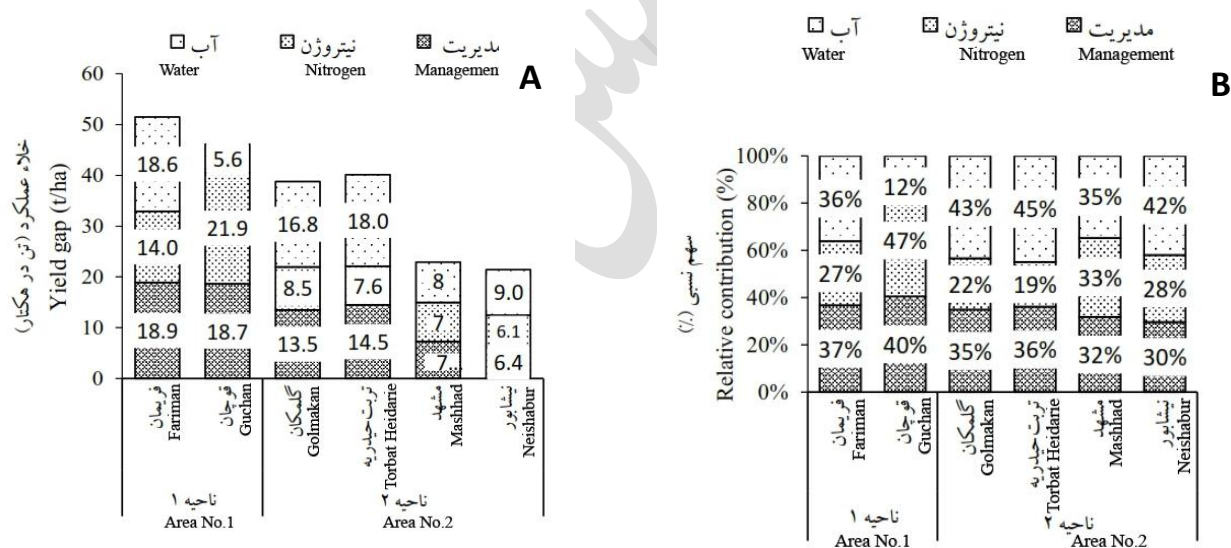
Fig. 8- The ratio of actual yield means to yield gap in climatic regions 1 and 2 (A) and cities located across climatic regions 1 and 2 in Khorasan Razavi province

طبق نتایج بدست آمده بیشترین خلاء عملکرد در شهرستان فریمان و کمترین خلاء عملکرد مربوط به شهرستان مشهد بود. به طوری که در شهرستان فریمان ۶۲ درصد خلاء عملکرد و ۳۸ درصد عملکرد واقعی محاسبه گردید. شهرستان مشهد دارای ۵۸ درصد عملکرد واقعی و ۴۲ درصد خلاء عملکرد بود. در مجموع بر اساس نتایج حاصله، ناحیه ۱ دارای ۶۲ درصد خلاء عملکرد و ناحیه ۲ دارای ۵۵ درصد خلاء عملکرد می باشد (شکل ۸-ب). اسوویپور و همکاران (Svubure, Struik, Haverkort & Steyn, 2015) در تحقیقی در زیمبابوه نشان دادند که میانگین عملکرد واقعی سیبزمینی ۸ تا ۳۵ درصد عملکرد پتانسیل بود و خلاء عملکرد ۶۵ تا ۹۲ درصدی مشاهده شد که نشان می دهد این منطقه، از پتانسیل بالایی برای افزایش تولید برخوردار است. مصرف بالای کود در این منطقه و عدم حصول عملکرد مطلوب، نشان از ناکارآمدی استفاده از کود در تولید سیبزمینی در زیمبابوه است.

در شهرستان فریمان سهم آب در ایجاد خلاء، مقدار ۱۸/۶ تن در هکتار معادل ۳۶ درصد و تأثیر نیتروژن، ۱۴ تن در هکتار معادل ۲۷ درصد و سهم سایر عوامل مدیریتی، ۱۸/۹ تن در هکتار معادل ۳۷ درصد برآورد شد. همچنین در شهرستان قوچان، سهم آب در ایجاد خلاء عملکرد سیبزمینی ۵/۶ تن در هکتار معادل ۱۲ درصد، سهم نیتروژن ۲۱/۹ تن در هکتار معادل ۴۷ درصد و سهم سایر عوامل مدیریتی، ۱۸/۷ تن در هکتار معادل ۴۰ درصد برآورد شد. در ناحیه ۲، سهم آب در ایجاد

خلاء در شهرستان گلמکان، تربت حیدریه، مشهد و نیشابور به ترتیب، ۱۶/۸، ۱۸/۰، ۸/۰ و ۹/۰ تن در هکتار برآورد شد. همچنین سهم نیتروژن در ایجاد خلاء در شهرستان‌های مذکور به ترتیب، ۸/۵، ۷/۶، ۷/۷ و ۶/۱ تن در هکتار بود. محدودیت آب در ایجاد خلاء در شهرستان تربت حیدریه با ۴۵ درصد بیشترین سهم را در این منطقه به خود اختصاص داد (شکل ۹-آ).

ارقام جدید سیب‌زمینی علاوه بر تأمین نیاز آبی، به مقادیر بالای کود نیتروژن نیز نیاز دارند. فراوانی نیتروژن غده‌بندی را به تأخیر می‌اندازد و موجب تحریک رشد رویشی سیب‌زمینی می‌شود، اما تا وقتی که سایر عوامل محیطی و گیاهی محدودکننده نباشد، باعث افزایش رشد غده و در نتیجه افزایش عملکرد می‌شود. وقتی گیاه در شرایط غیرعادی مانند مصرف بیش‌ازحد کود نیتروژن رشد نماید، تولید پروتئین کاسته شده و نیتروژن به شکل غیرپروتئینی در گیاه انباشته می‌شود. استفاده بهینه کود نیتروژن، وزن غده، وزن خشک گیاه، تعداد غده و خصوصیات کیفی و کمی غده‌ها را بهبود می‌دهد، ولی مصرف بیش‌ازحد نیتروژن باعث تأخیر در نمو و تغییر خصوصیات کمی و کیفی غده‌ها می‌گردد (Doring, Brandt, Heb, Finckh & Saucke, 2005; Alva, Ren & Moore, 2012).



شکل ۹- سهم محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی (آ) و سهم نسبی آنها (ب) در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در شهرستان‌های واقع در ناحیه ۱ و ۲ استان خراسان رضوی

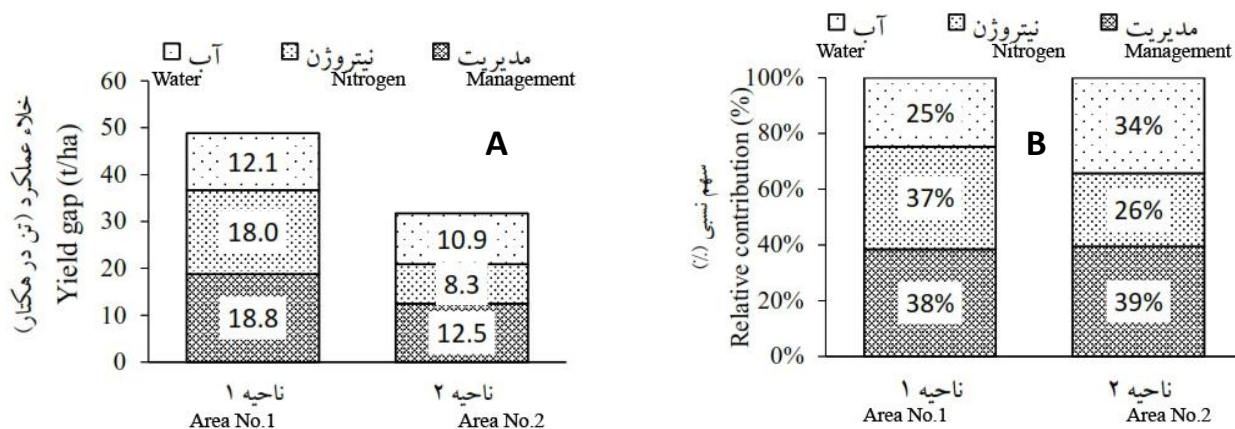
Fig. 9- Contribution of water, nitrogen, and management limitations (A) relative contribution (B) impact on potato yield gap across cities in climatic regions 1 and 2 in Khorasan Razavi province

نتایج اکثر پژوهش‌های انجام شده نشان دهنده آن است که ترکیب مناسبی از تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن به‌طوری‌که گیاه با سطح معینی از تنش آبی مواجه شود، ممکن است در نهایت منجر به رسیدن حداکثر کارایی مصرف آب در گیاه شود (Shock, Feibert & Saunders, 1998; Zhang, Li, Huang, Cheng & Zhang, 2006; Shahnazari, Liu,) (Anderson, Jacobsen & Jensen, 2007).

سهم نسبی محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در شهرستان‌های واقع در ناحیه ۱ و ۲ استان خراسان رضوی در شکل ۹-ب نشان داده شده است. بر این اساس در شهرستان فریمان، محدودیت آب ۳۶ درصد، نیتروژن ۲۷ درصد و سایر عوامل مدیریتی ۳۷ درصد در ایجاد خلاء مؤثر بوده است. همچنین در شهرستان قوچان، محدودیت آب ۱۲ درصد، نیتروژن ۴۷ درصد و سایر عوامل مدیریتی ۴۰ درصد در ایجاد خلاء مؤثر بوده است. در ناحیه ۲ سهم محدودیت آب در شهرستان‌های گل‌مکان، تربت‌حیدریه، مشهد و نیشابور به ترتیب، ۴۳، ۴۵، ۳۵ و ۴۲ درصد در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی نقش داشته است. همچنین سهم نسبی محدودیت نیتروژن در ایجاد خلاء در این شهرستان‌ها به ترتیب، ۲۲، ۱۹، ۳۳ و ۲۸ درصد برآورد شد (شکل ۹-ب).

درمجموع بر اساس نتایج حاصله، میانگین سهم محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه ۱ و ۲ استان خراسان رضوی محاسبه گردید (شکل ۱۰-آ). بر این اساس در ناحیه ۱ سهم محدودیت آب، نیتروژن و سایر عوامل مدیریتی به ترتیب، ۱۲/۱، ۱۸ و ۱۸/۸ تن در هکتار برآورد گردید. همچنین سهم محدودیت آب، نیتروژن و سایر عوامل مدیریتی در ناحیه ۲ به ترتیب، ۱۰/۹، ۸/۳ و ۱۲/۵ تن در هکتار بود.

شاه‌نظری و همکاران (Shahnazari, Liu, Anderson, Jacobsen & Jensen, 2000) اثر کم‌آبیاری بر گیاه سیب‌زمینی را بررسی و گزارش نمودند که اعمال تنش آبی با کاهش ۳۰ درصد نیاز آبی گیاه سیب‌زمینی پس از مرحله رشد اولیه غده‌ها، موجب حفظ محصول و در نتیجه افزایش کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد شد. برخی محققان نیز کاهش عملکرد و اجزای عملکرد شامل میانگین وزن غده در بوته، تعداد غده در بوته و همچنین افزایش کارایی مصرف آب را در اثر اعمال تنش‌های آبی گزارش کرده‌اند (Sobhani & Hamidi, 2013; Alva, Ren & Moore, 2012; Ayas,) (2013).



شکل ۱۰- سهم محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی (آ) و سهم نسبی آنها (ب) در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه‌های اقلیمی ۱ و ۲ واقع در استان خراسان رضوی

Fig. 10- Contribution of water, nitrogen, and management limitations (A) relative contribution (B) impact on potato yield gap in climatic regions 1 and 2 in Khorasan Razavi province

نسبت تأثیر محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه ۱ و ۲ استان خراسان رضوی در شکل ۱۰-ب آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در ناحیه ۱ محدودیت آب ۲۵ درصد در ایجاد خلاء عملکرد سهمیم بوده و محدودیت نیتروژن ۳۷ درصد ایجاد خلاء عملکرد را به خود اختصاص داده است. ۳۸ درصد سهم سایر عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در این ناحیه است. همچنین با توجه به نمودار مذکور، در ناحیه ۲ سهم آب، نیتروژن و سایر عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء، به ترتیب ۳۴، ۲۶ و ۳۹ درصد برآورد گردید.

آزمایشی برای بهبود مدیریت نیتروژن در مزرعه سیب‌زمینی با خصوصیات متغیر خاک توسط زبارت و همکاران (Zebarth, Rees, Tremblay, Fournier & Leblon, 2002) انجام شد. آن‌ها برای بررسی تغییرات وضعیت نیتروژن، تیمارهای کودی مختلف نیتروژن را در یک مزرعه با مقیاس آزمایشی در دو سال بکار گرفتند و مقدار نیتروژن سیب‌زمینی و کلروفیل برگ را با استفاده از دستگاه Field scout متر و دستگاه SPAD-۵۰۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین داده‌های دو دستگاه و مقدار نیتروژن گیاه و عملکرد کل غده همبستگی مثبت و قوی وجود دارد. وس و همکاران (Vos & Van der Putten, 1998) نیز گزارش نمودند که فراهمی نیتروژن در افزایش تعداد و اندازه برگ‌های سیب‌زمینی مؤثر است و کمبود نیتروژن به این معنی است که گیاه نمی‌تواند به پتانسیل تولید برگ خود دست یابد.

نتیجه گیری کلی

به طور کلی شبیه سازی انجام شده در این مطالعه دقت بالایی در پیش بینی عملکرد پتانسیل در کشت بهاره سیب زمینی در استان خراسان رضوی نشان داد. بیشترین عملکرد پتانسیل در سطح استان، مربوط به ناحیه اقلیمی یک و در شهرستان فریمان بود و کمترین آن برای شهرستان بردسکن واقع در ناحیه اقلیمی سه برآورد شد. میانگین ده ساله عملکرد پتانسیل برای ناحیه اقلیمی یک ۲۱/۶ تن در هکتار بود. در مجموع بر اساس نتایج حاصله، میانگین سهم محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب زمینی در ناحیه اقلیمی یک به ترتیب، ۱۲/۱، ۱۸ و ۱۸/۸ تن در هکتار برآورد گردید. همچنین سهم محدودیت آب، نیتروژن و سایر عوامل مدیریتی در ناحیه اقلیمی دو به ترتیب، ۱۰/۹، ۸/۳ و ۱۲/۵ تن در هکتار بود.

در مناطقی که محدودیت آب، سهم بیشتری در ایجاد خلاء دارد، می توان با استفاده از سیستم های نوین آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب، بخشی از خلاء عملکرد را جبران نمود. در مناطقی که نیتروژن باعث ایجاد خلاء گردیده است، با مصرف بهینه و به موقع کودهای شیمیایی نیتروژنه و همچنین رعایت تناوب زراعی و استفاده از کودهای دامی، می توان کمبود نیتروژن را رفع نموده و به عملکرد قابل حصول نزدیک تر شد. در برخی مناطق محدودیت آب و نیتروژن نقش کمتری در ایجاد خلاء داشته و سایر عوامل مدیریتی باعث ایجاد خلاء عملکرد گردیده اند که انتظار می رود کارشناسان ترویج سازمان جهاد کشاورزی نسبت به آگاهی رسانی و آموزش کشاورزان گام برداشته تا خلاء عملکرد از طریق افزایش دانش به روز کشاورزان به ویژه در وهله اول با انتخاب تاریخ کاشت مناسب، و در ادامه با تراکم کاشت مناسب، انتخاب رقم زراعی سازگار با منطقه و مدیریت تغذیه ای تلفیقی جبران گردد.

سپاسگزاری

بخشی از هزینه های انجام این پژوهش در قالب طرح شماره ۳ به شماره ۳/۵۲۶۹۲ مصوب ۱۳۹۹/۰۷/۲۳ توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است، که به این وسیله قدردانی می شود. نگارندگان مراتب سپاس خود را به داوران گمنام مقاله ابراز می دارند که با پیشنهادهای ارزنده خود سبب ارتقاء کیفیت علمی مقاله شدند.

References

1. Alva, A.K., Ren, H., Moore, A.D. (2012). Water and nitrogen management effects on biomass accumulation and partitioning in two potato cultivars. *American Journal of Plant Sciences*. 3: 164-170.
2. Arora, V. K., Nath, J. C., and Singh, C. B. (2013). Analyzing potato response to irrigation and nitrogen regimes in a sub-tropical environment using SUBSTOR-Potato model. *Agricultural Water Management*, 124, 69-76.
3. Arshadi, M.J., Khazaei, H.R., Kafi, M. (2014). Investigating the effect of nitrogen fertilizer using chlorophyll meter on yield, yield components and growth indices of potato. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 11(4), 573-582. Doi: [10.22067/gsc.v11i4.32654](https://doi.org/10.22067/gsc.v11i4.32654)
4. Ayas, S. (2013). The effects of different regimes on potato (*Solanum tuberosum* L. Hermes) yield and quality characteristics under unheated greenhouse conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19(1), 87-95.
5. Bagheri, H.R., Gharineh, M.H., and Bakhshandeh, A. (2015). Agroecological zoning and gap analysis of potato yield using SUBSTOR-Potato simulation model and geographic information system in Chaharmahal-Bakhtiari province. Ph.D. Thesis, Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agriculture.
6. Bremner, J. M., and Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-total. In 'Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. (Eds AL Page, RH Miller, DR Keeney). *Soil Science Society of America: Madison, WI, USA*. 2, 595-624.
7. Coates, J. (2013). Build it back better: Deconstructing food security for improved measurement and action. *Global Food Security*, 2(3), 188-194.
8. Deguchi, T., Iwama, K., and Haverkort, A. J. (2016). Actual and potential yield levels of potato in different production systems of Japan. *Potato Research*, 59, 207-225.
9. Devaux, A., Kromann, P., and Ortiz, O. (2014). Potatoes for sustainable global food security. *Potato Research*, 57, 185-199.
10. Dobermann, A., and Cassman, K. G. (2002). Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 247, 153-175.
11. Döring, T.F., Brandt, M., Heß, J., Finckh, M.R., Saucke, H. (2005). Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Research*, 94(2-3), 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.006>
12. Fageria, N.K., Baligar, V.C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
13. FAO. (2017). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Food Security*, 1(1): 5-7. Available in: <http://faostat.fao.org/countryprofiles>.
14. FAO. 2021. Potato. FAOSTAT database for agriculture. Available online at:
15. Fallah-Ghalhari, Gh., Moosavi-Baygi, M., Habibi-Nokhandan. 2000. Forecasting seasonal precipitation based on synoptic patterns using adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS). *Research on Natural Geographia*, 66: 121-139. (In Persian)
16. Fischer, R. A. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9-18.
17. Gharineh, M.H., Bakhshandeh, A., Andarzian, B., and Fayzizadeh, N. (2012). Agro of Khuzestan province for potential yield of wheat with WOFOST model. *Journal of Agroecology*, 4(3), 255-264. (In Persian with English Summary)
18. Greenwood, D. J., Neeteson, J. J., and Draycott, A. (1985). Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. *Plant and Soil*, 85, 185-203.

19. Haile, B., Mohammed, A., and Woldegiorgis, G. (2015). Effect of planting date on growth and Tuber yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties at Anderacha district, southwestern Ethiopia. *Int. J. Res. Agric. Sci.* 2(6), 2348-3997.
20. Hall, A. J., and Richards, R. A. (2013). Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, 143, 18-33.
21. Haverkort, A.J. (2014). Yield gaps and ecological footprints of potato production systems in Chile. *Potato Research*, 57: 13-31. <https://doi.org/10.1007/s11540-014-9250-8>
22. Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., and Garcia, J. N. (2016). Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 197, 97-106.
23. Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Thornton, P.K., Jones, J.W., Hunt, L.A. and Imamura, D.T. (1999). Decision support system for agrotechnology transfer v3. 5. *DSSAT version*, 3, 1-36.
24. IISD Report. (2012). Food Security and Climate Change Initiative. International Institute for Sustainable Development. https://www.iisd.org/system/files/publications/food_security_agriculture_financing.pdf
25. Jaggard, K. W., Qi, A., and Ober, E. S. (2010). Possible changes to arable crop yields by 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2835-2851.
26. Jamro, M. R., Tunio, S. D., Buriro, U. A., and Chachar, Q. D. (2015). Effect of planting dates on growth and yield of true potato seed (TPS) in nursery raising approach. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 11, 318.
27. Kamali, Gh., Bazgir, S. (2009). Prediction of wheat yield using agrometeorological indices in some western areas of the Iran, *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, Number 15(2), 113-121
28. Kazemi, M. (2017). Quantitative analysis of potato production in northeastern Iran. PhD dissertation. Ferdowsi University of Mashhad.
29. Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M., Mansoori, H., Moradi, R. (2017). effect of climatic and management factors on potential and gap of wheat yield in Iran using WOFOST Model. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2): 244-256
30. Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M., Asadi, S., and Zare, H. (2022). Evaluation of spatial crop water use efficiency in Khorasan Razavi province. *Journal of Agroecology*, 14(1), 69-94.
31. Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andradea, F. H., Halle, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., and Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184: 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
32. Metzger, M. J., and Flanagan, A. J. (2013). Credibility and trust of information in online environments: The use of cognitive heuristics. *Journal of Pragmatics*, 59, 210-220.
33. Ministry of Agriculture. (2022). Review of harvest level statistics and production rate of 36 years of crops. Ministry of Agricultural Jihad, Planning and Economic Deputy. Information and Communication Technology Center. <https://maj.ir> also in: <https://agrieng.org/1401>
34. Mohammadi, A., Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M. (2018). Evaluation of LINTUL1-POTATO Model for Simulation of Development Stages and Potential Yield of Spring-Sown Potato (*Solanum tuberosum* L.) in Iran. *Journal of Agroecology*, doi: 10.22067/jag.v1i1.71619
35. Neumann, K., Verburg, P. H., Stehfest, E., and Müller, C. (2010). The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agricultural Systems*, 103(5), 316-326.

36. Roberts, S., Weaver, W. H., and Phelps, J. P. (1982). Effect of rate and time of fertilization on nitrogen and yield of Russet Burbank potatoes under center pivot irrigation. *American Potato Journal*, 59, 77-86.
37. Rosegrant, M. W., Koo, J., Cenacchi, N., Ringler, C., Robertson, R. D., Fisher, M., and Sabbagh, P. (2014). Food security in a world of natural resource scarcity: The role of agricultural technologies. *Intl Food Policy Res Inst.* 250 p.
38. Sepahvand, N. (2007). Potato Research Strategic Program. Seed and Plant Improvement Research Institute, (In Persian)
39. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. (2007). Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 100(1), 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.05.010>.
40. Shock, C.C., Feibert, E.G., Saunders, L.D. (1998). Potato yield and quality response to deficit irrigation. *Horticultural Science*, 33, 655- 659.
41. Sidlauskas, G., and Bernotas, S. (2003). Some factors affecting seed yield of spring oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Agronomy Research*, 1(2), 229-243.
42. Sobhani, A.R., Hamidi, H. (2013). Effects of water deficit and potassium on yield and water use efficiency of potato crop in linear sprinkler irrigation method (line source). *Environmental Stress in Crop Sciences*. 6(1), 1-15. [In Persian with English Summary].
43. Sparrow, L. A., and Chapman, K. S. R. (2003). Effects of nitrogen fertiliser on potato (*Solanum tuberosum* L., cv. Russet Burbank) in Tasmania. 1. Yield and quality. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 43(6), 631-641.
44. Svubure, O., Struik, P. C., Haverkort, A. J., and Steyn, J. M. (2015). Yield gap analysis and resource footprints of Irish potato production systems in Zimbabwe. *Field Crops Research*, 178, 77-90.
45. Taei, J. S., Ghanbari, A., Amiri, E., Ghaffari, A., Siahsar, B., and Ayoubi, S. (2013). Agroecological Zoning of Wheat in the Borujen Watershed: Rianfed and Irrigated Wheat Cropping System Evaluation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 22(4), 1-12
46. Tavakkoli-Kakhki, H. R. (2016). Zoning and evaluation of nitrogen use efficiency and nitrogen balance for wheat and corn cropping systems of Iran by using simulation model and GIS. Ph.D. Dissertation. the Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian with English abstract).
47. Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E., and Kazemi-Korgehei, M. (2013). Ranking factors causing the wheat yield gap in Gorgan. *Crop Production*, 6(1), 171-189. https://ejcp.gau.ac.ir/article_1211_2f3aeadd19a6181a57561b772bc99026.pdf?lang=en
48. Van Bussel, L. G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., and van Ittersum, M. K. (2015). From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98-108.
49. 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.
50. Van Wart, J., van Bussel, L. G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N.D., Claessens, L. and van Ittersum, M.K. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44-55.
51. Vos, J., and Van der Putten, P. E. L. (1998). Effect of nitrogen supply on leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in potato. *Field Crops Research*, 59(1), 63-72.

52. Westermann, D.T. (2005). Nutritional requirements of potatoes. *Am. J. Pot. Res.* 82, 301–307. <https://doi.org/10.1007/BF02871960>
53. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
54. Yazdandoost-Hamedani, M. (2003). A study of the effect of nitrogen rates on yield, yield components and nitrate accumulation in potato varieties. *Iranian J. Agric. Sci.* 34(4), 977-985 (In Persian with English Summary)
55. Zebarth, B. J., Rees, H., Tremblay, N., Fournier, P., and Leblon, B. (2002). Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the N Sensor. In *XXVI International Horticultural Congress: Toward Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production*, 627, 267-273.
56. Zhang, B., Li, F. M., Huang, G., Cheng, Z. Y., and Zhang, Y. (2006). Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management*, 79(1), 28-42.