

Estimation of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Yield Gap and Determining the Contribution of Water and Nitrogen Across Khorasan Razavi Province using Modeling Approach

M. Jahan^{1*}, M. Noori¹, H. R. Khazaei¹, M. Nassiri-Mahallati¹, K. Shojaei-Nofarast², M. H. Fallah¹

1- Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Khorasan Razavi, Mashhad, Iran

(*- Corresponding author's Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 12 October 2024
Revised: 26 November 2024
Accepted: 27 November 2024
Available Online: 13 April 2025

Jahan, M., Noori, M., Khazaei, H. R., Nassiri-Mahallati, M., Shojaei-Nofarast, K., & Fallah, M. H. (2025). Estimation of potato (*Solanum tuberosum* L.) yield gap and determining the contribution of water and nitrogen across Khorasan Razavi province using modeling approach. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(3), 321-339. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.90184.1355>

Introduction

The growing human population, global warming, depletion of water and soil resources, and climate change make it imperative to reconsider food production methods in agricultural systems. Improving resource use efficiency and enhancing productivity are key strategies to address these challenges. 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 (*Solanum tuberosum* L.) 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



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

 <https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.90184.1355>

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.

Conclusion

In R1, the yield gap varied between 40.5 and 57.7 ton ha⁻¹. The average yield gap during 10 years was estimated at 48.8 and 31.7 ton 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 ton ha⁻¹, and in R2, it was 10.9 and 8.3 ton ha⁻¹, respectively. Although narrowing the yield gap depends on the climatic conditions of each region, selecting a compatible crop variety, optimizing planting date, and adopting appropriate plant density are among the most effective crop management strategies to reduce the yield gap, regardless of climatic differences.

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

برآورد خلاء عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) 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^۱، مهدی نصیری محلاتی^۱، کوروش شجاعی نوفرست^۲،

محمد حسن فلاح^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

چکیده

خلاء عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در استان خراسان رضوی براساس شیوه‌نامه اطلس جهانی خلاء عملکرد و با استفاده از مدل SUBSTOR-Potato برنامۀ 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 براساس شیوه‌نامه اطلس جهانی خلاء عملکرد به سه ناحیه اقلیمی کشاورزی کلاستر بندی شد. سپس، با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی بلندمدت (۲۰۱۱-۲۰۲۰) 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 سه با مقدار ۸/۳ تن در هکتار برآورد شد. میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در ناحیه یک ۴۸/۸ و در ناحیه دو ۳۱/۷ تن در هکتار برآورد گردید. 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 دو به ترتیب ۱۰/۹ و ۸/۳ تن در هکتار بود. پر کردن بخشی از خلاء عملکرد با توجه به شرایط اقلیمی هر ناحیه متفاوت است، باین‌حال انتخاب رقم زراعی سازگار، تاریخ کاشت و تراکم بوته مناسب از جمله مهم‌ترین گزینه‌های مدیریت زراعی به‌منظور جبران بخشی از خلاء عملکرد، صرف نظر از تفاوت‌های اقلیمی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، امنیت غذایی، پهنه‌بندی، عملکرد پتانسیل، واسنجی، DSSAT

مقدمه

و آب‌وهوایی 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 سید غذایی جهان ایفا می‌کند (FAO, 2017). بر این اساس، سازمان خواروبار جهانی این محصول زراعی را با توجه به روند روبه‌رشد جمعیت و پیامدهای ناشی از آن شامل افزایش تعداد گرسنگان و نیاز به غذا، به‌عنوان یک گیاه امنیت غذایی معرفی و

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). به‌منظور کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی

۱- گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی، خراسان رضوی، مشهد، ایران

*- نویسنده مسئول
(Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.90184.1355>

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، به نحوی 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 گاه‌ها 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 برداشت‌شده 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 آن‌ها است.

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 به دست می‌آید و عملکردی که می‌تواند به وسیله استفاده از بهترین ارقام سازگار با محیط و بهترین روش‌های مدیریت آب، خاک و گیاه به دست 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, Horan & Garcia, 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 آب محدود، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد گیاهان زراعی می‌باشد. 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. با وجود اهمیتی که موضوع پتانسیل‌یابی تولید محصولات زراعی دارد، تحقیقات محدودی در ایران انجام شده که عمدتاً بر محصول گندم (*Triticum aestivum*) (L. تمرکز دارد) (Kamali & Bazgir, 2009; 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^۵ و تعیین اعتبار^۶ 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 در نهایت 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

4- Global Yield Gap Atlas
5- Calibration
6- Validation

1 - Potential yield
2- Actual yield
3- Yield gap

پوست زرد و مقاوم به ویروس پیچیدگی برگ و حساس به بیماری ساق سیاه و اسکب معمولی و رقم آریندا نیمه‌زودرس با رنگ پوست زرد و گوشت زرد کم‌رنگ با عملکرد بالا در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. آزمایش دوم با چهار سطح نیتروژن صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص به‌عنوان عامل کرت اصلی و دو رقم سیب زمینی (آگریا و آریندا) به‌عنوان عامل کرت فرعی اجرا شد (از نتایج این آزمایش شامل ماده خشک، سطح برگ، فنولوژی و عملکرد، در ادامه جهت واسنجی مدل استفاده گردید).

آماده‌سازی زمین، عملیات کاشت و داشت

جهت تعیین بافت و سایر ویژگی‌های خاک، قبل از اجرای آزمایش نمونه‌برداری انجام شد. برای این منظور در چند نقطه از مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌گیری انجام شد. نمونه‌ها با هم ترکیب و نمونه‌ای مرکب به آزمایشگاه منتقل گردید. نتایج آزمون خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

متوسط سالانه آن ۲۰۸ میلی‌متر است که توزیع آن از دامنه‌های شمالی استان به سمت جنوب، کاهشی و عمدتاً در فصول زمستان و بهار به صورت 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 آگریا 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 به صورت کرت‌های خردشده 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 آگریا که نیمه‌دیررس با رنگ گوشت و

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 1- Some physicochemical properties of the soil of the experiment site

بافت Texture	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	درصد اشباع Saturation percent (%)	اسیدیته pH	کربن C (%)	نیتروژن Total N (%)	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹ soil)	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹ soil)
لوم رسی Clay loam	2.1	36	7.62	1.3	0.13	19	147

مثالاً کسبیل-مانکوزب انجام شد. جهت مبارزه با حشره مکنده تریپس، حشره کش 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 گردید. 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 هشت 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 گردید.

نمونه‌گیری، اندازه‌گیری 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 به‌عنوان 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 اندازه ریز، متوسط و درشت، وزن خشک اندام هوایی، عملکرد غده به صورت تر و

به‌منظور آماده‌سازی بستر کاشت، پس از شخم عمیق، کلوخه‌ها توسط دیسک خرد و زمین به وسیله لولر کاملاً تسطیح شد. سپس کرت‌های اصلی به ابعاد ۴×۱۲ 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 سانتی‌متری با خاک مخلوط شد. در تاریخ ۱۰ خردادماه و هم‌زمان با تاریخ کشت رایج در منطقه، اقدام به کشت غده شد. ضدعفونی غده‌ها توسط قارچ‌کش کاپتان انجام شد. چهار ردیف سیب‌زمینی به طول چهار متر در هر کرت کشت شد که ردیف‌ها از یکدیگر ۷۵ سانتی‌متر فاصله داشته و فاصله غده‌ها روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر بود. تراکم نه بوته در مترمربع و عمق کاشت ۱۵ سانتی‌متر بود. مراحل داشت سیب‌زمینی شامل آبیاری، مبارزه با علف‌های هرز، بیماری‌ها و آفات به موقع انجام گردید. علف‌کش سنکور (متری بوزین) جهت مهار علف‌های هرز به کار گرفته شد و جهت پاکسازی کامل علف‌های 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

سال، محاسبه شد. تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه به روش Priestley-Taylor، و براساس داده‌های هواشناسی در DSSAT برآورد شد. براساس شیوه‌نامه ارائه‌شده توسط اطلس جهانی خلاء عملکرد، طبقه‌بندی نواحی اقلیمی کشاورزی براساس سه معیار، شامل مجموع درجه روزهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد (Growing degree days (GDD)) (رابطه ۱)، شاخص خشکی سالانه (Annual aridity index (AI)) (نسبت بارندگی کل سالانه به مجموع کل تبخیر و تعرق بالقوه سالانه) (رابطه 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).

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

$$AI = \frac{MAP}{MAE} \quad (2)$$

که در آن‌ها، T_i : دمای روزانه (برحسب درجه سانتی‌گراد) و T_b : دمای پایه (برحسب درجه سانتی‌گراد) است (دمای پایه صفر درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد). MAP: میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر و MAE: میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه برحسب میلی‌متر است.

عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل

عملکرد واقعی: میزان عملکرد واقعی سیب‌زمینی، برای دوره ۱۰ ساله (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 ارائه‌شده توسط مرلوسا و همکاران (Merlos et al., 2015) برآورد گردید. میانگین عملکرد واقعی برای هر ناحیه اقلیمی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

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

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 زیرکشت محصول در شهرستان j و a_k : سطح زیرکشت 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 براساس هر دو عامل طول و روز دما تعیین می‌شود. رشد ساقه

خشک و همچنین میزان نیتروژن موجود در غده و اندام‌های هوایی گیاه در مرحله برداشت سیب‌زمینی بود. برای اندازه‌گیری نیتروژن از دستگاه کج‌دال و روش برمنر و مولوانی (Bremner & Mulvaney, 1982) استفاده شد. قطر غده‌ها با استفاده از کولیس اندازه‌گیری گردید. 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 هرکدام از آن‌ها تعیین گردید.

شبیه‌سازی رشد و نمو سیب‌زمینی به وسیله

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 (۲۰۲۰-۲۰۱۱) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. پارامترهای گیاهی لازم برای واسنجی مدل از جمله اطلاعات مراحل نمو سیب‌زمینی از داده‌های ایستگاه‌های تحقیقاتی، و پژوهش‌های انجام‌شده 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 آبیرو خاک که از منابع علمی، مقالات منتشرشده و پرسش‌نامه‌های تکمیل‌شده 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 منتشرشده و پرسش‌نامه‌های تکمیل‌شده توسط کشاورزان تهیه شد.

تعیین ناحیه‌های اقلیمی-کشاورزی استان خراسان رضوی

(کلاستر بندی منطقه)

از بین ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی، ۱۴ شهرستان شامل قوچان، فریمان، گل‌مکان، نیشابور، تربت‌حیدریه، مشهد، درگز، تربت‌جام، 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 گم‌شده به وسیله ابزار WeatherMan در برنامه DSSAT برآورد شد. میزان تشعشع روزانه با استفاده از داده‌های تعداد ساعات آفتابی و براساس معادله آنگستروم ضریب نشر اتمسفر برای روزهای

پهنه‌بندی عملکرد و آنالیز خلاء عملکرد

عملکردهای پیش‌بینی‌شده 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 (Yp) در پهنه‌های مختلف استان و نیز مقادیر عملکرد واقعی (Ya) خراسان جهت تخمین خلاء عملکرد مورد استفاده قرار گرفت، به این منظور ضریب عملکرد منطقه‌ای^۳ (RYF) براساس رابطه (۴) محاسبه گردید.

$$RYF = \frac{Y_a}{Y_p} \quad (4)$$

ضریب عملکرد منطقه‌ای بین صفر و ۱ متغیر است و نشان‌دهنده 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 (Yg) اختلاف بین عملکرد پتانسیل (Yp) و عملکرد واقعی (Ya) خواهد بود (رابطه ۵).

$$Y_g = Y_p - Y_a \quad (5)$$

پس از محاسبه عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل، مجدداً در شرایط محدودیت آب، عملکرد پتانسیل محاسبه و اختلاف دو عملکرد نشان‌دهنده سهم آب در ایجاد خلاء است. همچنین در شرایط محدودیت آب و نیتروژن مجدداً عملکرد پتانسیل محاسبه گردید و اختلاف عملکرد به‌دست‌آمده در شرایط محدودیت آب و نیتروژن با عملکرد پتانسیل بدون محدودیت، نشان‌دهنده 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 (شکل‌های ۱ و

براساس 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 و اعتبارسنجی^۲ مدل

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 محدوده معقول آن‌ها انجام گردید. 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 آگریا 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 و 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 مزرعه‌ای آزمایشی نیز محاسبه گردید که مقدار آن‌ها به‌مقدار تخمین زده‌شده با ابزار GenCalc بسیار شبیه بود.

مدل پس از واسنجی، به‌وسیله اطلاعات حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده 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 (R²) بود. هر چقدر مقدار d برآوردشده توسط مدل به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است که پیش‌بینی را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده‌شده انجام دهد (Willmott, 1982).

1- Calibration
2- Validation

۰/۰۹۶، ناحیه‌ای گرم و خشک محسوب می‌شود.

واسنجی و تعیین اعتبار مدل

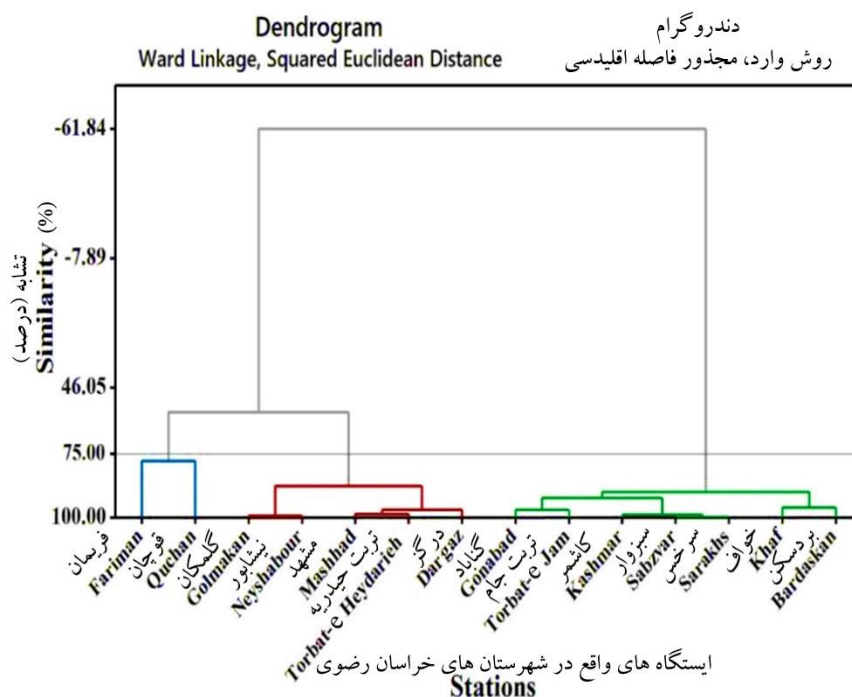
واسنجی مدل: مهم‌ترین ضرایب ژنتیکی برای تعیین عملکرد در مدل DSSAT، پارامترهای G2 و G3 بودند که مقادیر تنظیم‌شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

عملکرد غده مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، 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 غده‌زایی مشاهده‌شده (۳۸ روز) و شبیه‌سازی‌شده (۳۸ روز) می‌باشد. تعداد روزهای کاشت تا شروع غده‌زایی سیب‌زمینی در نواحی مختلف اقلیمی به‌خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شد. میانگین عملکرد شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، به مقادیر مشاهده‌شده 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 نشان‌دهنده واسنجی مناسب مدل است (شکل ۳).

۲) ناحیه ۱ (R1: معتدل و نیمه‌خشک) شامل شهرهای قوچان و فریمان، دارای بیشترین میزان بارش و کم‌ترین 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 براساس طبقه‌بندی متزگر و فلاناگین (Metzger & Flanagan, 2013) منطقه‌ای معتدل و نیمه‌خشک می‌باشد.

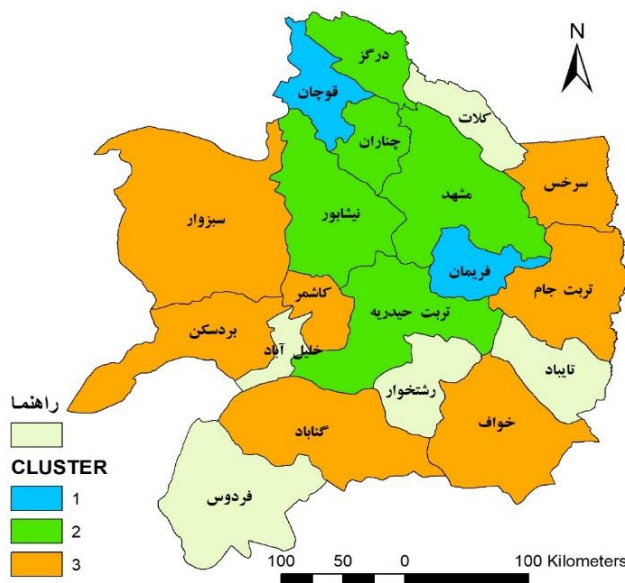
ناحیه ۲ (R2: گرم و نیمه‌خشک)، شهرهای گل‌مکان، نیشابور، تربت‌حیدریه، مشهد و درگز در حدفاصل ناحیه‌های یک و سه بوده و با میانگین مجموع درجه روزهای رشد سالانه برابر با 5651°C و میانگین شاخص خشکی حدود $0/163$ براساس طبقه‌بندی متزگر و فلاناگین (Metzger & Flanagan, 2013)، منطقه‌ای گرم و نیمه‌خشک می‌باشد.

ناحیه سه (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



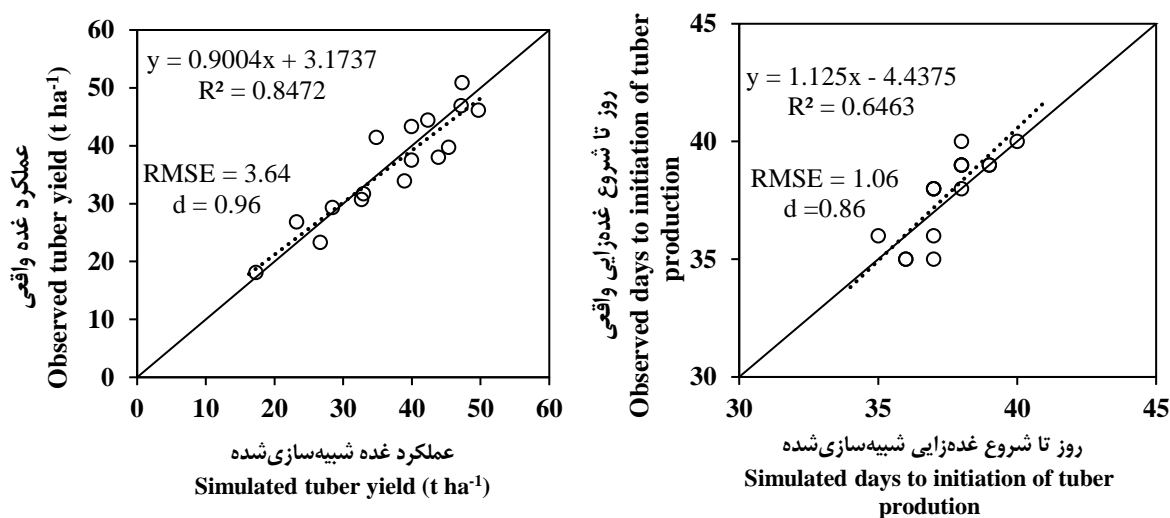
شکل ۱- دندروگرام حاصل از اجرای آنالیز خوشه‌ای بر روی متغیرهای اقلیمی-کشاورزی شهرستان‌های استان خراسان رضوی و تفکیک سه ناحیه اصلی (R1, R2, R3). خوشه‌بندی بر مبنای ۷۵ درصد تشابه

Figure 1- Dendrogram of cluster analysis for agroclimatic variables of studied cities across Khorasan province resulted in tree 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 براساس درجه حرارت روزهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد، شاخص خشکی سالانه و شدت فصلی بودن درجه حرارت

Figure 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



شکل ۳- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی و روز تا شروع غده‌زایی شبیه‌سازی شده و روز تا شروع غده‌زایی واقعی (براساس داده‌های به‌کاررفته برای واسنجی مدل)

Figure 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)

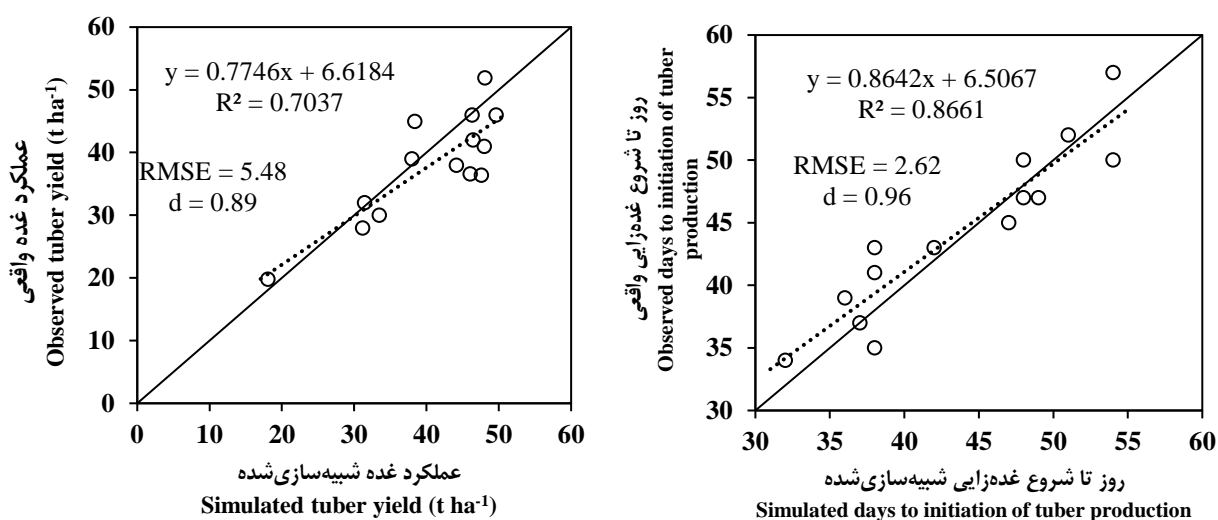
تعیین اعتبار مدل: مدل با دقت قابل قبولی تعدا دروز تا شروع غده‌زایی را شبیه‌سازی کرد. نتایج تعداد روز تا شروع غده‌زایی شبیه‌سازی شده و تعداد روز تا شروع غده‌زایی واقعی، همچنین مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی سیب‌زمینی در شکل ۴ نشان داده شده است.

باقری و همکاران (Bagheri, Gharineh & Bakhshandeh, 2015) در تحقیقی دریافته‌اند 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 س ریح (غده‌زایی ۳۰ تا ۴۰ روز پس از کاشت) و تأخیر در غده‌زایی تا اواسط فصل رشد (۸۰ تا ۹۰ روز پس از کاشت) انجام شد.

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی گیاهی در مدل DSSAT برای محصول سیب‌زمینی

Table 2- Genetic coefficients of potato in DSSAT model

رقم	G2	G3	PD	P2	TC
Cultivar	سرعت توسعه برگ ($\text{cm}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	سرعت رشد غده ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	شاخص القاء غده‌زایی Index of induction of tuber production	حساسیت آغازش غده به فتوپریود Sensitivity of initiation of tuber to photoperiod	دمای بحرانی Critical temperature ($^{\circ}\text{C}$)
آگریا Agria	1100	22	1	0.3	18



شکل ۴- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی و روز تا شروع غده‌زایی شبیه‌سازی شده و روز تا شروع واقعی (براساس داده‌های به‌کاررفته برای اعتبار سنجی مدل)

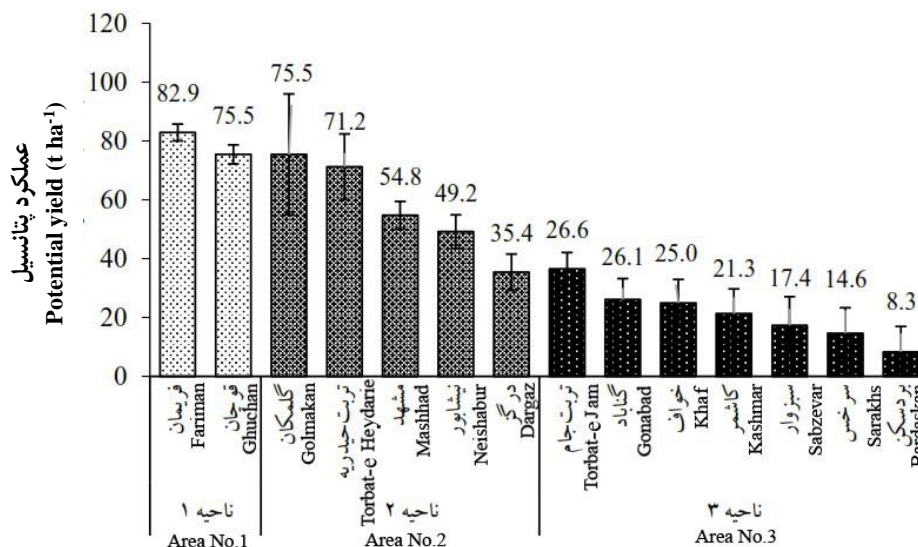
Figure 4- Comparison of simulated yield with actual yield, simulated days to initiation of tuber production and observed days to initiation of tuber production (based on data input for model validation)

ارزیابی مدل با پارامترهای کالیبره شده ارقام، نشان از تطبیق دقیق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده دارد (شکل ۴). معیارهای

ارزیابی شامل R^2 ، RMSE 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 دینامیک 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 فرایندها، 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. براساس 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 سه با مقدار ۸/۳ تن در هکتار برآورد شد. کشت سیب‌زمینی در ناحیه سه، رواج نداشته و تنها در بخش نصرآباد در شهرستان تربت‌جام کشت انجام می‌گردد (Ministry of Agriculture, 2022). میانگین ۱۰ ساله عملکرد پتانسیل برای این ناحیه ۲۱/۶ تن در هکتار بود.

ارزیابی مدل با پارامترهای کالیبره شده ارقام، نشان از تطبیق دقیق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده دارد (شکل ۴). معیارهای ارزیابی شامل R^2 ، RMSE 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 دینامیک 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 فرایندها، 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.



شکل ۵- مقادیر پیش‌بینی‌شده عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۱) در سه ناحیه اقلیمی در استان خراسان رضوی
Figure 5- Simulated potential yield of potato across three climatic zones during 10 years of study

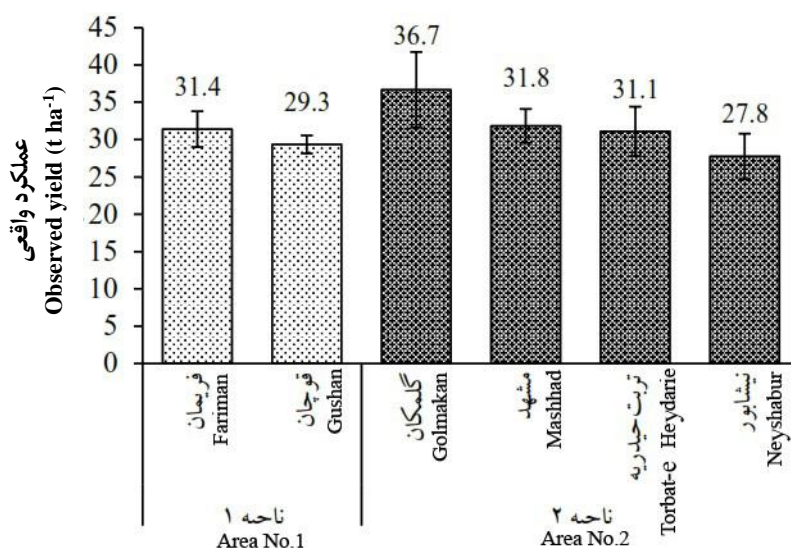
واقعی ۱۰ ساله شهرستان قوچان ۲۹/۳۵ تن در هکتار برآورد گردیده است. میانگین عملکردهای واقعی در ناحیه دو، از ۲۷/۸ تن در هکتار تا ۳۶/۷ تن در هکتار متغیر بود. در بین شهرستان‌های واقع‌شده در ناحیه دو، بیشترین میانگین عملکرد واقعی مربوط به سال ۲۰۱۵ در شهرستان گلمکان با ۴۸/۷ تن در هکتار و کمترین میانگین عملکرد واقعی مربوط به سال ۲۰۱۲ در شهرستان نیشابور با ۲۲ تن در هکتار می‌باشد. بر این اساس، میانگین عملکرد واقعی ۱۰ ساله شهرستان گلمکان، مشهد، تربت‌حیدریه و نیشابور به ترتیب ۳۶/۷، ۳۱/۸، ۳۱/۱ و ۲۷/۸ تن در هکتار گزارش شده است (شکل ۶). همان‌گونه که قبلاً بیان شد، در ناحیه اقلیمی سه، کشت سیب‌زمینی در مساحت بسیار محدود انجام می‌شود و اطلاعات درستی از آن در دست نیست.

خلاء عملکرد سیب‌زمینی

میانگین خلاء عملکرد در ناحیه یک که حاصل اختلاف عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی‌شده 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 یک، ۴۸/۸ تن در هکتار برآورد شد. در ناحیه دو، خلاء عملکرد بین ۲۱/۴ تا ۴۰/۱ تن در هکتار متغیر می‌باشد. میانگین خلاء عملکرد در دوره آماری ۱۰ ساله در شهرستان‌های تربت‌حیدریه، گلمکان، درگز، مشهد و نیشابور به ترتیب 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 دو، ۳۱/۷ تن در هکتار

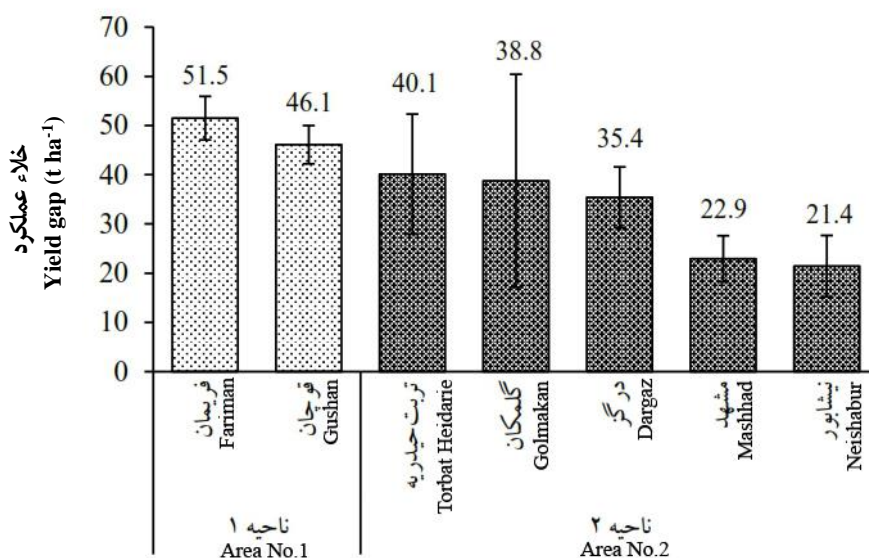
عملکرد پتانسیل می‌تواند تحت تأثیر تغییر شرایط اقلیمی قرار گرفته و این تغییرات ممکن است از تحقق پتانسیل ژنتیکی ارقام ممانعت نموده و یا باعث بهبود آن شود (Neumann, Verburg, 2010; Stehfest & Muller, 2010; Hall & Richards, 2013; Hochman, Gobbett, Horan & Garcia, 2016). در تحقیقی عنوان نمودند که کاهش عملکرد پتانسیل ارقام پرمحصول گندم در استرالیا به دلیل کاهش میزان بارش سالانه است، این در حالی است که جاگارد و همکاران (Jaggard, Qi & Ober, 2010) گزارش نمودند که به دلیل بهبود شرایط اقلیمی به‌ویژه درجه حرارت فصل بهار به‌علت گرمایش جهانی، عملکرد پتانسیل چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) در انگلستان افزایش یافته و اصلاح ژنتیکی ارقام چغندرقد 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 براساس 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 اخذشده 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



شکل ۶- مقادیر میانگین عملکرد واقعی سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۱) در ناحیه‌های اقلیمی یک و دو

Figure 7- The mean of potato actual yield in climatic zones one and two during 10 years of study



شکل ۷- میانگین خلاء عملکرد سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۱۰۱۱) در ناحیه‌های اقلیمی یک و دو

Figure 7- The mean of potato yield gap in climatic regions one and two during 10 years study

ترمیم زخم) و تراکم کم بوته می‌باشد (Mohammadi, 2020). خلاء عملکرد سیب‌زمینی در مناطق مختلف کشور ژاپن توسط دگویی و همکاران (Deguchi, Iwama & Haverkort, 2016) بررسی شد. نتایج نشان داد که خلاء عملکرد براساس 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 و سلامت بذر) و مدیریت مزرعه (تغذیه، وضعیت خاک و مقابله با عوامل کاهنده) را از

عوامل مختلفی می‌توانند 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 گواهی شده، بافت نامناسب خاک، تنش خشکی، خاک‌دهی نامناسب پای بوته، آماده‌سازی نامناسب بذر (عدم

به شهرستان فریمان با سه درصد می‌باشد. تشابه داده‌های هواشناسی ۱۰ ساله و یا اختلاف آن‌ها باعث کاهش و یا افزایش ضریب تغییرات خواهد شد. در شهرستان بردسکن به علت اختلاف زیاد بین داده‌های هواشناسی ۱۰ ساله، ضریب تغییرات بالا به دست آمده است. شهرستان گل‌مکان با دامنه تغییرات عملکرد واقعی ۴۸/۷-۳۰ تن در هکتار بیشترین نوسانات عملکرد (ضریب تغییرات ۱۴) و شهرستان مشهد با دامنه تغییرات عملکرد واقعی ۳۵-۲۹ تن در هکتار کمترین ضریب تغییرات را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). با توجه به اینکه عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده توسط مدل برای شهرستان گل‌مکان از ۴۷/۴ تا ۹۶/۷ تن در هکتار متغیر بود، ضریب تغییرات خلاء عملکرد این شهرستان با عدد ۵۵/۸ درصد، بیشترین مقدار را در این ناحیه به خود اختصاص داد. ضریب تغییرات خلاء عملکرد برای شهرستان‌های تربت‌حیدریه، نیشابور، مشهد و درگز به ترتیب ۳۰/۴، ۲۹/۱، ۲۰/۵ و ۱۷/۴ درصد بود (جدول ۳).

مهم‌ترین دلایل خلاء عملکرد عنوان نمودند. اسووویور 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 سیب‌زمینی در زیمبابوه است.

ضریب تغییرات عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد

ضریب تغییرات پتانسیل عملکرد در نواحی سه‌گانه استان خراسان رضوی در جدول ۳ ارائه شده است. بیشترین ضریب تغییرات مربوط به شهرستان بردسکن با ۱۰۴ درصد و کمترین ضریب تغییرات مربوط

جدول ۳- ضریب تغییرات عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد سیب‌زمینی در دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۱) برای شهرستان‌های واقع در ناحیه‌های اقلیمی یک، دو و سه

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 / ضریب تغییرات City/coefficient of variation (%)	فریمان Farinan	قوچان Guchan	گلمکان Golmakan	تربت حیدریه Torbat Heydarieh	مشهد Mashhad	نیشابور Neyshabour	درگز Dargaz	تربت جام Torbat Jaam	گناباد Gonabad	خواف Khaaf	کاشمر Kashmar	سبزوار Sabzevar	سرخس Sarakhsh	بردسکن Bardaskan
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								
خلاء عملکرد Yield gap	8.6	8.4	55.8	30.4	20.5	29.1	17.4							

ناحیه یک: فریمان و قوچان. ناحیه دو: گلمکان، تربت حیدریه، مشهد و نیشابور، درگز. ناحیه سه: 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, Khaaf, Kashmar, Sabzevar, Sarakhsh and Bardaskan

عملکرد پتانسیل کم، زیاد باشد (Mohammadi, Koocheki & Nassiri-Mahallati, 2018). در تحقیق محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2018)، خلاء عملکرد سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی بررسی گردید که براساس 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-

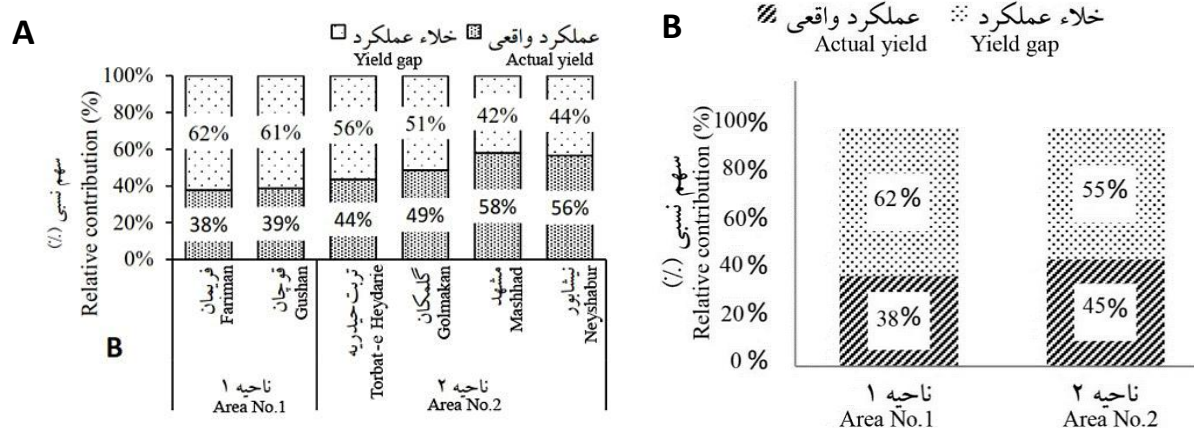
گزارش شده است که در منطقه شمال شرق، نوسانات عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی در محدوده ۶۳/۵ تا ۵۶ تن در هکتار با ضریب تغییرات ۱۳ درصد بود. ولی عملکرد واقعی در محدوده ۳۶/۱۱ تا ۱۵/۷۴ تن در هکتار با ضریب تغییرات ۱۲۹/۵ درصد نوسان داشت. کمترین عملکرد در نواحی غربی منطقه شمال شرق وجود داشت. لذا عملکرد پایین سبب گردید تا خلاء عملکرد سیب‌زمینی در مناطق با

طبق نتایج به‌دست‌آمده، 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 براساس نتایج حاصل از این پژوهش، ناحیه یک دارای ۶۲ درصد خلاء عملکرد و ناحیه دو دارای ۵۵ درصد خلاء عملکرد بود (شکل ۸-ب). اسوویبور و همکاران (Svubure et al., 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 سیب‌زمینی در زیمبابوه است.

۴۴ درصد عملکرد پتانسیل قرار داشت. خلاء قابل مهار عملکرد (خلاء ۸۵ درصد) 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 قابل مهار در این نواحی محقق نشده است. در نتیجه می‌توان گفت که با برنامه‌ریزی در شهرستان‌های قوچان، نیشابور، فریمان و تربت‌حیدریه می‌توان عملکرد را به ۵۲/۲۵، ۵۰/۳۰، ۵۲/۹۹ و ۵۱/۲۷ تن در هکتار افزایش داد.

نسبت بین عملکرد واقعی و خلاء عملکرد

طبق آمار به‌دست‌آمده از آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۹، بیشترین سطح زیرکشت سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی در ناحیه یک و دو شامل شهرستان‌های فریمان، قوچان، تربت‌حیدریه، نیشابور، گل‌مکان و مشهد واقع گردیده است. نسبت بین عملکرد واقعی و خلاء عملکرد در این دو ناحیه محاسبه گردید (شکل ۸-ا).



شکل ۸- نسبت بین میانگین عملکرد واقعی و خلاء عملکرد در ناحیه‌های یک و دو (ا) و شهرستان‌های واقع در ناحیه یک و دو استان خراسان رضوی (ب)

Figure 8- The ratio of actual yield means to yield gap in climatic regions one and two (A) and cities located across climatic regions one and two in Khorasan Razavi province

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 تربت‌حیدریه با ۴۵ درصد بیشترین سهم را در این منطقه به خود اختصاص داد (شکل ۹-ا).

ارقام جدید سیب‌زمینی علاوه بر تأمین نیاز آبی، به مقادیر بالای کود نیتروژن 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

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 گردید. در ناحیه دو، سهم آب در ایجاد خلاء در شهرستان گل‌مکان، تربت‌حیدریه، مشهد و نیشابور به ترتیب، ۱۶/۸، ۱۸/۰، ۸/۰ و ۹/۰ تن در هکتار برآورد

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).

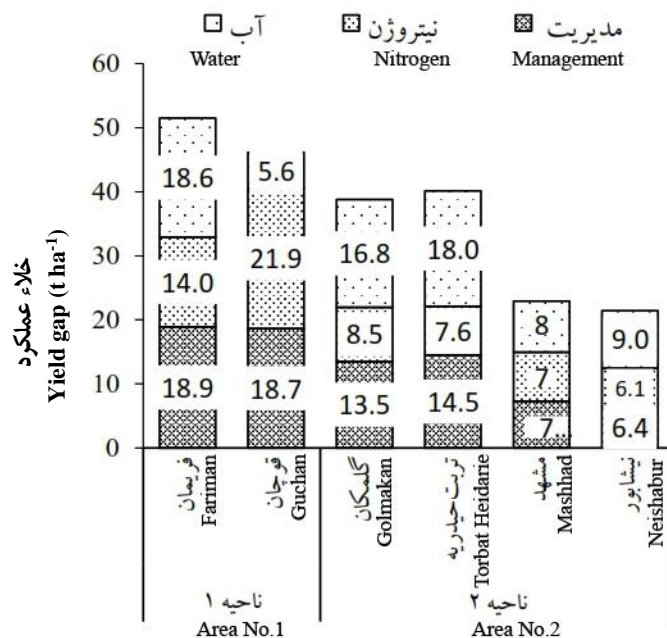
در مجموع براساس نتایج حاصل از این پژوهش، میانگین سهم محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه یک و دو استان خراسان رضوی محاسبه گردید (شکل ۱۰-ا). بر این اساس در ناحیه ۱ سهم محدودیت آب، نیتروژن و سایر عوامل مدیریتی به ترتیب ۱۲/۱، ۱۸ و ۱۸/۸ تن در هکتار برآورد گردید. همچنین سهم محدودیت آب، نیتروژن و سایر عوامل مدیریتی در ناحیه دو به ترتیب ۱۰/۹، ۸/۳ و ۱۲/۵ تن در هکتار بود.

شاه‌نظری و همکاران (Shahnazari, Liu, Anderson, 2007) 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 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 et al., 2012; Ayas, 2013).

غیرعادی مانند مصرف بیش از حد 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 بیش از حد نیتروژن باعث تأخیر در نمو و تغییر خصوصیات کمی و کیفی غده‌ها می‌گردد (Doring, Brandt, Heb, Finckh, & Saucke, 2005; Alva, Ren, & Moore, 2012).

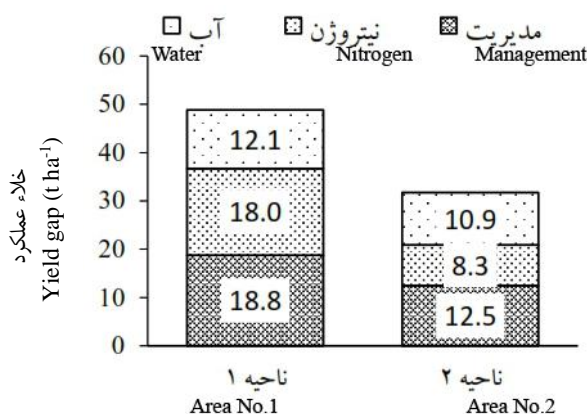
نتایج اکثر پژوهش‌های انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که ترکیب مناسبی از تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن به طوری که گیاه با سطح معینی از تنش آبی مواجه شود، ممکن است در نهایت منجر به رسیدن حداکثر کارایی مصرف آب در گیاه شود (Shock, Feibert & Saunders, 1998; Zhang, Li, Huang, Cheng & Zhang, 2006; Shahnazari, Liu,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

سهم نسبی محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در شهرستان‌های واقع در ناحیه یک و دو 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 دو، سهم محدودیت آب در شهرستان‌های



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

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



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

Figure 10- Contribution of water, nitrogen, and management limitations (A) relative contribution (B) impact on potato yield gap in climatic regions one and two in Khorasan Razavi province

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 ۱۰ ساله عملکرد پتانسیل برای ناحیه اقلیمی یک ۲۱/۶ تن در هکتار بود. در مجموع براساس نتایج حاصل از این تحقیق، میانگین سهم محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی 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، می‌توان با استفاده از سیستم‌های 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 به‌موقع کودهای شیمیایی نیتروژنه و همچنین رعایت تناوب زراعی و استفاده از کودهای دامی، می‌توان کمبود نیتروژن را رفع نموده و به عملکرد قابل‌نزدیک‌تر شد. در برخی مناطق، محدودیت آب و نیتروژن نقش کمتری در ایجاد خلاء داشته و سایر عوامل مدیریتی باعث ایجاد خلاء عملکرد گردیدند که انتظار می‌رود کارشناسان ترویج سازمان جهاد کشاورزی نسبت به آگاهی‌رسانی و آموزش کشاورزان گام برداشته تا خلاء عملکرد از طریق افزایش دانش به‌روز کشاورزان به‌ویژه در وهله اول با انتخاب تاریخ کاشت مناسب، و در ادامه با تراکم کاشت مناسب، انتخاب رقم زراعی سازگار با منطقه و مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی جبران گردد.

نسبت تأثیر محدودیت آب، نیتروژن و عوامل مدیریتی در ایجاد خلاء عملکرد سیب‌زمینی در ناحیه یک و دو استان خراسان رضوی در شکل ۱۰-ب آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در ناحیه یک 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 دو 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 به کار گرفتند و مقدار نیتروژن سیب‌زمینی و کلروفیل برگ را با استفاده از دستگاه Field Scout ۵۰۲-SPAD 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.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی شبیه‌سازی انجام‌شده در این مطالعه، دقت بالایی در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل در کشت بهاره سیب‌زمینی در استان

سیاسگزاری

بخشی از هزینه‌های 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 می‌شود. نگارندگان مراتب سپاس خود را به داوران گمنام مقاله ابراز می‌دارند که با پیشنهادهای ارزنده خود سبب ارتقاء کیفیت علمی مقاله شدند.

References

- 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. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.31019>
- Arora, V. K., Nath, J. C., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.021>
- 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.
- Bagheri, H. R., Gharineh, M. H., & 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, Faculty of Agriculture, Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz, Iran.
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). *Nitrogen-total*. In Methods of Soil Analysis. Chemical and microbiological properties. A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney eds. *Soil Science Society of America: Madison, WI, USA*, 2, 595-624.
- Coates, J. (2013). Build it back better: Deconstructing food security for improved measurement and action. *Global Food Security*, 2(3), 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2013.05.002>
- Deguchi, T., Iwama, K., & Haverkort, A. J. (2016). Actual and potential yield levels of potato in different production systems of Japan. *Potato Research*, 59, 207-225. <https://doi.org/10.1007/s11540-016-9322-z>
- Devaux, A., Kromann, P., & Ortiz, O. (2014). Potatoes for sustainable global food security. *Potato Research*, 57, 185-199. <https://doi.org/10.1007/s11540-014-9265-1>
- Dobermann, A., & 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. <https://doi.org/10.1023/A:1021197525875>
- Doring, 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>
- 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)
- FAO. (2017). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Food Security*, 1(1), 5-7. Available in: <http://faostat.fao.org/countryprofiles>.
- FAO. (2021). Potato. FAOSTAT database for agriculture.
- Fallah-Ghalhari, Gh., Moosavi-Baygi, M., & Habibi-Nokhandan, H. (2000). Forecasting seasonal precipitation based on synoptic patterns using adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS). *Research on Natural Geographia*, 66, 121-139. (In Persian)
- Greenwood, D. J., Neeteson, J. J., & Draycott, A. (1985). Response of potatoes to N fertilizer: Dynamic model. *Plant and Soil*, 85, 185-203.
- Hall, A. J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.014>
- 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>
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., & Garcia, J. N. (2016). Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 197, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.017>
- Hoogenboom, G., Wilkens, P. W., Thornton, P. K., Jones, J. W., Hunt, L. A. & Imamura, D. T. (1999). Decision support system for agrotechnology transfer v3. 5. *DSSAT Version*, 3, 1-36. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_8
- 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
- Jaggard, K. W., Qi, A., & 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. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0153>
22. 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*, 15(2), 113-121
 23. 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. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v15i2.54278>
 24. Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andradea, F. H., Halle, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G., & 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>
 25. Metzger, M. J., & Flanagan, A. J. (2013). Credibility and trust of information in online environments: The use of cognitive heuristics. *Journal of Pragmatics*, 59, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2013.07.012>
 26. 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>
 27. 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*, (in Persian with English abstract).
 28. Neumann, K., Verburg, P. H., Stehfest, E., & Müller, C. (2010). The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agricultural Systems*, 103(5), 316-326. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.02.004>
 29. Rosegrant, M. W., Koo, J., Cenacchi, N., Ringler, C., Robertson, R. D., Fisher, M., & Sabbagh, P. (2014). Food security in a world of natural resource scarcity: The role of agricultural technologies. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI). 250 p. <https://doi.org/10.2499/9780896298477>
 30. Mohammadi, A. (2020). Strategies for optimal agricultural management in delayed potato cultivation. *Applied Science of Potato*, 3(2), 27-34. (In Persian). Available Online at: https://pem.areeo.ac.ir/article_123326_be6943fb65aad7cc09abc77063059f50.pdf
 31. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M. N., Jacobsen, S. E., & T 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>
 32. Shock, C. C., Feibert, E. G., & Saunders, L. D. (1998). Potato yield and quality response to deficit irrigation. *Horticultural Science*, 33, 655-659. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.33.4.655>
 33. 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 Abstract).
 34. Svubure, O., Struik, P. C., Haverkort, A. J., & Steyn, J. M. (2015). Yield gap analysis and resource footprints of Irish potato production systems in Zimbabwe. *Field Crops Research*, 178, 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.002>
 35. Taei, J. S., Ghanbari, A., Amiri, E., Ghaffari, A., Siahsar, B., & 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. (in Persian with English abstract). Available Online at: https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_801.html?lang=en
 36. 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, Mashhad, Iran. 151 pp. (In Persian with English abstract).
 37. Van Bussel, L. G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., & van Ittersum, M. K. (2015). From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>
 38. Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance- a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
 39. Van Wart, J., van Bussel, L. G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N. D., Claessens, L., & van Ittersum, M. K. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>
 40. Vos, J., & 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. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00107-5)
 41. Westermann, D.T. (2005). Nutritional requirements of potatoes. *American Journal of Potato Research*, 82, 301-307. <https://doi.org/10.1007/BF02871960>
 42. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American*

Meteorological Society, 63(11), 1309-1313.

43. Zebarth, B. J., Rees, H., Tremblay, N., Fournier, P., & 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. *Acta Horticultura*, 627, 267-273. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.627.34>
44. Zhang, B., Li, F. M., Huang, G., Cheng, Z. Y., & Zhang, Y. (2006). Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management*, 79(1), 28-42. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.007>