
Estimation of yield gap and water productivity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran

Samaneh Mohammadi¹, Ebrahim Zeinali^{2*}, Afshin Soltani³, Beniamin Torabi⁴

¹ Ph.D. Graduate of Agronomy, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran, Email: samamoh1367@gmail.com

² Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran, Email: e.zeinali@gau.ac.ir

³ Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran. Email: afshin.soltani@gau.ac.ir

⁴ Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran. Email: ben_torabi@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received:
Accepted:

Keywords:

GYGA protocol
production gap
attainable yield
SSM-iCrop2 model

ABSTRACT

Background and objectives: In Iran, protein supply heavily relies on plant-based sources. Therefore, any effort to improve the yield and quality of protein-rich crops, particularly legumes, is paramount. Increasing yield through optimizing production management and mitigating factors that contribute to yield gap is the most suitable way to increase crop production and enhance food security. Hence, for a sustainable food supply, accurate estimation of potential yield and yield gap of crops is essential. Given the importance of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran, the present study aimed to estimate the yield and production gap, and water productivity of this crop in the main production climatic regions in Iran based on the Global Yield Gap Atlas (GYGA) project. at the University of Agricultural Sciences and Natural Resources of Gorgan.

Materials and methods: To estimate the common bean yield gap and water productivity in Iran according to the GYGA protocol, data on farmers' yields (Y_a), harvested areas, and production were obtained from the Ministry of Agriculture of Iran. This data encompassed a 15-year period, spanning from 2001 to 2015. Subsequently, a distribution map of common bean cultivation in the country was generated. Then, by overlaying this map with the climatic zoning map of Iran, the main climatic zones (DCZs) for bean production were identified. Subsequently, reference weather stations (RWSs) were selected within each identified DCZ based on the harvested area. To estimate potential yield (Y_p) and water productivity (W_p), the SSM-iCrop2 simulation model, locally calibrated and validated, was employed. This model utilized weather data, predominant soil types, and prevailing agronomic management practices specific to each selected region. Finally, the common bean yield gap (Y_g) was calculated as the difference between potential and actual yields for each RWS. These yield gap estimates were then upscaled to the DCZ and national levels.

Results: Comparison of the actual yield of common bean reported by the Ministry of Agriculture of Iran with actual yield calculated using the

GYGA protocol for the country showed high accuracy of this protocol, with RMSE, CV, and r values of 84 kg ha⁻¹, 4%, and 0.96, respectively. Actual yield of common bean in the main regions of production in Iran ranged from 1.6 to 2.3 t ha⁻¹ during 2001 to 2015. Grain Yields across the main climatic zones varied from 1.1 t ha⁻¹ (climatic zone 4202 in Germe) to 2.3 t ha⁻¹ (climatic zone 3003 in Avaj), with an average of 1.9 t ha⁻¹. Common bean potential yield was estimated to range from 3.4 t ha⁻¹ (climatic zone 4202 in Germe) to 5.4 t ha⁻¹ (climatic zone 4103 in Hamedan and Bijar), with an average of 4.5 t ha⁻¹. This analysis revealed a yield gap of 1.8 to 3.5 t ha⁻¹ (with an average of 2.6 t ha⁻¹) equal to 46-67% (with an average of 57%) across the main common bean-producing zones of Iran. The average water productivity potential for common bean in Iran was estimated to be 0.76 kg m⁻³.

Conclusion: According to the results, if the yield gap is addressed by optimizing production management and yields are brought to attainable level (80% of potential yield), grain yield increases from the current yield of 1.9 t ha⁻¹ to 3.6 t ha⁻¹, and with the same harvested areas, bean production in Iran would increase from the current production of 222,705 to 415,822 tons, representing a 46% increase. This substantial increase in production would have a significant positive impact on food security and potentially contribute to increased farmer incomes and reduced food imports.

Cite this article: Mohammadi, S., Zeinali, E., Soltani, A., Torabi, B. 2024. Estimation of yield gap and water productivity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran. *Crop Production Journal*, 17 (3), 165-190.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejcp.2024.2110.2463

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تولید گیاهان زراعی

شاپا چاپی: ۲۳۹۸-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۳-۲۰۰۸



برآورد خلأ عملکرد و بهره‌وری آب لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) در ایران

سمانه محمدی^۱، ابراهیم زینلی^{۲*}، افشین سلطانی^۳، بنیامین ترابی^۴

^۱ دانش‌آموخته دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: samamoh1367@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: e.zeinali@gau.ac.ir

^۳ استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: afshin.soltani@gau.ac.ir

^۴ دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: ben_torabi@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

سابقه و هدف: در ایران، تأمین پروتئین به‌طور عمده وابسته به فرآورده‌های گیاهی است. از اینرو، هر اقدامی در راستای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی غنی از پروتئین که در رأس آن‌ها حبوبات قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزایش عملکرد از طریق بهینه‌سازی مدیریت تولید و حذف عوامل ایجاد کننده خلأ عملکرد مناسب‌ترین راه برای افزایش تولید گیاهان زراعی و ارتقای امنیت غذایی به‌شمار می‌رود. بنابر این، برای تأمین پایدار غذا، برآورد دقیق عملکرد پتانسیل و خلأ عملکرد محصولات زراعی ضروری است. با توجه به اهمیت لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) در ایران، مطالعه حاضر با هدف برآورد میزان خلأ عملکرد و تولید، و بهره‌وری آب این محصول در مناطق اقلیمی اصلی تولید آن در کشور بر اساس پروژه اطلس جهانی خلأ عملکرد (GYGA) در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد.

نوع مقاله:

مقاله کامل علمی - پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۶

مواد و روش‌ها: به منظور برآورد خلأ عملکرد و بهره‌وری آب لوبیا در ایران مطابق با دستورالعمل گیگا ابتدا داده‌های مربوط به عملکرد کشاورزان (Ya) و سطح زیر کشت و تولید لوبیا در کشور در بازه زمانی ۱۵ ساله ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ از وزارت جهاد کشاورزی ایران تهیه و نقشه پراکنش لوبیا در کشور رسم شد. با روی هم گذاشتن نقشه پراکنش سطح زیر کشت لوبیا و نقشه پهنه‌بندی اقلیمی کشور، مناطق اقلیمی اصلی تولید لوبیا مشخص شدند. سپس متناسب با سطح هر پهنه اقلیمی، ایستگاه‌های هواشناسی مرجع انتخاب شدند. به منظور برآورد میزان عملکرد پتانسیل (Yp) و بهره‌وری آب لوبیا (Wp) بر اساس داده‌های هواشناسی و نوع خاک غالب و شیوه‌های مدیریتی در هر یک از مناطق انتخاب شده از مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop2 استفاده شد که به‌صورت محلی کالیبره و ارزیابی شده بود. در نهایت، خلأ عملکرد از اختلاف عملکردهای پتانسیل و واقعی برای هر ایستگاه برآورد و با روش بزرگ مقیاس نمایی از ایستگاه به مناطق اقلیمی اصلی و سپس به کل کشور تعمیم داده شد.

واژه‌های کلیدی:

پروتکل گیگا

خلأ تولید

عملکرد قابل حصول

مدل SSM-iCrop2

یافته‌ها: نتایج مقایسه میانگین عملکرد واقعی لوبیا گزارش شده توسط وزارت کشاورزی با عملکرد واقعی محاسبه شده طبق پروتکل گیگا برای کشور با CV, RMSE و r^2 به ترتیب برابر با ۸۴ کیلوگرم در هکتار، ۴ درصد و ۰/۹۶ نشان داد که با استفاده از این پروتکل می‌توان میانگین عملکرد لوبیا در کشور را با دقت بالایی برآورد نمود. میانگین عملکرد واقعی لوبیا در ایران طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ بین ۱/۶ و ۲/۳ تن در هکتار متغیر بود. همچنین، عملکرد واقعی لوبیا در مناطق اقلیمی اصلی تولید این محصول با میانگین ۱/۹ در دامنه ۱/۱ در منطقه اقلیمی ۴۲۰۲ واقع در گرمی تا ۲/۳ تن در هکتار در منطقه اقلیمی ۳۰۰۳ واقع در آوج قرار داشت. عملکرد پتانسیل لوبیا از ۳/۴ در منطقه اقلیمی ۴۲۰۲ واقع در گرمی تا ۵/۴ تن در هکتار در منطقه اقلیمی ۴۱۰۳ واقع در همدان و بیجار متغیر و میانگین آن ۴/۵ تن در هکتار تخمین زده شد. بر اساس این نتایج، در مناطق اقلیمی اصلی تولید لوبیا در ایران ۱/۸ تا ۳/۵ (به طور متوسط ۲/۶) تن در هکتار معادل ۴۶ تا ۶۷ (به طور متوسط ۵۷) درصد خلأ عملکرد وجود دارد. میانگین پتانسیل بهره‌وری آب برای تولید لوبیا در ایران ۰/۷۶ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج، اگر خلأ عملکرد با بهینه‌سازی مدیریت تولید برطرف شود و عملکرد به سطح قابل‌دستیابی (۸۰ درصد عملکرد بالقوه) برسد، عملکرد دانه ۱/۹ تن در هکتار فعلی به ۳/۶ تن در هکتار افزایش می‌یابد، و با همین سطح زیر کشت، تولید لوبیا در ایران از ۲۲۳ هزار تن فعلی به ۴۱۶ هزار تن خواهد رسید که نشان دهنده ۴۶ درصد افزایش تولید است. این افزایش قابل توجه در تولید تأثیر مثبت قابل توجهی بر امنیت غذایی خواهد داشت و به طور بالقوه به افزایش درآمد کشاورزان و کاهش واردات مواد غذایی کمک می‌کند.

استناد: محمدی، سمانه؛ زینلی، ابراهیم؛ سلطانی، افشین؛ ترابی، بنیامین. (۱۴۰۳). برآورد خلأ عملکرد و بهره‌وری آب لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) در ایران. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۷ (۳)، ۱۹۰-۱۶۵.



© نویسندگان.

DOI: 10.22069/ejcp.2024.2110.2463

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) یک گیاه زراعی مهم از خانواده بقولات و یک منبع حیاتی برای تغذیه و تامین پروتئین در سراسر جهان است (۱)، (۲). در بین کشورهای آسیایی، چین، ایران، ژاپن و ترکیه عمده‌ترین تولید کنندگان لوبیای معمولی هستند (۳). طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی، در سال ۲۰۱۶ سطح زیر کشت لوبیا در ایران ۱۱۴۵۹۳ هکتار، تولید آن ۲۲۲۷۰۵ تن و متوسط عملکرد آن ۱۹۴۳ کیلوگرم در هکتار بوده است (۴). طبق گزارش سلطانی و همکاران (۲۰۲۰)، در ایران با جمعیتی بالغ بر ۸۰ میلیون نفر و قرارگیری در منطقه ناپایدار از لحاظ جغرافیایی-سیاسی خاورمیانه و وجود تحریم‌های اقتصادی، مصرف گوشت قرمز و برنج از سال ۲۰۱۰ کاهش یافته است و انتظار می‌رود با تشدید تحریم‌ها، مصرف این دو ماده کاهش بیش‌تری یابد (۵). از طرف دیگر، محدودیت منابع آب و بهینه نبودن مصرف این منابع در جهت خودکفایی در تولید پروتئین حیوانی، توجه بیش‌تر به اصلاح رژیم غذایی به سمت افزایش مصرف و تولید حبوبات به ویژه لوبیا در جهت حفظ امنیت غذایی کشور را توجیه می‌کند.

تغذیه ۹ تا ۱۰ میلیارد نفر جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ یکی از چالش‌های جدی پیش روی جامعه انسانی است. برای کمک به حل چالش امنیت غذایی گزینه‌هایی از جمله کاهش خلأ عملکرد، افزایش پتانسیل تولید محصولات زراعی، کاهش ضایعات، تغییر رژیم غذایی از گوشت به گیاه‌خواری و گسترش آبی‌پروری، ارائه شده است (۶). بخش عمده امنیت غذایی به طور واضح بر تولید مواد غذایی متمرکز شده است. افزایش تولید همواره یک راهکار مهم برای کمک به کاهش ناامنی غذایی بوده و هنوز هم هست

(۷). افزایش تولید مواد غذایی از طریق افزایش سطح زیر کشت و افزایش پتانسیل عملکرد امکان‌پذیر است (۸). در این میان، افزایش تولید از طریق افزایش سطح زیر کشت ممکن است به دلیل فقدان زمین مناسب جدید برای کشت امکان‌پذیر نبوده و پیامدهای محیط زیستی فراوانی داشته باشد. بنابراین، افزایش عملکرد در واحد سطح گزینه مناسب‌تری است (۹). افزایش عملکرد در واحد سطح با افزایش عملکرد پتانسیل^۱ (Yp) و یا از طریق کاهش خلأ عملکرد^۲ (Yg) حاصل می‌شود (۷). خلأ عملکرد تفاوت بین عملکرد موجود در مزارع^۳ (Ya) و عملکردی است که می‌توان در آن شرایط با استفاده از همان ارقام و با استفاده از بهترین روش‌های زراعی که تمام عوامل محدود کننده تولید (به جز عوامل اقلیمی) را کاهش می‌دهد و قابل دستیابی است به دست آورد (۱۰). مدیریت کامل این محدودیت‌ها مانند کمبود عناصر غذایی خاک، آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز حتی در بهترین شرایط مدیریت، غیرممکن است (۱۱). به همین دلیل، ۸۰ درصد از عملکرد پتانسیل به عنوان سقف عملکرد قابل دستیابی در شرایط مزرعه در نظر گرفته می‌شود که به آن عملکرد قابل حصول^۴ (YAtt) گفته می‌شود. اختلاف بین عملکرد قابل حصول و عملکرد واقعی، خلأ عملکرد قابل حذف^۵ (YE) یا ظرفیت افزایش عملکرد را نشان می‌دهد.

اهمیت موضوع خلأ عملکرد باعث شده است که کشورهای توسعه یافته و نیز در حال توسعه، به طور ویژه‌ای به این موضوع و تحقیقات در مورد آن بپردازند (۱۲). خلأ عملکرد محصولات کشاورزی در کشورهای توسعه یافته، ۱۰ تا ۲۰ درصد و در برخی کشورهای در حال توسعه ۶۰ تا ۸۰ درصد متفاوت است (۹).

⁴ Attainable Yield

⁵ Exploitable Yield Gap

¹ Potential Yield

² Yield Gap

³ Actual Yield

اجرای پروتکل در کشورهای مختلف با یکدیگر قابل مقایسه می‌باشند (۲۲، ۱۰). از اطلاعات این اطلس می‌توان برای ارزیابی توانایی کشورها برای خودکفایی از طریق فشرده‌سازی استفاده کرد و اگر خودکفایی میسر نباشد این اطلاعات برای ارزیابی مقدار واردات لازم برای تامین نیازهای غذایی قابل استفاده است (۱۰).

مطالعات متعددی در زمینه خلأ عملکرد گیاهان زراعی مختلف با استفاده از دستورالعمل گیگا انجام شده است. نتایج مطالعه‌ای با استفاده از مدل SSM و طبق دستورالعمل گیگا در شرق آفریقا بر روی خلأ عملکرد حبوبات نشان داد لوبیای معمولی با ۲/۶ تن در هکتار (۷۶ درصد) بیش‌ترین و نخود با ۱/۴ تن در هکتار (۶۴ درصد) کم‌ترین خلأ عملکرد را در بین سایر حبوبات داشتند (۲۳). در ایران در استان گلستان، مقادیر خلأ عملکرد و تولید سویا به ترتیب ۲/۴۴ تن در هکتار و ۱۱۸ هزار تن (۵۲ درصد) تخمین زده شد (۲۴). همچنین، خلأ عملکرد نخود و عدس دیم در مناطق اصلی تولید آن در ایران طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ به ترتیب ۶۱۰ کیلوگرم در هکتار (۵۸ درصد) و ۷۲۰ کیلوگرم در هکتار (۶۱ درصد) گزارش شد (۲۵). خلأ عملکرد جو دیم در ایران طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ برابر با ۱/۷ تن در هکتار (۶۷ درصد) بوده است (۲۶). مقدار خلأ عملکرد قابل دستیابی گندم که می‌توان آن را از طریق بهبود مدیریت جبران نمود در غرب استان گلستان ۲/۶ تن در هکتار برآورد شد (۲۷). با رفع خلأ عملکرد تا ۸۰ درصد عملکرد پتانسیل از طریق بهبود مدیریت تولید گیاهان زراعی، تولید محصولات زراعی دیم و آبی در صورت عدم محدودیت منابع آب در کشور تا دو برابر قابل افزایش است. در حالی که به دلیل کمبود آب باید منابع آب اختصاص داده شده به گیاهان زراعی کاهش یابد (۱۳). بهبود مدیریت منابع آب و کارآیی مصرف آب

خلأ عملکرد گیاهان زراعی مهم در ایران ۴۱ تا ۶۴ درصد گزارش شده است. بزرگ بودن خلأ عملکرد بیان‌گر این است که از ظرفیت تولید گیاهان زراعی در کشور به خوبی استفاده نمی‌شود (۱۳). روش‌های مختلفی برای برآورد خلأ عملکرد محصولات زراعی در ایران مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به روش تحلیل مقایسه کارکرد (CPA) (۱۴)، ۱۵، ۱۶)، آنالیز خط مرزی (۱۷، ۱۸)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و روش آنترپی (۱۹) و مدل‌های شبیه‌سازی (۲۰، ۲۱) اشاره نمود. به دلیل ماهیت و سطح متفاوت این روش‌ها مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر کار دشواری است. همچنین، برآوردهای قابل قبول خلأ عملکرد حاصل از طرح‌های تحقیقاتی و مدل‌های شبیه‌سازی غالباً در سطح محدود و با تعداد کمی از گیاهان زراعی در کشور موجود می‌باشند. در نتیجه، روشی مورد نیاز بود که بتوان از آن در سطح جهانی و منطقه‌ای استفاده کرد (۱۳). بنابراین، با توجه به اهمیت تجزیه و تحلیل خلأ عملکرد در کشورهای در حال توسعه، پروژه بین‌المللی اطلس جهانی خلأ عملکرد (GYGA) با هدف ارزیابی و کاهش خلأ عملکرد و بررسی اثر تغییر اقلیم، کاربری اراضی و اثرات زیست محیطی کشاورزی مطرح شد. در این راستا و بر اساس اقلیم موجود و منابع آب و خاک در دسترس، پتانسیل تولید محصول زراعی در زمین‌های زراعی فعلی برآورد می‌شود. هدف گیگا در دسترس قرار دادن اطلس آنلایینی است که شامل اطلاعات عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و خلأ عملکرد گیاهان زراعی می‌باشد. نتایج حاصل از این اطلس‌ها می‌تواند به شناسایی مناطقی که بیش‌ترین پتانسیل را جهت سرمایه‌گذاری در بخش توسعه و فناوری کشاورزی دارند، کمک کند. روش گیگا نسبت به سایر روش‌ها به اطلاعات کم‌تری نیاز دارد و به دلیل انجام رویکرد مشابه در تمامی کشورها نتایج حاصل از

از مدل برای شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل و ۵) برآورد عملکرد واقعی از مطالعات و داده‌های آماری.

تهیه نقشه سطح زیر کشت لوبیا: حداقل اطلاعات جامع درباره توزیع مکانی زمین‌های زیر کشت گیاهان زراعی مختلف آبی و دیم برای کاربرد در پروتکل گیگا، استفاده از اطلاعات موجود در نقشه‌های جهانی SPAM^۸ برای این منظور می‌باشد (۳۳). با این وجود بعد از بررسی رسترهای ارائه شده برای گیاه زراعی لوبیا در ایران، با توجه به اطلاعات موجود، در بعضی از مناطق تناقض‌هایی با پراکنش واقعی کشت لوبیا در کشور مشاهده گردید. بنابراین با توجه به دستورالعمل مشخص گیگا ابتدا هدف گذاری این مطالعه، به روز رسانی نقشه پراکنش زمین‌های زیر کشت لوبیا در کل کشور مطابق با مقیاس‌های ارائه شده نقشه‌های رستری SPAM بوده است. نقشه پراکنش سطح زیر کشت گیاهان زراعی و باغی در ایران توسط عالی‌مقام و همکاران (۲۰۲۱) به روز رسانی و منتشر شده است (۳۴).

تعیین مناطق اقلیمی و ایستگاه‌های هواشناسی مرجع: با توجه به وسعت سطوح مورد مطالعه، ابتدا نیاز بود که پهنه‌بندی اقلیمی برای مناطق مختلف صورت گیرد تا مدیریت داده‌های هواشناسی آسان‌تر شود. برای این منظور، رویکرد GYGA بهره‌گیری از یک طرح ترکیبی پهنه‌بندی به نام دامنه برون‌یابی اطلس جهانی خلأ عملکرد می‌باشد که در واقع ترکیبی از دیگر روش‌های پهنه‌بندی است. در این راستا، GYGA به دنبال ایجاد پهنه‌های اقلیمی با حداقل غیریکنواختی آب و هوایی است تا نیاز به اطلاعات هواشناسی را به حداقل برساند. طرح پهنه‌بندی اقلیمی در پروتکل GYGA توسط ون وارت و همکاران (۲۰۱۳) ساخته و به وسیله سه متغیر مشخص شده است: ۱) درجه روز

در مناطق نیمه خشک مانند ایران برای حفظ تحولات کشاورزی از اهمیت بسیاری برخوردار است. منابع آب در ایران طی سال‌های اخیر فشارهای فزاینده ناشی از افزایش تقاضای آب و خشک‌سالی‌های مکرر را تجربه کرده‌اند (۲۸). بنابراین، برآورد پتانسیل بهره‌وری آب گیاهان زراعی مهم در مناطق مختلف می‌تواند در برنامه‌ریزی راهبردی و مدیریت الگوهای کشت و منابع آب مورد استفاده قرار گیرد (۲۹). با توجه به اینکه نخستین گام در جهت رفع خلأ عملکرد تعیین مقدار و نحوه توزیع آن می‌باشد (۳۰)، مطالعه حاضر به منظور برآورد پتانسیل و خلأ عملکرد و بهره‌وری آب لوبیا در مناطق اصلی تولید این گیاه زراعی در ایران با استفاده از مدل SSM-iCrop2 و براساس پروتکل اطلس جهانی خلأ عملکرد انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به منظور بررسی خلأ عملکرد لوبیا در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۳۹۵ انجام شد. برای برآورد خلأ عملکرد، از پروتکل توسعه یافته توسط گیگا^۶ پیروی شد که تا حد ممکن از داده‌های اولیه مکانی خاص (۳۱) و یک چارچوب بزرگ مقیاس نمایی تخمین خلأ عملکرد در سطوح بزرگ‌تر مانند مناطق اقلیمی^۷ (CZ) و مناطق و مقیاس‌های کشوری (۳۲) استفاده می‌کند. به‌طور خلاصه، برآورد خلأ عملکرد لوبیا در ایران بر اساس پروژه اطلس جهانی خلأ عملکرد بر پایه مراحل اصلی زیر بود: ۱) انتخاب مناطق اقلیمی نماینده بر پایه نواحی کشت عمده محصول، ۲) انتخاب ایستگاه‌های هواشناسی مرجع که درون CZهای انتخابی باشد، ۳) انتخاب خاک غالب و سیستم کشت رایج در شعاع ۱۰۰ کیلومتری اطراف ایستگاه هواشناسی، ۴) استفاده

^۸ Spatial Production Allocation Model

^۶ <http://www.yieldgap.org>

^۷ Climate Zone

رشد که تعیین کننده طول بالقوه فصل رشد محصول است، ۲) شاخص خشکی سالانه که تخمینی از تأمین آب به عنوان نسبت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل را فراهم می‌کند و ۳) دمای فصلی که بین اقلیم‌های معتدل و گرمسیری تمایز ایجاد می‌کند (۳۵). انتخاب مناطق اقلیمی در دو مرحله و با هدف پوشش حداقل ۸۵ درصد از سطح زیر کشت لوبیای کشور انجام شد. ابتدا تمام مناطق اقلیمی با حداقل ۵ درصد سطح زیر کشت ملی انتخاب شدند. همچنین مناطق با کم‌تر از ۵ درصد سطح زیر کشت نیز اگر ایستگاه هواشناسی مطلوب برای آن CZ خاص وجود داشت، انتخاب می‌شدند. اگر پس از انتخاب در میان ایستگاه‌های هواشناسی درون DCZ^۹ هنوز پوشش کم‌تر از ۸۵ درصد باشد، در میان ایستگاه‌های هواشناسی واقع در سایر مناطق اقلیمی با کم‌تر از ۵ و بیش‌تر از ۱ درصد از سطح زیر کشت محصول ملی انتخاب شد. ۱۲ منطقه اقلیمی با استفاده از این طرح پهنه‌بندی اقلیمی در ایران ترسیم شد. این مناطق اقلیمی-زراعی شامل ۹۱ درصد از مناطق تولید لوبیا در ایران است. برای هر منطقه اقلیمی-زراعی، یک یا چند ایستگاه هواشناسی پس از مشورت با محققان لوبیا در هر استان برای اطمینان از نماینده بودن ایستگاه در مناطق تولید لوبیا انتخاب شدند. از این لیست ایستگاه‌های هواشناسی، ۲۵ ایستگاه هواشناسی مرجع انتخاب شد. جزئیات مربوط به نحوه برش بافرها و تعیین اقلیم‌های اصلی، بافرها و خاک در مطالعه دادرسی و همکاران (۲۰۲۱) قابل مشاهده است (۲۲). اطلاعات مربوط به مکان‌های DCZ و RWS انتخاب شده در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های خاک محدوده ایستگاه‌های هواشناسی:

برای شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گیاهان زراعی، به برخی از خصوصیات فیزیکی خاک مندرج در جدول ۲ نیاز است. با توجه به اینکه این اطلاعات برای کل کشور وجود ندارد، بنابراین اطلاعات خاک مورد استفاده برای اجرای مدل از موسسه بین‌المللی تحقیقات سیاست غذایی- (IFPRI) HarvestChoice HC27 به‌دست آمد (۳۶). لایه پروفیل خاک HC27 که در مطالعه حاضر استفاده شد توسط نهبندانی و همکاران (۲۰۲۰) مورد ارزیابی قرار گرفته و درستی آن در ایران تأیید شده است (۳۷). این لایه پروفیل خاک بر اساس سه معیار بافت، عمق و حاصلخیزی (درصد کربن آلی) خاک‌ها را از شماره ۱ تا ۲۷ در مناطق مختلف کد گذاری می‌کند. اطلاعات مربوط به خاک‌های غالب در مناطق تولید کننده لوبیا در ایران در جدول ۲ ارائه شده است.

اطلاعات مدیریت زراعی: اجرای مدل نیازمند اطلاعات تیپیک مدیریت زراعی هر منطقه می‌باشد. داده‌های مربوط به روش‌های مدیریت زراعی (به عنوان مثال تاریخ کاشت، ارقام و تراکم کاشت گیاه) برای سیستم‌های کشت در ایران موجود و یا در دسترس عموم نیست. از این‌رو، پرسش‌نامه‌ای در ارتباط با اطلاعات و شیوه‌های مدیریت محصول برای هر ایستگاه هواشناسی مرجع^{۱۰} (RWS) جهت تکمیل توسط منابع مختلف (مراکز تحقیقاتی استان‌ها، جهاد کشاورزی، کشاورزان با تجربه)، طراحی شد. اطلاعات مورد نیاز شامل تناوب‌های زراعی رایج، نوع خاک، تاریخ کاشت، نام رقم و طول دوره رشد آن، تراکم کاشت، عملکرد دانه، تاریخ برداشت، مدیریت کوددهی و آبیاری بود.

¹⁰ Reference Weather Station

⁹ Designated Climate Zones

برآورد خلا عملکرد و بهره‌وری آب لوبیای... / سمانه محمدی و همکاران

جدول ۱- مناطق اصلی اقلیمی در نواحی تولید لوبیا در ایران و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی مرجع (RWS) در هر DCZ، پهنه‌بندی بر اساس GYGA است. سطح زیر کشت لوبیا در ایران (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵) ۱۱۴۵۹۳ هکتار است.

Table 2- Main climate zone in bean production areas in Iran and the number of reference weather station (RWS) in each DCZ, zoning is based on GYGA-ED. National bean crop area is 114593ha (2014 to 2016).

مناطق اقلیمی تعیین شده DCZ	تعداد ایستگاه های هواشناسی داخل هر اقلیم RWS No.	ایستگاه‌های داخل اقلیم Station DCZ	سطح زیر کشت لوبیا داخل هر اقلیم (هکتار) Area in CZ (ha)	درصد اراضی لوبیا از کل اراضی لوبیا در کشور National Area in CZ (%)
8003	2	اهواز، دزفول (صفی آباد) AHWAZ, DEZFUL (SAFIABAD)	11872	10
8002	1	آبادان ABADAN	1509	1
5003	4	آباده، ساوه، درود، سی سخت (فرضی) ABADEH, SAVEH, DOROUD, SISAKHT (HYP)	11629	10
5002	1	درودزن DORODZAN	3072	3
4202	1	گرمی GERMI	2562	2
4103	2	بیجار، همدان (فرودگاه) BIJAR, HAMEDAN (AIRPORT),	4557	4
4102	2	نهادند، اردبیل NAHAVAND, ARDEBIL	4548	4
4003	7	الیگودرز، بروجن، اقلیدفارس، کمیجان، کوهرنگ، یاسوج، غرقاباد ALIGOODARZ, BOROJEN, EGHLIDEFARS, KOMIJAN, KOOHRANG, YASOUJ, GHARGHABAD	53096	46
4002	2	داران، خرم دره DARAN, KHORRAMDAREH,	5344	5
3103	1	خدابنده KHODABANDEH	3500	3
3102	1	مشکین شهر MESHKINSHAHR	2550	2
3003	1	اوج AVAJ	1714	1
مجموع/SUM	25	-	105953	91

متوالی (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) به صورت روزانه و دارای کم‌تر از ۲۰ درصد داده از دست رفته برای هر متغیر از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد (جدول ۲). طبق پروتکل گیگا، در صورت عدم وجود داده‌های هواشناسی کافی در یک ایستگاه می‌توان از ایستگاه جایگزین (در همان اقلیم) که حاوی داده‌های هواشناسی طولانی مدت و صحیح است با عنوان ایستگاه فرضی^{۱۱} استفاده نمود. در این مطالعه ایستگاه هواشناسی سی‌سخت واقع در منطقه اقلیمی ۵۰۰۳

داده‌های هواشناسی: با توجه به اینکه بسته به تأمین آب، داده‌های هواشناسی روزانه ۱۰ (در محیط‌های آبی یا دیمی پرآب) تا ۲۰ ساله (در محیط‌های دیمی کم آب) برای شبیه‌سازی‌های قابل اعتماد Y_p (عملکرد پتانسیل در شرایط آبی) یا Y_w (عملکرد پتانسیل در شرایط دیم) و تغییرپذیری آن‌ها مورد نیاز است (۳۱)، برای شرایط اقلیمی ایران، داده‌های هواشناسی شامل تابش خورشید، بارندگی و حداقل و حداکثر دما برای ایستگاه‌ها در مناطق اقلیمی انتخاب شده برای ۱۵ سال

¹¹ Hypothetical RWS (HYP RWS)

(جدول ۲) در عرض جغرافیایی ۳۰/۸۴ و طول جغرافیایی ۵۱/۴۷ و در ارتفاع ۲۱۳۳ متر از سطح دریا به عنوان ایستگاه فرضی در نظر گرفته شد. این ایستگاه هواشناسی فرضی ۱/۶ درصد از سطح زیر کشت لوبیا در ایران را بر اساس رویکرد GYGA پوشش داده است.

جدول ۲- خاک‌های غالب در مناطق تولید کننده لوبیا در ایران بر اساس HarvestChoice HC27 (IFPRI) (۳۶).

Table 1- Major soils in bean production areas of Iran based on IFPRI Harvest Choice (36).

کد خاک Soil code	Soc	SOLDEP	SALB	CN	DRAINF	SAT	DUL	LL
HC16-Clay MF060	0.7-1.2	600	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC19-Clay LF060	0-0.7	600	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC22-Loam HF060	>1.2	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180
HC25-Loam MF060	0.7-1.2	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180
HC28Loam LF060	0-0.7	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180

Soc: کربن آلی خاک (درصد); SOLDEP: عمق خاک (میلی‌متر); SALB: ضریب آلبیدوی خاک; CN: شماره منحنی خاک; DRAINF: ضریب زهکشی; SAT: کسر حجمی آب خاک در نقطه اشباع (میلی‌متر بر میلی‌متر); DUL: کسر حجمی آب خاک در نقطه ظرفیت زراعی (میلی‌متر بر میلی‌متر); LL: کسر حجمی آب خاک در نقطه پژمردگی دائم (میلی‌متر بر میلی‌متر).
کدهای خاک (IFPRI) - HarvestChoice HC27: ۱۶=رسی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۱۹=رسی، حاصلخیزی کم، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۲۲=لومی، حاصلخیزی زیاد، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۲۵=لومی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۲۸=لومی، حاصلخیزی کم، عمق ۶۰ سانتی‌متر

Soc: Organic carbon (%); SOLDEP; Depth (mm); SALB; Albedo; CN: Curve number; DRAINF: Drainage factor; SAT: Saturation (mm mm⁻¹); DUL: Drained upper limit (mm mm⁻¹); LL: Drained lower limit (mm mm⁻¹)
Soil codes (IFPRI Harvest Choice): 16=Clay, medium fertility, 60 cm depth; 19=Clay, low fertility, 60 cm depth; 22=Loam, high fertility, 60 cm depth; 25=Loam, medium fertility, 60 cm depth

در پارامتریابی و ارزیابی مدل شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV) بودند. نتایج ارزیابی مدل با RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۵۳ گرم در متر مربع، ۱۹ درصد و ۰/۷۷ حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی عملکرد لوبیا بود. بهره‌وری آب (WP)، مقدار محصول تولید شده به ازای مقدار آب مصرفی یا تبخیر و تعرق واقعی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب یا میلی‌متر محاسبه می‌گردد (۳۹). بنابراین، طبق رابطه ۱ پتانسیل بهره‌وری آب در هر ایستگاه هواشناسی از تقسیم عملکرد پتانسیل بر حسب وزن تر بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه زراعی لوبیا در طی فصل رشد (ET) محاسبه شد (۱۳):

$$WP = (Yp \text{ or } Yw) / ET \quad \text{رابطه ۱}$$

استفاده از مدل SSM-iCrop2 و برآورد عملکرد پتانسیل و بهره‌وری آب لوبیا: شبیه‌سازی عملکرد و تولید پتانسیل و بهره‌وری آب لوبیا با استفاده از مدل شبیه‌سازی گیاه SSM-iCrop2 انجام شد که توانایی آن در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی مهم تحت شرایط مدیریت مطلوب در مناطق اصلی تولید در ایران به طور موفقیت‌آمیزی اعتبارسنجی شده است (۳۸). در این راستا، ابتدا استان‌های مهم تولید کننده لوبیا شناسایی شدند و سپس در این استان‌ها اطلاعات عملکرد و روز تا رسیدگی لوبیا تحت شرایط مطلوب مدیریتی از مقالات مختلف تهیه شد. از بخشی از اطلاعات تهیه شده برای پارامتریابی مدل شامل پارامترهای مربوط به فنولوژی، سطح برگ، تولید ماده خشک، تشکیل عملکرد و روابط آب و از بخشی دیگر برای ارزیابی مدل استفاده شد. آماره‌های مورد بررسی

جزئیات اطلاعات و دلایل مفصل آن‌ها به صورت جداگانه در رابطه با مناطق اقلیمی (۳۵)، بزرگ مقیاس نمایی از ایستگاه هواشناسی به منطقه اقلیمی با اقلیم مشابه و مقیاس کشور با استفاده از میانگین وزنی منطقه‌ای (۳۲) و ضوابط و معیارها برای انتخاب داده‌ها (۴۱) منتشر شده و در دسترس می‌باشند. برای بررسی دقت پروتکل گیگا به منظور تعمیم نتایج به کل کشور، میانگین عملکردهای واقعی مشاهده شده در کل کشور و مقادیر محاسبه شده به وسیله گیگا طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ از آماره‌های CV، RMSE و r استفاده شد:

$$\text{رابطه ۴: } \text{RMSE}(\%) = \sqrt{\left(\frac{\sum(X_i - Y_i)^2}{n-1}\right)} \times \frac{100}{\bar{X}}$$

که در آن X_i : مقدار اندازه‌گیری شده، Y_i : مقدار شبیه‌سازی شده و n : تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه RMSE استفاده می‌شوند.

$$\text{رابطه ۵: } \text{CV} = \frac{\delta}{\mu} \times 100$$

در رابطه ۵، CV: ضریب تغییرات، δ : انحراف معیار و μ : میانگین می‌باشد.

$$\text{رابطه ۶: } r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

که در آن X_i : مقدار اندازه‌گیری شده، Y_i : مقدار شبیه‌سازی شده، \bar{X} و \bar{Y} : میانگین مقادیر X_i و Y_i و n : تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه r استفاده می‌شوند. در این مطالعه برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel و برای رسم نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استفاده شد.

نتایج و بحث

سطح زیر کشت، عملکرد و تولید لوبیا در ایران:
سطح زیر کشت، عملکرد و تولید لوبیای معمولی در

داده‌های عملکرد و تولید واقعی: داده‌های عملکرد و تولید واقعی موجود در طول دوره مورد مطالعه (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) برای هر یک از شهرستان‌هایی که با RWS انتخابی هم پوشانی دارند از آمارنامه‌های وزارت کشاورزی ایران (۴) استخراج شد.

برآورد خلأ عملکرد و عملکرد نسبی: Y_g برای یک گیاه زراعی آبی مانند لوبیا طبق رابطه ۲ از تفاوت بین Y_a یا عملکردهای رایج کشاورزان و Y_p یا عملکرد محصول در شرایط مدیریت بهینه بدون محدودیت رطوبت و عناصر غذایی و عدم حضور آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز محاسبه شد. همچنین، خلأ تولید از اختلاف بین تولید پتانسیل و واقعی برآورد شد (۱۳):

$$\text{رابطه ۲: } Y_g = (Y_p \text{ or } Y_w) - Y_a$$

درصد عملکرد نسبی (RY) و تولید نسبی (RP) نیز طبق رابطه ۳ به صورت نسبت عملکرد و تولید واقعی به عملکرد و تولید پتانسیل هر ایستگاه محاسبه شد (۱۳):

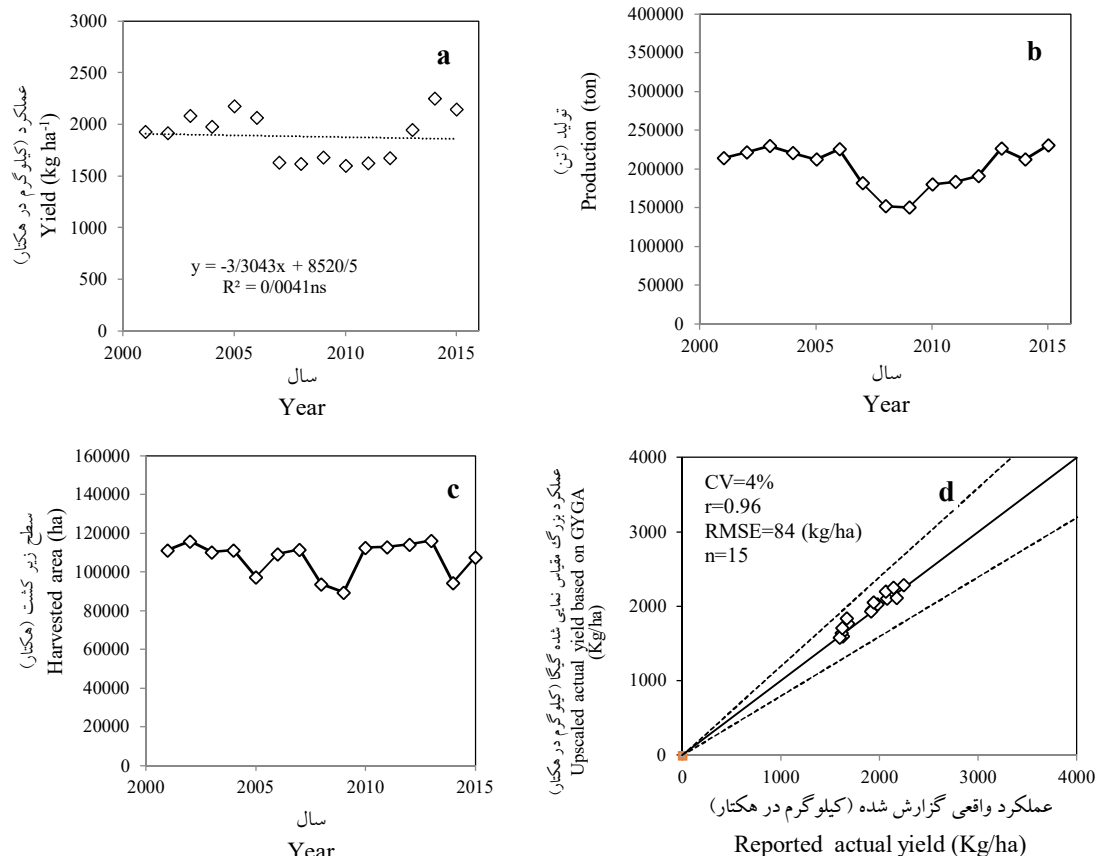
$$\text{رابطه ۳: } \text{RY} = (Y_a / (Y_p \text{ or } Y_w)) \times 100$$

محاسبه عملکرد و تولید قابل حصول: با توجه به اینکه، بیش‌تر منابع بر این اتفاق نظر دارند که بین ۷۰ تا ۸۵ درصد از عملکرد و تولید پتانسیل توسط کشاورزان قابل دستیابی است (۴۰)، ۸۰ درصد عملکرد و تولید پتانسیل به عنوان حداکثر عملکرد قابل حصول (Y_{Att}) و تولید قابل دستیابی (P_{Att}) در نظر گرفته شد.

روش‌های پروتکل بزرگ مقیاس نمایی: برای بزرگ مقیاس نمایی Y_p ، Y_a و Y_g تخمین زده شده از مقیاس RWS به مقیاس‌های مکانی بزرگ‌تر، میانگین وزنی برای هر متغیر با سهم متناسب سطح زیر کشت لوبیا در هر واحد فضایی محاسبه و به مقادیر تجمعی مکانی در مقیاس CZ یا کشور تعمیم داده شد.

۱/۶ تا ۲/۲ تن در هکتار، ۱۵۰ تا ۲۳۰ هزار تن و ۸۹ تا ۱۱۶ هزار هکتار متغیر بود (شکل ۱).

ایران طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ روند نسبتاً ثابت و بدون تغییری را نشان داد. حداقل و حداکثر میانگین عملکرد، تولید و سطح زیر کشت لوبیا به ترتیب از



شکل ۱- روند تغییرات عملکرد (a)، تولید (b) و سطح زیر کشت (c) لوبیا در ایران طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ برگرفته از آمارنامه‌های وزارت کشاورزی (۱۳۹۵) (۲۵). میانگین عملکرد کشوری محاسبه شده با استفاده از روش گیگا در مقابل میانگین عملکرد واقعی لوبیا در ایران استخراج شده از آمارنامه وزارت کشاورزی (۱۳۹۵) (۲۹) طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴. خط منتهی خط ۱:۱ و خطوط منقطع حدود اطمینان $\pm 20\%$ درصد را نشان می‌دهند (d).

Figure 1- Trend of bean yield (a), production (b) and harvested area (c) in Iran using 2001-2015 statistics from Ministry of Agriculture (2016) (29). The average actual yield (kg ha⁻¹) of the country reported by Ministry of Agriculture versus the actual yield of the country calculated by the GYGA method for bean. Time period is 2000 to 2014. The $\pm 20\%$ discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line (d).

معمولاً مقادیر خلأ عملکرد در کشورهای در حال توسعه، تا حدودی به این دلیل زیاد است که کشاورزان به ارقام قدیمی و دارای پتانسیل عملکرد پایین و یا حساس به آفات، بیماری‌ها و تنش‌های محیطی اعتماد می‌کنند، زیرا تلاش برای توسعه ارقام جدید عمدتاً

مهم‌ترین دلایل ثابت عملکرد لوبیا طی ۱۵ سال در ایران را می‌توان عدم معرفی ارقام جدید سازگار و دارای پتانسیل عملکرد بالاتر از ارقام قدیمی (۴۲) و فقدان آگاهی و شناخت کافی از گیاه زراعی، عدم بهبود مدیریت زراعی و کشاورزی سنتی دانست.

برآورد خلأ عملکرد و بهره‌وری آب لوبیای... / سمانه محمدی و همکاران

شده توسط وزارت کشاورزی با عملکرد واقعی محاسبه شده طبق پروتکل گیگا برای کشور با RMSE، CV و r^2 به ترتیب برابر با ۸۴ کیلوگرم در هکتار، ۴ درصد و ۰/۹۶ نشان داد که با استفاده از این پروتکل می‌توان میانگین عملکرد لوبیا در کشور را با دقت بالایی برآورد نمود (شکل d۱). میانگین ۱۵ ساله عملکرد واقعی دانه لوبیا در مناطق اقلیمی اصلی تولید آن در ایران برابر با ۱/۹ تن در هکتار و دامنه آن از ۱/۱ (منطقه اقلیمی ۴۲۰۲ واقع در گرمی) تا ۲/۳ تن در هکتار (در منطقه اقلیمی ۳۰۰۳ واقع در آوج) متغیر بود (جدول ۳ و شکل b۲).

محدود به کشورهای توسعه یافته است (۴۳). همچنین، کشورهای دارای سیستم کشاورزی فنی، عملکردهای بسیار بالاتری نسبت به کشورهای فاقد این سیستم دارند (۴۴). البته ارائه فناوری‌های نوین کشاورزی ممکن است باعث کاهش قطعی خلأ عملکرد نشود مگر اینکه توسط کشاورزان به درستی مورد استفاده قرار گیرد (۴۵). به عنوان مثال، در اتیوپی با وجود دستاوردهای جدید در زمینه تولید محصولات زراعی، خلأ عملکرد لوبیا در حدود ۲ تن در هکتار گزارش شده است (۴۶). نتایج مقایسه میانگین عملکرد واقعی لوبیا گزارش

جدول ۳- عملکرد واقعی (Y_a ; کیلوگرم در هکتار)، عملکرد پتانسیل (Y_p ; کیلوگرم در هکتار)، خلأ عملکرد (Y_g ; کیلوگرم در هکتار)، درصد عملکرد نسبی ($RY\%$)، عملکرد قابل حصول (Y_{Att} ; کیلوگرم در هکتار)، خلأ عملکرد قابل دست‌یابی (Y_E ; کیلوگرم در هکتار) و بهره‌وری آب (Wp ; کیلوگرم بر متر مکعب) در مناطق اصلی تولید لوبیا در ایران. عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل SSM-iCrop2 شبیه‌سازی و با رطوبت ۱۲ درصد تصحیح شد. ۸۰ درصد عملکرد پتانسیل به عنوان عملکرد قابل حصول در نظر گرفته شد. عملکرد واقعی از آمارنامه‌های وزارت کشاورزی (۱۳۹۵) (۲۹) مربوط به دوره ۱۵ ساله ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ استخراج شد.

Table 3- Bean actual yield (Y_a ; kg ha⁻¹), potential yield (Y_p ; kg ha⁻¹), yield gap (Y_g ; kg ha⁻¹), relative yield (%RY), attainable yield (Y_{Att} ; kg ha⁻¹), exploitable yield gap (Y_E ; kg ha⁻¹) and water productivity based on wet matter (Wp ; kg m⁻³) in its main climate zones in Iran. Attainable yield is 80% of potential yield. Potential yield is simulated by SSM-iCrop2 model during 2001-2015 and is adjusted with 12% moisture content. Actual yield was calculated using recorded yield statistics obtained from Ministry of Agriculture (2016) (29) during 2001-2015.

منطقه اقلیمی CZ	ایستگاه Station	عملکرد واقعی (کیلوگرم در هکتار) Y_a (kg ha ⁻¹)	عملکرد پتانسیل (کیلوگرم در هکتار) Y_p (kg ha ⁻¹)	خلأ عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Y_g (kg ha ⁻¹)	عملکرد نسبی (درصد) RY (%)	عملکرد قابل حصول (کیلوگرم در هکتار) Y_{Att} (kg ha ⁻¹)	خلأ عملکرد قابل دست‌یابی (کیلوگرم در هکتار) Y_E (kg ha ⁻¹)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب) Wp (kg m ⁻³)
8003	اهواز، دزفول (صفی آباد) AHWAZ, DEZFUL (SAFIABAD)	1544	3665	2121	42	2932	1388	0.34
8002	آبادان ABADAN	1487	3837	2350	39	3070	1583	0.33
5003	آباده، ساوه، درود، سی سخت (فرضی) ABADEH, SAVEH, DOROD, SISAKHT (HYP)	2104	5147	3044	41	4118	2014	0.77
5002	درودزن DORODZAN	1948	4655	2707	42	3724	1776	0.73
4202	گرمی GERMI	1127	3391	2263	33	2713	1585	0.98

4103	بیجار، همدان (فرودگاه) BIJAR, HAMEDAN (AIRPORT)	1939	5407	3468	36	4325	2386	0.79	
4102	نهایند، اردبیل NAHAVAND, ARDABIL	1515	3667	2152	41	2933	1418	0.67	
4003	الیگودرز، بروجن، اقلیدفارس، کمیجان، کوهرنگ، یاسوج، غرقاباد ALIGOODARZ, BOROOJEN, EGHLIDEFARS, KOMIJAN, KOOHRANG, YASOUJ, GHARGHABAD	2053	4719	2666	44	3775	1722	0.82	
4002	داران، خرم دره DARAN, KHORRAMDAREH	2134	4860	2726	44	3888	1754	0.85	
3103	خدابنده KHODABANDEH	2104	3889	1785	54	3111	1007	0.81	
3102	مشکین شهر MESHKINSHAHR	1777	3727	1950	48	2982	1205	1.17	
3003	آوج AVAJ	2329	4375	2046	53	3500	1171	0.94	
مجموع/میانگین SUM/AVE		-	1943	4536	2592	43	3629	1685	0.76

منطقه اقلیمی ۴۰۰۳ واقع در الیگودرز، بروجن، اقلید فارس، کمیجان، کوهرنگ، یاسوج و غرقاباد) تخمین زده شد (جدول ۴). برای هر مکان خاص و فصل رشد معین، عملکرد پتانسیل به وسیله سه عامل تابش خورشیدی، دما و تأمین آب تعیین می‌شود (۱۱). در صورت عدم محدودیت در تأمین آب و عناصر غذایی و عدم وجود مشکل آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، عملکرد گیاهان زراعی اغلب یک رابطه خطی با مقدار تشعشع تجمعی دریافتی دارد (۴۷). نتایج این مطالعه نیز رابطه مستقیم و خطی بین مجموع تشعشع خورشیدی (SRAD) و عملکرد پتانسیل در مناطق اقلیمی اصلی کشت لوبیا را نشان داد (شکل ۳).

همچنین، تولید واقعی لوبیا از ۲/۲ (در منطقه اقلیمی ۸۰۰۲ واقع در آبادان) تا ۱۰۹ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۴۰۰۳ واقع در الیگودرز، بروجن، اقلید فارس، کمیجان، کوهرنگ، یاسوج و غرقاباد) متغیر بود (جدول ۴).

عملکرد پتانسیل: عملکرد پتانسیل دانه لوبیا در مناطق اقلیمی اصلی تولید آن در ایران از ۳/۴ (در منطقه اقلیمی ۴۲۰۲ واقع در گرمی) تا ۵/۴ تن در هکتار (در منطقه اقلیمی ۴۱۰۳ واقع در همدان و بیجار) با میانگین ۴/۵ تن در هکتار برآورد شد (جدول ۳ و شکل ۲a).

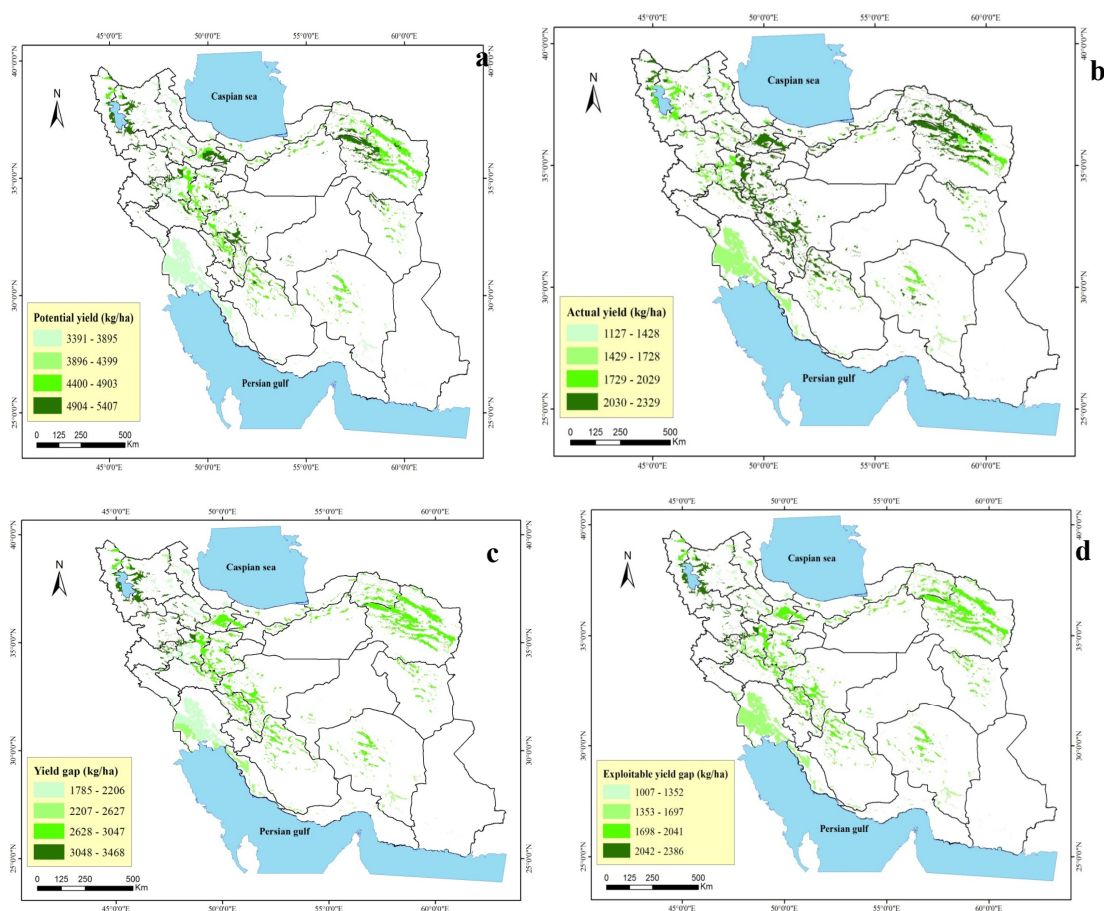
همچنین، تولید پتانسیل لوبیا از ۵/۸ (در منطقه اقلیمی ۸۰۰۲ واقع در آبادان) تا ۲۵۱ هزار تن (در

برآورد خلأ عملکرد و بهره‌وری آب لوبیای... / سمانه محمدی و همکاران

جدول ۴- تولید واقعی (P_a : تن)، تولید پتانسیل (P_p : تن)، خلأ تولید (P_g : تن)، درصد تولید نسبی ($RP\%$)، تولید قابل حصول (P_{Att} : تن) و خلأ تولید قابل دست‌یابی (P_E : تن) در در مناطق اصلی تولید لوبیا در ایران. تولید پتانسیل با استفاده از مدل SSM-iCrop2 شبیه‌سازی و با رطوبت ۱۲ درصد تصحیح شد. ۸۰ درصد تولید پتانسیل به عنوان تولید قابل حصول در نظر گرفته شد. تولید واقعی از آمارنامه‌های وزارت کشاورزی (۲۹) مربوط به دوره ۱۵ ساله ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ استخراج شد.

Table 4- Bean actual production (P_a ; ton), potential production (P_p ; ton), production gap (P_g ; ton), relative production ($RP\%$), attainable production (P_{Att} ; ton), exploitable production gap (P_E ; ton), in its main climate zones in Iran. Attainable production is 80% of potential production. Potential production is simulated by SSM-iCrop2 model during 2001-2015 and is adjusted with 12% moisture content. Actual production was calculated using recorded yield statistics obtained from Ministry of Agriculture (29) during 2001-2015.

منطقه اقلیمی	ایستگاه	تولید واقعی (تن)	تولید پتانسیل (تن)	خلأ تولید (تن)	تولید نسبی (درصد)	تولید قابل حصول (تن)	خلأ تولید قابل دست‌یابی (تن)	
CZ	Station	$P_a(\text{ton})$	$P_p(\text{ton})$	$P_g(\text{ton})$	$RP(\%)$	$P_{Att}(\text{ton})$	$P_E(\text{ton})$	
8003	اهواز، دزفول (صفی آباد) AHWAZ, DEZFUL (SAFIABAD)	18329	43513	25184	42	34810	16482	
8002	آبادان ABADAN	2244	5790	3546	39	4632	2388	
5003	آباده، ساوه، درود، سی سخت (فرضی) ABADEH, SAVEH, DOROUD, SISAKHT (HYP)	24462	59857	35395	41	47886	23423	
5002	درودزن DORODZAN	5983	14299	8316	42	11439	5456	
4202	گرمی GERMI	2889	8687	5798	33	6950	4061	
4103	بیجار، همدان (فرودگاه) BIJAR, HAMEDAN (AIRPORT)	8837	24639	15802	36	19711	10874	
4102	نهایند، اردبیل NAHAVAND, ARDABIL	6890	16676	9786	41	13341	6450	
4003	الیگودرز، بروجن، اقلیدفارس، کمبجان، کوهرنگ، یاسوج، غرقاباد ALIGOODARZ, BOROOJEN, EGHLEDFARS, KOMIJAN, KOOHRANG, YASOUJ, GHARGHABAD	108990	250540	141550	44	200432	91442	
4002	داران، خرم دره DARAN, KHORRAMDAREH	11404	25973	14569	44	20778	9375	
3103	خدابنده KHODABANDEH	7364	13610	6247	54	10888	3525	
3102	مشکین شهر MESHKINSHAHR	4531	9505	4973	48	7604	3073	
3003	آوج AVAJ	3992	7498	3507	53	5999	2007	
SUM/AVE	مجموع میانگین	-	205914	480587	274673	43	384470	178556
National estimate	میانگین وزنی	-	222705	519777	297072	43	415822	193116

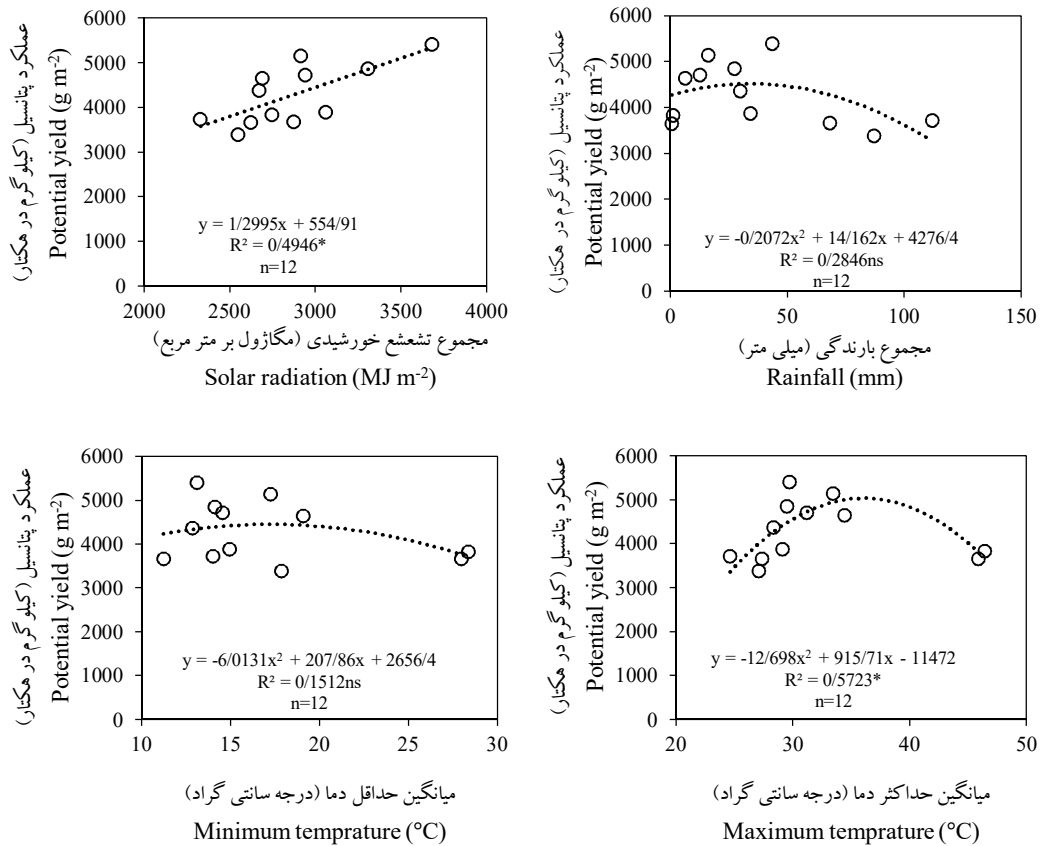


شکل ۲- عملکرد پتانسیل (a)، عملکرد واقعی (b)، خلأ عملکرد (c) و خلأ عملکرد قابل دستیابی لوبیا (d) (kg/ha) در اراضی واقع در مناطق اقلیمی اصلی در ایران. عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برای دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) شبیه‌سازی و با رطوبت ۱۲ درصد تصحیح شد. ۸۰ درصد عملکرد پتانسیل به عنوان عملکرد قابل حصول در نظر گرفته شد. عملکرد واقعی از آمارنامه‌های وزارت کشاورزی (۱۳۹۵) (۴) مربوط به دوره ۱۵ ساله ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ استخراج شد.

Figure 2- Bean potential yield (a), actual yield (b), yield gap (c) and exploitable yield gap (d) (kg ha⁻¹) in its main climate zones in Iran. Exploitable yield is 80% of potential yield. Potential yield is simulated by SSM-iCrop2 during 2001-2015 and is adjusted with 12% moisture content. Actual yield was calculated using recorded yield statistics obtained from Ministry of Agriculture (2016) (4) during 2001-2015.

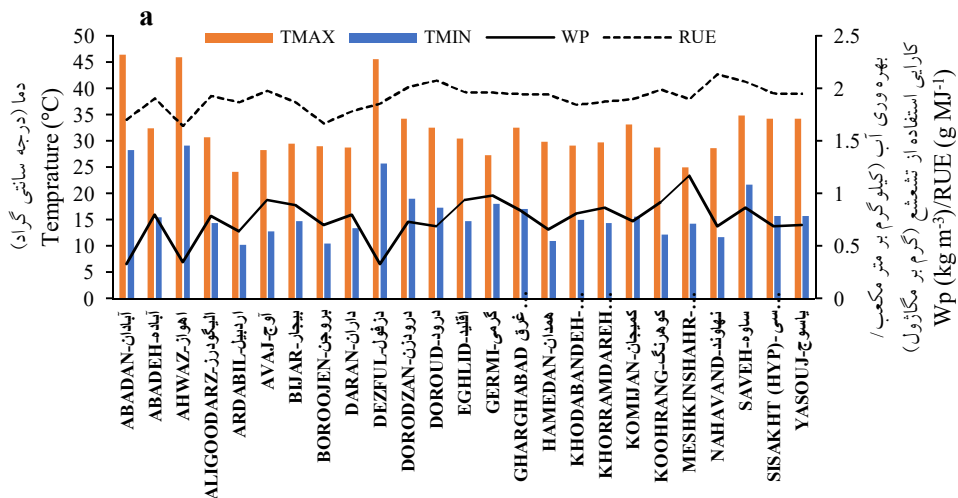
مناطق اقلیمی اصلی تولید لوبیا مشاهده شد، اما این ارتباط با دمای حداقل معنی‌دار نبود (شکل ۳). ایستگاه‌های اهواز، آبادان و دزفول متوسط دمای حداکثر (TMAX) بالایی دارند (شکل ۴a).

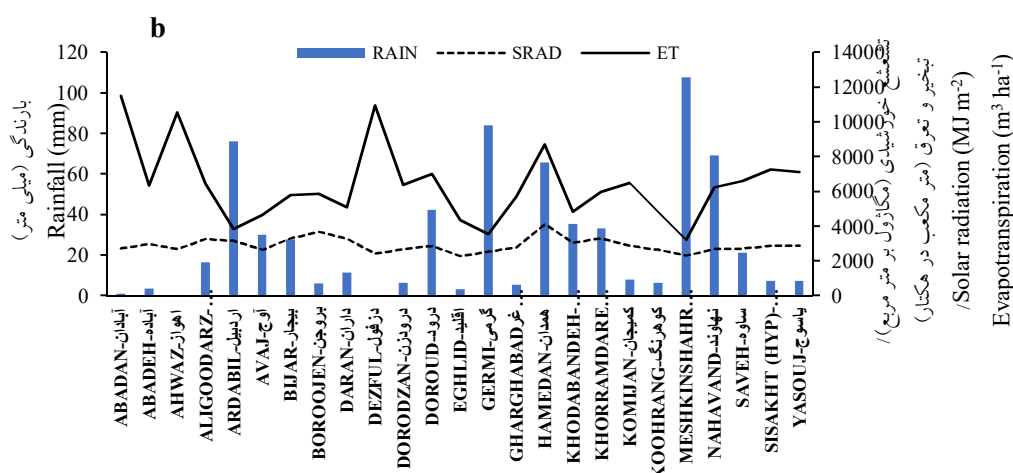
با توجه به اینکه شبیه‌سازی عملکرد به صورت تشعشع محدود است تشعشع به عنوان یک عامل مهم بر عملکرد پتانسیل تاثیر می‌گذارد. رابطه معنی‌داری بین عملکرد پتانسیل لوبیا و متوسط دمای حداکثر در



شکل ۳- رابطه بین عملکرد پتانسیل و متوسط حداکثر و حداقل دما (TMAX و TMIN) (درجه سانتی‌گراد)، بارندگی تجمعی (RAIN) (میلی‌متر) و مجموع تابش خورشیدی (SRAD) (مگاژول بر متر مربع) از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) مربوط به مناطق اقلیمی اصلی تولید لویبای در ایران.

Figure 3- The relationship between potential yield (g m⁻²) and the average of maximum and minimum temperature (TMAX and TMIN, °C), cumulative solar radiation (SRAD, MJ m⁻²) and cumulative rainfall (RAIN, mm) during the bean from sowing to physiological maturity (2001-2015) in its main climate zones in Iran.





شکل ۴- مقادیر متوسط حداکثر و حداقل دمای روزانه (TMAX; TMIN) (درجه سانتی‌گراد)، بهره‌وری آب (Wp) (کیلوگرم بر متر مکعب) و کارایی استفاده از تشعشع (RUE) (گرم بر مگاژول) (a)، مجموع تشعشع خورشیدی (SRAD) (مگاژول بر متر مربع)، تبخیر و تعرق (متر مکعب در هکتار) و بارندگی تجمعی (RAIN) (میلی‌متر) (b)، در طول فصل رشد لوبیا در دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی مرجع (RWS) در ایران.

Figure 4- The average of maximum and minimum daily temperature (TMAX; TMIN, °C), water productivity based on wet matter (Wp, kg m⁻³) and radiation use efficiency (RUE, g MJ⁻¹) (a), cumulative solar radiation (SRAD, MJ m⁻²), evapotranspiration (ET, m³ ha⁻¹) and cumulative rainfall (RAIN, mm) (b) during the bean growing season (2001-2015) for each weather station (RWS) in Iran.

دمای بهینه کارایی استفاده از تشعشع قرار دارد و از این نظر محدودیتی مشاهده نمی‌شود. اما کارایی استفاده از تشعشع در ایستگاه‌های دزفول، آبادان و اهواز به دلیل دمای بالا کاهش می‌یابد (شکل ۴a). همچنین، دماهای بالاتر از حد بهینه در دوره رشد رویشی، معدنی شدن مواد آلی را تسریع و رشد ریشه را تضعیف می‌کند و باعث هجوم آفات می‌شود. در شرایط تنش دمایی، میزان تنفس از میزان فتوسنتز بیشتر می‌شود که ممکن است باعث از دست رفتن زیست توده لوبیا شود (۴۹). لوبیای معمولی در میانگین دمای فصلی کم‌تر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز تحت تنش دمایی قرار می‌گیرد که می‌تواند منجر به کاهش عملکرد شود (۵۰). یکی از راه‌های کاهش تاثیر دما بر عملکرد، انتخاب ارقام از نظر طول دوره رشد و تاریخ کاشت مناسب برای هر منطقه است. بنابراین،

بنابراین، در این مناطق لوبیای معمولی در طول فصل رشد با تنش دمایی (بالاتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد) مواجه است که به میزان قابل توجهی عملکرد پتانسیل را کاهش می‌دهد. در مقابل، ایستگاه‌های آوج، مشکین‌شهر، اردبیل، گرمی، داران، کوه‌رنگ و بروجن، متوسط دمای حداکثر پایین‌تر از حد بهینه^{۱۲} دارند. در واقع به لحاظ دمای کاردینال، لوبیای معمولی در این مناطق با اندکی محدودیت دما در طول فصل رشد مواجه است و کم‌تر در محدوده دمای بهینه ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای لوبیا (۴۸) برای تولید ماده خشک و عملکرد قرار می‌گیرد. در حالی که با توجه به حد بهینه دما برای کارایی استفاده از تشعشع ۲۵ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد برای لوبیا (۴۸) متوسط حداکثر دما در ایستگاه‌های اردبیل، مشکین‌شهر و گرمی تا حدودی در محدوده

¹² Optimum temperature

طول دوره رشد می‌تواند برای مناطق و اقلیم‌های مختلف بهینه شود (۵۱).

عدم وجود رابطه معنی‌دار بین بارندگی و عملکرد پتانسیل لوبیا (شکل ۳) به این دلیل است که لوبیا در ایران عمدتاً به صورت آبی تولید می‌شود و به آب باران وابسته نیست. در واقع، از آنجایی که این گیاه مقاومت کمی به تنش خشکی دارد و از سوی دیگر فصل رشد آن با فصل گرم و خشک ایران مطابقت دارد، کم‌تر به صورت دیم کشت می‌شود. بنابراین، تاثیر بارندگی بر رشد و عملکرد لوبیا در صورتی که آب مورد نیاز از طریق آبیاری تامین شود، قابل چشم پوشی است. در عین حال، بارندگی زیاد و رطوبت بیش از حد می‌تواند موجب بروز بیماری‌های قارچی و پوسیدگی غلاف (خصوصاً در ارقام رونده) و هجوم آفات شود. در محیط‌های نسبتاً مرطوب، ارقام لوبیا با کانوپی‌های بسته و ارقامی که غلاف‌های آن‌ها به زمین می‌رسند مستعد بیماری هستند. در این مناطق، ارقام با تیپ رشدی ایستاده که اجازه می‌دهند هوا بهتر از میان کانوپی عبور کند و غلاف‌ها را از خاک دور نگه می‌دارند، توصیه می‌شود (۵۲). با وجود اینکه به طور معمول، لوبیا در مناطق خشک خلأ عملکرد بالاتری دارد (۴۴) عملکرد در ایستگاه‌های دزفول، آبادان و اهواز با وجود فصل رشد خشک و بدون بارندگی اختلاف معنی‌داری با مناطق پر بارش ندارد (شکل ۳). در چنین شرایطی، تغییرات عملکرد محدود و در نتیجه آن خلأ عملکرد کم است. در واقع، مدیریت زراعی به شکل آبیاری مشکل خشکی فصل را حل نموده است (۵۳). علاوه بر این، میزان تابش خورشیدی در مناطق پر بارش نسبت به مناطق خشک، کم‌تر است.

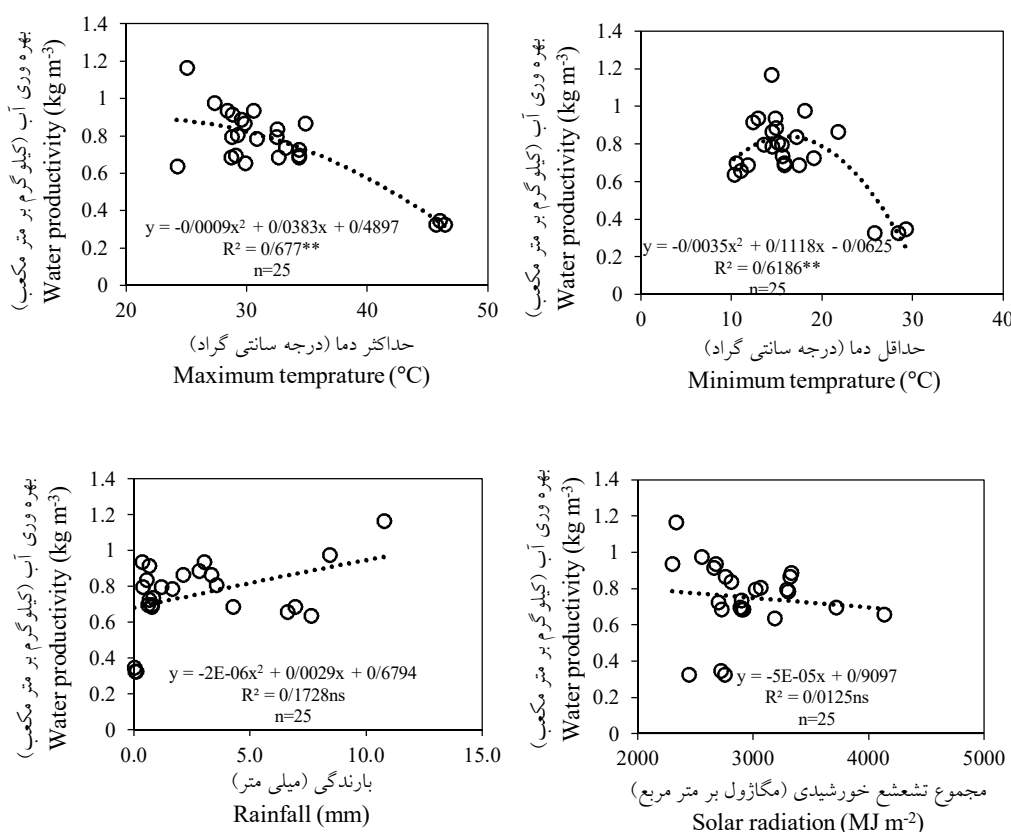
خلأ عملکرد و ظرفیت افزایش تولید: خلأ عملکرد لوبیا در مناطق اقلیمی اصلی تولید آن در ایران، از ۱/۸ (واقع در منطقه اقلیمی ۳۱۰۳) تا ۳/۵ (واقع در منطقه

اقلیمی ۴۱۰۳) با عملکرد نسبی به ترتیب معادل ۵۴ تا ۳۶ درصد و به طور متوسط ۲/۶ تن در هکتار برآورد شد (جدول ۳ و شکل ۵۲). همچنین خلأ تولید لوبیا از ۳/۵ (در منطقه اقلیمی ۳۰۰۳ واقع در آوج) تا ۱۴۲ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۴۰۰۳ واقع در الیگودرز، بروجن، اقلید فارس، کمیجان، کوه‌رنگ، یاسوج و غرقاباد) با تولید نسبی به ترتیب معادل ۵۳ تا ۴۴ درصد متغیر بود (جدول ۴). بیش‌ترین درصد خلأ عملکرد و تولید در مناطق اقلیمی اصلی تولید لوبیا در ایران مربوط به اقلیم‌های ۴۲۰۲، ۴۱۰۳ و ۸۰۰۲ به ترتیب برابر با ۶۷، ۶۴ و ۶۱ درصد (عملکرد و تولید نسبی به ترتیب ۳۳، ۳۶ و ۳۹ درصد) و کم‌ترین درصد مربوط به اقلیم‌های ۳۱۰۳ و ۳۰۰۳ به ترتیب برابر با ۴۶ و ۴۷ درصد (عملکرد و تولید نسبی ۵۴ و ۵۳ درصد) بود (جدول ۳ و ۴). بنابراین، در کشور به طور میانگین ۵۷ درصد (عملکرد و تولید نسبی ۴۳ درصد) خلأ عملکرد و تولید لوبیا وجود دارد. این مقدار خلأ، قابل توجه و در عین حال تا حد زیادی قابل جبران است.

بنابر نتایج به‌دست آمده و با احتساب ۸۰ درصد عملکرد پتانسیل به عنوان عملکرد قابل دست‌یابی توسط کشاورزان، عملکرد قابل حصول لوبیا از ۲/۷ (در منطقه اقلیمی ۴۲۰۲ واقع در گرمی) تا ۴/۳ تن در هکتار (در منطقه اقلیمی ۴۱۰۳ واقع در همدان و بیجار) با میانگین ۳/۶ تن در هکتار برآورد گردید (جدول ۳). همچنین، تولید قابل حصول لوبیا از ۴/۶ (در منطقه اقلیمی ۸۰۰۲ واقع در آبادان) تا ۲۰۰ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۴۰۰۳ واقع در الیگودرز، بروجن، اقلید فارس، کمیجان، کوه‌رنگ، یاسوج و غرقاباد) برآورد شد (جدول ۴). خلأ عملکرد قابل دست‌یابی لوبیا از ۱/۰ (در منطقه اقلیمی ۳۱۰۳ واقع در خداآبده) تا ۲/۴ تن در هکتار (در منطقه اقلیمی ۴۱۰۳ واقع در همدان و بیجار) با میانگین ۱/۷ تن در هکتار متغیر بود

افزایش ناامنی غذایی و در نتیجه نیاز به منابع یا ترکیبی از صفات جدید در لوبیا برای افزایش عملکرد پتانسیل یا کاهش تلفات می‌شود (۲). الگوهای زمانی و مکانی عملکرد پتانسیل و خلأ عملکرد می‌تواند اطلاعات اساسی برای افزایش پایداری سیستم‌های تولید محصولات زراعی فراهم کند (۵۱). علاوه بر برآورد خلأ عملکرد، هدف مهم دیگر برای تجزیه و تحلیل خلأ در مقیاس بزرگ، شناخت مناطقی با بیش‌ترین پتانسیل برای افزایش عملکرد کشاورزان است (۵۴).

(جدول ۳ و شکل d۲). همچنین، خلأ تولید قابل دستیابی در مناطق اقلیمی اصلی از ۲/۰ (در منطقه اقلیمی ۳۰۰۳ واقع در آوج) تا ۹۱ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۴۰۰۳ واقع در الیگودرز، بروجن، اقلید فارس، کمیجان، کوه‌رنگ، یاسوج و غرقاباد) متغیر بود (جدول ۴). امروزه با وجود عملکردهای بالای لوبیا در اکثر کشورهای در حال توسعه، عملکرد مزارع هنوز به‌طور میانگین به اندازه ۳ تن در هکتار کم‌تر از عملکرد پتانسیل است (۴۴). این خلأ عملکرد منجر به



شکل ۵- رابطه بین بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب) و متوسط حداقل و حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد) بارندگی تجمعی (میلی‌متر) و مجموع تابش خورشیدی (مگاژول بر متر مربع) در طول فصل رشد لوبیا (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی مرجع (RWS) در ایران.

Figure 5- The relationship between water productivity (kg m^{-3}) and the average of maximum and minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$), cumulative solar radiation (MJ m^{-2}) and cumulative rainfall (mm) during the bean growing season (2001-2015) for each reference weather station (RWS) in Iran.

اصلی تولید لوبیا برابر با ۰/۳۳ و ۰/۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب مربوط به اقلیم‌های ۸۰۰۲ و ۸۰۰۳ و بیش‌ترین مقدار برابر با ۱/۱۷، ۰/۹۸ و ۰/۹۴ کیلوگرم

دمای بالا بهره‌وری آب: میانگین بهره‌وری آب برای تولید لوبیا در ایران ۰/۷۶ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد. کم‌ترین مقدار بهره‌وری آب در اقلیم‌های

همدان و بروجن بالاترین تشعشع و ایستگاه‌های مشکین‌شهر، اقلید فارس و گرمی پایین‌ترین تشعشع تجمعی در طول فصل رشد را دارا بودند در حالی که، بالاترین تبخیر و تعرق مربوط به ایستگاه‌های آبادان، اهواز و دزفول بود (شکل b4). این نشان می‌دهد که تاثیر دما بر تبخیر و تعرق، کارایی استفاده از تشعشع و بهره‌وری آب بیش‌تر از تشعشع است (شکل ۵). تامین منابع آب کشاورزی آینده با چالش‌های زیادی روبه‌رو است. اهمیت مطالعه و تخمین بهره‌وری آب محصولات مختلف به ویژه در کشوری با اقلیم گرم و خشک مانند ایران، بسیار زیاد است. سلطانی و همکاران (۲۰۲۰)، کارایی واقعی آبیاری را برای کل کشور ۳۸ درصد تخمین زده‌اند (۵۵) که نشان دهنده مدیریت بسیار ضعیف منابع آب در بخش کشاورزی است و در صورت تداوم، کشور را با خطر جدی کمبود آب در آینده‌ای نزدیک روبه‌رو خواهد کرد.

نتیجه‌گیری کلی

طبق نتایج به‌دست آمده در مناطق اصلی تولید لوبیا در ایران، عملکرد واقعی به طور میانگین ۱/۹ تن در هکتار می‌باشد در حالی که میانگین عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده لوبیا ۴/۵ تن در هکتار برآورد گردید. در نتیجه، ۲/۶ تن در هکتار معادل ۵۷ درصد خلأ عملکرد عملکرد وجود دارد. با احتساب ۸۰ درصد عملکرد پتانسیل به عنوان عملکرد قابل دستیابی توسط کشاورزان، عملکرد قابل حصول ۳/۶ تن در هکتار و خلأ عملکرد قابل حصول ۱/۷ تن در هکتار و برابر با ۴۷ درصد خواهد بود. بر اساس نتایج، تولید واقعی لوبیا در ایران ۲۲۳ هزار تن، تولید پتانسیل آن ۵۲۰ هزار تن، تولید قابل حصول لوبیا در ایران ۴۱۶ هزار تن، خلأ تولید ۲۹۷ هزار تن و خلأ تولید قابل دستیابی ۱۹۳ هزار تن (معادل ۴۶ درصد) تخمین زده می‌شود. محاسبه بهره‌وری آب مناطق کشت لوبیا نشان داد که در مناطق گرم و دارای فصل رشد خشک

بر متر مکعب به ترتیب مربوط به اقلیم‌های ۳۱۰۲، ۴۲۰۲ و ۳۰۰۳ بود (جدول ۳). دمای حداقل و حداکثر بالا بهره‌وری آب را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (شکل ۵).

عامل محدود کننده بهره‌وری است (۴۹). در شرایط افزایش دما و کاهش بارندگی، افزایش متوسط کمبود فشار بخار (VPD)، موجب کاهش بهره‌وری آب می‌شود (۲۴). در حالی که در مطالعه حاضر بین بارندگی در طول فصل رشد و بهره‌وری آب لوبیا رابطه معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۵). این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که علاوه بر عدم وجود ارتباط معنی‌دار بین عملکرد پتانسیل و مجموع بارندگی طی فصل رشد، مقدار بارندگی در طول فصل رشد لوبیا در اغلب ایستگاه‌ها قابل ملاحظه نیست (شکل b4). ایستگاه‌های دزفول، اهواز و آبادان به دلیل دمای بالا و افزایش پتانسیل تبخیر و تعرق، بهره‌وری آب بسیار پایینی دارند (شکل a4). دمای بالا موجب افزایش تبخیر و تعرق و کاهش شدید بهره‌وری آب در این مناطق می‌گردد (شکل a4 و b) و در نتیجه، حجم آب و تعداد دفعات آبیاری به مراتب بیش‌تری برای رسیدن به یک عملکرد قابل قبول لازم است. بنابراین، برخلاف شرایط دیم، وجود خلأ زیاد عملکرد در شرایط آبی لزوماً به این معنی نیست که پتانسیل زیادی برای افزایش تولید وجود دارد، زیرا خلأ عملکرد ممکن است ناشی از این باشد که محصولات آبی نیاز آبیاری خود را به طور کامل دریافت نمی‌کنند. بستن خلأ عملکرد برای این موارد نیاز به آب آبیاری بیش‌تری را نشان می‌دهد که ممکن است در دسترس نباشد (۵۵).

تشعشع بالا باعث افزایش عملکرد پتانسیل می‌شود. در عین حال، مصرف آب بیش‌تر در مناطق دارای مقدار تابش تجمعی بالا باعث کاهش بهره‌وری آب در این مناطق می‌شود (۲۴). در ایران ایستگاه‌های

بیش تر بهینه نیست. همچنین، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که علاوه بر بهبود مدیریت زراعی، انتخاب اقلیم‌های مناسب کشت لوبیا برای رسیدن به بالاترین مقادیر عملکرد پتانسیل، راهکاری مناسب و کم هزینه برای افزایش تولید ملی بدون افزایش سطح زیر کشت و حفظ منابع آب است. بنابراین، پهنه‌بندی اقلیمی برای شناسایی دقیق مناطق مناسب کشت لوبیا در ایران می‌تواند در برنامه مطالعات آینده گنجانده شود.

(بخش‌های جنوبی کشور واقع در مناطق اقلیمی ۸۰۰۲ و ۸۰۰۳) میانگین بهره‌وری آب ۰/۳۳ کیلوگرم بر متر مکعب و در مناطق معتدل و دارای فصل رشد نسبتاً مرطوب (بخش‌های شمالی کشور واقع در مناطق اقلیمی ۳۰۰۳، ۳۱۰۲ و ۴۲۰۲) میانگین بهره‌وری آب ۱/۰۳ کیلوگرم بر متر مکعب است. به طور کلی، در مناطق گرم و خشک به دلیل تبخیر و تعرق بالا بهره‌وری آب کم است و کشت لوبیا به دلیل حساسیت این گیاه به خشکی و در نتیجه نیاز به مصرف آب

References

1. McClean, P.E., Burrige, J., Beebe, S., Rao, I.M. & Porch, T.G. (2011). Crop improvement in the era of climate change: an integrated, multi-disciplinary approach for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Functional Plant Biology*, 38(12), 927-933.
2. Porch, T.G., Beaver, J.S., Debouck, D.G., Jackson, S.A., Kelly, J.D. & Dempewolf, V. (2013). Use of Wild Relatives and Closely Related Species to Adapt Common Bean to Climate Change. *Agronomy*, 3, 433-461.
3. Singh, S.P. (1999). Developments in plant breeding: Common bean improvement in the twenty-first century. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 409 p.
4. Ministry of Agriculture Jihad. (2016). Agricultural Statistics. [WWW Document], n.d. URL <https://www.maj.ir>. [In Persian]
5. Soltani, A., Alimaghani, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Vadez, V., van Loon, M.P. & Van Ittersum, M.K. (2020b). Future food self-sufficiency in Iran: A model-based analysis. *Global Food Security*, 24, 100351.
6. Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, L., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M. & Toulmin, C. (2010). Food Security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812-818.
7. Fischer, T., Byerlee, D. & Edmeades, G.O. (2014). Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph. Australian Centre for international agricultural research, Cranberra.
8. Grassini, P., Eskridge, K.M. & Cassman, K.G. (2013). Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications*, 2918, 1-11.
9. Keating, B.A., Herrero, M., Carberry, P.S., Gardner, J. & Cole, M.B. (2014). Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, 3, 125-132.
10. 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.
11. Lobell, D.B., Cassman, K.G. & Field, C.B. (2009). Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204.
12. Van Ittersum, M.K. & Cassman, K.G. (2013). Yield gap analysis—Rationale, methods and applications—Introduction to the Special Issue. *Field Crops Research*, 143, 1-3.
13. Soltani, A., Nehbandani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E., Ghassemi, S., Alasti, O., Dadras, A., Hosseini, R.S., Alimaghani, S.M., Zahed, M., Fayazi, H., Kamari, H., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Mohammadi, S. & Keramat, S. (2019). Preparation of yield gap atlas and production capacity of important crops in the country in current and future climatic conditions. Sirang Vocabulary Publications. 268 p. [In Persian]

14. Hajjarpour, A., Soltani, A., Zeinali, E., Kashiri, H. & Ayneband, A. (2017). Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) yield gap in Golestan province of Iran using comparative performance analysis (CPA) method. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 19(2), 86 -101. [In Persian]
15. Nehbandani, A., Soltani, A., Zeinali, E. & Hoseini, F. (2017a). Analyzing soybean yield constraints in Gorgan and Aliabad katul using CPA method. *Journal of Agroecology*, 7(1), 109-123. [In Persian]
16. Nekahi, M.Z., Soltani, A., Siahmarguee, A. & Bagherani, N. (2014). Yield gap associated with crop management in wheat (Case study: Golestan province-Bandar-gaz). *Journal of Crop Production*, 7(2), 135-156. [In Persian]
17. Hajjarpour, A., Soltani, A. & Torabi, B. (2015). Using boundary line analysis in yield gap studies: Case study of wheat in Gorgan. *Journal of Crop Production*, 8(4), 183-201. [In Persian]
18. Nehbandani, A., Soltani, A., Zeinali, E., Hoseini, F., Shahoseini, A. & Mehmandoy, M. (2017b). Soybean (*Glycine max* L. Merr.) Yield Gap Analysis using Boundary Line Method in Gorgan and Aliabad Katul. *Journal of Agroecology*, 9(3), 760-776. [In Persian]
19. Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E. & Kazemi Korgehei, M. (2013). Ranking factors causing the wheat yield gap in Gorgan. *Journal of Crop Production*, 6(1), 171-189. [In Persian]
20. Soltani, A., Hajjarpour, A. & Vadez, V. (2016). Analysis of chickpea yield gap and water-limited potential yield in Iran. *Field Crops Research*, 185, 21-30.
21. Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S. & Zeinali, E. (2011). Assessment of yield gap due to nitrogen management in wheat. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 879-84.
22. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A. & Zeinali, E. (2021). Determination of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Yield Gap in Golestan Province. *Journal of Agroecology*, 12(4), 613-633.
23. Van Loon, M.P., Deng, N., Grassini, P., Edreira, J.I.R., Wolde-Meskel, E., Bajjukya, F., Marrou, H. & Van Ittersum, M.K. (2018). Prospect for increasing grain legume crop production in East Africa. *European Journal of Agronomy*, 101, 140-148.
24. Nehbandani, A., Soltani, A., Rahemi-Karizaki, A., Dadrasi, A. & Nourbakhsh, F. (2021). Determination of soybean yield gap and potential production in Iran using modeling approach and GIS. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 395-407.
25. Arabameri, R., Soltani, A., Zeinali, E. & Torabi, B. (2021). The amount and How to distribute of chickpea and lentil yield gap in Iran. *Journal of Crops Improvement*, 23(2), 221-234. [In Persian]
26. Alasti, O., Zeinali, E., Soltani, A. & Torabi, B. (2020). estimation of yield gap and the potential of rainfed barley production increase in Iran. *Journal of Crop Production*, 13(3), 41-60. [In Persian]
27. Alizadeh Dehkordi, P., Nehbandani, A., Hassanpour-bourkheili, S. & Kamkar, B. (2020). Yield gap analysis using remote sensing and modelling approaches: Wheat in the northwest of Iran. *International Journal of Plant Production*, 14(3), 443-452. [In Persian]
28. Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S.J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R. & Yang, H. (2014). Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *hydrological processes*, 28(4), 2018-2032.
29. Wesseling, J.G. & Feddes, R.A. (2006). Assessing crop water productivity from field to regional scale. *Agricultural Water Management*, 86(1-2), 30-39.
30. 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.
31. Grassini, P., van Bussel, L.G.J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yanga, H., Boogaarde, H., de Groot, H., van Ittersum, M.K. & Cassman, K.G. (2015b). How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177, 49-63.
32. Van Bussel, L.G.J., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., Groot, H.D., Saito, K., Cassman, K.G. & Van Ittersum, M.K. (2015). From field to atlas: upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98-108.
33. HarvestChoice, (2014). "Crop Production: SPAM". International Food Policy Research Institute, Washington, DC., and University of Minnesota, St. Paul, M.N. Available online at <http://harvestChoice.org/node/9716>.

34. Alimagham, S., Soltani, A., Dadrasi, A. & Nehbandani, A. (2021). Spatial distribution maps of horticultural and agricultural crops lands generating at the country scale for Iran. *Journal of Agroecology*, 15(1), 75-88. <https://doi.org/10.22067/agry.2021.69619.1033>. [In Persian]
35. 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. & Cassman, K.G. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crop Research*, 143, 44–55.
36. Koo, J. & Dimes, J. (2013). HC27 generic soil profile database. <http://hdl.handle.net/1902.1/20299>, Harvard Data verse, V4.
37. Nehbandani, A., Soltani, A., Naghab, R.T., Dadrasi, A. & Alimagham, S.M. (2020). Assessing HC27 soil database for modeling plant production. *International Journal of Plant Production*, 14(4), 679-687.
38. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadeze, V., van Ittersum, M.K. & Sinclair, T.R. (2020a). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855.
39. Passioura, J. (2006). Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agricultural water management*, 80(1-3), 176-196.
40. Espe, M.B., Cassman, K.G., Yang, H., Guilpart, N., Grassini, P., Van Wart, J., Anders, M., Beighley, D., Harrell, D., Linscombe, S., McKenzie, K., Mutters, R. & Wilson, L.T. (2016). Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. *Field Crops Research*, 196, 276–283.
41. Grassini, P., Torrion, J.A., Yang, H.S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K.G. & Specht, J.E. (2015a). Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *Field Crops Research*, 179, 150–163.
42. Kooshki, M.H., Rahmati, M., Nasrolahi, M., Mohseni-Amin, A., Kalhor, M., Astaraki, H., Shahverdi, M. & Dehghani, A. (2018). Cultivation and production of beans in Lorestan province. Ministry of Agriculture Jihad. Seed and Plant Improvement Institute. *Lorestan Agriculture and Natural Resources*, 54046, 75 p. [In Persian]
43. Atlin, G.N., Cairns, J.E. & Das, B. (2017). Rapid breeding and varietal replacement are critical to adaptation of cropping systems in the developing world to climate change. *Global food security*, 12, 31-37.
44. Beebe, S.E., Rao, I.M., Blair, M.W. & Acosta-Gallegos, J.A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, 4(35), 1-20.
45. Assefa, B.T., Chamberlin, J., Reidsma, P., Silva, J.V. & van Ittersum, M.K. (2020). Unravelling the variability and causes of smallholder maize yield gaps in Ethiopia. *Food Security*, 12(1), 83-103.
46. Katungi, E., Horna, D., Gebeyehu, S. & Sperling, L. (2011). Market access, intensification and productivity of common bean in Ethiopia: A microeconomic analysis. *African Journal of Agricultural Research*, 6(2), 476-487.
47. Alimadadi, A., Jahansooz, M. R., Ahmadi, A., Tavakol Afshari, R. & Rostamza, M. (2006). Cowpea, common bean and mung bean radiation use efficiency, light extinction coefficient and radiation interception in double cropping. *Pajouhesh- Va- Sazandegi*, 71, 67-75. [In Persian]
48. Soltani, A. & Sinclair, T.R. (2012). *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CAB. 322p.
49. Beebe, S.E., Ramirez, J., Jarvis, A., Rao, I.M., Mosquera, G., Bueno, J.M. & Blair, M.W. (2011). Genetic improvement of common beans and the challenges of climate change. *Crop adaptation to climate change*, 356-369.
50. Porch, T.G., Bernsten, R., Rosas, J.C. & Jahn, M. (2007). Climate change and the potential economic benefits of heat-tolerant bean varieties for farmers in Atlántida, Honduras. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 91, 133–148.

51. Zhang, H., Tao, F. & Zhou, G. (2019). Potential yields, yield gaps, and optimal agronomic management practices for rice production systems in different regions of China. *Agricultural Systems*, 171, 100–112.
52. Singh, R.J. & Jauhar, P.P. (2006). Genetic Resources, Chromosome Engineering and Crop Improvement: Cereals. Volume 2. CRC press.
53. Hajjarpour, A., Kholová, J., Pasupuleti, J., Soltani, A., Burridge, J., Degala, S.B., Gattu, S., Murali, T.V., Garin, V., Radhakrishnan, T. & Vadez, V. (2021). Environmental characterization and yield gap analysis to tackle genotype-by-environment-by-management interactions and map region-specific agronomic and breeding targets in groundnut. *Field Crops Research*, 267, 108160 p.
54. Wang, J., Zhang, J., Bai, Y., Zhang, S., Yang, S. & Yao, F. (2020). Integrating remote sensing-based process model with environmental zonation scheme to estimate rice yield gap in Northeast China. *Field Crops Research*, 246, 107682.
55. Soltani, A., Alimaghani, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vadez, V., Sinclair, T.R. & Van Ittersum, M.K. (2020c). Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems*, 183, 102859.

