Journal of Saffron Research (semi-annual)

Vol.11, No.1, Spring & Summer, 2023

p. 1-18

http://dx.doi.org/10.22077/JSR.2022.3678.1166

University of Birjand

Original Article

Optimization of Manure and Potassium Fertilizers in Saffron Cultivation by Using Surface-Response Methodology

Soroor Khorramdel[1*], Mahdi Nassiri Mahallati[2], Fatemeh Moallem Banhangi[3], Mohammad Javad Ibrahimi[4]

1- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3-PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

4- Undergraduate Student in Agronomy and Plant Breeding, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*Corresponding author: *khorramdel@um.ac.ir*

Received 07 August 2021; Accepted 26 April 2022

Extended Abstract

Introduction: More specifically, the excessive use of inorganic fertilizers has reduced yield and nutrients efficiency of use and intensified nutrient losses in agroecosystems. Optimization is a modelling techniques approach to improve nutrient efficiency of use and mitigate environmental losses. Response surface methodology (RSM) is a statistical technique which is widely used in engineering and scientific disciplines to optimize processes and improve product quality. George Box and his colleagues developed response surface methodology (RSM) during the 1950s. The combination of experimental design, modeling techniques, and optimization methods in response surface methodology (RSM) provides a robust approach that leverages experimental data to achieve process improvements. The experimental design phase of RSM involves planning and conducting experiments to generate data that can be used to build a mathematical model of the relationship between the process parameters and the response variable(s) of interest. In this study, the optimization of cow manure and sulfate potassium fertilizers as two effective fertilizers in saffron production on yield, yield components of flower and corms of saffron was evaluated by using RSM.

Material and Methods: An experiment was conducted with 13 treatments and two replications at the Agricultural Research Field, Ferdowsi University of Mashhad, during two growing seasons of 2017-2018 and 2018-2019. The treatments were allocated based on low and high levels of cow manure (0 and 100 t. ha^{-1}, respectively) and sulfate potassium (0 and 400 kg per ha, respectively). Flower yield indicators (such as fresh weight of flower, flower numbers and dried weight of stigma per unit) and daughter corm criteria (including daughter corm numbers per unit, dried weight of daughter corms per unit and daughter corm diameter) in the second year of experiment were computed as dependent variables and changes of these variables were evaluated by a regression model.

The adequacy of the model was judged using analysis of variance, lack-of-fit test, determination coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE). Finally, the optimum levels of cow manure and potassium sulfate were calculated based on economic scenario for dependent variables such as stigma yield, daughter corm yield and daughter corm diameter and desirability index (D).

Results and Discussion: The experimental results revealed that the effect of linear component was significant on flower numbers, fresh weight of flower and daughter corm diameter. Effect of square component was significant on flower numbers and fresh weight of flowers. Interaction effect of full quadratic component was significant on dried weight of daughter corms. Lack-of-fit test had no significant effect on the studied traits that represent the full square model was satisfactorily explained. The maximum observed values for fresh weight of flower and flower numbers were recorded for 100 t cow manure per ha+ without any potassium sulfate consumption with 15.15 g. m^{-2} and 33 flowers. m^{-2}, respectively. The highest dried weight of daughter corms was observed in 100 t cow manure per ha+ 400 kg potassium sulfate per ha with 314.28 g. m^{-2}. The estimated optimization rates for manure and potassium sulfate were 80.50 t. ha^{-1} and 371.71 kg. ha^{-1} (with D= 0.98), respectively.

Conclusion: RSM is defined as a collection of statistical techniques that are used to optimize production inputs. RSM involves the design and analysis of experiments, modeling techniques, and optimization methods to find the optimal combination of process parameters that will yield the highest quality product or process output. The optimization phase involves using the mathematical model to identify the optimal process parameters that will yield the desired response variable(s). One of the key advantages of RSM is that it enables engineers and scientists to optimize complex processes with multiple input variables. RSM can also help reduce the number of experiments required to optimize a process, which can save time and resources. Additionally, RSM can help identify the interactions between different process parameters, which is useful for gaining a deeper understanding of the underlying process and for making further process improvements. Results demonstrate that for each response, different parameters and interactions were important. Therefore, to optimize parameters (such as cow manure and sulfate potassium), corm yield and stigma yield should be considered simultaneously. In general, it seems that optimization of resource use based on response-surface methodology may be suitable cropping approach for sustainable production, yield improvement and mitigation of environmental pollution in saffron cultivation.

Conflict of Interest : Authors declared no conflict of interest.

Keywords: Lack-of-fit test, Economic scenario, Desirability index, Root mean square error.

نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)
جلد یازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲
شماره صفحه: ۱۸-۱
http://dx.doi.org/10.22077/JSR.2022.3678.1166

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی سطوح کود دامی و پتاسیم در زراعت زعفران با استفاده از روش سطح-پاسخ

سرور خرم دل[1*]، مهدی نصیری محلاتی[2]، فاطمه معلم بنهنگی[3] و محمد جواد ابراهیمی[4]

۱- دانشیار، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۴- دانشجوی کارشناسی زراعت، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*نویسنده مسئول: *Email: khorramdel@um.ac.ir*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

چکیده

هدف این پژوهش بهینه‌سازی کاربرد کودهای دامی و سولفات پتاسیم بر عملکرد گل و بنه زعفران با استفاده از روش سطح-پاسخ بود. این آزمایش با ۱۳ تیمار (سطوح بالا و پایین کود دامی (به ترتیب ۱۰۰ و صفر تن در هکتار) و سولفات پتاسیم (به ترتیب ۴۰۰ و صفر کیلوگرم در هکتار)) و دو تکرار در دو سال زراعی در مزرعه دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. شاخص‌های عملکرد گل و بنه در سال دوم بعنوان متغیر وابسته اندازه‌گیری و تغییرات آنها با مدل‌های رگرسیونی ارزیابی شد. به منظور ارزیابی کیفیت مدل‌ها از آنالیز واریانس، عدم برازش، ضریب تبیین و میانگین جذر مربعات خطا استفاده شد. مقادیر بهینه کودها برای متغیرهای وابسته در سناریوی اقتصادی بر اساس شاخص مطلوبیت (D) تعیین شد. نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر تعداد و وزن تر گل و قطر بنه‌های دختری، اثر جزء درجه دو کامل بر تعداد و وزن تر گل و اثر متقابل تنها بر وزن خشک بنه‌های دختری معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌یک از شاخص‌های عملکرد گل و بنه‌های دختری زعفران معنی‌دار نبود که نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل می‌باشد. بیشترین وزن تر و تعداد گل در تیمار ۱۰۰ تن کود دامی در هکتار+ عدم مصرف کود سولفات پتاسیم و بیشترین وزن خشک بنه‌های دختری در تیمار ۱۰۰ تن کود دامی در هکتار+ ۴۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار به‌دست آمد. میزان بهینه مصرف کودهای دامی و سولفات پتاسیم براساس سناریوی اقتصادی ۸۰/۵۰ تن کود دامی در هکتار و ۳۷۱/۷۱ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار (D=۰/۹۸) محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: آزمون عدم برازش، سناریوی اقتصادی، شاخص مطلوبیت، میانگین جذر مربعات خطا.

مقدمه

در سال‌های اخیر کاربرد مدل‌های ریاضی جهت بهبود عملکرد و کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد توجه محققان قرار گرفته است. هدف از بهینه‌سازی فراهم آوردن اطلاعات آماری مرتبط با مدل‌سازی فرایندها است که در آن از آنالیز رگرسیون چند متغیره یا در اصطلاح روش سطح-پاسخ (RSM)[1] استفاده می‌شود (Mansouri et al., 2015). روش سطح- پاسخ که با کمترین تعداد تیمار، مقدار بهینه چندین متغیر را بصورت هم‌زمان تعیین می‌کند، شامل گروهی از تکنیک‌های ریاضی و آماری بوده و برای به دست آوردن روابط کمی بین متغیرهای وابسته و تعدادی متغیر مستقل استفاده می‌شود (Kwak, 2005; Arsalan, 2007). هدف اصلی بهینه‌سازی تعیین مقدار مطلوب متغیرهای مستقل می‌باشد که منتهی به حصول بهترین عملکرد می‌شود. بدون این‌که زمان یا تعداد آزمایش بیش از اندازه گسترش داده شود (Khorramdel et al., 2019). برای این منظور، جهت تعیین مقادیر بهینه مدل، بایستی برازش مناسبی انجام شود (Nassiri Mahallati et al., 2015). تعیین مقدار بهینه منابع در اکوسیستم‌های کشاورزی، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید و حفظ منابع، باعث کاهش بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه این منابع می‌شود (Khorramdel et al., 2020).

زعفران با نام علمی *Crocus sativus* L. گیاهی تک‌لپه از خانواده زنبقیان است که از نظر گیاه‌شناسی چرخه زندگی خود را در یک سال تکمیل می‌کند، اما از نظر زراعی به عنوان یک محصول چند ساله زراعت و مدیریت می‌شود (Gresta et al., 2016). این گیاه به عنوان گران‌ترین محصول دارویی جهان (Koocheki, 2013) جایگاه ویژه‌ای در بین محصولات صنعتی و صادراتی ایران دارد.

بر طبق آخرین آمارنامه جهاد کشاورزی (Ministry of Agriculture-Jihad, 2020)، سطح زیرکشت و میزان تولید زعفران در سال ۱۳۹۹ به ترتیب ۱۲۰۲۲۳/۵ هکتار و ۴۳۹/۱۷۵ تن گزارش شده است. مطالعه تغییرات سطح زیر کشت و عملکرد زعفران در طی دوره‌های گذشته نشان داده است علی‌رغم آنکه سطح زیر کشت و تولید این محصول در ایران از روند صعودی برخوردار است، ولی عملکرد در واحد سطح آن از روند نزولی تبعیت می‌کند، به نحوی که میانگین تولید از ۵/۷۶ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۳۵۲ به ۳/۶۵ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۳۹۹ کاهش یافته است (Koocheki, 2018; Ministry of Agriculture-Jihad, 2020).

با وجود این‌که ایران در بین کشورهای تولیدکننده زعفران مقام نخست را از نظر سطح زیر کشت و میزان تولید دارد، اما میانگین عملکرد آن در مقایسه با متوسط جهانی اندک می‌باشد. به‌نظر می‌رسد که تفاوت معنی‌دار عملکرد تولیدی در ایران با سایر کشورهای عمده تولیدکننده، به دلیل نامناسب بودن مدیریت زراعی چون تغذیه و نیز تفاوت در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد (Shahriary et al., 2018). به همین دلیل یکی از مهمترین عوامل موثر بر عملکرد گل و بنه زعفران، مدیریت صحیح تغذیه گیاهی می‌باشد (Khorramdel et al., 2015; Zabihi & Pishbin, 2018). با توجه به کمبود ماده آلی خاک به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، نظیر مزارع زعفران در استان خراسان، کاربرد کودهای آلی همچون کودهای دامی در بوم‌نظام‌های تولید این گیاه از اهمیت بالایی برخوردار است (Khorramdel et al., 2019).

خرم دل و همکاران (Khorramdel et al., 2020) با بررسی بهینه‌سازی سطوح کود دامی و محلول‌پاشی برگی با دلفارد بر عملکرد گل و بنه و خصوصیات کیفی زعفران گزارش نمودند که بیشترین مقدار مشاهده شده تعداد بنه‌های دختری برای تیمار ۵۰ تن در هکتار کود دامی+ بدون محلول‌پاشی (۴۱/۳۸ بنه در متر مربع) و بالاترین مقدار مشاهده شده وزن خشک کلاله برای مصرف ۱۰۰ تن در هکتار کود دامی بدون محلول‌پاشی (۱۵۶/۳۳ میلی‌گرم بر متر مربع) بدست آمد. بیشترین مقدار مشاهده شده خصوصیات کیفی زعفران شامل محتوی پیکروکروسین، کروسین و سافرانال مربوط به تیمار ۱۰۰ تن در هکتار کود دامی+ ۱۰ پی‌پی‌ام محلول‌پاشی با دلفارد (به ترتیب با ۸۹/۹۱ E1%257، ۱۸۰/۹۸ E1%440 و ۴۰/۱۵ E1%330) بود.

از آنجا که کشت زعفران عمدتاً در مناطق خشک و نیمه-خشک انجام می‌شود (Azizi-Zohan et al., 2009) و نیز با توجه به اینکه فراهمی ماده آلی و عناصر غذایی از

[1] Response-surface methodology

جمله مهمترین عوامل موثر در کنترل تغییرات عملکرد این گیاه می‌باشند (Behdani et al., 2006; Nehvi et al., 2010)، کاربرد نهاده‌های آلی با تاثیر مستقیم بر میزان ماده آلی خاک، منجر به افزایش عملکرد و پایداری تولید زعفران می‌شود (Rezvani Moghaddam et al., 2013b). کودهای دامی با دارا بودن میزان بالایی از عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف می‌توانند به عنوان منبعی غنی از عناصر غذایی، آن‌ها را آهسته و به صورت تدریجی در اختیار گیاه قرار داده و ساختمان و خصوصیات خاک را بهبود بخشد (Esmaeilian & Amiri, 2019). کاربرد کودهای دامی به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، افزایش تجمع، معدنی شدن و دسترسی عناصر غذایی به ویژه نیتروژن، کاهش اسیدیته و مزایای اقتصادی آن برای بسیاری از گیاهان به‌ویژه در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که از حاصلخیزی پایینی برخوردار هستند، نقش مهم و موثری دارد (Khorramdel et al., 2014). رضوانی مقدم و همکاران (Rezvani Moghaddam et al., 2013a) نیز بیان نمودند که مصرف کودهای آلی در سال‌های ابتدایی پس از کاشت بنه زعفران، بجای افزایش اندازه بنه، منجر به افزایش تعداد بنه‌های دختری در خاک می‌شود که این امر می‌تواند پتانسیل تولید این گیاه را در سال‌های بعد افزایش دهد.

تحقیقات نشان می‌دهد که مدیریت صحیح تغذیه بر استفاده توأم از کودهای آلی و شیمیایی استوار است (Zabihi & Pishbin, 2018). پتاسیم، یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی موثر در رشد گیاهان بعد از نیتروژن محسوب می شود (Zabihi & Feizi, 2014) که علاوه بر وظایف فیزیولوژیکی بسیار مهمی که در گیاه به عهده دارد، در افزایش مقاومت به خشکی (Hasanuzzaman et al., 2018) و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی جایگاه ویژه‌ای دارد؛ به طوری‌که پتاسیم به «عنصر کیفیت»[1] نیز معروف است (Hasanuzzaman et al., 2018). پتاسیم عمده‌ترین کاتیون سیتوپلاسم بوده و ترکیب K^+ با آنیون‌ها، پتانسیل اسمزی بافت‌ها و سلول‌ها را تنظیم می‌نماید (Vorobiev, 1967). پتاسیم نقش فعالی در افزایش تحمل به سرما، بیماری‌ها، شوری و خشکی نیز دارد (Hasanuzzaman et al., 2018).

از دیگر وظایف اصلی پتاسیم، نقش حمایتی آن در جلوگیری از تخریب سلول در برابر گونه های فعال اکسیژن (ROS)[2] ست؛ به طوری‌که پتاسیم به وسیله افزایش فعالیت آنزیم‌های اکسید کننده، این گونه‌های فعال را خنثی می‌کند (Karimian et al., 2014). همچنین پتاسیم در فعالیت آنزیم‌ها، جذب و انتقال آهن، فتوسنتز، کاهش تنفس، بارگیری و انتقال مواد در آوند آبکش، باز و بسته شدن روزنه‌ها و افزایش رشد ریشه نقش اساسی دارد (Barker & Pilbeam, 2007). پتاسیم در افزایش کارایی فتوسنتزی و بهبود مقاومت گیاه در برابر بیماری‌ها (Rabani Foroutagheh et al., 2013) و بالا بردن کیفیت محصول نیز نقش قابل توجهی دارد (Zabihi & Feizi, 2014). طباطبائیان و همکاران (Tabatabaeian et al., 2020) با بررسی تاثیر محلول‌پاشی با نیترات پتاسیم و روی بر صفات کمی و کیفی زعفران بیان داشتند که محلول پاشی با غلظت ۱۰ در هزار کود پتاسیم بیشترین اثر را در بهبود صفات کیفی داشت. اکبریان و همکاران (Akbarian et al., 2012) نیز در پژوهشی بیان کردند که محلول‌پاشی با پتاسیم، طول برگ و عملکرد گل زعفران را به طور معنی‌داری افزایش داد. امیرنیا و همکاران (Amirnia et al., 2014) نیز گزارش نمودند که کاربرد کودهای شیمیایی آهن، فسفر و پتاسیم اثر مثبتی بر روی تعداد گل، وزن خشک و تر کلاله و وزن تر و خشک گل دارند. اگرچه به نظر می‌رسد به دلیل بارش‌های کم و از طرفی آبشویی زیاد، میزان پتاسیم خاک در زمین‌های کشاورزی بالا باشد، ولی شنی بودن بافت خاک، محتوی پایین ماده آلی، عدم مصرف کودهای پتاسیم و کاشت متوالی و بدون آیش محصولات مختلف، باعث تخلیه خاک از این عنصر شده است (Torabian et al., 2021).

با عنایت به مطالب فوق، به نظر می‌رسد تعیین بهترین ترکیب و سطح مصرف کود دامی و سولفات پتاسیم می‌تواند ضمن بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و جلوگیری از هدررفت منابع کودی، در افزایش عملکرد گل و بنه زعفران تاثیر مطلوب داشته باشد. بر این اساس، هدف از اجرای این تحقیق، بهینه‌سازی اثر سطوح کود دامی و کود سولفات پتاسیم بر عملکرد گل

[1] Quality nutrient

[2] Reactive oxygen species

و بنه‌های دختری زعفران با استفاده از مدل سطح-پاسخ در شرایط آب و هوایی مشهد بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا در قالب طرح مرکب مرکزی در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح پایین و بالای کود دامی از نوع گاوی پوسیده (به ترتیب صفر و ۱۰۰ تن در هکتار) و سطوح پایین و بالای سولفات پتاسیم (به ترتیب صفر و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار) تعیین شد. تعداد تیمارها در طرح مرکب مرکزی با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد (جدول ۳).

$$t= 2^k + 2k +r \qquad \text{معادله (۱)}$$

در این فرمول، k نشان‌دهنده تعداد فاکتور و r تعداد تکرار در سطح میانگین برای نقطه مرکزی می‌باشد که برابر با پنج در نظر گرفته شد. در نهایت، ۱۳ ترکیب تیماری مختلف مشخص و اعمال گردید (جدول ۳).

در شهریور ماه ۱۳۹۶ عملیات آماده‌سازی زمین شامل دیسک و تسطیح، اقدام به کرت‌بندی با ابعاد ۱×۲ متر انجام شد. قبل از شروع آزمایش، از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری خاک مزرعه به صورت تصادفی نمونه‌گیری خاک انجام و برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و میزان عناصر غذایی و توصیه کودی به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از شروع آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

قبل از کاشت نمونه‌ای ۳۰ کیلوگرم از بنه‌های مادری جدا و بر اساس وزن تفکیک شدند. مشخصات وزنی بنه‌های مادری مورد استفاده برای کاشت در جدول ۲ نشان داده شده است. زعفران روی چهار ردیف دو متری با فاصله بین ردیف ۲۵ سانتی‌متر در اواخر شهریور ماه سال اول اجرای آزمایش بر اساس تراکم ۱۰ تن بنه در هکتار کاشته شد. بین هر کرت دو پشته نیم متری به صورت نکاشت و بین بلوک‌ها یک متر به عنوان راهرو جهت جلوگیری از اختلاط اثر تیمارها در نظر گرفته شد. بنه-های زعفران به صورت درهم و به تفکیک وزن‌های مختلف تقسیم‌بندی و عملیات کاشت دستی توسط کارگر انجام شد.

برداشت گل‌های زعفران، از سوم آبان ماه آغاز شد و به مدت یک ماه به طول انجامید. جهت نمونه‌برداری و تعیین عملکرد و اجزای عملکرد گل، به صورت روزانه، گل‌ها برداشت و تعداد گل‌ها در واحد سطح، عملکرد تر گل در واحد سطح و عملکرد خشک کلاله اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (عمق ۲۵-۰ سانتی‌متر).

Table 1. Physical and chemical properties of the soil (0-25 cm depth).

بافت Texture	پتاسیم K (mg.kg^{-1})	فسفر P (mg.kg^{-1})	نیتروژن N (%)	ماده آلی Organic matter (%)	هدایت الکتریکی EC (dS.cm^{-1})	شاخص واکنش pH
لوم رسی شنی Sandy clay loam	0.57	14.09	0.50	0.64	0.57	7.58

جدول ۲. گروه‌بندی بنه‌های مادری بر اساس وزن (در زمان کاشت).

Table 2. Grouping of mother corms based on weight (at the planting time).

گروه‌های وزنی (گرم) Groups weight (g)	12<	10.1-12	8.1-10	6.1-8	4.1-6	<4
درصد گروه‌های وزنی Percent of groups weight	10.60	11.42	12.85	15.18	23.4	26.55

جدول ۳. ضرایب و مقادیر تیمارها بر اساس طرح مرکب مرکزی.

Table 3. Rates and coefficients for treatments based on central composite design.

تیمارهای کودی Fertilizer treatments		ضرایب* Coefficients*	
سولفات پتاسیم Potassium sulfate ($kg.ha^{-1}$)	کود دامی Manure ($t.ha^{-1}$)	X_1	X_2
0	0	-1	-1
0	100	1	-1
400	0	-1	1
400	100	1	1
200	0	-1	0
200	100	1	0
0	50	0	-1
400	50	0	1
200	50	0	0
200	50	0	0
200	50	0	0
200	50	0	0
200	50	0	0

*X_1 و X_2: به ترتیب نشاندهنده متغیرهای مستقل کودهای دامی و سولفات پتاسیم هستند.

*X_1 and X_2: indicate independent variables such as manure and potassium sulfate fertilizers, respectively.

نمونه‌برداری مربوط به بنه‌های دختری، در انتهای فصل رشد رویشی در اریبهشت ماه انجام شد، به طوری‌که بنه‌ها از سطحی به ابعاد ۲۵×۵۰ سانتی‌متر برداشت و صفاتی از جمله وزن کل بنه‌های دختری، قطر بنه‌های دختری و تعداد بنه‌های دختری ثبت شد.

به منظور انتخاب مدل مناسب، مدل درجه دو کامل با اثرات متقابل بین عوامل برازش داده شد (معادله ۲). سپس بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مقادیر F، P و R^2) و آزمون عدم برازش بهترین مدل انتخاب و از آن برای بهینه‌سازی استفاده گردید (Koocheki et al., 2017).

معادله (۲)
$$Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$$

که در آن، Y متغیر وابسته (شاخص‌های عملکرد گل، کلاله و بنه‌های دختری)، x_1 متغیر مستقل کود دامی، x_2 متغیر مستقل کود سولفات پتاسیم و a_1 تا a_5 ضرایب معادله می‌باشند. در نهایت، نتایج داده‌های پیش‌بینی شده با مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[1] بررسی شد (معادله ۳).

RMSE به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود. براساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل برای RMSE کمتر از ۱۰ درصد، عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد، ضعیف برآورد می‌شود (Latifi et al., 2018).

مقادیر بهینه کاربرد کودهای دامی و سولفات پتاسیم برای متغیرهای وابسته شامل وزن خشک کلاله، وزن خشک بنه‌های دختری و قطر بنه در سناریوی اقتصادی بررسی و محاسبه شد. به منظور برآورد دقت بهینه‌سازی مقدار متغیرهای وابسته، شاخص مطلوبیت (D)[2] محاسبه شد. هر چه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالاتر در شبیه‌سازی می‌باشد (Kalavathy et al., 2009).

جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Minitab ver. 17 و Excel استفاده شد.

لازم به ذکر است، از آنجا که عملکرد گل در سال اول کاشت گیاه زعفران در ارتباط مستقیم با میزان اندوخته عناصر غذایی در بنه‌های مادری می‌باشد (Nassiri Mahallati et al., 2007) و از طرف دیگر، تأمین عناصر در خاک تحت تاثیر مدیریت تغذیه نمی‌تواند اهمیت زیادی در تولید این گیاه داشته باشد (Rezvani Moghaddam et al., 2014)، لذا به علت اطمینان از اثر این تیمارهای تغذیه‌ای بر رشد و عملکرد این گیاه

[1] Root mean square error

[2] Desirability

فقط نتایج مربوط به سال دوم گلدهی و رشد رویشی مبنا قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج این مطالعه روی بهینه‌سازی اثر سطوح کود دامی و سولفات پتاسیم بر شاخص‌های عملکرد گل و بنه زعفران نشان داد که اثر جزء خطی بر تعداد و وزن تر گل و قطر بنه‌های دختری، اثر جزء درجه دو کامل بر تعداد و وزن تر گل و اثر متقابل تنها بر وزن خشک بنه‌های دختری معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌یک از شاخص‌های عملکرد گل و بنه‌های دختری زعفران معنی-دار نبود که نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مدل درجه دو کامل برای اثر کودهای دامی و سولفات پتاسیم بر شاخص‌های عملکرد گل و بنه‌های دختری زعفران.

Table 4. Analysis of variance (mean of squares) of full quadratic model for effects of cow manure and potassium sulfate fertilizers on flower and daughter corm yield of saffron.

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	تعداد گل در متر مربع Flower numbers per m^2	وزن تر گل در متر مربع Fresh weight of flower per m^2	وزن خشک کلاله گل در متر مربع Dried weight of stigma per m^2	وزن خشک بنه‌های دختری در متر مربع Dried weight of daughter corms per m^2	تعداد بنه‌های دختری در متر مربع Number of daughter corms per m^2	قطر بنه دختری Daughter corm diameter
مدل: Model:	6	15.057*	3.14*	0.000998ns	959006ns	24518ns	0.43604*
تکرار Blocks	1	11.894ns	0.5671ns	0.000991ns	277435ns	25664ns	0.00299ns
خطی: Linear:	2	21.999*	5.0670*	0.002039ns	1174284ns	30491ns	0.92796**
کود دامی (M) cow manure (M)	1	8.406ns	1.8174ns	0.000403ns	2294845*	20598ns	0.08967ns
سولفات پتاسیم (K) Potassium sulfate (K)	1	35.593*	8.3167**	0.003675ns	53723ns	40383ns	1.76626**
درجه دو Square	2	16.599*	3.9362*	0.000461ns	478168ns	13281ns	0.24484ns
M× M	1	19.641ns	4.5371*	0.000316ns	226790ns	14764ns	0.6212
K × K	1	25.936*	6.2500*	0.000871ns	943127ns	21526ns	0.25971ns
اثر متقابل 2-way interaction	1	1.253ns	0.2665ns	0.0000001ns	2171695*	33900ns	0.26767ns
M× K	1	1.253ns	0.2665ns	0.0000001ns	2171695*	33900ns	0.26767ns
خطا Error	19	4.851	0.9683	0.000950	419200	19425	0.8183ns
عدم برازش Lack-of- fit	11	4.721ns	1.0048ns	0.001193ns	298383ns	14009ns	0.09596
خطای خالص Pure error	8	4.389	0.9181	0.000615	585324	26872	0.06241ns

ns: غیرمعنی‌دار، * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

Ns: non-significant, * and **: are significant at 5 and 1 probability levels, respectively.

جدول ۵. ضرایب رگرسیون، تبیین و RMSE برای مدل درجه دو کامل: $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$ تحت تأثیر کودهای دامی و سولفات پتاسیم بر شاخص‌های عملکرد گل و بنه‌های دختری زعفران.

Table 5. Regression, R^2 coefficients and RMSE for full quadratic model: $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$ for effects of cow manure and potassium sulfate fertilizers on flower and daughter corm yield of saffron.

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2 (%)	RMSE
تعداد گل Flower numbers	29.33	0.0842	-0.0323	-0.000754	0.000054	0.000040	50.93	0.79
وزن تر گل Fresh weight of flower	13.683	0.0404	- 0.01571	-0.000363	0.000027	0.000018	50.59	0.73
وزن خشک کلاله Dried weight of stigma	0.2967	0.000418	-0.000213	-0.000003	0.000000	0.000000	24.92	2.70
وزن خشک بنه‌های دختری Dried weight of daughter corms	1471	6.4	-6.40	-0.081	0.01033	0.0521	41.94	8.61
تعداد بنه‌های دختری Number of daughter corms	402.8	1.59	- 1.240	-0.0207	0.00156	0.00651	28.50	8.04
قطر بنه دختری Daughter corm diameter	1.217	0.00617	0.00500	-0.000042	- 0.000005	- 0.000018	62.72	2.59

X_1 و X_2: به ترتیب نشاندهنده متغیرهای مستقل کودهای دامی و سولفات پتاسیم هستند.

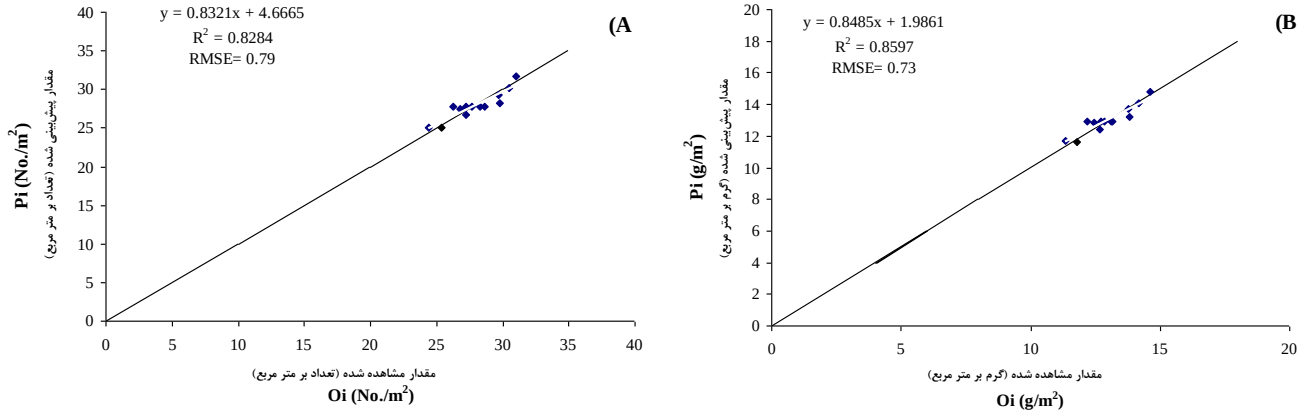
X_1 and X_2: indicate independent variables for cow manure and potassium sulfate fertilizers, respectively.

آنالیز رگرسیون، ضریب تبیین و RMSE برای برازش بین متغیرهای کود دامی و سولفات پتاسیم با شاخص‌های عملکرد گل و بنه زعفران در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج، مدل درجه دو کامل بین ۵۰/۹۳-۲۴/۹۲ درصد تغییرات عملکرد گل و کلاله و ۶۲/۷۲-۲۸/۵۰ درصد تغییرات شاخص‌های عملکرد بنه‌های دختری زعفران را توصیف کرد (جدول ۵).

نمودار رگرسیون خطی مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده و سطح- پاسخ تعداد و وزن تر گل زعفران در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. مقدار پایین RMSE برای تعداد و وزن تر گل (به ترتیب با ۰/۷۹ و ۰/۷۳ درصد) نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل می‌باشد (جدول ۵ و شکل‌های ۱ و ۲).

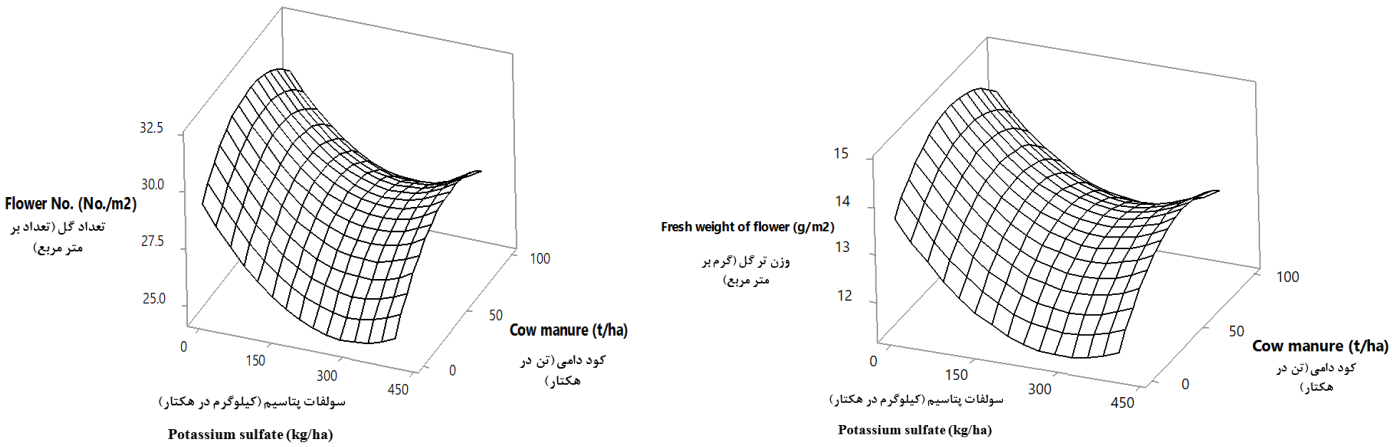
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش مصرف کود دامی تعداد و وزن تر گل افزایش یافت، در حالی‌که با افزایش مصرف کود سولفات پتاسیم روند کاهشی برای این صفات مشاهده شد. بیشترین تعداد و وزن تر گل برای تیمار ۱۰۰ تن در هکتار کود دامی+ عدم مصرف کود سولفات پتاسیم به ترتیب با ۳۳ گل در متر مربع و ۱۵/۱۵ گرم بر متر مربع بدست آمد (شکل ۲).

ذبیحی و پیش‌بین (Zabihi & Pishbin, 2018) با بررسی اثر مدیریت عناصر غذایی و ماده آلی در تغذیه زعفران بیان کردند که استفاده از پتاسیم باعث کاهش عملکرد می‌شود. به طوری‌که در مقادیر بالای مصرف پتاسیم کاهش عملکرد زعفران تا نصف نیز مشاهده می‌شود. همچنین خرم دل و همکاران (Khorramdel et al., 2014) در پژوهشی نتیجه گرفتند که استفاده از کود دامی نقش موثری در افزایش رشد و فعالیت ریزموجودات مفید به ویژه در ناحیه ریزوسفر دارد، لذا مصرف کود دامی را راهکاری مفید و موثر در افزایش عملکرد زعفران معرفی نمودند. در این راستا نتایج مطالعه بهدانی و همکاران (Behdani et al., 2005) نیز نشان داد که افزودن کود دامی بدلیل بهبود طول دوره گلدهی زعفران موجب افزایش تعداد گل شد و در نهایت، افزایش عملکرد را در پی داشت.



شکل ۱. مقایسه خط رگرسیون با خط ۱:۱ و RMSE برای (الف) تعداد و (ب) وزن تر گل زعفران با توجه به مدل درجه دو کامل.

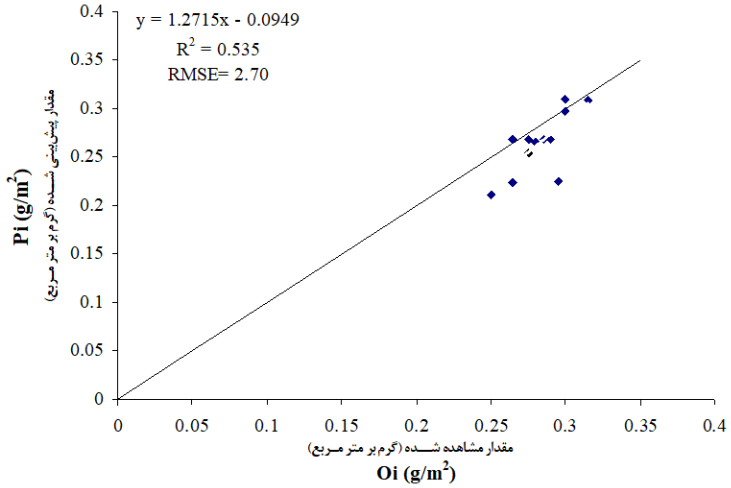
Fig 1. Comparisons for the regression line with 1:1 line and RMSE (%) for (A) flower number and (B) flower fresh weight of saffron based on a full quadratic model.



شکل ۲. مدل سطح- پاسخ برای تعداد و وزن تر گل زعفران در پاسخ به سطوح کودهای دامی و سولفات پتاسیم.

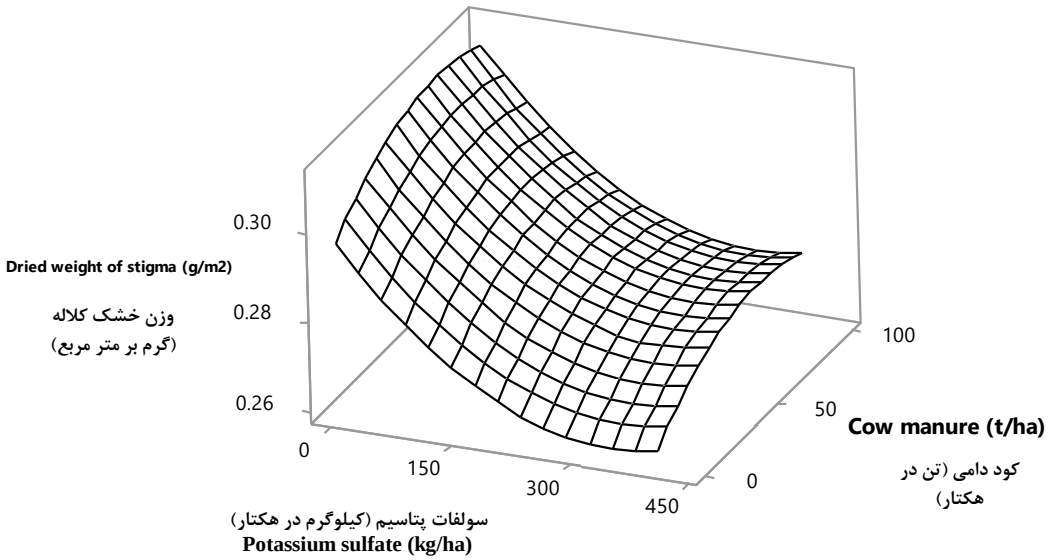
Fig 2. Response-surface model for flower number and flower fresh weight of saffron affected as cow manure and potassium sulfate fertilizers.

مقدار پایین RMSE برای وزن خشک کلاله (با ۲/۷۰ درصد) نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل می‌باشد (جدول ۵ و شکل ۳). مشابه با روند تغییرات وزن تر گل و تعداد گل (شکل‌های ۱ و ۲-الف و ب)، نمودار سطح- پاسخ مربوط به وزن خشک کلاله زعفران نشان داد که افزایش مصرف کود دامی بهبود وزن خشک کلاله را موجب گردید و از طرف دیگر، با مصرف کود سولفات پتاسیم روند کاهشی برای این صفت حاصل گردید. بالاترین وزن خشک کلاله مربوط به تیمار ۱۰۰ تن در هکتار کود دامی+عدم مصرف کود سولفات پتاسیم با ۰/۳۵ گرم بر متر مربع بود (شکل ۴).



شکل ۳. مقایسه خط رگرسیون با خط ۱:۱ و RMSE برای وزن خشک کلاله زعفران با توجه به مدل درجه دو کامل

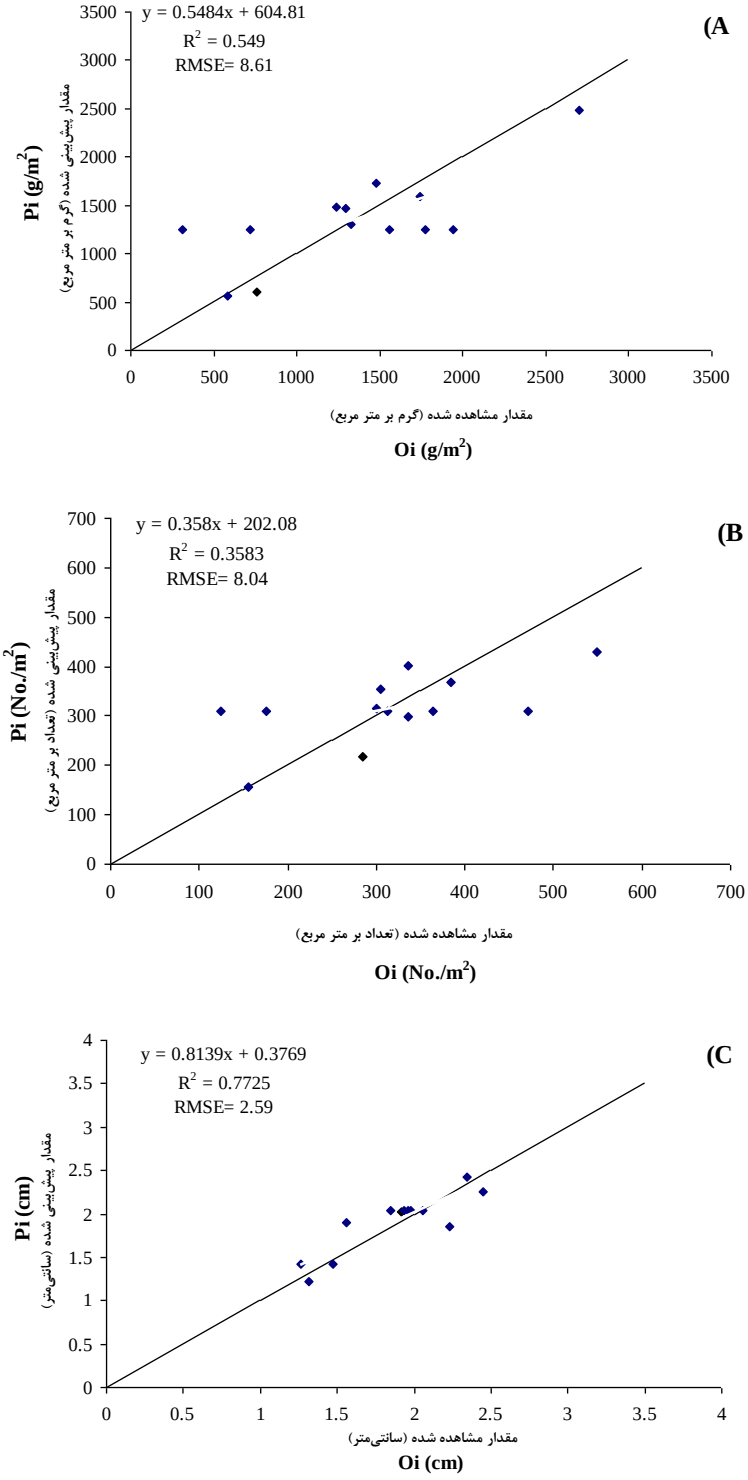
Fig 3. Comparisons for the regression line with 1:1 line and RMSE (%) for stigma dried weight of saffron based on a full quadratic model.



شکل ۴. مدل سطح- پاسخ برای وزن خشک کلاله زعفران در پاسخ به سطوح کودهای دامی و سولفات پتاسیم.

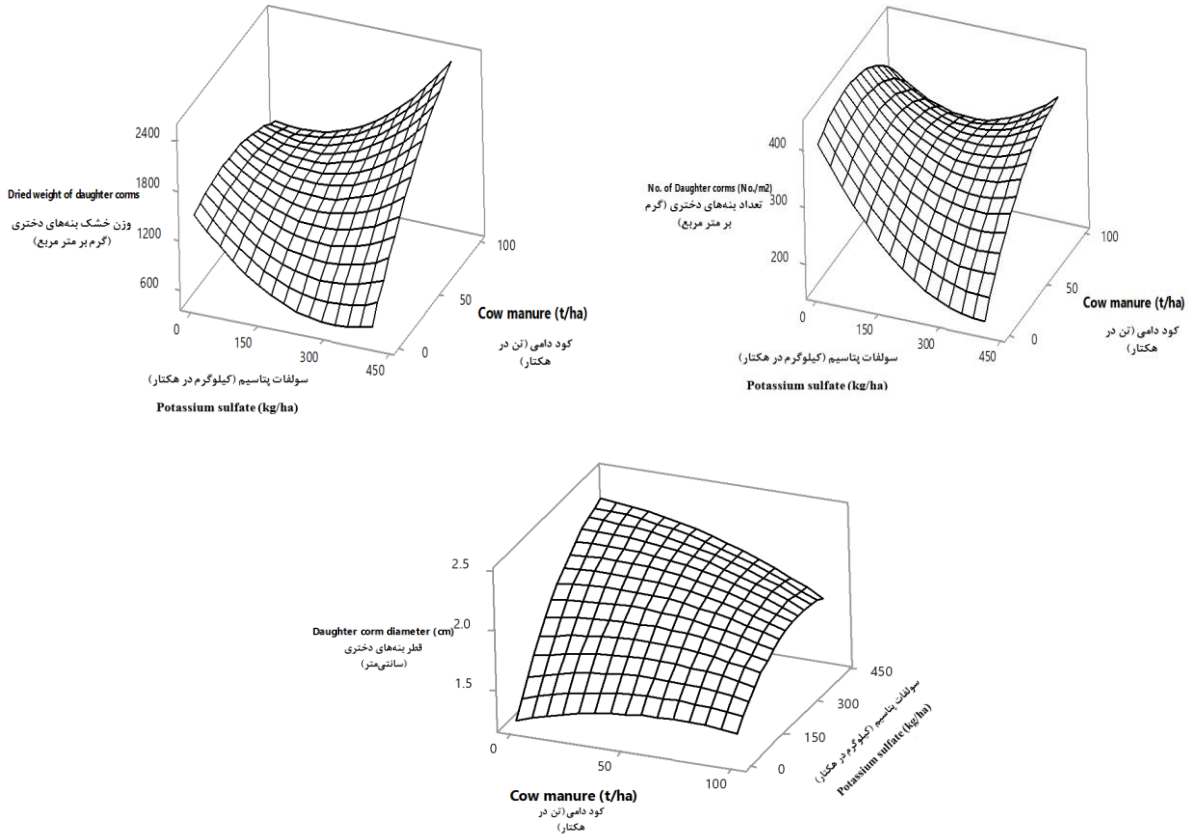
Fig 4. Response- surface model for stigma dried weight of saffron affected as cow manure and potassium sulfate fertilizers.

در پژوهشی کرمانی (Kermani, 2010) بیان داشت که کاربرد ۶۰ تن کود دامی در هکتار موجب افزایش ۵۷ درصدی عملکرد کلاله زعفران نسبت به شاهد شد. امیری (Amiri, 2008) نیز در پژوهشی روی بررسی تاثیر کود حیوانی و شیمیایی بر اجزای عملکرد گل زعفران بیان کرد که بیشترین عملکرد کلاله از ترکیب ۲۰ تن کود دامی در هکتار به همراه مصرف ۴۰ کیلوگرم کود اوره و ۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات تریپل به‌دست آمد.



شکل ۵. مقایسه خط رگرسیون با خط ۱:۱ و RMSE برای (الف) وزن تر، (ب) تعداد و (ج) قطر بنه‌های دختری زعفران با توجه به مدل درجه دو کامل.

Fig 5. Comparisons for the regression line with 1:1 line and RMSE (%) for (A) fresh weight of daughter corms, (B) number of daughter corms and (C) daughter corm diameter of saffron based on a full quadratic model.



شکل ۶. مدل سطح- پاسخ برای تعداد، وزن خشک و قطر بنه‌های دختری زعفران در پاسخ به سطوح کودهای دامی و سولفات پتاسیم.

Fig 6. Response- surface model for number of daughter corms, dried weight of daughter corms and daughter corm diameter of saffron affected as manure and potassium sulfate fertilizers.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مصرف کود دامی افزایش نسبتا خطی برای تعداد و وزن خشک بنه-های دختری را موجب گردید ولی مصرف کود سولفات پتاسیم کاهش تعداد و وزن خشک بنه‌ها را به دنبال داشت. با این وجود، بیشترین وزن خشک و تعداد بنه‌های دختری به ترتیب برای تیمارهای ۱۰۰ تن کود دامی+۴۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم (۳۱۴/۲۸ گرم بر متر مربع) و مصرف ۵۰ تن در هکتار کود دامی بدون مصرف سولفات پتاسیم (۵۹۲/۳۷ بنه در متر مربع) بدست آمد (شکل ۶). تیموری و همکاران (Teimori at al., 2013) در پژوهشی گزارش دادند که بیشترین تعداد بنه‌های دختری در تیمار کود دامی با ۱۸/۴۲ بنه در مترمربع به دست آمد. دارا بودن ماده آلی، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، کمک به افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه و بهبود ساختار شیمیایی و فیزیکی خاک، از جمله دلایلی است که برای افزایش عملکرد گیاهان تحت تاثیر کاربرد کود دامی گزارش شده است (Leip et al., 2019).

براساس نتایج به دست آمده از مطالعه فعلی روی مقایسه تاثیر مصرف کود دامی و سولفات پتاسیم بر شاخص‌های عملکرد گل و کلاله، بنظر می‌رسد که در مقایسه این دو کود، کود دامی تاثیر بالاتری بر بهبود این صفات به همراه دارد (شکل‌های ۲ و ۴) که این امر علاوه بر بهبود خصوصیات شیمیایی و وضعیت عناصر غذایی ضروری و کم‌مصرف در خاک، احتمالاً مربوط به بهبود خصوصیات فیزیکی و بیولوژیکی خاک نیز می‌باشد که می‌تواند ارتقاء کارکردها و خدمات خاک همچون خدمات حمایتی را به دنبال داشته باشد. بهزاد و همکاران (Behzad et al., 1996) در بررسی هشت ساله روی تاثیر کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم و کاربرد کود دامی در تولید زعفران گزارش نمودند که به ویژه در خاک‌های فقیر از

نظر ماده آلی، کاربرد کود دامی مهم‌ترین عامل در افزایش عملکرد و سطح تولید می‌باشد.

براساس نتایج حاصل از این آزمایش، مقدار پایین RMSE برای شاخص‌های عملکرد بنه‌های دختری (شامل تعداد، وزن خشک و قطر بنه‌های دختری به ترتیب با ۸/۰۴، ۸/۶۱ و ۲/۵۹ درصد) نشان‌دهنده پیش-بینی عالی مدل بود (جدول ۵ و شکل ۵).

روند مشاهده شده برای قطر بنه‌های دختری تحت تاثیر مصرف کود دامی و سولفات پتاسیم کمی متفاوت از دو صفت مربوط به وزن خشک و تعداد بنه‌های دختری بود، به طوری‌که نتایج مطالعه فعلی نشان داد که با افزایش مصرف سولفات پتاسیم و کود دامی روند افزایشی برای قطر بنه مشاهده شد. بالاترین قطر بنه‌های دختری برای تیمار ۴۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم بدون مصرف کود دامی با ۲/۵۰ سانتی‌متر بدست آمد (شکل ۶). همچنین با مقایسه شیب تغییرات شاخص‌های عملکرد بنه تحت تاثیر مصرف کود دامی و سولفات پتاسیم، بنظر می‌رسد که کود دامی تاثیر بالاتری بر تعداد و وزن خشک بنه‌های دختری داشت؛ در حالی‌که مصرف کود سولفات پتاسیم موجب بهبود نسبی قطر بنه‌های دختری شد (شکل ۶). به نظر می‌رسد که مصرف عنصر پتاسیم در کشت زعفران بیشتر بر روی خصوصیات رشدی تک‌بنه تاثیر گذاشته و مصرف آن درشت‌تر شدن بنه‌های دختری تولید شده را به دنبال دارد. در این راستا جباری و همکاران (Jabbari et al., 2018) با بررسی تاثیر محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید و نیترات پتاسیم بر رشد بنه‌های دختری بیان داشتند که بیشترین تعداد و قطر بنه دختری در تیمار ۱۰۰۰میلی‌گرم بر لیتر نیترات پتاسیم مشاهده شد. رمضان و همکاران (Ramzan et al., 2010) نیز گزارش کردند که محلول سه درصد نیترات پتاسیل در گلایول موجب افزایش قطر بنه گردید. جباری و همکاران (Jabbari et al., 2017) طی مطالعه‌ای دیگر نیز نیز اثر مثبت غوطه‌وری بنه‌های زعفران در محلول‌های نیترات پتاسیم و سالیسیلیک اسید را بر رشد بنه‌های دختری تأیید نمودند. همچنین همانطور که پیشتر نیز توضیح داده شد، تاثیر مثبت کود دامی بر افزایش شاخص‌های مربوط به گل، کلاله و قطر بنه در این مطالعه در مقایسه با مصرف کود پتاسیم بالاتر بود که این امر نشان‌دهنده ضرورت مصرف کودهای آلی در مزارع زعفران به ویژه با هدف تولید گل می‌باشد.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که لایه فوقانی خاک طی مدت زمان طولانی از فصل رشد خشک می‌باشد، تحرک عناصر متحرک ضروری عمدتاً توسط کمبود آب محدود می‌شود و رشد گیاهان در این مناطق به کمبود این عناصر پرمصرف حساس بوده و این کمبود اثرات منفی بر رشد و عملکرد گیاهان دارد (Wang et al., 2009; Waraich et al., 2011; Li-yun et al., 2014)، لذا پیشنهاد می‌شود که مصرف کودهای آلی- بر مبنای تجزیه خصوصیات شیمیایی خاک- در مناطق خشک و نیمه‌خشک به منظور راهکاری چندجانبه در این شرایط محیطی مدنظر قرار گیرد که این امر علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک و به تبع آن افزایش عملکرد، از طریق ارتقاء وضعیت رطوبتی خاک نیز می‌تواند رشد و عملکرد گیاهان را بهبود بخشد. بنابراین برای بهبود و افزایش پایدار جذب عناصر غذایی در مقیاس مزرعه‌ای باید راهکارهای مدیریتی و زراعی مناسبی در راستای توجه به اصول اکولوژیک اتخاذ شود. بهبود روش‌های مصرف کود، در نظر گرفتن زمان مصرف آن و کاربرد آن همزمان با بیشترین نیاز گیاه، کشت مخلوط، تناوب زراعی و همچنین مدیریت آبیاری برای کاهش آبشویی از جمله راهکارهای مدیریت زراعی برای حصول پایداری در تولیدات اکولوژیک و پایدار محسوب می‌شود (Koocheki et al., 2005). همچنین، با توجه به اهمیت در نظر گرفتن همزمان مسائل زیست-محیطی و اقتصادی در راستای اهداف بلندمدت کشاورزی پایدار، افزایش کارایی مصرف منابع، جایگزینی منابع و طراحی مجدد بوم‌نظام‌ها سه راهکار عمده برای نیل به کشاورزی پایدار می‌باشند (Gliessman, 2001) که توجه به میزان جذب و کارایی مصرف عناصر اولین گام در این امر محسوب می‌شود. بر این اساس با توجه به نتایج ذکر شده در فوق، توصیه می‌شود مصرف مقادیر بهینه کودهای آلی پوسیده به منظور آزادسازی تدریجی عناصر که بهبود جذب و کارایی مصرف عناصر مختلف را به دنبال دارد، در مزارع تولید زعفران مدنظر قرار گیرد.

بهینه‌سازی منابع

بهینه‌سازی میزان مصرف کودهای دامی و سولفات پتاسیم در زراعت زعفران برای حصول پاسخ سه متغیر

وابسته عملکرد کلاله، عملکرد بنه‌های دختری و قطر بنه-های دختری بر اساس سناریوی اقتصادی در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. بهینه‌سازی کود دامی و سولفات پتاسیم برای حصول متغیرهای وابسته در زعفران در سناریوی اقتصادی.

Table 6. Optimized values for cow manure and potassium sulfate fertilizers for reaching the dependent variables in saffron based on an economic scenario.

	متغیر Variable	سناریوی اقتصادی Economic scenario
وابسته Dependent	وزن خشک کلاله (گرم بر متر مربع) Dried weight of stigma ($g.m^{-2}$)	0.275
	وزن خشک بنه‌های دختری (گرم بر متر مربع) Dried weight of daughter corms ($g.m^{-2}$)	2069.60
	قطر بنه دختری (سانتی‌متر) Daughter corm diameter (cm)	2.0
مستقل Independent	کود دامی (تن در هکتار) Cow manure ($t.ha^{-1}$)	80.50
	کود سولفات پتاسیم (کیلوگرم در هکتار) Potassium sulfate ($kg.\ ha^{-1}$)	371.71
	شاخص مطلوبیت Desirability	0.98

نتایج نشان داد که کاربرد ۸۰/۵۰ تن کود دامی در هکتار و ۳۷۱/۷۱ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار با شاخص مطلوبیت ۰/۹۸، باعث تولید ۰/۲۸ گرم کلاله در مترمربع، بنه‌هایی با قطر دو سانتی‌متر و وزن ۲۰۶۹/۶۰ گرم بنه دختری بر مترمربع می‌شود (جدول ۶) که به عنوان سطوح بهینه مصرف این کودها لحاظ گردید. همانطور که پیشتر نیز ذکر شد، هر چه شاخص مطلوبیت نزدیک به یک باشد، نشان‌دهنده دقت بالاتر در شبیه-سازی مقدار متغیرهای وابسته تحت تاثیر متغیرهای مستقل می‌باشد (Kalavathy et al., 2009) که در این مطالعه مقدار این شاخص بسیار بالا می‌باشد. بر این اساس، به نظر می‌رسد بهینه‌سازی مقدار مصرف کودهای مختلف راهکار اکولوژیکی مناسبی برای افزایش کارایی مصرف این نهاده‌ها در نظام‌های زراعی با هدف دستیابی به پایداری زیست‌محیطی می‌باشد (Lopez-Bellido et al., 2005; Arregui & Quemada, 2000) و اطلاعاتی را در مورد افزایش عملکرد در سیستم‌های زراعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم می‌کند. در نهایت، با توجه به اینکه در سناریوی اقتصادی، وزن خشک کلاله و قطر وزن خشک بنه‌های دختری به عنوان عاملی مهم در تولید اقتصادی گل و بنه زعفران در نظر گرفته شده‌اند و مصرف بهینه نهاده‌های دامی و پتاسیم تعیین شده است، آشکار است که بهره‌گیری از این توصیه می‌تواند به عنوان راهکاری مناسب برای دستیابی عملکرد قابل قبول به همراه کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی عناصر غذایی راهکاری اکولوژیکی است که در کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد و اطلاعاتی را در مورد افزایش عملکرد در سیستم‌های زراعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم می‌کند. نتایج حاصل از این مطالعه روی بهینه‌سازی سطوح کودهای دامی و سولفات پتاسیم با استفاده از مدلسازی سطح-پاسخ در زراعت زعفران حاکی از تاثیر معنی‌دار مقادیر مختلف این کودها بر عملکرد و اجزای عملکرد گل و بنه زعفران بود. با توجه به نتایج حداکثر عملکرد تر گل، خشک کلاله و تعداد گل در تیمار ۱۰۰ تن در هکتار کود دامی + عدم مصرف کود سولفات پتاسیم و حداکثر عملکرد بنه‌های دختری در تیمار ۱۰۰ تن کود دامی+ ۴۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم به دست آمد.

کاربرد ۸۰/۵۰ تن در هکتار کود دامی و ۳۷۱/۷۱ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم باعث تولید ۰/۲۶

گرم کلاله در مترمربع و بنه‌هایی با قطر دو سانتی‌متر و وزن ۲۰۶۹/۶۰ گرم بنه دختری بر مترمربع شد که به عنوان مناسب‌ترین سطوح مصرف کودهای دامی و سولفات پتاسیم لحاظ گردید. مقدار شاخص مطلوبیت ۰/۹۸ محاسبه شد، به طوری‌که به عنوان سطوح بهینه این کودها معرفی می‌شود.

سپاسگزاری

حمایت مالی این طرح از محل پژوهه شماره ۴۵۳۹۴/۲ مورخ ۱۳۹۶/۰۹/۱۱ معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است که بدین وسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Akbarian, M. M., Heidari Sharifabad, H., Noormohammadi, G., & Darvish Kojouri, F. (2012). The effect of potassium, zinc and iron foliar application on the production of saffron (*Crocus sativus* L.). *Annals of Biological Research, (12),* 5651-5658.

Alam, S. M., Azam Shah, S., & Akhtar, M. (2003). Varietal differences in wheat yield and phosphorus use efficiency as influenced by method of phosphorus application. *Journal of Science and Technology, 25(2),* 175-181.

Amiri, M. E. (2008). Impact of animal manures and chemical fertilizers on yield components of saffron (*Crocus sativus* L.). American-Eurasian *Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 4,* 274-279.

Amirnia, R., Bayat, M., & Tajbakhsh, M. (2014). Effects of nano fertilizer application and maternal corm weight on flowering at some saffron (*Crocus sativus* L.) ecotypes. Turkish *Journal of Field Crops*, 19(2), 158-168.

Arregui, L. M., & Quemada, M. (2008). Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rain fed conditions. *Agronomy Journal, 100,* 277–284.

Arsalan, N. (2007). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multigravity separator for chromite concentration. *Powder Technology, 86,* 769-776.

Azizi-Zohan, A. A., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2009). Saffron (*Crocus sativus* L.) production as influenced by rainfall, irrigation method and intervals. *Archives of Agronomy and Soil Science, 55,* 547-555.

Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2007). *Handbook of Plant Nutrition*. CRC Press, Boca Raton, FL., USA.

Behdani, M. A., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Rezvani Moghaddam, P. (2005). Evaluation of quantitative relationships between saffron yield and nutrition (on farm trial). *Iranian Journal* of *Field Crops Research,* 3(1), 1-14. [in Persian].

Behzad, S., Razavi, M., & Mahajeri, M. (1992). The effect of various amounts of ammonium phosphate and urea on saffron production. *International Symposium on Medicinal and Aromatic Plants,* Acta Horticulturae, *306,* 337-339.

Esmaeilian, Y., & Amiri, M. B. (2019). Investigation the effect of manure and planting pattern on some flower and corm quantitative traits of saffron (*Crocus sativus* L.) in Gonabad climatic conditions. *Saffron Agronomy and Technology, 6(4),* 429-444. [in Persian].

Gliessman, S. R. (2001). *Agroecosystem Sustainability Developing Practical Strategies*. Boca Raton: CRC Press. 324 pp.

Gresta, F., Santonoceto, C., & Avola, G. (2016). Crop rotation as an effective strategy for saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation. *Scientia Horticulturae, 211,* 34-39.

Hasanuzzaman, M., Borhannuddin Bhuyan, M. H. M., Nahar, K., Hossain, M. S., Al Mahmud, J., Hossen, M. S., Masud, A. A. C. M., & Masayuki Fujita, M. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy, 8,* 31.

Jabbari, M., Khayyat, M., Fallahi, H. R., & Samadzadeh, A. R. (2017). Influence of saffron corm soaking in salicylic acid and potassium nitrate on vegetative and reproductive growth and its chlorophyll fluorescence indices. *Saffron Agronomy and Technology, 5(1),* 21-35. [in Persian].

Jabbari, M., Khayyat, M., Fallahi, H., Samadzadeh, A., (2018). The effects of foliar application of salicylic acid and potassium nitrate on chlorophyll content, electrolyte leakage and replacement corm growth of saffron in Birjand. *Journal of Saffron Research, 6(1),* 27-49. [in Persian].

Kalavathy M. H., Regupathi, I., Pillai, M. G., & Lima Rose Miranda, L. R. (2009). Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H_3PO_4 activated

rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 70(1), 35-45.

Karimian, M., Galavi, M., Dahmardeh, M., & Kafi, M. (2014). Effect of drought stress and different levels of potassium on quantitative and qualitative forage yield of Kochia (*Kochia scoparia* L.). *New Findings in Agriculture*, 8(3), 239-250. [in Persian].

Khorramdel, S., Eskandari Nasrabadi, S., & Mahmoodi, G. (2015). Evaluation of mother corm weights and foliar fertilizer levels on saffron (*Crocus sativus* L.) growth and yield components. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2(1), 9-14.

Khorramdel, S., Gheshm, R., Amin Ghafori, A., & Esmaielpour, B. (2014). Evaluation of soil texture and superabsorbent polymer impacts on agronomical characteristics and yield of saffron. *Journal of Saffron Research, 1(2),* 120-135. [in Persian].

Khorramdel, S., Moallem Banhangi, F., & Shabahang, J. (2021). Effects of cow manure and leaf spraying on flower and corm yield of saffron (*Crocus sativus* L.) using a Central Composite Design. *Saffron Agronomy and Technology, 9(1),* 3-27. [in Persian].

Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Hooshmand, M., & Mostafavi, M. (2020). Optimization of N and P fertilizer rates on yield and quality indices of wheat using a response-surface methodology. *Journal of Crop Production, 13(3),* 119-140. [in Persian].

Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., Moallem Banhangi, F., & Shabahang, J. (2019). Optimization of cow manure levels and corm weight in saffron (*Crocus sativus* L.) by central composite design. *Journal of Saffron Research, 6(2),* 233-249. [in Persian].

Kirmani, S. (2010). Standardization of integrated nutrient management for saffron, *Horticulture ministry mission (MM-2.22), Indian Council for agricultural Research, India*.

Koocheki, A. (2013). Research on production of Saffron in Iran: Past trend and future prospects. *Saffron Agronomy and Technology, 1(1),* 3-21. [in Persian].

Koocheki, A. (2018). Agro-ecological aspects of saffron production with a holistic approach. In: *Fifth National Conference on Saffron*, November 14-15, Torbat-Heydarieh, Iran. [In Persian].

Koocheki, A., Gholami, A., Mahdavi Damghani, A. M., & Tabrizi, L. (2005). *Organic Field Crop Handbook*. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, Iran 375 pp. [in Persian].

Kwak, J. S. (2005). Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45,* 327-341.

Leip, A., Ledgard, S., Uwizeye, A., Palhares, J. C., Aller, M. F., Amon, B., & Wang, Y. (2019). The value of manure-Manure as co-product in life cycle assessment. *The Journal of Environmental Management, 241,* 293-304.

Li-Yun, K., Shan-Chao, Y., & Shi-Qing, L. (2014). Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. *Journal of Integrative Agriculture, 13(9),* 2028-2039.

Lopez-Bellido, L., Lopez-Bellido, R. J., & Redondo, R. (2005). Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research, 94,* 86-97.

Mansouri, H., Banayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., & Lakzian, A. (2015). Management of nitrogen, irrigation and planting density in Persian shallot (*Allium hirtifolium*) by using central composite optimizing method. *The Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 24(1),* 41-60. [in Persian].

Ministry of Agriculture-Jihad. (2020). Agricultural Statistics, (Vol. II). *Islamic Republic of Iran, Ministry of Agriculture-Jihad*, available at: https://koaj.ir/modules/showframework.aspx?RelFacilityId=1241&ObjectID=851&FrameworkPageType=SEC [in Persian].

Nassiri Mahallati, M., Koocheki A., Amin Ghafouri, A., & Mahlujirad, M. (2015). Optimizing corm size and density in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation by central composite design. *Saffron Agronomy and Technology, 3(3),* 161-177. [in Persian].

Nehvi, F. A., Lone, A. A., Khan, M. A., & Maghdoomi, M. I. (2010). Comparative study on effect of nutrient management on growth and yield of saffron under temperate conditions of Keshmir. *Acta Hortic. 850 (Third International Symposium on Saffron: Forthcoming Challenges in Cultivation, Research and Economics, 31 January 2010, Krokos, Kozani, Greece),* pp. 165–170.

Rabani Foroutagheh, M., Hamidoghli, Y., & Mohajeri, S. A. (2013). Effect of the split foliar fertilization on quality and quantity of active constituents in saffron (*Crocus*

sativus L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture, 11*, 35-41.

Ramazan, A., Hafiz, I. A., Ahmad, T., & Abbasi, N. A. (2010). Effect of priming with potassium nitrate and dehiscing on seed germination of gladiolus (*Gladiolus alatus*). *Pakistan Journal of Botany, 42(1),* 247- 258.

Rezvani Moghaddam, P., Koocheki, A., Molafilabi, A., & Seyyedi, S. M. (2013a). Effect of biological and chemical fertilizers on replacement corm and flower yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences, 15*, 234-246. [in Persian].

Rezvani Moghaddam, P., Koocheki, A., Molafilabi, A., & Seyyedi, S. M. (2013b). The effects of different levels of applied wheat straw in different dates on saffron (*Crocus sativus* L.) daughter corms and flower initiation criteria in the second year. *Saffron Agronomy and Technology, 1*, 55-70. [in Persian].

Shahriary, R., Rezvani Moghaddam, P., Jahan, M., & Khorasani, R. (2018). Effects of nutrition management on saffron (*Crocus sativus* L.) stigma and flower yield. *Saffron Agronomy and Technology, 6(2),* 181-196. [in Persian].

Tabatabaeian, J., Hassanian, S., & Kadkhodaie, A. (2020). Effect of micronutrient foliar application on quantitative and qualitative traits of saffron (*Crocus sativus* L.). *Saffron Agronomy and Technology, 8(2),* 147-163. [in Persian].

Teimori, S., Behdani, M., Ghaderi, M., & Sadegh, B. (2013). Investigation on the effect of organic and chemical fertilizers on morphological and agronomic of saffron (*Crocus sativus* L.) corm criteria. *Journal of Saffron Research, 1(1),* 36-47. [in Persian].

Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Qin, R., Noulas, C., Sathuvalli, V., Charlton, B., & Loka, D. A. (2021). Potassium: A vital macronutrient in potato production- A review. *Agronomy, 11(3),* 543.

Vorobiev, L. N. (1967). Potassium ion activity in the cytoplasm and the vacuole of cells of *Chara* and *Griffithsia*. *Nature, 216*, 1325-1327.

Wang, X., Tang, C., Guppy, C. N., & Sale, P. W. G. (2009). The role of hydraulic lift and subsoil P placement in P uptake of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant & Soil, 325*, 263-275.

Waraich, E. A., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., & Saifullah Ahmad, M., 2011. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. *Acta Agriculturae Scandinavica B, 61*, 291-304.

Zabihi, H. R., & Pishbin, M. (2018). Management of basic nutrients and organic matter in the nutrition of saffron farms. *Saffron Journal, 2(1),* 1-9. [in Persian].

Zabihi, H., & Feizi, H. (2014). Saffron response to the rate of two kinds of potassium fertilizers. *Saffron Agronomy and Technology, 2(3),* 191-198. [in Persian].

COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by University of Birjand – Saffron Research Group. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)