Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Optimizing the amount of irrigation water and nitrogen fertilizer in ratoon rice using response surface methodology

Aslan Egdernezhad [1]*, Parisa Shahinrokhsar [2], Saloome Sepehri Sadeghiyan [3]

[1] Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[2] Assistant Professor, Gilan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran
[3] Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Rice (*Oryza sativa L.*) is one of the most popular cereals in the world and is known as the second most consumed grain in Iran after wheat. For this reason, it is essential to pay attention to the quantity and quality of this agricultural crop. The cultivation of ratoon rice, which has become common in some areas in the north of Iran, will enable the re-production of rice in the next cropping season. The lack of water resources in recent years in Iran and the prediction of the severity of the shortage of available water in the coming years have caused the use of methods to reduce water consumption in the agricultural sector, which is the largest water consumer in the country, to be considered Rice plant has a large share in water consumption per unit area among other agricultural products. For this reason, some methods of reducing water consumption in the cultivation of this product have been suggested. According to the existing restrictions on the use of irrigation water and nitrogen fertilizer, it is necessary to determine the optimal amounts of these factors in the field. However, this work requires many field experiments, which require a lot of time and money. To solve this problem, the use of simulation and optimization models has been suggested. Therefore, this research aims to optimize the two factors of irrigation water and nitrogen fertilizer to achieve the most appropriate amount of production and improve the quality of rice using the response surface methodology (RSM).

Materials and Methods

Considering the effects of two aforementioned factors, in this research the optimization of the amount of irrigation water and nitrogen fertilizer on the quantitative and qualitative characteristics of ratoon rice was applied using the response surface method. The study site was the research farm of the Rice Research Institute located at latitude 37º 16′ N and longitude 49º 63′ E in Rasht, Iran. The studied factors included the amount of irrigation water (with upper and lower levels of 0 and 5 mm of cracks appearing in the soil, respectively) and nitrogen fertilizer (with upper and lower levels of 90 and zero kg ha^{-1} of pure nitrogen, respectively). the RSM refers to a multivariate function. To compare the obtained model results with observed values, from the Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), Mean Bias Error (MBE), Efficiency Factor (EF), agreement index (d), and the Coefficient of Determination (R^2) was used.

Results and Discussion

The results showed that the regression model for predicting the plant height, biomass, gel consistency, and yield had an underestimation error (MBE < 0), and for other parameters had an an overestimation error (MBE<0). The value of the NRMSE was less than 0.1, so the quadratic regression model had excellent accuracy for all parameters. The two statistics EF and d, which show the efficiency of the regression model, had acceptable values (d>0.90 and EF>0). After optimization, the yield of seed and biomass was 10.5 and 0.5 %, respectively, higher than the average values of these parameters in field conditions. In optimal conditions, the number of tillers, panicle length, and harvest index were 1.9, 1.4, and 3.6 % higher than the observed values, respectively, and plant height and weight of 1000 seeds were almost equal in both optimal and observational conditions. The changes in the quality indicators of gelatinization temperature, gel consistency, amylase content percentage, and grain elongation in optimal conditions compared to the observed values were 1.8 (less), 0.4 (more), zero, and 6.2 (more) percent, respectively. The amount of irrigation water and nitrogen fertilizer in optimal conditions was 3.5 mm of cracking in the soil and 68 kg ha^{-1}, respectively.

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Conclusion

In this research, the effect of two factors, irrigation water and nitrogen fertilizer, was optimized using the response surface method. For this purpose, the minimum and maximum values of these factors were considered with codes of -1 and +1. The results showed that, except for yield and biomass, other traits did not have uniform and regular changes with the increase of two factors, irrigation water and nitrogen fertilizer. For this reason, the overlap map of these factors was determined and it was observed that the effect of nitrogen fertilizer on most parameters was greater than that of irrigation water. The optimal range of all factors was in the values of -0.3 to +0.5 nitrogen fertilizer -1 to +1 irrigation water +0.5 to +1 nitrogen fertilizer and -1 to +0.7 irrigation water. Of course, a part of the overlapping area of these two ranges also lacked the optimal value for the parameters, which was considered by the surface-response method in the optimization. After optimization, it was observed that the two parameters of gelatinization degree and gel consistency were lower than the average observed values. The parameters of amylase percentage, 1000 seed weight, and plant height did not change compared to the field conditions and the value of other parameters increased. To achieve these results, it is necessary to consider the amount of irrigation water in cracks of 3.5 mm and the amount of nitrogen fertilizer as 68 kg ha^{-1}.

Keywords: Amylase content percentage, Gelatinization temperature, Grain elongation, Deficit irrigation

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the Agricultural Engineering Research Institute (AERI) for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Aslan Egdernezhad: Writing, original draft preparation, conceptualization, methodology, software; **Parisa Shahinrokhsar:** Resources, visualization, supervision, resources; **Saloome Sepehri Sadeghiyan:** Consultation, formal analysis and investigation, manuscript editing

*Corresponding Author, E-mail: a_eigder@ymail.com

Citation: Egdernezhad, A., Shahinrokhsar, P., & Sepehri Sadeghiyan, S. (2024). Optimizing the amount of irrigation water and nitrogen fertilizer in ratoon rice using response surface methodology. *Water and Soil Management and Modelling*, *4*(4), 313-328.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13242.1319

Received: 02 July 2023, Received in revised form: 27 August 2023, Accepted: 07 September 2023, Published online: 21 October 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 313-328

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵۴۶-۲۷۸۳

بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن در برنج راتون با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ

اصلان اگدرنژاد[۱*]، پریسا شاهین رخسار [۲]، سالومه سپهری صادقیان [۳]

[۱] استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

[۲] استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

[۳] استادیار، مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

برنج از جمله غلات بسیار مهم و ضروری برای جمعیت در حال رشد ایران است. به همین دلیل توجه به کمیت و کیفیت این گیاه زراعی بسیار اهمیت دارد. کشت راتون برنج که در برخی مناطق شمال کشور رایج شده است، امکان تولید مجدد برنج را در ادامهٔ فصل زراعی میسر می‌کند. با توجه به اثرگذاری دو عامل مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن بر خصوصیات کمی و کیفی راتون برنج، در این تحقیق بهینه‌سازی آن‌ها با استفاده از روش سطح-پاسخ انجام شد. محل آزمایش، مزرعه تحقیقاتی مؤسسهٔ تحقیقات برنج واقع در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقهٔ شرقی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۶۳ دقیقهٔ شرقی در شهرستان رشت با ارتفاع هفت متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد بود. عوامل مورد مطالعه شامل مقدار آب آبیاری (با سطوح بالا و پایین صفر میلی‌متر ترک (یا غرقابی) و پنج میلی‌متر ترک) و کود نیتروژن (با سطوح بالا و پایین ۹۰ و صفر کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) بود. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی صفات ارتفاع بوته، عملکرد کاه، قوام ژل و ری آمدن دچار خطای کم‌برآوردی (MBE <0) و برای سایر صفات دچار خطای بیش‌برآوردی شد (MBE >0). مقدار آمارهٔ NRMSE کم‌تر از ۰/۱ بود. بنابراین مدل رگرسیونی درجهٔ دوم برای همهٔ پارامترها دارای صحت عالی بود. دو آمارهٔ EF و d که نشان‌دهندهٔ کارایی مدل رگرسیونی است دارای مقادیر قابل‌قبول (d >0.90 و EF >0) بود. پس از بهینه‌سازی، عملکرد دانه و زیست‌توده به‌ترتیب ۱۰/۵ و ۰/۵ درصد بیش‌تر از میانگین مقادیر این پارامترها در شرایط مشاهداتی بود. تعداد پنجه، طول خوشه و شاخص برداشت، در شرایط بهینه به‌ترتیب ۱/۹، ۱/۴، ۳/۶ درصد بیش‌تر از مقادیر مشاهداتی و ارتفاع بوته و وزن هزار دانه در هر دو حالت بهینه و مشاهداتی مقادیر تقریباً برابری داشت. تغییرات مقادیر شاخص‌های کیفی درجهٔ ژلاتینی شدن، قوام ژل، درصد آمیلوز و ری‌آمدن در شرایط بهینه نسبت به مقادیر مشاهده شده به‌ترتیب ۱/۸ (کم‌تر)، ۴/۰ (بیش‌تر)، صفر و ۶/۲ (بیش‌تر) درصد بود. مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن در شرایط بهینه به‌ترتیب ۳/۵ میلی‌متر ترک‌خوردگی و ۶۸ کیلوگرم بر هکتار بود.

واژه‌های کلیدی: درصد آمیلوز، درجهٔ ژلاتینی شدن، ری‌آمدن، کم‌آبیاری

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a_eigder@ymail.com

استناد: اگدرنژاد، اصلان، شاهین رخسار، پریسا، و سپهری صادقیان (۱۴۰۳). بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن در برنج راتون با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۳۱۳-۳۲۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13242.1319

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۳۱۳ تا ۳۲۸
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) از جمله محبوب‌ترین غلات در جهان به‌شمار می‌روند و در ایران پس از گندم به‌عنوان دومین غلهٔ پرمصرف شناخته می‌شود. سرانهٔ مصرف برنج در ایران حدود ۳۱ کیلوگرم در سال است که برای مرتفع کردن نیاز روز افزون جمعیت در حال رشد کشور، برنامه‌های خودکفایی در سال‌های اخیر در نظر گرفته شده است. کاربرد آب آبیاری بر تولید گیاهان زراعی از جمله برنج مؤثر است. با این حال، کمبود منابع آب در سال‌های اخیر در کشور ایران و پیش‌بینی شدت کمبود آب در دسترس در سال‌های آتی سبب شده است تا به استفاده از روش‌های کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، به‌عنوان بزرگ ترین بخش مصرف‌کنندهٔ آب در کشور، توجه شود (Ahmadee et al., 2021). گیاه برنج سهم زیادی در مصرف آب در واحد سطح در بین سایر محصولات کشاورزی دارد. به همین دلیل برخی روش‌های کاهش مصرف آب در کشت این محصول پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، آبیاری غیرغرقابی براساس ظهور مقدار مشخصی از عرض ترک است (Mostafazadeh-Fard et al., 2010). نیتروژن نیز از جمله کودهای ضروری برای گیاهان زراعی از جمله برنج به شمار می‌رود که مقدار آن اثر زیادی بر تولید محصول دارد (Ziaeifar et al., 2022). گرچه افزایش مصرف آن سبب افزایش تولید کمی محصول می‌شود، ولی ممکن است بر برخی خصوصیات کیفی برنج اثر منفی داشته باشد. با توجه به محدودیت‌های موجود بر کاربرد آب آبیاری و کود نیتروژن، لازم است مقادیر بهینهٔ این عوامل در مزرعه تعیین شوند. بنابراین، این کار نیازمند انجام آزمایش‌های متعدد مزرعه‌ای است که خود مستلزم صرف وقت و هزینهٔ زیاد است. برای رفع این مشکل، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پیشنهاد شده است (Egdernezhad et al., 2019; Ebrahimipak et al., 2019).

استفاده از روش سطح-پاسخ یکی از روش‌های مناسب، سریع و پرکابرد برای بهینه‌سازی عوامل مختلف حاکم در هر آزمایش است. این روش دارای مبنای آماری بسیار پیچیده است و از مدل غیرخطی چندمنظوره برای دست‌یابی به سطوح بهینهٔ عوامل مختلف استفاده می‌کند (Aslan, 2007; Zulkali et al., 2006; Hamid et al., 2022). در روش سطح-پاسخ ابتدا ترکیب مناسب تیمارهای مورد نظر توسط این مدل تعیین می‌شود. پس از آن، محقق باید داده‌های مورد نظر برای تیمارهای ارائه شده را به مدل معرفی کند. سپس بهترین برازش برای یک مدل آماری با فرض ترکیب به‌دست آمده از تیمارها ایجاد می‌شود. در ادامه، حالت بهینه برای متغیرهای مستقل مورد نظر به‌طوری تعیین می‌شود که متغیرهای وابسته به بیشینه، کمینه یا هدف خود نزدیک شوند (Montgomery, 2001). مدل سطح-پاسخ بسیار گسترده است و برای اهداف مختلف از روش‌های متفاوتی در این مدل استفاده می‌شود. طرح مربع مرکزی یکی از زیرمجموعه‌های این روش است (Wu and Hamada, 2009; Hamid et al., 2022) که در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون مطرح و پس از تغییراتی مجدداً در سال ۱۹۵۷ ارائه شد (Box and Wilson, 1951; Box and Hunter, 1957). این روش به‌منظور کاهش زمان و هزینهٔ طرح‌های آزمایشگاهی ارائه شد، ولی با توجه به خصوصیات آن، در بخش کشاورزی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Khashei Siuki et al., 2017; Hamid et al., 2022). این روش معمولاً به‌جای طرح‌های آزمایشی فاکتوریل استفاده و سبب می‌شود تعداد تکرارها و تیمارها کاهش یابد. هم‌چنین امکان مطالعه و تجزیهٔ بیش‌تری روی داده‌ها فراهم است و می‌توان ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای مستقل در آزمایش را فراهم کرد (Aslan, 2007; Khashei Siuki et al., 2017).

اهمیت این روش سبب شده است تا کاربرد آن برای بهینه‌سازی عوامل حاکم بر تولید در بخش کشاورزی مورد توجه محققان باشد. به‌عنوان مثال، نتایج مطالعهٔ Mansouri et al. (2015) در رابطه با کاربرد این روش برای بهینه‌سازی عوامل مقدار کود نیتروژن و آب آبیاری در تولید پیاز نشان داد که با مصرف ۹۳ کیلوگرم کود نیتروژن و ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری بیش‌ترین تولید و کم‌ترین آلودگی محیط زیستی به‌دست می‌آید. در تحقیق دیگری، Koocheki et al. (2014) در بهینه‌سازی عوامل نیتروژن، مقدار آب آبیاری و تراکم برای گیاه کلزا نشان دادند که برای دست‌یابی به حداکثر عملکرد استفاده از مقادیر ۹۲ کیلوگرم کود نیتروژن، ۲۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته در متر مربع باید رعایت شود. در این تحقیق سطوح بالا و پایین نیتروژن در محدودهٔ صفر تا ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، مقدار آب آبیاری در محدودهٔ ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار و تراکم گیاه در محدودهٔ ۵۰ تا ۱۵۰ بوته در مترمربع بود. در ادامه، Jahan et al. (2016) تعیین سطوح بهینهٔ سوپرجاذب در محدودهٔ ۸۰ تا ۱۶۰ کیلوگرم بر هکتار، اسیدهیومیک در محدودهٔ چهار تا هشت کیلوگرم در هکتار و آب آبیاری در محدودهٔ ۵۰ تا ۱۰۰ درصد نیاز آبی برای گیاه ذرت را بررسی کردند. هدف مطالعهٔ آن‌ها افزایش عملکرد و زیست‌توده بود. پس از بهینه‌سازی مشاهده شد که اگر سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آب آبیاری به‌ترتیب به میزان ۱۲۶/۰۶ کیلوگرم در هکتار، ۷/۱۹ کیلوگرم در هکتار و ۳۴۷/۴۷ مترمکعب در هکتار باشد پارامترهای عملکرد و زیست‌توده به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. بهینه‌سازی تولید گندم از نظر اقتصادی تحت شرایط مصرف کودهای نیتروژن (در محدودهٔ صفر تا ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار)، فسفر (در محدودهٔ صفر تا ۲۰۰

کیلوگرم بر هکتار) و دامی (در محدودهٔ صفر تا ۳۰ تن در هکتار) نیز توسط Jahan and Amiri (2017) بررسی شد. نتایج مطالعهٔ آن‌ها نشان داد پس از بهینه‌سازی عوامل با استفاده از روش سطح-پاسخ، بهترین میزان اقتصادی گندم با مصرف ۱۴۵/۴ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم فسفر و ۱۸/۴ تن کود دامی به‌دست آمد. در مطالعهٔ Mansouri et al. (2021) نتیجهٔ بهینه‌سازی عوامل کود نیتروژن (در محدودهٔ صفر تا ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) و آب آبیاری (در محدودهٔ ۸۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) برای گیاه چغندرقند نشان داد که در صورت کاربرد مقدار ۱۳۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰۶۷۷ مترمکعب در هکتار آب آبیاری، بیش‌ترین عملکرد چغندرقند به‌دست می‌آید. هم‌چنین، Goodarzi et al. (2021) عوامل کود نیتروژن و فاصلهٔ بوته روی ردیف در گیاه اسفناج تحت عوامل کود نیتروژن (صفر تا ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار) و فاصلهٔ بوته روی ردیف (در محدودهٔ هفت تا ۱۵ سانتی‌متر) را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که با اعمال ۱۸۹/۹ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن و رعایت فاصلهٔ هفت سانتی‌متر بین بوته‌ها روی ردیف بیش‌ترین عملکرد اقتصادی به‌دست آمد. در نهایت، کاهش آبشویی کود نیترات در بخش کشاورزی با در نظر گرفتن مقدار زئولیت (در محدودهٔ صفر تا شش درصد وزن خاک) و مقدار نیترات (در محدودهٔ صفر تا ۴۰۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک) با روش سطح-پاسخ در مطالعهٔ Hamid et al. (2022) نشان داد که بهترین مقدار اقتصادی استفاده از زئولیت دو درصد وزن خاک بود.

کشت برنج به‌صورت راتون از جمله روش‌هایی است که پتانسیل عملکرد در واحد سطح در هر منطقه را افزایش می‌دهد. علاوه‌بر آن در مصرف بذر و نیروی کار نیز صرفه‌جویی می‌شود (Shiraki et al., 2020). اگرچه به جز استان‌های شمالی، کشت برنج در برخی نقاط ایران نیز رایج است، اما در همهٔ این مناطق امکان کشت برنج به‌صورت راتون نیست. در سال‌های اخیر کشت راتون در برخی مناطق شمال کشور رایج شده است. در این روش بلافاصله پس از برداشت نخست محصول، گیاه برای برداشت دوم در پاییز آماده می‌شود. براساس مرور منابع، اثر کود نیتروژن و مقدار آب آبیاری روی افزایش عملکرد برنج بسیار مؤثر است. اما علاوه‌بر عملکرد، کیفیت برنج نیز عامل بسیار مهمی در تولید این محصول می‌باشد. براساس توضیحات داده شده، روش سطح-پاسخ روش مناسبی برای تعیین حدود بهینهٔ عوامل حاکم بر تولید محصولات کشاورزی است که تاکنون استفاده از آن برای بهینه‌سازی عوامل مورد اشاره روی راتون برنج بررسی نشده است. بنابراین، هدف این تحقیق بهینه‌سازی دو عامل آب آبیاری و کود نیتروژن برای دست‌یابی به مناسب‌ترین میزان تولید و بهبود کیفیت برنج با استفاده از روش سطح-پاسخ است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

این تحقیق در مزرعهٔ تحقیقاتی مؤسسهٔ تحقیقات برنج واقع در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقهٔ شرقی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۶۳ دقیقهٔ شرقی در شهرستان رشت با ارتفاع هفت متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد انجام شد. عوامل مورد مطالعه شامل مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن بود. سطوح بالا و پایین آب آبیاری به ترتیب شامل صفر میلی‌متر ترک (یا غرقابی) و پنج میلی‌متر ترک و سطوح بالا و پایین کود نیتروژن به‌ترتیب شامل ۹۰ و صفر کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص بود. به‌منظور تهیهٔ بستر آزمایش اولین شخم در اسفند ماه و شخم دوم در اردیبهشت ماه صورت گرفت. ابعاد هر کرت آزمایشی سه در پنج متر در نظر گرفته شد. کرت‌ها با استفاده از پلاستیک از هم جدا شده و برای ورود و خروج آب کانال‌های آبیاری تعبیه شد. به‌منظور کاهش اثر بارندگی کانال‌هایی در داخل کرت‌ها حفر شدند تا آب باران در کرت‌هایی که باید تیمار آبیاری اعمال شود، با یک‌دیگر تداخل نداشته باشند. نشاکاری بر طبق عرف مؤسسهٔ برنج و با توجه به شرایط حاکم بر تحقیق با فاصلهٔ نشاء ۲۰×۲۰ سانتی‌گراد اعمال شد. در جدول ۱ تاریخ عملیات زراعی مشاهده می‌شود. قبل از توزیع کودهای شیمیایی از هر تکرار یک نمونه خاک مرکب سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) تهیه و تجزیه‌های لازم روی آن‌ها انجام گرفت. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای کنترل علف‌های هرز علاوه بر استفاده از علف‌کش بوتاکلر ۶۰ درصد به مقدار سه لیتر در هکتار، دو بار وجین دستی نیز صورت گرفت. وجین اول و دوم به‌ترتیب ۲۰ و ۴۰ روز پس از نشاء انجام شد. برداشت کشت اصلی از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری زمین صورت گرفت (Islam and Mirza, 2008). بلافاصله پس از برداشت کشت اصلی تمام کرت‌ها آبیاری سنگین شدند و پس از آن مقدار کود مورد نظر اعمال شد. پس از رسیدن عرض ترک‌ها به مقدار مورد نظر، آبیاری انجام شد. عمق آب در کرت‌ها در هر آبیاری پنج سانتی‌متر بود (Mostafazadeh-Fard et al., 2010).

جدول ۱- تاریخ عملیات زراعی در طول آزمایش

Table 1- Date of agricultural operations during the experiment

عملیات زراعی	تاریخ (روز/ماه)
بذرپاشی	2.16
نشاء کاری	3.14
برداشت محصول اصلی	6.29
اعمال تیمارهای آبیاری	7.5
برداشت محصول راتون	8.2

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعهٔ مورد آزمایش

Table 2- Some physical and chemical characteristics of the studied farm soil

بافت خاک	شن	سیلت (درصد)	رس	EC (دسی زیمنس بر متر)	PH	کربن آلی (درصد)	نیتروژن کل	فسفر قابل جذب (قسمت در میلیون)	پتاسیم قابل جذب
سیلتی‌رسی	36	50	14	1.4	6.9	2.09	0.14	14.4	246

برای اندازه‌گیری آب ورودی به مزرعه از کنتورهای حجمی که در روی شیلنگ‌های آبگیری نصب شده بودند استفاده شد. روش سطح–پاسخ به‌صورت تابع چندمتغیره به‌صورت رابطهٔ (۱) تعریف می‌شود. در این رابطه، y متغیر پاسخ و x متغیر مستقل است.

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_k) \quad (۱)$$

یکی از انواع روش‌های سطح–پاسخ، طرح مربع مرکزی است. این روش به‌صورت طرح آزمایشی برای تعیین مقدار متغیرهای مستقل جهت تعیین متغیر وابسته پیش‌بینی شده تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح عوامل به‌عنوان نقطهٔ مرکزی در نظر گرفته می‌شود. در این روش، تیمارهای آزمایشی با اعداد یک، صفر و منفی یک و بدون واحد نمایش داده می‌شوند که به‌ترتیب نشان‌دهنده بالاترین، میانگین و پایین‌ترین سطح متغیر مستقل هستند. برای تعیین تعداد تیمارها از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$2^k + 2k + r \quad (۲)$$

در رابطهٔ بالا، k نشان‌دهندهٔ تعداد عوامل مورد آزمایش و r تعداد تکرار است (Aslan, 2007). بنابراین، در این تحقیق برای هر دو آزمایش انجام شده، تعداد تیمارهای طراحی به‌صورت رابطهٔ (۳) تعیین می‌شود. کد ضرایب و مقدار هر کدام از عوامل در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$2^2 + 2 \times 2 + 3 = 11 \quad (۳)$$

جهت برازش داده‌ها از رگرسیون چندمتغیره با افزودن جملات خطی، درجهٔ دو و اثر متقابل بین عوامل، برازش و بر اساس تجزیهٔ واریانس رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. رابطهٔ چندجمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به شکل زیر است (Aslan, 2007).

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 + a_5 x_1 x_2 \quad (۴)$$

در این رابطه، y متغیر وابسته، i خصوصیات کمی و کیفی راتون برنج، a ضریب رابطه، x_1 متغیر مستقل مقدار آبیاری و x_2 متغیر مستقل مقدار کود نیتروژن است. در نهایت، معناداری مدل و صحت آن در برازش داده‌ها مشخص شد. به‌منظور ارزیابی و آزمون معناداری آماری مدل به‌دست آمده، از تجزیهٔ واریانس رگرسیونی استفاده شد. برای مقایسهٔ نتایج مدل به‌دست آمده با مقادیر مشاهداتی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) به‌صورت زیر استفاده شد (Ahmadee et al., 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}}{\overline{O_i}} \quad (۶)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۷)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۸)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۰)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O_i}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است. آماره‌های RMSE و NEMSE به‌ترتیب برای تعیین خطا و صحت مدل است. مقدار آمارهٔ RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آمارهٔ NRMSE نشان‌دهندهٔ صحت عالی مدل است. هم‌چنین، مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲–۰/۱، ۰/۳–۰/۲ و بیش‌تر از ۰/۳ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ صحت خوب، متوسط و ضعیف است. آمارهٔ MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آمارهٔ MBE نشان‌دهندهٔ این است که مقدار شبیه‌سازی شده بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیان‌گر این است که مدل در برآورد صفات مورد مطالعه عدد کوچک‌تری بدست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهندهٔ کارایی مدل است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است. آمارهٔ R^2 نشان‌دهندهٔ قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به‌وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهندهٔ برازش بهتر داده‌ها می‌باشد (Ahmadee et al., 2015). برازش رگرسیون بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و مقایسهٔ آن با خط یک به یک یکی از روش‌های اعتبارسنجی مدل‌ها به‌شمار می‌رود. اگر شیب خط رگرسیون برابر با یک باشد بر خط یک به یک منطبق می‌شود. در این صورت نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی برابر هستند و مدل در شبیه‌سازی صحت خوبی داشته است. در غیر این صورت، با

فاصله گرفتن خط رگرسیون از خط یک به یک، از صحت مدل کاسته می‌شود. برای ارزیابی خط رگرسیون از رابطهٔ (۱) و آزمون t استفاده شد:

$$\text{Predicted} = a + (b \times \text{Observed}) \quad (۱۱)$$

در رابطهٔ فوق، b=1 به‌عنوان فرض صفر (H0) و b≠1 به عنوان فرض یک (H1) در آزمون t مد نظر قرار گرفتند. برای ارزیابی عرض از مبدأ دو خط a=0 به‌عنوان فرض صفر (H0) و a≠0 به‌عنوان فرض یک (H1) در نظر گرفته شد. در واقع در صورت رد شدن فرض صفر، اختلاف معناداری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد.

در طول فصل رویش ضمن انجام عملیات داشت، یادداشت برداری از خصوصیات گیاه نظیر ارتفاع بوته، تعداد پنجه، طول خوشه، درصد دانه‌های پر و خالی و وزن هزاردانه صورت گرفت. برای تعیین پوکی دانه‌ها در هر کرت ۱۰ خوشه به‌طور تصادفی جدا شده و تعداد دانه‌های پر و خالی آن شمارش شد. درصد دانه‌های پر و خالی آن با استفاده از رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) محاسبه شد.

$$FG = \frac{F}{T} \times 100 \quad (۱۲)$$

$$UFG = 100 - FG \quad (۱۳)$$

در این روابط، FG درصد دانهٔ پر، F تعداد دانهٔ پر، T تعداد کل دانه‌ها و UFG درصد دانهٔ خالی است. برای تعیین وزن هزار دانه در هر کرت آزمایشی از درون نمونهٔ مربوط به عملکرد نهایی هر کرت ۱۰ نمونه ۱۰۰ تایی به‌صورت تصادفی انتخاب و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته تعداد پنج بوته از هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و ارتفاع بوته از طوقه تا نوک بلندترین خوشه در مرحلهٔ رسیدن کامل گیاه اندازه‌گیری شد. برای تعیین طول خوشه، پنج خوشه از هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و با استفاده از خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری شد. چهار کپه از هر کرت در مرحلهٔ رسیدگی کف بر شده و با خشک کردن یکنواخت در حرارت ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد در آون، عملکرد (در رطوبت ۱۴ درصد) و زیست‌تودهٔ آن‌ها تعیین شد. شاخص برداشت به‌صورت زیر محاسبه شد.

$$HI = \frac{Y}{B} \times 100 \quad (۱۴)$$

در رابطهٔ (۴)، HI شاخص برداشت، Y عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و B زیست‌توده (کیلوگرم در هکتار) است. پس از برداشت نیز اندازه‌گیری صفات تعیین‌کنندهٔ کیفیت شامل مقدار آمیلوز به روش Roberts (1987)، درجهٔ حرارت ژلاتینی شدن به روش Little et al. (1958)، قوام ژل به روش Cagampang (1973) و ری‌آمدن به روش Azeez and Shafi (1966) بعد از سفید کردن و پختن برنج اندازه‌گیری شد.

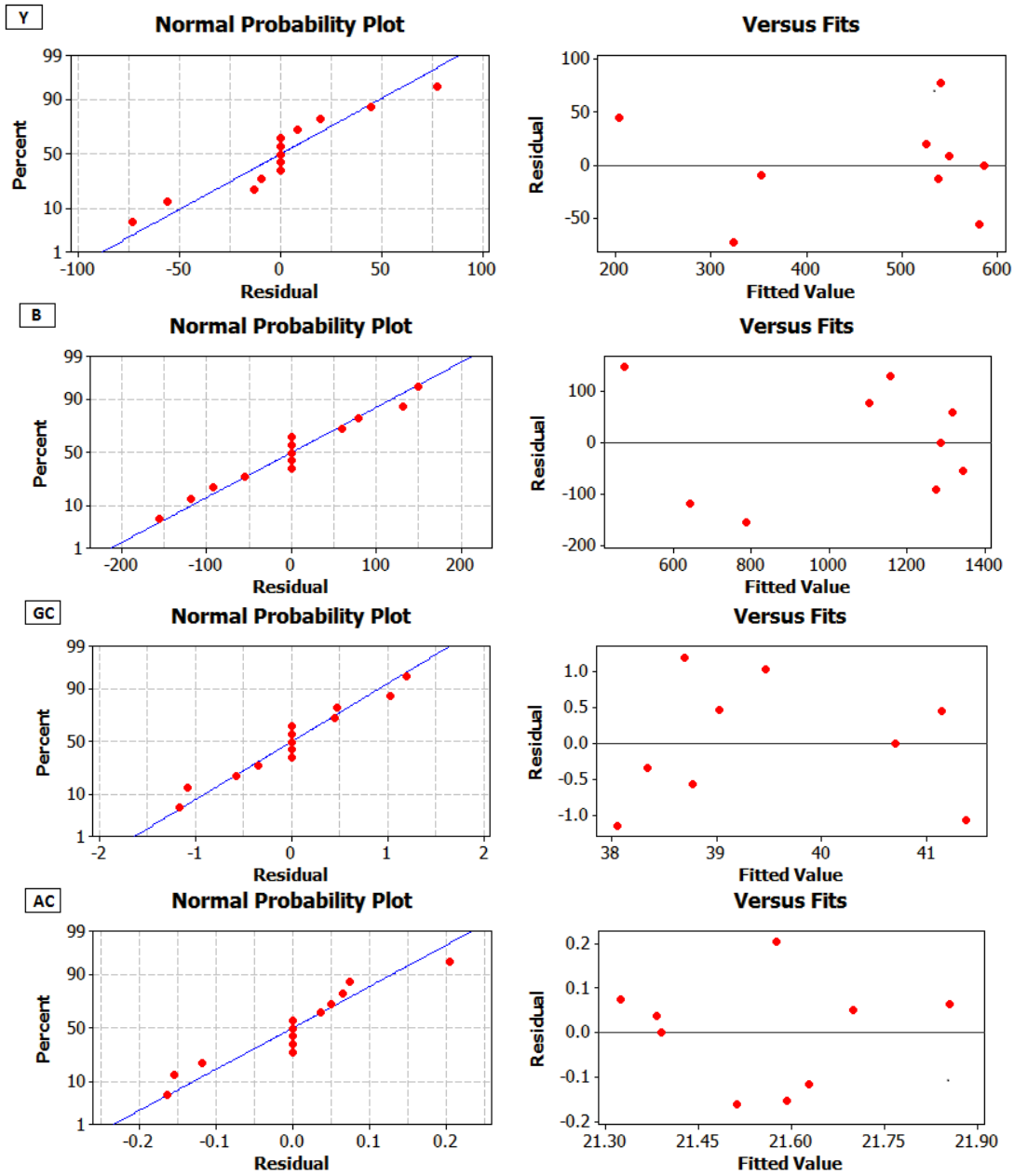
۳- نتایج و بحث

پیش از اجرای مدل سطح-پاسخ، به‌منظور بررسی مناسب بودن داده‌ها برای انجام تجزیهٔ از دو آزمون کفایت داده‌ها و مقادیر برازنده شده[1] استفاده شد. کفایت داده‌ها براساس بهترین خط برازش در پلات احتمالی نرمال[2] برای صفات مورد مطالعه بررسی شد. به‌دلیل زیاد بودن تعداد پارامترهای مورد بررسی، تنها چهار پارامتر (دو پارامتر کمی و دو پارامتر کیفی) به‌عنوان نمونه در شکل ۱ نشان داده شد. سایر صفات رفتار مشابه با این پارامترها داشتند. کلیهٔ نتایج نشان داد که مقادیر کلیه صفات در محدودهٔ خط برازش بود به همین دلیل کفایت لازم را داشتند. پراکندگی داده‌ها نیز نشان داد که روند خاصی بین پراکندگی باقی‌ماندهٔ داده‌های صفات مورد مطالعه وجود نداشت. بنابراین، واریانس بین داده‌ها ثابت بود و مقادیر صفات مورد مطالعه نسبت به شرایط آزمایش مستقل بودند. براساس این نتایج، استفاده از آن‌ها برای اجرای مدل سطح-پاسخ بلامانع است. نتایج تجزیهٔ واریانس مدل رگرسیونی در جدول ۴ نشان داده شده است. این مدل برای صفات ارتفاع بوته، وزن هزاردانه، عملکرد دانه، عملکرد کاه و درجهٔ ژلاتینی شدن در سطح احتمال یک درصد (P-value≤0.01) و برای صفات تعداد پنجه، طول خوشه، شاخص برداشت، قوام ژل، درصد آمیلوز و طول برنج خام در سطح احتمال پنج درصد (P-value≤0.05) معنادار بود.

رگرسیون صفات درصد دانهٔ پر، درصد دانهٔ خالی، عرض برنج و نسبت طول به عرض برنج از نظر آماری معنادار نشد. نتایج رگرسیون درجهٔ دو که در رابطهٔ (۴) معرفی شد برای صفات ارتفاع بوته، طول خوشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد کاه در سطح یک درصد (P-value≤0.01) و برای صفات تعداد پنجه، شاخص برداشت، درجهٔ ژلاتینی شدن، قوام ژل و درصد آمیلوز در سطح احتمال پنج درصد (P-value≤0.05) معنادار بود. رگرسیون درجهٔ دوم برای سایر صفات معنادار نشد. بنابراین، مدل سطح-پاسخ برای پیش‌بینی این صفات مورد استفاده قرار نگرفت.

عدم معناداری آزمون عدم برازش نشان داد که تفاوتی بین تجزیهٔ رگرسیونی و تجزیهٔ واریانس وجود نداشت. این نتایج بیان‌گر این است که می‌توان به نتایج به‌دست آمده اعتماد نمود که با مشاهدات Mansouri et al. (2021) و Ahmadee et al. (2021) مطابقت داشت. هم‌چنین Mansouri et al. (2021) با بررسی مقادیر مختلف آب آبیاری و کود بر گیاه چغندرقند گزارش کردند که تفاوت معناداری بین نتایج تجزیهٔ واریانس و مدل رگرسیونی وجود نداشت.

[1] Fitted value
[2] Normal probability plot



شکل ۱- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفات عملکرد (Y)، زیست‌توده (B)، قوام ژل (GC) و درصد آمیلوز (AC)

Figure 1- Examining the normality and stability of the data variance for yield (Y), biomass (B), gel consistency (GC), and amylase content percentage (AC) traits

پارامترهای ثابت رگرسیون درجهٔ دو در جدول ۵ نشان داده شده است. از پارامترهای ثابت برای تعیین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی درجهٔ دوم استفاده و نتایج به‌دست آمده با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد (جدول ۶). نتایج آماری این مقایسات نشان داد که مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی صفات ارتفاع بوته، عملکرد کاه، قوام ژل و ری‌آمدن دچار خطای کم‌برآوردی (MBE <0) و برای سایر صفات دچار خطای بیش‌برآوردی شد (MBE >0). براساس مقدار RMSE، خطای پیش‌بینی ارتفاع بوته برابر با ۰/۱۹ سانتی‌متر بود. متوسط ارتفاع بوته در تیمارهای مشاهداتی برابر با ۱۰۳ سانتی‌متر بود. بنابراین پیش‌بینی ارتفاع بوته دارای خطای قابل‌قبول بود. متوسط تعداد پنجه ۱۰ عدد بود و خطای به‌دست آمده برای این پارامتر ۰/۰۷ بود. به همین دلیل این خطا نیز قابل‌قبول بود. متوسط طول خوشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و کاه نیز به‌ترتیب ۲۰/۵ سانتی‌متر، ۲۰/۹ گرم، ۵۰۳ کیلوگرم در هکتار و ۱۱۱۸ کیلوگرم در هکتار بود. مقدار RMSE این پارامترها کم‌تر از یک درصد متوسط مقدار پارامتر بود و به همین دلیل خطای پیش‌بینی این پارامترها نیز قابل‌قبول بود. متوسط شاخص برداشت ۳۰ درصد بود و خطای ۰/۳۶ درصد برای این پارامتر مورد پذیرش است. مقدار RMSE برای پارامترهای درجهٔ ژلاتینی شدن، قوام ژل،

درصد آمیلوز و ری آمدن نیز قابل‌قبول و خطای پیش‌بینی این پارامترها نیز بسیار کم بود. مقدار آمارهٔ NRMSE کم‌تر از ۰/۱ بود بنابراین، مدل رگرسیونی درجهٔ دوم برای همهٔ پارامترها دارای صحت عالی بود. دو آمارهٔ EF و d که نشان‌دهندهٔ کارایی مدل رگرسیونی است دارای مقادیر قابل‌قبول (d>0.90 و EF>0) بود. از این‌رو، کارایی مدل رگرسیونی نیز مورد پذیرش بود.

جدول ٤- نتایج تجزیهٔ واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابستهٔ گیاه راتون برنج

Table 4- The results of regression variance analysis for the dependent variables of the ratoon rice plant

منابع تغییرات	رگرسیون	خطی	درجهٔ دو	اثر متقابل	خطا	عدم برازش	خطای خالص
درجهٔ آزادی	5	2	2	1	7	3	4
ارتفاع بوته	18.7**	31.0**	12.7**	6.0*	6.0	2.9	0.0
تعداد پنجه	7.0*	11.6**	5.6*	0.55	0.55	1.2	0.0
طول خوشه	7.2*	0.7	13.7**	26.8**	0.12	0.28	0.0
وزن هزار دانه	9.3**	5.0*	14.6**	28.6**	0.03	0.07	0.0
درصد دانهٔ پر	1.4	1.5	1.7	0.8	6.7	15.7	0.0
درصد دانهٔ خالی	1.4	1.5	1.7	0.8	6.8	15.9	0.0
عملکرد دانه	15.4**	۲۱/۰**	17.4**	0.3	2460	5740	0.0
عملکرد کاه	14.3**	۲۵/۱**	10.1**	0.8	14168	33059	0.0
شاخص برداشت	7.2*	1.2	8.7*	14.5**	1.6	3.8	0.0
درجهٔ ژلاتینی شدن	8.9**	15.0**	6.5*	1.4	0.0	0.0	0.0
قوام ژل	3.9*	4.5*	4.3*	1.7	0.8	1.9	0.0
درصد آمیلوز	3.5*	3.0	5.6*	0.21	0.01	0.03	0.0
طول برنج خام	7.5*	12.1**	2.5	8.1*	0.0	0.0	0.0
عرض برنج خام	2.4	1.1	0.3	9.4	0.0	0.0	0.0
نسبت طول به عرض	1.9	2.8	0.7	2.4	0.0	0.0	0.0
ری آمدن	12.3**	5.8*	25.2**	0.09	0.0	0.0	0.0

* و ** به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ معناداری در سطوح پنج و یک درصد است.

جدول ۵- ضرایب رگرسیون چندجمله‌ای درجهٔ دو کامل برای متغیرهای وابسته (x_1 مقدار آبیاری و x_2 مقدار نیتروژن است)

Table 5- Complete quadratic polynomial regression coefficients for dependent variables (x_1 is the amount of irrigation and x_2 is the amount of nitrogen)

$a_1+a_2x_1+a_3x_2+a_4x_1^2+a_5x_2^2+a_6\,x_1x_2$

پارامترها	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
ارتفاع بوته	106.2	**2.3**	4.98	-0.3	-5.15	2.1
تعداد پنجه	10.63	0.16	1.53	0.11	-1.58	-0.27
طول خوشه	20.77	-0.067	0.13	0.39	-1.0	0.47
وزن هزار دانه	20.69	-0.25	0.03	-1.26	0.62	-0.25
عملکرد دانه	581.0	-5.7	131.0	3.59	-171.0	15.3
عملکرد کاه	1293.7	17.6	345.3	-72.0	-307.2	54.2
شاخص برداشت	28.59	-0.65	-0.95	1.77	0.97	2.45
درجهٔ ژلاتینی شدن	5.48	0.083	-0.05	-0.04	-0.04	-0.025
قوام ژل	40.54	-1.23	0.217	-0.045	-1.39	-0.60
درصد آمیلوز	21.39	-0.09	0.09	-0.039	0.266	0.03
ری آمدن	1.72	0.01	-0.018	-0.069	0.06	0.002

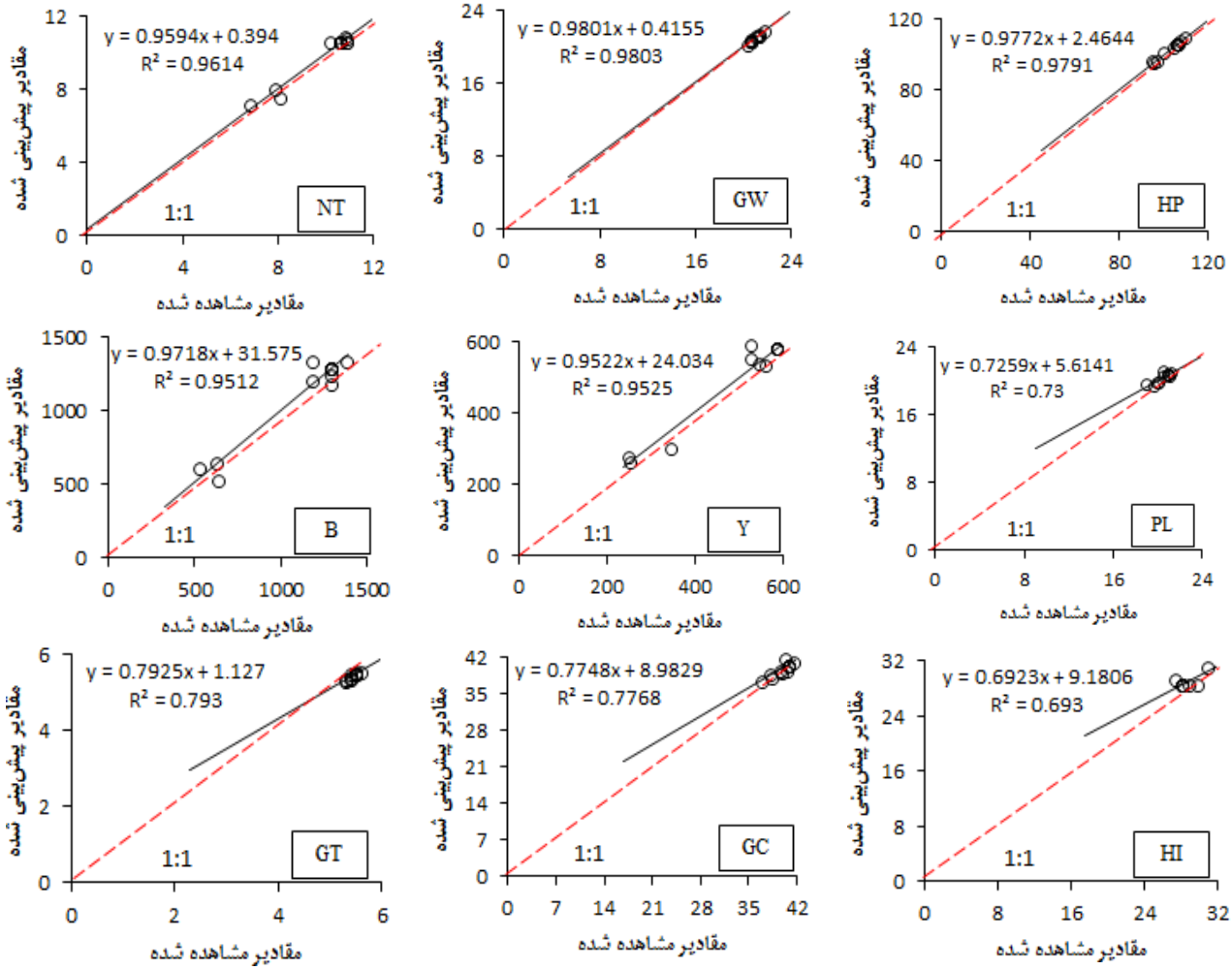
نتایج به‌دست آمده با مشاهدات سایر محققان از جمله Mansouri et al. (2021) و Koocheki et al. (2014) مطابقت داشت. نتایج به‌دست آمده توسط این محققان نیز نشان داد که مدل رگرسیونی درجهٔ دو برای پیش‌بینی صفات دارای خطای قابل چشم‌پوشی، صحت کافی و کارایی مطلوب بود. ضریب تبیین برای پارامترهای مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل رگرسیونی توانایی کافی برای پیش‌بینی بیش از ۹۰ درصد تغییرات پارامترهای ارتفاع بوته، تعداد پنجه، وزن هزار دانه، عملکرد و زیست‌توده را داشت. هم‌چنین، این مدل رگرسیونی توان لازم برای پیش‌بینی بیش از ۷۰ درصد تغییرات پارامترهای طول خوشه، درجهٔ ژلاتینی شدن، درصد آمیلوز و قوام ژل را داشت. نتایج برای سایر پارامترها نشان‌دهندهٔ توانایی مدل رگرسیون برای پیش‌بینی بیش از ۵۰ درصد تغییرات بود که با توجه به این‌که مقادیر خطا و صحت به‌دست آمده برای این پارامترها قابل‌قبول بود، این نتایج نیز پذیرفته می‌شود. نتایج آزمون t برای مقایسهٔ خط رگرسیون برازش داده شده برای هر متغیر وابسته با خط یک به یک بررسی و نتایج آن نشان داد که شیب و خط برازش برای همهٔ صفات قابل‌قبول بود (جدول ۷). نحوهٔ واکنش پارامترها به تغییرات مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن در شکل ۳ به‌صورت سه بعدی نشان داده شده است. در این شکل، تغییرات هر پارامتر برای مقدار آب آبیاری از پنج به صفر میلی‌متر اندازهٔ ترک (تغییر از کد منفی یک به مثبت یک)

و مقدار کود نیتروژن از صفر به ۹۰ کیلوگرم در هکتار (تغییر از کد منفی یک به مثبت یک) نشان داده شده است.

جدول ٦- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعهٔ راتون برنج

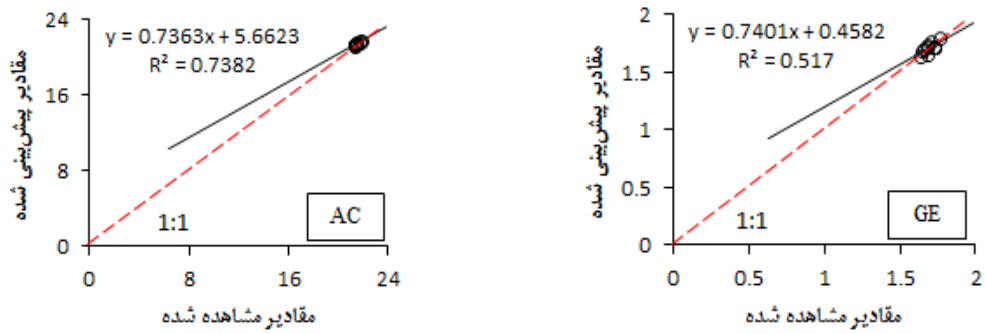
Table 6- Statistical values for the studied traits of ratoon rice

d	EF	NRMSE	RMSE	MBE	صفات
0.99	0.97	0.01	0.19	-0.1	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)
0.99	0.96	0.01	0.07	0.01	تعداد پنجه
0.99	0.72	0.01	0.09	0.01	طول خوشه (سانتی‌متر)
0.99	-3.39	0.01	0.21	0.52	وزن هزار دانه (گرم)
0.99	0.95	0.01	7.6	0.04	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
0.99	0.95	0.01	18.0	-0.01	عملکرد کاه (کیلوگرم در هکتار)
0.99	0.69	0.01	0.36	0.01	شاخص برداشت (درصد)
0.99	0.79	0.01	0.01	0.01	درجهٔ ژلاتینی شدن (درجه سانتی‌گراد)
0.99	0.77	0.01	0.17	-0.01	قوام ژل (میلی‌متر)
0.99	0.73	0.01	0.02	0.01	درصد آمیلوز
0.99	0.22	0.01	0.01	-0.01	ری‌آمدن (میلی‌متر)



شکل ۲- داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شدهٔ صفات مورد مطالعه و مقایسهٔ خط ۱:۱ (ممتد) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده (خط منقطع) (حروف HP، NT، PL، GW، Y، B، HI، GT و GC به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ ارتفاع بوته، تعداد پنجه، طول خوشه، وزن هزار دانه، عملکرد، زیست‌توده، شاخص برداشت، درجهٔ ژلاتینی شدن و قوام ژل هستند)

Figure 2- Observed and predicted data of studied traits and 1:1 line comparison (continuous) with fitted regression between observed and predicted data (dashed line) (letters HP, NT, PL, GW, Y, B, HI, GT, and GC indicate plant height, number of tillers, spike length, thousand seed weight, yield, biomass, harvest index, gelatinization degree، gel consistency، respectively)



ادامهٔ شکل ۲- داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شدهٔ صفات مورد مطالعه و مقایسهٔ خط ۱:۱ (ممتد) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده (خط منقطع) (حروف AC و GE به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ درصد آمیلوز و ری‌آمدن هستند)

Continuated Figure 2- Observed and predicted data of studied traits and 1:1 line comparison (continuous) with fitted regression between observed and predicted data (dashed line) (letters AC and GE indicate amylase content percentage and grain elongation, respectively)

جدول ۷- نتایج آزمون t برای مقایسهٔ شیب و عرض از مبدأ خط ۱:۱ با رابطهٔ رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهداتی)

Table 7- T-test results for comparing the slope and width from the origin of the 1:1 line with the fitted regression equation between the observed and predicted data (simulated = a + b × observed)

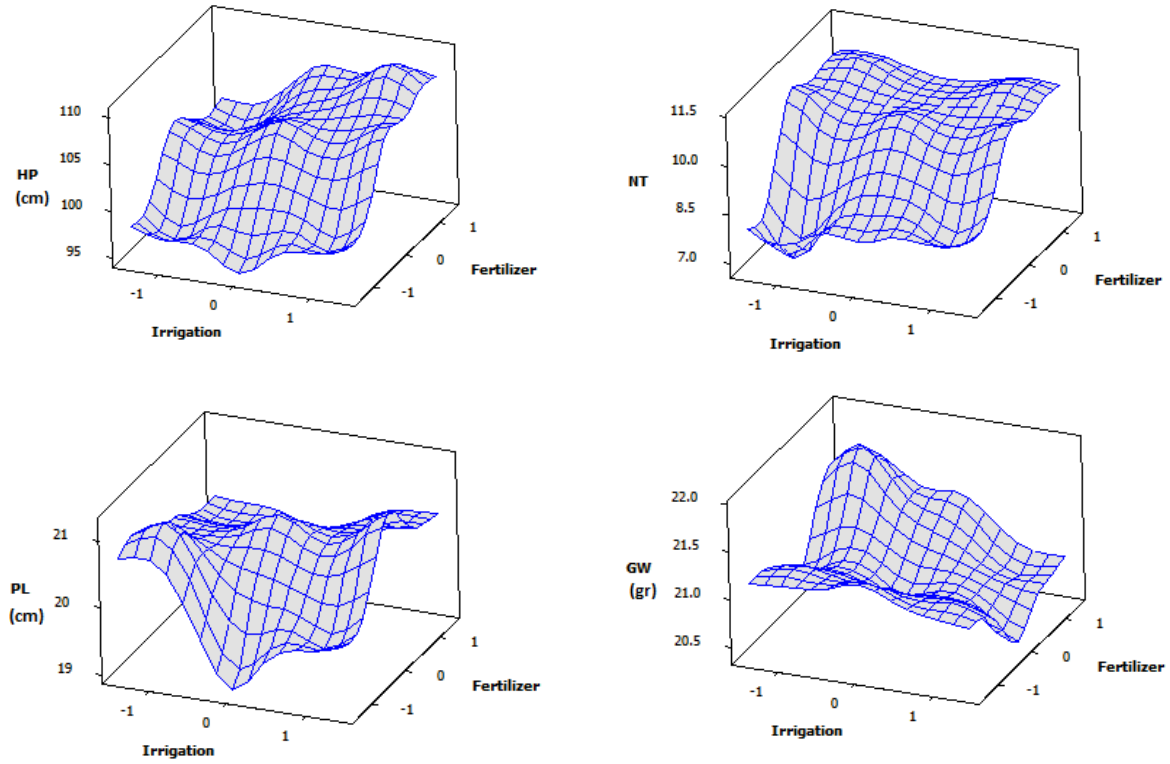
صفت	عرض از مبدأ (a)		شیب (b)		t	فرض صفر
	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	b=1،a=0
ارتفاع بوته	2.46	4.5	0.97	0.04	22.6	0.06	پذیرش
تعداد پنجه	0.39	0.60	0.95	0.06	16.5	0.01	پذیرش
طول خوشه	5.6	3.7	0.72	0.18	5.4	0.03	پذیرش
وزن هزار دانه	0.41	3.2	0.98	0.16	4.7	1.6	پذیرش
عملکرد دانه	24.0	34.9	0.95	0.06	14.8	0.03	پذیرش
زیست‌توده	31.5	77.2	0.97	0.06	14.6	0.03	پذیرش
شاخص برداشت	9.18	6.0	0.69	0.20	4.9	0.01	پذیرش
درجه ژلاتینی شدن	1.12	0.83	0.79	0.15	6.4	0.00	پذیرش
قوام ژل	8.98	6.4	0.77	0.16	6.1	0.01	پذیرش
درصد آمیلوز	5.66	3.8	0.73	0.18	5.5	0.01	پذیرش
ری آمدن	0.45	0.34	0.74	0.20	3.4	1.4	پذیرش

با افزایش مقدار آب آبیاری در مقادیر کود کم، تفاوت چندانی در ارتفاع بوته مشاهده نشد. در مقادیر کود بیش‌تر، اثر آب آبیاری بر ارتفاع بوته بسیار شدید بود. مقدار کود نیتروژن در هر دو حالت آب آبیاری کم و زیاد قابل‌توجه بود. گرچه اثر آن در شرایط تأمین کامل آب آبیاری بیش‌تر بود. مقدار آب آبیاری اثر چندانی بر تعداد خوشه نداشت، ولی مقدار کود نیتروژن بر تعداد خوشه اثر افزایشی داشت. در محدودهٔ صفر تا مثبت یک، مقدار اثرپذیری تعداد خوشه از مقدار کود نیتروژن تقریباً ثابت بود. اثر هر دو عامل کود نیتروژن و آب آبیاری بر طول خوشه از رابطهٔ منظمی پیروی نمی‌کرد. کم‌ترین تعداد خوشه در مقادیر زیاد آب آبیاری و مقادیر کم‌تر کود نیتروژن مشاهده شد. در سایر حالات تعداد خوشه در محدودهٔ ۲۱-۲۰ عدد بود. افزایش مقدار آب آبیاری سبب کاهش وزن هزار دانه شد. در مقادیر پایین آب آبیاری، افزایش کود نیتروژن سبب افزایش وزن هزار دانه شد. تغییرات عملکرد و زیست‌تودهٔ منظم‌تر و قاعده‌مندتر از سایر پارامترها بود. افزایش کود نیتروژن اثر بیش‌تری نسبت به مقادیر آب آبیاری بر افزایش عملکرد دانه و زیست‌توده داشت. به همین دلیل مقادیر بالای عملکرد دانه (بیش‌تر از ۵۵۰ کیلوگرم در هکتار) و زیست‌توده (بیش‌تر از ۱۲۵۰ کیلوگرم در هکتار) در محدودهٔ کدهای صفر تا یک برای کود نیتروژن مشاهده شد. تغییرات شاخص برداشت قاعدهٔ منظمی نداشت و در محدودهٔ کد آبیاری بین یک تا ۰/۷- مشاهده شد. بیش‌ترین مقدار درجهٔ ژلاتینی شدن با تأمین کامل آب آبیاری و عدم مصرف نیتروژن به‌دست آمد. تغییرات سه پارامتر قوام ژل، درصد آمیلوز و میزان ری‌آمدن نیز نشان داد که این پارامترها نیز از تغییرات منظمی در شرایط مختلف آب آبیاری و کود نیتروژن پیروی نمی‌کنند. براساس کلیهٔ نتایج، برای تعیین میزان بهینهٔ عوامل مورد بررسی، لازم است از بهینه‌سازی استفاده شود. بدین‌منظور، ابتدا برای تعیین محدودهٔ مناسب بهینه‌سازی، نقشهٔ هم‌پوشانی پارامترها تهیه شد (شکل ۴).

در محدودهٔ پایین شکل ۴، که شامل پایین‌ترین مصرف کود نیتروژن است، کم‌ترین مقدار برای همهٔ پارامترها به‌دست آمد. این نشان می‌دهد که اثر کود نیتروژن نسبت به آب آبیاری اثر بیش‌تری بر افزایش اکثر پارامترها داشت. این نتایج در شکل ۳

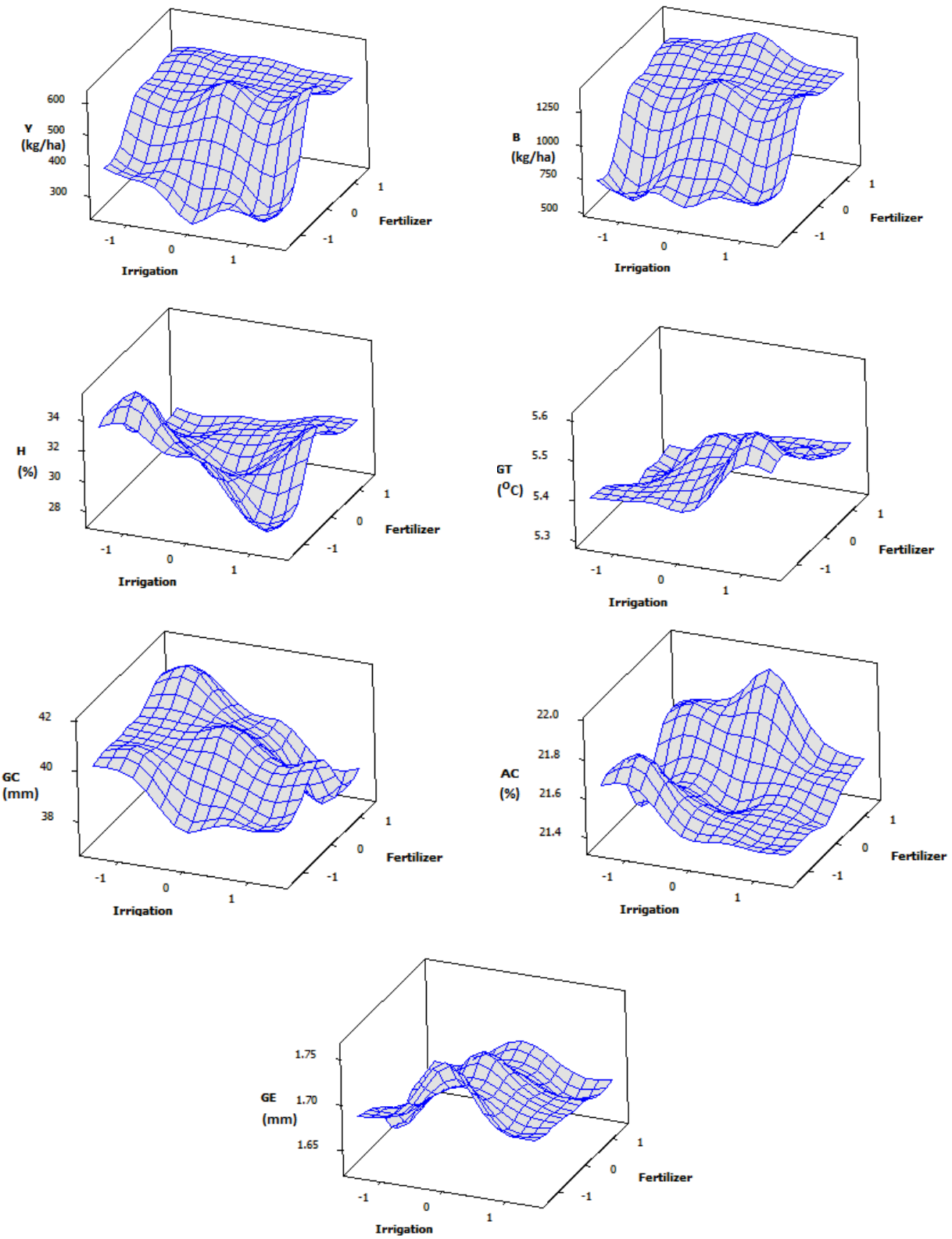
نیز به‌دست آمد. محدودهٔ سفید که مقدار بهینهٔ کلیهٔ پارامترها است برای بهینه‌سازی تعیین شد. بر اساس این نتایج، حدود بهینه برای پارامترهای ارتفاع بوته (۱۱۰–۹۰ سانتی‌متر)، تعداد پنجه (هشت تا ۱۲ سانتی‌متر)، طول خوشه (۲۲–۱۹ سانتی‌متر)، وزن هزار دانه (۲۲–۲۰ گرم)، عملکرد (۷۰۰–۵۰۰ کیلوگرم در هکتار)، زیست‌توده (۱۴۰۰–۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار)، درجهٔ ژلاتینی شدن (۵/۷–۵/۰)، قوام ژل (۴۲–۳۸ میلی‌متر)، درصد آمیلوز (۲۲–۱۹ درصد) و ری آمدن (۱/۸–۱/۵ میلی‌متر) تعیین و بهینه‌سازی انجام شد (جدول ۸). برای دست‌یابی به حداکثر کلیهٔ پارامترها، لازم است مقدار کود نیتروژن ۶۸ کیلوگرم در هکتار و مقدار ترک‌خوردگی ۳/۵ میلی‌متر باشد. با اعمال این عوامل، مقادیر هیچ‌کدام از پارامترها بیش‌تر از مقدار هدف به‌دست نیامد.

علت آن عدم رابطهٔ مشابه همهٔ پارامترها در افزایش یا کاهش مصرف آب آبیاری یا کود نیتروژن بود. در شرایط بهینه، عملکرد دانه و زیست‌توده به‌ترتیب ۵۵۴ و ۱۱۷۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد که به‌ترتیب ۱۰/۱ و ۵/۰ درصد بیش‌تر از میانگین مقادیر این پارامترها در شرایط مشاهداتی بود. تعداد پنجه، طول خوشه و شاخص برداشت، در شرایط بهینه به‌ترتیب ۱/۹، ۱/۴، ۳/۶ درصد بیش‌تر از مقادیر مشاهداتی این پارامترها بود. ارتفاع بوته و وزن هزار دانه در هر دو حالت بهینه و مشاهداتی مقادیر تقریباً برابری داشت. تغییرات مقادیر شاخص‌های کیفی درجهٔ ژلاتینی شدن، قوام ژل، درصد آمیلوز و ری‌آمدن در شرایط بهینه نسبت به مقادیر مشاهده شده به‌ترتیب ۱/۸ (کم‌تر)، ۴/۰ (بیش تر)، صفر و ۶/۲ (بیش‌تر) درصد بود.



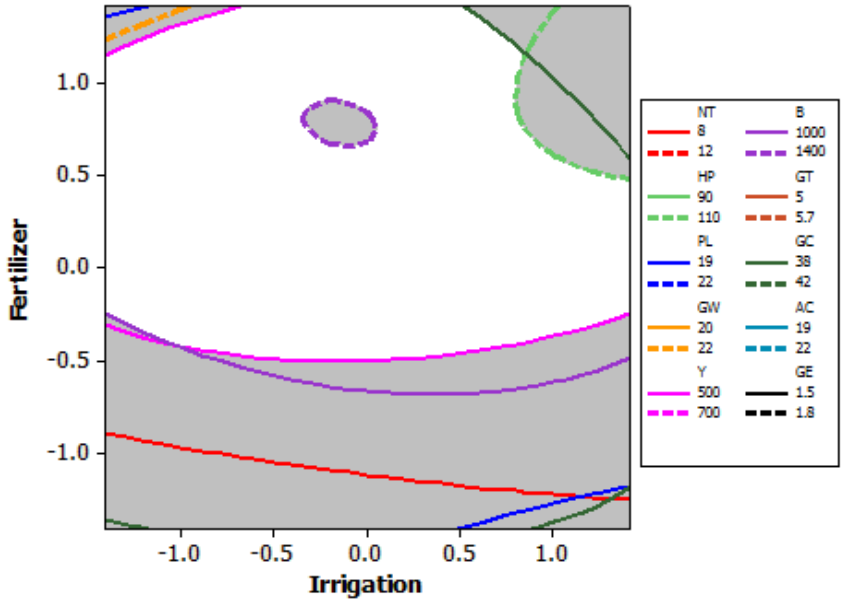
شکل ۳- واکنش پارامترها و سطح-پاسخ صفات مورد مطالعه نسبت به تغییرات مقدار آب آبیاری و سوپرجاذب

Figure 3- The reaction of the parameters and the response level of the studied traits to the changes in the amount of irrigation water and nitrogen fertilizer



ادامهٔ شکل ۳- واکنش پارامترها و سطح-پاسخ صفات مورد مطالعه نسبت به تغییرات مقدار آب آبیاری و سوپرجاذب

Continuation of Figure 3- The reaction of the parameters and the response level of the studied traits to the changes in the amount of irrigation water and nitrogen fertilizer



شکل ۴- نقشهٔ هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته شامل صفات مورد مطالعه (سطح بهینه با رنگ سفید مشخص شده است)

Figure 4- Map of layer overlap for optimal level of dependent variables including studied traits (optimal level is marked with white color)

جدول ۸- مقادیر هدف و شبیه‌سازی شده متغیرهای وابسته و مقدار بهینه متغیرهای مستقل در گیاه برنج راتون

Table 8- Target and simulated values of dependent variables and optimal value of independent variables in rice ratoon

متغیرهای وابسته/ مستقل	صفات	هدف	شبیه‌سازی شده	مقدار بهینه
متغیرهای وابسته	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	110	102	-
	تعداد پنجه	12	10.5	-
	طول خوشه (سانتی‌متر)	22	20.8	-
	وزن هزار دانه (گرم)	22	21	-
	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	700	554	-
	زیست‌توده (کیلوگرم بر هکتار)	1400	1173	-
	شاخص برداشت (درصد)	35	31	-
	درجهٔ ژلاتینی شدن (درجه سانتی‌گراد)	5.7	5.3	-
	قوام ژل (میلی‌متر)	42	41.5	-
	درصد آمیلوز	22	21.5	
	ری آمدن (میلی‌متر)	1.8	1.6	
متغیرهای مستقل	میزان ترک‌خوردگی (میلی‌متر)	3.5	-	-
	مقدار نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	68	-	-

٤- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر بهینه‌سازی اثر دو عامل میزان آب آبیاری و کود نیتروژن با استفاده از روش سطح-پاسخ انجام شد. بدین منظور مقادیر حداقل و حداکثر این عوامل با کدهای منفی یک و مثبت یک در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که به‌جز عملکرد و زیست‌توده، سایر صفات تغییرات یکنواخت و منظمی با افزایش مقادیر دو عامل آب آبیاری و کود نیتروژن نداشتند. به همین دلیل نقشهٔ هم‌پوشانی این عوامل تعیین و مشاهده شد که اثر کود نیتروژن بر اکثر پارامترها بیش‌تر از آب آبیاری بود. محدودهٔ بهینهٔ کلیهٔ عوامل در مقادیر ۰/۳- تا ۰/۵+ کود نیتروژن و ۱- تا ۱+ آب آبیاری و ۰/۵+ تا ۱+ کود نیتروژن و ۱- تا ۰/۷+ آب آبیاری قرار داشت. البته بخشی از منطقهٔ هم‌پوشانی این دو محدوده نیز فاقد مقدار بهینه برای پارامترها بود که توسط روش سطح-پاسخ در بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. پس از بهینه‌سازی مشاهده شد که مقدار دو پارامتر درجهٔ ژلاتینی شدن و قوام ژل کم‌تر از متوسط مقادیر مشاهداتی بود. مقدار پارامترهای درصد آمیلوز، وزن هزار دانه و ارتفاع بوته نسبت به شرایط مزرعه تغییری نداشتند و مقدار سایر پارامترها افزایش یافت. برای دست‌یابی به این نتایج لازم است مقدار آب آبیاری

در ترک‌خوردگی ۳/۵ میلی‌متر و مقدار کود نیتروژن به مقدار ۶۸ کیلوگرم بر هکتار در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به پاس فراهم آوردن امکان این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این تحقیق ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این تحقیق از طریق مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

اصلان اگدرنژاد: مفهوم‌سازی، انجام تجزیه‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله؛ **پریسا شاهین رخسار:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **سالومه سپهری صادقیان:** مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله.

منابع

ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، اگدرنژاد، اصلان، تافته، آرش، و احمدی، محسن. (۱۳۹۸). ارزیابی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۳)، ۷۱۵-۷۲۶. dor:20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4

احمدی، محسن، خاشعی سیوکی، عباس، و سیاری زهان، محمد حسن. (۱۳۹۵). بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus* L.) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۸(۴)، ۵۰۵-۵۲۰. doi:10.22067/jag.v8i4.40517

احمدی، محسن، قنبرپوری، مرادعلی، و اگدرنژاد، اصلان. (۱۴۰۰). مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۸(۱)، ۱۵-۳۰. dor:20.1001.1.24764531.2021.8.1.2.0

اگدرنژاد، اصلان، ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، تافته، آرش، و احمدی، محسن. (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۵(۲)، ۵۳-۶۴. dor:20.1001.1.24764531.1397.5.2.7.2

جهان، محسن، امیری، محمد بهزاد، و نوربخش، فرانک. (۱۳۹۵). بررسی اثر مقادیر مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در شرایط کم‌آبیاری بر برخی ویژگی‌های اگرواکولوژیک ذرت (*Zea mays* L.) به روش سطح پاسخ. *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۴(۴)، ۷۶۴-۷۴۶. doi:10.22067/gsc.v14i4.48347

جهان، محسن، نصیری محلاتی، مهدی، خلیل زاده، حمیده، بیگناه، ریحانه، و رضوی، سیداحمدرضا. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی کاربرد کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در زراعت گندم پاییزه (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از روش سطح-پاسخ (RSM). *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۴(۱۳)، ۸۲۳-۸۳۹. doi:10.22067/gsc.v13i4.39788

حمید، زینب، سلطانی محمدی، امیر، و احمدی، محسن. (۱۴۰۱). ارزیابی روش‌های فاکتوریل کامل، تاگوچی و طرح مربع مرکزی در کاهش آبشویی نیترات از خاک تحت تیمار زئولیت. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۴۹)، ۹۰-۱۰۷. doi:10.22125/iwe.2022.158509

خاشعی سیوکی، عباس، هاشمی، سیدرضا، و احمدی، محسن. (۱۳۹۵). کاربرد روش تاگوچی در ارزیابی سبز شدن زعفران (*Crocus sativus L.*) تحت تأثیر زئولیت و برنامه‌ریزی آبیاری. *پژوهش‌های زعفران*، ۴(۲)، ۲۶۶-۲۷۸. doi:10.22077/jsr.2017.524

ضیایی‌فر، سمیرا، خزیمه‌نژاد، حسین، علی‌نژاد، حسن، و درزی نفت چالی، عبداله. (۱۴۰۱). ارزیابی تاثیر مدیریت آب و روش‌های مختلف عرضه کود نیتروژن بر کارآیی مصرف آب و عملکرد برنج. *پژوهش های حفاظت آب و خاک*، ۲۹(۲)، ۱۵۴-۱۳۵. doi:0.22069/jwsc.2022.19993.3540

گودرزی، فرناز، دلشاد، مجتبی، منصوری، حامد، و سلطانی، فروزنده. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی فاکتورهای کود نیتروژن و فاصله بوته روی ردیف در گیاه اسفناج رقم Harrier به روش سطح پاسخ. *علوم باغبانی ایران*، ۱(۵۲)، ۱۳۹-۱۵۱. doi:10.22059/ijhs.2019.283357.1663

منصوری، حامد، بنایان اول، محمد، رضوانی‌مقدم، پرویز، و لکزیان، امیر. (۱۳۹۳). مدیریت کوددهی نیتروژن، آبیاری و تراکم کاشت در گیاه دارویی موسیر ایرانی با استفاده از روش بهینه‌سازی مرکب مرکزی. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۴(۴)، ۴۱-۶۰. doi:10.22055/jise.2021.34154.1922

منصوری، حامد، نوشاد، حمید و حسنی، مهدی. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و آب در چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ. *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۱۳(۱)، ۵۷-۷۲. doi:10.22067/jag.v13i1.79767

References

Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., & Egdernezhad, A. (2021). Applied irrigation water of wheat using sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop. *Water Management in Agriculture*, *8*(1), 15-30. dor:20.1001.1.24764531.2021.8.1.2.0. [In Persian]

Ahmadee, M., Khashei Siuki, A., & Sayyari, M.H. (2015). Comparison of efficiency of different equations to estimate the water requirement in saffron (*Crocus sativus L.*) (Case study: Birjand Plain, Iran). *Journal of Agroecology*, *8*(4), 505-520. doi:10.22067/jag.v8i4.40517. [In Persian]

Aslan, N. (2007). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator

for chromite concentration. *Powder Technology, 86*, 769–776. doi:10.1016/j.powtec.2007.10.002

Azeez, M.A., & Shafi, M. (1966). *Quality of Rice Dept.* of Agriculture Bulleting, Pakistan, 50 pp.

Box, G.E.P., & Hunter, J.S. (1957). Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistic, 28*(1), 195-241.

Box, G.E.P., & Wilson, K.B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series* B (Statistical Methodology), *13*, 1–45. doi:10.1007/978-1-4612-4380-9_23

Cagampang, G.B, Perez, C.M., & Juliano, B.O. (1973). A gel Consistency test for eating quality of Rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 24*, 1589-1594. doi:10.1002/jsfa.2740241214

Ebrahimipak, N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to simulate rapeseed yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 13*(3-75), 715-726. dor:20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4. [In Persian]

Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Canola irrigation scheduling using AquaCrop model in Qazvin Plain. *Water Management in Agriculture, 5*(2), 53-64. dor:20.1001.1.24764531.1397.5.2.7.2. [In Persian]

Goodarzi, F., Delshad, M., Mansouri, H., & Soltani, F. (2021). Optimization of nitrogen fertilizer and plant spacing on the row parameters in spinach cv. "Harrier" using response surface methodology. *Iranian Journal of Horticultural Science, 52*(1), 139-151. doi:10.22059/ijhs.2019.283357.1663. [In Persian]

Hamid, Z., Soltani-Mohammadi, A., & Ahmadee, M. (2022). Evaluation of full factorial, taguchi and central composite design methods in reducing nitrate leaching from soil under zeolite treatment. *Journal of Irrigation and Water Engineering, 13*(49), 90-107. doi:10.22125/iwe.2022.158509. [In Persian].

Islam, M.S., & Mirza, H. (2008). Ratoon rice response to different fertilizer doses in irrigated condition. *Agriculturae Conspectus Scientificus (Poljoprivredna Znanstvena Smotra), 73*(4), 197-202. https://hrcak.srce.hr/31230

Jahan, M., Amiri, M.B., & Noorbakhsh, F. (2017). Evaluation of the increased rates of water super absorbent and humic acid application under deficit irrigation condition on some agroecological characteristics of zea mays using response surface methodology. *Iranian Journal of Field Crops Research, 14*(4), 746-764. doi:10.22067/gsc.v14i4.48347. [In Persian]

Jahan, M., Nassiri-Mahallati, M., Khalilzade, H., Bigonah, R., & Razavi, A.R. (2016). Optimizing of nitrogen, phosphorus and cattle manure fertilizers application in winter wheat production using response-surface methodology (RSM). *Iranian Journal of Field Crops Research, 13*(4), 823-839. doi:10.22067/gsc.v13i4.39788. [In Persian]

Khashei Siuki, A., Hashemi, S.R., & Ahmadee, M. (2017). Application of the taguchi approach in the evaluation of saffron (*Crocus sativus L.*) emergence affected by zeolite and irrigation scheduling. *Journal of Saffron Research, 4*(2), 266-278. doi:10.22077/jsr.2017.524. [In Persian]

Koocheki, A., Nassiri, M., Moradi, R., & Mansouri, H. (2014). Optimizing water, nitrogen, and crop density in canola cultivation using response surface methodology and central composite design. *Soil Science and Plant Nutrition, 1*, 1-13. doi:10.1080/00380768.2014.893535

Little, R.R,, Hilder, G.B., & Dawson, E.H. (1958). Differential effect of dilute alkali on 25 varieties of milled white rice. *Cereal Chemistry, 35*, 111-126.

Mansouri, H., Bannayan, 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. *Agricultural Science and Sustainable Production, 24*(4), 41-60. doi:10.22055/jise.2021.34154.1922. [In Persian]

Mansouri, H., Noshad, H., & Hassani, M. (2021). Optimization of nitrogen fertilizer and water consumption in sugar beet by using response-surface method. *Journal of Agroecology, 13*(1), 57-72. doi:10.22067/jag.v13i1.79767. [In Persian]

Montgomery, D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*, Fifth Ed., John Wiley & Sons, New York. 734 p.

Mostafazadeh-Fard, T.B, Jafari, F., Musavi, S.F., & Yazdani, M.R. (2010). Effects of irrigation water management on yield and water use of rice in cracked paddy soils. *Australian Journal of Crop Science. 4*(3), 136-141.

Shiraki, S.h, Cho, T.M., Htay, K.h.M., & Yamaoka, K. (2020). Effects of the double-cutting method for ratooning rice in the salibu system under different soil moisture conditions on grain yield and regeneration rate. *Agronomy*, 10, 1621-1634. doi:10.3390/agronomy10111621

Wu, C.F.J., & Hamada, M. (2009). *Experiments: Planning, analysis, and parameter design optimization*. Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 853p.

Ziaeifar, S., Khozeymehnezhad, H., Alinezhad, H., & Darzi-Naftchali, A. (2022). Evaluation of the influnce of water management and different methods of nitrogen application on rice yield and water use efficiency. *Journal of Water and Soil Conservation, 29*(2),135-154. doi:10.22069/jwsc.2022.19993.3540. [in Persian]

Zulkali, M.M.D, Ahmad, A.L., & Norulakmal, N.H. (2006). *Oryza sativa L* husk as heavy metal adsorbent: optimization with lead as model solution. *Bioresource Technology, 97*, 21-25. doi:10.1016/j.biortech.2005.02.007.