Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Optimizing the amount and splitting of nitrogen fertilizer in corn using response surface modeling

Karim Neysi[1], Aslan Egdernezhad[2]*, Fariborz Abbasi[3]

[1] M.Sc. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[2] Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[3] Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Abstract

Introduction

Corn is one of the most widely consumed cereals in the world, which is highly compatible with many climates. For this reason, corn has been cultivated in most regions of the world since ancient times. Therefore, it is also considered a part of people's food all over the world. The effect of nitrogen fertilizer, as an agricultural solution, on the growth and yield of corn has caused it to be split to increase the plant's access time to this nitrogen source. In fact, due to the leaching of nitrogen fertilizer, it is usually not applied in one step. For this reason, based on the prevailing conditions of the field, the operators divide it into two or more divisions and perform nitrogen fertilization during the growth period. In each division, it is necessary to determine and apply the optimal amount of nitrogen fertilizer in order to minimize environmental pollution in addition to being economical. It requires many field experiments, which require a lot of time and money. To solve this problem, the use of simulation and optimization models, such as response-surface modeling, is suggested. The response-surface method is one of the suitable optimization tools that has been considered in various sciences for many years. The statistical basis of this method is very complex and uses a multi-objective nonlinear model for optimization and modeling. The response-surface method first provides a suitable combination of treatments, and by considering them, a statistical model is created that has the best fit compared to other models. Next, the most optimal value is determined for the independent variables so that the value of the dependent variables reached their maximum or minimum.

Materials and Methods

For this purpose, the data collected from a research project, which was carried out in the 500-hectare farm of the Seedling and Seed Research Institute in two years (2011-2012), were used. Two factors consisted of fertilizer in three levels (N1: 100 and N2: 60% and N3: 50% of fertilizer requirement) and the time of splitting into three methods (T1: the farmer's application with two splittings; T2: three equal divisions and T3: four equal divisions) was considered. The response surface method was used to optimize yield and yield components. In the response-surface method, the code of -1, 0, and +1 for nitrogen indicates 50, 60, and 100 kg/ha of nitrogen fertilizer, respectively. The code of -1, 0, and +1 for fertilizer splitting indicates the number of 2, 3, and 4 nitrogen fertilizer splitting during the growing season, respectively. In this method, to fit the data, multivariate regression was used by adding linear terms, quadratic, and interaction between factors. Then, regression was evaluated based on the analysis of variance. The statistical criteria used included root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), mean bias error (MBE), model efficiency (EF), index of agreement (d), and coefficient of explanation (R^2).

Results and Discussion

The results of ANOVA showed that the linear and quadratic regression model for seed yield and the linear regression model for fertilizer efficiency was significant at the 5 % probability level (P-value ≤ 0.05). For water productivity, the splitting factor had a greater effect on the regression than the amount of fertilizer, although both factors did not show a significant effect. The regression model had a significant effect on the 1000 seed weight, number of seeds in a row, number of rows in a cob, cob length, and seed size. The regression of other variables was not statistically significant. Therefore, the response-surface method can be used to predict and optimize

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

variables with significant regression. The results showed that the regression model was capable of predicting variables including 1000 seed weight, number of seeds in a row, number of rows in a cob, corn length, and seed zinc content. But this model had an underestimation error (MBE ≤ 0.0) for all variables. The accuracy of the regression model for grain zinc content was in a good category (0.1 < NRMSE < 0.2) and for other variables in the excellent category (0.0 <NRMSE< 0.1). By increasing the amount of fertilizer (changing from code -1 to + 1), the yield initially decreased and then increased. With the increase of fertilizer splitting, corn yield decreased first and then increased. The effect of the amount and splitting of fertilizer on changes in the 1000 seed weight was linear and with the increase of these two factors, the 1000 seed weight also increased. This result was also observed for the number of seeds in the cob. In terms of cob length and grain zinc percentage, the two factors of fertilizer amount and splitting had similar effects on the increase of these two variables, but at low values of both factors, the mentioned variables decreased slightly. Increasing the amount and distribution of fertilizer caused an increase in the number of rows in the cob, but high amounts of these two factors had no effect on the increase in the number of rows in the cob. Except for the number of rows, other variables increased along with increasing the amount of fertilizer and its splitting. Providing 100% fertilizer requirement and increasing the number of divisions to 5 times, can increase maize yield by up to 1.5 tons per hectare. This was about 28% of the average yield and 6 % of the maximum corn yield in this study. The weight of the thousand seeds increased to 3.5 grams under optimal conditions, which increased by 32 and 9 % compared to the average and maximum values in this study, respectively. The variable of the row was not much of a change in the average variable (1.5 cm) and increased by only 1 %. The optimal length increased to 3.5 cm and the optimal rate increased to 62%.

Conclusion

In general, the optimization results of all variables showed that if the fertilizer requirement is applied as N1 and in five splittings; the amount of yield, 1000 seed weight, the number of seeds in a row, the length of the cob and the amount of seed will increase by 6, 9, 12, 18.5, and 19.6% respectively compared to the maximum values of these variables. Therefore, it is suggested to apply this scenario in the field to improve yield and yield criteria such as zinc concentration in corn seeds.

Keywords: Central square design, Fertilizer splitting, Seed zinc Content, Yield criteria

Article Type: Research Article

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

Citation: Neysi, K., Egdernezhad, A., & Abbasi, F. (2023). Optimizing the amount and splitting of nitrogen fertilizer in corn using response surface modeling. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 60-76.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11488.1132
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.6.0

Received: 10 September 2022, Received in revised form: 05 November 2022, Accepted: 06 November 2022, Published online: 06 November 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 4, pp. 60-76
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

بهینه‌سازی مقدارکود نیتروژن و تقسیط آن برای گیاه ذرت با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ

کریم نیسی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]، فریبرز عباسی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

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

[۳] استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

بهینه‌سازی مقدار و تقسیط کود نیتروژن می‌تواند سبب افزایش زمان دسترسی گیاه به این منبع غذایی پرمصرف شده و عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان زراعی را افزایش دهد. در این پژوهش به‌منظور تعیین مصرف بهینهٔ کود نیتروژن برای گیاه ذرت با استفاده از روش سطح-پاسخ، از داده‌های مستخرج از طرح تحقیقاتی اجرا شده در مزرعهٔ ۵۰۰ هکتاری مؤسسهٔ تحقیقات اصلاح و تهیهٔ نهال و بذر در دو سال زراعی استفاده شد. تیمارهای مورد بررسی در طرح مذکور شامل مقدار کود نیتروژن در سه سطح (N1؛ ۱۰۰ درصد نیاز کودی، N2؛ ۶۰ درصد نیاز کودی و N3؛ ۵۰ درصد توصیهٔ کودی)، زمان تقسیط کود به سه صورت (T1؛ دو تقسیط، T2؛ سه تقسیط و T3؛ چهار تقسیط) و روش آبیاری مزرعه، جویچه‌ای بود. شاخص‌های آماری مورد استفاده شامل 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) است. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی مورد استفاده قابلیت پیش‌بینی صفات عملکرد، وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد ردیف در بلال، طول بلال و میزان روی دانه را داشت. بنابراین مدل برای همهٔ صفات دچار خطای کم‌برآوردی ($MBE \leq 0$) شد. دقت مدل رگرسیونی برای میزان روی دانه در دستهٔ خوب ($۰/۲ \leq NRMSE \leq ۰/۱$) و برای سایر صفات در دستهٔ عالی ($۰/۱ \geq NRMSE \leq$ صفر) قرار داشت. به‌جز تعداد ردیف در بلال، سایر صفات با افزایش مقدار کود و تقسیط آن افزایش یافتند. نتایج بهینه‌سازی کلیهٔ صفات نشان داد که، اگر نیاز کودی به‌صورت کامل (N1) و تعداد تقسیم به پنج نوبت افزایش یابد؛ مقدار عملکرد، وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف، طول بلال و مقدار روی دانه به‌ترتیب ۶، ۹، ۱۲، ۱۸/۵ و ۱۹/۶ درصد نسبت به مقادیر حداکثر این متغیرها افزایش خواهد یافت. بنابراین، اعمال این سناریو در مزرعه برای بهبود عملکرد و شاخص‌های عملکردی مانند غلظت روی دانهٔ ذرت پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اجزای عملکرد، تقسیط کود، طرح مربع مرکزی، غلظت روی

نوع مقاله: پژوهشی

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

استناد: نیسی، کریم، اگدرنژاد، اصلان، و عباسی، فریبرز (۱۴۰۲). بهینه‌سازی مقدارکود نیتروژن و تقسیط آن برای گیاه ذرت با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۶۰-۷۶.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11488.1132

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.6.0

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۶۰ تا ۷۶

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

ذرت یکی از غلات پرمصرف در جهان است که سازگاری بالایی با اقالیم مختلف دارد. به‌همین دلیل ذرت در اکثر مناطق جهان از قدیم کشت می‌شود و به‌عنوان بخشی از غذای مردم در سراسر جهان به‌شمار می‌رود. میزان مصرف آن حدود ۲/۸ درصد غلات جهان و سطح زیرکشت آن در دنیا و ایران به‌ترتیب ۱۸۸ میلیون هکتار و ۱۴۰ هزار هکتار برآورد شده است (FAO, 2020). دسترسی مناسب به نیتروژن سبب بهبود رشد ذرت و افزایش عملکرد آن می‌شود (Abbasi et al., 2015; Namihira et al., 2011). با توجه به آبشویی کود نیتروژن، معمولاً مصرف آن در یک مرحله انجام نمی‌شود. به‌همین دلیل بهره‌برداران براساس شرایط حاکم بر مزرعه، آن را به دو یا چند تقسیط تقسیم کرده و در طول دورهٔ رشد، کوددهی نیتروژن را انجام می‌دهند. پژوهش‌ها نشان داده است که این کار سبب افزایش عملکرد، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف کود می‌شود (Tavangar et al., 2020; Preza-fontes et al., 2021). در هر تقسیط لازم است مقدار بهینه کود نیتروژن تعیین و اعمال شود تا علاوه‌بر مقرون به‌صرفه بودن، آلودگی محیط زیست هم به حداقل برسد. این کار نیازمند انجام آزمایش‌های متعدد مزرعه‌ای است که خود مستلزم صرف وقت و هزینهٔ زیاد است. برای حل این مشکل، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پیشنهاد شده است (Ebrahimipak et al., 2019).

روش سطح-پاسخ[1] به‌عنوان یکی از ابزارهای مناسب بهینه‌سازی است که از سال‌های قبل در علوم مختلف مورد توجه قرار گرفته است (Aslan, 2007; Kwak, 2005). مبنای آماری این روش بسیار پیچیده است و از یک مدل غیرخطی چندمنظوره برای بهینه‌سازی و مدل‌سازی استفاده می‌کند (Zulkali et al., 2006). روش سطح-پاسخ ابتدا ترکیب مناسبی از تیمارها را ارائه می‌کند که با در نظر گرفتن آن‌ها یک مدل آماری که بهترین برازش را نسبت به سایر مدل‌ها دارد ایجاد می‌شود. در ادامه، بهینه‌ترین مقدار برای متغیرهای مستقل تعیین می‌شود تا مقدار متغیرهای وابسته به حد بیشینه یا کمینهٔ خود برسند (Montgomery, 2001). روش سطح-پاسخ از چند زیرمجموعه تشکیل شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها طرح مربع مرکزی است (Wu and Hamada, 2009). طرح مربع مرکزی توسط Box and Wilson (1951) مطرح و به‌وسیلهٔ Box and Hunter (1957) اصلاح شد. گرچه این روش عمدتاً در صنایع و علوم آزمایشگاهی کاربرد دارد، اما با توجه به خصوصیات آن، در سال‌های اخیر در بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از روش‌های جایگزین و مناسب برای طرح‌های آزمایشی کامل، مثل فاکتوریل، در نظر گرفته شده است (Khashei Siuki et al., 2017). در طرح مربع مرکزی تعداد تیمارها و تکرارها نسبت به طرح فاکتوریل کم‌تر شده اما مطالعه و تحلیل بیش‌تری روی داده‌ها انجام می‌شود و می‌توان ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای مستقل در آزمایش را فراهم کرد (Aslan, 2007; Khashei Siuki et al., 2017).

اهمیت و قابلیت‌های طرح مربع مرکزی سبب شده است تا از آن در مطالعات مختلف استفاده شود. در پژوهشی که برای تعیین سطوح بهینهٔ سوپرجاذب (با سطوح ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم بر هکتار)، اسیدهیومیک (با سطح ۴ و ۸ کیلوگرم در هکتار) و آب آبیاری (با سطوح ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) در گیاه ذرت انجام و سناریوی مناسب برای افزایش عملکرد و برخی اجزای عملکرد پیشنهاد شد. در این پژوهش، بهینه‌ترین حالت برای مصرف سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آب آبیاری به‌ترتیب ۱۲۶/۰۶ کیلوگرم در هکتار، ۷/۱۹ کیلوگرم در هکتار و ۳۴۷/۴۷ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد (Jahan et al., 2017). بهینه‌سازی عامل کود نیتروژن (با سطوح بالا و پایین برابر با صفر و ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) و آب آبیاری (با سطوح بالا و پایین به میزان ۸۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) در گیاه چغندر قند توسط Mansouri et al. (2021) انجام شد. این پژوهش‌گران نشان دادند که با مقدار ۱۳۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰۶۷۷ مترمکعب در هکتار آب آبیاری، بیش‌ترین عملکرد چغندر قند به‌دست می‌آید.

به‌کارگیری روش مربع مرکزی برای بهینه‌سازی کود نیتروژن و فاصلهٔ بوته روی ردیف در گیاه اسفناج نشان داد که با رعایت مصرف ۱۸۹/۹ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن (در شرایط اعمال سطوح بالا و پایین برابر با صفر و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار) و فاصلهٔ ۷ سانتی‌متر (در شرایط اعمال سطوح بالا و پایین به میزان ۷ و ۱۵ سانتی‌متر) می‌توان به بهترین نتیجه از نظر اقتصادی دست یافت (Goodarzi et al., 2021). استفاده از روش بهینه‌سازی عوامل مورد استفاده در گیاه پیاز نشان داد که مصرف ۹۳ کیلوگرم کود نیتروژن به همراه ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری سبب بهینه‌سازی منابع تولید و کاهش آلودگی زیست‌محیطی می‌شود (Mansouri et al., 2014). در پژوهشی بهینه‌سازی نیتروژن (با سطوح بالا و پایین صفر و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار)، مقدار آب آبیاری (با سطوح بالا و پایین ۱۵۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) و تراکم گیاه (با سطوح بالا و پایین ۵۰ و ۱۵۰ بوته در مترمربع) برای گیاه کلزا مورد مطالعه قرار گرفت (Koocheki et al., 2014). نتایج آن‌ها نشان داد که حالت بهینه برای دست‌یابی به حداکثر عملکرد، استفاده از ۹۲ کیلوگرم کود نیتروژن، ۲۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته

[1] Response Surface Methodology (RSM)

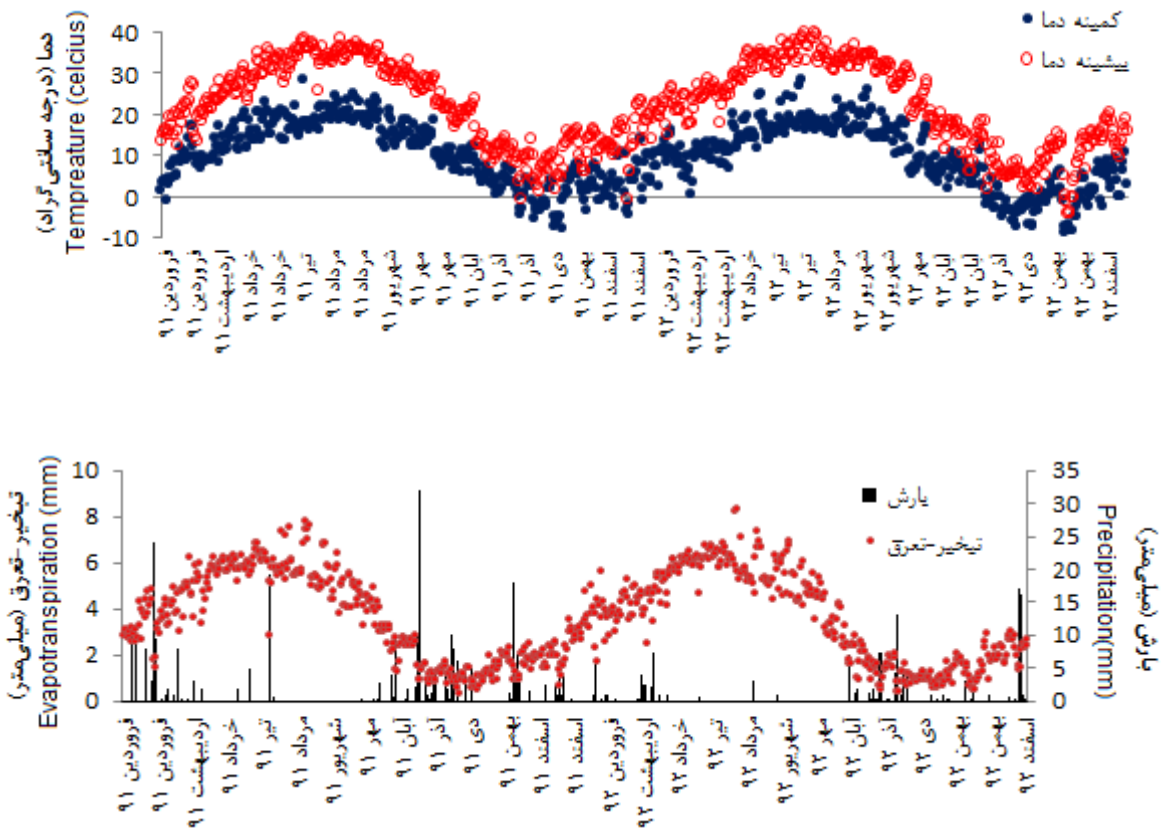
در متر مربع است. در پژوهشی که توسط Jahan et al. (2016) روی گیاه گندم انجام شد، سطوح بهینهٔ کودهای نیتروژن، فسفر و دامی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این محققان نشان داد که با مصرف ۱۴۵/۴ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم فسفر و ۱۸/۴ تن کود دامی می‌توان به بهترین نتیجه از نظر اقتصادی دست یافت. در این پژوهش سطوح بالا و پایین برای کودهای نیتروژن، فسفر و دامی به‌ترتیب صفر و ۳۰۰، صفر و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار و صفر و ۳۰ تن در هکتار بود.

بررسی منابع نشان داد که روش سطح–پاسخ می‌تواند به تعیین بهینهٔ سطوح مختلف عوامل مصرفی در کشاورزی کمک کند. این روش می‌تواند برای گیاه ذرت که عملکرد و اجزای عملکرد آن تحت تأثیر مقدار و تقسیط کود است و به شدت تغییر می‌کند، مورد استفاده قرار گیرد. براساس بررسی منابع، تاکنون این پژوهش برای تعیین مقدار و تقسیط بهینهٔ کود نیتروژن در گیاه ذرت انجام نشده است. بنابراین، در این پژوهش به بهینه‌سازی مقدار کود نیتروژن و تقسیط آن در آبیاری جویچه‌ای گیاه ذرت پرداخته شد.

۲– مواد و روش‌ها

۲–۱– منطقهٔ مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش برگرفته از طرح تحقیقاتی انجام شده روی گیاه ذرت در مزرعهٔ ۵۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیهٔ نهال و بذر واقع در شهرستان کرج با طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجهٔ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا در دو سال زراعی است (Abbasi et al., 2015؛ Abbasi et al., 2011). این منطقه از نظر آب و هوایی بر اساس طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق نیمه‌خشک با زمستان سرد است. متوسط بارندگی در شهرستان کرج ۲۴۵ میلی‌متر و متوسط درجهٔ هوا ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد است. سایر متغیرهای هواشناسی نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.



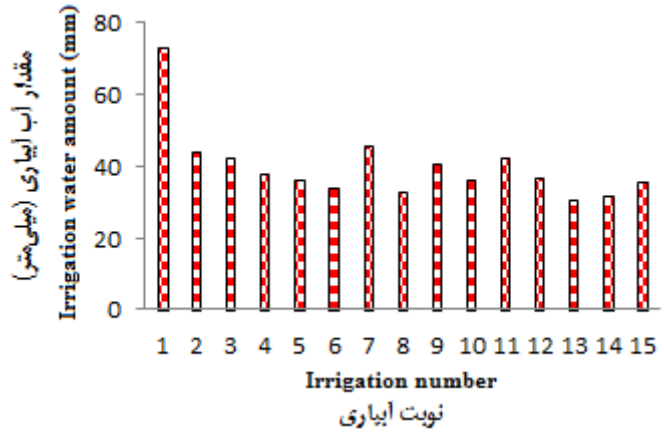
شکل ۱– داده‌های هواشناسی در محل آزمایش

Figure 1- Meteorological data in study area

در این پژوهش، مقدار کود نیتروژن (در سه سطح N1؛ ۱۰۰، N2؛ ۶۰ درصد نیاز کودی و N3؛ عرف زارعین منطقه و به‌صورت ۵۰ درصد توصیهٔ کودی قبل از کاشت و ۵۰ درصد در مرحلهٔ ۶–۴ برگی) و زمان تقسیط کود (به سه صورت T1؛ دو تقسیط مساوی،

T2؛ سه تقسیط مساوی و T3؛ چهار تقسیط مساوی) جهت پژوهش در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که در روش عرف زارعین منطقه، کود کم‌تری مصرف می‌شود و تقسیط آن در دو مرحله است، به‌عنوان یک تیمار با حد پایین در نظر گرفته و نیتروژن مورد نیاز از طریق کود اوره تأمین شد. مقدار آب آبیاری بر اساس نیاز آبی کامل گیاه و بر اساس تبخیر از سطح تشت کلاس A و اعمال ضرایب تشتک و گیاهی تعیین شد. رقم مورد استفاده در این پژوهش ذرت دانه‌ای هیبرید سینگل کراس ۲۶۰ بود که در دو سال زراعی به روش آبیاری جویچه‌ای مورد کشت قرار گرفت. عملیات کاشت این رقم در اردیبهشت هر سال و با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار انجام شد.

برای تعیین نیاز آبی از داده‌های ایستگاه هواشناسی در فاصلهٔ دو کیلومتری از مزرعهٔ تحقیقاتی استفاده شد. بر اساس توصیهٔ ایستگاه هواشناسی ضریب تشتک برابر با ۰/۶۵ و ضریب گیاهی نیز براساس مقادیر ارائه شده در نشریهٔ فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. پنج جویچه برای هر تیمار حفر شد که سه جویچهٔ میانی برای برداشت محصول و دو جویچهٔ کناری برای اثر حاشیه‌ای منظور شدند. ابعاد هر کرت آزمایشی ۱۲۰ متر مربع بود. دبی ورودی و خروجی هر جویچه به‌ترتیب با استفاده از کنتور و فلوم WSC تیپ سه اندازه‌گیری شد. مقادیر آب آبیاری برای هر تیمار در شکل ۲ قابل مشاهده است. مصرف کود به‌صورت کود آبیاری اعمال شد. کود نیتروژن مورد استفاده ابتدا در یک ظرف ۲۰ لیتری در آب حل و سپس به آب آبیاری در ابتدای جویچه‌ها تزریق می‌شد. به‌دلیل این‌که تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیش‌تری به همراه دارد، تزریق کود در ۲۰ تا ۳۰ دقیقهٔ انتهای آبیاری انجام می‌شد. مشخصات خاک مزرعه نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲- میزان آب مصرفی
Figure 2- The amount of water consumed

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعهٔ مورد آزمایش
Table 1- Some physical and chemical characteristics of the soil

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مربع)	رطوبت حجمی در PWP (درصد)	رطوبت حجمی در FC (درصد)	رطوبت اشباع (درصد)	EC (دسی‌زیمنس بر متر مربع)	pH
0-20	لوم	1.34	15	29	45	1.16	7.77
20-40	لوم	1.46	15	29	44	0.82	7.67

روش سطح-پاسخ به‌صورت تابع چندمتغیره طبق رابطهٔ (۱) تعریف می‌شود (Kalavathy et al., 2009).

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_k) \qquad (۱)$$

که در این رابطه، y متغیر پاسخ و x متغیر مستقل است. یکی از انواع روش‌های سطح-پاسخ، طرح مربع مرکزی است. این روش به‌صورت طرح آزمایشی برای تعیین مقدار متغیرهای مستقل در تعیین متغیر وابسته پیش‌بینی شده تعریف شد. در این طرح، میانگین سطوح عوامل به‌عنوان نقطهٔ مرکزی در نظر گرفته می‌شود. در این روش، تیمارهای آزمایشی با اعداد ۱-، صفر و ۱+ بدون واحد نمایش داده می‌شوند که به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ بالاترین، میانگین و پایین‌ترین سطح متغیر مستقل هستند. برای تعیین تعداد تیمارها از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$2^k + 2k + r \qquad (۲)$$

در این رابطه، k نشان‌دهندهٔ تعداد عوامل مورد آزمایش و r تعداد تکرار است (Aslan, 2007). کد ضرایب و مقدار هر کدام از عوامل در جدول ۲ نشان داده شده است. کد ضرایب ۱-، صفر و ۱+ برای

نیتروژن به‌ترتیب نشان‌دهنده ۵۰، ۶۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن است. کد ضرایب ۱-، صفر و ۱+ برای تقسیط کود به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ تعداد ۲، ۳ و ۴ تقسیط کود نیتروژن در طول فصل رشد است.

جدول ۲- کد ضرایب و مقدار واقعی متغیرهای مستقل
Table 2- Coefficients code and actual values of independent variables

کد ضرایب		مقدار آزمایش	
نیتروژن	تقسیط کود	مقدار کود نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	تقسیط کود نیتروژن (تعداد)
0	0	60	3
+1	0	100	3
-1	+1	50	4
-1	0	50	3
0	0	60	3
0	0	60	3
0	0	60	3
0	0	60	3
0	+1	60	4
+1	-1	100	2
0	-1	60	2
-1	-1	50	2

برای برازش داده‌ها از رگرسیون چندمتغیره با افزودن جملات خطی، درجهٔ دو و اثر متقابل بین عوامل استفاده و بر اساس تجزیهٔ واریانس، رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. معادلهٔ چندجمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی نیز به شکل رابطهٔ (۳) است (Aslan, 2007).

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 + a_5 x_1 x_2 \quad (۳)$$

در این رابطه، y متغیر وابسته، i خصوصیات کمی و یا کیفی ذرت، a ضریب رابطه، x_1 متغیر مستقل کود نیتروژن و x_2 متغیر مستقل تقسیط کود نیتروژن است. در نهایت، معنادار بودن مدل و دقت آن در برازش داده‌ها مشخص شد. به‌منظور ارزیابی و آزمون معنادار بودن 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) به صورت رابطه‌های (۴-۹) بهره گرفته شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

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

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۶)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۷)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۸)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum (P_i - \overline{P})^2 \sum (O_i - \overline{O})^2} \quad (۹)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است. آماره‌های RMSE و NEMSE به‌ترتیب تعیین خطا و دقت مدل هستند. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهندهٔ دقت عالی مدل است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیش‌تر از ۰/۳ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آماره 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 عملکرد و بهره‌وری آب ذرت عدد کوچک‌تری به‌دست داده است. مقادیر آماره‌هایEF 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 است.

برازش رگرسیون بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و مقایسهٔ آن با خط ۱:۱ یکی از روش‌های اعتبارسنجی مدل‌ها به شمار می‌رود. اگر شیب خط رگرسیون برابر با یک باشد، بر خط ۱:۱ منطبق می‌شود. در این صورت نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی برابر هستند و مدل در شبیه‌سازی، دقت خوبی دارد. در غیر این صورت، با فاصله گرفتن خط رگرسیون از خط ۱:۱، از دقت مدل کاسته می‌شود. برای ارزیابی خط رگرسیون از رابطه زیر و آزمون t استفاده شد.

$$\Pr edicted = a + (b \times Observed) \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، b=1 به‌عنوان فرض صفر (H0) و b≠1 به‌عنوان 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. صفاتی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند شامل عملکرد، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف کود است. برای اندازه‌گیری عملکرد در انتهای دورهٔ رشد، نمونه‌گیری از تعداد ۱۰ بوته و به‌صورت تصادفی برای هر تکرار انجام شد. سپس عملکرد دانه در رطوبت ۱۴ درصد اندازه‌گیری شد. بهره‌وری مصرف آب (WP) و بهره‌وری مصرف کود (FP) به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱۱ و ۱۲) تعیین شدند.

$$WP = \frac{Y}{W} \qquad (۱۱)$$

$$FP = \frac{Y - Yo}{F} \qquad (۱۲)$$

در این روابط، Y عملکرد محصول (کیلوگرم)، W مقدار آب آبیاری (مترمکعب)، Y_0 عملکرد محصول در تیمار بدون کود (کیلوگرم) و F مقدار کود مصرفی (کیلوگرم) است.

برای دسته‌بندی داده‌های مزرعه‌ای و تجزیه و تحلیل آن‌ها از نرم‌افزار MINITAB استفاده شد. آزمون طرح مربع مرکزی در این نرم‌افزار طراحی و نتایج به‌دست آمده نیز به‌صورت جدول و نمودار با استفاده از این نرم‌افزار تهیه شد.

۳- نتایج و بحث

پیش از انجام عملیات، کفایت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های مورد استفاده برای صفات عملکرد، بهره‌وری آب، بهره‌وری کود، وزن هزاردانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد ردیف در بلال، طول بلال، پروتئین دانه، نیتروژن دانه و روی دانه در محدودهٔ بهترین خط برازش در پلات احتمالی نرمال[1] قرار داشتند. نتایج برای صفت عملکرد به‌صورت نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است. بنابراین داده‌های مورد استفاده نرمال هستند. پراکندگی باقیماندهٔ داده‌ها براساس مقادیر برازنده شده[2] نشان داد که روند خاصی در این خصوص وجود ندارد. بنابراین واریانس بین داده‌ها ثابت است و مقادیر مورد استفاده نسبت به انجام آزمایش مستقل هستند. لذا استفاده از این داده‌ها به‌منظور طرح مربع مرکزی بلامانع است.

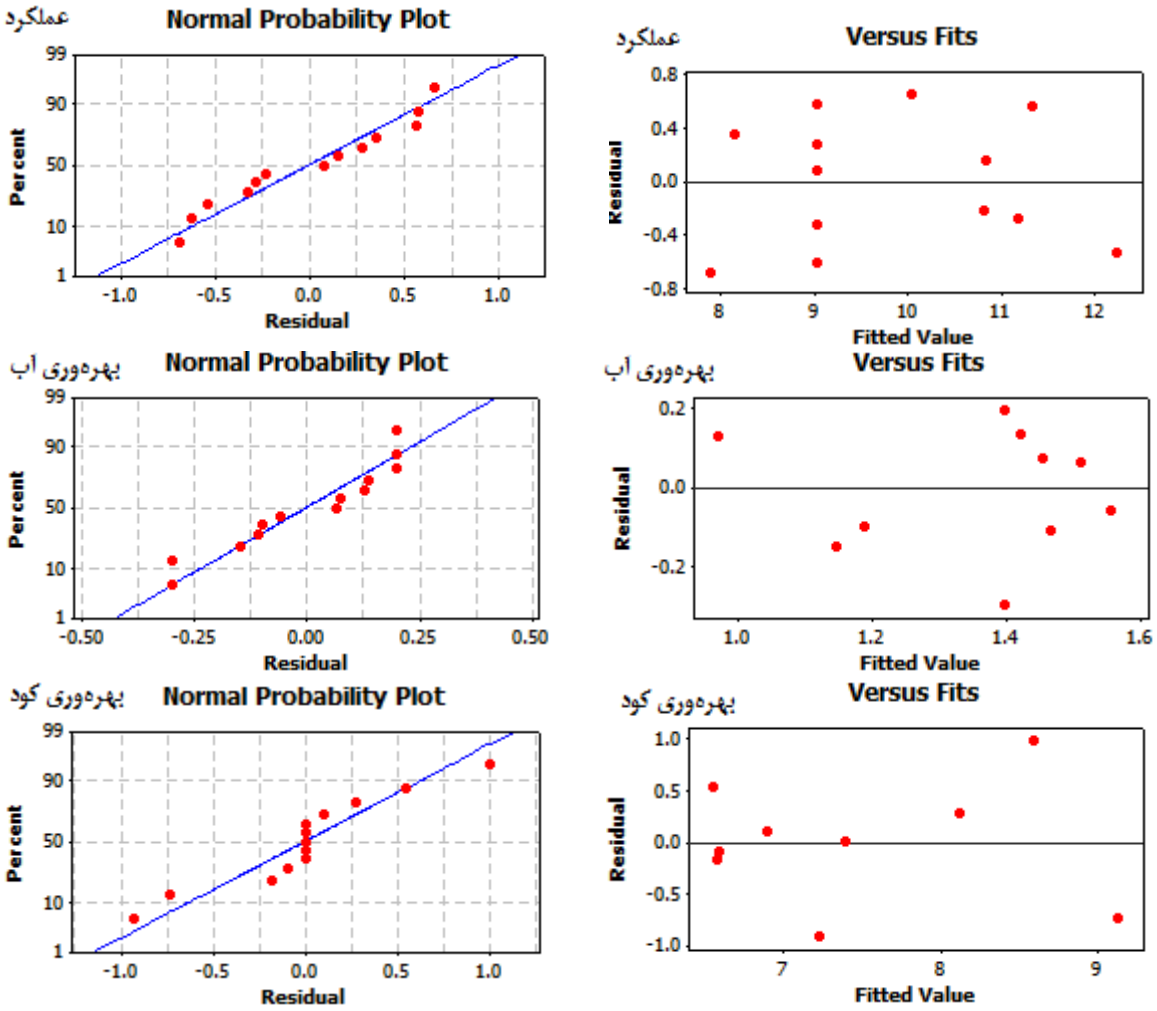
نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که مدل رگرسیونی خطی و درجهٔ دو برای عملکرد دانه و مدل رگرسیون خطی برای بهره‌وری کود در سطح احتمال ۵ درصد (P-value ≤ 0.05) معنادار شد (جدول ۳). برای بهره‌وری آب، عامل تقسیط بر رگرسیون اثر بیش‌تری نسبت به مقدار کود داشت گرچه هر دو عامل اثر معناداری نشان ندادند. مدل رگرسیونی برای صفات وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد ردیف در بلال، طول بلال و روی دانه اثر معنادار داشت. رگرسیون سایر صفات از نظر آماری معنادار نبود. بنابراین، می‌توان از مدل سطح-پاسخ برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی صفات دارای رگرسیون معنادار استفاده کرد. معنادار نبودن آزمون عدم برازش نشان داد که، تجزیهٔ رگرسیونی، تفاوت معناداری نسبت به تجزیهٔ واریانس نداشته است و می‌توان به این روش اعتماد کرد. این نتایج با مشاهدات Mansouri et al. (2021) مطابقت داشت. این محققان نیز با مطالعهٔ مقادیر مختلف کود و آب آبیاری روی گیاه چغندر قند نشان دادند که بین نتایج تجزیهٔ واریانس و مدل رگرسیونی تفاوت آماری معناداری وجود نداشت.

به‌منظور برازش رگرسیونی برای کلیهٔ صفات مورد مطالعه، از رگرسیون چندجمله‌ای درجهٔ دو کامل برای این منظور استفاده و مقادیر ثابت در این رگرسیون برای صفات دارای رگرسیون معنادار مشخص شد (جدول ۴). نتایج مقایسهٔ عملکرد مشاهداتی و پیش‌بینی شده براساس آماره‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس آمارهٔ MBE، مدل رگرسیونی در پیش‌بینی عملکرد و هم‌چنین پیش‌بینی سایر صفات دچار خطای کم‌برآوردی شد. این موضوع براساس پراکنش داده‌ها در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است. در این شکل، پراکنش داده‌ها در زیر خط منقطع (۱:۱) قرار داشت. ضریب تبیین برای عملکرد محصول، ۰/۷۶ به‌دست آمد. بنابراین مدل رگرسیونی توانایی شبیه‌سازی ۷۶ درصد تغییرات عملکرد ذرت را داشت. سایر آماره‌ها از جمله RMSE و NRMSE نیز به‌ترتیب خطای قابل قبول و دقت خوبی (کم‌تر از ۰/۲) برای این مدل رگرسیونی نشان دادند. کارایی این مدل نیز براساس آمارهٔ d بیش‌تر از ۰/۹ و قابل قبول بود. خطای مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی وزن هزار دانه ۱۱/۱ گرم بود که نسبت

[1] Normal Probability Plot

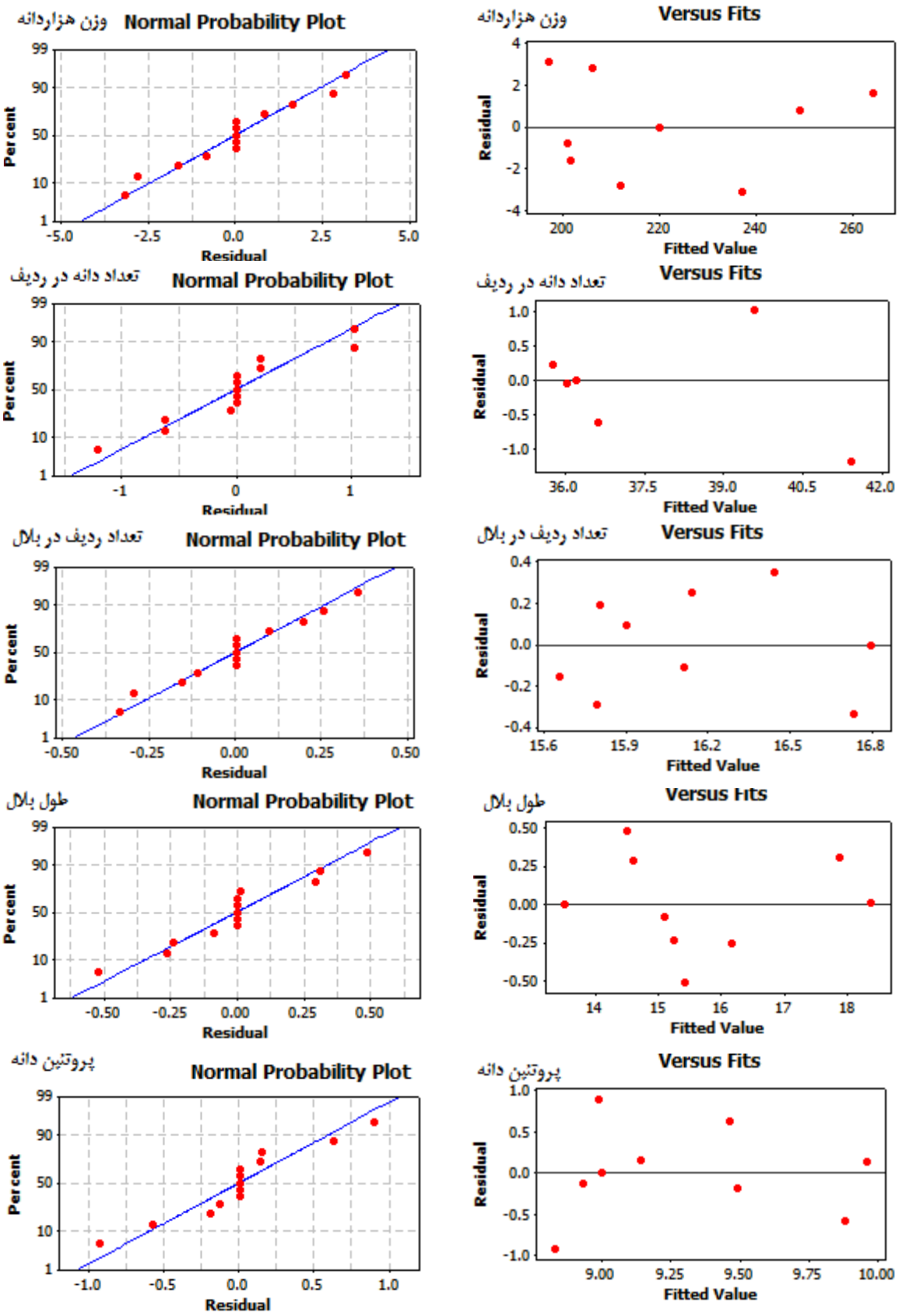
[2] Fitted Value

به متوسط وزن هزار دانه (۲۲۰ گرم) قابل قبول است. خطای تعداد دانه در ردیف و بلال نیز به‌ترتیب ۰/۶۱ و ۱/۲ عدد بود که با توجه به متوسط تعداد این متغیرها (به‌ترتیب ۳۷ و ۱۶ عدد) قابل قبول بود. متوسط طول بلال ۱۵ سانتی‌متر و خطای به‌دست آمده ۰/۵۱ سانتی‌متر بود. لذا می‌توان از این مقدار خطا در پیش‌بینی مدل رگرسیونی صرف‌نظر کرد. خطای پیش‌بینی غلظت روی دانه ۳/۸ درصد بود که با مقایسهٔ متوسط غلظت روی دانه (۳۹ درصد) قابل چشم‌پوشی است. براساس آمارهٔ NRMSE دقت مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد ردیف در بلال و طول بلال در دستهٔ عالی (۰/۱≥ NRMSE ≤ صفر) قرار داشت. دقت مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی روی دانه در دستهٔ خوب (۰/۲≥ NRMSE ≥ ۰/۱) قرار گرفت. کارایی مدل رگرسیونی براساس آماره‌های EF و d برای همهٔ صفات مطلوب بود. کارایی مدل رگرسیونی برای صفات مورد مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است. این نتایج با مشاهدات Mansouri et al. (2014)، Koocheki et al. (2014) و Mansouri et al. (2021) مطابقت داشت. این محققان به‌ترتیب با مطالعهٔ گیاهان چغندر قند، پیاز و کلزا نشان دادند که مدل رگرسیونی درجهٔ دوم دقت لازم برای شبیه‌سازی صفات مورد مطالعه را داشت. نتایج آزمون t برای مقایسهٔ خط رگرسیون برازش داده شدهٔ هر متغیر وابسته با خط ۱:۱ نشان داد که شیب و خط برازش برای همهٔ صفات قابل قبول بود.



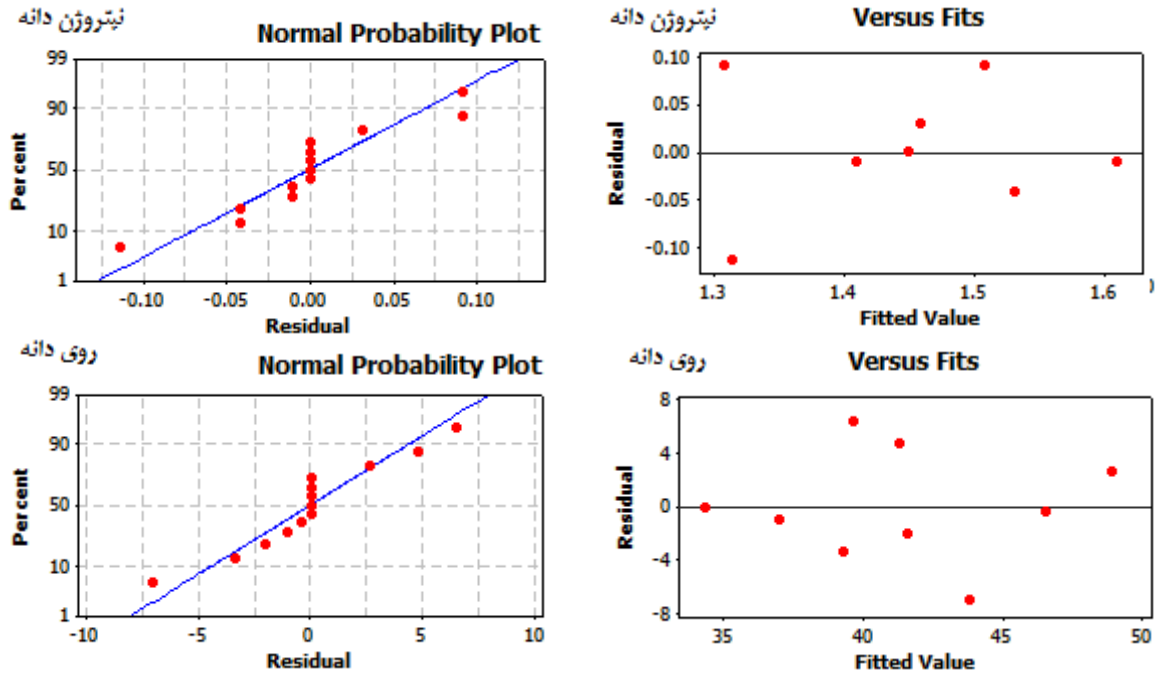
شکل ۳- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفت عملکرد

Figure 3- Checking the normality and stability of data variance for yield



ادامهٔ شکل ۳- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفت عملکرد

Continued Figure 3- Checking the normality and stability of data variance for yield



ادامهٔ شکل ۳- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفت عملکرد

Continued Figure 3- Checking the normality and stability of data variance for yield

جدول ۳- نتایج تجزیهٔ واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابستهٔ گیاه ذرت

Table 3- The results of regression analysis for the dependent variables of the corn

منابع تغییرات رگرسیون	درجه آزادی	عملکرد دانه	بهره‌وری آب	بهره‌وری کود	وزن هزار دانه	تعداد دانه در ردیف	تعداد ردیف در بلال	طول بلال	پروتئین دانه	نیتروژن دانه	روی دانه
رگرسیون	5	4.30*	0.06	1.40	150.2**	12.5*	7.53**	56.0**	0.91	33.3	3.04
خطی	2	5.90*	0.12	3.20*	323.2**	22.5**	3.02	44.8*	0.72	2.21	0.79
درجه دو	2	20.1**	0.68	0.15	5.40*	5.20*	12.2**	81.5**	0.62	2.15	5.10*
اثر متقابل	1	1.90	0.00	0.64	93.9*	6.90*	7.22*	27.4**	1.50	8.00	3.40
خطا	7	0.30	0.05	0.40	6.13	0.63	0.06	0.11	0.36	0.00	20.0
عدم برازش	3	0.6^{ns}	0.03^{ns}	0.93^{ns}	14.3^{ns}	1.48^{ns}	0.15^{ns}	0.27^{ns}	0.84^{ns}	0.01^{ns}	46.7^{ns}
خطای خالص	4	0.20	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

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

جدول ۴- ضرایب رگرسیون چند جمله‌ای درجهٔ دو کامل برای متغیرهای وابسته (x_1 مقدار کود و x_2 تعداد تقسیط)

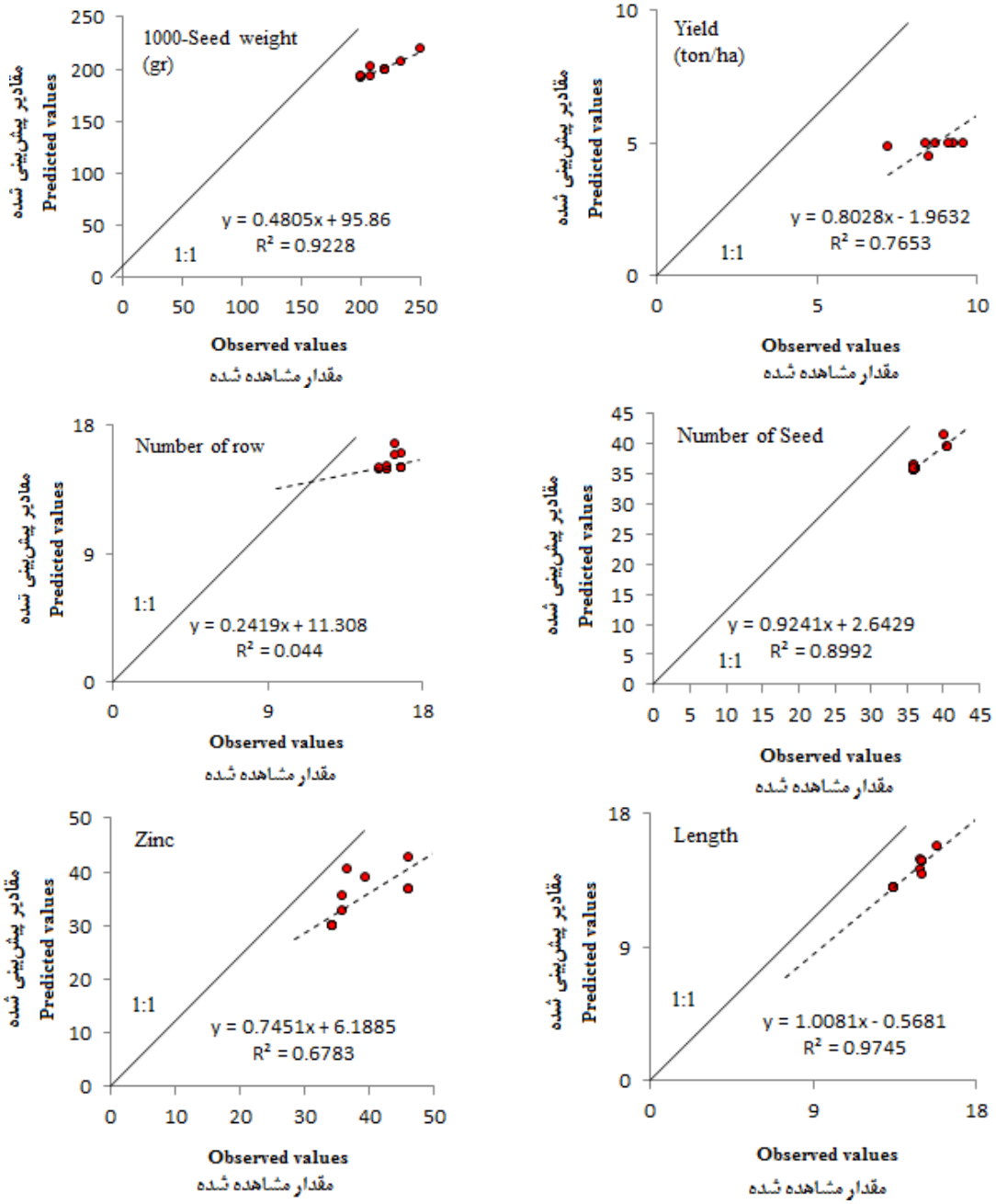
Table 4- Complete quadratic polynomial regression coefficients for dependent variables (x_1: amount of fertilizer and x_2: number of splitting)

$a_1+a_2x_1+a_3x_2+a_4x_1^2+a_5x_2^2+a_6x_1x_2$						
متغیرها	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
عملکرد	5.00	0.79	0.94	1.06	0.43	0.14
بهره‌وری آب	1.20	0.07	0.01	0.00	0.17	0.01
بهره‌وری کود	5.00	0.00	0.80	0.65	0.17	0.12
وزن هزار دانه	200	10.0	5.00	3.00	0.05	5.00
تعداد دانه در ردیف	36.0	1.38	1.38	0.76	0.76	1.05
تعداد ردیف در بلال	15.0	0.41	0.38	0.23	0.20	0.49
طول بلال	13.0	0.99	0.64	1.58	0.92	0.90
پروتئین دانه	5.00	0.39	0.29	0.49	0.33	0.21
نیتروژن دانه	5.00	0.39	0.29	0.49	0.33	0.21
روی دانه	30.0	2.11	0.72	4.83	3.92	4.62

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعهٔ ذرت

Table 5- Statistical values for corn variables

d	EF	NRMSE	RMSE	MBE	صفات
0.90	0.30	0.06	6.10	-1.9	عملکرد (تن در هکتار)
0.99	0.98	0.05	11.1	-18.7	وزن هزار دانه (گرم)
0.99	0.99	0.01	0.61	-0.17	تعداد دانه در ردیف
0.99	0.96	0.07	1.20	-1.08	تعداد ردیف در بلال
0.99	0.99	0.03	0.51	-0.44	طول بلال (سانتی‌متر)
0.99	0.97	0.12	5.00	-3.80	روی دانه (درصد)



شکل ۴- داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شدهٔ صفات مورد مطالعه و مقایسهٔ خط ۱:۱ (ممتد) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده (خط منقطع)

Figure 4- Observed and predicted data of studied variables and 1:1 line comparison (continuous) with fitted regression between observed and predicted data (dashed line)

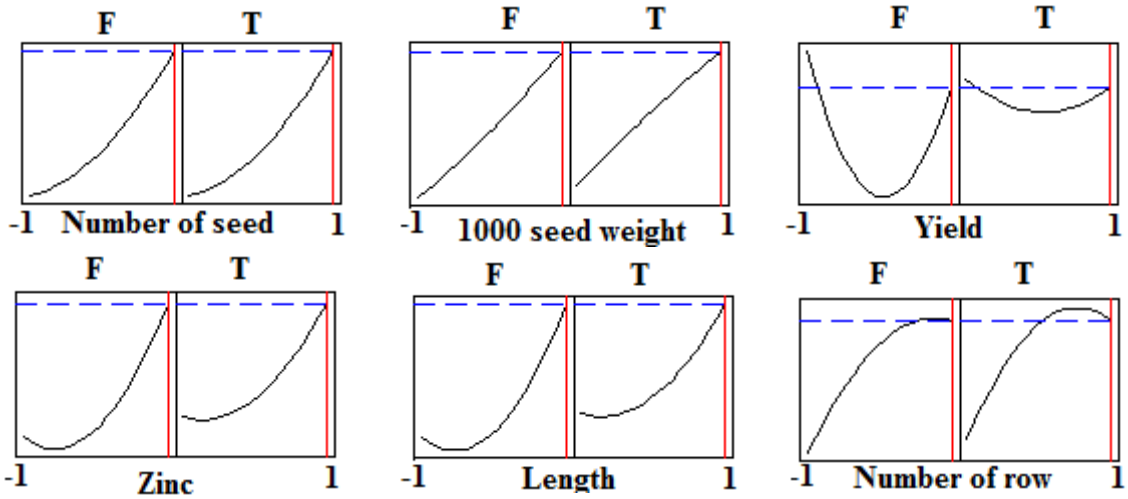
جدول ۶- نتایج t تست برای مقایسهٔ شیب و عرض از مبدأ خط ۱:۱ با معادلZ رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهداتی)

Table 6- The results of t-test for comparing the slope (b) and intercept (a) of the 1:1 line against the fitted linear regression 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	a=0 b=1
عملکرد	-23.9	13.1	3.60	1.30	2.70	1.80	پذیرش
وزن هزار دانه	95.8	9.20	0.40	0.04	11.4	10.3	پذیرش
تعداد دانه در ردیف	2.60	3.40	0.90	0.09	9.90	0.70	پذیرش
تعداد ردیف در بلال	11.0	5.50	0.20	0.30	2.00	0.70	پذیرش
طول بلال	-0.50	0.70	1.00	0.04	20.5	0.70	پذیرش
روی	6.10	6.00	0.70	0.15	4.00	1.00	پذیرش

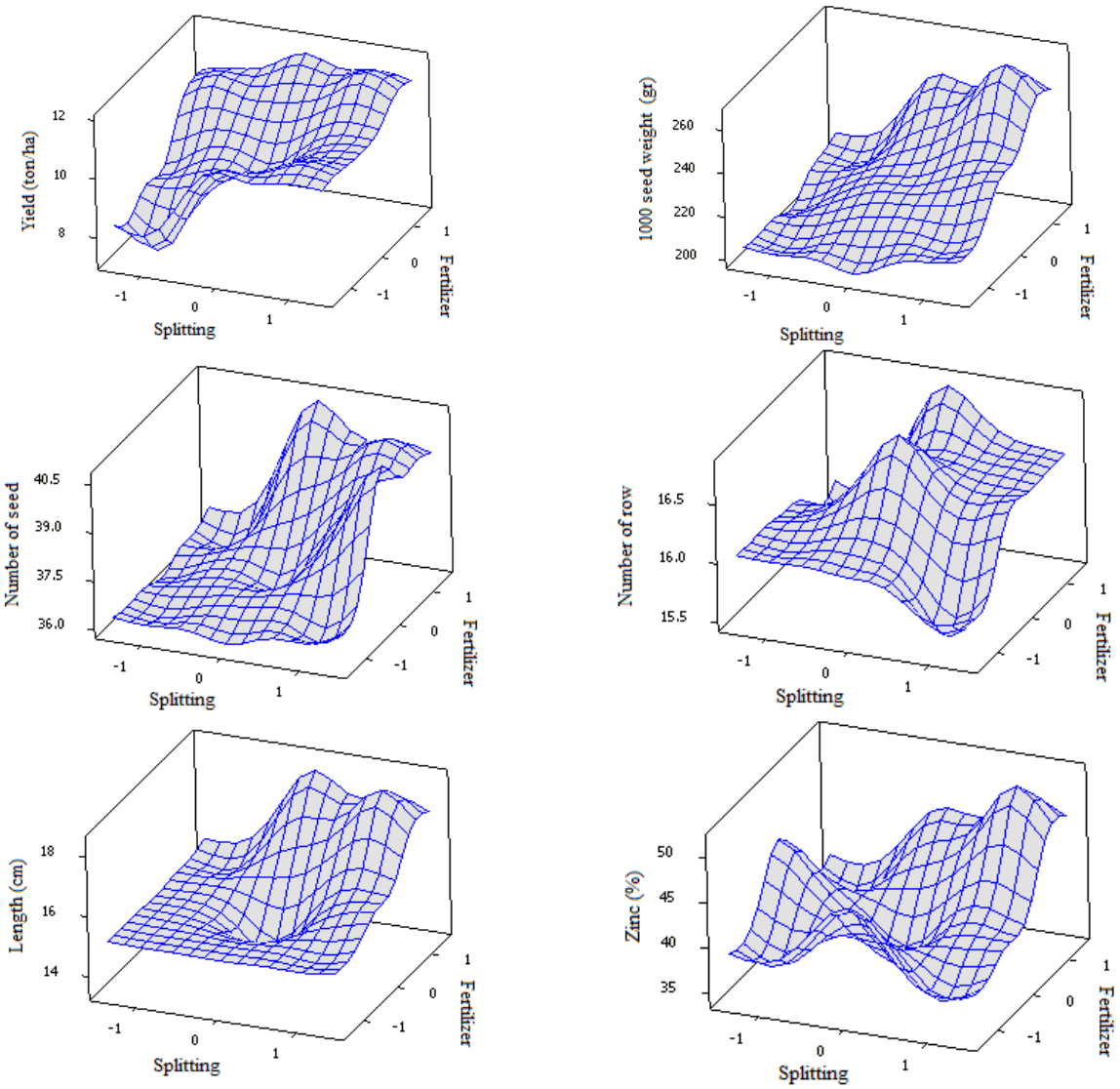
در شکل ۵، نحوهٔ تغییرات مقدار عملکرد، بهره‌وری آب و بهره‌وری کود نسبت به تغییرات مقدار و تقسیط کود نشان داده شده است. با افزایش مقدار کود (تغییر از کد ۱- به سمت ۱+)، مقدار عملکرد در ابتدا کاهش و پس از آن افزایش یافت. پایین‌ترین مقدار عملکرد در محدودهٔ کد ۰/۲+ بود. با افزایش تقسیط کود، عملکرد ذرت ابتدا کاهش و در ادامه افزایش یافت. براساس تغییرات نشان داده شده در شکل ۵ اثر مقدار کود نسبت به تقسیط آن در تغییرات عملکرد بیش‌تر بود. این نتایج براساس سطح-پاسخ عملکرد در شکل ۶ قابل مشاهده است. کشیدگی سطح نشان داده شده در پاسخ به عامل تقسیط کود، کم‌تر از عملکرد بود. با افزایش اندکی در مقدار بهینهٔ آب و کود، عملکرد ذرت تا سه درصد می‌تواند افزایش یابد (Li et al., 2019). اثر مقدار و تقسیط کود بر تغییرات وزن هزاردانه خطی بود و با افزایش این دو عامل، وزن هزار دانه نیز افزایش یافت. این پدیده برای تعداد دانه در بلال نیز مشاهده شد. در صفات طول بلال و درصد روی دانه، دو عامل مقدار و تقسیط کود واکنش مشابهی بر افزایش این دو متغیر داشتند ولی در مقادیر پایین هر دو عامل، صفات مورد مطالعه اندکی کاهش یافتند. افزایش مقدار و تقسیط کود سبب افزایش تعداد ردیف در بلال شد ولی مقادیر بالای این دو عامل، اثری بر افزایش تعداد ردیف در بلال نداشت. در نتایج سطح-پاسخ این متغیر نیز مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار این صفت در محدودهٔ مقدار و تقسیط صفر (۶۰ درصد نیاز کودی در سه تقسیط) به‌دست می‌آید. احتمالاً این موضوع سبب شده است تا مدل رگرسیونی نتواند تغییرات این متغیر را به خوبی پیش‌بینی کند. به‌همین دلیل آمارهٔ R^2 این متغیر نزدیک به صفر بود (شکل ۴).

برای تعیین سطح مشترک حدود بهینهٔ هر سه متغیر، نقشهٔ هم‌پوشانی آن‌ها به‌صورت شکل ۷ ترسیم شد. مقادیر بهینه برای متغیرهای عملکرد، وزن هزاردانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد ردیف در بلال، طول بلال و روی دانه به‌ترتیب در مقادیر ۱۰ تا ۱۴ تن در هکتار، ۲۵۰ تا ۳۰۰ گرم، ۳۴ تا ۴۵ عدد، ۱۶ تا ۱۸ عدد، ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر و ۵۰ تا ۶۵ درصد مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. براساس نتیجه به‌دست آمده، مقادیر کود نزدیک به کد یک، با تعداد تقسیط بیش‌تر سبب افزایش مقادیر این صفات می‌شود. این نتایج براساس شکل‌های ۵ و ۶ نیز قابل مشاهده است. بنابراین ، مقدار بهینه هر کدام از این صفات در صورت تأمین نیاز حداکثری باید با استفاده از راه‌حل وسیلهٔ عددی به‌دست آید. از این‌رو، نتایج آن براساس مقادیر جدول ۷ تعیین شد. مقدار شاخص مطلوبیت بهینه‌سازی برابر با ۰/۶۱ به‌دست آمد. این شاخص نشان‌دهندهٔ دقت مدل در تعیین حد بهینه برای سطوح مختلف عوامل مورد مطالعه است. با توجه به این‌که مقدار نزدیک به یک، برای این شاخص نشان‌دهندهٔ دقت بالاتر مدل است؛ می‌توان به نتایج بهینه‌سازی در این پژوهش اعتماد کرد. بنابراین، با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز کودی و افزایش تعداد تقسیط به ۵ دفعه، می‌توان عملکرد ذرت را تا ۱۲/۶ تن در هکتار افزایش داد. این مقدار حدود ۲۸ درصد از متوسط عملکرد و ۶ درصد از حداکثر عملکرد ذرت در این پژوهش بیش‌تر بود. وزن هزار دانه در شرایط بهینه به ۲۹۰/۶ گرم افزایش یافت که نسبت به مقادیر متوسط و حداکثر در این پژوهش به‌ترتیب ۳۲ و ۹ درصد افزایش نشان داد. متغیر تعداد ردیف در بلال تغییرات چندانی نسبت به متوسط این متغیر (۱۶/۳ سانتی‌متر) نداشت و فقط به میزان یک درصد افزایش یافت. همین عامل در نتایج به‌دست آمده در شکل ۴ نیز قابل پیش‌بینی بود. طول بهینه بلال به ۲۲/۳ سانتی‌متر و میزان بهینهٔ روی به ۶۲ درصد افزایش یافت. این مقادیر به‌ترتیب ۱۸/۵ و ۱۹/۶ درصد نسبت به حداکثر مقادیر به‌دست آمده در این پژوهش بیش‌تر بود. این دو متغیر به همراه وزن هزار دانه، در بهینه‌سازی تغییرات بیش‌تری نسبت به سایر صفات مورد مطالعه داشتند. علت آن وابستگی این صفات به افزایش تقسیط و مقدار کود به‌خصوص در مقادیر بالای این عوامل بود.



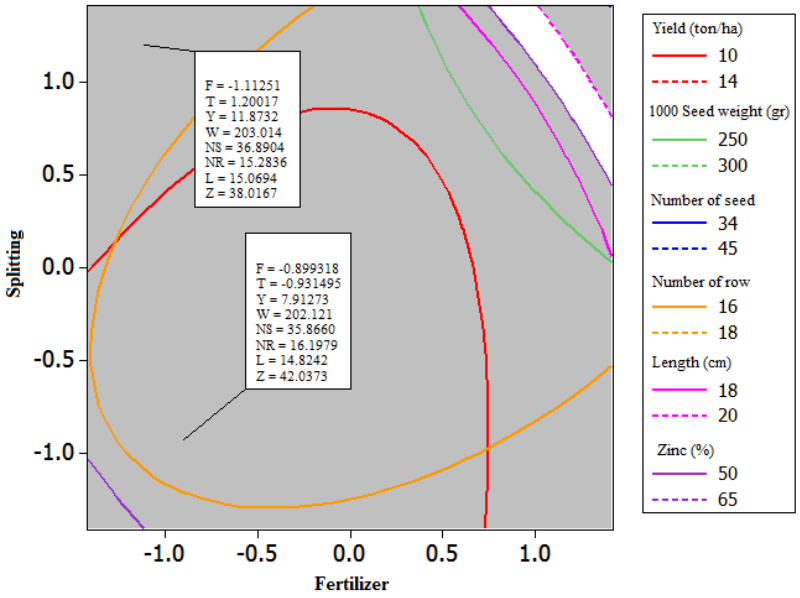
شکل ۵- واکنش متغیرها برای صفات مورد مطالعه نسبت به تغییرات مقدار (Fertilizer) و تقسیط (Splitting) کود

Figure 5- The reaction of cron yield and yield criteria in changing the amount and splitting of fertilizer



شکل ۶- سطح-پاسخ صفات مورد مطالعه نسبت به تغییرات مقدار (Fertilizer) و تقسیط (Splitting) کود

Figure 6- Response-surface of the factors for the variables in changing the amount and splitting of fertilizer



شکل ۷- نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته شامل صفات مورد مطالعه (رنگ سفید در نقشه، سطح بهینه است)

Figure 7- Overlapped plot of layers for optimum level of dependent variables (white color on the map is the optimal level)

جدول ۷- مقادیر هدف و شبیه‌سازی شده متغیرهای وابسته و مقدار بهینه متغیرهای مستقل در گیاه ذرت

Table 7- Target and simulated values of dependent variables along with optimaum value of independent variables in corn

	متغیر مورد بررسی	هدف	شبیه‌سازی شده	مقدار بهینه
متغیرهای وابسته	عملکرد (تن بر هکتار)	14	12.6	-
	وزن هزار دانه (گرم)	300	290.3	-
	تعداد دانه در ردیف	45	45.0	-
	تعداد ردیف	18	16.5	
	طول بلال (سانتی‌متر)	20	22.3	
	روی (درصد)	65	62.0	
متغیرهای مستقل	مقدار کود	100	-	-
	تعداد تقسیط	5	-	-

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر مقدار کود نیتروژن و تعداد تقسیط آن بر عملکرد و برخی اجزای عملکرد ذرت در آبیاری جویچه‌ای پرداخته شد. براساس نتایج به‌دست آمده، صفات ذرت عمدتاً تحت تأثیر افزایش مصرف کود و تقسیط آن قرار گرفتند. به‌همین دلیل بهینه‌سازی این صفات در محدوده‌ی کد ۱+ انجام شد. براساس بهینه‌سازی، تأمین کامل نیاز کودی و تقسیط کوددهی نیتروژن به پنج نوبت می‌تواند مقدار کلیه صفات نسبت به مقادیر حداکثر به‌دست آمده در پژوهش مزرعه‌ای را افزایش دهد. از طرفی، افزایش حدود ۲۰ درصد غلظت روی و ۲۸ درصد عملکرد می‌تواند هزینه‌های ناشی از افزایش تقسیط کود را پوشش دهد. در این پژوهش چون عوامل حاکم بر کاهش مقدار کود مانند مسائل زیست‌محیطی در نظر گرفته نشد، اثربخشی تقسیط کود فقط روی عوامل کمی و کیفی ذرت مشاهده شد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده این موضوع مورد توجه قرار گیرد و نتایج به‌دست آمده با مشاهدات این پژوهش مقایسه گردد.

منابع

ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، اگدرنژاد، اصلان، تافته، آرش، و احمدی، محسن (۱۳۹۸). ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۳-۷۵)، ۷۱۵-۷۲۶. dor:20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4

توانگر، محمد، عشقی‌زاده، حمیدرضا، و قیصری، مهدی (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد و مصرف آب هیبریدهای دیررس ذرت در شرایط متفاوت آبیاری و تقسیط کود نیتروژن. *علوم آب و خاک*، ۲۴ (۲)، ۲۳۵-۲۴۹. doi:10.47176/jwss.24.2.32181

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)، ۷۴۶-۷۶۴. doi:10.22067/gsc.v14i4.48347

جهان، محسن، نصیری‌محلاتی، مهدی، خلیل‌زاده، 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*، ۱۳(۴)، ۸۲۳–۸۳۹. doi:10.22067/gsc.v13i4.39788

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

عباسی، فریبرز، چوگان، رجب، علیزاده، حمزه علی، معینی، رضا، آقایی، ابوالفضل، شفیعی، پروین، لیاقت، عبدالمجید، و نوری، رحیم (۱۳۹۰). بررسی اثرات کودآبیاری سطحی بر کارایی مصرف آب، عملکرد و اجزا عملکرد ذرت دانه‌ای در کرج. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ۵۱ صفحه.

عباسی، فریبرز، چوگان، رجب، و غیبی، محمد نبی (۱۳۹۴). بررسی امکان کاهش تلفات نیتروژن در کودآبیاری جویچه‌ای ذرت دانه‌ای. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ۵۵ صفحه.

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*، ۵۲ (۱)، ۱۳۹–۱۵۱. doi:10.22059/ijhs.2019.283357.1663

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

References

Abbasi, F., Chogan, R., Alizadeh, H.A., Moeini, R., Aghaei, A., Shafiei, P., Liaghat, A., & Noori, R. (2011). Study on surface fertigation effect on maize water use efficiency, yield and yield criteria in Karaj. Final report of research project, Agricultural research, education and promotion organization, 51 pages. [In Persian]

Abbasi, F., Chogan, R., & Gheibi, M. (2015). Investigating the possibility of reducing nitrogen losses in corn under furrow fertigation. Final report of research project, Agricultural research, education and promotion organization, 55 pages. [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.fuel.2006.10.020

Box, G.E.P., & Hunter, J.S. (1957). Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*, 28(1), 195-241. doi:10.1214/aoms/1177707047

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

Ebrahimipak, N.A., 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]

FAO, (2020). Statistical database of the food and agriculture organization of the united nations. FAO, Rome.

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]

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. [In Persian]

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]

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

Kwak, J.S. (2005). Application of taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 327–334. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.08.007

Li, Y., Li, Zh., Cui, S., Chang, S., Jia, Ch., & Zhang, Q. (2019). A global synthesis of the effect of water and nitrogen input on maize (Zea mays) yield, water productivity and nitrogen use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 136-145. doi:10.1016/j.agrformet.2019.01.018

Mansouri, H., Bannayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., & Lakzian, A. (2014). Management of nitrogen fertilizer, irrigation, and plant density in onion production using response surface methodology as optimization approach. *African Journal of Agricultural Research*, 9(7), 676-687. doi:10.5897/ajar2013.8428

Mansouri, H., Noshad, H., & Hassani, M. (2021). Optimization of nitrogen fertilizer and water consumption in sugar beet by using response-surface method. *Journal of Agronomy*, 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 pages.

Namihira, T., Shinzato, N., Akamine, H., Nakamura, I., Maekawa, H., Kawamoto, Y., & Matsui, T. (2011). The effect of nitrogen fertilization to the sward on guineagrass (Panicum maximum Jacq cv. Gatton) silage fermentation. *Asian-Australian Journal of Animal Science*, 24, 358-363. doi:10.5713/ajas.2011.10191

Preza-fontes, G., Pittelkow, C.M., Greer, K.D., Bhattarai, R., & Christianson, L.E. (2021). Split-nitrogen application with cover cropping reduces subsurface nitrate losses while maintaining corn yields. *Journal of Environmental Quality*, 50, 1408-1418. doi:10.1002/jeq2.20283

Tavangar, M., Eshghizadeh, H. R., & Gheysari, M. (2020). Evaluation of late maturing corn hybrids for yield and water use efficiency under different irrigation regimes and split-application of nitrogen fertilizer. *Journal of Water and Soil Science*, 24(2), 235-249. doi:10.47176/jwss.24.2.32181 [In Persian]

Wu, C.F.J., & Hamada, M.S. (2009). *Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization.* Second edition, John Wiley and Sons, New York, 853 pages.

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