Gonbad Kavous University

Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment

Online ISSN: 2981-0280

Homepage: https://nawee.gonbad.ac.ir

Optimizing the amount of irrigation water and plant density in the cultivation of median corn cultivar (SC500) using response surface method

Shokooh Karimi [1], Aslan Egdernezhad[2*], Mohammad Mehdi Nakhjavanimoghaddam [3]

[1] Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
[2] Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
[3] Department of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 10 January 2024
Received in revised form 14 February 2024
Accepted 17 February 2024
Published online 29 January 2024

Keywords:
Central Square Design
Water Use Efficiency
Corn Yield
Plant Density

ABSTRACT

Objective: The corn production amount highly depends on the amount of irrigation water and plant density. Thus, determining the optimized amount of these two factors can lead to better conditions for corn plantations. This research was conducted in Karaj's research field to optimize irrigation water and planting density factors in SC500 corn.

Methods: This research used the data collected from the SC500 corn research field in Karaj City to optimize the amount of irrigation water and plant density by using the response surface method. The treatments examined in this research include three levels of irrigation (I1, I2, and I3 based on 75, 100 and 125% of the crop water requirement, respectively) and three plant densities (D1, D2, and D3 representing 75000, 85000, and 95000 plants per hectare respectively).

Results: The overlap of the layers showed that the range of -0.5 to +0.5 was the most optimal mode to achieve the maximum studied parameters. According to the results, the most optimal conditions can be achieved by applying 85% irrigation and a density of 75000 plants per hectare. By observing these conditions, yield, water use efficiency, leaf length, and corn length increased by 27, 8.5, 11, and 28%, respectively, compared to the current average condition. The number of rows and grain length increased to 26 and 11.5 mm, respectively, compared to the current maximum condition. The number of seeds in the row did not change compared to the target conditions and was simulated at its highest level.

Conclusions: Based on the results, changes in yield, the number of rows, leaf length, and seed length had an upward trend with increasing irrigation water, but plant density only affected yield increase and seed length. The changes in other parameters did not have a regular trend. Thus, overlaying layers were used. According to the optimization results, the highest yield and yield components are obtained if 85% of irrigation water was used and the plant density of 75,000 plants per hectare was observed.

[*]Corresponding author**:** E-mail: a_eigder@ymail.com

Cite this article: Karimi, sh., Egdernezhad, A., & Nakhjavanimoghaddam, M.M. (2024). Optimizing the amount of irrigation water and plant density in the cultivation of median corn cultivar (SC500) using response surface method. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), 1-20. http//doi.org/

© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: http//doi.org/ 10.22034/nawee.2024.451925.1071

رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست
شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۰۲۸۰
Homepage: https://nawee.gonbad.ac.ir

بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و تراکم بوته در کشت ذرت متوسطرس رقم SC500 با استفاده از مدل‌سازی سطح پاسخ

شکوه کریمی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]*، محمدمهدی نخجوانی مقدم[۳]

[۱] گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[۲] گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[۳] مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

کلیدواژه‌ها:
طرح مربع مرکزی،
کارایی مصرف آب،
عملکرد ذرت،
تراکم بوته.

چکیده

هدف: میزان تولید ذرت به‌شدت به مقدار آب آبیاری و تراکم بوته حساس است. بنابراین، تعیین مقدار بهینه این دو عامل می‌تواند سبب دستیابی به شرایط بهتری در زراعت این گیاه گردد. بدین‌منظور، این پژوهش با هدف بهینه‌سازی عوامل مقدار آب آبیاری و تراکم کاشت ذرت دانه‌ای متوسطرس رقم SC500 در کرج انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از یک مزرعه تحقیقاتی ذرت رقم SC500 در شهرستان کرج اقدام به بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و تراکم بوته به روش سطح پاسخ شد. تیمارهای مورد بررسی در این تحقیق شامل سه سطح آبیاری (I1، I2 و I3 به‌ترتیب براساس ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) و سه تراکم کشت گیاه (D1، D2 و D3 به‌ترتیب نشان‌دهنده ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ بوته در هکتار) بود.

نتایج: هم‌پوشانی لایه‌ها نشان داد که محدوده ۰/۵- تا ۰/۵+ بهینه‌ترین حالت برای دستیابی به حداکثر صفات مورد مطالعه بود. براساس این نتایج، بهینه‌ترین شرایط با کاربرد ۸۵ درصد آب آبیاری و تراکم ۷۵۰۰۰ بوته در هکتار به‌دست‌می‌آید. با رعایت این شرایط، صفات عملکرد، کارایی مصرف آب، طول برگ و طول بلال به‌ترتیب ۲۷، ۸/۵، ۱۱ و ۲۸ درصد نسبت به متوسط شرایط فعلی افزایش داشت. تعداد ردیف و طول دانه نسبت به حداکثر شرایط فعلی به‌ترتیب به مقادیر ۲۶ عدد و ۱۱/۵ میلی‌متر افزایش یافتند. تعداد دانه در ردیف نسبت به شرایط هدف تغییری نکرد و در بالاترین حد خود شبیه‌سازی گردید.

نتیجه‌گیری: براساس کلیه نتایج، تغییرات عملکرد، تعداد ردیف، طول برگ و طول دانه با افزایش آب آبیاری روند صعودی داشت، اما تراکم بوته تنها بر افزایش عملکرد و طول بذر تأثیر داشت. تغییرات سایر پارامترها روند منظمی نداشت و به همین دلیل از لایه‌های همپوشانی استفاده شد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، در صورت مصرف ۸۵ درصد آب آبیاری و مشاهده تراکم بوته ۷۵۰۰۰ بوته در هکتار، بیشترین عملکرد و اجزای عملکرد به دست می‌آید.

*نویسنده مسئول، E-mail: a_eigder@ymail.com

استناد: کریمی، شکوه؛ اگدرنژاد، اصلان؛ و نخجوانی مقدم، محمد مهدی. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و تراکم بوته در کشت ذرت متوسطرس رقم SC500 با استفاده از مدل‌سازی سطح پاسخ. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۳ (۱)، ۲۰-۱.

http//doi.org/ 10.22034/nawee.2024.451925.1071

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

© نویسندگان.

مقدمه

ذرت، یکی از غلات اصلی و غذای اصلی میلیون‌ها نفر در سراسر جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است. ذرت یا به‌صورت مستقیم یا فرآوری‌شده در محصولات غذایی مختلف برای مصرف انسان و در تولید خوراک دام مورد استفاده قرار می‌گیرد. ذرت به‌عنوان گیاهی یکساله، از نظر سطح زیرکشت در سراسر جهان بعد از گندم و برنج در رتبه سوم قرار دارد (Hanway and Ritchie, 2019). عملکرد این گیاه زراعی، به‌شدت تحت تأثیر مقدار آب آبیاری و مدیریت کاشت، به خصوص تراکم، قرار دارد (نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). لیکن تعیین دقیق مقدار آب و تراکم کشت مناسب با انجام تحقیقات متعدد مزرعه‌ای و صرف زمان و هزینه ممکن است. به‌منظور رفع این مشکل، مدل‌سازی شرایط حاکم بر مسأله پیشنهاد شده است (نیسی و همکاران، ۱۴۰۲).

از جمله مدل‌های پرکاربرد برای تعیین حدود بهینه در مسائل مرتبط با کشاورزی، روش سطح پاسخ است (Kwak, 2005 ; Aslan, 2007). این روش براساس مبانی آماری بسیار پیشرفته و استفاده از مدل‌های غیرخطی چندمنظوره توسعه یافته است (Kalavathy et al., 2009). در واقع، در این روش سعی شده تا با بهره‌گیری از ترکیب مناسبی از تیمارها، مقادیر متغیرهای مستقل به گونه‌ای تعیین شود که کمترین یا بیشترین مقدار برای تابع هدف به‌دست‌آید (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۵). روش سطح پاسخ به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شود که براساس شرایط حاکم بر مسأله می‌توان از آن‌ها استفاده کرد (حمید و همکاران، ۱۴۰۱). طرح مربع مرکزی یکی از این روش‌ها است که به‌عنوان جایگزین مناسبی برای روش فاکتوریل نیز شناخته می‌شود است (Wu and Hamada, 2009). از جمله مزایای این روش نسبت به طرح فاکتوریل می‌توان به استخراج داده‌های بیشتر، تجزیه و تحلیل جامع‌تر، تعیین حدود بهینه متغیرها و کاربرد کمتر تیمار و تکرار در مزارع آزمایشی اشاره کرد (Aslan, 2007).

با توجه به اهمیت روش سطح پاسخ، در سال‌های اخیر از آن برای بهینه‌سازی پارامترها در طرح‌های کشاورزی استفاده شده است. در پژوهشی، به‌منظور بهینه‌سازی نیتروژن، مقدار آب آبیاری و تراکم گیاه کلزا از روش سطح پاسخ استفاده شد (Koocheki et al., 2014). در این پژوهش، سطوح بالا و پایین برای عوامل مورد اشاره را به‌ترتیب ۴۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار، ۱۵۰۰-۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار و ۱۵۰-۵۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بهینه‌ترین حالت برای دستیابی به حداکثر عملکرد، استفاده از مقادیر ۹۲ کیلوگرم کود نیتروژن، ۲۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته در متر مربع است. برخی محققان از این روش برای گیاه پیاز استفاده کردند و نشان دادند که مصرف ۹۳ کیلوگرم کود نیتروژن به همراه ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری سبب بهینه‌سازی منابع تولید و کاهش آلودگی زیست‌محیطی می‌گردد (منصوری و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهشی دیگر، مقادیر بهینه کودهای فسفر، نیتروژن و دامی برای تولید گندم بررسی شد. سطوح مورد استفاده هر کدام از این کودها به‌ترتیب ۲۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار، ۳۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار و ۳۰-۰ تن در هکتار بود. مقادیر بهینه برای هر کدام از این کودها، به‌منظور دستیابی به بیشترین عملکرد و اجزای عملکرد، به‌ترتیب ۲۰۰، ۱۴۵ کیلوگرم در هکتار و ۱۸ تن در هکتار بود (جهان و همکاران، ۱۳۹۴). از این روش برای بهینه‌سازی آب و کود نیتروژن در کشت چغندرقند استفاده شد (منصوری و همکاران، ۱۴۰۰). سطوح بالا و پایین کود نیتروژن و آب آبیاری به‌ترتیب ۲۴۰-۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۴۰۰۰-۸۰۰۰ مترمکعب در هکتار بود. نتایج نشان داد که کاربرد ۱۳۳ کیلوگرم کود نیتروژن و ۱۰۶۶۷ مترمکعب آب آبیاری در هکتار بیشترین عملکرد را به‌دست داد. بررسی مقادیر بهینه کود نیتروژن و فاصله بوته روی ردیف براساس چهار هدف اقتصادی، سلامت غذایی، بازارپسندی و حدمطلوب تولید اسفناج با استفاده از روش سطح پاسخ انجام گردید (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۰). فاصله روی ردیف در بازه ۱۵-۷ سانتی‌متر و سطوح کود نیتروژن در بازه ۴۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار بررسی شدند و نتایج نشان داد که برای دستیابی به هدف اقتصادی، بهتر است فاصله روی ردیف و کود نیتروژن به‌ترتیب ۷ سانتی‌متر و ۱۸۹/۹ کیلوگرم در هکتار باشد. برای دستیابی به اهداف سلامت غذایی، بازارپسندی و حدمطلوب تولید پیشنهاد شد فاصله روی ردیف به‌ترتیب ۷/۴، ۷/۲ و ۷/۰ سانتی‌متر و مقدار کود نیتروژن به‌ترتیب ۷/۰، ۱۸۹/۹ و ۱۴۹/۵ کیلوگرم باشد.

مرور منابع نشان داد که می‌توان از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی عوامل موثر بر تولید محصولات کشاورزی استفاده کرد. با توجه به اثر مقادیر آب آبیاری و تراکم کشت بر عملکرد ذرت، بهینه‌سازی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. لیکن، تاکنون در ارتباط با بررسی این موضوع توسط محققان گزارشی منتشر نشده است. از این رو، پژوهش حاضر به منظور دستیابی به این هدف انجام گردید؛ لذا در این پژوهش، تعیین مقادیر بهینه مقدار آب آبیاری و تراکم کشت در زراعت ذرت دانه‌ای رقم *SC500* با هدف دستیابی به بیشترین عملکرد و اجزای عملکرد بررسی شد.

مواد و روش‌ها

نحوه انجام آزمایش

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از یک مزرعه تحقیقاتی ذرت رقم SC500 در شهرستان کرج انجام شد (نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). تیمارهای مورد مطالعه شامل سه سطح آبیاری (I1، I2 و I3 به ترتیب براساس ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) و سه تراکم کشت (D1، D2 و D3 به ترتیب نشان‌دهنده ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ بوته در هکتار) بود. آزمایش مورد نظر در نیمه اول خرداد انجام گردید. کشت به‌صورت دستی و به‌وسیله مارکر چوب صورت گرفت. برای هر بذر یک چاله در نظر گرفته شد و در آن سه عدد بذر کشت گردید و پس از استقرار کامل بوته‌ها و کسب اطمینان از اینکه بوته‌ها خطرات اولیه (مانند آفات خاکزی) را گذرانده‌اند؛ عملیات تنک‌کاری انجام شد. فاصله بین ردیف‌های کشت ۷۵ سانتی‌متر بود. پیش از انجام آزمایش، خصوصیات فیزیکی خاک از سه عمق مختلف، به منظور اعمال آبیاری، تعیین شد (جدول ۱). تعیین رطوبت خاک قبل از آبیاری با استفاده از دستگاه TRIME صورت گرفت و مقدار آبیاری برای همه‌ی تیمارها تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی انجام شد. مقدار آب آبیاری به‌وسیله کنتور حجمی تعیین گردید. سیستم آبیاری مورد نظر از نوع بارانی بود و آب‌پاش‌های برنجی قابل تنظیم VYR 50 مورد استفاده قرار گرفتند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کریمی و همکاران، ۱۴۰۰).

پس از رسیدگی کامل در انتهای فصل رشد، عملیات برداشت صورت گرفت. عملکرد، بیوماس و وزن هزار دانه توسط ترازو محاسبه شدند. صفات شمارشی مانند تعداد برگ، تعداد ردیف و تعداد دانه در ردیف با شمارش در آزمایشگاه تعیین شدند.

جدول ۱-خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (cm)	وزن مخصوص ظاهری خاک (g/m^3)	رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی (%)	بافت خاک
۲۰-۰	۱/۳۶	۲۶/۳۰	لوم
۴۰-۲۰	۱/۴۲	۲۷/۰۰	لوم
۶۰-۴۰	۱/۴۲	۲۸/۶۰	لوم

سایر صفات مانند طول برگ، طول بلال، ارتفاع بوته و طول دانه با استفاده از متر اندازه‌گیری شدند. کارایی مصرف آب از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad (۱)$$

که در این معادله، WUE کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد ذرت (کیلوگرم) و W مجموع بارندگی و آبیاری (مترمکعب) است.

روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ به صورت تابع چند متغیره به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود (Kalavathy et al., 2009).

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_k) \quad (۲)$$

که در آن، 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 برای تعیین متغیر وابسته پیش‌بینی‌شده تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح عوامل به‌عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Kalavathy et al., 2009). در این روش، تیمارهای آزمایشی با اعداد ۱، ۰ و ۱- و بدون واحد نمایش داده می‌شوند که به‌ترتیب نشان‌دهنده بالاترین، میانگین و پایین‌ترین سطح متغیر مستقل هستند. برای تعیین تعداد تیمارها از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$2^k + 2k + r \quad (۳)$$

در این رابطه، k نشان‌دهنده تعداد عوامل مورد آزمایش و r تعداد تکرار است (Aslan, 2007). بنابراین در این پژوهش، برای هر دو آزمایش انجام‌شده، تعداد تیمارهای طراحی به‌صورت رابطه ۳ تعیین می‌شود. کد ضرایب و مقدار هر کدام از عوامل در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$2^2 + 2 \times 2 + 3 = 11 \quad (۴)$$

برای برازش داده‌ها از رگرسیون چندمتغیره با افزودن جملات خطی، درجه دو و اثر متقابل بین عوامل، برازش و براساس تجزیه واریانس رگرسیون ارزیابی شد. رابطه چند جمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به شکل زیر است (Aslan, 2007).

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 {x_1}^2 + a_4 {x_2}^2 + a_5 x_1 x_2 \quad (۵)$$

در این رابطه، y متغیر وابسته، i خصوصیات کمی و کیفی ذرت، a ضریب رابطه، x1 متغیر مستقل مقدار آب آبیاری و x2 متغیر مستقل تراکم بوته است. برای مقایسه نتایج مدل به‌دست‌آمده با مقادیر مشاهداتی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R2) به‌صورت زیر استفاده شد.

جدول ۲- کد ضرایب و مقدار واقعی متغیرهای مستقل

کد ضرایب Code		مقدار آزمایش Value	
آبیاری	تراکم	آبیاری	تراکم
۱	-۱	۱۲۵	۷۵۰۰۰
۰	۰	۱۰۰	۸۵۰۰۰
۱	۰	۱۲۵	۸۵۰۰۰
۰	-۱	۱۰۰	۷۵۰۰۰
۰	۰	۱۰۰	۸۵۰۰۰
-۱	۰	۷۵	۸۵۰۰۰
-۱	-۱	۷۵	۷۵۰۰۰
۰	۱	۱۰۰	۹۵۰۰۰
-۱	۱	۷۵	۹۵۰۰۰
۰	۰	۱۰۰	۸۵۰۰۰
۱	۱	۱۲۵	۹۵۰۰۰

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

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

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۸)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۹)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum (P_i - \overline{P})^2 \sum (O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۱)$$

در معادله‌های فوق P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، O_i مقدار اندازه‌گیری‌شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و n برابر تعداد تیمارها است. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل مورد نظر مقدار پارامتر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل‌ها در برآورد پارامتر مورد نظر عدد کوچکتری به‌دست‌داده است. مقدار آماره NRMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۲/۳-۰/۰ و بیشتر از ۰/۳ به‌ترتیب نشان-دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار EF نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل رگرسیون برای صفات عملکرد، کارایی مصرف آب، تخریب برگ، تعداد برگ، طول برگ، بیوماس، قطر بلال، طول بلال، تعداد ردیف، تعداد دانه در ردیف، ارتفاع بوته و طول دانه اثر معنی‌دار در سطح یک درصد (P-value≤0.01) و بر قطر بلال اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد (P-value≤0.05) داشت. مدل رگرسیون برای پارامتر وزن هزار دانه معنی‌دار نشد. مدل رگرسیون درجه دوم برای صفات عملکرد، تخریب برگ و طول بلال اثر معنی‌دار در سطح یک درصد (P-value≤0.01) و برای کارایی مصرف آب، طول برگ، تعداد ردیف، تعداد دانه در ردیف و طول بلال اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد (P-value≤0.05) داشت. لذا، تنها این صفات برای مدل سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج عدم برازش برای این صفات معنی‌دار نبود؛ به‌همین دلیل تفاوت آماری بین نتایج تجزیه رگرسیونی و تجزیه واریانس وجود نداشت.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابسته گیاه ذرت

منابع تغییرات رگرسیون	عملکرد	وزن هزار دانه	کارایی مصرف آب	تخریب برگ	تعداد برگ	طول برگ	بیوماس	قطر بلال	طول بلال	تعداد ردیف	تعداد دانه در ردیف	ارتفاع بوته	طول دانه
رگرسیون	۶۸/۹**	۲/۹۰	۱۲۶/۲**	۳۱/۲**	۳۱/۱**	۸/۰**	۱۷/۹**	۷/۲۰*	۴۳/۵**	۲۱/۲**	۱۰/۶**	۲۴/۶**	۳۶/۶**
خطی	۱۶۱/۶**	۴/۹۰*	۳/۷۰	۵۸/۰**	۷۲/۷**	۱۴/۶**	۴۲/۹**	۱۴/۹**	۴۷/۱**	۲۰/۵**	۲۰/۲**	۵۷/۳**	۷۹/۷**
درجه دو	۱۰/۳**	۰/۱۶	۳۱۱/۹*	۲۰/۲**	۲/۲۰	۵/۴۰*	۱/۷۰	۰/۶۶	۴۷/۵**	۶/۱۰*	۶/۶۰*	۰/۴۳	۷/۶۰**
اثر متقابل	۰/۸۹**	۱/۵۰	۰/۲۰	۰/۰۰	۵/۷۰	۰/۴۵	۰/۴۰	۵/۱۲	۲۸/۲**	۵۲/۷	۰/۸۵	۷/۸۰*	۰/۱۰
خطا	۰/۱۳	۴۲/۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸	۱۲/۱	۳/۶۰	۰/۰۳	۰/۲۸	۰/۵۰	۸/۲۰	۳۶/۹	۰/۰۲
عدم برازش	۰/۳۲	۰/۹۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۹	۲۸/۴	۸/۵۰	۰/۰۹	۰/۶۷	۱/۱۰	۱۹/۳	۸۶/۱	۰/۰۵
خطای خالص	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

* و ** به‌ترتیب نشان دهنده‌ی معنی‌داری در سطوح پنج و یک درصد است.

این نتایج نشان‌دهنده قابلیت زیاد مدل رگرسیون مورد استفاده در برآورد متغیرهای مورد بررسی است. این نتایج توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (منصوری و همکاران، ۱۳۹۳؛ جهان و همکاران، ۱۳۹۴؛ گودرزی و همکاران، ۱۴۰۰). براساس این نتایج، ضرایب رگرسیون برای هر کدام از صفات مورد مطالعه تعیین شد که در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- ضرایب رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو کامل برای متغیرهای وابسته (x_1 مقدار آب آبیاری و x_2 تراکم بوته است)

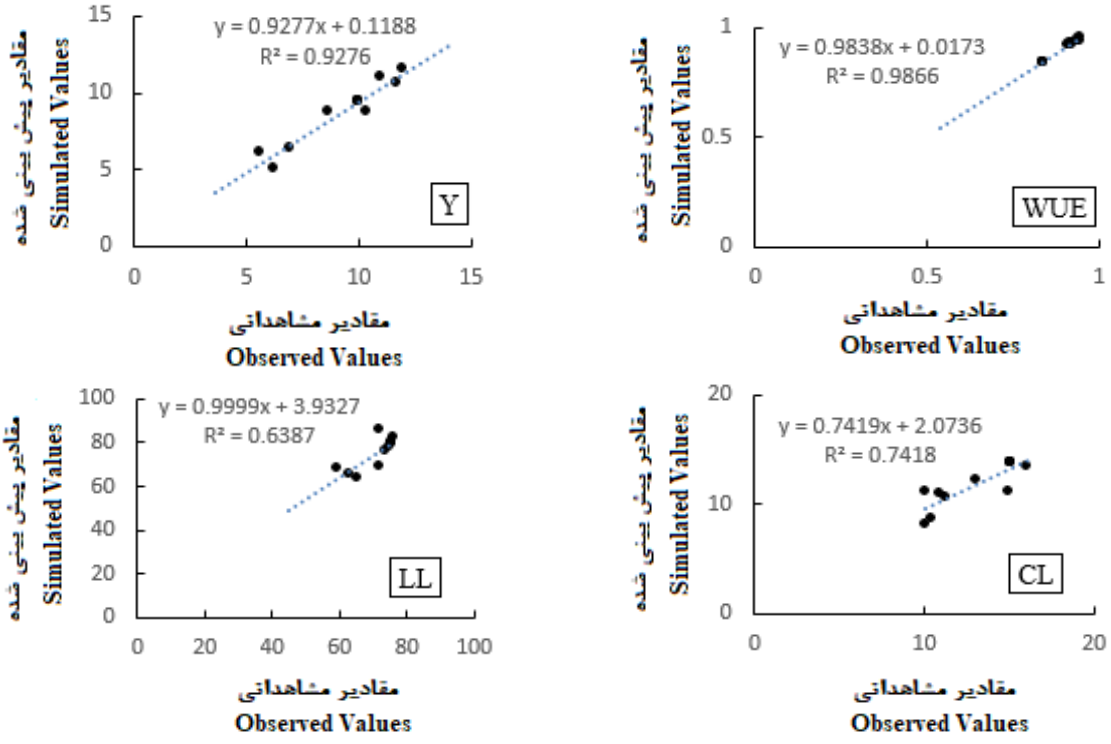
پارامترهای مورد بررسی	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1
	$a_1+a_2x_1+a_3x_2+a_4x_1^2+ a_5x_2^2+ a_6 x_1x_2$					
عملکرد	۰/۱۷۵	-۰/۳۵۰	-۰/۵۷۵	-۰/۵۶۳	۲/۲۸۸	۱۰/۰
کارایی مصرف آب	۰/۰۰۱	۰/۰۳۹	۰/۰۵۴	۰/۰۰۳	-۰/۰۰۶	۰/۸۳۸
طول برگ	-۱/۱۷۵	-۱/۹۰۰	-۴/۱۲۵	-۳/۹۲۹	۵/۳۸۵	۷۹/۶
طول بلال	-۱/۴۲۵	-۱/۲۸۸	-۱/۶۶۳	-۱/۳۵۴	۱/۲۴۷	۱۵/۱
تعداد ردیف	-۲/۶۰۰	۰/۹۴۴	۰/۰۱۹	-۱/۱۸۸	۱/۱۰۷	۱۶/۰
تعداد دانه در ردیف	-۱/۳۲۵	-۲/۹۳۱	-۲/۷۸۱	-۳/۳۱۶	۵/۵۶۵	۳۲/۶
طول دانه	-۰/۰۲۵	-۰/۰۶۹	-۰/۲۱۹	-۰/۱۹۱	۰/۶۸۸	۱۰/۸

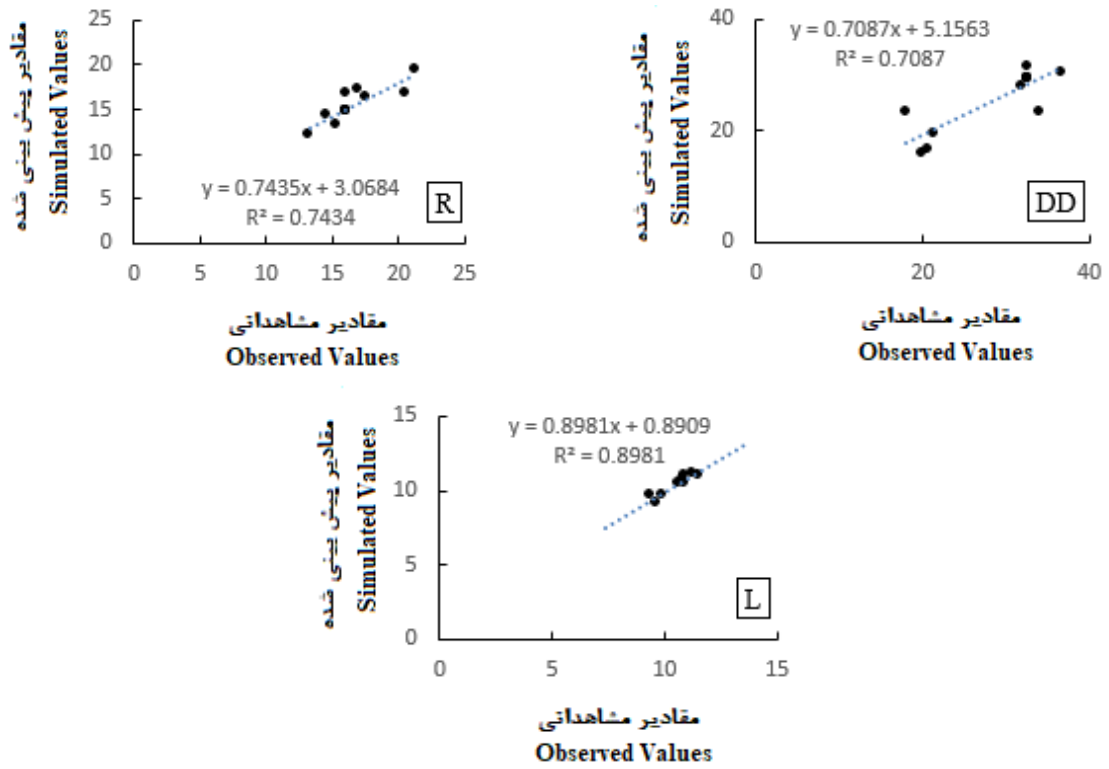
مقادیر آماره MBE برای صفات عملکرد، طول برگ، طول بلال، تعداد ردیف، تعداد دانه در ردیف و طول دانه منفی بود و به‌همین دلیل مدل رگرسیونی برای تعیین این صفات دچار خطای کم‌برآوردی شد (جدول ۵). خطای کم‌برآوردی برای کارایی مصرف آب بسیار نزدیک به صفر بود. براساس آماره RMSE، خطای مدل رگرسیون برای برآورد این پارامتر نیز نزدیک به صفر بود. بنابراین، خطای این مدل برای تعیین این صفت را می‌توان نادیده گرفت. مقدار آماره NRSME برای کلیه صفات کمتر از ۰/۱ بود. لذا، دقت مدل رگرسیونی برای محاسبه این صفات در گروه عالی قرار داشت. کارایی این مدل برای تعیین کلیه صفات مطلوب بود؛ زیرا براساس دو آماره EF و d، نتایج به دست آمده بیشتر از ۰/۹ بود. ضریب تبیین برای صفت طول برگ کمتر از سایر صفات به‌دست‌آمد (R^2=0.63) ولی مقدار آن قابل‌قبول بود (شکل ۱). برای سایر صفات ضریب تبیین بیشتر از ۷۰ درصد بود.

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعه ذرت

پارامترهای مورد بررسی	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d	R^2
عملکرد	-۰/۵۶	۰/۳۷	۰/۰۳	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۲
کارایی مصرف آب	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸
طول برگ	-۳/۹۲	۲/۷۳	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۶۳
طول بلال	-۱/۳۵	۰/۷۰	۰/۰۵	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۷۴
تعداد ردیف	-۱/۱۸	۰/۶۸	۰/۰۴	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۷۴
تعداد دانه در ردیف	-۳/۳۱	۲/۱۷	۰/۰۷	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۷۰
طول دانه	-۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۹

این نتایج نشان می‌دهد که مدل رگرسیون قابلیت پیش‌بینی بیش از ۷۰ درصد تغییرات پارامترهای مورد بررسی را داشت. مقایسه نتایج t تست (جدول ۶) و رگرسیون برازش داده شده به همراه خط ۱:۱ (شکل ۱) نشان داد که در تمامی صفات، شیب و عرض از مبدأ رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت. این نتایج شرط لازم برای انجام بهینه‌سازی است که توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۰؛ منصوری و همکاران، ۱۴۰۰؛ شاهین رخسار و اگدرنژاد، ۱۴۰۱؛ نیسی و همکاران، ۱۴۰۲).





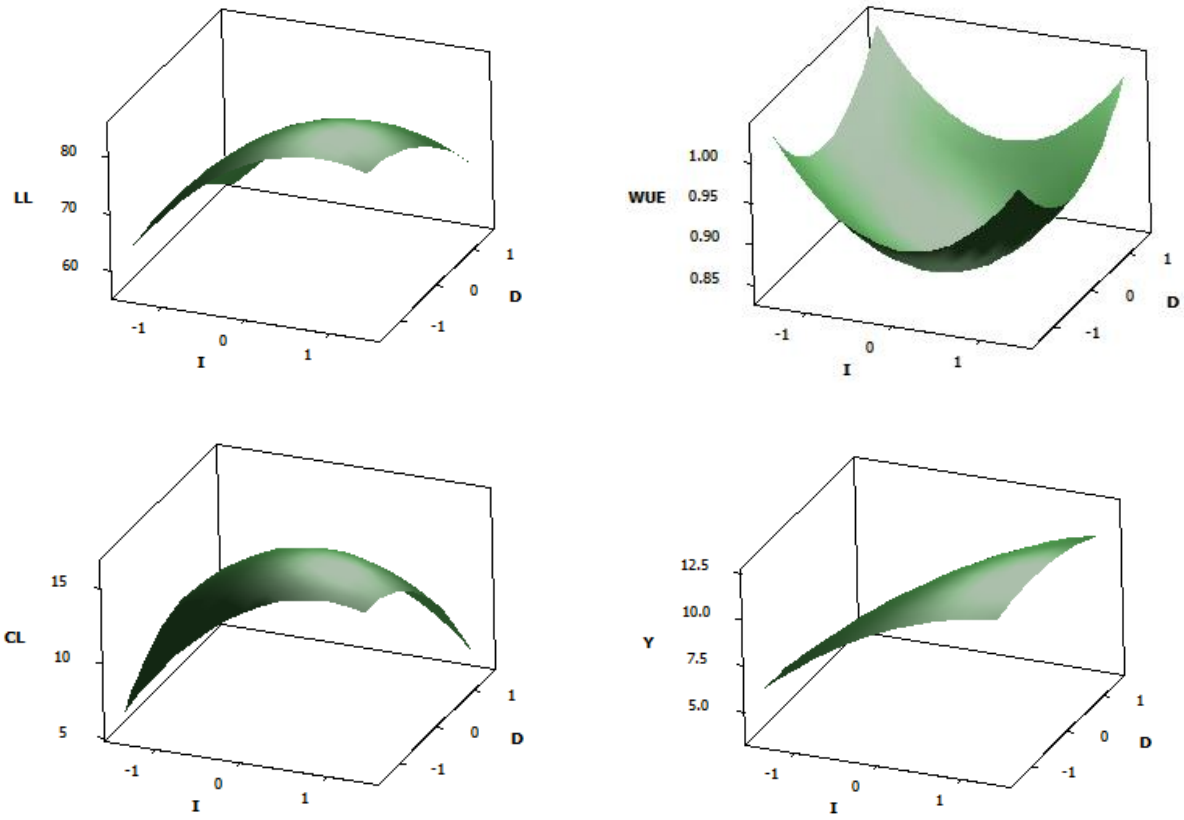
شکل ۱- داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده صفات مورد بررسی (عبارات Y، WUE، LL، CL، R، DD و L به ترتیب نشان دهنده عملکرد، کارایی مصرف آب، طول برگ، طول بلال، تعداد ردیف، تعداد دانه در ردیف و طول دانه است).

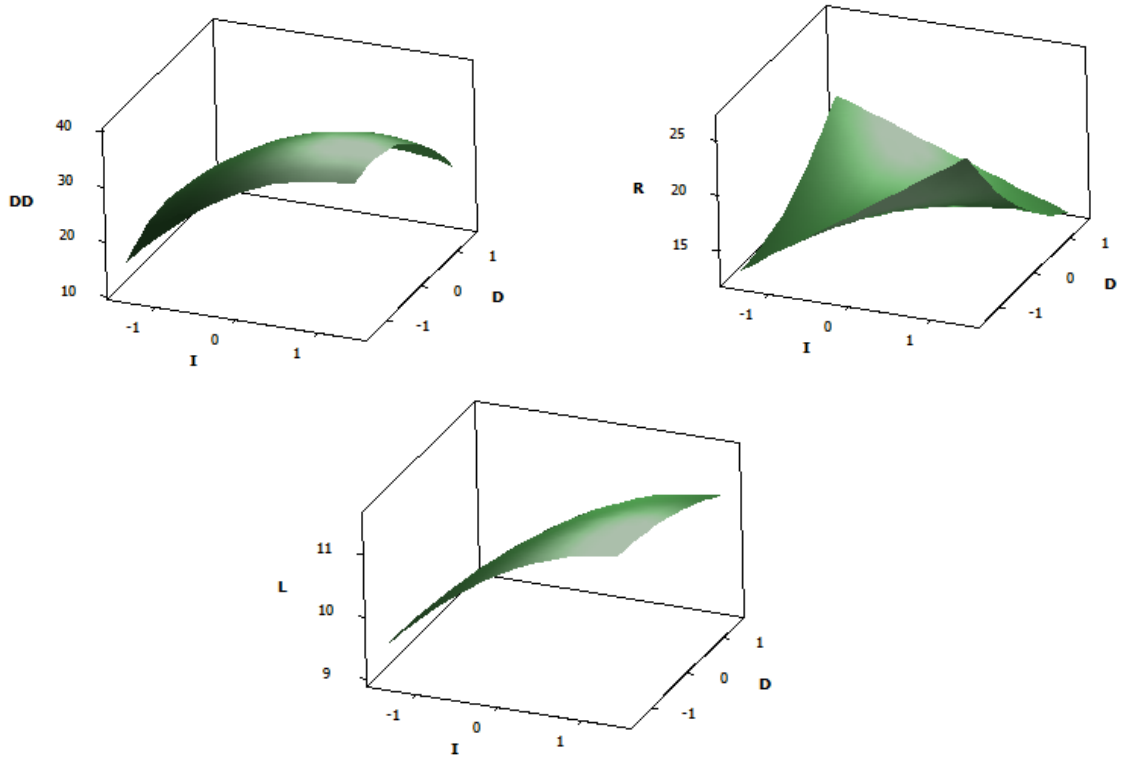
جدول ۶- نتایج t تست برای مقایسه شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهداتی)

پارامترهای مورد بررسی	عرض از مبدا (a)		شیب (b)		T		فرض صفر
	مقدار Value	انحراف معیار SD	مقدار Value	انحراف معیار SD	مقدار Value	انحراف معیار SD	a=0 b=1
عملکرد	۰/۱۱	۰/۷۹	۰/۹۲	۰/۰۸	۰/۷۳	۱۱/۸	بله
کارایی مصرف آب	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۱۶	۲۸/۴	بله
طول برگ	۳/۹۰	۱۶/۳	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۲۴	۴/۴۰	بله
طول بلال	۲/۰۰	۲/۱۰	۰/۷۴	۰/۱۷	۰/۶۳	۵/۶۰	بله
تعداد ردیف	۳/۰۰	۲/۷۰	۰/۷۴	۰/۱۷	۰/۴۳	۵/۶۰	بله
تعداد دانه در ردیف	۵/۱۰	۵/۰۰	۰/۷۰	۰/۱۹	۰/۶۵	۵/۱۰	بله
طول دانه	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۱۰	۰/۱۸	۹/۸۰	بله

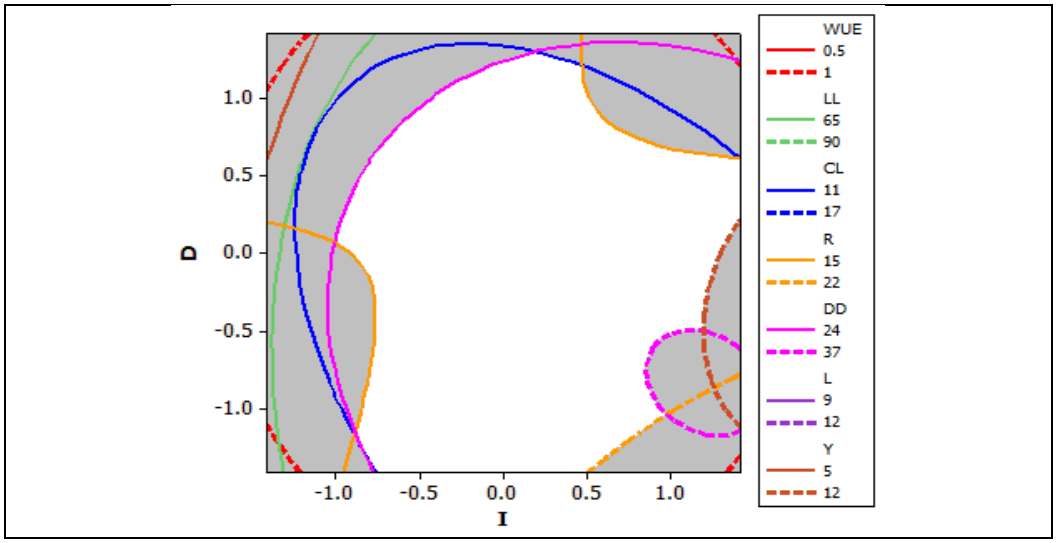
نتایج سطح پاسخ صفات مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. کارایی مصرف آب نسبت به مقادیر آب آبیاری و تراکم کشت رفتار یکسان داشت. عملکرد ذرت در مقادیر پایین آب آبیاری کاهش یافت و با افزایش آب آبیاری تا سطح I3 (کد ۱+) مقدار آن صعودی بود. بررسی رفتار سطح پاسخ عملکرد ذرت نیز این موضوع را نشان می‌دهد. براساس نتایج سایر محققان، به دلیل وابسته بودن عملکرد ذرت به مقدار آب آبیاری، کاهش مقدار آب سبب کاهش این صفت می‌شود (نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲؛ جهان و همکاران، ۱۳۹۵). در مقادیر پایین آبیاری (I1)، کارایی

مصرف آب بیشترین مقدار را داشت. با افزایش آب آبیاری تا I2 (کد صفر در سطح پاسخ)، سبب کاهش کارایی مصرف آب شد. این نتایج به این دلیل است که افزایش عملکرد به اندازه‌ی افزایش مقدار آب آبیاری نبوده است. این نتایج در مطالعات سایر محققان نیز گزارش شده است (نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). افزایش آب آبیاری (I3) به کارایی مصرف آب اندکی افزایش یافت ولی به اندازه حدود پایین (I1) کاربرد آب آبیاری نبود. با افزایش آب آبیاری، طول برگ افزایش یافت و بیشترین مقدار این پارامتر در مقادیر بیشتر آب آبیاری (با کد ۱+) به‌دست‌آمد. این عمل سبب افزایش تعرق شد و به‌همین دلیل عملکرد گیاه نیز افزایش یافت. از طرف دیگر، رفتار عملکرد ذرت در افزایش آب آبیاری از I2 به I3 نشان‌دهنده این است که ضریب گیاهی در نظر گرفته شده برای این رقم به درستی انجام نشده و در واقع در تیمار I2، کم-آبیاری اعمال شده است. این نتایج با مطالعات سایر محققان مطابقت داشت (نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). مجموع این عوامل سبب افزایش کارایی مصرف آب در مقادیر بیشتر آب آبیاری شد. رفتار کارایی مصرف آب در تراکم کم (D1) و زیاد (D3) بیشتر از تراکم متوسط (D2) بود. این نتایج با توجه به تغییرات طول برگ و عملکرد قابل توجیه است. طول بلال با افزایش آب آبیاری افزایشی بود، ولی تراکم بیشتر سبب کاهش طول بلال گردید. به همین دلیل حدود بهینه برای این صفت در نقطه حد واسط I3 و D1 به‌دست‌آمد. رفتار طول دانه و تعداد دانه در ردیف مشابه طول بلال بود. در تراکم پایین، تعداد ردیف با افزایش آب آبیاری افزایش یافت. ولی در تراکم بالا، افزایش مقدار آب آبیاری سبب کاهش تعداد ردیف گردید.





شکل ۲- سطح پاسخ صفات (عبارات Y، WUE، LL، CL، R، DD و L به ترتیب نشان دهنده عملکرد، کارایی مصرف آب، طول برگ، طول بلال، تعداد ردیف، تعداد دانه در ردیف و طول دانه است).



شکل ۳- نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب پارامترها

با توجه به کلیه نتایج، نقشه هم‌پوشانی صفات در شکل ۳ تعیین گردید. براساس این نتایج، حدود بهینه صفات در حالت کلی بین مقادیر ۰/۵- تا ۰/۵+ آبیاری و تراکم گیاه به‌دست‌آمد. بهینه‌سازی انجام شده برای تعیین مقادیر بهینه هر کدام از صفات در جدول ۷ نشان داده شده است. بهترین شرایط با کاربرد ۸۵ درصد آب آبیاری و تراکم ۷۵۰۰۰ بوته در هکتار به دست می‌آید. با رعایت این شرایط، عملکرد ذرت به ۱۱/۷ تن در هکتار می‌رسد که نسبت به متوسط عملکرد در وضعیت فعلی

حدود ۲۷ درصد بیشتر است. کارایی مصرف آب در شرایط بهینه به ۱/۰ کیلوگرم در مترمکعب رسید که نسبت به متوسط شرایط فعلی ۸/۵ درصد بیشتر است. طول برگ و طول بلال نیز به ترتیب به ۸۳ میلی‌متر و ۱۶ سانتی‌متر رسید که به ترتیب ۱۱ و ۲۸ درصد بیشتر از متوسط فعلی است. تعداد ردیف در حالت هدف برابر با ۲۱ عدد در نظر گرفته شد که در شرایط بهینه به ۲۶ عدد افزایش یافت.

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

نوع متغیر	پارامتر مورد بررسی	هدف	شبیه‌سازی شده	مقدار بهینه
متغیرهای وابسته	عملکرد (تن در هکتار)	۱۲/۰	۱۱/۷	-
	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۹۰	۱/۰	-
	طول برگ (میلی‌متر)	۸۵	۸۳	-
	طول بلال (سانتی‌متر)	۱۶	۱۶	-
	تعداد ردیف	۲۱	۲۶	-
	تعداد دانه در ردیف	۳۶	۳۶	-
	طول دانه (میلی‌متر)	۱۱	۱۱/۵	-
متغیرهای مستقل	آب آبیاری (درصد)	۸۵	-	-
	تراکم (تعداد در هکتار)	۷۵۰۰۰	-	-

این نشان می‌دهد که در شرایط فعلی، حتی در تیمارهای بالا تعداد دانه بالا، این پارامتر دارای مقدار کمی است و باید بهینه شود. تعداد دانه در ردیف نسبت به شرایط هدف تغییری نکرد و در بالاترین حد خود شبیه‌سازی گردید. طول دانه نیز نسبت به شرایط هدف اندکی افزایش یافت. افزایش این پارامتر به مقدار ۱۱/۵ میلی‌متر، سبب رشد ۹ درصدی آن نسبت به متوسط شرایط فعلی گردید.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بهینه‌سازی مقادیر آب آبیاری و تراکم بوته ذرت رقم SC500 انجام شد. بدین منظور از روش سطح پاسخ استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی مورد استفاده دارای خطای کم‌برآوردی گردید (MBE<0) گردید ولی خطا و دقت آن براساس دو آماره RMSE و NRMSE قابل‌قبول بود. کارایی این مدل نیز براساس دو آماره d و EF مطلوب به‌دست آمد. به‌همین دلیل بهینه‌سازی با استفاده از این مدل انجام گردید. تغییرات صفات عملکرد، تعداد ردیف، طول برگ و طول دانه با افزایش آب آبیاری روند صعودی داشت، ولی تراکم بوته فقط بر افزایش صفات عملکرد و طول دانه اثر داشت. تغییرات سایر صفات روند منظمی نداشت و به‌همین دلیل از هم‌پوشانی لایه‌ها استفاده گردید. نتایج همپوشانی نشان داد که حدود بهینه آب آبیاری و تراکم در محدوده ۰/۵- تا ۰/۵+ قرار داشت. براساس نتایج بهینه‌سازی، در صورت کاربرد ۸۵ درصد آب آبیاری و رعایت تراکم ۷۵۰۰۰ بوته در هکتار، بیشترین عملکرد و اجزای عملکرد به‌دست می‌آید.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: دکتر محمد مهدی نخجوانی مقدم؛ تهیه گزارش پژوهش: دکتر اصلان اگدرنژاد، دکتر محمد مهدی نخجوانی مقدم؛ تحلیل داده‌ها: دکتر اصلان اگدرنژاد

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر است:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله؛

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به‌خاطر حمایت معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. همچنین از موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج به‌خاطر حمایت‌های مالی، معنوی و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

اگدر نژاد، ا.، نخجوانی مقدم، م. م. و سپهری، س. ۱۴۰۲. بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب در کشت سویا با استفاده از مدل سطح-پاسخ. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۷(۲): ۴۰۰-۳۸۷.

جهان، م.، بهزاد امیری، م. و نوربخش، ف. ۱۳۹۵. بررسی اثر مقادیر مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسید هیومیک در شرایط کم آبیاری بر برخی ویژگی های اگرواکولوژیکی ذرت (*Zea mays L*) به روش سطح پاسخ. *پژوهش‌های زراعی ایران*. ۱۴(۴): ۷۶۴-۷۴۶.

جهان، م.، نصیری محلاتی، م.، خلیل‌زاده، ح.، بیگناه، ر. و رضوی، س. ا. ر. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی کاربرد کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در زراعت گندم پاییزه (*Triticum aestivum L.*) با استفاده از روش سطح-پاسخ (RSM). *پژوهش¬های زراعی ایران*. ۱۳(۴): ۸۲۳-۸۳۹.

حمید، ز.، سلطانی محمدی، ا. و احمدی، م. ۱۴۰۱. ارزیابی روش‌های فاکتوریل کامل، تاگوچی و طرح مربع مرکزی در کاهش آبشویی نیترات از خاک تحت تیمار زئولیت. *نشریه آبیاری و آب ایران*. ۱۳(۱): ۱۰۷-۹۰.

خاشعی سیوکی، ع.، هاشمی، س. ر. و احمدی، م. ۱۳۹۵. کاربرد روش تاگوچی در ارزیابی سبز شدن زعفران (*Crocus sativusL*) تحت تأثیر زئولیت و برنامه‌ریزی آبیاری. *نشریه پژوهش‌های زعفران*. ۴(۲): ۲۷۸-۲۶۶.

شاهین رخسار، پ. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۱. تعیین مقدار بهینه آب آبیاری گل گاوزبان در مراحل مختلف رشد با استفاده از طرح مرکب مرکزی. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*. ۳۶(۱): ۵۳-۳۵.

کریمی، ش.، اگدرنژاد، ا. و نخجوانی مقدم، م. م. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسطرس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۴(۶): ۱۸۹۳-۱۹۰۷.

کریمی، ش.، اگدرنژاد، ا. و نخجوانی مقدم، م. م. ۱۴۰۰. بررسی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت دانه‌ای در تراکم‌های کاشت متفاوت و مقادیر مختلف آب. *نشریه محیط زیست و مهندسی آب*. ۷(۱): ۷۲-۵۹.

گودرزی، ف.، دلشاد، م.، منصوری، ح. و سلطانی، ح. ۱۴۰۰. بهینه‌سازی فاکتورهای کود نیتروژن و فاصله بوته روی ردیف در گیاه اسفناج رقم Harrier به روش سطح پاسخ. *مجله علوم باغبانی ایران*. ۵۲(۱): ۱۳۹-۱۵۱.

منصوری، ح.، رضوانی مقدم، پ. و لکزیان، ا. ۱۳۹۳. مدیریت کوددهی نیتروژن، آبیاری و تراکم کاشت در گیاه دارویی موسیر ایرانی (*Allium hirtifolium*) با استفاده از روش بهینه سازی مرکب مرکزی. *نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار*. ۲۴(۴/۱): ۴۱-۶۰.

منصوری، ح.، نوشاد، ح. و حسنی، م. ۱۴۰۰. بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و آب در چغندرقند (*Beta vulgaris L.*) با استفاده از مدل‌سازی سطح- پاسخ. *نشریه علمی بوم‌شناسی کشاورزی*. ۱۳(۱): ۵۷-۷۲.

نخجوانی مقدم م. م.، دهقانی سانیج ح.، اکبری م. و صدرقاین، ح. ۱۳۸۹. اثر سطوح مختلف آب بر کارایی مصرف آب رقم ذرت دانه‌ای زودرس ۳۰۲ در روش آبیاری بارانی. *مجله آب و خاک*. ۲۴(۶): ۱۲۵۴-۱۲۳۶.

نخجوانی مقدم م.، فرهادی، ا.، صدرقاین، ح. و نجفی، ا. ۱۳۹۲. اثر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته بر عملکرد و صفات مورفولوژیک ذرت دانه ای سینگل کراس ۵۰۰ در منطقه کرج. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۱(۱): ۲۲-۱۳.

نیسی، ک.، اگدرنژاد، ا. و عباسی، ف. ۱۴۰۲. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهره‌وری آب تحت مدیریت مختلف کاربرد کود نیتروژن در کرج. *نشریه مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. ۳(۱): ۴۱-۲۶.

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. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.002

Hanway, J. J., and Ritchie, S. W. 2019. Zea mays CRC Handbook of Flowering, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 525–541, 2019.

Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G. and Miranda, L. R. 2009. Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H3PO4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 70: 35–45. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.12.007

Koocheki, A., Nassiri, M., Moradi, R., and 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. https://doi.org/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: 327–34. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.08.007

Mansouri, H., Bannayan, M., Rezvani Moghaddam, P., and 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. http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2013.8428

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