



Optimization of Application Levels of Irrigation Water, Superabsorbent Polymer and Cattle Manure Using Response-Surface Methodology: A Study on Sesame (*Sesamum indicum* L.) in an Ecological Cropping System

 M. Jahan^{1*}, M. Javadi²

 Received: 19-09-2021
 Revised: 20-02-2022
 Accepted: 23-02-2022

How to cite this article:

 Jahan, M., and Javadi, M. 2022. Optimization of Application Levels of Irrigation Water, Superabsorbent Polymer and Cattle Manure Using Response-Surface Methodology: A Study on Sesame (*Sesamum indicum* L.) in an Ecological Cropping System. Iranian Journal of Field Crops Research 20 (3): 255-274. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/jcsc.2022.72603.1090](https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.72603.1090)

Introduction

Due to climate change, increasing and maintaining the current level of production in low rainfall conditions in semi-arid regions is an important challenge. On the other hand, agriculture in these areas is often of low productivity due to low water use efficiency. Considering the fact that Iran is one of the challenging arid and semi-arid regions of the world, so it faces the problem of water shortage and precipitation. Therefore, in such circumstances, finding eco-friendly solutions to increase water use efficiency to achieve sustainable agricultural goals seems necessary. In recent years, many efforts have been made in this field, in this regard, limited irrigation and the use of superabsorbent into the soil as two practical strategies for water conservation and optimal use have been considered.

Optimizing the effective factors in production and management of water use in the farm could save limited water resources and protect the soil, moreover, can increase yields. Extensive research has been done on the effect of different levels of irrigation, superabsorbent and fertilizer on different crops, but in the field of simultaneous optimization of these factors using statistical techniques, there is little or no information, so this study aims to optimize consumption of irrigation water, superabsorbent and cattle manure were designed and conducted in low-input sesame cultivation using surface-response methodology and Box-Behnken design.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a Box-Behnken design. Experimental factors including a combination of different levels of irrigation water, superabsorbent and cattle manure. The total number of treatments required for this experiment was 15 treatments including 12 factorial combinations and 3 replications of the central point. The Box-Behnken design is essentially applicable and analyzed with one replication, but to fit the level of response equations, it is necessary to repeat the central points that represent the average level of high and low levels of each of the experimental factors. Using the Box-Behnken design, it is possible that most information from the minimum executive operation would be obtained through the distribution of trial points in the treatments. The values of these factors were determined by using software due to low and high levels of irrigation water (1500 and 3000 m³ ha⁻¹), superabsorbent (0 and 160 kg ha⁻¹) and cattle manure (0 and 30 ton ha⁻¹) using software.

In the Box-Behnken method, the response variable (y) is estimated by Equation 1:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

1- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

2- Ph.D. Student of Agroecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)

DOI: [10.22067/jcsc.2022.72603.1090](https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.72603.1090)

Where y is a dependent variable and according to sesame seed yield, biological yield, leaf area index, leaf dry weight, number of pods per plant, number of seeds per pods, 1000-seeds weight, relative water content and seed oil percentage were calculated separately; X_i is the independent variable, $X_i X_j$ is the interaction of the independent variable i and the independent variable j , X_i^2 the second power of the independent variable i and β_i to β_{ii} are the coefficients of the equation. After obtaining the simulation results, using calculations and statistical methods, a quadratic polynomial is obtained which expresses the response rate (yield) as a function of input variables. Finally, after optimizing the obtained relationship and eliminating ineffective sentences, using statistical tests and criteria such as F test value, Lack of Fit test, P_{value} and R^2 (coefficient of determination), the final relationship for predicting yield and other response variables is calculated for the present study (Equation 2).

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1^2 + a_5 X_2^2 + a_6 X_3^2 + a_7 X_1 X_2 + a_8 X_1 X_3 + a_9 X_2 X_3 \quad (2)$$

The obtained relationship is valid only within the limits defined for the input parameters and has no predictive power outside this range. In this equation, y : is a dependent variable already defined for Eq. 4. X_1 is the independent variable of irrigation water, X_2 is the superabsorbent, and X_3 is the independent variable of manure, a_1 to a_9 are the equation coefficients. Optimal amounts of irrigation water, superabsorbent and manure were determined according to the possibility of maximum seed yield. Finally, the estimated values were compared with the observed data and the validity of the regression models was evaluated using the root mean square error (*RMSE*).

Results and Discussion

In general, considering the significant effect of linear component of manure from regression model and biological yield as well as linear effect of irrigation and manure on the number of seed per pod, it can be concluded that the use of manure ultimately increased seed yield. Regarding the quality yield of sesame (seed oil percentage), the significance of the linear component of the superabsorbent effect can guarantee the quality yield of sesame. The high significant ($p \leq 0.01$) effect of the second order (full quadratic model) component of manure on 1000-seeds weight also indicates the effectiveness of manure on yield components and finally seed yield. Optimization was performed with three scenarios. First, considering all three factors, irrigation, superabsorbent and manure were done. Optimization was done to produce the highest seed yield, in which case the highest seed yield (4541 kg ha^{-1}) was obtained with $3,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ of irrigation water, without superabsorbent and with 30 t ha^{-1} of manure. In the next step, to investigate the role of superabsorbent in water saving, optimization was performed with half irrigation water, 100 kg ha^{-1} of superabsorbent and with no application of manure, which resulted in the production of 3380 kg ha^{-1} of seed. In the third case, the results of optimization for irrigation water in the range of 1500 to $2250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (limited irrigation), with no use of superabsorbent and the amount of manure from zero to 30 t ha^{-1} , showed that applying $2250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ of water and 30 t ha^{-1} of manure could be resulted in a seed yield of 4186 kg ha^{-1} . The highest amount of irrigation water productivity, equal to $2.2 \text{ kg seed per m}^3$ of water, was obtained from 2250 m^3 of irrigation water. Third scenario compared with the first scenario shows a reduction of 750 m^3 in the volume of irrigation water that resulted in only an 8% reduction in seed yield (4186 vs. 4541 kg of seed), therefore, the third scenario potentially could be chosen by the farmers. Depends on the level of availability of water resources, the balance of economic value of water against seed yield, and other environmental and management options, if the application of 30 t ha^{-1} of manure to achieve the stable seed yield is not economical for the farmer compared with the application of 100 kg ha^{-1} of superabsorbent, we can recommend the second scenario (1500 m^3 of water plus 100 kg of superabsorbent, with no manure) that will result in the seed yield by 3380 kg ha^{-1} . The difference in seed yield in this scenario compared with the third scenario is 806 kg of seed, so the farmer must take into account all economic and managerial conditions to select the appropriate scenario. In general, the results of this study showed that using eco-friendly inputs, it is possible to produce stable sesame in an arid and semi-arid region and achieve a yield beyond of the conventional high-input systems.

Keywords: Drought, Ecofriendly inputs, Economical feasibility, Production stability, Seed oil

بهینه‌سازی میزان کاربرد آب آبیاری، پلیمر سوپرجاذب رطوبت و کود دامی با استفاده از روش سطح-پاسخ (RSM): مطالعه روی کنجد (*Sesamum indicum* L.) در یک نظام زراعی

اکولوژیک

محسن جهان^{۱*}، مریم جوادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

چکیده

باتوجه به تغییرات اقلیمی، افزایش و یا حفظ سطح کنونی تولید در شرایط بارندگی کم در مناطق نیمه‌خشک به‌عنوان چالشی مهم مطرح است و نیازمند تجدید نظر در روش‌های تولید و به‌ویژه نهاده‌های مصرفی است. در همین راستا و به‌منظور تعیین بهترین سطح آب آبیاری و نهاده‌های دوستدار محیط‌زیست شامل سوپرجاذب رطوبت و کود دامی در زراعت کنجد در یک ناحیه خشک و نیمه‌خشک، آزمایشی در قالب باکس-سینکن طراحی و طی سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در مزرعه دانشگاه فردوسی مشهد به اجرا درآمد. تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین آب آبیاری (۳۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر مکعب در هکتار)، سوپرجاذب رطوبت (۱۶۰ و صفر کیلوگرم در هکتار) و کود گاوی (۳۰ و صفر تن در هکتار) طراحی شدند، به طوری که نقطه مرکزی در هر تیمار سه مرتبه تکرار شد و کلاً ۱۵ ترکیب تیماری به‌دست آمد. عملکرد دانه و ماده خشک، شاخص سطح برگ، وزن خشک برگ، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه، درصد روغن دانه و کارایی مصرف آب، به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد اندازه‌گیری و محاسبه قرار گرفتند. سپس با استفاده از مدل رگرسیونی گام به گام و برازش تابع درجه دو کامل به داده‌ها، سطح-پاسخ متغیرهای وابسته تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی محاسبه و رسم شد. اثر جزء خطی کود دامی از مدل رگرسیونی بر عملکرد زیستی، اثر جزء خطی آبیاری و کود دامی بر تعداد کپسول در دانه و همچنین اثر جزء خطی سوپرجاذب بر درصد روغن دانه معنی‌دار بود. اثر جزء درجه دو کود دامی بر وزن هزار دانه، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که حاکی از اثربخشی کود دامی بر اجزای عملکرد و در نهایت عملکرد دانه است. بیشترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری، برابر با ۲/۲ کیلوگرم دانه به ازای متر مکعب آب، برای سطح آبیاری ۲۲۵۰ متر مکعب حاصل شد. بهینه‌سازی با نصف آب آبیاری، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب و بدون کاربرد کود دامی انجام شد که منجر به تولید ۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار دانه شد. در حالت سوم، نتایج بهینه‌سازی که برای آب آبیاری در دامنه ۱۵۰۰ تا ۲۲۵۰ متر مکعب در هکتار (شرایط کم آبیاری)، بدون کاربرد سوپرجاذب و مقدار کود دامی از صفر تا ۳۰ تن در هکتار انجام گرفت، نشان داد که با استفاده از ۲۲۵۰ متر مکعب در هکتار آب و ۳۰ تن در هکتار کود دامی، می‌توان به عملکرد دانه‌ای معادل ۴۱۸۶ کیلوگرم در هکتار دست یافت. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که با استفاده از نهاده‌های دوستدار محیط‌زیست، می‌توان نسبت به زراعت باثبات کنجد اقدام نمود و به عملکردی با ثبات و فزاینده از عملکرد سیستم‌های رایج پرنهاده، دست یافت.

واژه‌های کلیدی: ثبات تولید، خشکی، روغن دانه، صرفه اقتصادی، نهاده بوم سازگار

مقدمه

در میان گیاهان روغنی یک ساله، کنجد (*Sesame indicum* L.) از خانواده Pedaliaceae لقب ملکه دانه‌های روغنی را گرفته و دارای بیشترین درصد روغن (۵۵ درصد) است. کنسانتره دانه کنجد حاوی ۴۲ درصد پروتئین بوده و غذای مناسبی برای مرغ‌های

۱- استاد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- دانشجوی دکتر، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* - نویسنده مسئول: (Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)

مصرف عناصر غذایی، افزایش درصد جوانه‌زنی و سبزشدن بذر (Xie *et al.*, 2013)، کاهش تلفات آب در خاک (Eneji *et al.*, 2013)، کاهش میزان تبخیر از سطح خاک (Nykanen *et al.*, 2011) و کاهش تلفات ناشی از مصرف کودها (Zhong *et al.*, 2013) منجر به بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات مختلف می‌شوند. جهان و نصیری محلاتی (Jahan and Nassiri-Mahallati, 2022) ضمن مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم بر فنولوژی کنگد، گزارش کردند که به‌کارگیری کم‌آبیاری در مقایسه با آبیاری کامل، منجر به کاهش تنها ۱/۲ درصدی در عملکرد دانه شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که می‌توان از تکنولوژی کم‌آبیاری در تولید پایدار محصولات زراعی بهره گرفت.

مصرف کود دامی در کشاورزی سنتی جایگاه خاصی داشته و در حال حاضر می‌تواند نقش مهمی را در کشاورزی پایدار ایفا کند. کودهای دامی حاوی اکثر عناصر مورد نیاز گیاهان هستند و علاوه بر داشتن عناصر پرمصرف، حاوی عناصر کم‌مصرف بوده و استفاده از آن‌ها در درازمدت تعادل عناصر تغذیه‌ای خاک را در پی خواهد داشت (Amiri *et al.*, 2022). مواد آلی به علت داشتن گروه‌های عامل مختلف از جمله کربوکسیلی، فنلی، الکی و هیدروکسیلی، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داده و سبب می‌گردد عناصر غذایی در خاک بهتر نگهداری شوند و گیاه دسترسی بیشتری به آن داشته باشد. از سوی دیگر، مواد آلی در اثر معدنی شدن مقدار قابل توجهی از عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف را در خاک آزاد نموده و به تغذیه متعادل گیاه کمک می‌نمایند (Samavat *et al.*, 2008). نتایج بررسی‌های متعدد نشان داده است که کودهای آلی سبب بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و عملکرد محصولاتی چون گندم (*Triticum aestivum* L.) و ریحان (*Ocimum basilicum* L.) را افزایش داده‌اند (Jahan *et al.*, 2016; Tahami *et al.*, 2014; Vessey, 2003). مدافع بهزادی و همکاران (Modafe Behzadi *et al.*, 2018) گزارش کردند که عملکرد ماده خشک گیاه دارویی وسمه در نتیجه کاربرد ۳۰ تن در هکتار کود گاوی در بیشترین مقدار بود، به طوری که نسبت به کاربرد کود شیمیایی و شاهد به ترتیب ۱۰ و ۲۰/۵ درصد افزایش نشان داد. همچنین در اثر استمرار مصرف کودهای آلی، pH خاک کاهش می‌یابد و در نتیجه علاوه بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های زراعی، حلالیت برخی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر، آهن، روی، منگنز، بر و مس افزایش می‌یابد (Dabhi *et al.*, 2013).

باتوجه به این که ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده و مقدار مواد آلی خاک‌های آن اندک است، تأمین نیتروژن و سایر عناصر مورد نیاز گیاهان از طریق نهاده‌های اکولوژیک ضروری به نظر می‌رسد. فراهمی آب و عناصر غذایی، عوامل کلیدی در تولید آگرواکوسیستم‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب

تخم‌گذار و دام‌های شیرده می‌باشد (El-Habbasha *et al.*, 2007). اگرچه کشت و کار این گیاه دانه روغنی، از استوا تا عرض‌های ۴۰ درجه شمالی و همچنین تا عرض‌های ۴۵ درجه جنوبی امکان‌پذیر است، اما در ایران به رغم سابقه دیرینه کشت و کار و همچنین وجود پتانسیل‌های فراوان در زمینه تولید دانه‌های روغنی، پیشرفت چندانی در زمینه کشت کبجد حاصل نشده است. با توجه به نیاز روزافزون کشور به روغن، این گیاه می‌تواند به‌عنوان یک گیاه صنعتی و روغنی مهم مطرح باشد (Rezvani Moghaddam, 2008).

خشکی نیز یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی به شمار می‌رود و با توجه به گزارش‌های پژوهشگران در بسیاری از مناطق جهان، این مشکل به‌طور فزاینده‌ای روبه افزایش است (Morison *et al.*, 2007; Bannayan *et al.*, 2010). باتوجه به تغییرات اقلیمی، افزایش و حفظ سطح کنونی تولید در شرایط بارندگی کم در مناطق نیمه‌خشک به‌عنوان چالشی مهم مطرح می‌باشد (Nyakuda and Stroosnijder, 2014; Jahan and Ghalenoei, 2022). از سوی دیگر، کشاورزی در این مناطق اغلب در نتیجه پایین بودن کارایی مصرف آب، بهره‌وری پایینی دارد (Wu *et al.*, 2015). ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود، لذا با مشکل کمبود آب و نزولات جوی مواجه است (Bannayan *et al.*, 2010). بنابراین، در چنین شرایطی یافتن راهکارهایی بوم‌سازگار به منظور افزایش کارایی مصرف آب در جهت نیل به اهداف کشاورزی پایدار ضروری به نظر می‌رسد (Dabhi *et al.*, 2013; Jahan and Nassiri-Mahallati, 2022). از این‌رو در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی در این زمینه صورت گرفته است که در این راستا، کم‌آبیاری و کاربرد سوپرجاذب‌های رطوبت در خاک به‌عنوان دو راهکار اساسی جهت صرفه‌جویی و استفاده بهینه آب مدنظر قرار گرفته‌اند (Islam *et al.*, 2011; Nassiri-Mahallati and Jahan, 2020). امروزه پلیمرهای سوپرجاذب به‌طور قابل توجهی در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند و نقش آن‌ها در کاهش شدت تنش خشکی و تلفات گیاهان و افزایش تولید محصولات زراعی در پژوهش‌های متعدد به اثبات رسیده است (Zhong *et al.*, 2013; Abedi-Koupai *et al.*, 2008; Jahan and Nassiri-Mahallati, 2020). این پلیمرها مقدار زیادی آب جذب و آن را در ساختمان خود حفظ می‌کنند و در صورت نیاز در شرایط خشکی آن را در اختیار گیاه قرار می‌دهند (Natesan *et al.*, 2007; Wang and Wang, 2010; Zhong *et al.*, 2013). این مواد، بی‌رنگ، بی‌بو و بدون خاصیت آلاینده‌گی خاک، آب و بافت گیاه می‌باشند، همچنین کاملاً سالم و غیرسمی هستند و در نهایت در خاک به دی‌اکسید کربن، آب، آمونیاک و یون پتاسیم تجزیه می‌شوند. سوپرجاذب‌ها از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خاک، کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک (Abedi Koupai *et al.*, 2008)، افزایش کارایی

درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) و با هدف بهینه‌سازی کاربرد سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت، آب و کود دامی در زراعت کنجد اجرا شد. آزمایش مورد نظر در قالب طرح باکس-بنکن و تیمارهای آزمایشی شامل ترکیبی از سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت، آب و کود دامی بود. تعداد کل تیمارهای مورد نیاز این آزمایش ۱۵ تیمار که شامل ۱۲ ترکیب فاکتوریل و سه مرتبه تکرار نقطه مرکزی بود. طرح باکس-بنکن اساساً با یک تکرار قابل اجرا و آنالیز است، البته به منظور برآزش معادلات سطح پاسخ، لازم است تا نقاط مرکزی که معرف میانگین سطوح بالا و پایین هر یک از فاکتورهای تحت بررسی هستند، حداقل سه بار تکرار شوند (Box and Behnken, 1960). با استفاده از طرح باکس-بنکن این امکان فراهم می‌شود که بیشترین اطلاعات از حداقل عملیات اجرایی از طریق توزیع نقاط آزمایشی در محدوده تیمارها به دست آید. بر این اساس، مقادیر این عامل‌ها باتوجه به سطوح پایین و بالای آب آبیاری (۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ مترمکعب)، سوپرجاذب رطوبت (۰ و ۱۶۰ کیلوگرم) و کود گاوی (۰ و ۳۰ تن در هکتار)، با استفاده از نرم‌افزار Minitab Ver. 17 مشخص گردید. بر اساس رابطه (۱) و با در نظر گرفتن سه تکرار برای نقطه مرکزی، ۱۵ تیمار مشخص شد (Box and Behnken, 1960) (جدول ۱). مقادیر بیشینه، مرکزی و کمینه پارامترها به ترتیب متناظر با ۱، صفر و -۱ در جدول ۱ نشان داده شده است.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، pH و هدایت الکتریکی و محتوای عناصر غذایی شامل NPK، قبل از شروع آزمایش از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. خصوصیات سوپرجاذب رطوبت مورد استفاده (در خاک) در جدول ۳ بیان شده است. قبل از کاربرد کود دامی، نمونه‌ای از آن به آزمایشگاه ارسال شده و محتوای عناصر نیتروژن، فسفر و پتاس آن به ترتیب ۱/۱۵، ۰/۳۱ و ۱/۰۲ درصد تعیین شد.

به منظور انجام عملیات آماده‌سازی زمین و تهیه بستر کاشت، دو نوبت از دیسک عمود بر هم و یک نوبت سیکلوتیلر استفاده شد. کود دامی نیز برحسب نیاز غذایی کنجد و باتوجه به بررسی منابع انجام شده به مقدار ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار، یک ماه قبل از کاشت به‌طور یکنواخت در سطح کرت‌های موردنظر پخش و بلافاصله توسط بیل دستی وارد خاک شد. کاشت بذر در اواخر اردیبهشت ماه به‌صورت دستی در هشت ردیف به طول سه متر انجام شد. ابعاد هر کرت ۴ × ۳ متر بود و به منظور جلوگیری از اختلاط آب آبیاری، فاصله بین کرت‌ها یک متر در نظر گرفته شد. همچنین با در نظر گرفتن تراکم ۴۰ بوته در متر مربع، فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر و فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر بود.

می‌شوند (Reza et al., 2012) و بهینه‌سازی این دو عامل با هم مرتبط است، به طوری که استفاده بهینه از کود در شرایطی امکان‌پذیر است که مدیریت بهینه آبیاری وجود داشته باشد (Mahajan et al., 2012). به منظور تعیین سطوح بهینه مجموعه‌ای از نهاده‌های مورد استفاده در کشاورزی نظیر پلیمر سوپرجاذب رطوبت، کود دامی و آب آبیاری، استفاده از مدل‌ها و روابط تجربی-ریاضی امری اجتناب‌ناپذیر است (Amiri et al., 2022). در همین راستا روش سطح-پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که به منظور آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌های یک فرآیند استفاده می‌شود و هدف نهایی آن بهینه‌سازی فرآیند است (Myers and Montgomery, 1995). طرح‌های مرکب مرکزی، باکس-بنکن^۱ و دهلرت سه طرح اصلی روش سطح-پاسخ هستند. هدف از این روش یافتن مقادیر مناسب هر یک از متغیرها برای رسیدن به مطلوب‌ترین پاسخ‌هاست. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز یا سناریوهای شبیه‌سازی در این روش، برای تعداد مشخصی عامل آزمایشی، بسیار کمتر از دیگر روش‌ها (مانند آزمایش‌های فاکتوریل) است. این موضوع به‌ویژه با افزایش تعداد مولفه‌های ورودی اهمیت دوچندان می‌یابد. همچنین، به دلیل این‌که برای هر عامل آزمایشی سه مقدار ورودی تعیین می‌شود، طرح باکس-بنکن امکان بررسی و اندازه‌گیری تأثیر ترکیبات دوتایی از پارامترها علاوه بر تأثیر جداگانه و مستقیم هر یک از آن‌ها را فراهم می‌آورد (Erikson et al., 2008).

باتوجه به افزایش روزافزون جمعیت و تغییر در الگوی غذایی جوامع، مصرف روغن‌های گیاهی نیز در حال افزایش است. لذا باتوجه به این‌که بخش زیادی از روغن مورد نیاز کشور از طریق واردات تامین می‌گردد، افزایش تولید و کیفیت دانه‌های روغنی در داخل کشور بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Mohajer, 2017).

بهینه‌سازی عوامل مؤثر در تولید و مدیریت کاربرد آب در مزرعه سبب صرفه‌جویی در منابع محدود آب و حفاظت از خاک شده و علاوه بر آن می‌تواند موجب افزایش محصول شود. تحقیقات گسترده‌ای در مورد اثر سطوح مختلف آبیاری، سوپرجاذب رطوبت و کود بر روی گیاهان مختلف صورت گرفته است، اما در زمینه بهینه‌سازی همزمان این عوامل با استفاده از تکنیک‌های آماری، اطلاعاتی وجود ندارد و یا اندک است، لذا این تحقیق با هدف بهینه‌سازی میزان مصرف آب آبیاری، سوپرجاذب رطوبت و کود دامی در زراعت کم نهاده کنجد با استفاده از روش سطح-پاسخ و طرح باکس بنکن طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (باعراض جغرافیایی ۳۶

جدول ۱- مقادیر و ضرایب تیمارهای آزمایشی بر اساس طرح باکس-بنکن

Table 1- Values and coefficients of experimental treatments based on Box-Behnken design

شماره تیمار Treatment number	ضرایب Coefficients			مقادیر تیمارها* Treatment values*		
	آب Water (X1)	سوپر جاذب SAP (X2)	کود دامی Manure (X3)	آب Water (m ³ ha ⁻¹)	سوپر جاذب SAP (kg ha ⁻¹)	کود دامی Manure (ton ha ⁻¹)
	1	0	+1	+1	2250	160
2	+1	+1	0	3000	160	15
3	+1	0	-1	3000	80	0
4	0	0	0	2250	80	15
5	0	0	0	2250	80	15
7	+1	-1	0	3000	0	15
8	-1	0	-1	1500	80	0
9	-1	0	+1	1500	80	30
10	0	+1	-1	2250	160	0
11	0	0	0	2250	80	15
12	0	-1	-1	2250	0	0
13	0	-1	+1	2250	0	30
14	-1	+1	-1	1500	160	15
15	-1	-1	-1	1500	0	15
15	+1	0	+1	3000	80	30

* +1، -1 و 0، به ترتیب سطوح بالا، پایین و میانگین هر فاکتور را نشان می‌دهد.

* +1, -1, and 0 indicates up, down and medium level of each factor

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر)

Table 2- Some physiochemical properties of the soil of the experimental site (depth of 0-30 cm)

کربن آلی Organic carbon (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	نیترژن کل Total N (%)	بافت Texture
0.68	7.6	0.52	315	71.3	0.069	لوم رسی Clay loam

جدول ۳- خصوصیات سوپر جاذب رطوبت مورد استفاده

Table 3- Properties of applied superabsorbent

فرمولاسیون ظاهری Appearance	رطوبت Humidity (%)	بو و سمیت Odor and toxicity	چگالی Density (g.cm ⁻³)	اسیدیته pH
گرانول (گرید ریز دانه) Granule	<5%	0	0.8	9.8

بعضی از گیاهان در اوایل مرحله رشد از قارچ کش رورال تی اس (با غلظت ۱ در هزار) استفاده گردید. قبل از برداشت نهایی محصول، بوته‌های واقع در سطحی برابر با ۵۰۰ سانتی‌متر مربع (شش بوته) از هر کرت انتخاب و اجزای عملکرد (تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه) در آن‌ها تعیین شد. جهت تعیین عملکرد دانه، در انتهای فصل رشد، برداشت گیاهان در نیمه دست نخورده هر کرت، با حذف دو ردیف کناری و ۲۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای انجام شد. گیاهان برداشت شده سپس در

اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت با هدف تسهیل در خروج گیاهچه‌ها از خاک و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر هفت روز یکبار به شیوه نشتی انجام شد. نیاز آبی کنجد در منطقه مشهد با استفاده از نرم‌افزار OPTIWAT تعیین شد (Alizadeh and Kamali, 2008). در هر بار آبیاری، مقدار آب آبیاری مطابق میزان تعیین شده برای کرت مربوطه، توسط کنتور با دقت ۰/۰۱ متر مکعب کنترل و ثبت می‌شد. وجین علف‌های هرز در دو نوبت (چهار و شش هفته پس از سبز شدن) و به صورت دستی صورت گرفت. به دلیل آلودگی قارچی

عدم برازش^۲، P_{value} و ضریب تبیین R²، رابطه نهایی برای پیش‌بینی عملکرد و سایر متغیرهای پاسخ مورد نظر در پژوهش حاضر محاسبه شد (رابطه ۵). رابطه به‌دست آمده، صرفاً در محدوده‌های تعریف شده برای پارامترهای ورودی صادق بوده و در خارج از این محدوده قدرت پیش‌بینی ندارد.

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_1^2 + a_5X_2^2 + a_6X_3^2 + a_7X_1X_2 + a_8X_1X_3 + a_9X_2X_3 \quad (5)$$

در این رابطه، y: متغیر وابسته است و باتوجه به عملکرد دانه کنگد، عملکرد زیستی، سطح برگ، وزن خشک، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزاردانه، رطوبت نسبی برگ و درصد روغن به‌صورت جداگانه محاسبه شدند؛ X₁: متغیر مستقل آبیاری و X₂: سوپر جاذب رطوبت و X₃: متغیر مستقل کود دامی و a₀ تا a₉ ضرایب رابطه هستند. مقادیر بهینه آب، سوپر جاذب و کود دامی مصرفی باتوجه به امکان تولید بیشینه عملکرد دانه تعیین گردید.

در نهایت مقادیر برآورد شده با داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از آماره‌ی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۶) ارزیابی شد (Myers and Montgomery, 1995)

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (6)$$

که در این رابطه \bar{O} : میانگین مشاهدات، P_i: مقادیر برازش شده و O_i: مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

RMSE به‌صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر مشاهده شده بیان می‌شود و بر اساس تعریف، در صورتی که مقدار آن کمتر از ۱۰ درصد باشد، قدرت پیش‌بینی مدل عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، خوب و اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰ درصد باشد، ضعیف می‌باشد.

قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نرمال بودن توزیع آن‌ها اطمینان حاصل شد. برای داده‌های شمارشی، عملیات تبدیل داده انجام گرفت. به‌منظور اطمینان از یکنواختی واریانس تیمارها، آزمون بارتلت بر روی داده‌ها انجام و فرض صفر تأیید شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای MS Excel Ver. 19 و Minitab صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل^۳ برای هر کدام از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد زیستی، تعداد پنجه بارور، محتوای نسبی رطوبت، تلفات نیتروژن و کارایی نیتروژن در جدول ۳ نشان داده شده است.

هوای آزاد خشک و عملکرد زیستی آن‌ها اندازه‌گیری شد. پس از بوجاری بذرها، میزان عملکرد دانه نیز تعیین شد.

به‌منظور تعیین درصد و عملکرد روغن، از روش استخراج گرم (AOAC Official Method 927.28) و تحت مجاورت مداوم با حلال آلی انجام گرفت (AOAC international, 2012).

بهره‌وری آب آبیاری بر اساس عملکرد دانه، از نسبت عملکرد دانه به مجموع آب مصرفی در طول دوره رشد، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Fernandez et al., 2020):

$$WUE = Yg (\text{kg ha}^{-1}) / W (\text{m}^3 \text{ha}^{-1}) \quad (2)$$

در این معادله WUE کارایی مصرفی آب، Yg عملکرد دانه (برحسب کیلوگرم در هکتار) و W مجموع آب مصرفی در طی فصل رشد (شامل آب آبیاری و میزان بارندگی طی زمان مورد نظر، بر حسب متر مکعب در هکتار) می‌باشد.

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ‌ها (RWC^۱)، در اواسط مرحله گلدهی از برگ‌های یکسان روی بوته‌های مربوط به هر تیمار، قطعه‌های ۲×۲ سانتی‌متری بریده و با استفاده از ترازو دیجیتال وزن تر (FW) آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس قطعات بریده شده به مدت شش ساعت در دمای آزمایشگاه در آب مقطر قرار داده شد و پس از اندازه‌گیری وزن آن‌ها و در نظر گرفتن آن به‌عنوان وزن آماس (TW) ، به مدت ۴۸ ساعت در آون با درجه حرارت ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس وزن آن‌ها به‌عنوان وزن خشک (DW) برگ یادداشت و در نهایت با استفاده از رابطه (۳) محتوای آب نسبی برگ محاسبه گردید (Kramer, 1988):

$$RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \quad (3)$$

در روش باکس بنکن، متغیر پاسخ (y) توسط رابطه (۴) برآورد می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 \quad (4)$$

در این رابطه، y: متغیر وابسته است و باتوجه به عملکرد دانه کنگد، عملکرد زیستی، سطح برگ، وزن خشک، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزاردانه، رطوبت نسبی برگ و درصد روغن به‌صورت جداگانه محاسبه شدند؛ X_i: متغیر مستقل i^{ام} و X_iX_j: اثر متقابل متغیر مستقل i^{ام} و متغیر مستقل j^{ام}، X_i² توان دوم متغیر مستقل i^{ام} و β_i تا β_{ii} ضرایب معادله هستند. پس از به‌دست آوردن نتایج شبیه‌سازی، با استفاده از محاسبات و روش‌های آماری، یک چندجمله‌ای درجه دوم حاصل می‌شود که میزان پاسخ (عملکرد) را به‌صورت تابعی از متغیرهای ورودی بیان می‌کند. در پایان و پس از بهینه‌سازی رابطه به‌دست آمده و حذف جملات کم اثر، با استفاده از آزمون‌های آماری و معیارهایی چون مقدار آزمون F، آزمون

2- Lack of Fit

3- Full quadratic regression

1- Relative Water Content

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مدل رگرسیونی درجه دو کامل اثر سوپراآب، آب آبیاری و کود دامی بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد کبکد
 Table 4- Analysis of variance (mean of squares) of the linear and full quadratic regression model of the effects of superabsorbent, manure and irrigation on some growth characteristics and yield of sesame

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات (Mean of squares)										درصد روغن Seed oil percent
		شاخص سطح برگ LAI	رطوبت نسبی برگ RWC	وزن خشک برگ Leaf dry weight	عملکرد زیستی Biological yield	تعداد کپسول در بوته Pod no. per plant	تعداد دانه در کپسول Seed no. per pod	وزن هزار دانه 1000 seeds weight	عملکرد دانه Seed yield			
مدل رگرسیونی Regression model	9	284.37 ^{ns}	65.134 ^{ns}	11.2284 ^{ns}	4.4748 ^{ns}	40.995 ^{ns}	80.723 ^{ns}	0.020630 ^{ns}	1240753 ^{ns}	2.14913 ^{ns}		
خطی Linear	3	106.65 ^{ns}	7.002 ^{ns}	14.1294 ^{ns}	8.4828 ^{ns}	70.481 ^{ns}	200.712*	0.008608 ^{ns}	2458883 ^{ns}	2.86343 ^{ns}		
آب آبیاری Irrigation water	1	0.70 ^{ns}	1.465 ^{ns}	15.6715 ^{ns}	0.0150 ^{ns}	80.222 ^{ns}	334.111**	0.024200 ^{ns}	2800423 ^{ns}	0.50000 ^{ns}		
سوپراآب Superabsorbent	1	2.92 ^{ns}	9.342 ^{ns}	24.8784 ^{ns}	10.3194 ^{ns}	46.722 ^{ns}	105.125 ^{ns}	0.000613 ^{ns}	4128743 ^{ns}	7.67014*		
کود دامی Cattle manure	1	316.35 ^{ns}	10.198 ^{ns}	1.8382 ^{ns}	15.1140*	84.500 ^{ns}	162.901 ^{ns}	0.001012 ^{ns}	447483 ^{ns}	0.42014 ^{ns}		
مدل درجه دو Full quadratic model	3	669.24 ^{ns}	85.380 ^{ns}	1.3620 ^{ns}	0.4355 ^{ns}	43.882 ^{ns}	36.423 ^{ns}	0.048673*	52401 ^{ns}	1.25988 ^{ns}		
W*W	1	1825.89 ^{ns}	167.419 ^{ns}	0.3054 ^{ns}	1.1161 ^{ns}	2.479 ^{ns}	67.479 ^{ns}	0.012385 ^{ns}	37620 ^{ns}	0.08618 ^{ns}		
S*S	1	103.16 ^{ns}	99.543 ^{ns}	0.0029 ^{ns}	0.2642 ^{ns}	119.146 ^{ns}	26.917 ^{ns}	0.002231 ^{ns}	3725 ^{ns}	0.97507 ^{ns}		
m*m	1	5.00 ^{ns}	19.119 ^{ns}	3.8685 ^{ns}	0.0043 ^{ns}	10.428 ^{ns}	6.482 ^{ns}	0.125801**	118991 ^{ns}	2.47934 ^{ns}		
اثر متقابل Interaction	3	77.22 ^{ns}	103.020 ^{ns}	18.1939 ^{ns}	4.5059 ^{ns}	8.620 ^{ns}	5.035 ^{ns}	0.004608 ^{ns}	1210976 ^{ns}	2.32407 ^{ns}		
W*s	1	59.42 ^{ns}	2.018 ^{ns}	4.5194 ^{ns}	12.0340 ^{ns}	3.361 ^{ns}	3.063 ^{ns}	0.008100 ^{ns}	2405174 ^{ns}	2.25000 ^{ns}		
W*m	1	13.89 ^{ns}	300.807 ^{ns}	34.5291 ^{ns}	0.7000 ^{ns}	2.250 ^{ns}	7.840 ^{ns}	0.000100 ^{ns}	296058 ^{ns}	0.02778 ^{ns}		
S*m	1	158.34 ^{ns}	6.235 ^{ns}	15.5333 ^{ns}	0.7838 ^{ns}	20.250 ^{ns}	4.202 ^{ns}	0.005625 ^{ns}	931695 ^{ns}	4.69444 ^{ns}		
عدم برازش Lack of fit	3	785.71	174.377	7.4441	2.4473	27.352	32.414	0.002208	675449	1.38194		

ns, *, ** represents for non-significant, significant at 0.05 and 0.01 probability level, respectively. ns, *, ** represents for non-significant, significant at 0.05 and 0.01 probability level, respectively.

جدول ۵- ضرایب رگرسیونی و تبیین معادله رگرسیونی درجه دو کامل مدل رگرسیونی درجه دو کامل اثر سوپر جاذب، آب آبیاری و کود دامی بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد کتجد
 Table 5- Regression coefficients and coefficients of determination of the full quadratic regression model of the effects of superabsorbent, manure and irrigation on some growth characteristics and yield of sesame

ضرایب Coefficients	متغیرهای پاسخ										درصد روغن Seed oil percent
	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد زیستی Biological yield	شاخص سطح برگ LAI	وزن خشک برگ Leaf dry weight	تعداد کپسول در بوته Pod no. per plant	تعداد کپسول در کپسول Seed no. per pod	وزن هزار دانه 1000 seeds weight	رطوبت نسبی برگ RWC	تعداد دانه 1000 seeds weight	وزن هزار دانه 1000 seeds weight	
a0	2105	9.90	284	2.8	98.5	80.5	2.296	153.6	2.296	50.33	
a1	0.69	0.00147	-0.180	0.0021	0.0021	-0.0263	0.000337	-0.0669	0.000337	-0.00200	
a2	25.3	-0.0670	0.074	-0.0417	-0.178	0.158	-0.00194	-0.186	-0.00194	-0.0140	
a3	17	0.042	0.22	0.288	0.29	0.266	-0.0204	-2.05	-0.0204	-0.069	
a4	-0.00018	-0.000001	0.000040	0.000001	-0.000001	0.000008	-0.000000	0.000012	-0.000000	0.000000	
a5	0.0050	-0.000042	-0.000083	-0.000004	0.000888	-0.000422	0.000004	0.00081	0.000004	-0.000080	
a6	-0.80	-0.00015	0.0052	0.00455	0.0075	-0.0059	0.000820	0.0101	0.000820	0.00364	
a7	-0.01292	0.000029	0.000064	0.000018	0.000015	-0.000015	0.000001	0.000012	0.000001	0.000012	
a8	0.0242	0.000037	-0.00017	-0.000261	-0.000067	0.000124	-0.000000	0.000771	-0.000000	0.000007	
a9	-0.402	-0.000369	-0.0052	0.00164	-0.00188	-0.00085	-0.000031	0.00104	-0.000031	-0.000903	
R ²	62.49	77.74	45.63	60.84	48.24	83.50	82.90	40.52	82.90	80.57	

$$a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1^2 + a_5 X_2^2 + a_6 X_3^2 + a_7 X_1 X_2 + a_8 X_1 X_3 + a_9 X_2 X_3 = Y$$

X₁, X₂ and X₃ indicates independent variables of irrigation, superabsorbent and manure, respectively

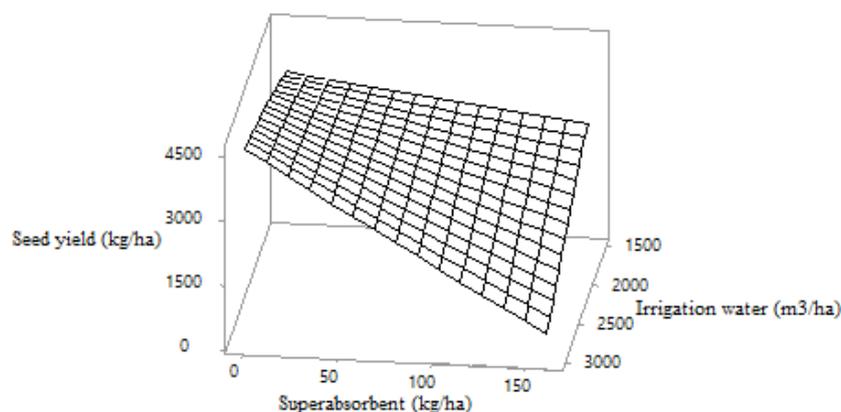
X₁, X₂ and X₃ به ترتیب متغیرهای مستقل آبیاری، سوپر جاذب و کود دامی هستند.

دامی، در شکل ۱ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در شکل ۱ آن است که در سطح کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، کاهش آب آبیاری از ۳۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر مکعب در هکتار، سبب افزایش عملکرد دانه شد. این روند نمایانگر این است که این دو نهاد (آب آبیاری و سوپرجاذب) عکس یکدیگر عمل کرده و ویژگی جبرانی برای هم دارند. به عبارت دیگر، عملکرد دانه کنجد در نتیجه مصرف ۱۵۰۰ متر مکعب آب به همراه کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب، به میزان ۲۳۹۰ کیلوگرم از عملکرد آن در نتیجه مصرف ۳۰۰۰ متر مکعب آب و بدون کاربرد سوپرجاذب، بیشتر بود. اگر میانگین دفعات آبیاری کنجد در طول فصل رشد تقریباً سه ماهه آن، ۹ مرتبه در نظر گرفته شود، به نظر می‌رسد که کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب در هکتار، از هر نظر باصرفه بوده و به مصرف ۱۳۵۰۰ متر مکعب آب اضافه‌تر برای حصول عملکردی کمتر نسبت به حالت قبل، برتری دارد. بنابراین، با توجه به شرایط محیطی، قیمت و سایر ویژگی‌های تأثیرگذار بر دسترس‌پذیری آن‌ها برای کشاورزان، می‌توان نسبت به استفاده از یکی از آن‌ها (کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب یا افزایش آب آبیاری به میزان دو برابر در هر نوبت آبیاری) اقدام نمود.

اثر کود دامی از جزء خطی مدل رگرسیونی بر عملکرد زیستی معنی‌دار بود ($p \leq 0.05$). در مورد درصد روغن و تعداد دانه در کپسول، به ترتیب اثر سوپرجاذب و اثر آبیاری از جزء خطی مدل رگرسیونی بر اساس آزمون F در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر درجه دو کود دامی بر وزن هزار دانه، بر اساس آزمون F در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). آزمون عدم برازش، عدم وجود اختلاف معنی‌دار تجزیه رگرسیونی برای کلیه صفات مورد بررسی را با روش تجزیه واریانس نشان داد، که بیانگر قابلیت بالای برازش مدل بود. ضرایب رگرسیون برای مدل‌های برازش شده در مورد هر یک از صفات مورد مطالعه در آزمایش در جدول ۵ ذکر شده است. ضرایب تبیین (R^2) نشان‌دهنده درصد تغییرات هر کدام از متغیرهای وابسته تحت تأثیر متغیرهای مستقل است و ضرایب تبیین بالا در این معادلات نشان‌دهنده برازش خوب مدل برآورد شده است (جدول ۵).

عملکرد دانه

سطح- پاسخ تغییرات عملکرد دانه با توجه به متغیرهای مستقل (آب آبیاری و سوپرجاذب رطوبت) در سطح ثابت ۳۰ تن در هکتار کود



شکل ۱- سطح- پاسخ عملکرد دانه کنجد نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب و آب آبیاری در سطح ثابت ۳۰ تن در هکتار کود دامی
Figure 1- Response surface for sesame seed yield as affected by super absorbent and irrigation water in fixed level of 30 t ha⁻¹ of manure

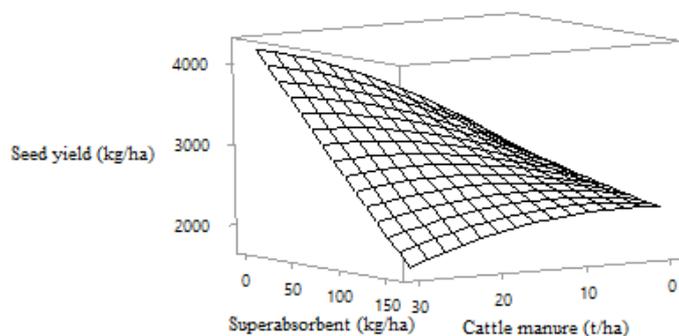
دانه (به ترتیب در سناریوهای اقتصادی و اقتصادی- زیست‌محیطی، با کاربرد ۱۲۶ و ۱۲۳ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب حاصل شد (Jahan *et al.*, 2017). برخی محققان اثر کاربرد مقادیر مختلف سوپرجاذب و دور آبیاری را بر عملکرد و اجزای عملکرد سویا بررسی و گزارش کردند که با افزایش مقدار کاربرد سوپرجاذب، عملکرد دانه به مقدار قابل توجهی نسبت به شاهد، افزایش یافت (Yazdani *et al.*, 2012).

در خصوص اثر کاربرد سوپرجاذب و کود دامی بر عملکرد دانه

در گزارش‌های متعدد (Dabhi *et al.*, 2013; Zhong *et al.*, 2013) به نقش سوپرجاذب رطوبت در تأمین آب مورد نیاز گیاه و افزایش فراهمی عناصر غذایی اشاره شده است. از آنجا که بین میزان نیتروژن قابل استفاده توسط گیاه در خاک و عملکرد دانه همبستگی مثبت و قوی وجود دارد، بنابراین، سوپرجاذب می‌تواند در فراهمی پر مصرف‌ترین عنصر غذایی برای گیاهان نیز نقش قابل توجهی ایفا کند. در بررسی اثر سطوح مختلف سوپرجاذب و اسید هیومیک بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت (*Zea mays* L.)، بیشترین و کمترین عملکرد

۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب بدون کود دامى، اختلافى قابل توجه دارد (۲۳۷۰ کیلوگرم). کودهاى دامى با دارا بودن اکثر عناصر غذایى مورد نیاز گیاهان، به‌ویژه عناصر کم‌مصرف و همچنین از طریق بهبود ویژگی‌هاى فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، در درازمدت سبب حفظ تعادل غذایى خاک، تقویت چرخه عناصر غذایى، پایداری اکوسیستم خاک و افزایش تولید محصول می‌شوند (Sharma and Chatterjee, 2002; Jahan and Nassiri Mahallati, 2012; Amiri et al., 2022).

کنجد، نتیجه‌ای مشابه آنچه برای آب آبیاری و سوپرجاذب بیان شد، حاصل گردید (شکل ۲). به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که سوپرجاذب و کود دامى، از نظر قابلیت ذخیره رطوبت و آزادسازی تدریجی آن برای استفاده گیاه، نقشی مشابه و جبرانى دارند، به این صورت که با افزایش میزان کاربرد سوپرجاذب می‌توان مقدار مصرف کود دامى را کاهش داد و برعکس. با این حال، همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار عملکرد دانه در نتیجه کاربرد ۳۰ تن کود دامى و بدون کاربرد سوپرجاذب حاصل شد که با تیمار



شکل ۲- سطح- پاسخ عملکرد دانه کنجد نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب و کود دامى در سطح ثابت ۱۵۰۰ متر مکعب در هکتار آب آبیاری
Figure 2- Response surface for sesame seed yield as affected by super absorbent and manure in fixed level of 1500 m³ of irrigation water

از کود دامى و تنها با ۱۵۰۰ متر مکعب آب، می‌توان به بیشترین عملکرد دانه (۳۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) دست یافت (شکل ۳ ب). به عبارت دیگر، بیشینه اثر مثبت کاربرد سوپرجاذب بر عملکرد دانه، در حالت اخیر نمود یافت که در شکل ۳ ج در قالب خطوط تراز به‌طور واضح‌تری نشان داده شده است.

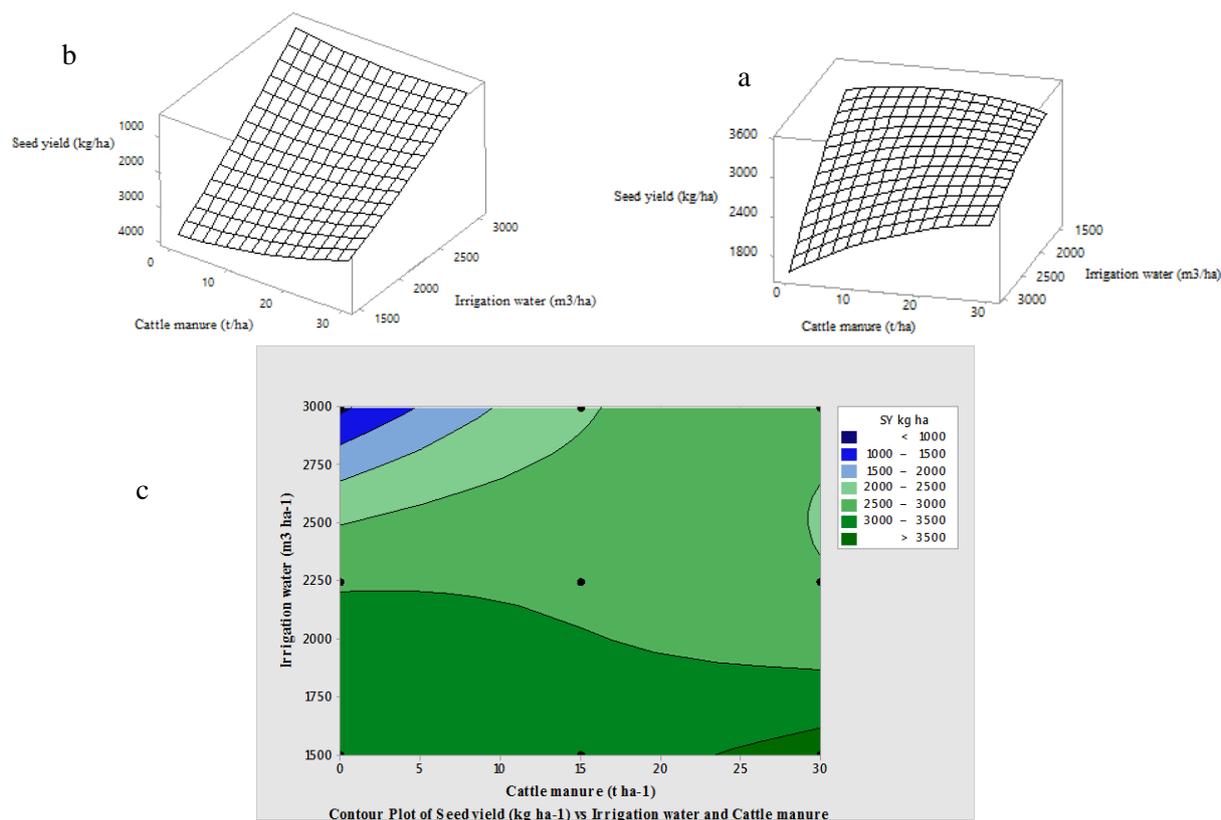
مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین توابع برازش شده برای متغیرهاى پاسخ در جدول ۶ نشان داده شده است. مقدار پایین RMSE و ضریب تبیین بالا برای عملکرد دانه کنجد، نشان‌دهنده برازش خوب مدل می‌باشد.

بیشترین عملکرد دانه کنجد در سطح ثابت ۸۰ کیلوگرم سوپرجاذب، در نتیجه مصرف ۳۰۰۰ متر مکعب آب آبیاری و بدون مصرف کود دامى حاصل شد و جالب آن‌که با تیمار کاربرد ۳۰ تن در هکتار کود دامى و ۳۰۰۰ متر مکعب آب آبیاری تفاوتی نداشت (شکل ۳ ا). در سطح ثابت کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، نتیجه جالب توجهی حاصل شد، به این شرح که در تمام سطوح کاربرد کود دامى، با کاهش میزان آب آبیاری، عملکرد دانه کنجد افزایش یافت (نسبت به سطح ثابت ۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب) (شکل ۳ ب). نتیجه دیگر این‌که در سطح ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب، بدون استفاده

جدول ۶- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین توابع برازش شده برای متغیرهاى پاسخ منجد تحت تأثیر کاربرد مقادیر مختلف آب آبیاری، سوپرجاذب و کود دامى

Table 6- Root mean square errors (RMSE) and Coefficients of determination of sesame response variables as affected by different levels of irrigation water, superabsorbent and manure application

Response variables پاسخ متغیرهاى				
کارآبی مصرف آب WUE	درصد روغن Oil percentage	تعداد کپسول در بوته Pod No. Plant ⁻¹	عملکرد دانه Seed yield	
8.51	26	28	22	RMSE (%)
0.92	0.46	0.48	0.64	R ²



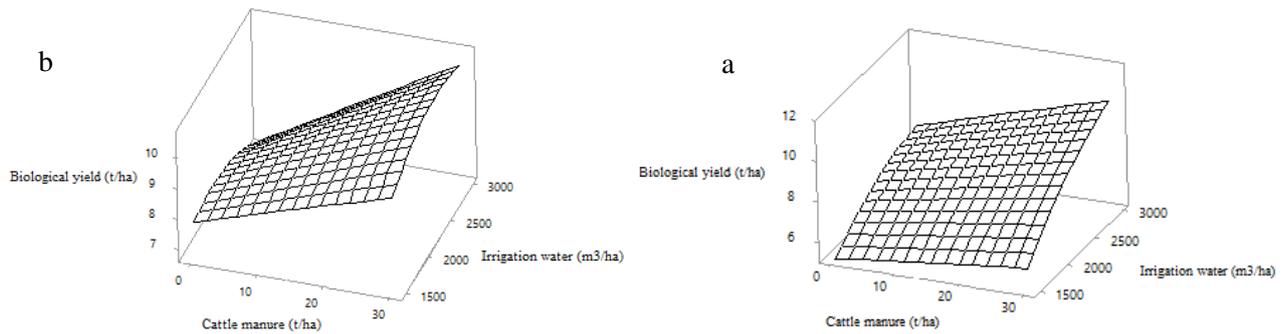
شکل ۳- سطح- پاسخ عملکرد دانه کنجد نسبت به سطوح مختلف کود دامی و آب آبیاری در (ا در سمت راست) سطح ثابت ۸۰ و (ب در سمت چپ) ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب، و خطوط تراز عملکرد دانه کنجد نسبت به سطوح مختلف کود دامی و آب آبیاری (ج در پایین) در سطح ثابت ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب

Figure 3- Response surface for sesame seed yield as affected by manure and irrigation water in fixed level of 80 (a) and 160 (b) kg ha^{-1} of superabsorbent, and contour plot for sesame seed yield as affected by manure and irrigation water in fixed level of 160 (c) kg ha^{-1} of superabsorbent

عملکرد دانه بود (Jahan and Nassiri-Mahallati, 2020). گزارش شد که با افزایش مقدار کاربرد سوپرجاذب تا سطح ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد ماده خشک ذرت افزایش یافت، ولی افزایش بیشتر مقدار سوپرجاذب، کاهش عملکرد ماده خشک را در پی داشت (Jahan *et al.*, 2017). کودهای آلی با تأثیر بر ساختمان و وزن مخصوص ظاهری خاک، سبب بهبود نفوذپذیری خاک، افزایش محتوای هوموس خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت بافیری و تشدید فعالیت برخی آنزیم‌ها شده و در نهایت موجب افزایش جمعیت و تشدید فعالیت میکروبی در خاک می‌شوند (Chaterji and Sharma, 2002; Jahan and Nassiri Mahallati, 2012; Amiri *et al.*, 2022). بنابراین به نظر می‌رسد که نقش مثبت کود دامی در افزایش عملکرد زیستی را می‌توان به موارد یاد شده نسبت داد. الکندی و همکاران (El Gendy *et al.*, 2001) گزارش کردند که عملکرد ماده خشک ریحان در نتیجه کاربرد کودهای آلی به میزان قابل توجهی نسبت به شاهد (عدم کاربرد کود آلی) افزایش یافت. نتایج مشابهی برای گیاه داروی خرفه گزارش شده است (Javadi *et al.*, 2021).

عملکرد زیستی

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در دو سطح ثابت ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب، با افزایش سطح کاربرد کود دامی و آب آبیاری، عملکرد زیستی افزایش یافت. نکته قابل توجه این است که شیب این افزایش در سطح ثابت ۸۰ کیلوگرم سوپرجاذب، بیشتر از سطح ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب بود. همچنین، مقایسه شیب عملکرد در سطح ۳۰ تن کود دامی، حاکی از آن است که تفاوت عملکرد زیستی در سطوح مختلف آب آبیاری در سطح ثابت ۸۰ کیلوگرم سوپرجاذب، کمتر از سطح ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب است (شکل ۴). نتایج فراتحلیل اثر کاربرد سوپرجاذب رطوبت بر عملکرد گیاهان زراعی نشان داد که مقدار بهینه کاربرد سوپرجاذب از نظر بهره‌وری اقتصادی و عملکرد گیاه، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار است که نتیجه پژوهش حاضر با آن همخوانی دارد. نتایج پژوهش یاد شده همچنین نشان داد که تأثیر سوپرجاذب بر عملکرد دانه و ماده خشک معنی‌دار و بر شاخص برداشت ناچیز بود، همچنین، اندازه اثر کاربرد سوپرجاذب بر عملکرد ماده خشک در تمام سطوح بیشتر از اندازه اثر آن بر



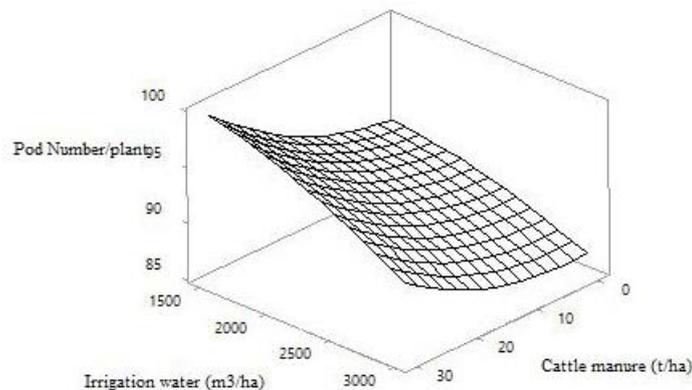
شکل ۴- سطح- پاسخ عملکرد زیستی کنجد نسبت به سطوح مختلف کود دامی و آب آبیاری در (سمت راست a) سطح ثابت ۸۰ و (سمت چپ b) ۱۶۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر جاذب

Figure 4- Response surface for sesame biological yield as affected by manure and irrigation water in fixed level of 80 (a) and 160 (b) kg ha⁻¹ of superabsorbent

می‌تواند ضمن کاهش میزان آب آبیاری به نصف (۱۵۰۰ متر مکعب در هکتار) منجر به تولید حداکثر تعداد کپسول در بوته شود، که این موضوع می‌تواند از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک حائز اهمیت باشد. مشابه این نتیجه برای عملکرد دانه نیز حاصل شد. از آنجا که تعداد کپسول در دانه از اجزای عملکرد است، بنابراین، چنین نتیجه‌ای منطقی می‌باشد.

تعداد کپسول در بوته

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، تعداد کپسول در بوته با افزایش میزان مصرف کود دامی افزایش یافت و در سطح ۳۰ تن در هکتار به بیشترین مقدار خود رسید. نکته قابل توجه این است که بیشترین تعداد کپسول در بوته در کمترین میزان آب آبیاری حاصل شد، به عبارت دیگر، کاربرد کود دامی و ۸۰ کیلوگرم سوپر جاذب



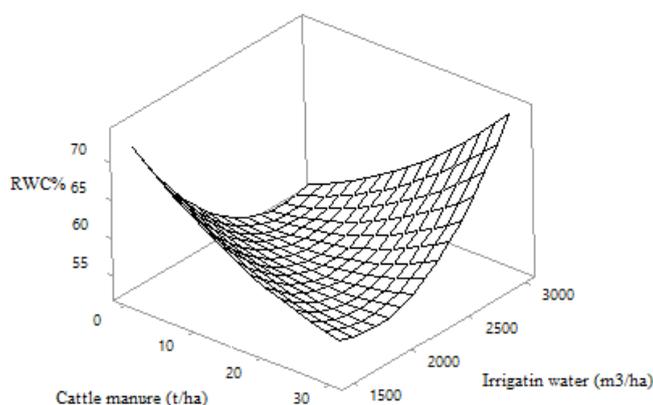
شکل ۵- سطح- پاسخ تعداد کپسول در بوته کنجد نسبت به سطوح مختلف کود دامی و آب آبیاری در سطح ثابت ۸۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر جاذب

Figure 5- Response surface for sesame pod number per plant as affected by manure and irrigation water in fixed level of 80 kg ha⁻¹ of superabsorbent

کود دامی نقش چندانی در ذخیره رطوبت نداشته و چه بسا به سبب افزایش پتانسیل اسمزی، آن را در ساختار خود حبس و ذخیره کرده و سبب کاهش محتوای رطوبت نسبی گیاه شده باشد. گزارش شده است که محتوای رطوبت نسبی و عملکرد زیستی گندم تحت تأثیر برهم‌کنش منفی سطوح بالای کود دامی و فسفر قرار گرفت (Jahan and Amiri, 2018).

محتوای رطوبت نسبی برگ

با افزایش سطح آبیاری، در سطح ثابت کاربرد ۸۰ کیلوگرم سوپر جاذب، محتوای رطوبت نسبی برگ کنجد افزایش یافت که این نتیجه دور از انتظار نبود، اما با افزایش میزان کاربرد کود دامی، از محتوای رطوبت نسبی برگ کاسته شد (شکل ۶). احتمال می‌رود که در شرایط فراهمی بالای رطوبت (آبیاری ۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار)،



شکل ۶- سطح- پاسخ محتوای رطوبت نسبی برگ کنگد نسبت به سطوح مختلف کود دامی و آب آبیاری در سطح ثابت ۸۰ کیلوگرم بر هکتار سوپرجاذب

Figure 6- Response surface for sesame relative water content as affected by manure and irrigation water in fixed level of 80 kg ha⁻¹ of superabsorbent

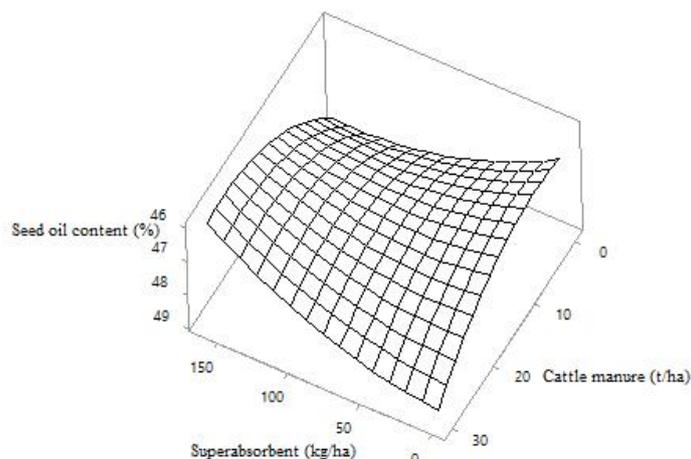
پژوهش فوق، دلیل افزایش تلفات نیتروژن در سطوح بالای کود دامی، زیاد بودن مقدار آن از نیاز گیاه بیان شده است. لطیفی و همکاران (Latifi et al., 2019) گزارش کردند که در اثر افزایش کود نیتروژن، درصد روغن دانه کنگد کاهش یافت، آن‌ها دلیل این موضوع را با استناد به (Babaei Abarghouei, 2016) افزایش درصد پروتئین دانه بیان کردند به این شرح کاربرد نیتروژن سبب ورود ترکیبات نیتروژنه (شامل آمیدها و آمین‌ها) بیشتری به دانه می‌شود که برای سنتز پروتئین‌ها با استفاده از اسکلت کربنی حاصل از ساکارز مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نتیجه، کربن کمتری برای سنتز روغن در دانه باقی می‌ماند و در نهایت سبب کاهش درصد روغن دانه می‌شود. ژانگ و همکاران (Zhong et al., 2012) گزارش کردند که با کاربرد سوپرجاذب در خاک، از تلفات نیتروژن به شکل اوره کاسته شد و دلیل این موضوع، بهبود ساختمان خاک بیان شد. گزارش شده است که با افزایش سطوح استفاده از کود نیتروژن به شکل اوره، و کود دامی، میزان تلفات نیتروژن در زراعت گندم افزایش یافت (Latifi et al., 2019; Jahan and Amiri, 2018). نصیری محلاتی و همکاران (Nassiri Mahallati et al., 2019) در بررسی سطح-پاسخ تأثیر کود نیتروژن و مقادیر مختلف آبیاری نتایج مشابهی را مبنی بر افزایش تلفات نیتروژن در زراعت گندم گزارش کردند.

بهره‌وری آب آبیاری

مقادیر بهره‌وری آب (به ازای عملکرد دانه) مشاهده شده و پیش‌بینی شده، در جدول ۷ نشان داده شده است. برآورد مقدار بهره‌وری آب در سطح ۳۰۰۰ متر مکعب به مقدار مشاهده شده، بسیار نزدیک بود، اما برای سطوح ۲۲۵۰ و ۱۵۰۰ متر مکعب، بین مقادیر اختلاف وجود داشت.

درصد روغن دانه

در سطح ثابت ۳۰۰۰ متر مکعب آب آبیاری، با افزایش مقدار کاربرد سوپرجاذب، درصد روغن دانه افزایش یافت، ولی با افزایش مقدار کاربرد کود دامی از میزان آن کاسته شد (شکل ۷). با وجود این، بیشترین درصد روغن دانه، بدون کاربرد سوپرجاذب و کود دامی حاصل شد که تفاوت محسوسی با درصد روغن در نتیجه کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب و ۳۰ تن کود دامی نداشت. قبلاً در بخش عملکرد دانه، به اثرات جبرانی و معکوس کود دامی و سوپرجاذب رطوبت اشاره شد. به نظر می‌رسد که با افزایش میزان کاربرد کود دامی، از میزان تنش خشکی وارده به گیاه کاسته شده (از طریق کاهش نیاز آبی گیاه و کاهش تبخیر از سطح خاک) و در نتیجه درصد روغن دانه کاهش یافت. چنین نتیجه‌ای برای درصد روغن فرار (اسانس) بسیاری از گیاهان دارویی و درصد پروتئین در گیاهان مختلف گزارش شده است (Khandan et al., 2003; Xie et al., 2011; Yazdani et al., 2012). انتظار می‌رفت که روند مشابهی برای سطوح کاربرد سوپرجاذب مشاهده شود، اما با افزایش میزان کاربرد سوپرجاذب، درصد روغن دانه افزایش یافت. دلیل احتمالی این موضوع می‌تواند برهمکنش سوپرجاذب با سطح بالای آب آبیاری و کاربرد کود دامی باشد. نقش نیتروژن در بیوسنتز روغن دانه غیر قابل انکار است (El-Habbasha et al., 2007)، از طرفی گزارش شده است که با افزایش مقادیر کاربرد سوپرجاذب، میزان تلفات نیتروژن کاهش یافت (کاهش ۱۷ و ۸ درصدی برای سطوح ۱۲۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب نسبت به شاهد)، همچنین با افزایش میزان استفاده از کود دامی، مقدار تلفات نیتروژن افزایش یافت (تلفات ۹۱ و ۹۵ درصدی برای سطوح ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار نسبت به شاهد) (Jahan and Amiri, 2018).



شکل ۷- سطح- پاسخ درصد روغن دانه کنجد نسبت به سطوح مختلف کود دامی و سوپرجاذب در سطح ثابت ۳۰۰۰ مترمکعب بر هکتار آب آبیاری

Figure 7- Response surface for sesame seed oil as affected by manure and superabsorbent in fixed level of 3000 m³ of irrigation water

در هکتار آبیاری و در تراکم ۱۸ بوته در متر مربع حاصل شد. در پژوهشی اثر سطوح مختلف کود نیتروژن و آبیاری بر کارایی مصرف آب گندم بررسی و گزارش شد که کمترین میزان کارایی مصرف آب در بالاترین سطح آبیاری (۵۰۰۰ متر مکعب در هکتار) و در تیمار عدم کوددهی مشاهده شد (Nassiri Mahallati et al., 2019). گزارش شده است که بیشترین میزان کارایی مصرف آب ذرت در سطوح پایین و متوسط آبیاری (به ترتیب ۶۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متر مکعب در هکتار) از تراکم ۷ بوته در متر مربع به دست آمد، در حالی که در سطح بالای آبیاری (۱۴۰۰۰ متر مکعب در هکتار) بیشترین میزان کارایی مصرف آب از تراکم ۹ بوته در هکتار حاصل شد (Koocheki et al., 2021). در مرور مطالعات انجام گرفته که برخی از آن‌ها در اینجا بیان شد، بر این نکته تأکید شده است که تعدیل در مصرف آب آبیاری، می تواند منجر به بهبود کارایی مصرف آب توسط گیاه شود (به نقل از Jahan and Nassiri-Mahallati, 2022).

به نظر می‌رسد که این اختلاف به سبب نقش جبرانی سوپرجاذب و کود دامی بر بهره‌وری آب باشد، همچنین میانگین‌گیری از تمام سطوح، می‌تواند سبب بروز این تفاوت باشد. گزارش شده است که برآورد مقادیر پارامترهای مختلف در شرایط تنش، نسبت به شرایط بدون تنش (در اینجا سطح آبیاری ۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار)، با خطا صورت می‌گیرد (Nassiri Mahallati and Jahan, 2020). از سوی دیگر، افزایش کارایی مصرف آب گیاهان مختلف زراعی، در نتیجه کاربرد سوپرجاذب رطوبت و کود دامی، توسط محققان متعدد گزارش شده است (Dabhi et al., 2013; Jahan et al., 2021). در آزمایشی، با افزایش مقادیر کاربرد سوپرجاذب از ۸۰ تا ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار، کارایی مصرف آب افزایش یافت، ولی افزایش بیش از ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، منجر به کاهش کارایی مصرف آب شد (Jahan et al., 2017; Mansoori et al., 2014). گزارش کردند که بیشترین کارایی مصرف آب در گیاه دارویی موسیر (*Allium hirtifolium*) در تیمار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره، ۱۵۰۰ متر مکعب

جدول ۷- مقادیر بهره‌وری آب آبیاری مشاهده شده و پیش‌بینی شده کنجد در سطوح مختلف آبیاری (میانگین سطح آبیاری در تمام سطوح سوپرجاذب و کود دامی)

Table 7- Observed and estimated of irrigation water productivity (WPI) of sesame under different levels of irrigation water (mean of irrigation in all levels of superabsorbent and manure)

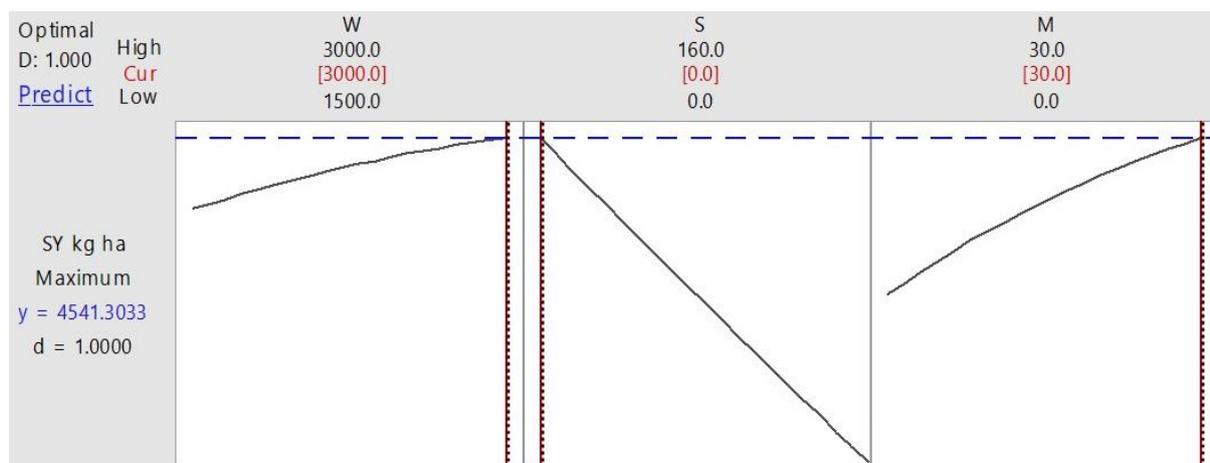
سطوح آب آبیاری Different irrigation level (m ³)	بهره‌وری آب مشاهده شده Observed WUE (kg m ⁻³)	بهره‌وری آب برآورد شده Predicted WUE (kg m ⁻³)
3000	0.71	0.59
2250	2.2	1.19
1500	1.2	1.96

بهینه‌سازی عوامل آزمایشی (منابع)

برخی نتایج مهم بهینه‌سازی میزان آب آبیاری، میزان کاربرد سوپرجاذب و کود دامی در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در ابتدا، منای بهینه‌سازی این سه نهاده، بیشینه عملکرد دانه و درصد روغن دانه در نظر گرفته شد، اما از آنجا که درصد روغن دانه با عملکرد دانه، رابطه عکس دارد و همچنین با توجه به این نکته که دامنه تغییرات درصد روغن دانه، در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی، بین ۱ تا ۲ درصد بود، بنابراین در ادامه بهینه‌سازی، از آن صرف‌نظر شد. در منابع مختلف نیز به این نکته اشاره شده است که این صفت،

ژنتیکی بوده و نه تنها بین ارقام مختلف تقریباً ثابت است، بلکه تحت تأثیر شرایط محیطی و مدیریتی نیز قرار نمی‌گیرد و نوسان قابل توجهی نشان نمی‌دهد (Latifi et al., 2019).

بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هر سه عامل، آبیاری، سوپرجاذب و کود دامی انجام گرفت (شکل ۹) و بیشترین عملکرد دانه (۴۵۴۱ کیلوگرم در هکتار) با سه هزار مترمکعب در هکتار آب آبیاری، بدون سوپرجاذب و با ۳۰ تن در هکتار کود دامی حاصل شد (شاخص مطلوبیت برابر یک، D:1.00).



شکل ۸- بهینه‌سازی مقدارهای آب آبیاری، سوپرجاذب و کود دامی به منظور تولید بیشینه عملکرد دانه کنگد (W آب آبیاری، S سوپرجاذب، M کود دامی، D شاخص مطلوبیت. Cur وضعیت جاری. خط بریده: سطح عملکرد. خط پیوسته: سطح نهاده. خط نقطه‌چین: وضعیت جاری نهاده، عملکرد و بهینه‌سازی)

Figure 8- Optimization of irrigation water, superabsorbent and manure to produce the maximum sesame seed yield. (W: irrigation water; S: superabsorbent; M: manure; D: Desirability index; Cur: The current status. Cutted line: yield level; Solid line: input level; Dotted line: The current level of input, yield and optimization) line: yield level; Solid line: input level; Dotted line: The current level of input, yield and optimization)

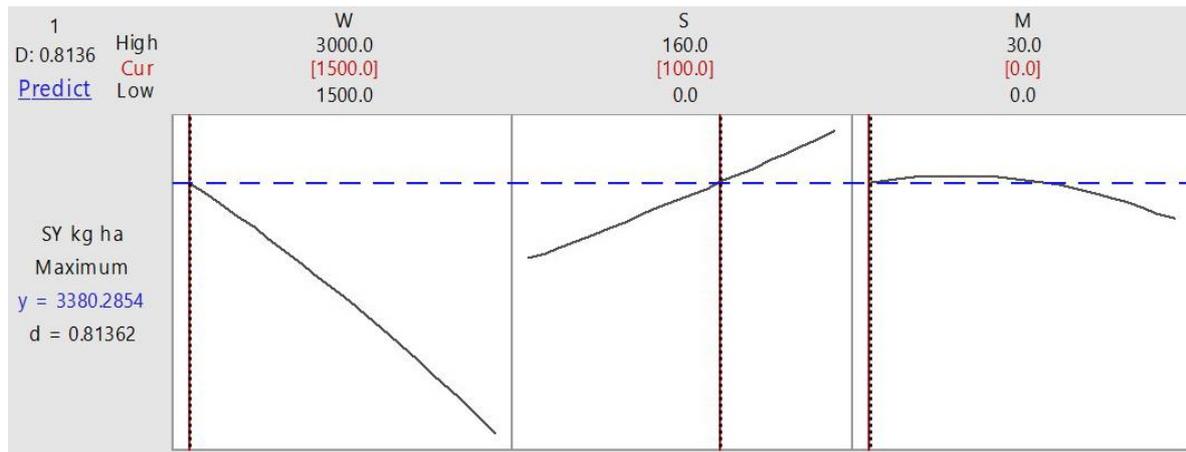
در گام بعد، به منظور بررسی نقش سوپرجاذب در صرفه‌جویی آب، بهینه‌سازی با نصف آب آبیاری و بدون کاربرد کود دامی انجام شد (شکل ۹). نتایج حاکی از آن بود که کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب و نیمی از آب آبیاری، منجر به تولید ۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار دانه شد (D:1.00). با جابه‌جا کردن فرضی خط نقطه‌چین که معرف وضعیت جاری هر نهاده است، به سمت راست مربع مربوط به آب مشاهده می‌شود که از میزان عملکرد دانه به صورت خطی کاسته خواهد شد. جابه‌جایی خط نقطه‌چین مربوط به سوپرجاذب به منتهی‌الیه سمت راست مربع مربوطه، مقدار کاربرد سوپرجاذب را ۶۰ کیلوگرم در هکتار افزایش خواهد داد، در حالی که افزایش عملکرد نسبت به کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، تنها ۴۳۴ کیلوگرم خواهد بود (مقدار شاخص مطلوبیت از ۰/۸۱ به ۰/۹۵ افزایش یافت). محاسبه سود و هزینه کاربرد ۶۰ کیلوگرم سوپرجاذب و افزایش ۴۳۴ کیلوگرمی

در عملکرد دانه، بسته به شرایط اقتصادی و قیمت سوپرجاذب و دانه کنگد، می‌تواند به کشاورزان و مدیران کمک کند که در این خصوص، تصمیم مناسب را اتخاذ نمایند. در حالت سوم، بهینه‌سازی برای آب آبیاری در دامنه ۱۵۰۰ تا ۲۲۵۰ مترمکعب در هکتار (شرایط کم آبیاری) و مقدار کود دامی از صفر تا ۳۰ تن در هکتار، بدون کاربرد سوپرجاذب انجام گرفت (شکل ۱۰). نتیجه بهینه‌سازی نشان داد که با استفاده از ۲۲۵۰ متر مکعب در هکتار آب و ۳۰ تن در هکتار کود دامی، می‌توان به عملکرد دانه‌ای معادل با ۴۱۸۶ کیلوگرم در هکتار دست یافت (D:1.00). افزایش میزان آب آبیاری تا ۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار (افزایشی برابر با ۷۵۰ متر مکعب در هکتار)، تنها منجر به افزایش ۳۳۵ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه شد (D:1.00). تصمیم‌گیری در خصوص افزایش این مقدار مصرف آب، مستلزم در نظر گرفتن شرایط محیطی، دسترسی به

(D:0.92)

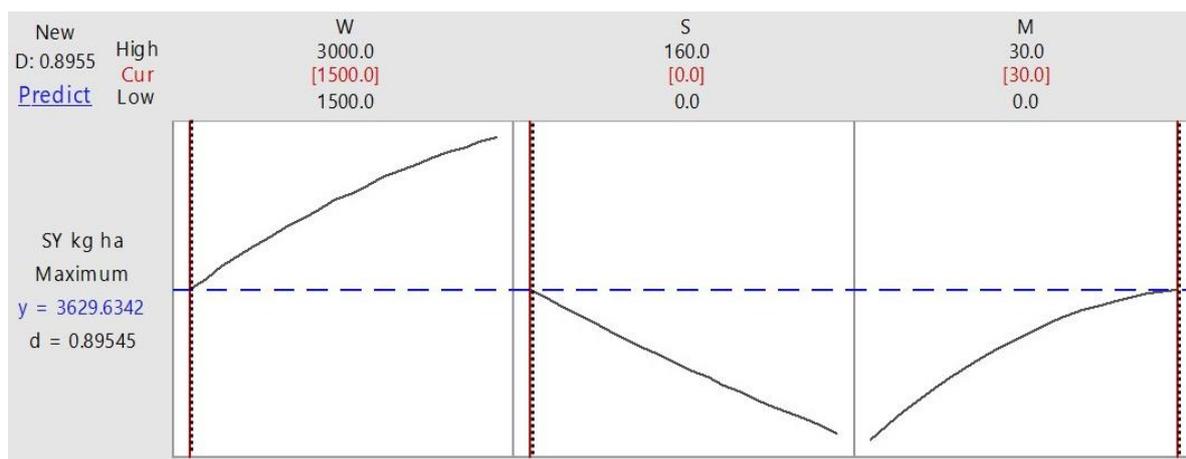
در همین سناریو، کاهش آب آبیاری به ۱۵۰۰ متر مکعب در هکتار و کاربرد کود دامی، به میزان ۳۰ و ۱۵ تن در هکتار، به‌ترتیب منجر به عملکرد دانه برابر با ۳۶۲۹ و ۳۳۶۲ کیلوگرم در هکتار شد (شاخص مطلوبیت به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۰ بود). تصمیم‌گیری در این رابطه نیز به شرایط زمانی، مکانی و از جمله قیمت کود دامی و دانه کنجد، بستگی خواهد داشت.

آب آبیاری، محدودیت‌های زیست‌محیطی و در نهایت ارزش اقتصادی آب و ارزش اقتصادی مقدار افزایش عملکرد دانه خواهد بود (Jahan and Nassiri-Mahallati, 2022). با توجه به محدودیت منابع آب و بالا گرفتن بحث‌های مربوط به آب مجازی، بهره‌وری اقتصادی آب و سایر مسائلی که به آن‌ها اشاره شد، به نظر نمی‌رسد که این مقدار افزایش عملکرد، کاربرد ۷۵۰ متر مکعب آب را توجیه نماید. در سناریوی اخیر، کاهش مقدار کاربرد کود دامی به نصف (از ۳۰ به ۱۵ تن در هکتار)، منجر به کاهش ۸۱۲ کیلوگرمی عملکرد دانه شد



شکل ۹- بهینه‌سازی مقدارهای آب آبیاری و سوپرجاذب (بدون کود دامی) به منظور تولید بیشینه عملکرد دانه کنجد (W آب آبیاری، S سوپرجاذب، M کود دامی. D شاخص مطلوبیت. Cur وضعیت جاری. خط بریده: سطح عملکرد. خط پیوسته: سطح نهاده. خط نقطه‌چین: وضعیت جاری نهاده، عملکرد و بهینه‌سازی)

Figure 9- Optimization of irrigation water and superabsorbent (with no manure) to produce the maximum sesame seed yield. (W: irrigation water; S: superabsorbent; M: manure; D: Desirability index; Cur: The current status. Cutted line: yield level; Solid line: input level; Dotted line: The current level of input, yield and optimization)



شکل ۱۰- بهینه‌سازی مقدارهای آب آبیاری و کود دامی (بدون سوپرجاذب) به منظور تولید بیشینه عملکرد دانه کنجد (W آب آبیاری، S سوپرجاذب، M کود دامی. D شاخص مطلوبیت. Cur وضعیت جاری. خط بریده: سطح عملکرد. خط پیوسته: سطح نهاده. خط نقطه‌چین: وضعیت جاری نهاده، عملکرد و بهینه‌سازی)

Figure 10- Optimization of irrigation water and manure (with no superabsorbent) to produce the maximum sesame seed yield. (W: irrigation water; S: superabsorbent; M: manure; D: Desirability index; Cur: The current status. Cutted line: yield level; Solid line: input level; Dotted line: The current level of input, yield and optimization)

نتیجه‌گیری

مقایسه سناریوی سوم با سناریوی اول، نشان می‌دهد که در سناریوی سوم کاهش ۷۵۰ متر مکعبی در مقدار آب آبیاری، فقط هشت درصد کاهش در عملکرد دانه را به دنبال داشت (۴۱۸۶ در برابر ۴۵۴۱ کیلوگرم دانه)، بنابراین، انتخاب سناریوی سوم توسط تولیدکننده، به وضعیت منابع آبی، میزان دسترسی به آب، موازنه ارزش اقتصادی آب در برابر دانه و سایر گزینه‌های محیطی و مدیریتی بستگی دارد. چنانچه، کاربرد ۳۰ تن در هکتار کود دامی برای دستیابی به عملکرد دانه بیان شده، در برابر کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، برای تولیدکننده صرفه اقتصادی نداشته باشد، می‌توان نسبت به توصیه سناریوی دوم (۱۵۰۰ متر مکعب آب، ۱۰۰ کیلوگرم سوپرجاذب، بدون کود دامی) اقدام نمود که عملکرد دانه ۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار را به دنبال خواهد داشت. تفاوت در عملکرد دانه در این سناریو نسبت به سناریوی سوم، ۸۰۶ کیلوگرم می‌باشد که تولیدکننده باید با در نظر گرفتن کلیه شرایط اقتصادی و مدیریتی، نسبت به انتخاب سناریوی مناسب اقدام نماید. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که با استفاده از نهاده‌های دوست‌دار محیط‌زیست، می‌توان نسبت به زراعت باثبات کتجد در یک ناحیه خشک و نیمه‌خشک اقدام نمود و به عملکردی فراتر از عملکرد سیستم‌های رایج پرنهاده، دست یافت.

سپاسگزاری

هزینه انجام این پژوهش توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح شماره ۲/۴۹۷۸۰ مصوب ۱۳۹۸/۲/۱۸ تأمین شده است، که بدین وسیله قدردانی می‌شود.

به‌طور کلی، با توجه به معنی‌دار بودن اثر جزء خطی کود دامی از مدل رگرسیونی و عملکرد زیستی و همچنین اثر خطی آبیاری و کود دامی بر تعداد کپسول در دانه، می‌توان چنین نتیجه گرفت که کاربرد کود دامی در نهایت سبب افزایش عملکرد دانه شد. در خصوص عملکرد کیفی کتجد (درصد روغن دانه) معنی‌دار بودن جزء خطی اثر سوپرجاذب می‌تواند تضمین‌کننده عملکرد کیفی کتجد باشد. اثر بسیار معنی‌دار جزء درجه دو کود دامی بر وزن هزار دانه، نیز حاکی از اثربخشی کود دامی بر اجزای عملکرد و در نهایت عملکرد دانه است. بهینه‌سازی با سه سناریو انجام گرفت. ابتدا با در نظر گرفتن هر سه عامل، آبیاری، سوپرجاذب و کود دامی صورت پذیرفت، بهینه‌سازی با هدف تولید بیشترین عملکرد دانه انجام گرفت، که در این حالت بیشترین عملکرد دانه (۴۵۴۱ کیلوگرم در هکتار) با سه هزار مترمکعب در هکتار آب آبیاری، بدون سوپرجاذب و با ۳۰ تن در هکتار کود دامی حاصل شد. در گام بعد، به‌منظور بررسی نقش سوپرجاذب در صرفه‌جویی آب، بهینه‌سازی با نصف آب آبیاری، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب و بدون کاربرد کود دامی انجام شد که منجر به تولید ۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار دانه شد. در حالت سوم، نتایج بهینه‌سازی که برای آب آبیاری در دامنه ۱۵۰۰ تا ۲۲۵۰ مترمکعب در هکتار (شرایط کم آبیاری)، بدون کاربرد سوپرجاذب و مقدار کود دامی از صفر تا ۳۰ تن در هکتار انجام گرفت، نشان داد که با استفاده از ۲۲۵۰ متر مکعب در هکتار آب و ۳۰ تن در هکتار کود دامی، می‌توان به عملکرد دانه‌ای معادل با ۴۱۸۶ کیلوگرم در هکتار دست یافت. بیشترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری، برابر با ۲/۲ کیلوگرم دانه به ازای متر مکعب آب، برای سطح آبیاری ۲۲۵۰ متر مکعب حاصل شد.

References

1. Abedi-Koupai, J., Sohrab, J., and Swarbrick, G. 2008. Evaluation of hydrogel application on soil water retention characteristics. *Journal of Plant Nutrition* 31: 317-331. (in Persian with English abstract).
2. Alizadeh, A., and Kamali, Gh. 2008. Water requirement of plants in Iran. Emam Reza University Press. (In Persian).
3. Amiri, M. B., Jahan, M., and Rezvani Moghaddam, P. 2022. An exploratory method to determine the plant characteristics affecting the final yield of *Echium amoenum* Fisch. and C.A. Mey. under fertilizers application and plant densities. *Scientific Reports*, 12:1881 DOI: [10.1038/s41598-022-05724-8](https://doi.org/10.1038/s41598-022-05724-8)
4. AOAC International. Official methods of analysis (OMA). 2012. In: Horwitz W, Latimer GW, editors. Association of official analytical chemists (AOAC). 20th ed. Maryland (USA). http://www.aoac.org/aoac_prod_imis/aoac/publications/official_methods_of_analysis/aoac_member/pubs/oma/aoac_official_methods_of_analysis.aspx?hkey=5142c478-ab50-4856-8939-a7a491756f48. Accessed 29 May 2012.
5. Bannayan, M., Sanjani, S., Alizadeh, A., Lotfabadi, S. S., and Mohamadian, A. 2010. Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. *Field Crops Research* 118 (2): 105-114.
6. Box, G., and Behnken, D. 1960. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics* 2: 455-475.
7. Dabhi, R., Bhatt, N., and Pandit, B. 2013. Super absorbent polymers-An innovative water saving technique for optimizing crop yield. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2 (10): 5333-5340

8. El Gendy, S. A., Hosni, A. M., Omer, E. A., and Reham, M. S. 2001. Variation in herbage yield, essential oil yield and oil composition on sweet basil (*Ocimum basilicum*) grown organically in a newly reclaimed land in Egypt. Arab Universities Journal of Agricultural Science 9: 915-933.
9. El-Habbasha, S. F., Abd El Salam, M. S. and Kabesh, M. O. 2007. Response of two sesame varieties (*Sesamum indicum* L.) to partial replacement of chemical fertilizers by bio-organic fertilizers. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 3 (6): 563-571.
10. Eneji, A. E., Islam, R., An, P., and Amalu, U. C. 2013. Nitrate retention and physiological adjustment of maize to soil amendment with superabsorbent polymers. Journal of Cleaner Production 52: 474-480.
11. Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstrom, C., and Wold, S. 2008. Design of experiments principles and applications. 3rd Edition, UMETRICS Academy, Sweden.
12. Fernandez, J. E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., and Cuevas, M. V. 2020. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. Agricultural Water Management, 233 (xxxx) xxxx. DOI: [10.1016/j.agwat.2020.106074](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074)
13. Islam, M., Xue, X., Mao, S., Ren, C., Eneji, A., and Hu, Y. 2011. Effects of watersaving superabsorbent polymer on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in corn (*Zea mays* L.) under drought stress. Journal of the Science of Food and Agriculture 91: 813-819.
14. Jahan, M., Amiri, M. B., and 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* L. using response surface methodology. Iranian Journal of Field Crops Research 14 (4): 746-764. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/gsc.v14i4.48347](https://doi.org/10.22067/gsc.v14i4.48347)
15. Jahan, M., and Amiri M. B. 2018. Optimizing application rate of nitrogen, phosphorus and cattle manure in wheat production: An approach to determine optimum scenario using response-surface methodology. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 18 (1): 13-26. DOI: [10.4067/S0718-95162018005000102](https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005000102)
16. Jahan, M., and Ghalenoei, Sh. 2022. Challenges and Opportunities Faced on Food Production Systems in Arid and Semi-Arid Regions under Climate Change Conditions. Annals of Agricultural and Crop Sciences 7 (2): 1109.
17. Jahan, M., Javadi, M., Hesami, E., and Amiri, M. B. 2021. Nutritional Management Improved Sesame Performance and Soil Properties: A Function- Based Study on Sesame as Affected by Deficit Irrigation, Water Superabsorbent and Salicylic Acid. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. DOI:[10.1007/s42729-021-00557-2](https://doi.org/10.1007/s42729-021-00557-2)
18. Jahan, M., and Nassiri Mahallati, M. 2020. Can Superabsorbent Polymers Improve Plants Production in Arid Regions? Advances in Polymer Technology, Volume 2020, Article ID 7124394, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/7124394>
19. Jahan, M., Nassiri Mahallati, M., Khalilzadeh, H., Bigonah, R., and 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.
20. Jahan, M., Nassiri Mahallati, M. 2022. Modeling the Response of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Growth and Development to Climate Change under Deficit Irrigation in a Semi-arid Region. PLOS CLIMATE (Published Online on June 30 2022). <https://journals.plos.org/climate/>
21. Javadi, H., Rezvani Moghaddam, P., Rashed Mohasel, M. H., and Seghatoleslami, M. J. 2021. Effect of Organic, Biological and Chemical Fertilizers on Yield, Yield Components and Oil Percent of Common Purslane (*Portulaca oleracea* L.). Iranian Journal of Field Crops Research 19 (1): 17-32. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/gsc.v19i1.84776](https://doi.org/10.22067/gsc.v19i1.84776)
22. Koocheki, A., Nasiri Mahallati, M., and Momen, A. 2021. Optimization of Irrigation and Plant Density of Corn (*Zea mays* L.) by Using Response-Surface Methodology. Journal of Agroecology 12 (4): 581-594. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/agry.2020.37564](https://doi.org/10.22067/agry.2020.37564)
23. Kramer, P. 1988. Measurement of plant water status: Historical perspectives and current concerns. Irrigation Science 9: 275-287.
24. Latifi, H., Khorramdel, S., Nassiri Mahallati M., Vafabakhsh J., and Mollafilabi, A. 2019. Effect of nitrogen fertilizer and plant density on seed yield and oil yield of sesame using a central composite design. Iranian Journal of Field Crops Research 17(3): 427-439. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/gsc.v17i3.72836](https://doi.org/10.22067/gsc.v17i3.72836)
25. Mahajan, G., Chauhan B. S., Timsina J., and Singh, P. P. 2012. Crop performance and water- and nitrogen-use efficiencies in dry-seeded rice in response to irrigation and fertilizer amounts in northwest India. Field Crops Research 134: 59-70. DOI: [10.1016/j.fcr.2012.04.011](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.04.011)
26. Mansoori, H., Banayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., and Lakzian, A. 2014. Management of nitrogen fertilization, irrigation and planting density in *Allium hirtifolium* by using central composite optimizing method. Iranian Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production 24: 40-60. (in Persian with English abstract).
27. Modafe Behzadi, N., Rezvani Moghaddam, P., and Jahan, M. 2018. The effect of organic and chemical fertilizers on qualitative and quantitative yield of indigo (*Indigofera tinctoria* L.) at irrigation levels under bam climatic conditions. Iranian Journal of Field Crops Research 16 (1): 49-65. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/gsc.v16i1.54983](https://doi.org/10.22067/gsc.v16i1.54983)

28. Mohajer, A. R. 2017. Imports 38 billion dollars of oil and meal over the past 25 years to the country. Interview with the Project Manager of Oil Seeds Project, Ministry of Jihad-e-Agriculture. Mehr news agency. 5 September 2017. (in Persian).
29. Morison, J., Baker, N. R., Mullineaux P. M. and Davies, W. J. 2007. Improving water use in crop production. *Advances in Water Research* 34 (2): 272-281.
30. Myers, R. H., and Montgomery, D. C. 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley and Sons, New York, USA.
31. Nassiri Mahallati, M., and Jahan, M. 2020. Using the AquaCrop model to simulate sesame performance in response to superabsorbent polymer and humic acid application under limited irrigation conditions. *International Journal of Biometeorology*. DOI: 10.1007/s00484-020-02001-z
32. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Fallahpour, F., and Amiri, M. B. 2019. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. *Journal of Agroecology* 11(2): 515-530. (in Persian with English abstract). DOI: [10.22067/jag.v11i2.31912](https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.31912)
33. Natesan, R., Kandasamy, S., Thiyageshwari, S., and Boopathy, P. M. 2007. Influence of lignite humic acid on the micronutrient availability and yield of blackgram in an alfisol. *Science World Journal* 7: 1198-1206.
34. Nyakudya, I. W., and Stroosnijder, L. 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management* 146: 280-296.
35. Nykanen, V. P. S., Nykanen, A., Puska, M. A., Goulart-Silva, G., and Ruokolainen, J. 2011. Dual-responsive and super absorbing thermally cross-linked hydrogel based on methacrylate-substituted polyphosphazene. *Soft Matter* 7: 4414-4424.
36. Reza, A., Friedel, J. K., and Bodner, G. 2012. Improving water use efficiency for sustainable agriculture,” in *Agroecology and Strategies for Climate Change*, E. Lichtfouse, Ed., pp. 167-211, Springer, Berlin, Germany, 2012.
37. Rezvani Moghaddam, P. 2008. Modern and Neglected Plants. In: *Modern Agronomy*, Koocheki, A., and Khajeh Hosseini, M. Press of Jihad-e Daneshgahi of Mashhad, Iran. (In Persian).
38. Samavat, S., Pazuki, A., Ladan Moghaddam, A., and Samavat, S. 2008. The applied principles of organic matters in agriculture. Islamic Azad University Press, Garmsar Branch.
39. Tahami, M. K., Rezvani Moghaddam, P., and Jahan, M. 2014. The effect of organic and chemical fertilizers on growth characteristics of *Ocimum basilicum* L. *Iranian Journal of Field Crops Research* 5(4): 363-372.
40. Vessey, J. K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizer. *Plant and Soil* 255: 571-586.
41. Wang, W., and Wang, A. 2010. Nanocomposite of carboxymethyl cellulose and attapulgite as a novel pH-sensitive superabsorbent: Synthesis, characterization and properties. *Carbohydrate Polymers* 82: 83-91.
42. Wu, Y., Jia, Z., Ren, X., Zhang, Y., Chen, X., Bing, H., and Zhang, P. 2015. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi humid area of China. *Agricultural Water Management* 158: 1-9.
43. Xie, L., Liu, M., Ni, B., Zhang, X., and Wang, Y. 2011. Slow-release nitrogen and boron fertilizer from a functional superabsorbent formulation based on wheat straw and attapulgite. *Chemical Engineering Journal* 167: 342-348.
44. Yazdani, F., Allahdadi, I., and Akbari, G. A. 2012. Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 10: 4190-4196.
45. Zhong, K., Lin, Z. T., Zheng, X. L., Jiang, G. B., Fang, Y. S., Mao, X. Y., and Liao, Z. W. 2013. Starch derivative-based superabsorbent with integration of water-retaining and controlled-release fertilizers. *Carbohydrate Polymers* 92: 1367-1376.