Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Optimization of irrigation intervals and amount of super absorbent in peppermint cultivation using response-surface modeling

Aslan Egdernezhad[1]*, Saloome Sepehri Sadeghiyan[2], Mohammad Mehdi Nakhjavanimoghaddam[2]

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

Abstract

Introduction

The water shortage in the agricultural sector in recent years and its continuation in the future is an undeniable reality in Iran. Super absorbent materials can be used to cope with the effects of drought and water stress on plants. As a result of absorbing and storing water, these materials can change the amount or frequency of irrigation water. To ensure the optimal development of the root structure of medicinal plants, aerial parts, and essential oil percentage, it is necessary to create optimal conditions for providing moisture. It is time-consuming and costly to conduct multiple tests to achieve this objective. Thus, simulation and optimization models have been suggested to solve this problem. The researcher must first prepare the required data for each combination of treatments mentioned in this model, then build a statistical model based on it. The next step is to determine the optimal conditions for the independent variables so that the dependent variables approach their maximum, minimum, or target value. According to the literature review, response-surface methodology (RSM) has been effective in determining the optimal values of factors in the agricultural sector. As a result, it can be also used to optimize the application of super absorbent in peppermint cultivation. So, this study was designed to optimize the use of super absorbent in different irrigation rounds to maximize quantitative and qualitative traits of peppermint (*Mentha piperita*).

Materials and Methods

The present research was conducted in the research greenhouse of the Agricultural Engineering Research Institute (AERI) in Karaj in 2018-2019. Specifically, three irrigation intervals (two, four, and six days) and three weight percent of Aquasource superabsorbent (zero, one, and two %W of superabsorbent/soil) were tested. Before irrigation, the moisture content in each pot was measured using a Lutron Professional Soil Moisture Meter (PMS-714), and the amount of irrigation in each round was determined based on the amount of moisture deficiency up to the field capacity (FC). The central square design is one type of response surface method. In this method, independent variables are determined to determine the predicted dependent variable through an experimental design. This design considers the average levels of the factors as the central point. Using this method, the experimental treatments are displayed as +1, zero, and –1, which represent the highest, average, and lowest levels of the independent variable, respectively. Using regression analysis of variance, linear terms, quadratic terms, and interactions between factors were added to the multivariate regression model to evaluate the model-data fit. Finally, the significance of the model and its accuracy in fitting the data were determined. To compare the obtained model results with observed values, the root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), mean bias error (MBE), efficiency factor (EF), agreement index (d), and the coefficient of determination (R^2), were used.

Results and Discussion

Variance analysis showed that the regression model for water productivity was statistically significant at the five percent probability level (P-value≤0.05) and for the other traits studied at the one percent probability level (P-value≤0.01). In contrast, quadratic regression was statistically significant only for root weight, root length, shoot weight, essential oil percentage, and water productivity traits. The regression of other traits was not statistically significant. Therefore, the RSM cannot be used to predict and optimize these traits. Based on the lack of significance of the lack of fit test, the results of regression analysis are reliable compared to variance analysis. The RSM was also confirmed to be effective in optimizing the traits studied. The overlapping map of the investigated parameters was prepared to determine the optimal limit and common surface. In the upper range of this map, which includes the most irrigation intervals and super absorbent consumption; parameters such as water productivity do not change much. This parameter reaches its maximum value in the center of the map.

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Generally, other parameters tend to reach the optimal limit within the range of the bottom right part of the map, so, to optimize the parameters of root weight, root length, shoot weight, essential oil percentage, and water productivity, their target values were determined as 1.1 kg m^{-2}, 3 cm, 2 kg m^{-2}, 3 %, and 4 kg m^{-3}.

Conclusion

The effects of different irrigation intervals (three levels of two, four, and six days) and Aquasource super absorbent (three levels of zero, one, and two %W of super absorbent/soil) were examined on some peppermint plant traits. Results showed that the response-surface model did not significantly differ from statistical methods. As a result, it is possible to trust the results obtained. The traits of root weight and length, shoot weight, essential oil percentage, and water productivity were used in the RSM, and all other traits were found to increase with an increase in irrigation water, except for essential oil percentage and water productivity. In terms of essential oil percentage and water productivity, the reduction in irrigation intervals to +0.8 levels had an upward trend and then it declined afterward. Increasing the amount of super absorbent negatively affected the characteristics of root weight and length, shoot weight, and essential oil percentage. As the amount of super absorbent was increased to a range of -0.3, water productivity increased, and then the value of this parameter also decreased. As a result of these conditions, the RSM was effectively used to optimize the irrigation interval and super absorbent amount, and it was determined that the best conditions were obtained by utilizing a three-day irrigation interval with a super absorbent concentration of 0.3%. Therefore, compliance with these conditions is recommended for peppermint cultivation.

Keywords: Central square design, Hydrogel, Essential oil content, Root weight

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This research has been conducted using the research project fund of the Iranian Agricultural Engineering Research Institute (IAERI) with Grant No. 24-14-14-054-970973. The authors would like to thank the mentioned institute for their kind assistance and funding support.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that there are no conflicts of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data availability statement

The data and results used in this research will be available through correspondence with the author.

Authors' contribution

Aslan Egdenezhad: Software, methodology, writing original draft preparation; **Saloome Sepehri Sadeghiyan:** Resources, methodology, manuscript editing; **Mohammad Mehdi Nakhjavanimoghaddam:** Resources, manuscript editing

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

Citation: Egdernezhad, A., Sepehri Sadeghiyan, S., & Nakhjavanimoghaddam, M.M. (2024). Optimization of irrigation intervals and amount of super absorbent in peppermint cultivation using response-surface modeling. *Water and Soil Management and Modeling*, *4*(4), 1-14.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12672.1260

Received: 08 April 2023, Received in revised form: 08 May 2023, Accepted: 15 May 2023, Published online: 15 May 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 1-14

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili
© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب در کشت گیاه نعناع فلفلی با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ

اصلان اگدرنژاد[۱*]، سالومه سپهری صادقیان[۲]، محمد مهدی نخجوانی مقدم[۲]

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

[۲] استادیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

واکنش گیاه دارویی نعناع فلفلی به مقادیر پایین و بالای آب سبب می‌شود تا حساسیت زیادی نسبت به تأمین رطوبت آن معطوف شود. با توجه به این‌که مقدار رطوبت بر خصوصیات ریشه، اندام‌های هوایی و کیفیت این گیاه مؤثر است، تعیین حدود بهینهٔ عوامل مؤثر بر تأمین رطوبت ناحیهٔ توسعهٔ ریشه از اهمیت بسیاری برخوردار است. لذا، در این تحقیق با استفاده از روش سطح-پاسخ به بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب برای دست‌یابی به حداکثر عملکرد کمی و کیفی در این گیاه پرداخته شد. بدین‌منظور سطوح پایین (منفی یک) و بالای (مثبت یک) هر دو عامل به‌ترتیب در محدوده‌های دو تا شش روز و صفر تا دو درصد در محل گلخانهٔ تحقیقاتی مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی در شهرستان کرج در سال ۱۳۹۸ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی مورد استفاده برای پیش‌بینی کلیهٔ صفات دچار خطای کم‌برآوردی (MBE≤۰/۰) شد. دقت این مدل برای پیش‌بینی کلیهٔ صفات مورد مطالعه در محدودهٔ عالی (۰/۰≤NRMSE≤۰/۱) قرار داشت. افزایش دور آبیاری سبب کاهش صفات وزن و طول ریشه و وزن اندام هوایی شد. کاهش دور آبیاری تا محدودهٔ ۰/۸+ (پنج و شش روز) سبب افزایش درصد اسانس و تا محدودهٔ ۰/۵+ (پنج روز) سبب افزایش بهره‌وری آب شد. پس از آن، هر دو پارامتر کاهش یافتند. افزایش مقدار سوپرجاذب سبب کاهش کلیهٔ صفات به جز بهره‌وری آب شد. این پارامتر تا محدودهٔ ۰/۳- (۰/۳ درصد) مصرف سوپرجاذب از بهره‌وری آب بالایی برخوردار بود ولی با افزایش مقادیر سوپرجاذب از مقدار آن کاسته شد. در مجموع، بهینه‌سازی کلیهٔ پارامترهای مستقل نشان داد که مصرف ۰/۳ درصد سوپرجاذب و رعایت دور آبیاری سه روز سبب دست‌یابی به بیش‌ترین مقدار برای وزن ریشه (۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع)، طول ریشه (۳۲/۴ سانتی‌متر)، وزن اندام هوایی (۱/۰۲ کیلوگرم بر مترمربع)، اسانس (۱/۲ درصد) و بهره‌وری آب (۲/۸ کیلوگرم بر مترمربع) می‌شود.

واژه‌های کلیدی: طرح مربع مرکزی، میزان اسانس، وزن ریشه، هیدروژل

نوع مقاله: پژوهشی

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

استناد: اگدرنژاد، اصلان، سپهری صادقیان، سالومه، و نخجوانی مقدم، محمدمهدی (۱۴۰۳). بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب در کشت گیاه نعناع فلفلی با استفاده از مدل‌سازی سطح-پاسخ. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۱-۴۵.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12672.1260

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۱ تا ۱۴
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

١- مقدمه

کمبود آب در بخش کشاورزی در سال‌های اخیر و تداوم آن در آینده به‌عنوان واقعیتی انکارناپذیر در کشور ایران است که لازم است برای سازگاری با آن چاره‌ای اندیشید. استفاده از مواد سوپرجاذب به‌عنوان یکی از روش‌های مقابله با اثرات خشکسالی و تنش آبی در گیاهان به‌شمار می‌رود. این مواد با جذب و نگهداری آب می‌تواند میزان آب آبیاری یا دور آبیاری را تغییر دهد. این موضوع به‌خصوص در شرایطی که برای کشت گیاهان دارویی با ارزش مانند نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) استفاده شود اهمیت بیش‌تری می‌یابد. نعناع فلفلی نسبت به کم‌آبی بسیار حساس است و به‌دلیل ساختار ریشه‌های خود قادر به جذب آب از اعماق خاک نیست. از طرفی، تداوم شرایط مرطوب در ناحیهٔ ریشهٔ این گیاه نیز سبب کاهش رشد آن می‌شود (Capuzzo and Maffei, 2016). بنابراین، ایجاد شرایط بهینه از نظر تأمین رطوبت برای توسعهٔ ساختار ریشه، اندام هوایی و درصد اسانس آن بسیار با اهمیت است. انجام آزمایش‌های متعدد برای دست‌یابی به این مهم نیازمند صرف وقت و هزینهٔ بسیار است. بنابراین، برای رفع این مشکل، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پیشنهاد شده است (Ebrahimipak et al., 2019).

یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد و سریع برای بهینه‌سازی عوامل مختلف، بهره‌گیری از مدل سطح-پاسخ است. گرچه این مدل دارای مبنای آماری بسیار پیچیده‌ای است و از یک مدل غیرخطی چندمنظوره برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند (Zulkali et al., 2006; Kalavathy et al., 2009)؛ لیکن به‌عنوان یکی از ابزارهای مناسب برای بهینه‌سازی به‌شمار می‌رود که از دهه‌های قبل در علوم مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Aslan, 2007; Kwak, 2005). در این مدل، ابتدا ترکیب مناسبی از تیمارها ارائه می‌شود که محقق باید داده‌های مورد نیاز این ترکیب‌ها را تهیه کند. سپس بهترین برازش برای یک مدل آماری با فرض ترکیب به‌دست آمده از تیمارها ایجاد می‌شود. در ادامه، حالت بهینه برای متغیرهای مستقل مورد نظر طوری تعیین می‌شود که متغیرهای وابسته به بیشینه، کمینه یا هدف خود نزدیک شوند (Montgomery, 2001; Kalavathy et al., 2009). با توجه به گستردگی این مدل، زیرمجموعه‌های مختلفی برای آن ایجاد شده است که طرح مربع مرکزی یکی از آن‌ها به‌شمار می‌رود. طرح مربع مرکزی ابتدا توسط Box and Wilson (1951) مطرح شد ولی شش سال بعد با اعمال تغییراتی اصلاح شد (Box and Hunter, 1957). هدف اصلی این روش، کاهش زمان و هزینه در طرح‌های آزمایشگاهی بود ولی با توجه به ویژگی‌های آن، در سال‌های گذشته در بخش کشاورزی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (KhasheiSiuki et al., 2017). این روش عمدتاً به‌عنوان جایگزینی برای طرح‌های آزمایشی مانند روش فاکتوریل به‌شمار می‌رود. در طرح مربع مرکزی تعداد تیمارها و تکرارها کاهش می‌یابد و امکان مطالعه و تحلیل بیش‌تری روی داده‌ها فراهم است و می‌توان ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای مستقل در آزمایش را فراهم نمود (Aslan, 2007; KhasheiSiuki et al., 2017).

با توجه به اهمیت روش سطح-پاسخ و زیرمجموعه‌های آن، محققان مختلفی در علوم کشاورزی از آن‌ها استفاده کرده‌اند. در تحقیقی، Koocheki et al. (2014) برای بهینه‌سازی عوامل نیتروژن، مقدار آب آبیاری و تراکم گیاه را به‌ترتیب با سطوح پایین و بالای صفر و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، ۱۵۵۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار و ۵۰ و ۱۵۰ بوته در مترمربع برای گیاه کلزا انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از مقادیر ۹۲ کیلوگرم کود نیتروژن، ۲۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته در متر مربع سبب دست‌یابی به بهینه‌ترین حالت برای عملکرد می‌شود. در تحقیق دیگری، Mansouri et al. (2015) با استفاده از روش بهینه‌سازی عوامل مورد استفاده در گیاه پیاز نشان دادند که مصرف ۹۳ کیلوگرم کود نیتروژن به همراه ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری سبب بهینه‌سازی منابع تولید و کاهش آلودگی محیط زیستی می‌شود. در ادامه، Jahan et al. (2015) بهینه‌سازی عوامل سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آب آبیاری به‌ترتیب با سطوح پایین و بالای ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم بر هکتار، چهار و هشت کیلوگرم در هکتار و ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی را مورد مطالعه قرار دادند. سناریوی بهینه با هدف افزایش عملکرد و برخی اجزای عملکرد در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که برای دست‌یابی به بهینه‌ترین حالت برای مصرف عوامل سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آب آبیاری لازم است به‌ترتیب ۱۲۶/۰۶ کیلوگرم در هکتار، ۷/۱۹ کیلوگرم در هکتار و ۳۴۷/۴۷ مترمکعب در هکتار مصرف شود. در مطالعهٔ انجام شده توسط Jahan et al. (2016) برای تعیین مقدار بهینهٔ مصرف کودهای نیتروژن، فسفر و دامی به‌ترتیب با حدود صفر و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار، صفر و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار و صفر و ۳۰ تن در هکتار نشان داد که با مصرف ۱۴۵/۴ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم فسفر و ۱۸/۴ تن کود دامی می‌توان به بهینه‌ترین عملکرد گندم از نظر اقتصادی دست یافت. هم‌چنین، Mansouri et al. (2021) عوامل کود نیتروژن و آب آبیاری را به‌ترتیب با سطوح پایین و بالای صفر و ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار برای بهینه‌سازی عملکرد چغندرقند بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت کاربرد مقدار ۱۳۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰۶۷۷ مترمکعب در هکتار آب آبیاری، بیش‌ترین عملکرد چغندرقند به‌دست می‌آید. در نهایت، Goodarzi et al. (2021) بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و فاصلهٔ بوته روی ردیف در گیاه اسفناج به‌ترتیب با حدود پایین و بالای صفر و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۷ و ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن مقدار ۱۸۹/۹ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن و فاصلهٔ هفت سانتی‌متر برای هر بوته در ردیف می‌توان به بهترین نتیجه اقتصادی دست یافت. در نهایت براساس

مرور منابع، روش سطح–پاسخ قابلیت مناسبی برای تعیین مقادیر بهینه عوامل در بخش کشاورزی تاکنون داشته است. از این رو، به‌منظور بهینه‌سازی مصرف سوپرجاذب برای گیاه نعناع فلفلی نیز می‌تواند استفاده شود. با توجه به این‌که تاکنون تحقیقی روی این موضوع انجام نشده است؛ این تحقیق به‌منظور بهینه‌سازی مصرف سوپرجاذب در دوره‌های مختلف آبیاری برای دست‌یابی به حداکثر مقدار برای صفات کمی و کیفی این گیاه دارویی انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در سال ۱۳۹۸ در محل گلخانهٔ تحقیقاتی مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی در شهرستان کرج انجام شد (Sepehri et al., 2021a; Sepehri et al., 2021b). بدین‌منظور سه دور آبیاری (دو، چهار و شش روز) و سه سطح از سوپرجاذب آکواسورس (صفر، یک و دو درصد وزنی سوپرجاذب/خاک) برای آزمایش در نظر گرفته شد. برای اجرای آزمایش، با توجه به درصدهای وزنی عنوان شده، مقادیر مشخصی از سوپر جاذب در هر گلدان در محدودهٔ توسعهٔ ریشهٔ گیاه نعناع فلفلی استفاده شد. با توجه به حساس بودن نشاها پس از دو هفته از استقرار آن‌ها، تیمارهای دور آبیاری اعمال شد؛ به طوری‌که میزان آبیاری در هر دور بر اساس تأمین میزان کمبود رطوبت تا حد ظرفیت زراعی تعیین شد. بدین‌منظور، قبل از هر آبیاری میزان رطوبت در هر گلدان با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج PMS 714 تعیین و مقدار آب آبیاری اعمال می‌شد. ضمناً این دستگاه قبل از اعمال تیمارها در محیط آزمایشگاه واسنجی شده بود. مشخصات خاک مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil used

بافت خاک	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	FC (درصد وزنی)	PWP (درصد وزنی)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	pH –	جمع آنیون‌ها (میلی‌اکی‌والان در لیتر)	جمع کاتیون‌ها (میلی‌اکی‌والان در لیتر)
لوم‌رسی	25.9	44.6	29.3	20.6	9.70	2.20	7.01	19.4	22.3

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

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

در این رابطه، y متغیر پاسخ و x متغیر مستقل است. یکی از انواع روش‌های سطح پاسخ، طرح مربع مرکزی است. این روش به صورت طرح آزمایشی برای تعیین مقدار متغیرهای مستقل جهت تعیین متغیر وابسته پیش‌بینی شده تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح عوامل به‌عنوان نقطهٔ مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Kalavathy et al., 2009). در این روش، تیمارهای آزمایشی با اعداد مثبت یک، صفر و منفی یک و بدون واحد نمایش داده می‌شوند که به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ بالاترین، میانگین و پایین‌ترین سطح متغیر مستقل هستند. برای تعیین تعداد تیمارها از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$2^k + 2k + r \quad (۲)$$

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

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

جهت برازش داده‌ها از رگرسیون چندمتغیره با افزودن جملات خطی، درجهٔ دو و اثر متقابل بین عوامل، برازش و بر اساس تحلیل واریانس رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت.

رابطهٔ چندجمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به شکل زیر است (Aslan, 2007):

$$y = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4{x_1}^2 + a_5{x_2}^2 + a_6x_1x_2 \quad (۴)$$

در رابطه فوق، y متغیر وابسته شامل خصوصیات کمی و کیفی نعناع، a ضریب رابطه، x_1 متغیر مستقل دور آبیاری و x_2 متغیر مستقل مقدار سوپرجاذب است. در نهایت، معناداری مدل و دقت آن در برازش داده‌ها مشخص شد. به‌منظور ارزیابی و آزمون معناداری آماری مدل به‌دست آمده، از تحلیل واریانس رگرسیونی استفاده شد.

جدول ۲- کد ضرایب و مقدار واقعی متغیرهای مستقل

Table 2-Code of coefficients and actual value of independent variables

کد ضرایب		مقدار آزمایش	
دور آبیاری (روز)	مقدار سوپرجاذب (درصد)	دور آبیاری (روز)	مقدار سوپرجاذب (درصد)
-1	-1	6	0
+1	0	4	2
0	0	4	1
-1	0	4	0
+1	+1	2	2
0	0	4	1
0	0	4	1
0	-1	2	1
0	0	6	1
-1	+1	2	0
+1	-1	6	2
0	0	2	1

برای ارزیابی کارایی مدل از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) مطابق با رابطه‌های ۵ تا ۱۰ استفاده شد:

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

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

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

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

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

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

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است. آماره‌های RMSE و NRMSE به‌ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل است. مقدار آمارهٔ RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آمارهٔ NRMSE نشان‌دهندهٔ دقت عالی مدل است. هم‌چنین، مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیش‌تر از ۰/۳ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آمارهٔ MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آمارهٔ MBE نشان‌دهندهٔ این است که مقدار شبیه‌سازی شده بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیان‌گر این است که مدل در برآورد صفات مورد مطالعه عدد کوچک‌تری به‌دست داده است. مقادیر آماره‌هایEF و d نشان‌دهندهٔ کارایی مدل است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است. آمارهٔ R^2 نشان‌دهندهٔ قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به‌وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌هاست. برازش رگرسیون بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و مقایسهٔ آن با خط یک به یک، یکی از روش‌های اعتبارسنجی مدل‌ها به‌شمار می‌رود (Nassiri et al., 2006). اگر شیب خط رگرسیون برابر با یک باشد بر خط یک به یک منطبق می‌شود. در این صورت نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی برابر هستند و مدل در شبیه‌سازی دقت خوبی داشته است. در غیر این صورت، با فاصله گرفتن خط رگرسیون از خط یک به یک، از دقت مدل کاسته می‌شود. برای ارزیابی خط رگرسیون از رابطهٔ زیر و آزمون t استفاده شد:

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

در این رابطه، b=1 به‌عنوان فرض صفر (H_0) و b≠1 به‌عنوان فرض یک (H_1) در آزمون t مد نظر قرار گرفتند. برای ارزیابی عرض از مبدأ دو خط a=0 به‌عنوان فرض صفر (H_0) و a≠0 به‌عنوان فرض یک (H_1) در نظر گرفته شد. در واقع در صورت رد شدن فرض صفر، اختلاف معناداری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. صفاتی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند شامل وزن ریشه، طول ریشه، ارتفاع، وزن اندام هوایی، وزن برگ، اسانس و بهره‌وری آب است. تعیین صفات وزن ریشه، برگ و اندام هوایی با استفاده از ترازو و تعیین طول ریشه و ارتفاع گیاه با استفاده از خط‌کش انجام شد. برای استخراج اسانس نمونه‌ها از دستگاه اسانس‌گیر[1] استفاده شد. بهره‌وری آب با استفاده از رابطهٔ (۱۲) تعیین شد که در آن، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد محصول (کیلوگرم) و W مقدار آب آبیاری (مترمکعب) است.

$$WP = \frac{Y}{W} \quad (۱۲)$$

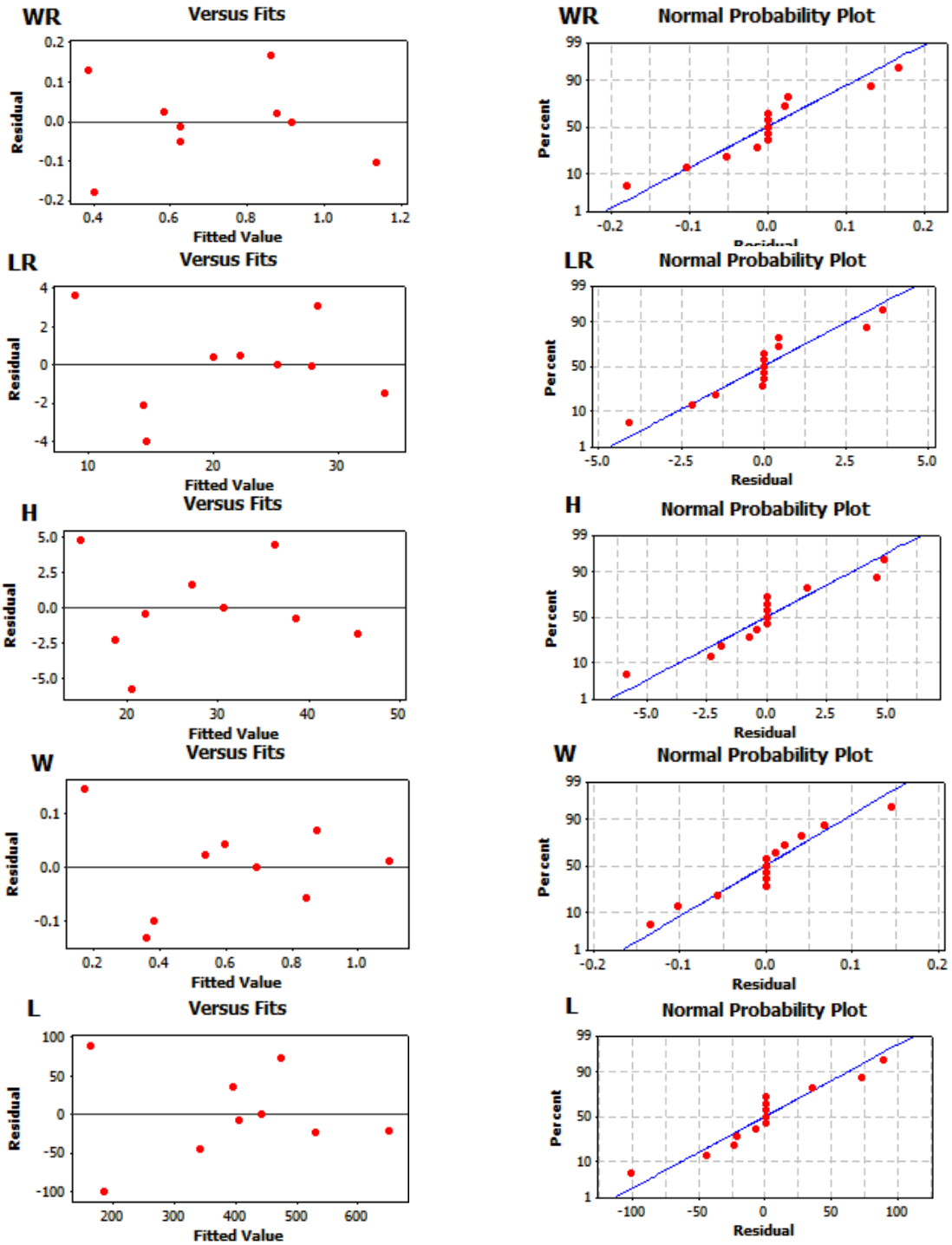
۳- نتایج و بحث

قبل از اجرای مدل سطح-پاسخ، لازم است کفایت داده‌ها بررسی شود. بدین‌منظور، این کار با در نظر گرفتن نتایج بهترین خط برازش در پلات احتمالی نرمال[2] برای صفات مورد مطالعه انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر این صفات در محدودهٔ خط برازش قرار داشت، به همین دلیل از کفایت لازم برای اجرا برخوردار بود (شکل ۱). پراکندگی داده‌ها نیز براساس مقادیر برازنده شده[3] بررسی شد و نتایج نشان داد که روند خاصی بین پراکندگی باقی‌مانده داده‌های صفات مورد مطالعه وجود نداشت. بنابراین، واریانس بین داده‌ها ثابت و مقادیر صفات مورد مطالعه نسبت به شرایط آزمایش مستقل هستند. در نتیجه استفاده از آن‌ها برای اجرای مدل سطح-پاسخ بلامانع است.

نتایج تحلیل واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابستهٔ گیاه نعناع فلفلی در جدول (۳) نمایش داده شده است. این نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی برای بهره‌وری آب در سطح احتمال پنج درصد (P-value≤0.05) و برای سایر صفات مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد (P-value≤0.01) از نظر آماری معنادار بود (جدول ۳). با این وجود رگرسیون درجهٔ دوم فقط برای صفات وزن ریشه، طول ریشه، وزن اندام هوایی، درصد اسانس و بهره‌وری آب از نظر آماری معنادار بود. رگرسیون سایر صفات از نظر آماری معنادار نبود. بنابراین، نمی‌توان از مدل سطح-پاسخ برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی این صفات استفاده کرد. معنادار نبودن آزمون عدم برازش نشان داد که تحلیل رگرسیونی تفاوت معناداری نسبت به تحلیل واریانس نداشته است و می‌توان به نتایج این روش اعتماد کرد. نتایج مشابه توسط Mansouri et al. (2021) گزارش شده است. این محققان با بررسی مقادیر مختلف آب آبیاری و کود بر گیاه چغندرقند، گزارش کردند که تفاوت معناداری بین نتایج تحلیل واریانس و مدل رگرسیونی وجود

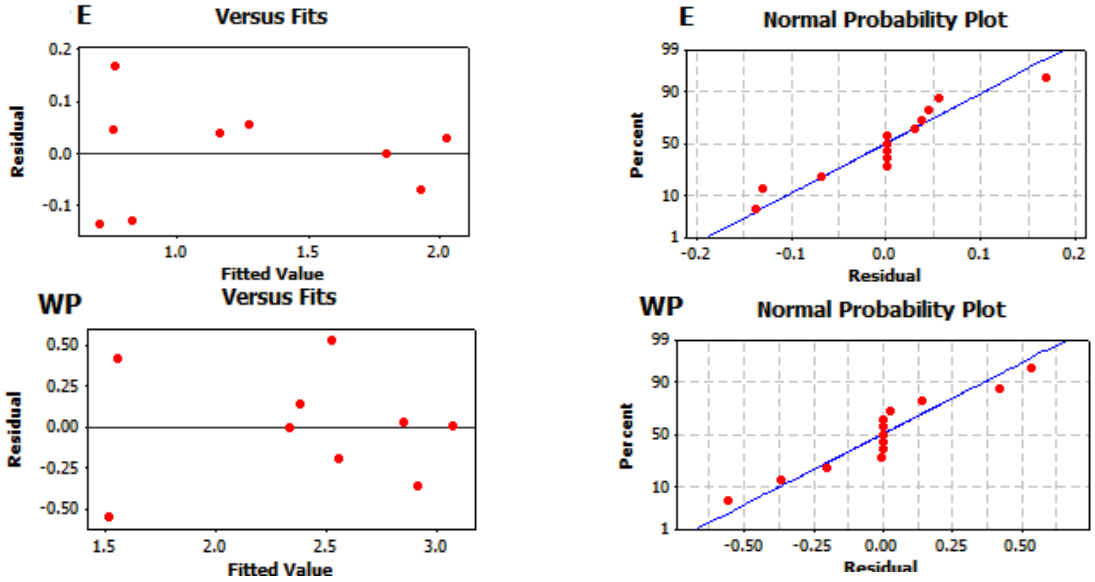
[1] Celevenger
[2] Normal probability plot
[3] Fitted value

نداشت. ایشان نیز استفاده از مدل سطح–پاسخ را برای بهینه‌سازی صفات مورد مطالعه تأیید کردند.



شکل ۱- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفات مورد مطالعه (حروف WR، LR، H، W و L به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ وزن ریشه، طول ریشه، ارتفاع، وزن اندام هوایی و وزن برگ هستند.)

Figure 1- Checking the normality and stability of data variance for the studied traits (the letters WR, LR, H, W, and L indicate root weight, root length, height, shoot weight, and leaf weight, respectively)



ادامهٔ شکل ١- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفات مورد مطالعه (حروف E و WP به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ درصد اسانس و بهره‌وری آب هستند.)

Continuation of Figure 1- Checking the normality and stability of data variance for the studied traits (the letters E and WP indicate essential oil and water productivity, respectively)

جدول ٣- نتایج تحلیل واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابستهٔ گیاه نعناع فلفلی

Table 3- The results of regression variance analysis for dependent variables of the peppermint plant

منابع تغییرات رگرسیون	درجهٔ آزادی	وزن ریشه	طول ریشه	ارتفاع بوته	وزن اندام هوایی	وزن خشک برگ	درصد اسانس	بهره‌وری آب
رگرسیون	5	9.40**	16.4**	13.2**	16.1**	9.90**	56.7**	5.30*
خطی	2	11.2**	32.4**	29.3**	32.8**	17.5**	73.1**	2.80
درجه دو	2	18.2**	6.10*	1.10	3.60*	2.00	57.6**	8.00*
اثر متقابل	1	11.4*	4.80	5.10	7.20*	10.7*	21.9**	4.70
خطا	7	0.01	6.60	13.0	0.00	0.00	0.01	0.13
عدم برازش	3	0.03	15.5	30.4	0.01	0.00	0.02	0.32
خطای خالص	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

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

برای برازش رگرسیونی صفات مورد بررسی، پارامترهای ثابت رگرسیون درجهٔ دو کامل تعیین شد، که نتایج آن در جدول (۴) نشان داده شده است. مقایسه آماری نتایج به‌دست آمده از مدل رگرسیونی و مقادیر واقعی نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس این نتایج، آمارهٔ MBE برای کلیهٔ صفات دارای مقدار منفی بود که این موضوع نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل رگرسیونی است. با مراجعه به شکل ۲ نیز این نتایج قابل مشاهده است؛ به‌طوری‌که در این نمودارها، تمایل داده‌ها به سمت محور X و زیرخط منقطع (یک به یک) است. مقدار آمارهٔ RMSE برای وزن ریشه ۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمربع به‌دست آمد که با توجه به متوسط وزن ریشه (۰/۷۷ کیلوگرم بر مترمربع)، این مقدار خطا قابل‌قبول است. دقت مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی وزن ریشه در محدودهٔ عالی (۰/۰≤NRMSE≤۰/۱) قرار داشت. دو آمارهٔ EF و d نیز که نشان‌دهندهٔ کارایی مدل رگرسیونی هستند از مقادیر مطلوبی برخوردار بودند. آمارهٔ R^2 برای صفت وزن ریشه حدود ۰/۸۷ بود. بنابراین، مدل رگرسیونی توانایی شبیه‌سازی ۸۷ درصد تغییرات وزن ریشه را داشت که این مقدار مطلوب است. مقدار آمارهٔ RMSE برای طول ریشه ۱/۰ سانتی‌متر بود که این خطا نسبت به متوسط طول ریشه (۲۲/۷ سانتی‌متر) قابل‌قبول بود. براساس این آماره، خطای مدل رگرسیونی برای سایر صفات نیز قابل چشم‌پوشی است. آمارهٔ NRMSE برای صفات طول ریشه، وزن اندام هوایی، اسانس و بهره‌وری آب نیز در محدودهٔ عالی (۰/۰≤NRMSE≤۰/۱) بود. بنابراین، دقت مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی کلیهٔ صفات قابل‌قبول است.

جدول ٤- ضرایب رگرسیون چندجمله‌ای درجهٔ دو کامل برای متغیرهای وابسته (x_1 دور آبیاری و x_2 مقدار سوپرجاذب)

Table 4- Complete quadratic polynomial regression coefficients for dependent variables (x_1 irrigation cycle and x_2 amount of superabsorbent)

$a_1+a_2x_1+a_3x_2+a_4x_1^2+a_5x_2^2+a_6x_1x_2$

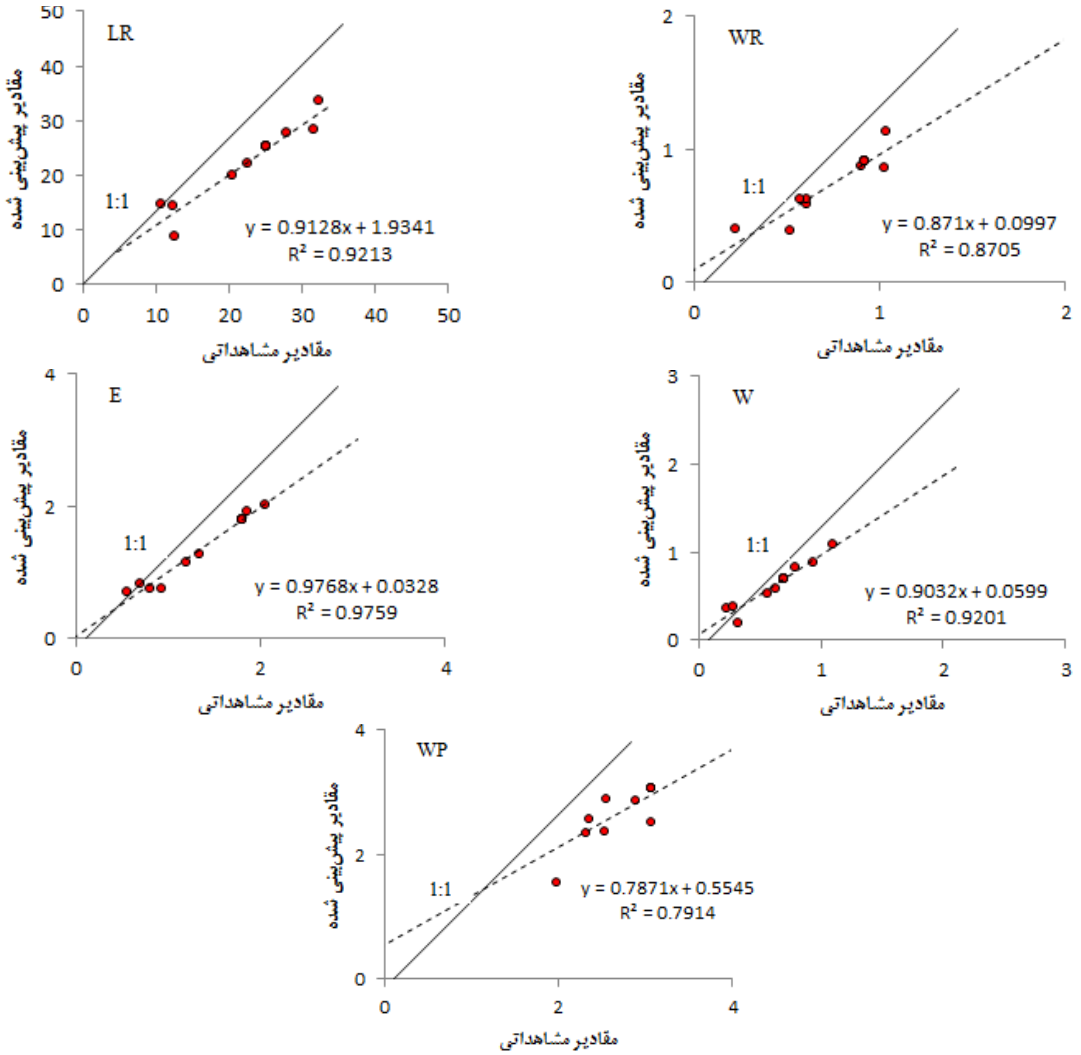
پارامترها	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
وزن ریشه	0.96	0.08	-0.17	-0.09	0.14	-0.19
طول ریشه	25.1	2.90	-6.70	-0.49	-3.40	-2.80
وزن اندام هوایی	0.69	0.12	-0.23	0.01	-0.09	-0.13
درصد اسانس	1.80	0.18	-0.41	-0.39	-0.23	-0.25
بهره‌وری آب	3.07	-0.12	-0.29	-0.19	-0.55	-0.40

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعهٔ نعناع فلفلی

Table 5- Statistical values for the studied characteristics of peppermint

صفات	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
وزن ریشه	-0.001	0.030	0.040	0.990	0.990
طول ریشه	-0.050	1.000	0.040	0.940	0.990
وزن اندام هوایی	-0.002	0.040	0.060	0.990	0.990
درصد اسانس	-0.020	0.060	0.040	0.990	0.990
بهره‌وری آب	-0.006	0.200	0.070	0.990	0.990

نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر با مشاهدات Mansouri et al. (2015)، Koocheki et al. (2014) و Mansouri et al. (2021) مطابقت داشت. نتایج به‌دست آمده توسط این محققان نیز نشان داد که مدل رگرسیونی درجهٔ دو برای پیش‌بینی صفات گیاهان زراعی چغندرقند، پیاز و کلزا دارای خطای قابل چشم‌پوشی، دقت کافی و کارایی مطلوب بود. ضریب تبیین برای طول ریشه، وزن اندام هوایی، اسانس و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۰/۹۲، ۰/۹۲، ۰/۹۷ و ۰/۷۹ به‌دست آمد. براساس این نتایج، مدل رگرسیونی توانایی لازم برای پیش‌بینی بیش از ۷۹ درصد تغییرات را در کلیه صفات مورد مطالعه داشت. نتایج آزمون t برای مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده برای هر متغیر وابسته با خط یک به یک بررسی شد و نتایج آن نشان داد که شیب و خط برازش برای تمامی صفات قابل‌قبول بود (جدول ۶).



شکل ۲- داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده صفات مورد مطالعه و مقایسهٔ خط ۱:۱ (ممتد) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده (خط منقطع) (حروف WR، LR، W، E و WP به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ وزن ریشه، طول ریشه، وزن اندام هوایی، اسانس و بهره‌وری آب هستند)

Figure 2- The observed and predicted data of the studied traits and the comparison of the 1:1 line (continuous) with the fitted regression between the observed and predicted data (dashed line) (the letters WR, LR, W, E, and WP indicate the weighted root, root length, shoot weight, essential oil and water productivity, respectively)

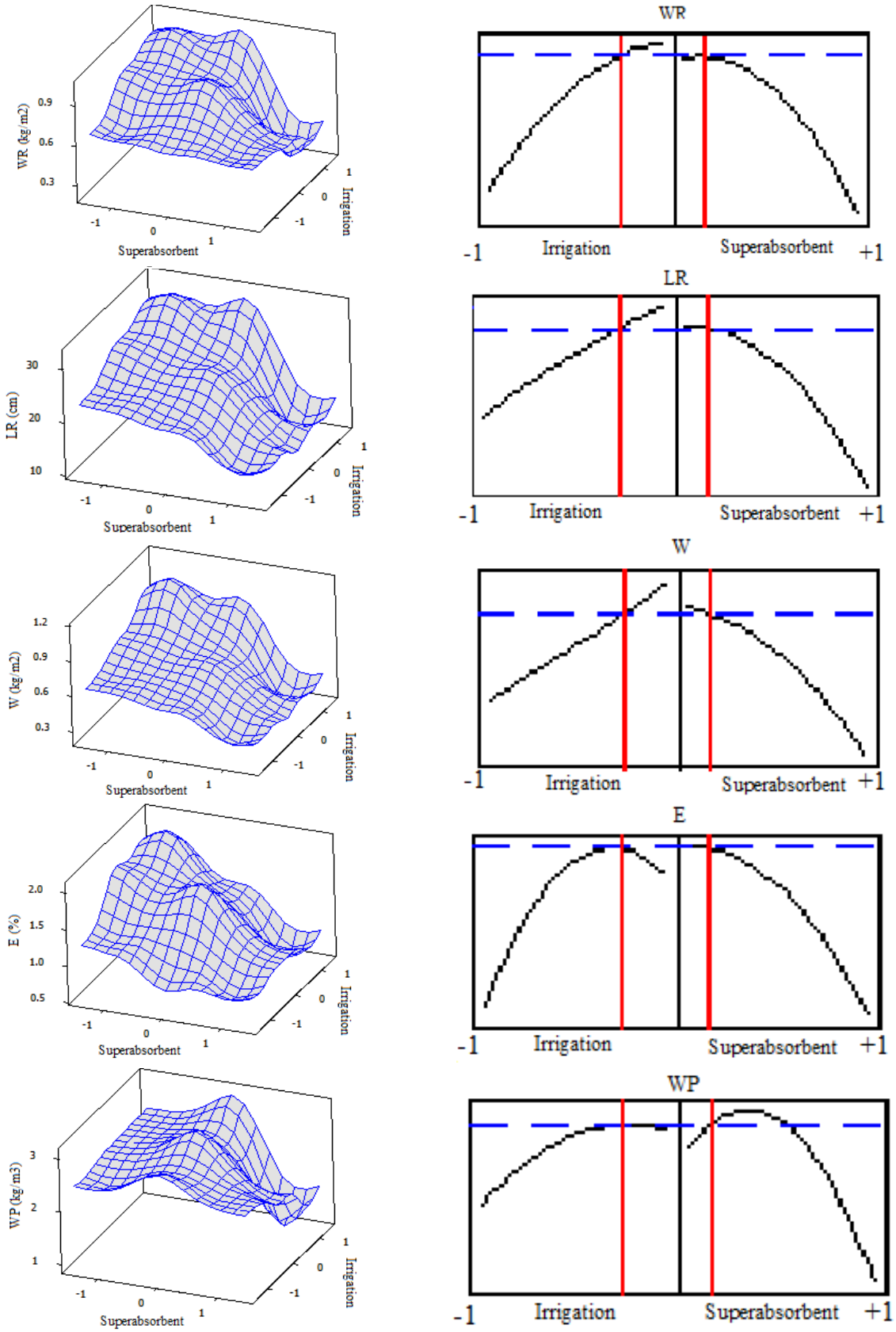
جدول ٦- نتایج آزمون t برای مقایسهٔ شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با رابطهٔ رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهداتی)

Table 6- The results of the t-test for comparing the slope and width from the origin of the 1:1 line with the fitted regression equation between the observed and predicted data (simulated = a + b × observed)

صفت	عرض از مبدا (a)		شیب (b)		t		فرض صفر
	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	a=0, b=1
وزن ریشه	0.09	0.09	0.80	0.10	13.6	0.08	پذیرش
طول ریشه	1.90	2.00	0.90	0.08	11.3	0.07	پذیرش
وزن اندام هوایی	0.05	0.06	0.90	0.09	11.2	0.16	پذیرش
درصد اسانس	0.03	0.07	0.90	0.04	21.1	0.02	پذیرش
بهره‌وری آب	0.50	0.41	0.70	0.15	6.40	0.02	پذیرش

در شکل ۳ تغییرات صفات مورد مطالعه نسبت به تغییرات دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب به دو صورت واکنش پارامترها (به‌صورت دو بعدی) و سطح-پاسخ آن‌ها (به‌صورت سه‌بعدی) نشان داده شده است. با کاهش دور آبیاری وزن ریشه نیز افزایش یافت. این روند به‌صورت خطی نبوده و مقدار تغییرات آن در محدودهٔ نزدیک به مثبت یک کم‌تر شد. وزن ریشه رابطهٔ معکوسی با افزایش سوپرجاذب داشت. نمودار سه‌بعدی سطح-پاسخ وزن ریشه نیز نشان داد که در مقادیر پایین سوپرجاذب، کاهش دور آبیاری سبب افزایش وزن ریشه شد. ولی در شرایط افزایش مصرف سوپرجاذب، کم‌تر بودن دور آبیاری سبب کاهش وزن ریشه شد. این موضوع می‌تواند به‌دلیل کاهش ریشه‌زایی باشد که اثر منفی بر جذب عناصر غذایی نیز دارد. در نمودار واکنش پارامتر طول ریشه، نتایج مشابهی با وزن ریشه به‌دست آمد. در این نمودار نیز با کاهش دور آبیاری طول ریشه افزایش و با مصرف بیش‌تر سوپرجاذب طول ریشه کاهش یافت. نمودار سطح-پاسخ این عامل، تشابه نزدیکی به وزن ریشه داشت. این موضوع نشان داد که بهترین شرایط برای وزن و طول ریشه در محدودهٔ کم‌ترین مصرف سوپرجاذب و دور آبیاری است. براساس نمودار واکنش پارامترها، وزن اندام هوایی با کاهش دور آبیاری به‌صورت خطی افزایش یافت ولی کاهش این صفت بر اساس افزایش مقدار سوپرجاذب حالت خطی نداشت و شیب آن در شرایط زیاد بودن مقدار سوپرجاذب بیش‌تر بود.

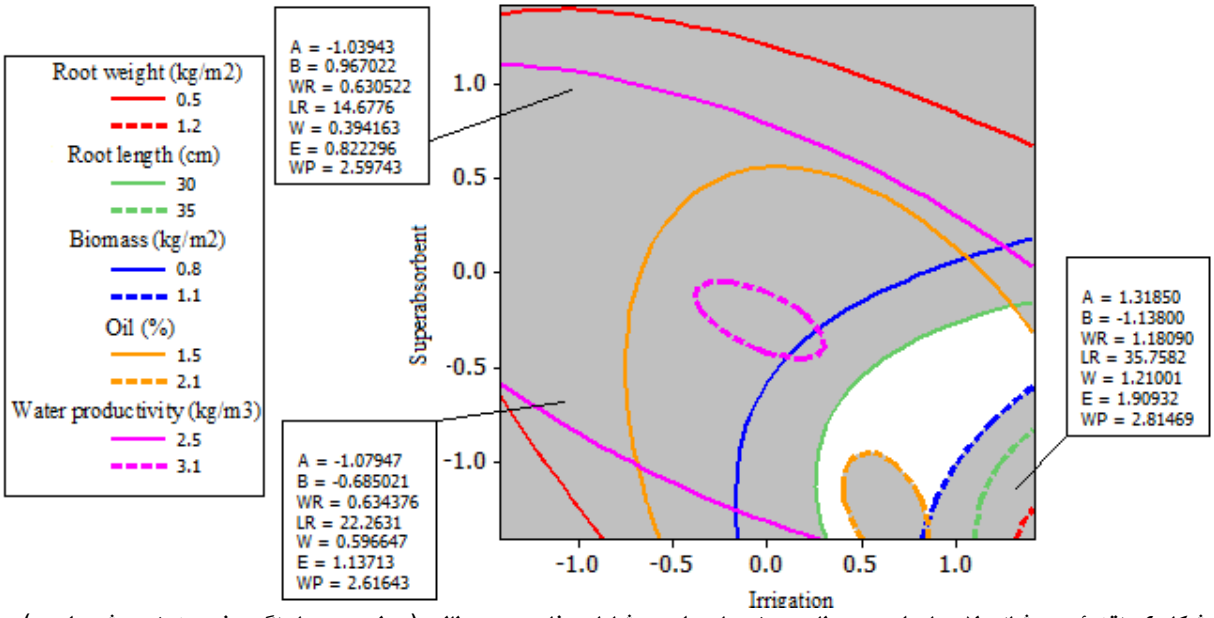
نتایج مشابه در نمودار سطح-پاسخ نیز مشاهده شد و بیش‌ترین وزن اندام هوایی در محدودهٔ کمینه مقدار سوپرجاذب و دور آبیاری به‌دست آمد. این نتایج با مشاهدات سایر محققان مطابقت داشت (Capuzzo and Maffei, 2016). از طرفی، این موضوع نشان می‌دهد که با کاهش وزن و طول ریشه، وزن اندام هوایی نیز کاهش می‌یابد. افزایش این صفات نیز سبب افزایش وزن اندام هوایی می‌شود که علت آن افزایش جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه است. براساس نمودار واکنش پارامتر درصد اسانس، کاهش دور آبیاری تا محدودهٔ ۰/۸+ سبب افزایش این پارامتر شد. بیش‌تر شدن مقدار آب آبیاری درصد اسانس را کاهش داد. رابطهٔ درصد اسانس و مقدار سوپرجاذب منفی بود به‌طوری‌که بیش‌ترین درصد اسانس در مقادیر کم‌تر سوپرجاذب به‌دست آمد. براساس نمودار سطح-پاسخ، محدودهٔ بین منفی یک تا صفر برای سوپرجاذب و صفر تا ۰/۸+ برای دور آبیاری دارای بیش‌ترین درصد اسانس بود. براساس نمودار واکنش بهره‌وری آب، این پارامتر با کاهش دور آبیاری تا محدودهٔ ۰/۵+ روند صعودی داشت. پس از این محدوده، تغییراتی در بهره‌وری آب مشاهده نشد. افزایش مصرف سوپرجاذب تا محدودهٔ ۰/۳- سبب افزایش بهره‌وری آب شد. مقدار این پارامتر پس از ۰/۳- روند نزولی داشت. گرچه سوپرجاذب مقدار آب بیش‌تری را جذب کرده بود ولی به‌دلیل کاهش شدید وزن اندام هوایی نعناع، مقدار بهره‌وری آب نیز کاهش یافت. البته این شرایط برای سایر گیاهان زراعی نیز متداول است. زیرا افزایش آب آبیاری به همان میزان سبب افزایش عملکرد در سطوح بالا (نزدیک به ۱+) نمی‌شود. این موضوع توسط محققان مختلف مورد تأیید قرار گرفته و تعدیل در مصرف آب برای افزایش بهره‌وری آب پیشنهاد شده است (Koocheki et al., 2014; Mansouri et al., 2015).



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

Figure 3- The reaction of the parameters and the response surface of the studied traits to changes in the amount of irrigation water and superabsorbent

برای تعیین حد بهینه و سطح مشترک پارامترهای مورد بررسی، ابتدا نقشهٔ هم‌پوشانی این پارامترها به‌صورت شکل ۴ تهیه شد. در محدودهٔ بالای این نقشه که شامل بیش‌ترین دور آبیاری و مصرف سوپرجاذب است؛ پارامترهایی مانند بهره‌وری آب تغییرات چندانی ندارند. این پارامتر در محدودهٔ مرکز نقشه به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. تمایل سایر پارامترها برای رسیدن به حد بهینه به محدود پایین–راست این نقشه است که با رنگ سفید مشخص شده است. لذا، برای بهینه‌سازی پارامترهای وزن ریشه، طول ریشه، وزن اندام هوایی، درصد اسانس و بهره‌وری آب، مقادیر هدف آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۱/۱ (کیلوگرم بر متر مربع)، ۳۳ (سانتی‌متر)، ۲ (کیلوگرم بر متر مربع)، ۳ (درصد) و ۴ (کیلوگرم بر مترمکعب) تعیین شد. این مقادیر براساس تغییرات این پارامترها در شکل ۴ تعیین شد. براساس نتایج بهینه‌سازی، دور آبیاری سه روز و مقدار سوپرجاذب ۰/۳ درصد به‌دست آمد. با اعمال این شرایط در مزرعه، وزن ریشه برابر با ۱/۱ کیلوگرم بر متر مربع به‌دست خواهد آمد که ۴۲ درصد بیش‌تر از متوسط وزن ریشه در شرایط به‌دست آمده است. این مقدار برای وزن ریشه بیش‌تر از وزن ۹۰ درصد تیمارهای آزمایشی نیز بود و از حداکثر وزن ریشه به‌دست آمده در این تحقیق حدود ۲/۶ درصد کم‌تر بود.



شکل ٤- نقشهٔ هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته شامل صفات مورد مطالعه (سطح بهینه با رنگ سفید مشخص شده است)

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

طول ریشهٔ بهینه برابر با ۳۲/۴ سانتی‌متر به‌دست آمد که نسبت به میانگین طول ریشهٔ تیمارهای آزمایشی حدود ۴۲/۷ درصد بیش‌تر و نسبت به حداکثر طول ریشه در این آزمایش ۳/۵ درصد کم‌تر بود. وزن اندام هوایی بهینه برابر با ۱/۰۲ کیلوگرم بر مترمربع به‌دست آمد که نسبت به متوسط و حداکثر وزن این پارامتر به‌ترتیب ۶۱/۹ درصد (بیش‌تر) و ۵/۵ درصد (کم‌تر) تغییرات داشت. درصد اسانس در شرایط بهینه به ۲/۱ درصد رسید که نسبت به متوسط و حداکثر اسانس در این آزمایش به‌ترتیب ۵۰ و ۳/۹ درصد بیش‌تر بود. تغییرات بهره‌وری آب در شرایط بهینه حدود ۷/۹ درصد نسبت به متوسط مقدار این پارامتر در شرایط آزمایش بیش‌تر و نسبت به حداکثر مقدار این پارامتر حدود ۸/۸ درصد کم‌تر بود. با این وجود، بهره‌وری آب به‌دست آمده از مقدار ۷۰ درصد تیمارها در شرایط آزمایش بیش‌تر به‌دست آمد.

٤- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات مقادیر مختلف دور آبیاری (سه سطح دو، چهار و شش روز) و سوپرجاذب آکواسورس (سه سطح صفر، یک و دو درصد وزنی سوپرجاذب/ خاک) در محدوده‌های منفی یک تا مثبت یک بر برخی صفات گیاه نعناع فلفلی بررسی شد. نتایج نشان داد که نتایج مدل سطح–پاسخ تفاوت معناداری با روش‌های آماری نداشت. بنابراین، به نتایج به‌دست آمده می‌توان اعتماد کرد. صفات وزن و طول ریشه، وزن اندام هوایی، درصد اسانس و بهره‌وری آب در مدل سطح–پاسخ مورد استفاده قرار گرفتند و به‌جز پارامترهای درصد اسانس و بهره‌وری آب، سایر صفات با افزایش مقدار آب آبیاری روند صعودی داشتند. کاهش دور آبیاری تا محدودهٔ ۰/۸+ برای درصد اسانس و ۰/۵+ برای بهره‌وری آب دارای روند صعودی بود و پس از آن حالت نزولی گرفت. افزایش مقدار سوپرجاذب بر صفات وزن و طول ریشه، وزن اندام هوایی و درصد اسانس اثر منفی داشت. افزایش مقدار

سوپرجاذب تا محدودهٔ ۰/۳- سبب افزایش بهره‌وری آب شد و پس از آن مقدار این پارامتر نیز کاهش یافت. براساس این شرایط، بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب توسط مدل سطح-پاسخ انجام شد و نتایج نشان داد که بهترین شرایط در صورت اعمال دور آبیاری سه روز و مقدار سوپرجاذب ۰/۳ درصد به‌دست می‌آید. این در حالی است که در طرح آزمایشی انجام شده، دور آبیاری چهار روز و مقدار سوپرجاذب یک درصد پیشنهاد شده بود. لیکن وزن اندام هوایی در این حالت کم‌تر از شرایط بهینه است و مقدار بهره‌وری آب نیز کم‌تر به‌دست آمد. بنابراین، رعایت شرایط بهینه برای کشت نعناع پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

این تحقیق با استفاده از صندوق پروژهٔ تحقیقاتی پژوهشکدهٔ مهندسی کشاورزی ایران (IAERI) با شماره ۲۴-۱۴-۱۴-۰۵۴-۹۷۰۹۷۳ انجام شده است. نویسندگان از کمک و حمایت مالی مؤسسه مذکور تشکر می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

اصلان اگدرنژاد: انجام تحلیل‌های روش‌شناسی، نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله؛ **سالومه سپهری صادقیان:** روش‌شناسی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **محمد مهدی نخجوانی مقدم:** ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل تحلیل‌های آماری.

منابع

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

Aslan, N. (2007). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator for chromite concentration. *Powder Technology*, *86*, 769–776. doi:10.1016/j.powtec.2007.10.002

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

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

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

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

سپهری صادقیان، سالومه، عباسی، نادر، و نخجوانی مقدم، محمدمهدی (۱۴۰۰الف). تأثیر پلیمر آکواسورس بر برخی خصوصیات فیزیکی و رطوبتی خاک‌های مختلف. *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۲۲(۸۲)، ۲۳-۴۲. doi:10.22092/idser.2021.124053

سپهری صادقیان، سالومه، عباسی، نادر، و نخجوانی مقدم، محمدمهدی (۱۴۰۰ب). نقش جاذب رطوبت آکواسورس در بهره‌وری مصرف آب گیاه نعناع فلفلی. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۴(۴)، ۲۹-۴۴. doi:10.22055/jise.2021.34154.1922

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

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

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

References

Ahmadee, M., Khashei-Siuki, A. & Sayyari, M.H. (2016). Comparison of Efficiency of Different Equations to Estimate the Water Requirement in Saffron (*Crocus sativus* L.((Case Study: Birjand Plain, Iran). *Journal of Agroecology*, 8(4), 505-520.

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

Box, G.E.P., & Wilson, K.B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, *13*, 1–45. doi:10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x.

Capuzzo, A., & Maffei, M. (2016). Molecular fingerprinting of peppermint (*Mentha piperita*) and some *Mentha* hybrids by sequencing and RFLP analysis of the 5S rRNA non-transcribed spacer (NTS) region. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, *150*(2), 236-243. doi:10.1080/11263504.2014.969355

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

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

Jahan, M., Nasiri mahalati, M., Khalilzadeh, H., Bigonah, R., & Razavi, S.A.R. (2015). Optimizing of nitrogen, phosphorus and cattle manure fertilizers application in winter wheat production using response-surface methodology (RSM). *Iranian Journal of Field Crops Research*, *13*(4), 823-839. doi:10.22067/gsc.v13i4.39788. [In Persian]

Jahan, M., Amiri, M.B., & Nourbakhsh, F. (2016). Evaluation of the increased rates of water super absorbent and humic acid application under deficit irrigation conidition on some agroecological characteristics of zea mays using response surface methodology. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *14*(4), 746-764. doi:10.22067/gsc.v14i4.48347. [In Persian]

Kalavathy, H.M., Regupathib, I., Pillai, M.G. & 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. doi:10.1016/j.colsurfb.2008.12.007

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

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

Kwak, J.S. (2005). Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *45*, 327–34. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.08.007

Mansouri, H., Banayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., Lakzian, A. (2015). Management of nitrogen, irrigation and planting density In Persian shallot (*Allium hirtifolium*) by using central composite optimizing method. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *24*(4.1), 41-60. doi:10.22055/jise.2021.34154.1922. [In Persian]

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

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

Nassiri, M., Koocheki, A., Kamali, G. A., & Shahandeh, H. (2006). Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran: (Potentieller Einfluss des Klimawandels auf die Weizenproduktion unter Rainfed-Bedingungen in Iran). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52(1), 113-124.

Sepehri Sadeghian, S., Abbassi, N., & Nakhjavanimoghaddam, M.M. (2021a). Effect of aquasource polymer on the hydro-physical properties of different soils. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, *22*(82), 23-42. doi:10.22092/idser.2021.124053. [In Persian]

Sepehri Sadeghian, S., Abbasi, N., & Nakhjavanimoghaddam, M.M. (2021b). The role of aquasource moisture absorbent in water productivity of peppermint (*mentha piperita*). *Irrigation Sciences and Engineering*, *44*(4), 29-44. doi:10.22055/jise.2021.34154.1922. [In Persian]

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