Determining the Optimal Irrigation Amount and Salinity in Quinoa (*Chenopodium quinoa*) by Surface-Response Method

Jalal Gharibvandnotorki[1] | Halimeh Piri[2]✉ | Parviz Haghighatjoo[3], Amir Nserin[4], Mahdi Asadiloor [5]

1. phd student, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: jalalgharibvand@gmail.com,
2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: h_piri2880@uoz.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. phjou40@gmail.com
4. Assistant professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Ahvaz – Iran. a.naserin@asnrukh.ac.ir
5. Assistant professor, Department of Water Engineering, Islamic Azad University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. M_asadi@yahoo.com.

Abstract

Quinoa (*Chenopodium quinoa*) has been introduced as one of the crops to ensure food security in the world, which can tolerate water and drought stress. However, the cultivation development of quinoa under water and salinity stress in Khuzestan province, Iran, should be based on determining the limits of irrigation water and determining its tolerance to salinity. To achieve this goal, the present research was conducted in a research farm located in Baghmalek city, in the east of Khuzestan province, Iran, at the latitude of 31° 41' N and longitude of 49° 51' E during 2022-2023. In this research, the quinoa was grown under pulse drip irrigation. Irrigation water was supplied between 60% and 100% of the water requirement (code -1 to +1) in different plots. Applying salinity treatment with two water sources with salinities of 0.5 and 0.6 $dS.m^{-1}$. Thus, in the absence of salinity stress (code +1), pulse irrigation was done with three fresh water pulses. In the conditions of full salinity stress (code -1), pulse irrigation was done with three pulses of saline water. Response-surface method was used to determine the optimal amounts of these parameters. The results showed that in the optimal state (Treatment of 60% irrigation and pulse irrigation in the form of fresh water-salt water-fresh water), the dry weight of fodder was equal to 6845.7 and the wet weight of fodder was equal to 24827.9 $kg.ha^{-1}$. In addition, the percentage of fiber and soluble sugars of fodder reached 0.15 and 10.4%, respectively. It is worth mentioning, the optimal amount of irrigation water was equal to 60% of the water requirement and the pulse method code was equal to zero. Therefore, it is suggested to reach the optimal quantitative and qualitative parameters of quinoa fodder, the pulse irrigation method is done in the form of fresh water-salt water-fresh water and by providing 60% of the water requirement of the quinoa.

Keywords: Pulse Irrigation, Fiber Percentage, Quinoa Quality, Irrigation Adequacy

ویرایش شده

تعیین حدود بهینه مقدار و شوری آب آبیاری در کشت کینوا (*Chenopodium quinoa*) با روش سطح-پاسخ

جلال غریبوند نوترکی [۱] | حلیمه پیری[۲]✉ |پرویز حقیقت جو[۳] ، امیر ناصرین[۴] |مهدی اسدی لور[۵]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: jalalgharibvand@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: h_piri2880@uoz.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: phjou40@gmail.com

۴. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران. رایانامه: a.naserin@asnrukh.ac.ir

۵. گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز ایران. رایانامه: M_asadi@yahoo.com.

ویرایش اولیه ی نشده

چکیده

کینوا (*Chenopodium quinoa*) یکی از گیاهان زراعی برای تأمین امنیت غذایی در جهان معرفی شده است که شرایط تنش آبی و خشکی را تا حدودی می‌تواند تحمل کند. لیکن، توسعه کشت آن در شرایط تنش آبی و خشکی در استان خوزستان می‌بایست براساس تعیین حدود مقادیر آب آبیاری و تعیین آستانه تحمل به شوری با شد. برای دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر در یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان باغملک، در شرق استان خوزستان، در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه‌ی شمالی در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شد. در این پژوهش، گیاه کینوا تحت آبیاری قطره‌ای و به صورت پالسی کشت گردید. کفایت آبیاری ۶۰ تا ۱۰۰ درصدی نیاز آبی (کدهای ۱- تا ۱+) در کرت‌های مختلف انجام شد. تیمارهای شوری آب در دو سطح ۰/۵ و ۶/۰ دسی‌زیمنس بر متر اعمال گردید. بدین صورت که در شرایط عدم تنش شوری (مقدار ۱+)، آبیاری پالسی با سه پالس آب شیرین انجام شد.اما در شرایط تنش کامل شوری (کد ۱-)، آبیاری پالسی در سه پالس آب شور صورت گرفت. برای تعیین حدود بهینه این پارامترها، از روش سطح-پاسخ استفاده گردید. نتایج نشان داد که در بهینه‌ترین حالت (تیمار ۶۰ درصد آبیاری و پالس آبیاری به‌صورت آب شیرین-آب شور-آب شیرین)، وزن خشک و تر علوفه به ترتیب برابر با ۶۸۴۵/۷ و ۲۴۸۲۷/۹ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. همچنین فیبر و قند محلول علوفه به ترتیب به ۱۵/۰ و ۱۰/۴ درصد رسیدند. لازم به ذکر است، مقادیر بهینه آب آبیاری برابر با ۶۰ درصد نیاز آبی و مقدار بهینه کد روش پالسی برابر با صفر به دست آمد. لذا پیشنهاد می شود برای رسیدن به پارامترهای بهینه کمی و کیفی علوفه‌ی کینوا، روش آبیاری پالسی به صورت آب شیرین-آب شور-آب شیرین و با تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه کینوا انجام شود.

واژه‌های کلیدی: *آبیاری پالسی، درصد فیبر، کیفیت کینوا، کفایت آبیاری*

مقدمه

کینوا یکی از گیاهان جدید محسوب می‌شود که توسط سازمان فائو به عنوان گیاهی اساسی برای تأمین امنیت غذایی در جهان معرفی شده است. این گیاه دولپه است و منشأ آن آمریکای جنوبی است (رضوانی‌مقدم و همکاران، ۱۴۰۰). در کشور ایران رقم‌های مختلفی برای کینوا معرفی شده است که هم مصرف غذایی و هم تأمین علوفه برای دام دارند. این گیاه نسبت به تنش‌های خشکی و شوری نسبتاً متحمل است ولی این شرایط سبب کاهش عملکرد و تغییر خصوصیات کیفی آن می شود (توراج‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳؛ Tourajzadeh et al., 2024). خوزستان به عنوان یکی از مناطق برای توسعه کشت کینوا در ایران در نظر گرفته شده است. لیکن، نگرانی در خصوص کمبود منابع آب در سال‌های اخیر و احتمال تداوم آن در آینده (یعقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ یعقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶) و افزایش شوری منابع آب در این استان (رجب‌زاده و پذیرا، ۱۳۹۹) وجود دارد. در برخی شرایط، استفاده از زهاب یا کم‌آبیاری برای زراعت در استان خوزستان پیشنهاد شده است (مختاران و همکاران، ۱۳۹۹) ولی اطلاعات دقیقی در خصوص حدود بهینه مقدار و شوری آب آبیاری در کشت کینوا در این استان در دسترس نیست.

روش‌های متعددی برای بهینه کردن پارامترها در کشاورزی وجود دارد و هر کدام به دلیل دارا بودن نقاط ضعف و قدرت برای اهداف خاصی استفاده می شوند. استفاده از داده‌های اندک و قابل برداشت در مزرعه یکی از عوامل اساسی برای انتخاب روش بهینه سازی در کشاورزی است. روش سطح-پاسخ به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی نوین شناخته می‌شود و کاربرد آن در بخش کشاورزی روز به روز در حال گسترش است (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ حمید و همکاران، ۱۴۰۱؛ Piri and Naserin, 2022). این روش در سایر علوم سابقه‌ی قدیمی‌تری دارد و قبلاً در علومی مانند صنایع غذایی و شیمی برای تعیین حدود بهینه پارامترهای آزمایش مورد استفاده قرار می‌گرفت (Aslan, 2007; Kwak, 2005). اساس این روش بر مبنای یک مدل غیرخطی چند منظوره است که سعی می شود برازش مناسبی بین تیمارها انجام داده و مقادیر مناسبی از متغیرهای مستقل را تعیین کند (Zulkali et al., 2006; Kalavathy et al., 2009). طرح مربع مرکزی یکی از متداول‌ترین روش‌های سطح-پاسخ است (Wu and Hamada, 2009) که به عنوان جایگزین مناسبی برای طرح‌های آزمایشات در کشاورزی نیز استفاده می‌شود (حمید و همکاران، ۱۴۰۱). با استفاده از طرح مربع مرکزی می‌توان هزینه‌های آزمایش در مزارع تحقیقاتی را کاهش داد و اطلاعات بیشتری نسبت به طرح‌های رایج آزمایشی برداشت کرد. همچنین، امکان مقایسه‌ی سناریوهای مختلف در این روش وجود دارد (Aslan, 2007).

در طرح مربع مرکزی حدود بالا و پایین برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود. سپس با بهینه کردن پارامترها در محدوده‌ی در نظر گرفته شده، بهترین حالت برای دستیابی به هدف آزمایش تعیین می‌گردد. با توجه به این مهم، تحقیقات متعددی با استفاده از این روش روی گیاهان زراعی انجام شده است. به عنوان مثال، جهان و همکاران (۱۳۹۴) سطوح بالا و پایین کود نیتروژن، فسفر و دامی را برای تعیین بهترین حالت از نظر سود اقتصادی در کشت گندم بررسی کردند. حدود کودهای مورد استفاده به ترتیب ۳۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار و ۳۰-۰ تن در هکتار بود. نتایج بهینه سازی نشان داد که بیشترین سود اقتصادی با کاربرد ۱۴۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم کود فسفر و ۱۸ تن کود دامی به دست می‌آید. در پژوهشی دیگر، جهان و همکاران (۱۳۹۵) سطوح بالا و پایین سوپر جاذب، اسید هیومیک و آب آبیاری را برای تعیین بیشترین عملکرد ذرت مورد بررسی قرار دادند. مقادیر بالا و پایین تیمارهای مورد استفاده به ترتیب ۱۶۰-۸۰ کیلوگرم بر هکتار، ۸-۴ کیلوگرم بر هکتار و ۱۰۰-۵۰ درصد نیاز آبی بود. نتایج این محققان نشان داد که بیشترین عملکرد ذرت در صورت کاربرد ۱۲۶ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، ۷ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و ۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری در هکتار به دست می‌آید. منصوری و همکاران (۱۴۰۰) سطوح بالا و پایین کود نیتروژن و آب آبیاری را برای تعیین بیشترین عملکرد چغندرقند مورد بررسی قرار دادند. مقادیر بالا و پایین این تیمارها به ترتیب ۲۴۰-۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۴۰۰۰-۸۰۰۰ مترمکعب آب آبیاری بود. نتایج این محققان نشان داد که بیشترین عملکرد چغندرقند با کاربرد ۱۳۳ کیلوگرم کود نیتروژن و ۱۰۶۷۷ مترمکعب آب آبیاری به دست می‌آید. گودرزی و همکاران (۱۴۰۰) مطالعه‌ای برای بهینه‌کردن کود نیتروژن و فاصله بوته روی گیاه انسفاج انجام دادند. بالاترین عملکرد اقتصادی با کاربرد ۱۸۹ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن و رعایت فاصله ۷ سانتی‌متر به دست آمد. رضوانی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از طرح مربع مرکزی به بهینه‌سازی سطوح مختلف آبیاری و نیتروژن روی گیاه کینوا پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که در صورت کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و ۷۵۰۰ مترمکعب آب آبیاری بیشترین عملکرد اقتصادی به دست می‌آید. همچنین در صورت تغییر هدف از اقتصادی به زیست‌محیطی، کاربرد ۹۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۶۰۰۰ مترمکعب آب آبیاری مناسب می‌باشد. در پژوهشی که Koocheki et al.,(2014) روی گیاه کلزا انجام دادند، پارامترهای کود نیتروژن، آب

آبیاری و تراکم گیاه مورد بررسی قرار گرفت. حدود بالا و پایین این پارامترها به ترتیب ۴۰۰–۰ کیلوگرم در هکتار، ۴۰۰۰–۱۵۰۰ مترمکعب در هکتار و ۱۵۰–۵۰ بوته در مترمربع بود. نتایج نشان داد که در صورت کاربرد ۹۲ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، ۲۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته در متر مربع، می‌توان بالاترین عملکرد را داشت. در پژوهشی دیگر، Mansouri et al (2015) با هدف کاهش آلودگی زیست‌محیطی، مقادیر مختلف کود نیتروژن و آب آبیاری را در کشت پیاز بررسی کردند. نتایج این محققان نشان داد که کاربرد ۹۳ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری سبب دستیابی به عملکرد قابل قبول و کمترین مقدار آلودگی زیست‌محیطی می‌شود. در پژوهشی که توسط Mazumdar et al., (2021) روی گیاه خردل انجام شد، بهترین مقادیر مصرف ریزوباکتری مورد بررسی قرار گرفت. هدف این پژوهش علاوه بر افزایش عملکرد، بهبود شرایط زیست‌محیطی نیز بود. نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار ریزوباکتری می‌توان به اهداف در نظر گرفته شده دست یافت.

بررسی منابع نشان داد که کاربرد روش سطح–پاسخ برای تعیین حدود بهینه مقدار و کیفیت آب آبیاری تاکنون کمتر مورد توجه محققان بوده است. این روش روی گیاه استراتژیک کینوا نیز تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا، هدف این پژوهش، تعیین مقادیر بهینه مقدار و شوری آب آبیاری به صورت پالسی روی افزایش خصوصیات کمی و کیفی گیاه کینوا با استفاده از روش سطح–پاسخ انجام شد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان باغملک، در شرق استان خوزستان، در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه‌ی شمالی در سال زراعی ۱۴۰۲–۱۴۰۱ انجام شد. این منطقه، در ارتفاع ۸۵۵ متری از سطح دریا قرار دارد. بیش‌ترین درجه حرارت این منطقه در تابستان‌ها به ۴۲ درجه و کم‌ترین درجه حرارت در زمستان‌ها به صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. متوسط بارش سالیانه ۵۰۰ میلی‌متر است.

در ابتدای بهمن ماه ۱۴۰۱، زمین خاکورزی و تسطیح شده و سپس با استفاده از دستگاه خطی‌کار، بذر کینوای علوفه‌ای رقم ساجاما در عمق ۰/۵ سانتی‌متری خاک کشت گردید. هر کرت آزمایشی به مساحت ۱۲ متر مربع (۴ متر × ۳ متر) و در هر کرت پنج ردیف کینوا به فاصله ردیف‌های کشت از هم ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌ها ۱۰ سانتی‌متر کشت و دو کرت کناری به‌عنوان حاشیه در طول آزمایش در نظر گرفته شد. در انتهای فصل کشت، برداشت نمونه از ردیف‌های میانی صورت گرفت. شکل (۱) کرت‌های آزمایشی را نشان می‌دهد.

آبیاری گیاه در طول آزمایش با اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای و به صورت پالسی انجام شد. این روش آبیاری بدین صورت است که زمان یکپارچه آبیاری در روش مرسوم به چند نوبت به همراه وقفه بین آن‌ها تقسیم می‌شود. کفایت آبیاری به ترتیب ۱۰۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه کینوا بود که در طی سه پالس در هر مرحله آبیاری در اختیار گیاه قرار گرفت. در حد بالای آبیاری پالسی، شوری آب آبیاری در هر سه پالس ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. در حد پایین آبیاری پالسی، شوری آب آبیاری در هر سه پالس ۶/۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. در هر پالس جای آب شور و شیرین تغییر می‌کرد. به این صورت که اگر پالس اول آب شور استفاده شد، پالس دوم آب شیرین و پالس سوم آب شور در نظر گرفته می‌شد. به همین ترتیب، سناریوهای مختلفی از آب شور و شیرین در هر آبیاری درنظر گرفته شد. براساس تجربه محلی، دور آبیاری به‌صورت دو روز یکبار و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متری در تیمار آبیاری کامل و رساندن به حد ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد. برای تیمار آبیاری ۶۰ درصد، کفایت آبیاری ۶۰ درصد صورت گرفت. اندازه‌گیری رطوبت خاک در محدوده مورد نظر برای تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه TDR انجام شد. سپس مقدار عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$d = (\theta_{fc} - \theta_i) \times \Delta z$$

رابطه ۱)

در معادله فوق d عمق آبیاری (متر) و θ_{fci} و θ_i به ترتیب رطوبت حجمی خاک ($m^3.m^{-3}$) در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری می‌باشد. همچنین Δz عمق توسعه ریشه برحسب متر (۰/۳ متر) می‌باشد. با توجه به این‌که اندازه‌گیری رطوبت برای کلیه تیمارها در یک زمان و در طول دوره آزمایش دشوار بود؛ زمان آبیاری برای هر کرت با این روش اندازه‌گیری شد. در واقع، با استفاده از دستگاه TDR، زمان لازم برای آبیاری هر تیمار به دست آمد. بر این اساس، در زمان اعمال آبیاری در مزرعه، زمان آبیاری برای کرت‌های مورد نظر در

نظر گرفته می شد تا حدود در نظر گرفته آبیاری اعمال گردند. خصوصیات منابع آب (شور و غیرشور) مورد استفاده و خاک محل آزمایش به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

شکل ۱. مزرعه تحقیقاتی و بررسی کرت‌ها در طول آزمایش

سیستم آبیاری مورد استفاده شامل لوله‌های آبیاری قطره‌ای تیپ بود که با طول ۴ متر در هر کرت استفاده گردید. برای آبیاری، آب در مخزن‌هایی در کنار مزرعه ذخیره شد. سپس با استفاده از پمپ، آب از درون مخازن به لوله‌های اصلی و پس از آن به نوارهای تیپ منتقل گردید. مقدار آب آبیاری تمامی کرت‌ها تا زمان سبزشدن کامل مزرعه (مرحله شش‌برگی) یکسان بود. همچنین تیمار شوری تا این مرحله اعمال نگردید. آب با شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس (F) بر متر از آب چاه موجود در مزرعه و آب با شوری ۶/۰ دسی‌زیمنس بر متر (S) از چاه‌های شهرستان مجاور تأمین شد (جدول ۱). برای تأمین مداوم آب شور، به صورت مکرر آب از شهرستان مجاور با تانکر به مزرعه منتقل و در مخازن مجزا ذخیره گردید. در انتهای فصل کشت (اواخر خرداد که گیاه تقریباً بذر تولید کرده است)، برداشت انجام شد. جهت تعیین پارامترهای مربوط به ریشه، ریشه گیاه از خاک در آورده شد. اندازه بزرگترین ریشه به عنوان طول ریشه گیاه در نظر گرفته شد. به منظور تعیین حجم ریشه از قانون ارشمیدس استفاده گردید. بدین منظور با قرار دادن ریشه‌ها در استوانه‌های مدرج و تعیین میزان تغییر سطح آب، حجم ریشه اندازه‌گیری شد. وزن مرطوب ریشه‌ها پس از نمونه‌برداری با استفاده از ترازو تعیین گردید. وزن خشک ریشه پس از قرار دادن نمونه‌ها در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. عملکرد علوفه تازه با برداشت دو خط وسط هر کرت با رعایت اثر حاشیه و حذف دو بوته از ابتدا و انتهای کرت به صورت دستی اندازه‌گیری و بر حسب تن در هکتار محاسبه گردید. به منظور تعیین وزن علوفه خشک، علوفه‌های تر برداشت شده به مدت دو هفته در هوای آزاد قرار داده شدند. پس از اینکه به طور کامل خشک شدند با استفاده از ترازو توزین گردیدند (توراج‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). مقادیر فیبر علوفه به‌وسیله دستگاه فایبرتک ۱۰۱۰ شرکت تکاتور براساس شستشو با اسید جوشان با روش ون سوئست و روبرتسون (Van Soest and Robertson, 1991) تعیین گردید. مقادیر قندهای محلول به روش فنل _ اسیدسولفوریک (Dubois et al., 1956)، اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی منابع آب مورد استفاده

نمونه	EC (dS/m)	pH	بی‌کربنات	پتاسیم	کلر	کلسیم	منیزیم	سدیم	SAR
			meq/lit						
F	۰/۵	۷/۳۱	۳/۲	۰/۳۲	۶/۳	۴/۱	۲/۳	۶/۵	۳/۶۳
S	۶	۷/۱۲	۴/۸	۰/۶۱	۳۱/۴	۴/۵	۴/۲	۳۶/۷	۱۷/۶۹

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

عمق خاک (cm)	بافت خاک	EC (dS/m)	pH	کربنات	بی کربنات	کلر	کلسیم	منیزیم	سدیم	SAR
				meq/lit						
۳۰-۰	سیلتی لوم	۰/۷۶	۸/۱۹	۰	۳/۰	۴/۵	۸/۲	۳/۲	۳/۸	۱/۵

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

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

که در آن، y متغیر پاسخ و x متغیر مستقل می‌باشد. یکی از انواع روش‌های سطح پاسخ، طرح مربع مرکزی است. این روش به صورت طرح آزمایشی برای تعیین مقدار متغیرهای مستقل برای تعیین متغیر وابسته پیش‌بینی شده تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح عوامل به عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Kalavathy et al., 2009). در این روش، تیمارهای آزمایشی با اعداد ۱، ۰ و ۱- و بدون واحد نمایش داده می‌شوند که به‌ترتیب نشان دهنده‌ی بالاترین، میانگین و پایین‌ترین سطح متغیر مستقل هستند. برای تعیین تعداد تیمارها از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود:

رابطه ۳)
$$2^k + 2k + r$$

در این معادله، k نشان دهنده‌ی تعداد عوامل مورد آزمایش و r تعداد تکرار است (Aslan, 2007). برای برازش داده‌ها از رگرسیون چند متغیره با افزودن جملات خطی، درجه دو و اثر متقابل بین عوامل، برازش و براساس تجزیه واریانس رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. معادله‌ی چند جمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به شکل زیر است (Aslan, 2007).

رابطه ۴)
$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3{x_1}^2 + a_4{x_2}^2 + a_5x_1x_2$$

در این معادله، y متغیر وابسته، i خصوصیات کمی و کیفی کینوا، a ضریب رابطه، x_1 متغیر مستقل مقدار آب آبیاری و x_2 متغیر مستقل شوری آب آبیاری به روش پالسی است. برای مقایسه‌ی نتایج مدل به دست آمده با مقادیر مشاهداتی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) به صورت زیر استفاده شد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

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

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

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

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

ویرایشاری شده

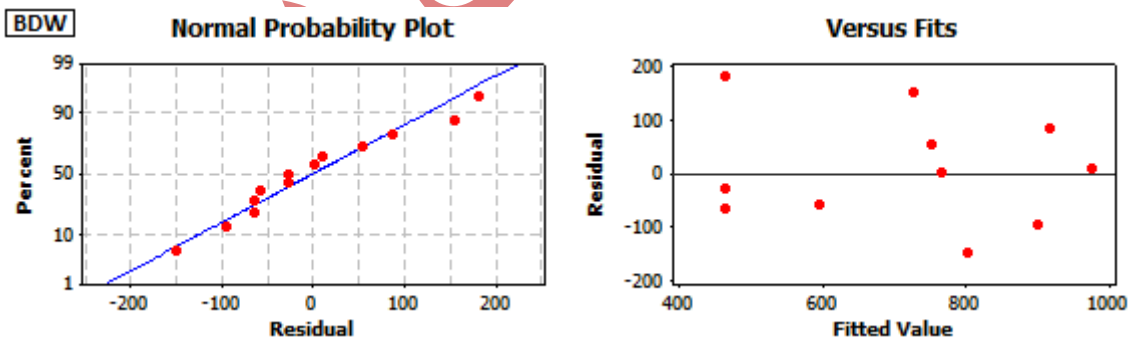
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2}$$ رابطه ۹)

$$R^2 = \frac{\left(\sum (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum (P_i - \overline{P})^2 \sum (O_i - \overline{O})^2}$$ رابطه 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 می‌با شد. آماره‌های RMSE و NEMSE به‌ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل ا ست. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقت عالی مدل است. هم چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به‌ترتیب نشان دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مقدار شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامترهای گیاه کینوا عدد کوچکتری به د ست داده ا ست. مقادیر آماره‌های EF و d ن شان‌دهنده کارایی مدل ا ست. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر با شند، بهتر است. آماره R^2 نشان‌دهنده قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). پس از ارزیابی مدل رگرسیونی، نتایج خروجی با استفاده از نرم‌افزار MINITAB تهیه گردید.

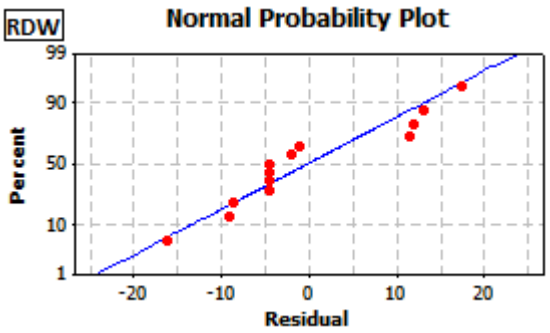
نتایج و بحث

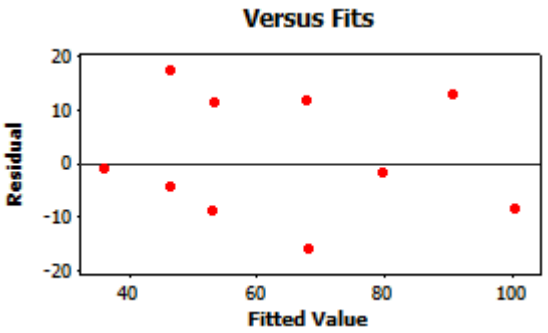
قبل از اجرای مدل سطح-پاسخ، ارزیابی داده‌های مورد استفاده با استفاده از دو آزمون نرمال بودن و ثابت بودن واریانس انجام گردید. نتایج ن شان داد که تنها پارامترهای وزن علوفه خ شک (BDW)، وزن ریشه خ شک (RDW)، حجم ریشه (RV)، وزن علوفه تر (BFW)، وزن ریشه تر (RFW)، فیبر (FI) و قندهای محلول (SS) صلاحیت لازم برای استفاده در مدل سطح-پاسخ را داشتند و سایر خصوصیات کمی و کیفی برداشت شده برای اجرا در این مدل منا سب نبودند. مقادیر پارامترهای ا شاره شده در محدوده‌ی خط برازش قرار دا شتند به همین دلیل از نظر نرمال بودن در وضعیت مطلوب بودند. همچنین، عدم وجود روند خاص بین این پارامترها براساس نتایج پراکندگی باقیمانده‌ی داده‌ها نسبت به مقادیر برازنده شده[1] نیز قابل مشاهده است (شکل ۲).



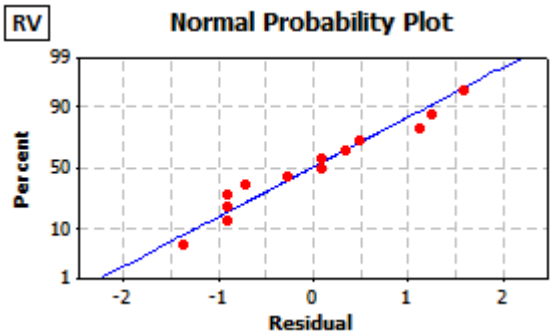
[1] Fitted Value

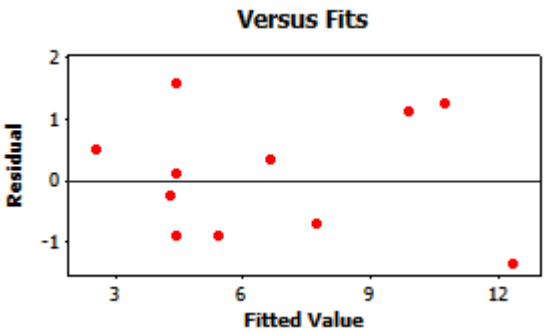
RDW



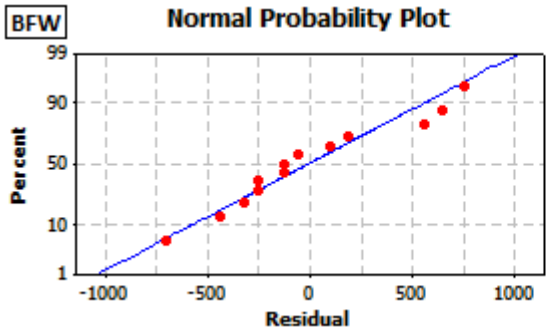


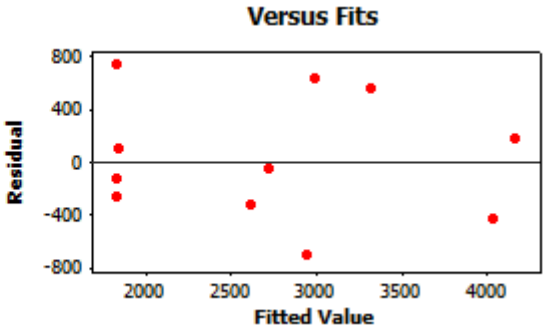
RV



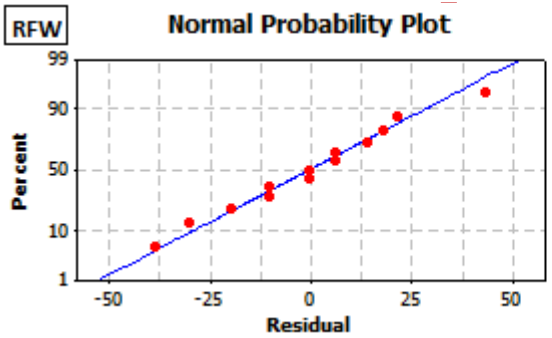


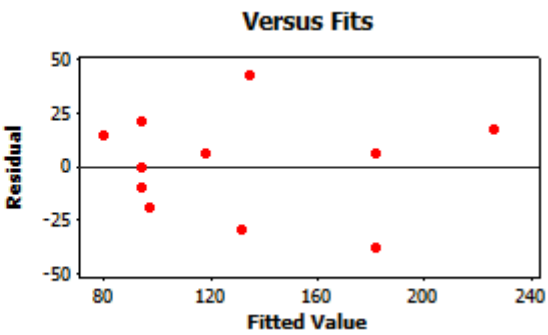
BFW



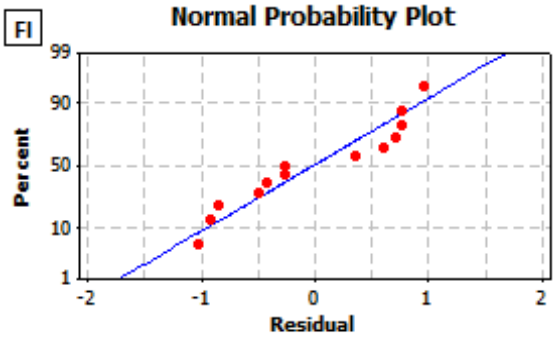


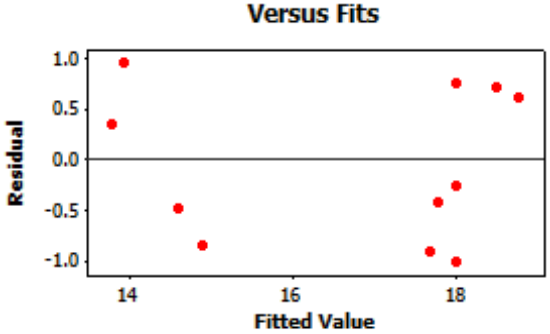
RFW

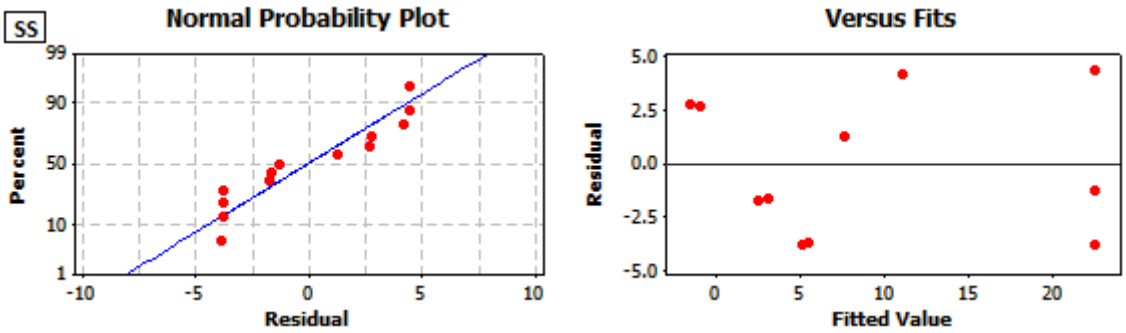




FI







شکل ۲- بررسی ثابت بودن واریانس (سمت راست) و نرمال بودن (سمت چپ) برای پارامترهای وزن علوفه خشک (BDW)، وزن ریشه خشک (RDW)، حجم ریشه (RV)، وزن علوفه تر (BFW)، وزن ریشه تر (RFW)، فیبر (FI) و قندهای محلول (SS)

نتایج تجزیه رگرسیون در جدول (۳) نشان داد که پارامترهایی که در شکل (۲) قابلیت لازم برای عملیات بهینه سازی داشتند، دارای سطوح معنی‌داری بیشتر از ۵ درصد بودند. نتایج سایر محققان در این مرحله نشان داده است که اگر مدل رگرسیون برای پارامترهای در نظر گرفته شده دارای سطح معنی‌داری بیشتر از ۵ درصد باشد؛ می‌توان عملیات سطح-پاسخ را با تعیین ضرایب پارامترهای مدل رگرسیون انجام داد (Koocheki et al., 2014; Mansouri et al., 2015). بنابراین، این ضرایب مطابق جدول (۴) محاسبه شدند. مقایسه‌ی نتایج مدل رگرسیونی براساس ضرایب تعیین شده در جدول (۴) با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقادیر آماره‌ی MBE برای کلیه پارامترها نزدیک به صفر بود؛ بنابراین مدل رگرسیونی دارای خطای بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی اندکی بود. براساس آماره‌ی NRMSE، مدل رگرسیونی برای برآورد فیبر دارای دقت عالی (NRMSE<0.1) و برای برآورد قندهای محلول دارای دقت متوسط (0.2<NRMSE<0.3) بود. دقت این مدل برای برآورد سایر پارامترها در دسته‌ی خوب (0.1<NRMSE<0.2) قرار داشت. مقادیر دو آماره‌ی EF و d بیشتر از ۰/۹ بود و به همین دلیل مدل رگرسیونی کارایی مطلوبی برای برآورد پارامترهای مورد مطالعه داشت. نتایج آماره‌ی R^2 در شکل (۳) نشان داده شده است. این آماره میزان تبعیت نتایج مدل رگرسیونی از تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مقادیر این آماره برای کلیه پارامترهای بیشتر از ۰/۷۹ بود. در واقع، مدل رگرسیونی توانایی پیش‌بینی بیش از ۷۹ درصد تغییرات در مزرعه را داشت. بنابراین می‌توان به نتایج این مدل اعتماد کرد. این نتایج مطابق با مطالعات سایر محققان از جمله منصوری و همکاران (۱۴۰۰) و رضوانی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۰) است. این محققان نیز برای ارزیابی مدل رگرسیونی از آماره‌های اشاره شده استفاده کردند. نتایج آزمون t برای مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده برای هر متغیر وابسته با خط ۱:۱ نشان داد که شیب و خط برازش برای همه‌ی صفات قابل قبول بود (جدول ۶).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس رگرسیونی (آماره P-value) برای متغیرهای وابسته گیاه کینوا

منابع تغییرات رگرسیون	نماد	رگرسیون	خطی	درجه دو	اثر متقابل
درجه آزادی	–	۵	۲	۲	۱
وزن علوفه خشک	BDW	۰/۰۲	۰/۵۵	۰/۰۰۴	۰/۰۷
وزن ریشه خشک	RDW	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۱۵
حجم ریشه	RV	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۸
وزن علوفه تر	BFW	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰۹	۰/۴۱
وزن ریشه تر	RFW	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۴۰
فیبر	FI	۰/۰۰۶	۰/۹۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱
قندهای محلول	SS	۰/۰۰۳	۰/۷۴	۰/۰۰	۰/۹۸

جدول ۴- ضرایب رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو کامل برای متغیرهای وابسته (x1 مقدار آب آبیاری و x2 روش پالسی است)

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

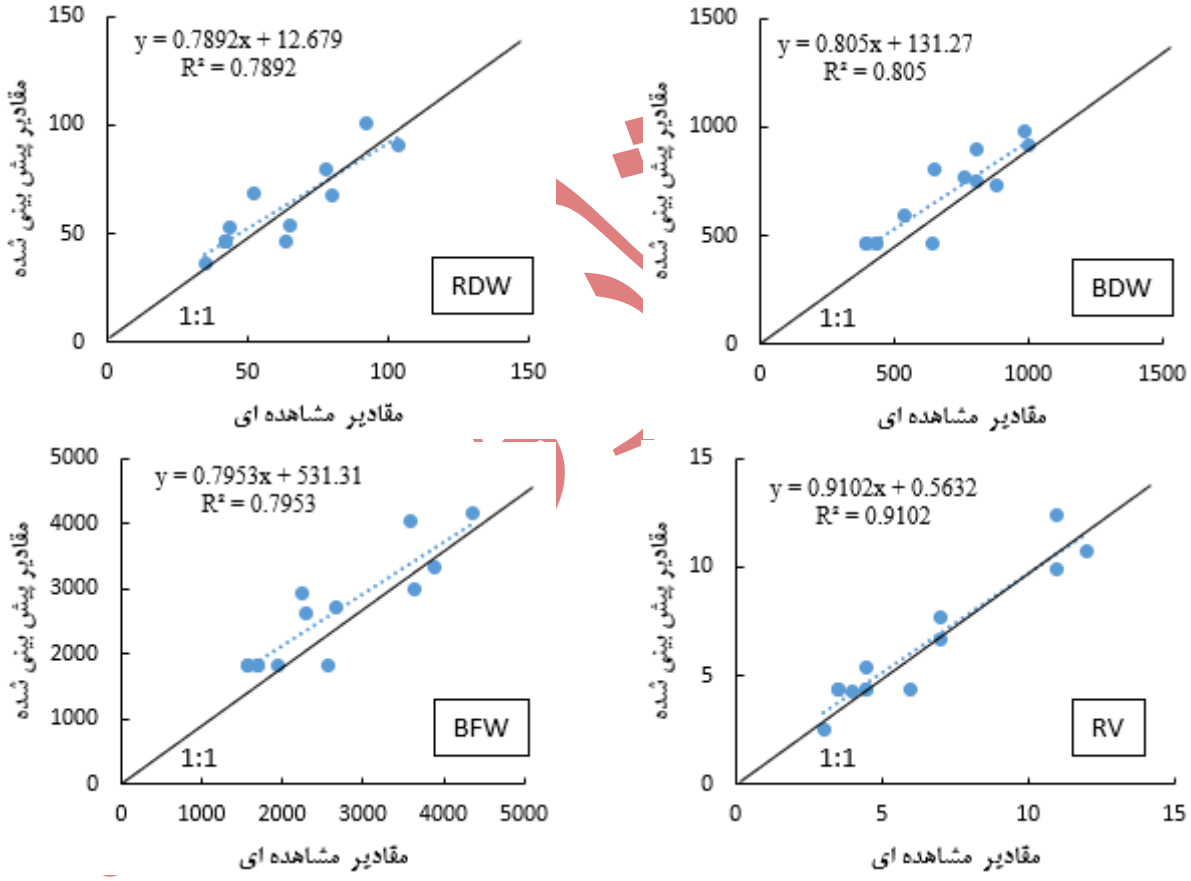
پارامترها	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
وزن علوفه خشک	۴۶۲/۶	۲۰/۶	-۴۶/۴	۲۴۲/۵	۹۹/۵	-۲۸/۰
وزن ریشه خشک	۴۶/۴	۱۶/۶	-۵/۲	۳۱۵	۷/۰	۱۰/۷
حجم ریشه	۴/۴	۲/۸	۰/۸	۱/۹	۱/۰	-۱/۲

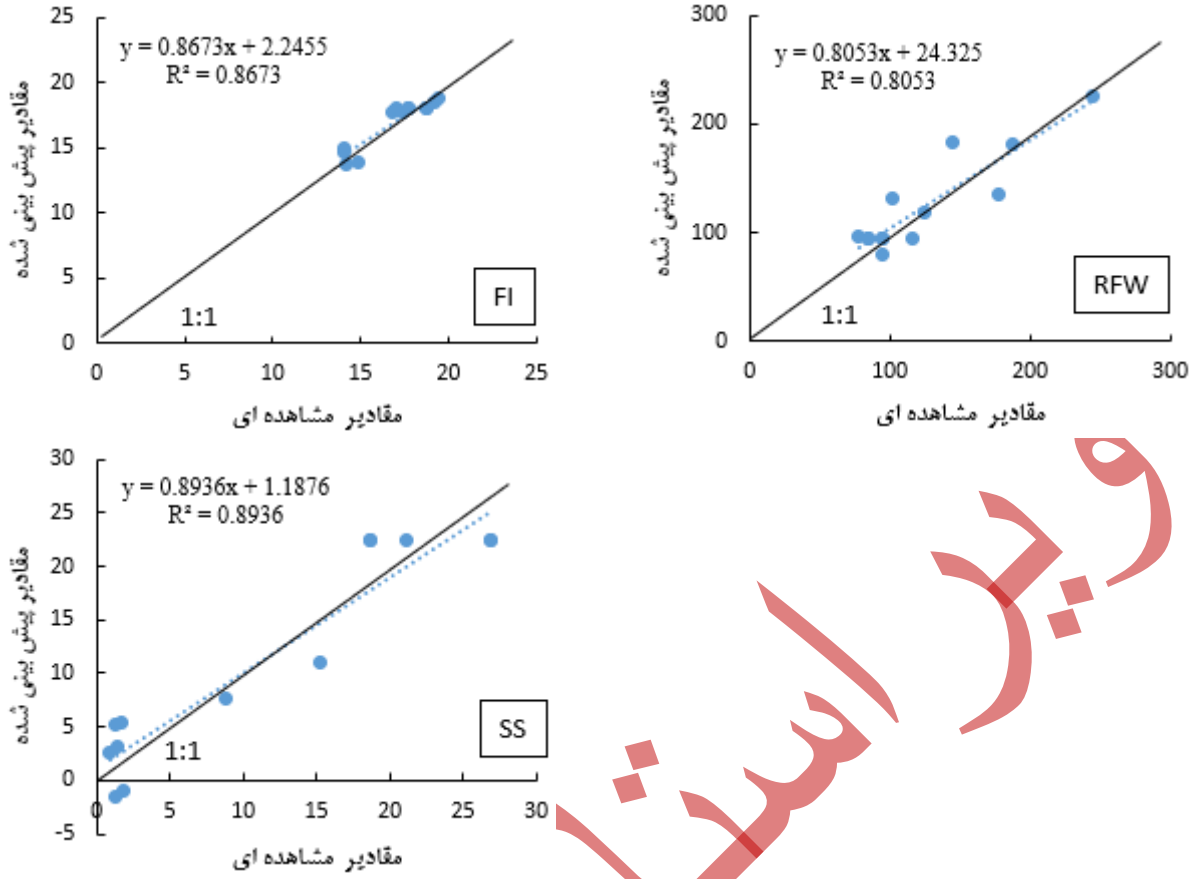
ویرایشی نشده

وزن علوفه تر	۱۸۲۴/۰	۳۰۱/۱	-۴۰۹/۳	۹۵۹/۹	۲۹۴/۹	-۲۴۷/۵
وزن ریشه تر	۹۴/۴	۳۸/۲	-۱۳/۱	۳۸/۸	۱۰/۸	۱۳/۰
فیبر	۱۸/۰	-۰/۰۴	۰/۰۹	-۲/۰	۰/۳	۱/۴
قندهای محلول	۲۲/۴	۰/۲۱	-۱/۲	-۱۱/۸	-۶/۵	۰/۰۴

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعه کینوا

صفات	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
وزن علوفه خشک	۰/۰	۹۳/۱	۰/۱۳	۰/۹۹	۰/۹۹
وزن ریشه خشک	۰/۰	۹/۸	۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۹۹
حجم ریشه	۰/۰	۰/۹۰	۰/۱۴	۰/۹۸	۰/۹۹
وزن علوفه تر	۰/۰	۴۲/۲	۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۹۹
وزن ریشه تر	۰/۰	۲۱/۳	۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۹۹
فیبر	۰/۰	۰/۶۹	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹
قندهای محلول	۰/۰	۳/۲	۰/۲۹	۰/۹۵	۰/۹۸





شکل ۳- داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده پارامترهای مورد مطالعه و مقایسه‌ی خط ۱:۱ (ممتد) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده (خط منقطع) برای پارامترهای وزن علوفه خشک (BDW)، وزن ریشه خشک (RDW)، حجم ریشه (RV)، وزن علوفه تر (BFW)، وزن ریشه تر (RFW)، فیبر (FI) و قندهای محلول (SS)

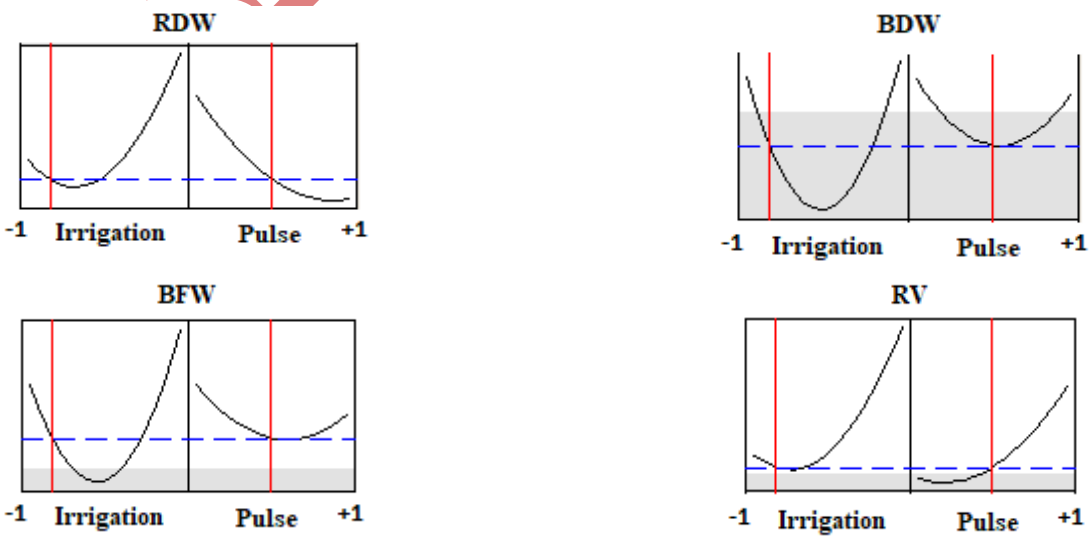
جدول ۶- نتایج t تست برای مقایسه شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهداتی)

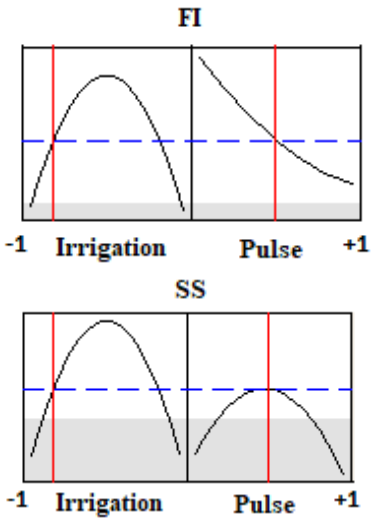
صفت	عرض از مبدا (a)		شیب (b)		t		فرض صفر
	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	a=0 b=1
وزن علوفه خشک	۱۳۱/۲	۱۰۳/۰	۰/۸	۰/۴	۶/۷	۰/۰	پذیرش
وزن ریشه خشک	۱۲/۶	۹/۸	۰/۷	۰/۱۵	۶/۴	۰/۰	پذیرش
حجم ریشه	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۹	۰/۰۹	۱۰/۵	۰/۰	پذیرش
وزن علوفه تر	۵۳۱/۱	۴۱۶/۶	۰/۷	۰/۱۵	۶/۵	۰/۰	پذیرش
وزن ریشه تر	۲۴/۳	۱۹/۴	۰/۸	۰/۱۴	۶/۸	۰/۰	پذیرش
فیبر	۲/۲	۲/۰	۰/۸	۰/۱۱	۸/۴	۰/۰	پذیرش
قندهای محلول	۱/۱	۱/۵	۰/۸	۰/۱۰	۹/۶	۰/۰	پذیرش

واکنش پارامترها در شکل (۴) و سطح-پاسخ آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. پارامترهایی که برای سطح-پاسخ انتخاب شدند، به دو دسته‌ی پارامترهای کمی شامل وزن خشک و تر علوفه، وزن خشک و تر ریشه و حجم ریشه و پارامترهای کیفی شامل فیبر و قندهای محلول تقسیم می شوند. تغییر نمودارها از کد ۱- به کد ۱+ نشان دهنده‌ی افزایش مقدار آب آبیاری و کاهش پالس‌های آب شور در طی دوره رشد کینوا است. بنابراین، تغییر وزن خشک و تر علوفه نسبت به مقدار آب آبیاری به صورت سهمی بود. در واقع، افزایش آب آبیاری از مقدار ۶۰ به حدود ۸۰ در صد نیاز آبی، سبب کاهش وزن خ شک و تر علوفه کینوا شد. مطالعات مختلفی در خ صوص اثر تنش آبی بر کاهش عملکرد کینوا گزارش شده ا ست که از جمله آن‌ها می‌توان به Elewa et al.(2017) و توراج‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) ا شاره کرد. نتایج پژوهش حا ضر در شرایط تنش ملایم (۸۰ در صد نیاز آبی) با مطالعات این محققان مطابقت دا شت ولی افزایش عملکرد علوفه در شرایط تنش شدید (۶۰ درصد نیاز آبی) تاکنون در مطالعات سایر محققان دیده نشده است. علت آن را می‌توان رقم کینوای علوفه‌ای مورد

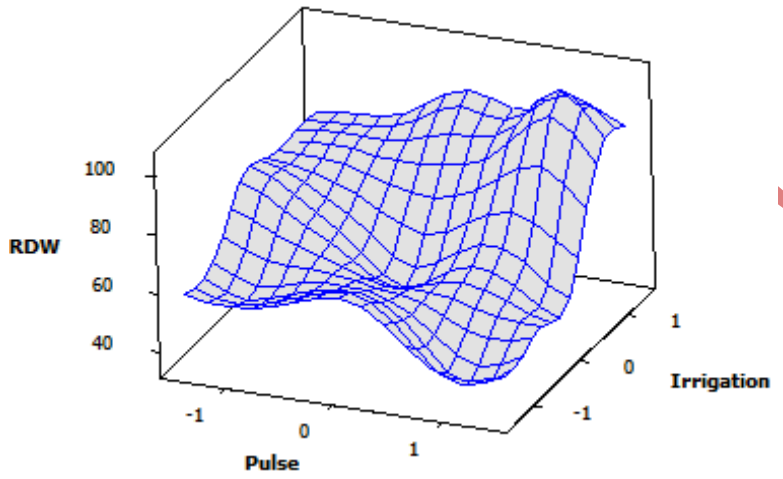
ویراستاری شده

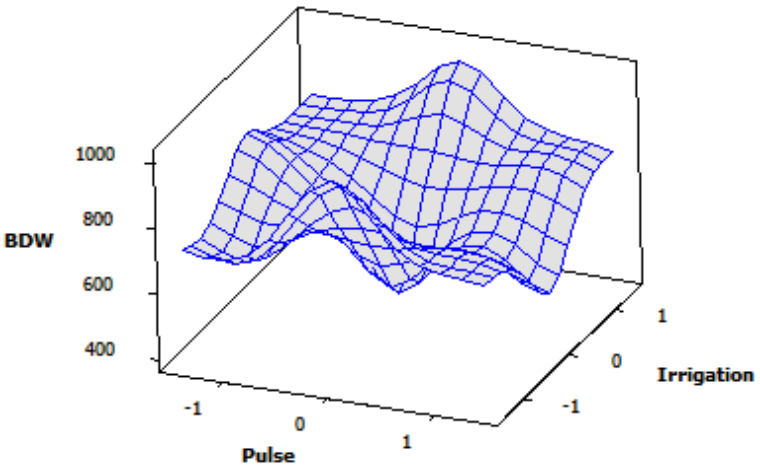
مطالعه در نظر گرفت. تغییرات وزن خشک و تر علوفه نسبت به پالس‌های شوری نیز مشابه مقدار آب آبیاری بود. با کاهش مقدار شوری وزن خشک و تر علوفه اندکی کاهش یافت. زمانی که هر سه پالس آبیاری با آب شیرین (EC=0.5 dS.m^{-1}) انجام شد؛ مجددا وزن خشک و تر علوفه افزایش یافت. گرچه ح سا سیت تغییر وزن خ شک و تر علوفه در پالس‌های شوری کمتر از مقدار آب آبیاری بود. بنابراین، اثر تغییر مقدار آب آبیاری بر وزن خشک و تر علوفه بسیار بیشتر از شوری آب آبیاری به دست آمد. این نتایج با مطالعات توراج‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) مطابقت داشت. این محققان نیز با بررسی همزمان تنش آبی و شوری روی گیاه کینوا، گزارش کردند که این گیاه نسبت به تنش شوری نسبتاً مقاوم است. البته تیمار شوری که این محققان استفاده کردند حداکثر ۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. با افزایش مقدار آب آبیاری، وزن خشک و تر ریشه افزایش یافت. زیرا با تأمین مقدار آب کافی، ریشه رشد بیشتری داشته و وزن آن نیز افزایش یافته است. لیکن، با کاهش مقدار شـوری آب آبیاری، وزن خشـک و تر ریشـه کاهش یافتند. با این وجود، حجم ریشـه در شـرایط افزایش مقدار آب آبیاری و کاهش شوری آن، روند افزایشی داشت. علت آن، حذف محدودیت‌های تنش آبی و شوری برای گسترش ریشه در خاک است که بدیهی است. مقدار فیبر در شرایط تنش آبی و تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی در کمترین مقدار خود قرار داشت. در شرایطی که تنش آبی نزدیک به ۸۰ درصد نیاز آبی بود؛ بیشترین مقدار فیبر به دست آمد. لیکن، افزایش تنش شوری باعث افزایش مقدار فیبر شد و در شرایطی که هر سه پالس آبیاری با آب شیرین (EC=0.5 dS.m^{-1}) تأمین شد؛ مقدار فیبر در کمترین مقدار به د ست آمد. بی شترین مقدار قندهای محلول در کفایت آبیاری ۸۰ در صد برای مقدار و شوری آب آبیاری به د ست آمد. قندهای محلول در شدت‌های متو سط تنش، افزایش دا شته و با شدیدتر شدن تنش خشکی مقدار آن شروع به کاهش می‌کند. دلیل افزایش اولیه برای بالا بردن مقاومت گیاه به‌دلیل تنظیم فشار اسمزی بوده، ولی با شدیدتر شدن تنش، تولید قندها به شدت کاهش پیدا می‌کند. که این امر به‌دلیل مصرف قندها در سنتز پرولین در اندام‌های هوایی باشـد (Subbaro et al., 2000). شـوری آب آبیاری باعث افزایش مقدار قندهای محلول شـد. یکی از معمول‌ترین واکنش‌های گیاهان در برابر تنش محیطی تنظیم ا سمزی ا ست. تجمع یافتن قند در اندام‌های گیاه و کاهش نشا سته در آن‌ها، با تخریب مولکول‌های درشت و برقراری تورژسانس اتفاق می‌افتد که درنتیجه آن مولکول‌های نشاسته طی چند مرحله به فروکتوز شکسته شده و موجب منفی‌تر شدن پتانسیل آب در سلول‌ها و تنظیم اسمزی می‌شود (Kumar et al., 2007). افزایش مقدار قند محلول به‌عنوان واکنش برای تنظیم اسمزی در شرایط تنش می‌باشد (Ahmadi and Niazi Ardekani, 2006). افزایش قند همچنین یک پاسخ نسبت به تغیرات پتانسیل محتوای نسبی آب و پتانسیل آب برگ می‌باشد، زیرا با افزایش سطح قندهای محلول به سبب بهبود وضعیت آب برگ در القای تحمل به شوری نقش مهمی داشته و می‌تواند از کاهش شدید میزان پتانسیل آب و محتوی نسبی آب برگ جلوگیری کند. با افزایش شوری به ۶ دسی‌زیمنس مقدار قند کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن کاهش فتوسنتز در نتیجه کاهش آب و آماس سلولی و بسته شدن روزنه‌ها می‌باشد (Chinnusamy and Jagendorf, 2005). تأمین کامل نیاز آبی با آب شـیرین (EC=0.5 dS.m^{-1}) نیز سـبب کاهش مقدار قند محلول می‌شود. گرچه حساسیت تغییرات قند محلول در علوفه در شرایط تنش آبی بسیار بیشتر از تنش شوری بود.

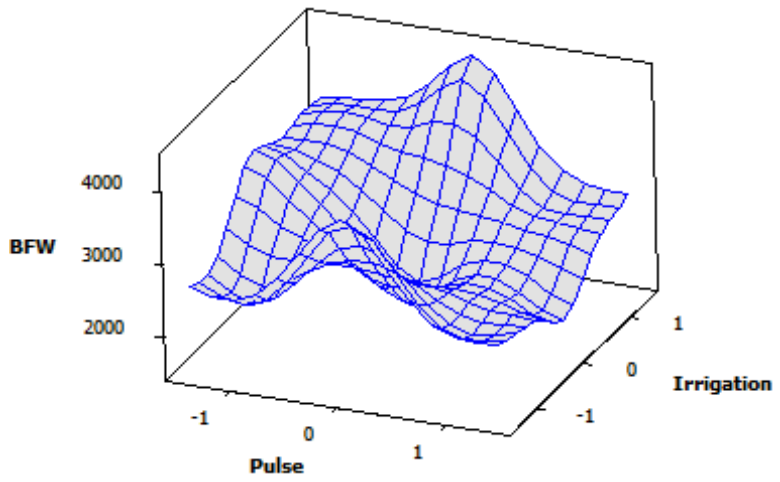


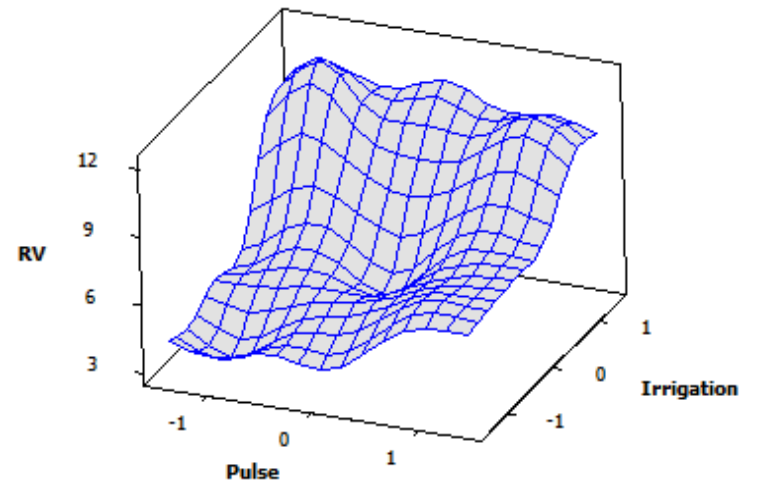


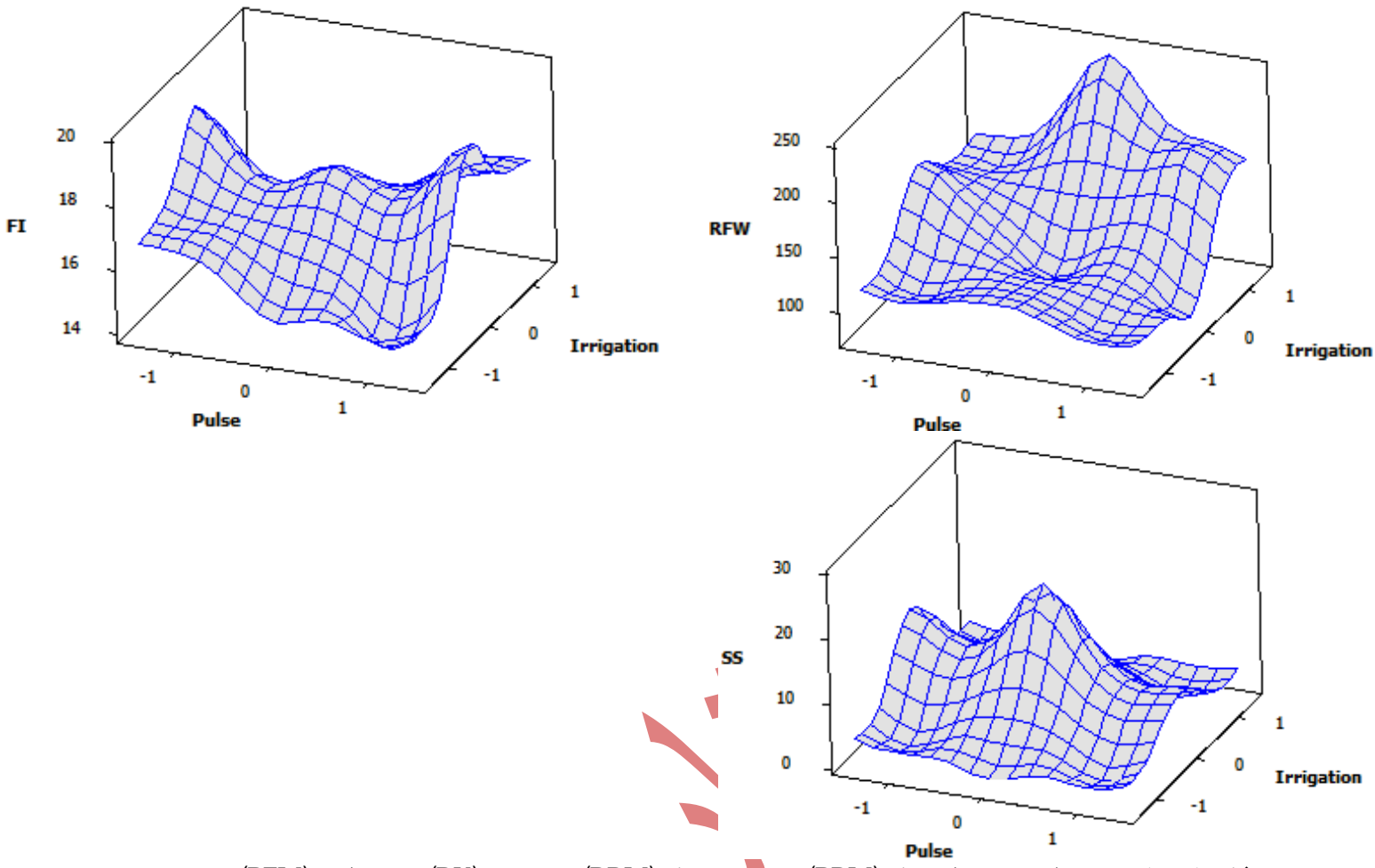
شکل ۴- واکنش پارامترهای وزن علوفه خشک (BDW)، وزن ریشه خشک (RDW)، حجم ریشه (RV)، وزن علوفه تر (BFW)، وزن ریشه تر (RFW)، فیبر (FI) و قندهای محلول (SS)







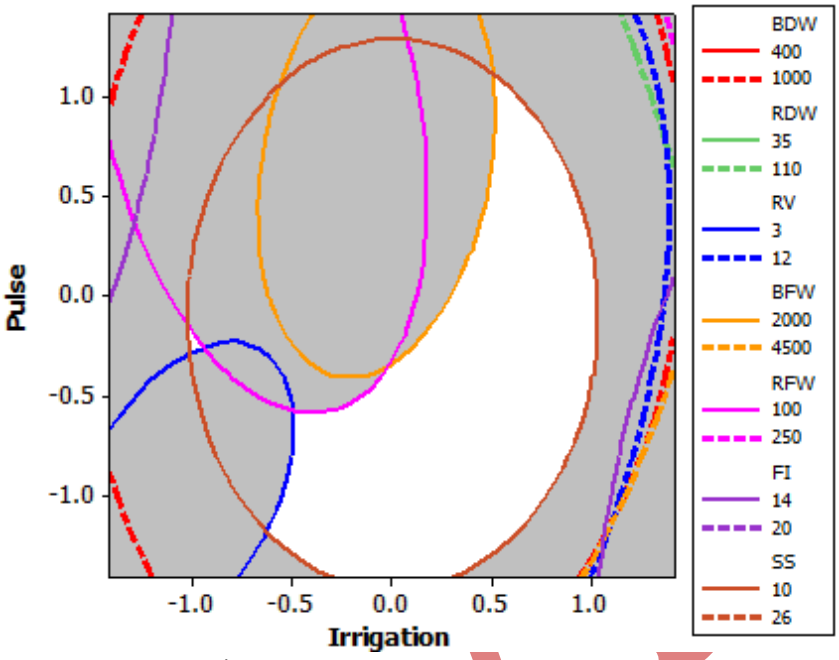




شکل ۵- سطح پاسخ صفات وزن علوفه خشک (BDW)، وزن ریشه خشک (RDW)، حجم ریشه (RV)، وزن علوفه تر (BFW)، وزن ریشه تر (RFW)، فیبر (FI) و قندهای محلول (SS)

هر چقدر مقادیر پارامترهای مورد مطالعه بالاتر باشد، نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر کینوا و کاربرد مناسب مقدار و شوری آب آبیاری است. در واقع، با افزایش خصوصیات کمی ریشه، وزن خشک و تر علوفه هم افزایش می‌یابد. از طرفی، این روند برای پارامترهای کیفی دیده نمی شود زیرا روند مستقیمی بین افزایش پارامترهای کیفی و کمی دیده نشد. به همین دلیل، همپوشانی لایه‌ها برا ساس شکل (۶) به دست آمد. سطح بهینه مقدار و شوری آب آبیاری با رنگ سفید نمایش داده شده است. در واقع، اگر مقدار آب آبیاری بین محدوده‌ی ۰/۳- تا ۰/۵+ و تنش شوری بین محدوده‌ی ۱- تا صفر در نظر گرفته شود؛ بهترین حالت برای دستیابی به مقادیر بهینه به دست می‌آید. البته، این محدوده ممکن به صورت همزمان سبب افزایش مقدار کلیه پارامترهای کمی و کیفی نشود. به همین دلیل، بهینه سازی عددی برای تعیین حدود بهینه انجام شد (جدول ۷). با توجه به اینکه صفات کیفی همانند صفات کمی در این مطالعه حائز اهمیت بودند؛ وزن آن‌ها در بهینه‌سازی برابر با عملکرد خشک و تر علوفه در نظر گرفته شدند. وزن سایر پارامترها ۵۰ درصد کاهش یافتند چون اهمیت کمتری نسبت به پارامترهای عملکرد و کیفیت علوفه داشتند. براساس نتایج به دست آمده، وزن خشک علوفه در حالت بهینه به ۶۸۴۵/۷ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت. این مقدار حدود ۴۳ درصد کمتر از بیشترین مقدار علوفه برداشت شده در مزرعه و برابر با میانگین وزن علوفه خشک به دست آمده در این پژوهش است. وزن تر علوفه نیز به ۲۴۸۲۷/۹ کیلوگرم در هکتار نسبت به مقدار هدف کاهش داشت. این مقدار نزدیک به متوسط عملکرد علوفه تر به دست آمده در پژوهش است. با این وجود، مقدار فیبر به ۱۵/۹ درصد رسید. درصد فیبر به دست آمده در مزرعه تحقیقاتی بین ۱۹-۱۴ درصد بود و درصد بهینه فیبر حدود ۵ درصد از متوسط درصد فیبر کمتر بود. مقدار قندهای محلول در علوفه به ۱۰/۴ درصد رسید که نسبت به مقدار هدف حدود ۴ درصد بیشتر بود. وزن خشک و تر ریشه نیز به ترتیب ۴۵/۰ و ۹۴/۹ گرم محاسبه شدند که نسبت به مقادیر هدف به ترتیب ۵۵ و ۶۱ درصد کمتر بودند. مقادیر بهینه آب آبیاری برابر با ۶۰ درصد نیاز آبی و کد روش پالسی برابر با صفر به دست آمد. در واقع اگر روش آبیاری پالسی به صورت آب شیرین-آب شور-آب شیرین و با تأمین

۶۰ در صد نیاز آبی گیاه کینوا انجام شود؛ مقادیر بهینه جدول (۷) به د ست خواهند آمد. در غیر این صورت، تنها صفات کمی یا کیفی در بیشترین مقدار خود به دست خواهند آمد.



شکل ۶- نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته شامل صفات مورد مطالعه (سطح بهینه با رنگ سفید مشخص شده است)

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

انواع متغیرها	پارامترهای مرد بررسی	هدف	شبیه‌سازی شده	مقدار بهینه
متغیرهای وابسته	وزن علوفه خشک	۱۲۰۰	۶۸۴۵/۷	–
	وزن ریشه خشک	۱۰۰	۴۵/۰	–
	حجم ریشه	۱۲	۳/۴	–
	وزن علوفه تر	۴۵۰۰	۲۴۸۲۷/۹	–
	وزن ریشه تر	۲۴۴	۹۴/۹	–
	فیبر	۱۹	۱۵/۹	–
	قندهای محلول	۱۰	۱۰/۴	–
متغیرهای مستقل	مقدار آب آبیاری (درصد نیاز آبی)	–	–	۶۰
	کد روش پالسی (-)	–	–	۰

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، استفاده از آب‌های نامتعارف شور و لب‌شور، زه‌آب‌های کشاورزی و پساب‌های شهری و صنعتی در کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. باید توجه داشت برای استفاده از آب‌های شور در کشاورزی حدود بهینه شوری و مقدار آب آبیاری تعیین گردد. یکی از معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای بهینه‌سازی این عوامل و تخمین مدل رگرسیون درجه دوم، طرح مرکب مرکزی است. این طرح روشی جایگزین و مناسب برای طرح فاکتوریل است. مزیت استفاده از طرح مرکب مرکزی نسبت به آزمایشات فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش می‌باشد که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند، همچنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد. لذا در این پژوهش، بهینه‌سازی خصوصیات کمی و کیفی کینوای رقم ساجاما تحت مقادیر مختلف مقدار و شوری آب آبیاری با استفاده از این روش انجام شد. نتایج نشان داد که تنها صفات وزن خشک و تر علوفه، وزن خشک و تر ریشه، حجم ریشه، مقدار فیبر و قندهای محلول قابلیت استفاده در روش سطح-پاسخ را دارند. بنابراین مدل رگرسیونی برای اجرای این روش به دست آمد. نتایج نشان داد که این مدل رگرسیونی از نظر کارایی (EF>0.9)، خطا (MBE≈0)، دقت (NRMSE<0.3) و پیش‌بینی تغییرات پارامتر

ویرایش نشده

(R^2>79%) دارای مقادیر قابل قبول ا ست. بنابراین، نتایج واکنش و سطح–پا سخ پارامترها مورد برر سی قرار گرفت. تغییرات پارامترهای کمی و کیفی از روند مشابهی برخوردار نبود. به همین دلیل بهینه‌سازی پارامترهای انجام شد. بهینه‌ترین حالت برای کلیه پارامترها زمانی به د ست آمد که مقدار آب آبیاری به میزان ۶۰ در صد نیاز آبی کینوا و به صورت آب شیرین–آب شور–آب شیرین در اختیار گیاه قرار گرفت. در این حالت، در صد فیبر و قندهای محلول به ترتیب ۱۵/۹ و ۱۰/۴ در صد به د ست آمدند. وزن خ شک و تر علوفه نیز به ترتیب ۶۸۴۵/۷ و ۲۴۸۲۷/۹ کیلوگرم بر هکتار بود. این مقادیر به متوسط وزن خشک و تر علوفه در مزرعه نزدیک بود. به همین دلیل کاهش عملکرد قابل توجهی از نظر اقتصادی ایجاد نشد. همچنین کیفیت علوفه از نظر قندهای محلول و فیبر نیز تضمین شد. با توجه به وجود چاه‌های آب شور و زه‌آب در استان خوزستان، از نتایج این تحقیق می‌توان برای استفاده بهینه از آب شور و زه‌آب در شرایط کم‌آبی استفاده کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837

منابع

احمدی، محسن؛ خاشعی سیوکی، عباس و سیاری زهان، محمد حسن. (۱۳۹۵). بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (Crocus sativus L.) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. *بوم شناسی*، ۸(۴-۴): ۵۰۵-۵۲۰.

توراج‌زاده، امیر؛ پیری، حلیمه؛ ناصرین، امیر و چاری، محمد حسین.(۱۴۰۳). بررسی تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحت کشت کینوا در شرایط تنش آبی و شوری. *آب و خاک*. ۳۸ (۱-۹۳): ۶۹-۸۵.

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

جهان، محسن؛ نصیری محلاتی، مهدی؛ خلیل زاده، حمیده، بیگناه، ریحانه و رضوی، سید احمدرضا. (۱۳۹۴). بهینه سازی کاربرد کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در زراعت گندم پاییزه (Triticum aestivum L.) با استفاده از روش سطح–پاسخ (RSM). *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*. ۱۳ (۴): ۸۲۳-۸۳۹.

حمید، زینب؛ سلطانی‌محمدی، امیر و احمدی، محسن. (۱۴۰۱). ارزیابی روش‌های فاکتوریل کامل، تاگوچی و طرح مربع مرکزی در کاهش آبشویی نیترات از خاک تحت تیمار زئولیت. *آبیاری و آب ایران*. ۱۳ (۱-۴۹): ۹۰-۱۰۷.

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

رجب‌زاده، فایزه و پذیرا، ابراهیم. (۱۴۰۱). مدیریت زهاب حاصل از آبیاری زراعت نیشکر در دشت خوزستان. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۹ (۱): ۱۱۹-۱۳۴.

رضوانی مقدم، پرویز؛ خرم‌دل، سرور؛ لطیفی، هدا؛ فرزانه بلگردی، محمودرضا و داورپناه، سیدجلیل. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی سطوح آبیاری و نیتروژن بر عملکرد، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن در گیاه کینوا (Chenopodium quinoa Willd.) با استفاده از مدل سازی سطح- پاسخ. *پژوهش‌های زراعی ایران*. ۱۹ (۲): ۱۸۵-۱۹۹.

گودرزی، فرناز؛ دل شاد، مجتبی؛ منصوری، حامد و سلطانی، فروزنده. (۱۴۰۰). بهینه سازی فاکتورهای‌کود نیتروژن و فاصله بوته روی ردیف در گیاه اسفناج رقم Harrier به روش سطح پاسخ. *علوم باغبانی ایران*. ۵۲ (۱): ۱۳۹-۱۵۱.

مختاران، علی؛ طاوسی، مهرزاد؛ ورجاوند، پیمان و سپهری صادقیان، سالومه. (۱۳۹۹). بررسی اثرات استفاده از زهاب مزارع نیشکر جنوب خوزستان در کشت گیاه کینوا بر عملکرد محصول و تغییرات شوری و سدیمی خاک. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۴ (۳): ۳۳۷-۳۵۴.

منصوری، حامد؛ نو شاد، حمید و حسنی، مهدی. ۱۴۰۰. بهینه سازی مصرف کود نیتروژن و آب در چغندرقند (Beta vulgaris L.) با استفاده از مدل‌سازی سطح–پاسخ. *نشریه بوم‌شناسی کشاورزی*. ۱۳ (۱): ۵۷-۷۲.

یعقوب‌زاده، مصطفی؛ احمدی، محسن؛ برومندنسب، سعید و حقایقی‌مقدم، سید ابوالقاسم. (۱۳۹۵). اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر– تعرق در طی دوره رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل‌های AOGCM. *پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)*. ۱۳۹۵. ۳۰(۴): ۵۲۳-۵۱۱.

ویرایشی نشده

یعقوب‌زاده، مصطفی؛ احمدی، محسن؛ سیدکابلی، حسام؛ زمانی، غلامرضا و امیرآبادی‌زاده، مهدی. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص‌های ETDI و SPI. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۲۴(۴): ۳۴-۶۱.

REFERENCE

Ahmadee, M., Khashei-Siuki, A., & Sayyari Zahan, 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. (in Persian)

Ahmadi, S. H., & Ardekani, J. N. (2006). The effect of water salinity on growth and physiological stages of eight Canola (Brassica napus) cultivars. *Irrigation Science*, *25*, 11-20.

Aslan, N. E. V. Z. A. T. (2008). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. *Powder Technology*, *185*(1), 80-86.

Box, G.E. and Hunter, J.S., 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*, pp.195-241.

Box, G. E. P. and Wilson, K. B. 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). 13: 1–45.

Chinnusamy, V., Jagendorf, A., & Zhu, J. K. (2005). Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop science*, *45*(2), 437-448.

DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, *28*(3), 350-356.

Elewa, T. A., Sadak, M. S., & Saad, A. M. (2017). Proline treatment improves physiological responses in quinoa plants under drought stress. *Bioscience Research*, *14*(1), 21-33.

FAO. 2014. Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome.

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

Hamid, Z., Soltani Mohammadi, A., & Ahmadee, M. (2022). Evaluation of Full Factorial, Taguchi and Central Composite Design Methods in Reducing Nitrate Leaching from Soil under Zeolite Treatment. *Irrigation and Water Engineering*, *13*(1), 90-107. (in Persian)

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

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. (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 Condition on Some Agroecological Characteristics of Zea Mays Using Response Surface Methodology. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *14*(4), 746-764. (in Persian)

Kalavathy, H.M., Regupathib, I., Pillai, M.G., & Miranda, L.R., (2009). Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H 3 PO 4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 70: 35–45.

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. (in Persian)

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

Kumar, V., Shiram, V., Jawali, N., and Shitole, M.G. 2007. Differential response of indica rice genotypes to NaCl stress in relation to physiological and biochemical parameters. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2:581-592.

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.

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

Mansouri, H., Bannayan, M., Rezvani Moghaddam, P., and Lakzian, A., 2015. Management of nitrogen, irrigation, and planting density in Persian shallot (Allium hirtifolium) by using central composite optimizing method. *Agricultural Science and Sustainable Production*. 24(4): 41-60.

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

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. (in Persian)

Masri, M.I., Ramadan, B.S.B., El-Shafai, A.M.A., and El-Kady, M.S., 2015. Effect of water stress and fertilization on yield and quality of sugar beet under drip and sprinkler irrigation systems in sandy soil. *International Journal of Agriculture Sciences*. 5(3): 414-425.

Mazumdar, D., Saha, Sh. P., Ghosh, Sh. 2021. RSM based optimization of plant growth promoting rhizobacteria and nitrogen dosage for enhanced growth and yield of mustard (Brassica campestris L.), *Pant Nutrition*, 44 (15): 2228-2244.

Mokhtaran, A., tavoosi, M., Varjavand, P., & Sepehri Sadeghian, S. (2020). Investigation of the Eeffects of Sugarcane Drainage Water for Quinoa Cultivation in Southern Khuzestanon on Crop Yield and Soil Salinity and Sodictiy Changes. *Journal of Water Research in Agriculture*, *34*(3), 337-354. (in Persian)

Montgomery, D.C. 2001. Design and Analysis of Experiments, fifth ed., John Wiley & Sons, New York. 734 p.

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

Piri, H., & Naserin, A. (2022). Comparison of different irrigation methods for onion by means of water and nitrogen response functions. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *97*(1), 122-136.

Rajabzadeh, F., & pazira, E. (2022). Management of drainage waters from sugarcane cultivation in Khuzestan plain. *Water Management in Agriculture*, *9*(1), 119-134. (in Persian)

Rezvani Moghaddam, P., Khorramdel, S., Latifi, H., Farzaneh Belgerdi, M. R., & Davarpanah, S. J. (2021). Optimization of Irrigation and Nitrogen Levels on Yield, Water Use Efficiency, and Nitrogen Use Efficiency of Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) by Using the Surface-Response Methodology. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *19*(2), 185-199. (in Persian)

Subbaro, G., Nam, N.H., chauhan, Y.S. and johansen, C., 2000. Oosmotic adjustment, water relation and carbohydrate remobilization in pigeonpea under water deficits. *Journal of plant physiology*, 157: 651- 659.

Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & Chari, M. M. (2024). Investigation of the Effect of Biochar on the Physical and Chemical Properties of Soil under Quinoa Cultivation under Water and Salinity Stress Conditions. *Water & Soil*, *38*(1). (in Persian)

Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & Cahri, M. M. (2024). Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 217, 105564.

Van Soest, P. J., B. Robertson, & B. A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition *Journal of Dairy Science*. 74: 3583-3597.

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

Yaghoub Zadeh, M., Ahmadi, M., Boroomandnasab, S., & Haghayeghimoghaddam, S. A., (2016). Impact of Climate Change on Changing Trend of Evapotranspiration during the Growth Period of Irrigated and Rainfed Field Crops by AOGCM Models. *Journal of Water Research in Agriculture*, *30*(4), 511-523. (in Persian)

Yaghoub Zadeh, M., Ahmadi, M., Seyed Kaboli, H., Zamani, G. R., & Amir Abadi Zadeh, M. (2017). The evaluation of Effect of Climate Change on Agricultural Drought Using ETDI and SPI Indexes. *Journal of Water and Soil Conservation*, *24*(4), 43-61. (in Persian)

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

Determining the Optimal Irrigation Amount and Salinity in Quinoa (*Chenopodium quinoa*) by Surface-Response Method

Abstract

Introduction: Quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) has been introduced as one of the crops to ensure food security in the world, which can tolerate water and drought stress to some extent. However, the development of its cultivation in the conditions of water stress and drought in Khuzestan province should be based on determining the limits of irrigation water and determining the threshold of tolerance to salinity. There are many methods to optimize the parameters in agriculture and each one is used for specific purposes due to having weak points and strengths. The use of small data that can be collected in the field is one of the basic factors for choosing the optimization method in agriculture. The response surface method is known as one of the modern optimization methods and its application in the agricultural sector is expanding day by day.

Materials and Methods: To achieve this goal, the present research was conducted in a research farm located in Baghmalek city, in the east of Khuzestan province, at the longitude of 49 degrees and 51 minutes east and latitude of 31 degrees and 41 minutes north in the crop year of 2022-2023. In this research, the quinoa plant was grown under drip irrigation and pulsed. Irrigation adequacy of 60 to 100 percent of water requirement (codes -1 to +1) was done in different plots. Water salinity treatments were applied at two levels of 0.5 and 0.6 deci-siemens/meter. Thus, in the condition of no salinity stress (code +1), pulse irrigation was done with three pulses of fresh water. But in the condition of complete salinity stress (code -1), pulse irrigation was done in three pulses of salt water. Level-response method was used to determine the optimal limits of these parameters.

Results and Discussion: By increasing the quantitative characteristics of the root, the dry and wet weight of the fodder also increases. On the other hand, this trend is not seen for qualitative parameters because no direct trend was seen between the increase of qualitative and quantitative parameters. The optimal level of irrigation water quantity and salinity is displayed in white. In fact, if the amount of irrigation water is between -0.3 and +0.5 and the salinity stress is considered between -1 and zero; The best mode is obtained to achieve optimal values. Of course, this range may not simultaneously increase the value of all quantitative and qualitative parameters. Based on the obtained results, the dry weight of fodder decreased to 6845.7 kg/hectare in the optimal condition. This amount is about 43% less than the maximum amount of fodder harvested in the field and equal to the average weight of dry fodder obtained in this research. The fresh weight of fodder also decreased to 24827.9 kg per hectare compared to the target value. This value is close to the average yield of fodder obtained in the research. However, the amount of fiber reached 15.9%. The percentage of fiber obtained in the research farm was between 14-19%, and the optimal percentage of fiber was about 5% less than the average percentage of fiber. The amount of soluble sugars in fodder reached 10.4%, which was about 4% more than the target amount. The dry and wet weight of the roots were calculated as 0.45 and 94.9 grams, respectively, which were 55 and 61% lower than the target values, respectively. The optimal amount of irrigation water was equal to 60% of the water requirement and the pulse method code was equal to zero. In fact, if the pulse irrigation method is done in the form of fresh water-salt water-fresh water and by providing 60% of the water requirement of the quinoa plant; Optimal values will be obtained.

Keywords: Pulse Irrigation, Fiber Percentage, Quinoa Quality, Irrigation Adequacy

ویرایش شده