نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۷، خرداد - تیر ۱۴۰۲، ص. ۴۰۰-۳۸۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 17, Jun.-Jul. 2023, p. 387-400

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب در کشت سویا با استفاده از مدل سطح-پاسخ

اصلان اگدرنژاد[1*]، محمد مهدی نخجوانی مقدم[2]، سالومه سپهری صادقیان[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

چکیده

سویا یکی از گیاهان زراعی با ارزش از نظر تأمین نیاز غذایی کشور به شمار می‌رود و دارای مقادیر بالایی از پروتئین و روغن است. این گیاه نسبت به مقدار آب آبیاری حساس است. به همین دلیل تعیین دور آبیاری مناسب و کاربرد مواد جاذب رطوبت می‌تواند در ارتقای مدیریت آبیاری این گیاه و ارتقای بهره‌وری آب آبیاری مؤثر باشد. از این رو در پژوهش حاضر از روش سطح-پاسخ برای بهینه‌سازی دور مناسب آبیاری و میزان بهینه استفاده از مواد جاذب رطوبت در راستای نیل به مدیریت مناسب آبیاری محصول سویا استفاده شد. بدین منظور، پژوهشی در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو عامل دور آبیاری و مقدار کاربرد سوپرجاذب در کشت سویا در محل گلخانه تحقیقاتی موسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی در سال ۱۳۹۸ اجرا شد و نتایج حاصله از اعمال این تیمارها شامل دور آبیاری (با سطوح بالا و پایین به ترتیب ۴ و ۷ روز) و مقدار سوپرجاذب (با سطوح بالا و پایین به ترتیب ۳۰۰ و صفر کیلوگرم در هکتار) به عنوان ورودی های مدل سطح-پاسخ در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که مدل سطح پاسخ برای پیش‌بینی عملکرد روغن دچار خطای بیش‌برآوردی (MBE>0) و برای پیش‌بینی سایر پارامترهای عملکرد و اجزای عملکرد سویا دچار خطای کم‌برآوردی (MBE<0) گردید. دقت این مدل برای پیش‌بینی کلیه صفات عالی (NRMSE<0.1) و خطای آن قابل قبول (RMSE< 3%) بود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که عملکرد دانه، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، تعداد غلاف، ارتفاع بوته و بهره‌وری آب به ترتیب ۱۶۹، ۲۲۸، ۲۲۷، ۸۹، ۳۴ و ۱۳۱ درصد نسبت به متوسط مقادیر مشاهداتی این پارامترها بیشتر بود. در نهایت برای دستیابی به عملکرد و بهره‌وری آب بهینه، مصرف ۵۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر جاذب و دور آبیاری سه روز پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، بهینه‌سازی، عملکرد پروتئین، عملکرد روغن، سوپر جاذب

مقدمه

سویا (Glycine max L.) با داشتن ۲۰ درصد روغن و ۴۰ درصد پروتئین از لحاظ اقتصادی، صنعتی و تغذیه‌ای از جمله گیاهان با ارزش محسوب می‌شود (پیغامزاده و همکاران، ۱۴۰۱). به‌همین دلیل، سطح زیر کشت آن در جهان رو به افزایش است به‌طوری که کل سطح زیر کشت آن در جهان بیش از ۱۲۰ میلیون هکتار با تولید ۳۳۴ میلیون تن گزارش شده است (FAOSTAT, 2022). سطح زیر کشت این گیاه زراعی در ایران حدود ۲۹ هزار هکتار و تولید آن به‌طور متوسط ۶۸ هزار تن است (بی‌نام، ۱۴۰۱). گرچه میانگین عملکرد سویا در ایران بالاتر از میانگین جهانی است (پرچمی‌عراقی و همکاران، ۱۴۰۱) ولی اثرات منفی ناشی از کاهش آب در دسترس در آینده سبب تحت تأثیر قرار گرفتن عملکرد و سطح زیر کشت این گیاه در ایران خواهد شد. گرچه سویا در جهان عمدتاً به‌صورت دیم کشت می‌شود؛ لیکن در کشور ما فقط ۴/۸ هزار هکتار از این گیاه دیم است و مابقی سطوح زیر کشت به‌صورت آبی است (بی‌نام، ۱۴۰۱؛ پرچمی‌عراقی و همکاران، ۱۴۰۱). عملکرد سویا به‌میزان آب در دسترس وابستگی زیادی دارد (Singh, 2010). به‌همین دلیل کاهش دور آبیاری و استفاده از مواد سوپرجاذب به‌عنوان راهکارهای مفیدی برای ارتقای عملکرد و اجزای عملکرد این گیاه زراعی می‌تواند باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ میرعرب‌رضی و همکاران، ۱۳۹۶). تعیین مقادیر بهینه دور آبیاری و مواد سوپر جاذب می‌تواند منجر به‌دستیابی به‌عملکرد بهینه با در نظر گرفتن کلیه شرایط حاکم بر مزرعه گردد. ولی محدویت‌های اقتصادی و زمانی برای انجام طرح‌های آزمایشی متعدد در مزرعه وجود دارد. به همین دلیل لازم است از روش‌های

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: a_eigder@ymail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.2.15.1

غیرمستقیم و مدل‌های شبیه‌سازی استفاده کرد (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸).

استفاده از روش سطح-پاسخ یکی از روش‌های مناسب، سریع و پرکابرد برای بهینه‌سازی عوامل مختلف حاکم در هر آزمایش است. این روش دارای مبنای آماری بسیار پیچیده است (حمید و همکاران، ۱۴۰۱) و از مدل غیرخطی چند منظوره برای دستیابی به‌سطوح بهینه عوامل مختلف استفاده می‌کند (Aslan, 2007; Kwak, 2005; Zulkali et al., 2006; Kalavathy et al., 2009). در روش سطح-پاسخ ابتدا ترکیب مناسب تیمارهای مورد نظر توسط این مدل تعیین می‌شود. پس از آن، محقق باید داده‌های مورد نظر برای تیمارهای ارائه شده را به‌مدل معرفی کند. سپس بهترین برازش برای یک مدل آماری با فرض ترکیب به‌دست آمده از تیمارها ایجاد می‌شود. سپس شرایط بهینه برای کلیه متغیرهای مستقل محاسبه می‌شود. این شرایط براساس نزدیک کردن اختلاف بین متغیرهای وابسته به‌مقادیر بیشینه، کمینه یا هدف است (Montgomery, 2001; Kalacathy et al., 2009). این مدل دامنه‌ی وسیعی از معادلات و روش‌ها را شامل می‌شود و براساس هدف مورد نظر می‌بایست از روش‌های مختلف ارائه شده برای آن استفاده کرد. طرح مربع مرکزی یکی از روش‌های مرسوم برای این مدل است (حمید و همکاران، ۱۴۰۱؛ Wu and Hamada, 2009). این روش ابتدا توسط باکس و ویلسون مطرح گردید ولی شش سال بعد توسط باکس و هانتر اصلاح گردید (Box and Wilson, 1951; Box and Hunter, 1957). ابتدا، این روش برای کاهش زمان و هزینه‌ی طرح‌های آزمایشگاهی ارائه شد ولی با توجه به‌خصوصیات مطرح شده برای آن، در سال‌های اخیر جایگاه خوبی در بخش کشاورزی پیدا کرده است (خاشعی‌سیوکی و همکاران، ۱۳۹۷؛ حمید و همکاران، ۱۴۰۱). این روش معمولاً به‌جای طرح‌های آزمایشی فاکتوریل استفاده می‌گردد و سبب می‌شود تعداد تکرارها و تیمارها کاهش یابد. از طرفی، با استفاده از این روش امکان مطالعه و تحلیل بیشتری روی داده‌ها فراهم می‌گردد و می‌توان ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای مستقل در آزمایش را فراهم کرد (خاشعی‌سیوکی و همکاران، ۱۳۹۷؛Aslan, 2007).

کاربرد روش سطح-پاسخ در تولید پیاز نشان داد که با مصرف ۹۳ کیلوگرم کود نیتروژن و ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری بیشترین تولید و کمترین آلودگی زیست‌محیطی به‌دست می‌آید (Mansouri et al., 2014). استفاده از این مدل برای تولید کلزا با عوامل نیتروژن در محدوده‌ی ۴۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار، مقدار آب آبیاری در محدوده‌ی ۴۰۰۰-۱۵۰۰ مترمکعب در هکتار و تراکم گیاه در محدوده‌ی ۱۵۰-۵۰ بوته در مترمربع بررسی شد. نتایج نشان داد که برای دستیابی به‌حداکثر عملکرد استفاده از مقادیر ۹۲ کیلوگرم کود نیتروژن، ۲۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته در متر مربع باید رعایت شود (Koocheki et al., 2014). ترکیب بهینه میزان آب کاربردی و نیتروژن برای کشت سیب‌زمینی با استفاده از مدل سطح-پاسخ در دشت دهگلان کردستان بررسی شد و نتایج نشان داد که مقدار نیتروژن ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار عمق آب آبیاری ۲۸۷ میلی-متر بهترین عملکرد را دارد (Soltani M and Soltani, 2016). بهینه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از مدل سطح-پاسخ با عوامل کود نیتروژن (در محدوده‌ی ۳۰۰-۰ کیلوگرم بر هکتار)، فسفر (در محدوده‌ی ۲۰۰-۰ کیلوگرم بر هکتار) و دامی (در محدوده‌ی ۳۰-۰ تن در هکتار) نشان داد که با مصرف ۱۴۵/۴ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم فسفر و ۱۸/۴ تن کود دامی بیشترین عملکرد به‌دست آمد (Jahan and Amiri, 2018). استفاده از روش سطح-پاسخ در بهینه‌سازی عوامل سوپرجاذب در محدوده‌ی ۱۶۰-۸۰ کیلوگرم بر هکتار، اسیدهیومیک در محدوده‌ی ۸-۴ کیلوگرم در هکتار و آب آبیاری در محدوده‌ی ۱۰۰-۵۰ درصد نیاز آبی نشان داد که اگر سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آب آبیاری به ترتیب به میزان ۱۲۶/۰۶ کیلوگرم در هکتار، ۷/۱۹ کیلوگرم در هکتار و ۳۴۷/۴۷ مترمکعب در هکتار باشد؛ پارامترهای عملکرد و زیست‌توده به بیشترین مقدار خود می‌رسد (جهان و همکاران، ۱۳۹۵). استفاده از این مدل بهینه‌سازی برای تعیین بالاترین عملکرد چغندرقند تحت عوامل کود نیتروژن (در محدوده‌ی ۲۴۰-۰ کیلوگرم در هکتار) و آب آبیاری (در محدوده‌ی ۱۴۰۰۰-۸۰۰۰ مترمکعب در هکتار) نشان داد که در صورت کاربرد مقدار ۱۳۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰۶۷۷ مترمکعب در هکتار آب آبیاری، بیشترین عملکرد چغندرقند به‌دست می‌آید (منصوری و همکاران، ۱۴۰۰). بهینه‌سازی عملکرد اقتصادی اسفناج با عوامل کود نیتروژن (۴۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار) و فاصله‌ی بوته روی ردیف (در محدوده‌ی ۱۵-۷ سانتی‌متر) نشان داد که این هدف با اعمال ۱۸۹/۹ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن و رعایت فاصله‌ی ۷ سانتی‌متر بین بوته‌ها روی ردیف به‌دست می‌آید (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۰). بهینه‌سازی آبشویی کود نیترات با در نظر گرفتن عوامل مقدار زئولیت (در محدوده‌ی ۶-۰ درصد وزن خاک) و مقدار نیترات (در محدوده‌ی ۴۰۰-۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک) نشان داد که بهترین مقدار اقتصادی استفاده از زئولیت با اعمال دو درصد وزنی از این ماده سوپرجاذب تعیین می‌شود (حمید و همکاران، ۱۴۰۱).

براساس مرور منابع، روش سطح-پاسخ یکی از روش‌های مناسب برای بهینه‌سازی عوامل حاکم بر تولید محصولات کشاورزی است. از طرفی، با توجه به اهمیت استفاده از دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب بر عملکرد سویا، لازم است که مقادیر این عوامل در شرایط مزرعه بهینه‌سازی شود. این موضوع کمک می‌کند تا علاوه بر افزایش تولید سویا، میزان مصرف آب نیز به صورت بهینه باشد. لذا، هدف این تحقیق به عنوان نوآوری پژوهش نیز محسوب می‌شود. بنابراین، هدف

این پژوهش بهینه‌سازی دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب بر عملکرد و اجزای عملکرد سویا است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در محل گلخانه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی در سال ۱۳۹۸ انجام شد و دو عامل دور آبیاری (با سطوح بالا و پایین به‌ترتیب ۴ و ۷ روز) و مقدار سوپرجاذب (با سطوح بالا و پایین به‌ترتیب ۳۰۰ و صفر کیلوگرم در هکتار) مورد مطالعه قرار گرفت. برای اجرای آزمایش از لایسی‌مترهای بتنی با ابعاد ۲×۲×۲ متر استفاده شد. سوپرجاذب مورد استفاده از نوع آکواسورس بر پایه پتاسیم و فاقد ترکیبات آکریل آمید بود که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات کلی سوپرجاذب آکواسورس

حالت ظاهری	رطوبت (درصد)	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	pH	اندازه ذرات (میلی‌متر)	ظرفیت جذب آب (گرم بر گرم)
گرانول سفید	<٪۱۰	۰/۵	۷	۳	۱:۴۰۰

عملیات آماده‌سازی لایسی‌مترها در اردیبهشت سال ۱۳۹۸ انجام و با نمونه‌گیری از خاک، میزان نیاز کودی آن‌ها به‌توصیه آزمایشگاه خاک تعیین شد (جدول ۲). کاشت بذور سویا در تاریخ ۳۰ اردیبهشت انجام شد. این بذور روی خطوط به‌صورت کپه‌ای به‌فاصله‌ی پنج سانتی‌متر و با فاصله ردیف ۶۰ سانتی‌متر کشت شد. آبیاری بلافاصله پس از کاشت صورت گرفت و تا مرحله‌ی پنج برگی شدن گیاه، همه‌ی لایسی‌مترها به یک اندازه آبیاری شدند. در طول فصل رشد بارشی صورت نگرفت. مقدار آبیاری براساس دور آبیاری و تعیین رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج PMS 714 انجام گردید. مهار علف‌های هرز به‌صورت دستی در طول دوره رشد صورت می‌گرفت. در انتهای فصل رشد، ده بوته از دو خط میانی هر کرت به‌طور تصادفی برداشت و صفات ارتفاع بوته، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، عملکرد و زیست‌توده اندازه‌گیری گردید. بهره‌وری آب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$WP = \frac{Y}{W} \qquad (۱)$$

در این رابطه، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم) و W آب آبیاری (مترمکعب) است. عملکرد روغن و پروتئین نیز با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) و پس از محاسبه‌ی درصد روغن و پروتئین در آزمایشگاه توسط دستگاه اینفراماتیک مدل ۸۱۰۰ تعیین شد.

$$O = op \times Y \qquad (۲)$$

$$P = pp \times Y \qquad (۳)$$

در این روابط، G عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)، P عملکرد پروتئین (کیلوگرم در هکتار)، op درصد روغن، pp درصد پروتئین و Y عملکرد (کیلوگرم) است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

عمق	درصد ذرات			بافت خاک	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی دائم	وزن مخصوص ظاهری	pH	EC
Cm	رس	سیلت	شن	-	$cm^3.cm^{-3}$	$cm^3.cm^{-3}$	$g.cm^{-3}$	-	$dS.m^{-1}$
۰-۳۰	۳۰	۴۲	۲۸	لوم‌رسی	۲۱	۱۷	۱/۴	۷/۷	۱/۴
۳۰-۶۰	۳۴	۴۲	۲۴	لوم‌رسی	۲۱	۱۷	۱/۴	۷/۸	۱/۲

در ادامه از روش سطح-پاسخ برای بهینه‌سازی دو عامل دور آبیاری و میزان استفاده از سوپرجاذب برای حصول حداکثر عملکرد و بهره‌وری آب استفاده شد. روش سطح پاسخ به‌صورت تابعی چند متغیره مطابق رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود (Kalavathy et al., 2009).

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_k) \qquad (۴)$$

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

$$2^k + 2k + r \qquad (۵)$$

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

$$2^2 + 2 \times 2 + 3 = 11 \qquad (۶)$$

جدول ۳-کد ضرایب و مقدار واقعی متغیرهای مستقل

کد ضرایب		مقدار آزمایش	
دور آبیاری	مقدار سوپرجاذب	دور آبیاری (روز)	مقدار سوپرجاذب (کیلوگرم در هکتار)
۰	۰	۵	۲۰۰
۱	۱	۴	۳۰۰
۰	۰	۵	۲۰۰
۰	۰	۵	۲۰۰
۰	۰	۵	۲۰۰
−۱	−۱	۷	۰
۱	۱	۴	۳۰۰
۰	۰	۵	۲۰۰
−۱	−۱	۷	۰
۰	۰	۵	۲۰۰
−۱	−۱	۷	۰
۰	۰	۵	۲۰۰

جهت برازش داده‌ها از رگرسیون چند متغیره با افـزودن جمـلات خطی، درجه دو و اثر متقابل بین عوامـل، بـرازش و براسـاس تجزیـه واریانس رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. معادلـه‌ی چنـد جملـه‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به‌شکل زیر است (Aslan, 2007).

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (۷)$$

در این رابطه، y متغیر وابسته، i خصوصیات کمی و کیفی سویا، a ضریب رابطه، x_1 متغیر مستقل دور آبیاری و x_2 متغیر مسـتقل مقـدار سوپرجاذب است. در نهایت، معنـی‌داری مـدل و دقـت آن در بـرازش داده‌ها مشخص گردید. به‌منظور ارزیابی و آزمـون معنـی‌داری آمـاری مدل به‌دست آمده، از تجزیه واریانس رگرسیونی استفاده گردید. بـرای مقایسه نتایج مدل به‌دست آمده با مقادیر مشاهداتی از آماره‌های جـذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میـانگین مربعـات نرمـال شـده (NRMSE)، میـانگین خطـای اریـب (MBE)، کـارایی مـدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) به صورت زیر استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۸)$$

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

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۱۰)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۱)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۱۲)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۳)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شـده، O_i مقـدار انـدازه‌گیـری شـده، $\overline{P}$ میـانگین مقـادیر شـبیه‌سـازی شـده، $\overline{O}$ میـانگین مقـادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. آماره‌هـای RMSE و NEMSE به ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل است. مقـدار آمـاره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیـک‌تـر باشـد بهتـر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقـت عالی مدل است. هم چنین مقادیر این آمـاره در بـازه‌هـای ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنـده ایـن اسـت کـه مقدار شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد صـفات مـورد مطالعـه عـدد کوچکتری به دست داده است. مقادیر آماره‌هایEF و d نشـان‌دهنـده کارایی مدل است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تـر باشـند بهتـر است. آماره R^2 نشان دهنده قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات بـه وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشـد نشـان‌دهنـده بـرازش بهتـر داده‌هـا

می‌باشد. برازش رگرسیون بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و مقایسه‌ی آن با خط ۱:۱ یکی از روش‌های اعتبارسنجی مدل‌ها به شمار می‌رود. اگر شیب خط رگرسیون برابر با یک باشد بر خط ۱:۱ منطبق می‌گردد. 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 ۱:۱، از دقت مدل کاسته می‌شود. برای ارزیابی خط رگرسیون از رابطه‌ی زیر و آزمون t استفاده شد.

$$\Pr edicted = a + (b \times Observed) \qquad (۱۴)$$

در این رابطه، b=1 به عنوان فرض صفر (H0) و b≠1 به عنوان فرض یک (H1) در آزمون t مد نظر قرار گرفتند. برای ارزیابی عرض از مبدا دو خط a=0 به عنوان فرض صفر (H0) و a≠0 به عنوان فرض یک (H1) در نظر گرفته شد. در واقع در صورت رد شدن فرض صفر، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد.

نتایج و بحث

قبل از اجرای مدل سطح-پاسخ، لازم است وضعیت داده‌ها در خصوص نرمال بودن و استقلال به‌ترتیب با استفاده از دو آزمون کفایت داده‌ها و مقادیر برازنده شده[1] بررسی شود. کفایت داده‌ها با بررسی بهترین خط برازش در پلات احتمالی نرمال[2] بررسی شد. نتایج نشان داد که کلیه صفات مورد بررسی در محدوده‌ی خط برازش بودند (شکل ۱). لذا، داده‌های برداشت شده کفایت لازم برای استفاده در آزمون سطح-پاسخ را داشتند. پراکندگی داده‌ها نیز نشان داد که بین باقیمانده‌ی داده‌های صفات سویا روند خاصی وجود نداشت. از این رو، واریانس بین داده‌ها ثابت بود و در نتیجه داده‌های مورد مطالعه از استقلال برخوردار بودند. بنابراین، استفاده از این داده‌ها در مدل سطح-پاسخ مانعی نداشت.

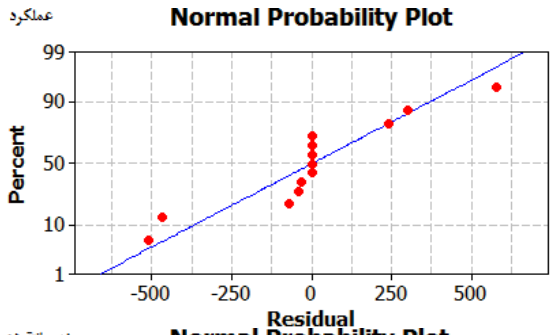
نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی در جدول (۴) نشان داده‌شده است. براساس این نتایج، مدل رگرسیونی برای صفات عملکرد دانه، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، تعداد غلاف، ارتفاع بوته و بهره‌وری آب در سطح احتمال یک درصد (P-value≤0.01) و برای صفات زیست‌توده و وزن هزار دانه در سطح احتمال پنج درصد (P-value≤0.05) معنی‌دار بود. رگرسیون درجه دو، براساس رابطه‌ی (۷)، برای صفات عملکرد دانه، وزن هزار دانه، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، تعداد غلاف، ارتفاع بوته و بهره‌وری آب در سطح احتمال یک درصد (P-value≤0.01) معنی‌دار بود. بنابراین برای این صفات می‌توان از مدل سطح-پاسخ استفاده کرد. این نتایج با مشاهدات سایر محققان از جمله منصوری و همکاران (۱۴۰۰) و احمدی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت داشت.

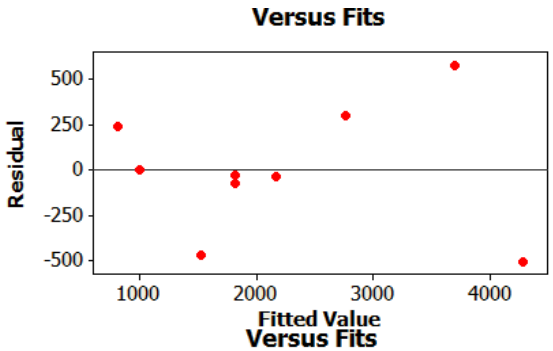
مقادیر پارامترهای ثابت رگرسیون درجه دو، که در رابطه ۷ معرفی شد، در جدول (۵) نشان داده‌شده است. با استفاده از این پارامترها مقادیر صفات مورد مطالعه پیش‌بینی شد. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده و مشاهداتی نشان داد که این مدل رگرسیونی برای عملکرد روغن دچار خطا بیش‌برآوردی (MBE>0) و برای سایر صفات دچار خطا کم‌برآوردی (MBE<0) شد. گرچه خطا کم‌برآوردی برای کلیه صفات قابل‌قبول بود. مقدار آماره RMSE برای عملکرد دانه برابر با ۷۵/۹ کیلوگرم بر هکتار بود که با توجه به‌متوسط عملکرد سویا (۱۸۳۸ کیلوگرم بر هکتار) قابل‌قبول بود. آماره RMSE برای عملکرد روغن و پروتئین به‌ترتیب ۱۹/۶ و ۲۵/۴ کیلوگرم بر هکتار بود که نسبت به‌متوسط مقادیر این دو صفت (به‌ترتیب ۴۲۳ و ۶۶۰ کیلوگرم بر هکتار) قابل‌قبول است. آماره RMSE برای صفات تعداد غلاف و ارتفاع بوته نیز به‌ترتیب ۱/۸ و ۱/۱ بود که مقادیر ناچیزی است. این آماره برای بهره‌وری آب حدود ۰/۰۸ بود که این خطا نیز قابل چشم‌پوشی است.

دقت مدل رگرسیونی براساس آماره NRMSE برای بهره‌وری آب در دسته متوسط (0.2<NRMSE<0.3) و برای سایر صفات در دسته عالی (NRMSE<0.1) قرار داشت. کارایی مدل رگرسیونی برای بهره‌وری آب براساس آماره d مطلوب و براساس آماره EF چندان رضایت‌بخش نبود. علت استفاده از دو آماره برای بررسی کارایی مدل نیز همین موضوع است تا بتوانند خطا یکدیگر را پوشش دهند. بنابراین، مدل رگرسیونی مورد مطالعه برای صفت بهره‌وری آب دارای خطا کم، دقت خوب و کارایی تقریباً مطلوب بود. این مدل برای سایر صفات نیز دارای کارایی مطلوب (d >0.90 و EF >0) بود. نتایج سایر محققان از جمله Mansouri et al (2021)، منصوری و Koocheki et al. (2014) نیز نشان داد که مدل رگرسیونی درجه دو برای پیش‌بینی صفات دارای خطا قابل چشم‌پوشی، دقت کافی و کارایی مطلوب بود. ضریب تبیین پارامترهای مورد بررسی نشان داد که مدل رگرسیونی توانایی پیش‌بینی بیش از ۸۵ درصد کلیه پارامترها به جز بهره‌وری آب را داشت. ضریب تبیین برای بهره‌وری آب حدود ۰/۳۲ بود. لیکن با توجه به آماره‌های جدول (۶)، این مدل دارای خطا کم و دقت خوب بود. علت پایین بودن ضریب تبیین برای این پارامتر عدم تغییر زیاد در کلیه تیمارها بود. زیرا عملکرد و مقدار آب مصرفی به‌صورت خطی روی این پارامتر موثر نیستند بلکه اثرات یکدیگر را کاهش می‌دهند. نتایج آزمون t برای مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده برای هر متغیر وابسته با خط ۱:۱ بررسی شد و نتایج آن نشان داد که شیب و خط برازش برای همه صفات قابل‌قبول بود (شکل ۲ و جدول ۷).

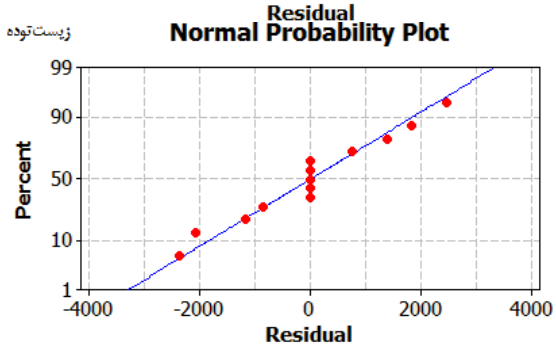
1- Fitted Value
2- Normal Probability Plot

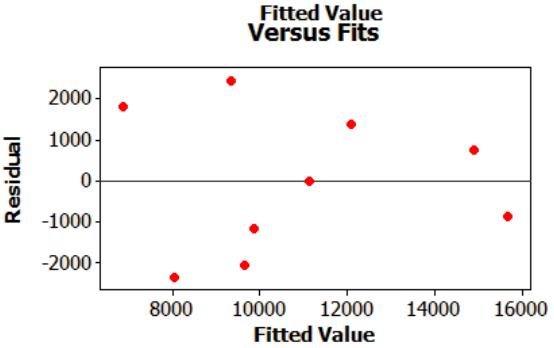
عملکرد



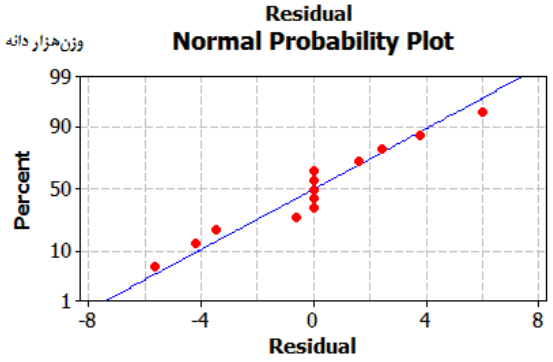


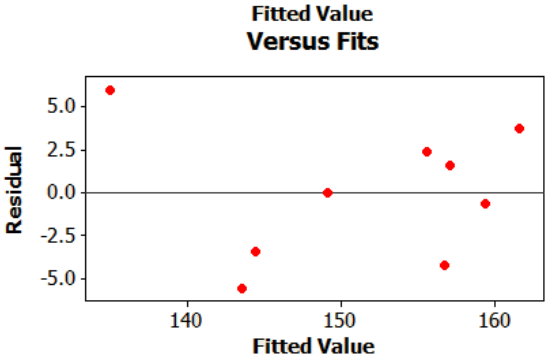
زیست‌توده



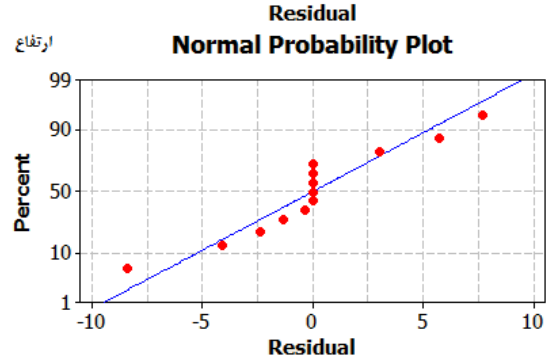


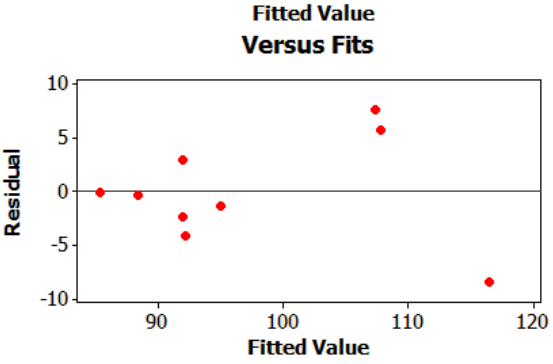
وزن‌هزار دانه



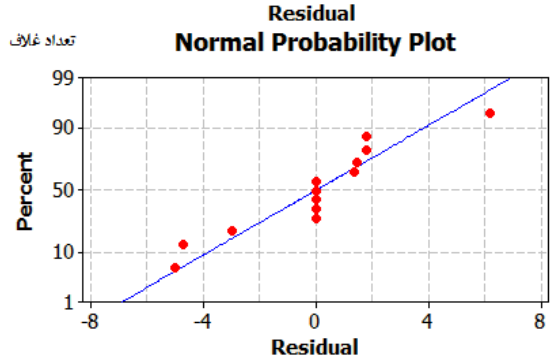


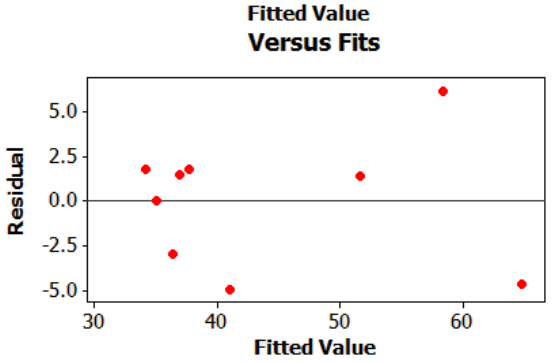
ارتفاع

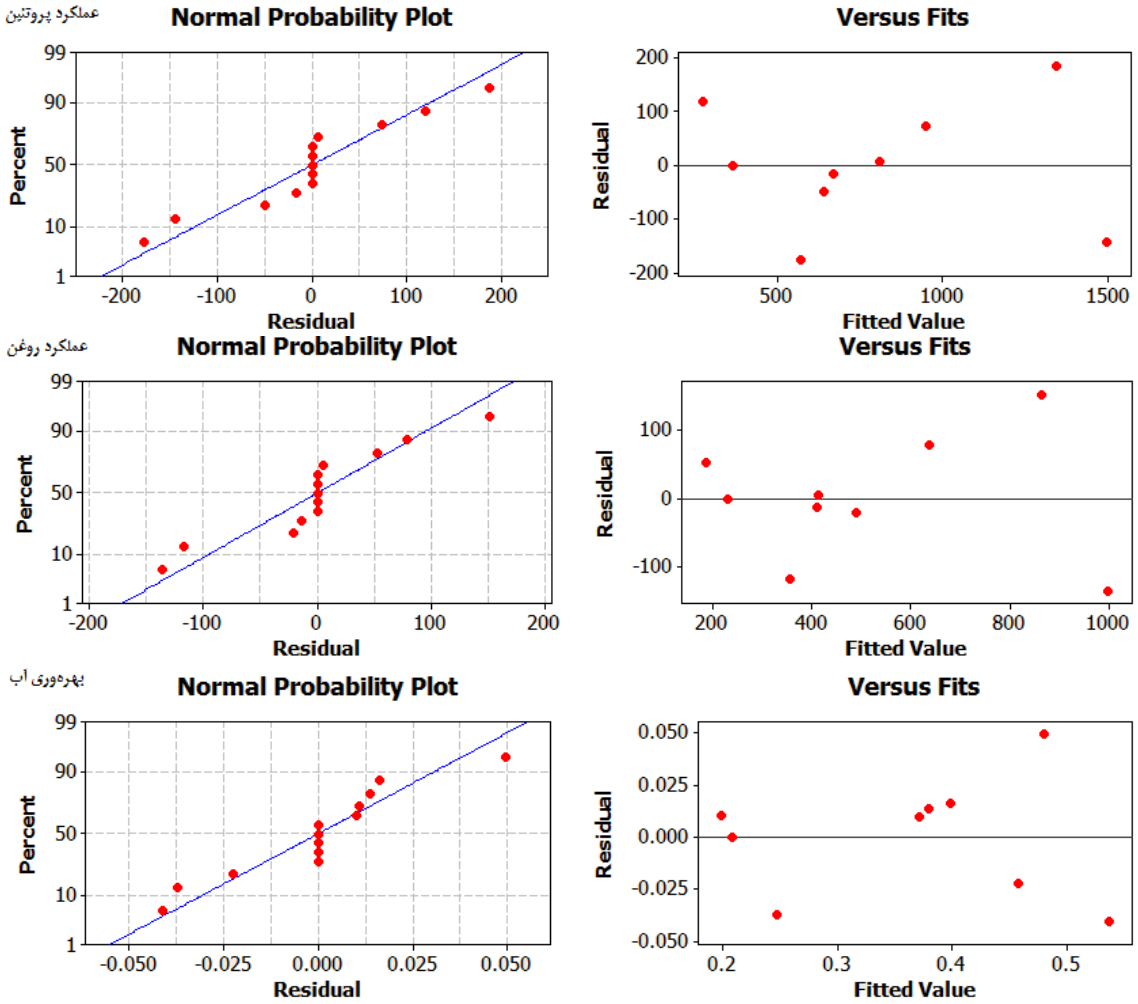




تعداد غلاف







شکل ۱- بررسی نرمال و ثابت بودن واریانس داده‌ها برای صفات مورد مطالعه

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابسته گیاه سویا

منابع تغییرات	رگرسیون	خطی	درجه دو	اثر متقابل	خطای خالص
درجه آزادی	۵	۲	۲	۱	۴
عملکرد دانه	۲۱/۶**	۲۲/۰**	۲۷/۲**	۹/۵*	۰/۰
زیست‌توده	۴/۰*	۸/۵*	۰/۶۹	۲/۰	۰/۰
وزن هزار دانه	۷/۵*	۱۴/۱**	۰/۶۸	۷/۸*	۰/۰
عملکرد روغن	۱۷/۶**	۱۸/۴**	۲۱/۸**	۷/۶*	۰/۰
عملکرد پروتئین	۲۳/۸**	۲۳/۸**	۲۸/۸**	۱۳/۷**	۰/۰
تعداد غلاف	۱۶/۷**	۲۶/۳**	۱۴/۹**	۱/۳	۰/۰
ارتفاع بوته	۹/۱**	۱۰/۸**	۱۲/۰**	۰/۰۹	۰/۰
بهره‌وری آب	۳۹/۱**	۲۱/۰**	۶۱/۵**	۳۰/۴**	۰/۰

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

نحوه واکنش پارامترها نسبت به دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب به‌صورت دو بعدی در شکل (۳) نشان داده‌شده است. با کاهش دور آبیاری عملکرد دانه افزایش یافت که این موضوع به‌دلیل تأمین مطلوب نیاز آبی گیاه است. در حالی که مقدار سوپرجاذب سبب اندکی کاهش در عملکرد شد. علت آن احتمالاً ایجاد محیط مرطوب و تنش ماندابی در اثر جذب طولانی مدت رطوبت در حالت اشباع است (خاشعی‌سیوکی و احمدی، ۱۳۹۴). عملکرد روغن و پروتئین نیز مشابه با عملکرد دانه با کاهش دور آبیاری حالت صعودی داشت و افزایش

مصرف سوپرجاذب سبب کاهش اندکی در مقادیر این پارامترها شد. کاهش دور آبیاری سبب افزایش تعداد غلاف، ارتفاع بوته و بهره‌وری آب شد. افزایش سوپرجاذب سبب کاهش تعداد غلاف و بهره‌وری آب شد ولی اثرگذاری آن بر پارامتر بهره‌وری آب بیشتر بود. ارتفاع بوته واکنش متفاوتی نسبت به‌مقدار سوپرجاذب داشت به‌طوری که مقادیر حداقل و حداکثر سوپرجاذب سبب افزایش ارتفاع بوته و مقادیر میانی سبب کاهش ارتفاع بوته شد (شکل ۳). تغییرات سه‌بعدی پارامترهای مورد بررسی در شکل (۴) به‌صورت سطح-پاسخ نشان داده‌شده است.

در همه پارامترها، اثر دور آبیاری نسبت به مقدار سوپرجاذب بیشتر بود. بیشترین مقدار کلیه صفات در محدوده دور آبیاری ۰/۷+ الی ۱+ و مقدار سوپرجاذب ۱- الی ۰/۶- به‌دست آمد. با توجه به این نتایج، نمودار همپوشانی صفات مطابق شکل (۵) تعیین شد. با توجه به اینکه محدوده‌ی سفید، که نشان دهنده حدود بهینه کلیه پارامترها در این شکل است، در محدوده اندکی در بازه اشاره شده وجود داشت، بهینه‌سازی مقدار پارامترها انجام شد.

جدول ۵- ضرایب رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو کامل برای متغیرهای وابسته (x_1 دور آبیاری و x_2 مقدار سوپرجاذب است)

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

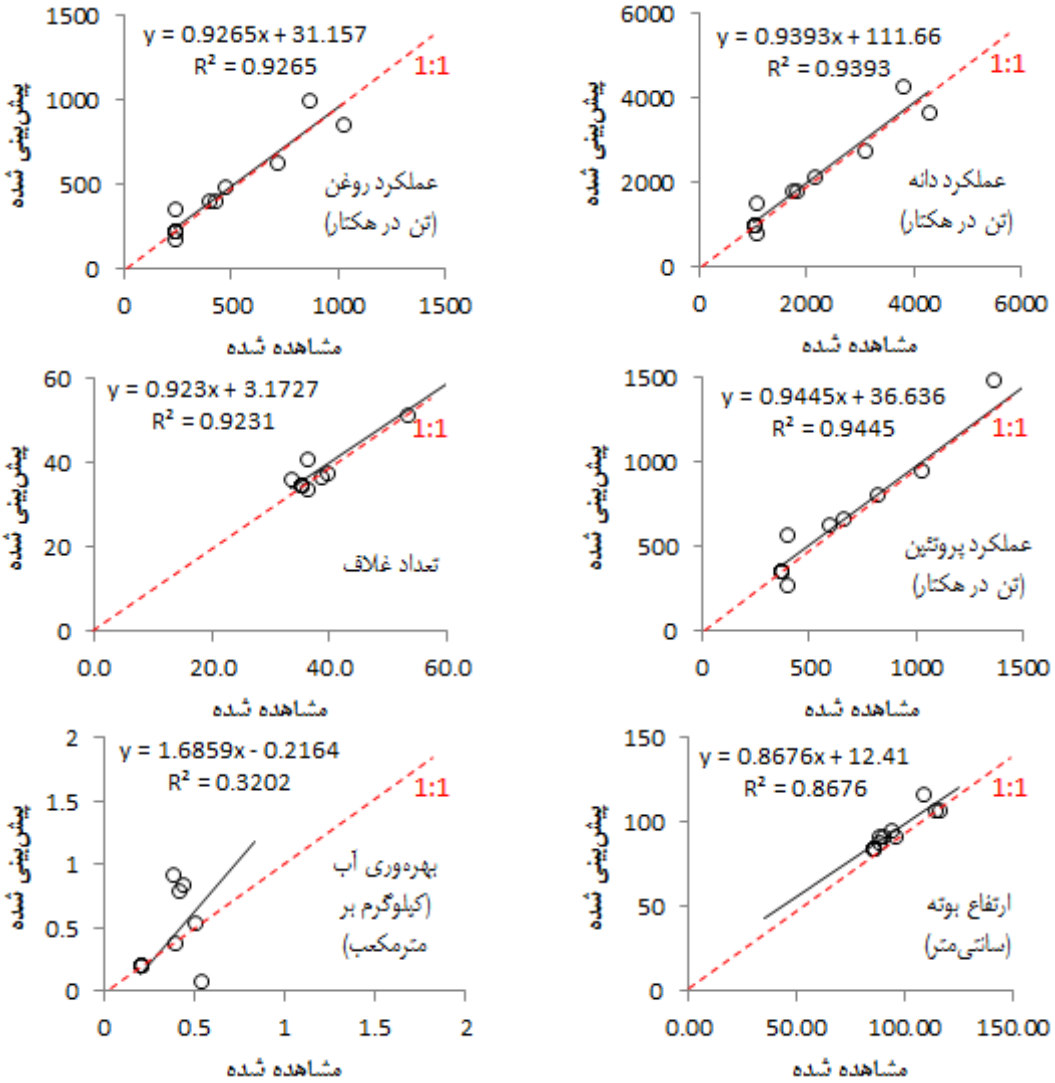
پارامترها	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
عملکرد دانه	۱۰۰۰/۵	۸۷۱/۰	۱۰۲۵/۹	۱۰۴/۲	۳۳۲/۰	-۵۷۶/۲
عملکرد روغن	۲۳۰/۷	۲۰۶/۸	۲۳۷/۸	۱۹/۰	۷۵/۹	-۱۳۳/۲
عملکرد پروتئین	۳۶۶/۱	۳۰۳/۴	۳۵۱/۱	۳۵/۲	۱۲۶/۶	-۲۳۱/۹
تعداد غلاف	۳۵/۰	۹/۸	۷/۹	-۱/۱	۲/۱	-۲/۲
ارتفاع	۸۵/۴	۸/۶	۹/۴	۰/۹	۴/۰	-۰/۷
بهره‌وری آب	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۰۵	-۰/۰۸

جدول ٦- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعه سویا

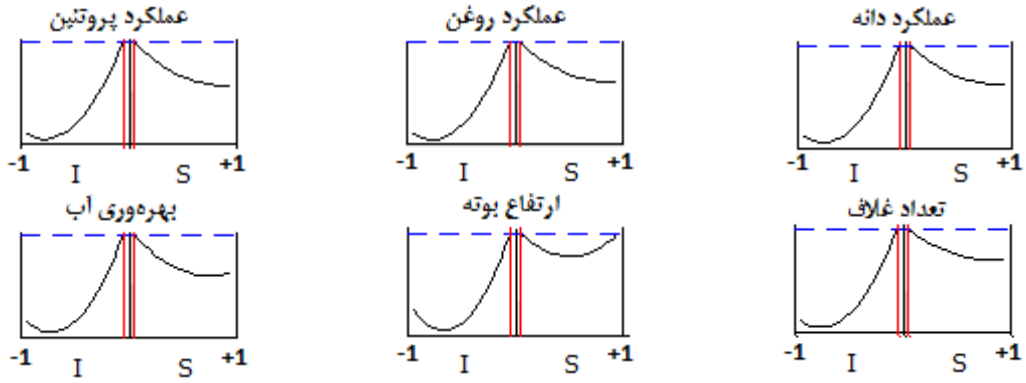
صفات	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	-۰/۰۱	۷۵/۹	۰/۰۴	۰/۹۳	۰/۹۹
عملکرد روغن (کیلوگرم بر هکتار)	۰/۰۰۱	۱۹/۶	۰/۰۴	۰/۹۲	۰/۹۹
عملکرد پروتئین (کیلوگرم بر هکتار)	-۰/۰۰۱	۲۵/۴	۰/۰۳	۰/۹۴	۰/۹۹
تعداد غلاف	-۰/۰۰۱	۰/۷۸	۰/۰۱	۰/۹۲	۰/۹۹
ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	-۰/۰۰۱	۱/۰۷	۰/۰۱	۰/۸۶	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	-۰/۰۰۱	۰/۰۸	۰/۲۷	-۵/۵	۰/۸۳

جدول ۷- نتایج t تست برای مقایسه شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهداتی)

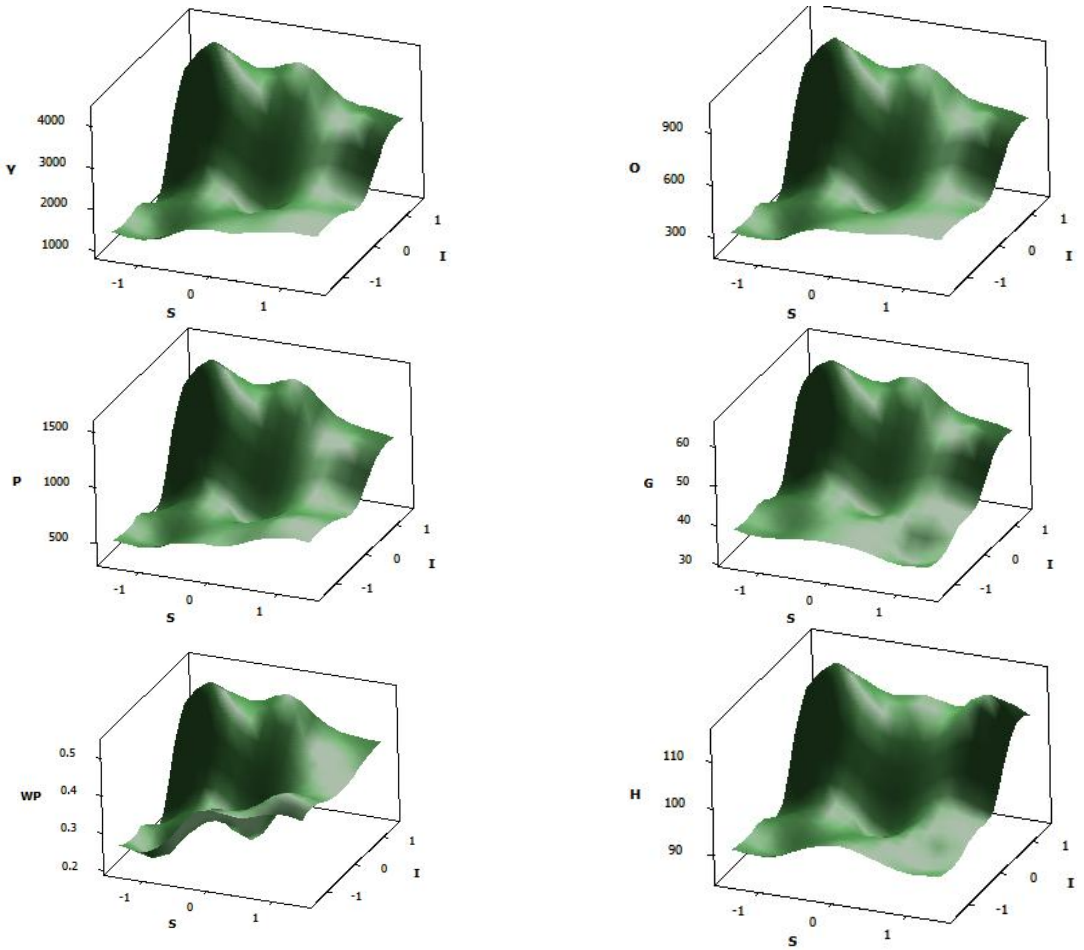
صفت	عرض از مبدا (a)		شیب (b)		t	فرض صفر
	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	a=0 b=1
عملکرد دانه	۱۱۱/۶	۱۶۳/۳	۰/۹۳	۰/۰۷	۱۳/۰	۰/۹۶	پذیرش
عملکرد روغن	۳۱/۱	۴۱/۸	۰/۹۲	۰/۰۸	۱۱/۷	۰/۹۶	پذیرش
عملکرد پروتئین	۳۶/۶	۵۵/۶	۰/۹۴	۰/۰۷	۱۳/۶	۰/۹۷	پذیرش
تعداد غلاف	۳/۱	۳/۶	۰/۹۲	۰/۸۷	۱۱/۴	۰/۹۶	پذیرش
ارتفاع	۱۲/۴	۱۱/۱	۰/۸۶	۰/۱۸	۸/۴	۰/۹۳	پذیرش
بهره‌وری آب	-۰/۲۱	۰/۰۴	۱/۶	۰/۰۸	۶/۳	۰/۵۶	پذیرش



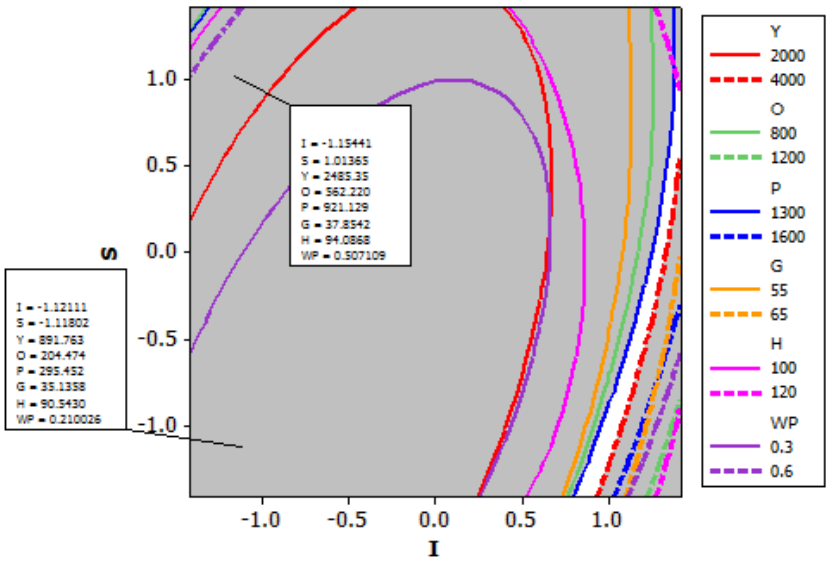
شکل ۲- داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده صفات مورد مطالعه و مقایسه‌ی خط ۱:۱ (خط منقطع) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده (خط ممتد)



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



شکل ٤- سطح پاسخ صفات مورد مطالعه نسبت به تغییرات مقدار آب آبیاری و سوپرجاذب



شکل ٥- نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته شامل صفات مورد مطالعه (سطح بهینه با رنگ سفید مشخص شده است)

پیش از بهینه‌سازی، مقادیر مورد انتظار برای هر کدام از پارامترها مورد مطالعه براساس دامنه تغییرات نشان‌داده‌شده در شکل (۴) محاسبه و در بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه، عملکرد دانه به ۵۹۵۵ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت. این مقدار ۳۲ درصد بیشتر از مقدار هدف و ۱۶۹ درصد بیشتر از متوسط عملکرد مشاهده‌شده است. عملکرد روغن نسبت به‌مقدار هدف ۲۶ درصد و نسبت به‌متوسط عملکرد روغن مشاهده‌شده حدود ۲۲۸ درصد افزایش یافت. عملکرد پروتئین نسبت به‌مقدار هدف ۳۵ درصد و نسبت به‌مقدار مشاهده‌شده ۲۲۷ درصد افزایش داشت. تعداد غلاف نیز نسبت به‌مقدار مشاهده شده ۸۹ درصد افزایش داشت. ارتفاع بوته نسبت به‌مقدار هدف کمتر بود ولی نسبت به ارتفاع بوته در مزرعه ۳۴ درصد بیشتر بود. متوسط بهره‌وری آب در مزرعه مطالعاتی ۰/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود ولی این مقدار در شرایط بهینه به ۰/۷۴ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. این نتایج در شرایطی به‌دست می‌آید که دور آبیاری به ۳ روز کاهش یابد و مقدار سوپرجاذب به‌میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار رعایت شود. کاهش دور آبیاری سبب افزایش دسترسی گیاه به‌رطوبت می‌شود و براساس نتایج به‌دست آمده در شکل‌های ۲ و ۳، کاهش آن سبب افزایش پارامترهای مورد مطالعه شد. کاهش سوپرجاذب تا مقدار ۵۰ کیلوگرم در هکتار نشان داد که استفاده بیش از حد از سوپرجاذب نه تنها اثرات مثبت ندارد بلکه به دلایلی از جمله تشدید تنش ماندابی می‌تواند سبب کاهش پارامترهای مورد مطالعه گردد.

جدول ۸- مقادیر هدف و شبیه‌سازی شده متغیرهای وابسته و مقدار بهینه متغیرهای مستقل در گیاه سویا

		هدف	شبیه‌سازی شده	مقدار بهینه
متغیرهای وابسته	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	۴۵۰۰	۵۹۵۵	-
	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)	۱۱۰۰	۱۳۹۰	-
	عملکرد پروتئین (کیلوگرم در هکتار)	۱۶۰۰	۲۱۶۴	-
	تعداد غلاف (-)	۷۰	۷۵	-
	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	۱۳۰	۱۲۵	-
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۶۵	۰/۷۴	-
متغیرهای مستقل	دور آبیاری (روز)	۳		-
	مقدار سوپرجاذب (کیلوگرم در هکتار)	۵۰		-

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌منظور بهینه‌سازی دو عامل دور آبیاری و مقدار سوپرجاذب در راستا حصول حداکثر عملکرد و بهره‌وری آب در کشت سویا انجام شد. نتایج نشان داد که مدل بهینه‌ساز سطح-پاسخ قادر به پیش‌بینی پارامترهای عملکرد دانه، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، تعداد غلاف، ارتفاع بوته و بهره‌وری آب بود. به جز پیش‌بینی پارامتر عملکرد روغن، این مدل دچار خطا کم‌برآوردی شد. براساس آماره‌های NRMSE و RMSE، مدل سطح-پاسخ به‌ترتیب دارای دقت مناسب و خطا قابل‌قبول بود. اثر دور آبیاری نسبت به‌مقدار سوپرجاذب اثر بیشتری بر کلیه پارامترهای مورد بررسی داشت. محدوده بهینه کلیه صفات مورد بررسی برای دور آبیاری بین ۰/۷+ الی ۱+ و برای مقدار سوپرجاذب بین ۱- الی ۰/۶- بود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که با مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب و اعمال دور آبیاری سه روز می‌توان به حداکثر عملکرد و بهره‌وری آب دست یافت. با اعمال این مقادیر، عملکرد دانه، عملکرد روغن و عملکرد پروتئین به‌ترتیب ۱۶۹، ۲۲۸ و ۲۲۷ نسبت به متوسط مقادیر مشاهداتی در مزرعه آزمایشی افزایش یافتند. تعداد غلاف نیز حدود ۸۹ درصد نسبت به‌متوسط مقدار مشاهداتی بیشتر شد. افزایش ارتفاع بوته و بهره‌وری آب در شرایط بهینه به‌ترتیب ۳۴ و ۱۳۱ درصد بود. بنابراین، کاربرد دور آبیاری ۳ روز به‌همراه مقدار ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب برای بهبود عملکرد و اجزای عملکرد سویا پیشنهاد می‌شود.

منابع

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸ (۱): ۱۱۷-۱۳۲.

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۳-۷۵): ۷۱۵-۷۲۶.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. ع. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop.

نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۸(۱): ۱۵-۳۰.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۵۳-۶۴.

بی‌نام، ۱۴۰۱، مرکز ملی آمار ایران، دسترسی در https://www.amar.org.ir/.

پرچمی‌عراقی, ف.، عباسی، ف. و اخوان، ک. ۱۴۰۱. ارزیابی مقدار آب کاربردی و بهره‌وری آب سویا در دشت مغان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۶ (۲): ۱۸۱-۲۰۱.

پیغام‌زاده، ک.، تورچی، م. و سادات شبر، ز. ۱۴۰۱. بررسی عارضه اختلال در غلاف‌بندی سویا با رهیافت‌های پروتئومیک و بیوانفورماتیک. نشریه پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی. ۱۴ (۴۲) : ۱۲۷-۱۳۷.

توانگر، م.، عشقی‌زاده، ح. ر. و قیصری، م. ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد و کارایی مصرف آب هیبریدهای دیررس ذرت در شرایط متفاوت آبیاری و تقسیط کود نیتروژن. نشریه علوم آب و خاک. ۲۴ (۲): ۲۳۵-۲۴۹.

جهان، م.، امیری، م. ب. و نوربخش، ف. 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.

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

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

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

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

میرعرب‌رضی، ر.، بیابانی، ع.، نخ‌زری‌مقدم، ع. و قربانی‌واقعی، ح. ۱۳۹۶. تاثیر سوپرجاذب و قارچ میکوریزا بر عملکرد سویا تحت تنش آبی. نشریه تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی. ۴ (۲): ۱۸۱-۱۹۴.

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.

Box, G. E. P. and Hunter, J. S. 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. The Annals of Mathematical Statistics. 28(1): 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.

FAOSTAT. 2022. Food and Agriculture Organization Crop Production Statistics: World sorghum production and utilization.

Jahan, M. and Amiri, M. B. 2018. Optimizing application rate of nitrogen, phosphorus and cattle manure in wheat production: An approach to determine optimum scenario using response-surface methodology. Journal of soil science and plant nutrition, 18(1): 13-26.

Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G. and Miranda, L. R. 2009. Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H_3PO_4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 70: 35–45.

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.

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.

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 onionproduction using response surface

Methodology (RSM). Biosc.Biotech.Res.Comm. 9(1): 46-54

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

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.

methodology as optimization approach. African Journal of Agricultural Research. 9(7): 676-687.

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

Singh, G. 2010. Water Management in Soybean. In: Singh G. (Ed.), the soybean: botany, production and uses. CABI, Oxfordshire, UK, pp. 191-208.

Soltani, M. and Soltani, J. 2016. Determination of Optimal Combination of Applied Water and Nitrogen for Potato Yield Using Response Surface

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 17, Jun.-Jul. 2023, p. 387-400

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۷، خرداد - تیر ۱۴۰۲، ص. ۴۰۰-۳۸۷

Optimizing Irrigation Period and Amount of Superabsorbent in Soybean Using Response-surface Model

A. Egdernezhad [1*], M.M. Nakhjavanimoghaddam[2], S. Sepehri Sadeghiyan[3]
Recived: Jan.17, 2023 Accepted: Apr.25, 2023

Abstract

Soybean is considered as one of the valuable crops in terms of providing food, which has high amounts of protein and oil. This crop is sensitive to the amount of irrigation water. For this reason, it is suggested to determine the appropriate irrigation period along with the use of superabsorbent. To optimize these factors, the response-surface method was used in the present study. For this purpose, the soybean data collected from a research farm located in the Research Institute of Agricultural Engineering, in Iran, in 2018, was used. Two factors of irrigation period (with high and low levels of 4 and 7 days, respectively) and amount of superabsorbent (with high and low levels of 300 and 0 $kg.ha^{-1}$, respectively) were applied. The results showed that the response surface method had an overestimation error (MBE>0) for predicting oil yield, and an underestimation error (MBE<0) for predicting other yield and yield components. The accuracy of this model for predicting all parameters were excellent (NRMSE<0.1) and its error was acceptable (RMSE<3%). The optimization results showed that seed yield, oil yield, protein yield, number of pods, plant height and water productivity were 169, 228, 227, 89, 34 and 131% higher than the average observed values of these parameters. In order to achieve optimal values, it is necessary to reduce the irrigation period to three days and use the amount of superabsorbent up to 50 $kg.ha^{-1}$. Therefore, compliance with this issue is suggested for soybean cultivation.

Keywords: Oil Yield, Optimization, Protein Yield, Superabsorbent, Water Productivity

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)