

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و آب آبیاری با روش سطح پاسخ در زراعت ذرت

سید کیومرث پژوهیده^۱، اصلان آگدرنژاد^{۲*}، فریبرز عباسی^۳، سالومه سپهری صادقیان^۴

چکیده

هدف از این پژوهش، تعیین مقادیر بهینه کود نیتروژن و آب آبیاری برای دستیابی به حداکثر عملکرد، بهره‌وری مصرف آب و کود است. بدین منظور، پژوهش حاضر با استفاده از مدل سطح پاسخ روی گیاه ذرت دانه‌ای رقم دبل کراس ۳۷۰ در مزرعه ۵۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در دو سال زراعی انجام شد. عوامل مورد آزمایش شامل مقدار آب آبیاری در سه سطح (I1= ۱۰۰، I2= ۸۰ و I3= ۶۰ درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن در سه سطح (F1= ۱۰۰، F2= ۶۰ و F3 برابر صفر درصد نیاز کودی) بود. نتایج نشان داد که مدل مورد استفاده دارای خطای قابل قبول برای پیش‌بینی عملکرد (۷/۳ درصد)، بهره‌وری آب (۹/۳ درصد) و کارایی مصرف کود (۲۴ درصد) بود. دقت این مدل برای پیش‌بینی صفات موردنظر به ترتیب در دسته‌های عالی (NRMSE ≤ ۰/۱)، عالی (NRMSE ≤ ۰/۱) و متوسط (۰/۳ ≤ NRMSE ≤ ۰/۲) قرار داشت. کارایی مدل موردنظر نیز مطلوب (EF ≥ ۰/۵ و d ≥ ۹۰) بود. با افزایش مقدار کود (تغییر از -۱ به سمت +۱)، عملکرد نیز افزایش داشت ولی میزان رشد عملکرد به صورت خطی نبود. تغییرات عملکرد نسبت به مقادیر آب آبیاری شیب یکنواخت‌تری داشت و نمودار آن به حالت خطی نزدیک‌تر بود. افزایش آب آبیاری تا محدوده‌ی +۰/۸ سبب افزایش بهره‌وری آب گردید. مقادیر بیشتر از آن، بهره‌وری آب را کاهش داد. تغییرات کارایی مصرف کود نسبت به دو عامل مقدار کود نیتروژن (تا محدوده‌ی +۰/۹) و آب آبیاری (تا محدوده‌ی +۰/۸) صعودی بود. مقادیر بهینه‌ی کود نیتروژن و آب آبیاری به ترتیب در محدوده‌ی ۶۰-۱۰۰ درصد نیاز کودی و ۷۰-۱۰۰ درصد نیاز آب آبیاری بود که پس از بهینه‌سازی به ترتیب ۷۱ و ۱۰۰ درصد تعیین شدند. در این شرایط، عملکرد ذرت، بهره‌وری آب و کود به ترتیب ۷ تن بر هکتار، ۲/۳ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳۳ کیلوگرم بر کیلوگرم به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، تنش کودی، عملکرد بهینه، بهره‌وری آب، کارایی مصرف کود

مقدمه

ذرت به‌عنوان سومین غله پرمصرف در دنیا شناخته می‌شود که قابلیت کشت در اکثر مناطق جهان را دارد. بر اساس

آمار فائو، حدود ۲/۸ درصد مصرف غلات جهان به ذرت اختصاص دارد. سطح زیر کشت آن در دنیا حدود ۱۸۸ میلیون هکتار و در ایران ۱۰۳ هزار هکتار است (بی‌نام، ۱۳۹۸؛ FAO، 2014). این گیاه زراعی به مقدار آب و نیتروژن مصرفی بسیار حساس است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۰). نیاز آبی گیاه ذرت بالا است، به همین دلیل اگر با کمبود آب آبیاری مواجه شود، کارایی مصرف آب آن کاهش می‌یابد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). افزایش نیتروژن در دسترس نیز سبب بهبود عملکرد دانه و شاخص‌های رشد آن می‌گردد (Namihira et al., 2011). برای افزایش دسترسی به نیتروژن در طول فصل رشد، آن را به صورت تقسیط در اختیار گیاه قرار می‌دهند. تحقیقات نشان داده است که افزایش تقسیط کود نیتروژن سبب افزایش عملکرد، بهره‌وری آب

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
^۲ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران (*نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com)
^۳ استاد پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
^۴ استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

گرچه روش سطح پاسخ عمدتاً در صنایع و علوم آزمایشگاهی کاربرد دارد، لیکن با توجه به خصوصیات آن، در سال‌های اخیر در بخش کشاورزی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (حمید و همکاران، ۱۴۰۱). جهان و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی سطوح بهینه سوپر جاذب (با سطوح ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم بر هکتار)، اسیدهیومیک (با دو سطح چهار و هشت کیلوگرم در هکتار) و آب آبیاری (با سطوح ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) در گیاه ذرت پرداختند. این محققان گزارش کردند که بهینه‌ترین حالت برای مصرف این عوامل به ترتیب ۱۲۶/۰۶ کیلوگرم در هکتار، ۷/۱۹ کیلوگرم در هکتار و ۳۴۷/۴۷ مترمکعب در هکتار است. کوچکی و همکاران، به‌منظور بهینه‌سازی نیتروژن، مقدار آب آبیاری و تراکم گیاه کلزا از روش سطح پاسخ استفاده نمودند (Koocheki et al., 2014). این محققان سطوح بالا و پایین برای عوامل مورد اشاره را به ترتیب ۴۰۰-۰ کیلوگرم در هکتار، ۱۵۰۰-۱۵۰ مترمکعب در هکتار و ۵۰-۱۵۰ بوته در مترمربع در نظر گرفتند. نتایج پژوهش نشان داد که بهینه‌ترین حالت برای دستیابی به حداکثر عملکرد، استفاده از مقادیر ۹۲ کیلوگرم کود نیتروژن، ۳۳۴۷ مترمکعب آب آبیاری و ۱۱۴ بوته در مترمربع است. منصوری و همکاران، از این روش برای گیاه پیاز استفاده کرده و نشان دادند که مصرف ۹۳ کیلوگرم کود نیتروژن به همراه ۸۹۳۰ مترمکعب آب آبیاری سبب بهینه‌سازی منابع تولید و کاهش آلودگی زیست‌محیطی می‌گردد (Mansouri et al., 2015).

منصوری و همکاران (۱۴۰۰)، از این روش برای بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و آب مصرفی در گیاه چغندر قند استفاده نمودند. سطوح بالا و پایین نیتروژن در این تحقیق به ترتیب صفر و ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار و سطوح بالا و پایین آب آبیاری به ترتیب ۸۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار بود. این محققان گزارش نمودند که بر اساس نتایج سطح پاسخ، مقدار ۱۳۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰۶۷۷ مترمکعب در هکتار، تیمار بهینه می‌باشند.

گودرزی و همکاران (۱۴۰۰)، از این روش برای بهینه‌سازی فاکتورهای کود نیتروژن و فاصله‌ی بوته روی ردیف در گیاه اسفناج استفاده نمودند. سطوح بالا و پایین فاصله بوته به

و کارایی مصرف کود می‌شود (توانگر و همکاران، ۱۳۹۹؛ Preza-fontes et al., 2021).

برای دستیابی به عملکرد اقتصادی قابل‌قبول و کاهش مصرف آب و آلودگی حاصل از آبیاری نیتروژن به‌صورت هم‌زمان، لازم است مصرف آب و کود نیتروژن به‌صورت بهینه تعیین شود. این کار در شرایط مزرعه یا ممکن نیست یا با صرف وقت و هزینه‌ی بسیار قابل‌اجرا است. از این‌رو، استفاده از مدل‌ها برای این مهم اجتناب‌ناپذیر است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸).

یکی از ابزارهای کاربرد در این زمینه روش سطح پاسخ است (Aslan, 2007; Kwak, 2005). این روش که مبنای آماری پیشرفته دارد بر اساس یک مدل غیرخطی چندمنظوره پایه‌گذاری شده است (Zulkali et al., 2006; Kalavathy et al., 2009). در این روش، ترکیبی از تیمارها طراحی شده و یک مدل آماری با بهترین برازش ایجاد می‌شود. سپس مقادیر بهینه متغیرهای مستقل به‌منظور دستیابی به مقدار موردنظر برای متغیر وابسته تعیین می‌شود (Montgomery, 2001; Kalacathy et al., 2009). این روش خود به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شود که طرح مرکب مرکزی از جمله مهم‌ترین آن‌ها است (Wu and Hamada, 2009). این طرح ابزاری جایگزین و مناسب برای طرح فاکتوریل است که توسط بکس و ویلسون مطرح و به‌وسیله‌ی بکس و هانتز اصلاح گردید (Box and Wilson, 1957; Box and Hunter, 1957). مزیت استفاده از طرح مرکب مرکزی نسبت به طرح فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش است که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند، همچنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007). در این روش می‌توان اطلاعات بیشتری از تحلیل طرح به دست آورد درحالی‌که در روش‌های معمول آماری انجام آن غیرممکن است. همچنین سبب می‌شود بتوان سناریوهای مختلفی را با هم مقایسه کرد. این شرایط در طرح‌های معمول آزمایش‌ها وجود ندارد.

آزمایش از نظر آب و هوایی بر اساس طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق نیمه‌خشک با زمستان سرد است. دو عامل مقدار آب آبیاری در سه سطح (I1: ۱۰۰، I2: ۸۰ و I3: ۶۰ درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن نیز در سه سطح (F1: ۱۰۰، F2: ۶۰ و F3: صفر درصد نیاز کودی) روی گیاه ذرت دانه‌ای رقم دبل کراس ۳۷۰ در نظر گرفته شد. عملیات کاشت در اوایل تیر ماه و با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار انجام و نیتروژن مورد نیاز نیز از طریق کود اوره تأمین شد. تقسیط کود نیتروژن در چهار مرحله قبل از کاشت، مرحله هفت برگی، مرحله ساقه رفتن و مرحله سنبل زدن در نظر گرفته شد و برای آبیاری نیز از جویچه‌هایی با شیب ۰/۰۰۶ متر بر متر، عرض ۰/۷۵ متر و طول ۱۶۵ متر استفاده شد. مقدار آب آبیاری بر اساس تبخیر از سطح تشتت کلاس A و اعمال ضرایب تشتک و گیاهی تعیین گردید. برای تعیین نیاز آبی از داده‌های ایستگاه هواشناسی در فاصله دو کیلومتری از مزرعه تحقیقات استفاده شد. ضریب تشتک بر اساس توصیه ایستگاه هواشناسی برابر با ۰/۶۵ و ضریب گیاهی نیز بر اساس مقادیر ارائه‌شده در نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. پنج جویچه برای هر تیمار در نظر گرفته شد. سه جویچه میانی برای برداشت محصول و دو جویچه کناری برای اثر حاشیه‌ای منظور شدند. اعمال تیمارهای آبیاری ۵ روز پس از کاشت انجام شد. دبی ورودی و خروجی هر جویچه به ترتیب با استفاده از کنتور و فلوم WSC تیپ سه اندازه‌گیری شد. مقادیر آب آبیاری برای هر تیمار در شکل (۱) نشان داده شده است. اعمال کود به صورت کودآبیاری برای هر دو دسته انجام شد. به دلیل اینکه تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیشتری به همراه دارد، تزریق کود در ۲۰-۳۰ دقیقه انتهایی آبیاری انجام می‌شد. مشخصات خاک مزرعه نیز در جدول (۱) نشان داده شده است.

ترتیب ۷ و ۱۵ سانتی‌متر و سطوح بالا و پایین کود نیتروژن به ترتیب صفر و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. نتایج این محققان نشان داد که بهترین فاصله ۷ سانتی‌متر به همراه مصرف ۱۸۹/۹ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن مناسب‌ترین تیمار از نظر اقتصادی بود. جهان و همکاران (۱۳۹۴) از این روش برای بهینه‌سازی مقدار کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در کشت گندم استفاده نمودند. سطوح بالا و پایین کود نیتروژن به ترتیب صفر و ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار، سطوح بالا و پایین کود فسفر به ترتیب صفر و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار و سطوح بالا و پایین کود دامی به ترتیب صفر و ۳۰ تن بر هکتار در نظر گرفته شد. این محققان گزارش نمودند که مصرف ۱۴۵/۴ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم فسفر و ۱۸/۴ تن بر هکتار کود دامی، بهترین نتایج را از نظر اقتصادی دارد.

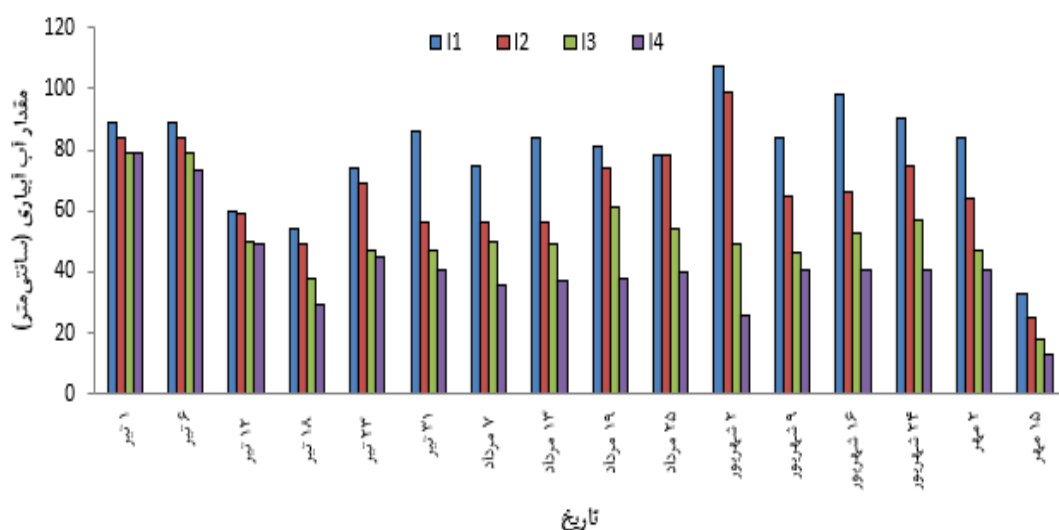
بر اساس بررسی منابع انجام‌شده، روش سطح پاسخ ابزار مفیدی برای دستیابی به مقادیر بهینه عوامل مختلف در بخش کشاورزی است. لیکن تاکنون برای بهینه‌سازی عوامل مقدار و تقسیط کود نیتروژن و میزان آب آبیاری در کشت گیاه ذرت مورد استفاده قرار نگرفته است. از این‌رو، هدف اصلی از این پژوهش، تعیین مقادیر بهینه این عوامل در کشت ذرت با استفاده از روش سطح پاسخ است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر بر اساس طرح تحقیقاتی انجام شده روی گیاه ذرت در مزرعه ۵۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر انجام شد. این طرح در دو سال زراعی و در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا انجام شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۰؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). منطقه مورد

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

pH	EC	رطوبت اشباع	رطوبت حجمی		جرم مخصوص ظاهری	بافت خاک	عمق خاک
			FC	PWP			
		درصد	رطوبت متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب		گرم بر سانتی‌متر مکعب		
	دسی زمینس بر متر						
۷/۷۷	۱/۱۶	۴۵	۲۹	۱۵	۱/۳۴	لوم	۲۰-۰
۷/۶۷	۰/۸۲	۴۴	۲۹	۱۵	۱/۴۶	لوم	۴۰-۲۰



شکل ۱- عمق آب آبیاری بر اساس نیاز آبی کامل گیاه

معادله‌ی (۳) تعیین می‌شود. کد ضرایب و مقدار هر کدام از عوامل در جدول (۲) آورده شده است.

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

برای برازش داده‌ها از رگرسیون چند متغیره با افزودن جملات خطی، درجه دو و اثر متقابل بین عوامل، برازش و بر اساس تجزیه واریانس رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. معادله‌ی چندجمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به شکل زیر است (Aslan, 2007).

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (۴)$$

در این معادله، y متغیر وابسته، i خصوصیات کمی و کیفی ذرت، a ضریب رابطه، x_1 متغیر مستقل کود نیتروژن و x_2 متغیر مستقل تقسیط کود نیتروژن 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 اربب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) به صورت زیر استفاده شد.

روش سطح پاسخ به صورت تابع چند متغیره به صورت معادله‌ی (۱) تعریف می‌شود (Kalavathy et al., 2009).

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

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 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بالاترین، میانگین و پایین‌ترین سطح متغیر مستقل هستند. برای تعیین تعداد تیمارها از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$2^k + 2k + r \quad (۲)$$

در این معادله، k نشان‌دهنده‌ی تعداد عوامل مورد آزمایش و r تعداد تکرار است (Aslan, 2007)؛ بنابراین در این پژوهش، برای هر دو آزمایش انجام شده، تعداد تیمارهای طراحی به صورت

آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برآزش بهتر داده‌ها است.

صفاتی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند، شامل عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود است. برای اندازه‌گیری عملکرد، در انتهای دوره رشد نمونه‌گیری از تعداد ۱۰ بوته و به صورت تصادفی برای هر تکرار انجام شد. سپس عملکرد دانه در رطوبت ۱۴ درصد اندازه‌گیری شد. بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود نیز به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۱۱) و (۱۲) تعیین شدند.

$$WP = \frac{Y}{W} \quad (11)$$

$$FP = \frac{Y - Y_0}{F} \quad (12)$$

در این معادله‌ها، Y عملکرد محصول (کیلوگرم)، W مقدار آب آبیاری (مترمکعب)، Y_0 عملکرد محصول در تیمار بدون کود (کیلوگرم) و F مقدار کود مصرفی (کیلوگرم) است.

نتایج و بحث

قبل از انجام عملیات سطح پاسخ، به منظور بررسی صحت ورودی‌های مورد استفاده به مدل سطح پاسخ، داده‌های برداشت شده از مزرعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج به دست آمده در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقادیر عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود در محدوده‌ی بهترین خط برآزش قرار داشتند، بنابراین داده‌های مورد استفاده از لحاظ نرمال بودن در وضعیت مطلوبی قرار داشتند. پراکندگی باقیمانده‌ی داده‌ها بر اساس مقادیر برازنده شده^۱ نشان داد که بین داده‌های مورد استفاده در این پژوهش روند خاصی وجود ندارد؛ بنابراین، واریانس بین داده‌ها ثابت است. در مجموع، داده‌های برداشت شده از مزرعه صلاحیت لازم برای تجزیه و تحلیل در آزمون سطح پاسخ را دارند

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (7)$$

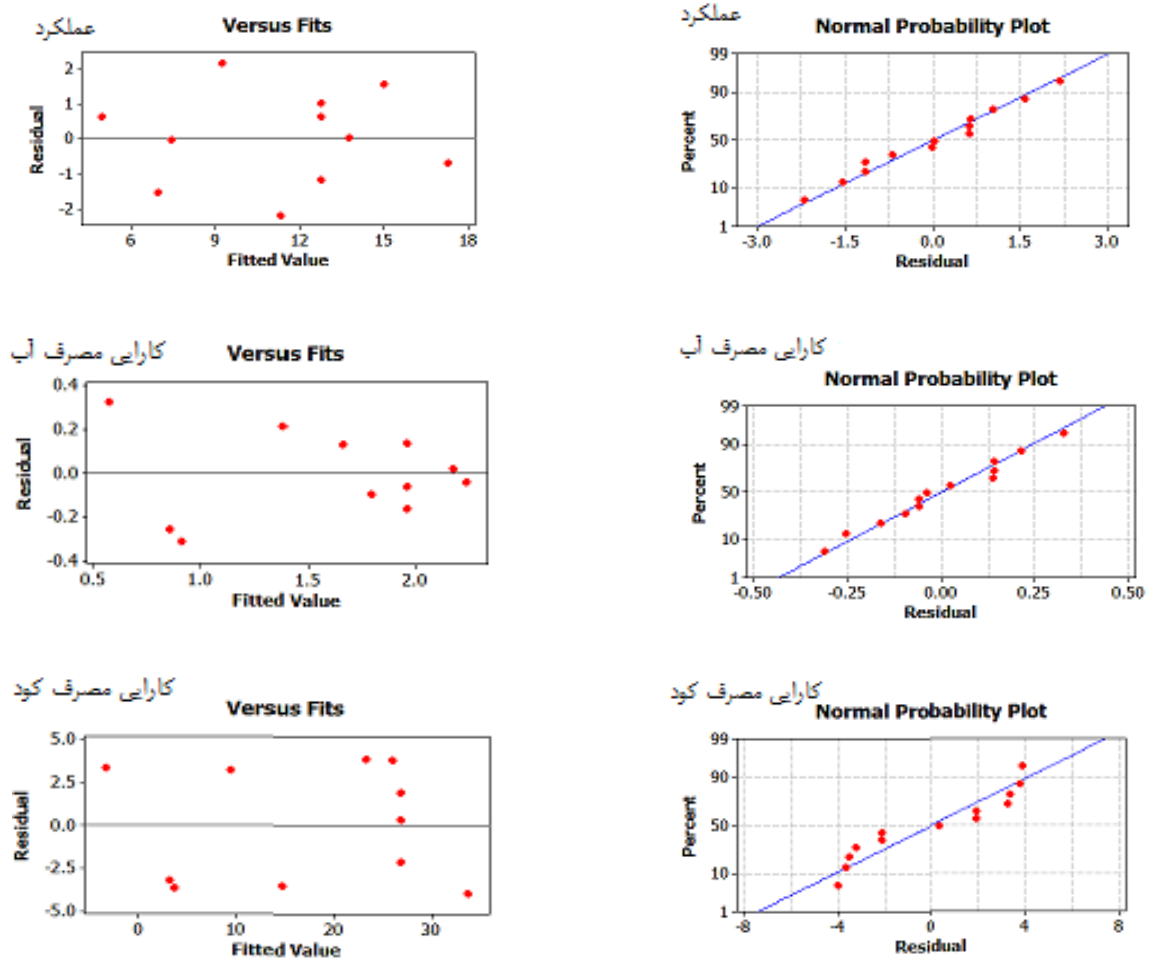
$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است. آماره‌های $RMSE$ و $NEMSE$ به ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل است. مقدار آماره $RMSE$ همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره $NRMSE$ نشان‌دهنده‌ی دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۳، ۰/۱-۰/۲، و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش برآوردی 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 عملکرد و بهره‌وری آب ذرت عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF نشان‌دهنده کارایی مدل است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند، بهتر است. آماره R^2 نشان‌دهنده قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به وجود آمده در مقدار واقعی است. این

¹ Fitted Value



شکل ۲- بررسی نرمال بودن (سمت راست) و ثابت بودن واریانس (سمت چپ) برای پارامترهای عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود

درجه دوم، مقادیر کود و آب آبیاری اثر معنی‌داری بر عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود داشتند. معنی‌دار نبودن عدم برآزش نشان داد که تجزیه رگرسیونی تفاوت معنی‌داری نسبت به تجزیه واریانس نداشته است و می‌توان به این روش اعتماد کرد. این نتایج با مشاهدات منصوری و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت داشت. این محققان نیز با مطالعه‌ی مقادیر مختلف کود و آب آبیاری روی گیاه چغندرقدن نشان دادند که بین نتایج تجزیه واریانس و مدل رگرسیونی تفاوت آماری معنی‌داری وجود نداشت.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد مدل رگرسیونی برای عملکرد و کارایی مصرف کود در سطح یک درصد ($P \leq 0.01$) و بهره‌وری آب در سطح پنج درصد ($P \leq 0.05$) معنی‌دار شدند (جدول ۳). هر سه پارامتر موردنظر در رگرسیون خطی تحت تأثیر عوامل مقدار کود و آب آبیاری قرار گرفتند. در رگرسیون خطی برای پارامتر بهره‌وری آب، مقدار کود اثر بیشتری نسبت به آب آبیاری داشت. گرچه آب آبیاری در این رگرسیون معنی‌دار نشد ولی مقدار P-value آن به ۰/۰۵ بسیار نزدیک بود. در رگرسیون

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

منابع تغییرات رگرسیون	پارامتر	درجه آزادی	عملکرد دانه	بهره‌وری آب	کارایی مصرف کود
رگرسیون	-	۵	۱۰/۰**	۰/۰۳*	۱۹/۴**
	-	۲	۲۱/۳**	۲۲/۳*	۳۰/۴**
خطی	مقدار کود	۱	۳۵/۳**	۴۳/۳**	۴۹/۷**
	آب آبیاری	۱	۷/۲*	۱/۲	۱۱/۰*
	-	۲	۲/۵**	۶/۹*	۱۵/۷**
درجه دو	مقدار کود	۱	۴/۶**	۱۰/۰*	۲۴/۲**
	آب آبیاری	۱	۰/۹۸**	۵/۵*	۱۱/۰*
اثر متقابل	-	۱	۲/۶	۱/۰	۵/۰
خطا	-	۷	۲/۸	۰/۰۵	۱۷/۳
عدم برازش	-	۳	۴/۴	۶/۳	۸/۱*
خطای خالص	-	۴	۱/۱	۰/۰۱	۴/۲

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

برای برازش رگرسیونی کلیه صفات مورد مطالعه، از رگرسیون چندجمله‌ای درجه دو کامل استفاده و مقادیر ثابت در این رگرسیون برای عملکرد، بهره‌وری آب و کود مشخص شد (جدول ۴). نتایج مقایسه‌ی عملکرد مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده بر اساس آماره‌های مختلف نیز، در جدول (۵) نشان داده شده است. بر اساس آماره‌ی MBE، مدل رگرسیونی توانایی لازم برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر را داشت. گرچه در پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی و در پیش‌بینی کارایی مصرف کود دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج در شکل (۳) نیز قابل مشاهده است.

در این شکل، پراکنش داده‌های عملکرد و بهره‌وری آب در زیر خط ۴۵ درجه (۱:۱) قرار داشت. خطای مدل رگرسیونی توسط آماره‌ی RMSE تعیین شد. مقادیر این آماره برای عملکرد ۰/۸۵ تن بر هکتار بود؛ بنابراین مدل رگرسیونی برای شبیه‌سازی عملکرد (با متوسط ۱۱/۵ تن بر هکتار) حدود ۷/۳ درصد خطا داشت. از طرفی، آماره‌ی NRMSE که دقت مدل را نشان می‌دهد، دقت نتایج پیش‌بینی عملکرد را در دسته‌ی عالی (۰/۱)

ک (NRMSE) قرار داد. خطای پیش‌بینی بهره‌وری آب (با متوسط ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) حدود ۹/۳ درصد و خطای پیش‌بینی کارایی مصرف کود (با متوسط ۱۸/۸ کیلوگرم بر مترمکعب) حدود ۲۴ درصد بود. به همین دلیل دقت مدل رگرسیون برای پیش‌بینی بهره‌وری آب و کود به ترتیب در دسته‌های عالی (۰/۱) \leq NRMSE) و متوسط (۰/۳) \leq NRMSE) قرار داشت. دو آماره‌ی EF و d نیز نشان‌دهنده‌ی کارایی مدل رگرسیونی است که برای هر سه پارامتر مورد مطالعه نتایج مطلوبی نشان داد. نتایج به‌دست‌آمده با مشاهدات سایر محققان از جمله منصورى و همکاران (۱۴۰۰)، منصورى و همکاران (۲۰۱۴) و کوچکی و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت داشت (Mansouri et al., 2014; Kocheiki et al., 2014). این محققان نیز به ترتیب با مطالعه‌ی گیاهان چغندرقد، پیاز و کلزا نشان دادند که مدل رگرسیونی درجه دوم دقت لازم برای شبیه‌سازی صفات مورد مطالعه را دارد. 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).

کلیه صفات مورد مطالعه، از رگرسیون چندجمله‌ای درجه دو کامل استفاده و مقادیر ثابت در این رگرسیون برای عملکرد، بهره‌وری آب و کود مشخص شد (جدول ۴). نتایج مقایسه‌ی عملکرد مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده بر اساس آماره‌های مختلف نیز، در جدول (۵) نشان داده شده است. بر اساس آماره‌ی MBE، مدل رگرسیونی توانایی لازم برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر را داشت. گرچه در پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی و در پیش‌بینی کارایی مصرف کود دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج در شکل (۳) نیز قابل مشاهده است.

در این شکل، پراکنش داده‌های عملکرد و بهره‌وری آب در زیر خط ۴۵ درجه (۱:۱) قرار داشت. خطای مدل رگرسیونی توسط آماره‌ی RMSE تعیین شد. مقادیر این آماره برای عملکرد ۰/۸۵ تن بر هکتار بود؛ بنابراین مدل رگرسیونی برای شبیه‌سازی عملکرد (با متوسط ۱۱/۵ تن بر هکتار) حدود ۷/۳ درصد خطا داشت. از طرفی، آماره‌ی NRMSE که دقت مدل را نشان می‌دهد، دقت نتایج پیش‌بینی عملکرد را در دسته‌ی عالی (۰/۱)

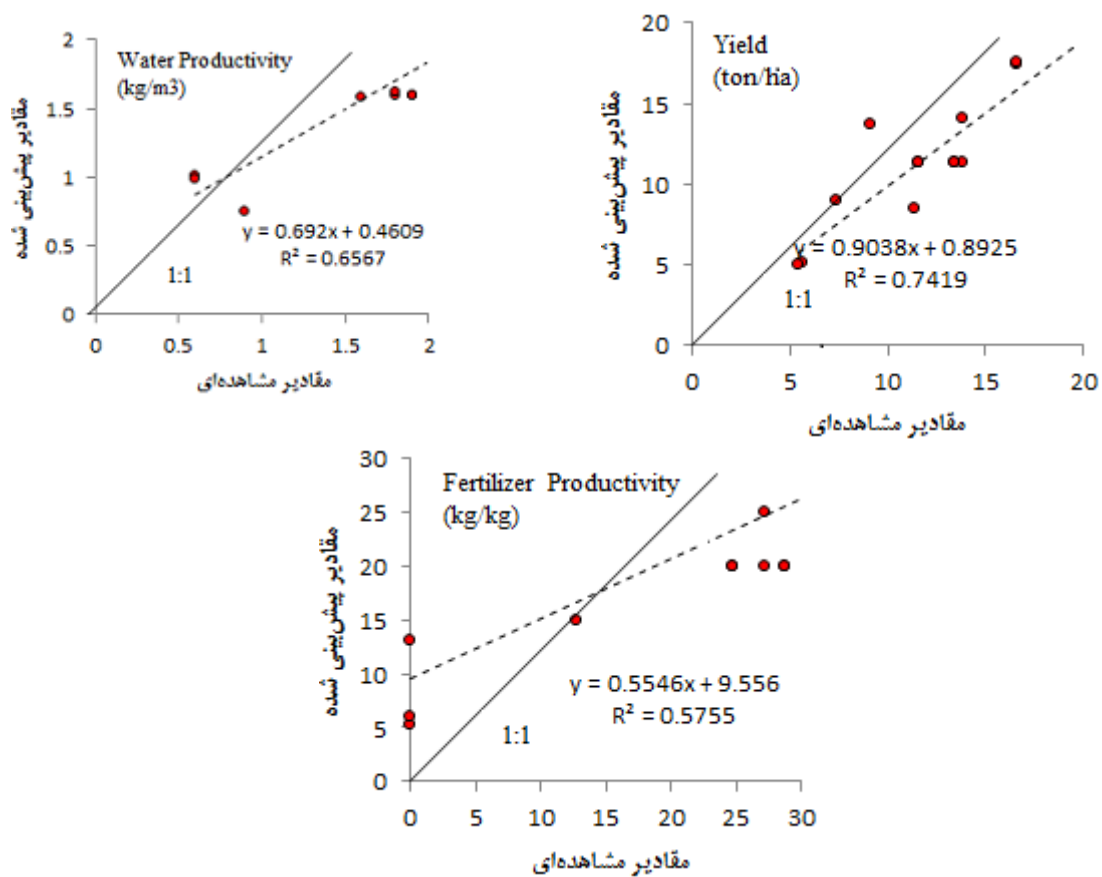
جدول ۴- ضرایب رگرسیون چندجمله‌ای درجه دو کامل برای متغیرهای وابسته (x1 مقدار کود و x2 مقدار آب آبیاری است)

$$a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6 x_1x_2$$

پارامترها	a1	a2	a3	a4	a5	a6
عملکرد	۵/۰	۴/۷	۲/۳	-۰/۰۲	-۰/۰۶	۱/۲
بهره‌وری آب	۱/۲	-۰/۰۷	-۰/۰۱	-۰/۰۰	-۰/۱۷	-۰/۰۱
کارایی مصرف کود	۵/۰	-۰/۰۰	-۰/۰۸	-۰/۶۵	-۰/۱۷	-۰/۱۲

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعه ذرت

صفات	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
عملکرد (تن بر هکتار)	-۰/۲۱	۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۷۰	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	-۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۹۹	۰/۹۹
کارایی مصرف کود (کیلوگرم بر کیلوگرم)	۱/۱	۴/۶	۰/۲۴	۰/۶۸	۰/۹۶



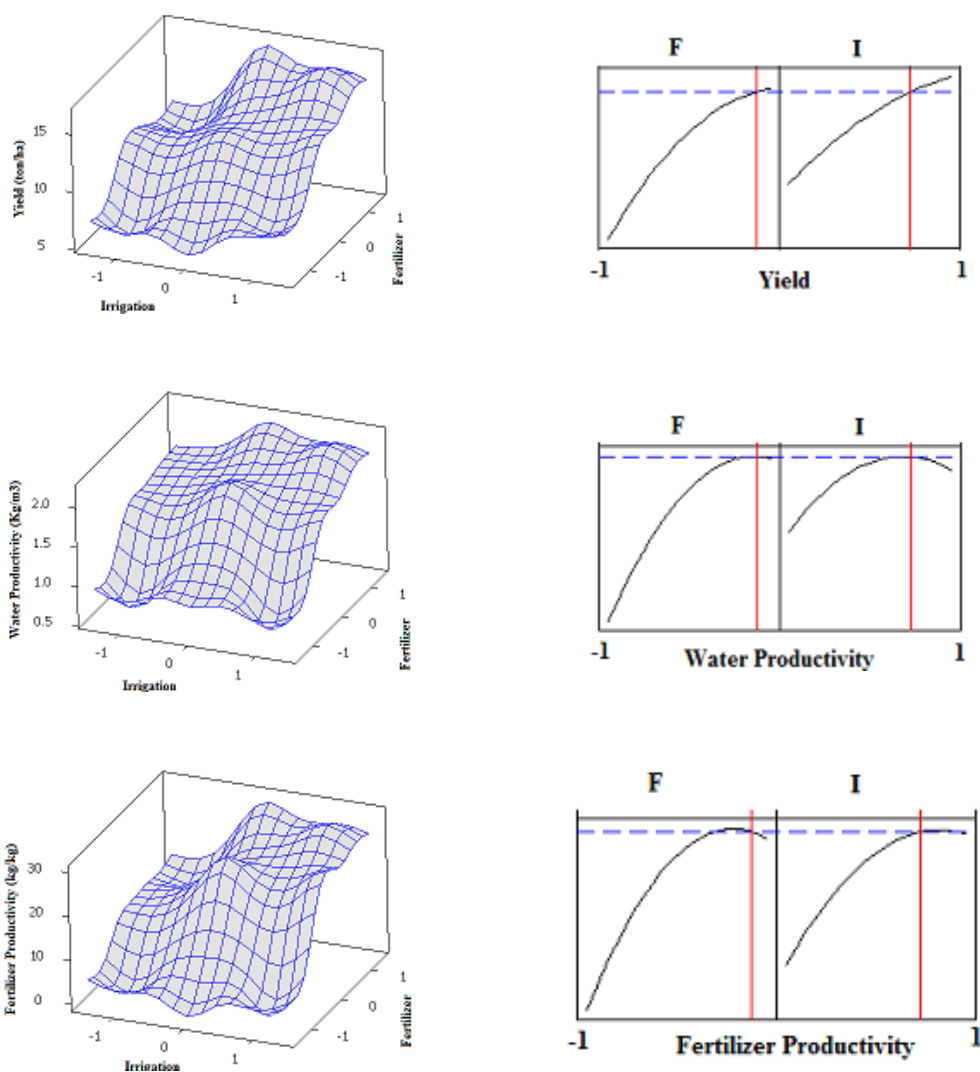
شکل ۳- داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود و مقایسه‌ی خط ۱:۱ (ممتد) با رگرسیون برازش داده‌شده بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده (خط منقطع)

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

صفت	عرض از مبدأ (a)			شیب (b)			T	فرض صفر
	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار		
عملکرد	۰/۸۹	۱/۹	۰/۹۰	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۸۶	پذیرش	a=0 b=1
بهره‌وری آب	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۶۹	۰/۱۵	۱/۷	۰/۸۱	پذیرش	
کارایی مصرف کود	۹/۵۵	۳/۱	۰/۵۵	۰/۱۴	۲/۹۹	۰/۷۵	پذیرش	

اگر به ظرفیت نگهداری آب در خاک توجه نشود، افزایش مقدار آب آبیاری، بهره‌وری آب را به دلیل نفوذ عمقی کاهش می‌دهد. این موضوع توسط محققان مختلف از جمله *Topak et al.*, (2011) و *Masri et al.* (2015) مورد تأیید قرار گرفته است؛ بنابراین تعدیل در مصرف آب برای افزایش بهره‌وری آب پیشنهاد شده است (*Mansouri et al.*, 2014; *Koocheki et al.*, 2015). تغییرات کارایی مصرف کود نسبت به دو عامل مقدار کود (تا محدوده‌ی ۰/۹+) و آب آبیاری (تا محدوده‌ی ۰/۸+) صعودی بود. مقادیر نزدیک به ۱+ برای دو عامل مقدار کود و آب آبیاری سبب کاهش کارایی مصرف کود شد. این تغییرات برای هر سه پارامتر عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود به صورت سطح پاسخ نیز نشان داده شده است (شکل ۴). در مقادیر پایین آب آبیاری، محدوده‌ی نزدیک به صفر برای مقدار کود سبب افزایش عملکرد شد. در مقادیر بالای آب آبیاری، افزایش کود نیز سبب افزایش عملکرد شد. اثرات متقابل آب آبیاری و کود نیز حائز اهمیت است. بر این اساس، اثر مقدار کود بر کارایی مصرف کود بیشتر از آب آبیاری بود، به همین دلیل در شرایط وجود هم‌زمان این دو عامل، مقدار کود بر آب آبیاری مقدم است. این نتایج در جدول (۳) نیز قابل مشاهده است. تغییرات بهره‌وری آب نسبت به هر دو عامل مقدار کود و آب آبیاری متوازن و اثر این دو عامل تقریباً یکسان بود. در جدول (۳) نیز مشاهده می‌شود که معنی‌داری هر دو عامل آب آبیاری و مقدار کود در یک سطح بود.

در شکل (۴)، نحوه تغییرات مقدار عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود نسبت به تغییرات مقدار کود و آب آبیاری آورده شده است. با افزایش مقدار کود (تغییر از ۱- به سمت ۱+)، عملکرد نیز افزایش داشت ولی میزان رشد عملکرد به صورت خطی نبود؛ بنابراین، در مقادیر بالای کود (نزدیک به ۱+) تغییرات عملکرد کمتر از مقادیر پایین کود (نزدیک به ۱-) بود. این روند در افزایش آب آبیاری نیز مشاهده شد. ولی تغییرات عملکرد نسبت به مقادیر آب آبیاری شیب یکنواخت‌تری داشت و نمودار آن به حالت خطی نزدیک‌تر بود. علت آن تأمین مواد مغذی و آب موردنیاز گیاه ذرت در مقادیر نزدیک به آن است. درواقع شیب تغییرات در شرایط عدم کاربرد و تنش (با کد ۱-) بیشتر از شرایط نزدیک به تأمین کامل نیاز گیاه (با کد ۱+) است. به طوری که برخی محققان نیز گزارش نمودند با افزایش اندکی در مقدار بهینه آب و کود، عملکرد ذرت تا ۳ درصد می‌تواند افزایش یابد (*Li et al.*, 2019). افزایش مقدار کود (تغییر از ۱- به سمت ۱+) سبب افزایش بهره‌وری آب شد و تغییرات آن مشابه عملکرد ذرت به دست آمد. افزایش آب آبیاری تا محدوده‌ی ۰/۸+ سبب افزایش بهره‌وری آب گردید. مقادیر بیشتر از آن، بهره‌وری آب را کاهش داد. این نتایج توسط جهان و همکاران (۱۳۹۵) نیز گزارش شده است. 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. درواقع



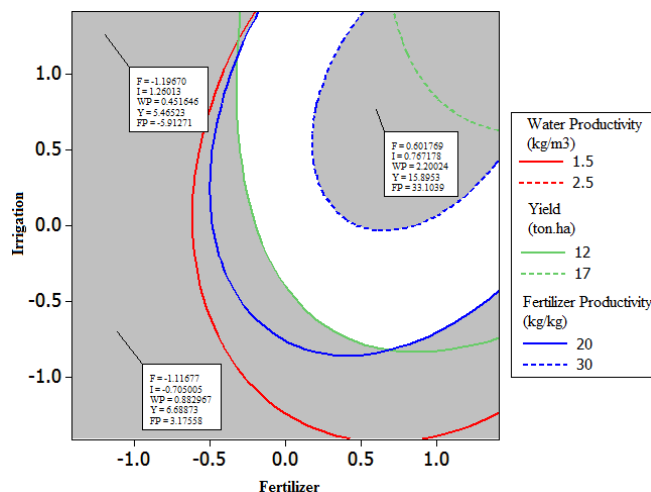
شکل ۴- واکنش پارامترها (سمت راست) و سطح پاسخ (سمت چپ) صفات عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود نسبت به تغییرات مقدار کود (F) و آب آبیاری (I)

آبیاری) بررسی شود. البته مقادیر بالای هر دو عامل سبب کاهش بهره‌وری آب (تا ۲ کیلوگرم بر مترمکعب) و عملکرد (تا ۱۴ تن بر هکتار) می‌گردد. بهینه‌سازی عددی سطوح عوامل مورد مطالعه در جدول (۷) مشاهده می‌شود. مقدار شاخص مطلوبیت بهینه‌سازی برابر با ۰/۹۵ به دست آمد. این شاخص نشان‌دهنده دقت مدل در تعیین حد بهینه برای سطوح مختلف عوامل مورد مطالعه است. با توجه به اینکه مقدار نزدیک به یک برای این شاخص نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است؛ می‌توان به نتایج

برای تعیین سطح مشترک حدود بهینه هر سه پارامتر مورد مطالعه، نقشه هم‌پوشانی آن‌ها به صورت شکل (۵) ترسیم شد. مقادیر بهینه برای پارامترهای عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود به ترتیب در مقادیر ۱۷-۱۲ تن بر هکتار، ۵/۵-۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳۰-۲۰ کیلوگرم بر کیلوگرم تعیین شد. برای دستیابی به بهینه‌ترین حالت، مقدار کود می‌بایست در محدوده‌ی ۰-۱ (۱۰۰-۶۰ درصد نیاز کودی) و مقدار آب آبیاری در محدوده‌ی ۰/۷-۱ (۱۰۰-۷۰ درصد نیاز آب

مصرف کود (۳۳ کیلوگرم بر کیلوگرم) می‌شود. مقدار عملکرد در بیشینه‌ترین حالت مدنظر به دست آمد. بهره‌وری آب نسبت به مقدار هدف کمتر شد ولی کارایی مصرف کود نسبت به مقدار هدف بیشتر شد.

بهبودسازی در این پژوهش اعتماد کرد. با توجه به نتایج بهبودسازی، کاربرد ۱۰۰ درصد نیاز کودی به همراه ۷۱ درصد نیاز آب آبیاری سبب دستیابی به بیشترین مقدار عملکرد (۱۷ تن بر هکتار)، بهره‌وری آب (۲/۳ کیلوگرم بر مترمکعب) و کارایی



شکل ۵- نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته شامل صفات عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود (سطح بهینه با رنگ سفید مشخص شده است)

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

انواع متغیرها	پارامترهای مرد بررسی	هدف	شبیه‌سازی شده	مقدار بهینه
	عملکرد (تن بر هکتار)	۱۷	۱۷	-
متغیرهای وابسته	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲/۵	۲/۳	-
	کارایی مصرف کود (کیلوگرم بر مترمکعب)	۳۰	۳۳	-
متغیرهای مستقل	مقدار کود	۱۰۰	-	-
	مقدار آب آبیاری	۷۱	-	-

لیکن در مطالعه‌ی میدانی، امکان بررسی دقیق‌تر و جزئی‌تر مقادیر آب آبیاری و نیتروژن نبود. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از روش بهبودسازی سطح پاسخ بدین منظور استفاده شد. نتایج بهبودسازی نشان داد که افزایش مقدار کود سبب افزایش همه‌ی صفات شد. ولی کارایی مصرف کود پس از محدوده‌ی $+0/9$ حالت نزولی داشت. افزایش آب آبیاری عملکرد را افزایش داد ولی پس از محدوده‌های $+0/8$ و $+0/9$ به ترتیب بهره‌وری

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های برداشت شده از یک مزرعه تحقیقاتی در کرج، به بهبودسازی مقادیر کود نیتروژن و آب آبیاری بر عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود ذرت پرداخته شد. نتایج حاصل از مطالعات میدانی در مزرعه نیز نشان داده بود که تأمین ۸۰ درصد آب آبیاری به همراه نیاز کامل کود نیتروژن برای ذرت سبب افزایش عملکرد و بهره‌وری می‌گردد.

جهان، م.، نصیری محلاتی، م.، خلیل زاده، ح.، بیگانه، ر.، رضوی، ا. ر. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی 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): ۸۳۹-۸۲۳.

حمید، ز.، سلطانی‌محمدی، ا.، احمدی، م. 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): ۱۰۷-۹۰.

عباسی، ف.، چوکان، ر.، عزیزاده، ح.، معینی، ر.، نوری، ر.، آقایی، ف.، شفیعی، پ. ۱۳۹۰. بررسی اثرات کود آبیاری سطحی بر کارایی مصرف آب، عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت دانه‌ای در کرج. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ۴۰۲۱۲.

عباسی، ف.، چوکان، ر.، غیبی، م. ۱۳۹۴. بررسی امکان کاهش تلفات نیتروژن در کودآبیاری جویچه‌ای ذرت دانه‌ای. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ۴۸۷۲۸.

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

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

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 J. S. Hunter. 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.

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

آب و کود را کاهش داد. حدود بهینه‌ی مقدار کود و آب آبیاری به ترتیب در محدوده‌ی ۱-۱۰۰ (۶۰-۱۰۰ درصد نیاز کودی) و مقدار آب آبیاری در محدوده‌ی ۱-۰/۷ (۷۰-۱۰۰ درصد نیاز آب آبیاری) بود. با بهینه‌سازی کلیه سطوح، حد بهینه آب آبیاری و کود به ترتیب ۷۱ و ۱۰۰ درصد نیاز گیاه به دست آمد که به نتایج مزرعه‌ای نزدیک است. در این شرایط، عملکرد، بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود به ترتیب ۱۷ تن بر هکتار، ۲/۳ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳۳ کیلوگرم بر کیلوگرم تعیین شد. در این پژوهش فقط صفات کمی بررسی شدند و دقت این روش نشان داد که می‌توان نتایج را به سایر صفات نیز تعمیم داد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای کاهش هزینه‌ها در مطالعه صفات کیفیت ذرت این روش بررسی و استفاده گردد.

منابع

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

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ.، احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. مدیریت آب در کشاورزی. ۵ (۲-۱۰): ۶۴-۵۳. بی‌نام، ۱۳۹۸. آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، مرکز ملی آمار ایران.

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

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

Kalavathy, H.M., Regupathib, I., Pillai, M.G. and 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Preza-fontes, G., Pittelkow, C. M., Greer, K. D., Bhattarai, R. and Christianson, L.E. 2021. Split-nitrogen application with cover cropping reduces subsurface nitrate losses while maintaining corn yields, *Journal of Environmental Quality*, 50: 1408-1418.
- Topak, R., Süheri, S. and Acar, B. 2011. Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality, and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey. *Irrigation Science*. 29(1): 79-89.
- 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.

Optimization of Nitrogen Fertilizer and Irrigation Water Using Response-Surface Methodology (RSM) in Corn Cultivation

S. K. Pazhoohideh¹, A. Egdernezhad^{2*}, F. Abbasi³ and S. Sepehri Sadeghiyan⁴

Abstract

The purpose of this research was to determine the optimal amounts of nitrogen fertilizer and irrigation water to achieve maximum yield (Y), water productivity (WP) and fertilizer productivity (FP). For this purpose, the research was carried out on a 370 double cross hybrid corn in the 500-hectare farm of the Seed and Plant Improvement Institute (SPII) for two crop years, using response surface method. The tested factors included the amount of irrigation water at three levels ($I_1:100$, $I_2:80$ and $I_3:60\%$ of water requirement) and nitrogen fertilizer at three levels ($F1:100$, $F2:60$, and $F3:0\%$ of fertilizer requirement). The results showed that the model used had an acceptable error for predicting yield (7.3%), water productivity (9.3%), and fertilizer productivity (24%). The accuracy of this model for predicting the desired traits was in the excellent ($NRMSE \leq 0.1$), excellent ($NRMSE \leq 0.1$), and moderate ($0.2 \leq NRMSE \leq 0.3$) categories, respectively. The efficiency of the desired model was also favorable ($d \geq 90$ and $EF \geq 0.5$). By increasing the amount of fertilizer (changing from -1 to +1), the yield also increased, but the rate of yield growth was not linear. The yield changes compared to irrigation water had a more uniform slope and its growth was closer to a linear line. The increase of irrigation water up to the range of +0.8 increased the efficiency of water consumption. Moreover, it reduced the efficiency of water consumption. The changes in the efficiency of fertilizer consumption were positive compared to the two factors of nitrogen fertilizer (up to the range of +0.9) and irrigation water (up to the range of +0.8). The optimal amounts of nitrogen fertilizer and irrigation water were in the range of 60-100% of fertilizer requirement and 70-100% of irrigation water requirement, which after optimization were determined as 71% and 100%, respectively. In these conditions, corn yield, water, and fertilizer productivity were 7 tons/ha, 2.3 kg.m^{-3} , and 33 kg.kg^{-1} , respectively.

Keywords: Fertilizer Stress, Fertilizer Use Efficiency, Optimal Performance, Water Productivity, Water Stress

¹ M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

² Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran (*Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)

³ Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

⁴ Assistant professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 21 Oct 2022

Accepted: 25 Dec 2022