نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۰ / شماره ٤ / ۱۳۹۵
DOI: http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2017.109007

بهینه‌سازی مصرف آب و کود در کودآبیاری ذرت دانه‌ای

حمزه علی علیزاده[۱]* و فریبرز عباسی

استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام.
H.alizadeh@ilam.ac.ir
عضو هیئت علمی (استاد) مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
fa.abbasi@areeo.ac.ir

چکیده

بهینه‌سازی مصرف آب و کود،علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید و حفظ منابع، باعث کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه این منابع می شود. در این مطالعه به منظور بهینه‌سازی مصرف آب و کود اوره ذرت دانه‌ای رقم دابل کراس ۳۷۰، آزمایشی به صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار طی سال‌های زراعی ۸۷-۱۳۸۶ و ۸۹-۱۳۸۸روی جویچه‌های انتها باز با طول ۱۶۵ متر در مزرعه ۴۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذرکرج انجام شد. فاکتور اول شامل چهار سطح آب (W)؛ ۶۰٪، ۸۰٪، ۱۰۰٪ و۱۲۰٪ آبیاری کامل و فاکتور دوم شامل چهار سطح کود (N)؛ شاهد بدون کود، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ توصیه کودی به روش کودآبیاری بود. کود اوره در چهار تقسیط مساوی (قبل از کاشت، مرحله هفت برگی، مرحله ساقه رفتن و مرحله سنبله‌دهی) به خاک داده شد. برای انتخاب بهترین ترکیب آب و کود، ابتدا توابع تولید عملکرد، هزینه و درآمد خالص بر حسب آب و کود مصرفی در شرایط محدودیت آب و محدودیت زمین با استفاده از آزمون رگرسیون چندگانه استخراج شد. سپس با استفاده از تابع هدف حداکثر درآمد خالص سطوح بهینه آب و کود محاسبه شد. نتایج آزمون رگرسیون چندگانه در سطح پنج درصد نشان داد که بهترین رابطه بین عملکرد ذرت دانه‌ای و مقدار مصرف هر یک از نهاده‌های آب و کود تابع درجه دوم می‌باشد (مقدار R^2=0.83 و ME=15.53%). سطح بهینه کود مصرفی به عمق آب آبیاری وابسته است به طوری که با افزایش مقدار آب آبیاری، سطح بهینه کود مصرفی افزایش می‌یابد. نتایج بهینه‌سازی توابع تولید نشان داد که در شرایط محدودیت زمین، سطوح بهینه آب و کود اوره مصرفی برای دستیابی به حداکثر سود خالص به ترتیب ۹۴۰ میلیمتر و ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. لیکن در شرایط محدودیت آب، مصرف ۷۷۴ میلیمتر (۷۷ درصد آب مصرفی) و ۳۵۷ کیلوگرم کود اوره در هکتار(۹۰ درصد نیاز کودی) سطوح بهینه مصرف آب و کود می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تابع تولید، سطح بهینه آب، تابع درآمد.

۱- آدرس نویسند مسئول: ایلام، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام.

*- دریافت: آذر ۱۳۹٤ و پذیرش: دی ۱۳۹۵

مقدمه

مصرف بهینه آب و کود اوره یکی از مهم‌ترین اهداف کشاورزی به ویژه در مناطق خشک به سبب کمبود منابع آب و آلودگی منابع آب می‌باشد (پلایان و فاسی، ۱۹۹۷). هدف از بهینه‌سازی مصرف آب، حصول حداکثر عملکرد یا درآمد با کمترین مقدار آب مصرفی و هدف از بهینه‌سازی مصرف کود حصول حداکثر درآمد با کمترین مصرف کود می‌باشد.

ذرت یکی از محصولات تابستانه با نیاز آبی زیاد است که معمولاً بعد از برداشت جو یا گندم، هنگام محدودیت شدید آب کشت می‌شود. با کم‌آبیاری در شرایط محدودیت آب می‌توان با صرفه‌جویی در مصرف آب، سطح زیر کشت را افزایش داده و از این طریق سود بیشتری را نسبت به شرایط آبیاری کامل بدست آورد (انگلیش، ۱۹۹۰). ذرت به کم‌آبی بسیار حساس (کاکایر، ۲۰۰٤، پاندی و همکاران، ۲۰۰۰) بوده و تنش آبی باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (پایرو و همکاران، ۲۰۰٦). با این حال، با اعمال تنش‌های آبی ملایم در ذرت می‌توان در مقدار آب مصرفی صرفه‌جویی کرد (فاری و فاسی، ۲۰۰۹). ذرت علاوه بر آب، به مقدار زیادی نیتروژن نیاز دارد. با افزایش مقدار نیتروژن مصرفی تا سطح بهینه عملکرد و اجزای عملکرد ذرت افزایش پیدا می‌کند (لیانگ و ماکنزی، ۱۹۹٤، زندپارسا و سپاسخواه، ۲۰۰۱).

بدیهی است که وجود هر یک از نهاده‌های آب و کود برای رشد و افزایش عملکرد ضروری است و کمبود یکی از آنها بر کارایی مصرف دیگری مؤثر است. زمانی که آب به کار رفته از طریق آبیاری کمتر از مقدار نیاز آبی گیاه باشد به کار بردن کود بر مبنای آبیاری کامل باعث افزایش پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی در آینده می‌شود (تیرسلین و همکاران، ۲۰۰۰). زیرا با کاهش رطوبت خاک، مقدار معدنی شدن نیتروژن آلی و انتقال نیترات به سمت ریشه‌ها کاهش و به تبع آن جذب نیتروژن در گیاهان کاهش یافته و نیتروژن در خاک باقی می‌ماند. هر چند با افزایش مقدار آب و نیتروژن عملکرد ماده خشک افزایش می‌یابد (پاندی و همکاران، ۲۰۰۰، ژانگ و اویس، ۱۹۹۹، پنگ و لتی، ۱۹۹۸). اما مصرف بیش از اندازه نیز باعث هدرروی منابع و ایجاد آلودگی-های زیست محیطی می‌شود (پنگ و لتی، ۱۹۹۸). لیو و ژانگ (۲۰۰۷) نشان دادند که عملکرد ذرت با افزایش مقدار آب و نیتروژن تا سطوح بهینه‌ی مصرف افزایش می‌یابد. در آزمایشی دیگر اُیکه و همکاران (۱۹۸۸) در نیجریه نشان دادند که با افزایش میزان نیتروژن از صفر تا ۱۰۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مقدار عملکرد دانه افزایش یافته و افزایش مقدار نیتروژن از ۱۰۹ تا ۱۲۰ کیلوگرم در میزان عملکرد دانه تغییری ایجاد نمی‌کند. انگلیش (۱۹۹۰) با ترکیب کار محققین مختلف برای بررسی اثرات کم‌آبیاری تابع تولید را ارائه نمود. مدل انگلیش الگوریتمی برای بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری برای استفاده بیشینه از واحد حجم آب در دو وضعیت محدودیت آب و زمین است. وی با دو قیمت متفاوت برای گندم گزارش کرد که با کم‌آبیاری در شرایط محدودیت آب می توان در مصرف آب ۵۰ درصد صرفه‌جویی و سطح زیر کشت را دو برابر کرده و تا ۱۱ درصد سود بیشتر نسبت به شرایط محصول بیشینه (آبیاری کامل) به دست آورد. توکلی و فرداد (۱۳۸۰) با به کار بردن تحلیل انگلیش (۱۹۹۰) ضمن ارزیابی اقتصادی کم‌آبیاری روی محصول چغندر قند گزارش کردند که آبیاری کامل بیشترین محصول را به‌دست می دهد اما با ۳٤ درصد کاهش آب مصرفی می توان بالاترین سود به ازاء مصرف واحد حجم آب را به‌دست آورد. تحلیل کم آبیاری وقتی تابع تولید دارای دو متغیر آب و نیتروژن باشد اولین بار توسط زند پارسا و سپاسخواه (۲۰۰۱) برای محصول ذرت به کار برده شد. در تحلیل ایشان تابع تولید و هزینه با دو متغیر آب و نیتروژن و به ترتیب از درجه دو و یک بود. طبق نتایج آن‌ها مقدار بهینه آب در شرایط محدودیت آب ۲٦/۵ درصد کمتر از مقدار آب لازم برای تولید

حداکثر محصول بود اما سطح زیر کشت را ۳٦ درصد افزایش می‌داد و درصد سود خالص بیشتری را در بر داشت.

کودها باید براساس یک برنامهٔ مدیریت تغذیه‌ای که کل عناصر غذایی قابل دسترس موجود در مزرعه را مدنظر قرار می‌دهد، مصرف شوند. زمان مصرف کودها نیز مهم است. زیرا نیازهای گیاه در مراحل مختلف نموی، متفاوت است. مؤثرترین و کارآمدترین مدیریت پخش کود زمانی حاصل می‌شود که در طول دوره رشد گیاه و ایامی که گیاه به مواد غذایی بیشتری نیازمند است، بتوان مقدار کافی مواد غذایی محلول را در خاک مرطوب با تهویه مناسب در اختیار ریشه گیاه قرار داد. آب آبیاری سریع‌ترین، مؤثرترین و کم هزینه‌ترین وسیله برای نیل به اهداف فوق است. به این تکنیک مدیریت کودی که در آن کود همراه با آب آبیاری به کار می‌رود کودآبیاری گفته می‌شود. کودآبیاری باعث افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب و کود می‌شود (تراوره و همکاران، ۲۰۰۰). هر چند کودآبیاری در سامانه‌های آبیاری تحت فشار به علت بازده آبیاری بیشتر، رایج‌تر است لیکن تحقیقات اخیر راه را برای استفاده از این روش کارایی پخش کود در آبیاری سطحی را نیز فراهم نموده است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱، عباسی و همکاران، ۱۳۸۸، علیزائه و همکاران، ۱۳۸۹، بولت و همکاران، ۱۹۹٤، هو و همکاران، ۲۰۰۷، پلایان و فاسی، ۱۹۹۷).

نظر به اینکه بیش از ۹۰ درصد اراضی آبی جهان با روش‌های سطحی آبیاری می‌شوند (تیرسلین و همکاران، ۲۰۰۰)، پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز آبیاری سطحی به عنوان یکی از رایج‌ترین سیستم‌های تامین آب در مزارع کشاورزی مطرح و کودآبیاری به عنوان یکی از راه‌های افزایش عملکرد محصولات کشاورزی مطرح خواهد بود. زیرا روش‌های معمول (پخش سطحی) هم گران هستند و هم اینکه فقط در دوره کوتاهی از فصل داشت قابل پخش هستند. لذا ضرورت تحقیق در خصوص کودآبیاری با سیستم‌های آبیاری سطحی آشکار می‌گردد. هدف از این تحقیق بهینه‌سازی مصرف آب و کود اوره تحت مدیریت کودآبیاری در آبیاری جویچه‌ای ذرت دانه‌ای در کرج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال‌های زراعی ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹در مزرعه ٤۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) با طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵٦ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا انجام شد. منطقه از نظر آب و هوایی بر اساس طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق نیمه خشک با زمستان سرد می‌باشد. بر اساس آمار ۱۰ سالهٔ ایستگاه هواشناسی کرج، متوسط بارندگی سالیانه ۲٤۵/۸ میلیمتر و متوسط درجهٔ حرارت هوا ۱۵ درجهٔ سانتیگراد است. حداقل درجهٔ حرارت محیط در دی‌ماه و حداکثر آن در مرداد ماه اتفاق می‌افتد. توزیع بارندگی در طول سال غیریکنواخت بوده و کمترین میزان بارندگی در شهریور ماه (۵/۳ میلیمتر) و بیشترین مقدار بارش در اسفند ماه (٤۹/۹ میلیمتر) گزارش شده است.

برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. بافت خاک مزرعه با روش هیدرومتری و جرم مخصوص ظاهری با روش استوانه دست نخورده تعیین شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک مزرعه آزمایشی

عمق خاک cm	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	EC (dS/m)	pH	رطوبت در FC (درصد حجمی)	رطوبت در PWP (درصد حجمی)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)
۰-۲۰	لوم	۱/۳۴	۱/۱۶	۷/۷۷	۲۹	۱۵	۴۵
۲۰-۴۰	لوم	۱/۴۶	۰/۸۲	۷/۶۷	۲۹	۱۵	۴۴
۲۰-۶۰	لوم	۱/۴۷	۰/۸۰	۷/۸۵	۲۸	۱۶	۴۴
۶۰-۸۰	لوم	۱/۵	۰/۸۷	۷/۶۹	۲۸	۱۶	۴۳

آزمایش‌های مزرعه‌ای به روش فاکتوریل دو عاملی با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) در چهار تکرار روی جویچه‌های انتها باز اجرا گردید. فاکتور اول شامل چهار سطح آبیاری (W): ٦٠٪، ٨٠٪، ١٠٠٪ و ١٢٠٪ نیاز آبی و فاکتور دوم شامل چهار سطح کود (N): شاهد (بدون کود)، ٦٠٪، ٨٠٪ و ١٠٠٪ کود مورد نیاز بود. مقدار کود مورد نیاز طبق آزمون تجزیه خاک، و آب مورد نیاز برای آبیاری کامل بر اساس تبخیر از سطح تشت کلاس A و اعمال ضرایب تشت تبخیر (Kp) و گیاهی (Kc) تعیین گردید. کودهای سولفات پتاسیم و سوپر فسفات تریپل با توجه به نیاز خاک پیش از کاشت در تمام تیمارها به صورت یکسان در سطح خاک پخش گردید.

نیتروژن مورد نیاز گیاه از طریق کود اوره تأمین و همراه آب آبیاری (کودآبیاری) طی دوره رشد در چهار تقسیط مساوی (قبل از کاشت، مرحله هفت برگی، مرحله ساقه رفتن و مرحله سنبله زدن) مورد استفاده قرار گرفت. تعیین زمان مناسب اعمال تقسیط‌های کودی بر اساس دوره‌های حساس ذرت به مواد غذایی صورت گرفت (ملکوتی و ریاضی همدانی، ١٣٧٠). میزان مقدار کود مورد نیاز تیمار ١٠٠ درصد نیاز کودی ٤٠٠ کیلوگرم بر هکتار اوره ٤٦ درصد و برای سایر سطوح ضریبی از این مقدار در نظر گرفته شد. برای تزریق کود به جویچه‌ها از بشکه‌های بزرگ (٢٢٠ لیتری) استفاده گردید (جزئیات مربوط چگونگی تزریق کود در منبع عباسی و همکاران، ١٣٨٩). برای جلوگیری از تلفات بیشتر کود و افزایش یکنواختی توزیع کود، تزریق کود در زمان‌های انتهایی آبیاری انجام می‌شد (عباسی و همکاران، ١٣٩١).

پنج جویچه برای هر بلوک (سه جویچه اصلی برای برداشت و دو جویچه کناری به عنوان حاشیه)، دو جویچه برای تفکیک هر بلوک از بلوک مجاور و دو جویچه برای اثر حاشیه دو بلوک کناری در نظر گرفته شد. شیب عمومی مزرعه ٠/٠٠٦ متر بر متر، فواصل جویچه‌ها ٧٥ سانتی‌متر و طول جویچه‌ها طول قطعه زراعی (١٦٥ متر) در نظر گرفته شد. در همه آبیاری‌ها، به منظور کاهش رواناب و تلفات کود از رژیم کاهش جریان استفاده شد. سطوح آبیاری ٢٥ روز بعد از کاشت اعمال گردید. برای اعمال تیمارهای آبیاری، ابتدا با استفاده از داده‌های تشت تبخیر (داده‌ها به صورت روزانه از یک ایستگاه هواشناسی که در فاصله حدود دو کیلومتر مزرعه قرار داشت، تهیه می‌شد.) نیاز آبی هر تیمار تعیین می‌شد. هدایت الکتریکی آب چاه مورد استفاده برای آبیاری ٠/٥٤ دسی‌زیمنس بر متر و pH آن حدود ٧/٥ بود. برای اعمال حجم آب مورد نظر و اندازه‌گیری راندمان آبیاری در هر آبیاری، حجم آب ورودی و خروجی با استفاده از فلوم‌های W.S.C اندازه‌گیری می‌شد. معادلات نفوذ با استفاده از زمان پیشروی و پسروی استخراج می‌شد. عمق آب نفوذ یافته در هر نقطه، متوسط عمق آب نفوذ یافته و تلفات نفوذ عمقی با استفاده از معادلات نفوذ و زمان آبیاری محاسبه می‌شد. دور آبیاری بین شش تا نه روز طی فصل رشد و با توجه به رطوبت خاک متغیر بود. رطوبت خاک توسط رطوبت‌سنج ترایم (TRIME FM) کالیبره شده با شرایط خاک مزرعه اندازه‌گیری می‌شد. عمق خالص و ناخالص آبیاری تیمارهای مختلف آبی در دو سال زراعی در جدول (٢) ارائه شده است.

جدول ٢- مقادیر آب مصرفی تیمارهای مختلف آبی

سال	تیمارهای آبی	$W_{60\%}$	$W_{80\%}$	$W_{100\%}$	$W_{120\%}$
١٣٨٧	خالص (میلی‌متر)	٥٢٥	٦٤٥	٧٤٦	٨٥٨
	ناخالص (میلی‌متر)	٦٩٨	٨٤٧	١١٣٧	١٢٦١
١٣٨٩	خالص (میلی‌متر)	٤٧٨	٥٩٣	٦٨٥	٧٨٨
	ناخالص (میلی‌متر)	٦٢٨	٧٦٢	١٠٠٠	١١٣٥

بذر مصرفی ذرت از نوع هیبرید دابل کراس ٣٧٠ بود که با تراکم ٨٥ هزار بوته در هکتار به وسیله ماشین خطی کار در هر دو سال زراعی در تاریخ ٢٨ خرداد کاشته شد. مبارزه با علف‌های هرز از طریق سم‌پاشی با استفاده از سم

آترازین با دوز ۱/۵ لیتر بر هکتار قبل از کاشت و وجین دستی طی فصل رشد انجام شد.

تئوری

به منظور استخراج توابع تولید از داده‌های سال ۱۳۸۷ و آزمون رگرسیون چندگانه نرم افزار $SPSS_{14.5}$ استفاده شد. برای این منظور فرم‌های درجه یک، دو و سه رگرسیونی مورد آزمون قرار گرفت. از بین فرم‌های رگرسیونی (معنی‌دار در سطح پنج درصد)، تابع رگرسیونی درجه دو برای همه توابع فوق دارای کمترین RMSE و بیشترین تناسب با داده‌های اندازه‌گیری شده بود (جدول ٤). بنابراین توابع تولید به شرح زیر خواهد بود:

$$Y(N) = b_0N^2 + b_1N + b2$$

(۱)

$$Y(W) = a_0W^2 + a_1W + a_2$$

(۲)

$$Y(W,N) = c_0 + c_1W + c_2W^2 + c_3N + c_4N^2 + c_5(W\times N) + c_6(W^2\times N) + c_7(W\times N^2) + c_8$$

(۳)

با توجه به هزینه‌های آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت می‌توان هزینه‌های تولید را به صورت تابعی از آب و کود مصرفی (C(W,N)) بیان نمود.

$$C(W,N) = d_0 + d_1W + d_2N$$

(٤)

که در آن:

d_0 هزینه‌های آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت (به استثنای آب و کود مصرفی) مشترک در همه تیمارهای مطابق قیمت‌های سال ۱۳۸۹ می‌باشد.

با توجه به روابط ۱ تا ٤ می‌توان تابع درآمد خالص (I(W,N)) را بر حسب کود و آب مصرفی بیان نمود:

$$I(W,N) = A(p\times Y(W,N) - C(W,N))$$

(۵)

که در آن:

A، P، $Y(W,N)$ و $C(W,N)$ به ترتیب مساحت مزرعه، قیمت محصول، تابع تولید و تابع هزینه می‌باشند. در شرایطی که زمین محدود باشد مساحت (A) ثابت است، ولی در شرایطی که آب محدود کننده باشد مساحت از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$A = \frac{W_T}{w}$$

(٦)

که در آن:

W_T و w به ترتیب مقدار آب قابل عرضه و میزان آب آبیاری در تیمار هدف می‌باشد.

بدیهی است که برای دستیابی به ترکیب سطوح آبیاری و کودی که در آن بیشترین درآمد خالص حاصل گردد باید از تابع درآمد خالص نسبت به هر دو نهاده مشتق گرفته شده و از حل دستگاه زیر به جواب مطلوب دست پیدا کرد:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dW} = A\frac{di(W,N)}{dW} + i(W,N)\frac{dA}{dW} = 0 \\ \frac{dI}{dN} = A\frac{di(W,N)}{dN} + i(W,N)\frac{dA}{dN} = 0 \end{cases}$$

(۷)

در شرایطی که محدودیت زمین وجود داشته باشد و فرض شود آلودگی نیترات روی محیط قابل ملاحظه نباشد آنگاه $\frac{dA}{dN} \& \frac{dA}{dW} = 0$ و در شرایطی که آب محدود کننده باشد $\frac{dA}{dN} = 0$ خواهد شد. در این صورت برای دستیابی به ترکیب اقتصادی آب و کود در شرایط محدودیت زمین و آب به ترتیب از روابط ۸ و ۹ استفاده گردید.

$$\begin{cases} \frac{dI}{dW} = A\frac{di(W,N)}{dW} = 0 \\ \frac{dI}{dN} = A\frac{di(W,N)}{dN} = 0 \end{cases}$$

(۸)

$$\begin{cases} \dfrac{dI}{dW}=A\dfrac{di(W,N)}{dW}+i(W,N)\dfrac{dA}{dW}=0 \Rightarrow W\dfrac{di(W,N)}{dW}=i(W,N) \\ \dfrac{di(W,N)}{dN}=0 \end{cases} \quad (۹)$$

صحت‌سنجی توابع تولید با استفاده از آماره‌های بیشینه خطای نسبی (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، کارآیی مدل‌سازی (EF) و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) انجام شد. بیان ریاضی آماره‌های یاد شده به‌صورت زیر است:

$$ME = max\left|P_i - O_i\right|_{i=1}^{n} \times \frac{100}{\overline{O}} \quad (۱۰)$$

$$nRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\overline{O}} \quad (۱۱)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۲)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i - \sum_{i=1}^{n}P_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i} \quad (۱۳)$$

که در آن‌ها:

Pi مقادیر برآورد شده، Oi مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و $\overline{O}$ میانگین مقادیر Oi می‌باشد. آماره‌های ME و NRMSE بر حسب درصد و آمارهای EF و CRM بدون بعد می‌باشند.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل عملکرد محصول

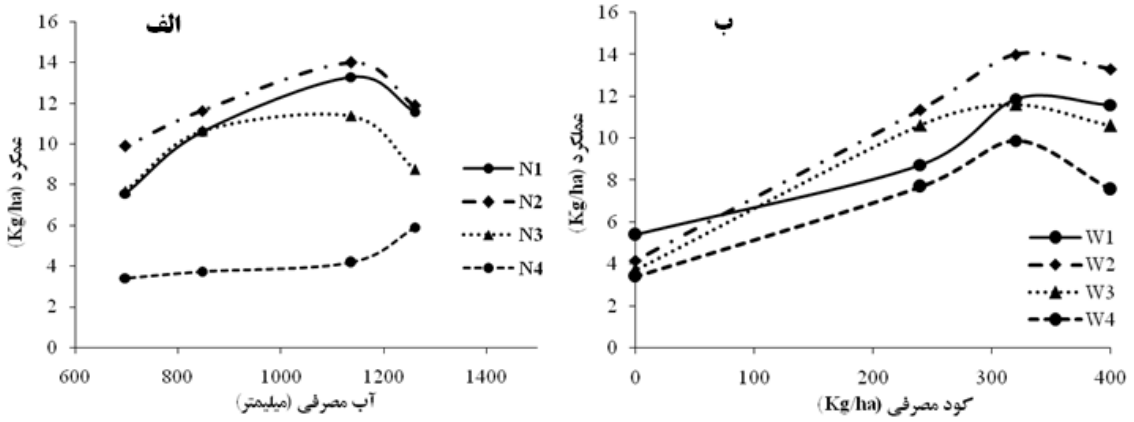
نتایج حاصل از تجزیه واریانس عملکرد ذرت در سطوح مختلف آبی و کودی و اثرات متقابل آن‌ها طی دو سال زراعی در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد اثر مقادیر مختلف آب مصرفی و کود نیتروژن بر عملکرد ذرت دانه‌ای در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار ولی اثر متقابل آب و کود معنی‌دار نبود.

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد ذرت در سطوح مختلف کودی و آبی در دو سال متوالی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مجموع مربعات	F	Sig
فاکتور آب	۳	۱۵۸/۸۲	۴۷۶/۷	۴/۰۴	۰/۰۰**
فاکتور کود	۳	۱۸۶/۵۶	۵۵۹/۷	۱۵/۷۹	۰/۰۰**
آب × کود	۹	۶/۰۳	۵۴/۲	۰/۵۷	۰/۸۰ns
سال	۱	۳۶/۰	۳۸/۲	۳/۴۵	۰/۰۶ns
سال × تکرار	۶	۳۶/۴۵	۲۱۸/۷	۳/۵۵	۰/۰۳*
خطا	۱۰۵	۱۰/۲۵	۱۰۷۶/۸	–	–

استخراج تابع تولید

عملکرد ذرت در مقابل سطوح مختلف آب مصرفی (برای چهار سطح کودی مختلف) و کود مصرفی (برای چهار سطح مختلف آبی) در شکل (۱) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در همه سطوح آبی، با افزایش کود مصرفی تا سطح بهینه افزایش یافته و از آن به بعد افزایش کود، کمکی به افزایش عملکرد نمی‌نماید (شکل ۱ ب). همچنین نتایج نشان می‌دهد که در همه سطوح کودی به استثنای سطح کودی صفر (بدون مصرف کود) با افزایش آب مصرفی تا سطح بهینه، عملکرد افزایش یافته و از آن به بعد نه تنها افزایش آب مصرفی، کمکی به افزایش عملکرد نمی‌کند بلکه با شستشوی بیشتر کود باعث کاهش عملکرد محصول نیز می‌شود (شکل ۱الف). لیانگ و همکاران (۱۹۹۴) و زندپارسا و سپاسخواه (۲۰۰۱) در تحقیقاتی مجزا اثر سطوح مختلف آب و کود مصرفی بر عملکرد ذرت دانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که سطح بهینه کود مصرفی بستگی به میزان آب مصرفی و همچنین سطح بهینه آب مصرفی به بستگی مقدار کود مصرفی دارد که از این حیث با نتایج تحقیق حاضر مشابهت دارد.



شکل ۱- عملکرد محصول ذرت در آب و کود اوره مصرفی

برای بررسی اثرات تنش‌های کودی و آبی و اثر همزمان آن‌ها بر عملکرد محصول، توابع تولید کود – عملکرد، آب مصرفی – عملکرد و اثر متقابل کود و آب مصرفی بر عملکرد با استفاده از آزمون رگرسیون چندگانه و داده‌های سال ۱۳۸۷ استخراج شد. در جدول ٤ نتایج آزمون رگرسیون برای استخراج بهترین تابع تولید کود– عملکرد، آب - عملکرد و آب - کود - عملکرد با استفاده از نرم افزار SPSS ارائه شده است. نتایج آزمون رگرسیون چندگانه در سطح پنج درصد نشان داد که رابطه بین عملکرد ذرت دانه‌ای و مقدار مصرف هر یک از نهاده‌های آب و کود تابع درجه دوم می‌باشد. لازم به ذکر است که ضرایب توابع تولید آب - عملکرد و کود عملکرد با استفاده از نرم افزار SPSS و ضرایب تابع تولید اثرات متقابل بعد از اطمینان از معنی‌دار بودن اثرات متقابل در نرم افزار SPSS با استفاده از نرم افزار STATISTICA استخراج شد.

جدول ۴- تحلیل آزمون رگرسیون و انتخاب بهترین تابع تولید

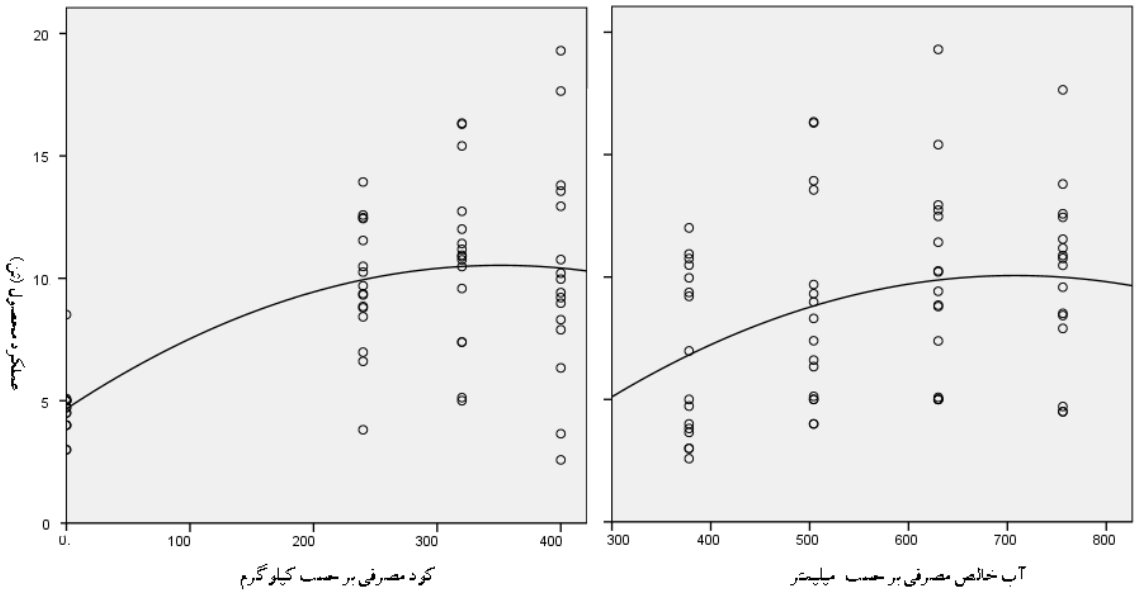
تابع تولید		df_{Reg}*	df_{Res}**	F	sign	R^2
آب - عملکرد	درجه یک	۳	۱۲	۱/۴	۰/۲۶	۰/۱۳
	درجه دو	۳	۱۲	۶/۸	۰/۰۱۵	۰/۶۶
	درجه سه	۳	۱۲	۶/۵	۰/۰۱۷	۰/۵۹
کود - عملکرد	درجه یک	۳	۱۲	۲۹/۶	۰/۰۰۰	۰/۶۸
	درجه دو	۳	۱۲	۱۵/۳	۰/۰۰۰	۰/۸۴
	درجه سه	۳	۱۲	۱۱/۰	۰/۰۰۱	۰/۷۳
آب– کود - عملکرد (درجه دو)		۳	۱۲	–	–	۰/۸۳

* – درجه آزادی رگرسیون و ** – درجه آزادی باقیمانده

در شکل ۱ تابع تولید به صورت تابعی از کود اوره مصرفی برای همه سطوح آبی و آب مصرفی برای همه سطوح آبی ارائه شده است. تابع تولید درجه دوم آب – عملکرد، کود – عملکرد و ضرایب این توابع با استفاده از آزمون رگرسیون چندگانه به صورت معادلات ١٤ و ١٥ استخراج شد. ژانگ و اویس (۱۹۹۹) طی یک مطالعه ده ساله بر روی گندم تحت شرایط آبیاری تکمیلی و بارندگی مختلف نشان داد که تابع تولید عملکرد - آب مصرفی یک تابع درجه دوم می‌باشد که با نتایج تحقیق حاضر مشابهت دارد.

$$Y(N) = 3336N - 0.047N^2 + 4668 \qquad (١٤)$$

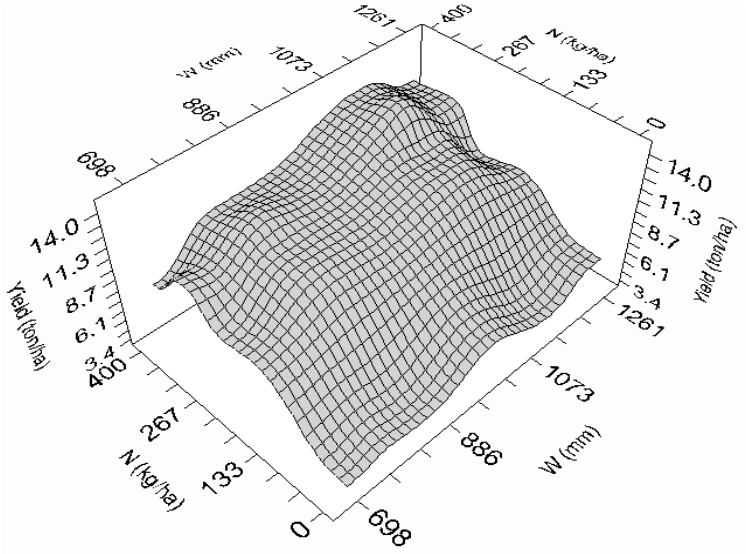
$$Y(W) = 83.14 \times W - 0.038W^2 - 31888 \qquad (١٥)$$



شکل ٢- خروجی مدل SPSS برای شبیه‌سازی تابع تولید به صورت تابعی از آب و کود مصرفی

در شکل ٣ عملکرد خشک ذرت دانه‌ای در سطوح مختلف آب و کود مصرفی ارائه شده است.همچنین تابع تولید ذرت دانه‌ای به صورت تابعی از کود اوره مصرفی و آب آبیاری و همچنین ضرایب این توابع با استفاده از آزمون رگرسیون چندگانه به صورت زیر استخراج شد.

$$Y(W,N) = -0.0026W^2 + 7.56W - 0.04409N^2 + 24.61N + 0.009175W \times N + 0.935 \qquad (١٦)$$

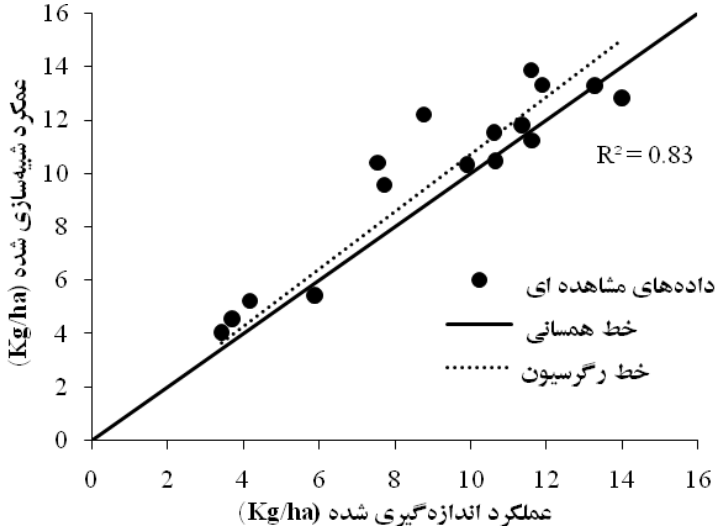


شکل ٣- نمایش گرافیکی تابع تولید عملکرد محصول نسبت به آب و کود اوره مصرفی

صحت‌سنجی تابع تولید

در شکل (٤) مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده با تابع تولید رابطه ١٦ و عملکرد مشاهده‌ای سال ١٣٨٩ارائه شده است. همچنین در جدول (٥) شاخص‌های آماری ارزیابی اطمینان‌پذیری تابع تولید ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تابع تولید استخراج شده مقادیر عملکرد

را به صورت تابعی از دو متغیر آب و کود مصرفی به خوبی با ضریب تبیین بالای ۰/۸۳ شبیه‌سازی می‌نماید.



شکل ۴- عملکرد شبیه‌سازی شده با تابع تولید در مقابل عملکرد مشاهده‌ای سال ۱۳۸۹

جدول ۵- شاخص‌های آماری ارزیابی تابع تولید

RMSEn (%)	ME (%)	R^2	CRM	EF
۱۶/۴۳	۱۵/۵۳	۰/۸۳	-۰/۰۹	۰/۷۹

سطوح بهینه مصرف آب و کود

همان‌طور که بیان شد عملکرد محصول را می‌توان به صورت تابعی از آب و کود مصرفی (Y(W,N)) بیان نمود. همچنین هزینه‌های تولید را می‌توان به صورت تابعی از آب و کود مصرفی (C(W,N)) بیان نمود. با توجه به قیمت‌های سال ۱۳۸۹ تابع هزینه تولید ذرت به صورت زیر استخراج شد:

$$C(W,N) = 30W + 60N + 431335 \quad (۱۷)$$

در شرایطی که محدودیت زمین وجود داشته باشد و فرض شود آلودگی نیترات روی محیط قابل ملاحظه نباشد فرایند حل معادله ۸ منجر به دستگاه ۱۸ شده که پس از حل نهایی دستگاه، ترکیب بهینه به ترتیب ۳۷۵ کیلوگرم کود اوره مصرفی و ۹٤۰ میلیمتر آب آبیاری برای شرایط محدودیت زمین محاسبه شد. یعنی در صورت محدودیت زمین اعمال آبیاری کامل و کود کامل (۹٤ درصد توصیه کودی) منجر به حصول حداکثر عملکرد می‌گردد. زندپارسا و سپاسخواه (۲۰۰۱) بهترین سطوح آب و کود مصرفی در شرایط محدودیت زمین را به ترتیب ۹۹ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کودی محاسبه نمودند که تقریبا با نتایج تحقیق حاضر مشابهت دارد.

$$\left.\begin{aligned} 1.1883W - 2.3396N &= -1920.2 \\ -2.3396W + 22.4859N &= 6216.57 \end{aligned}\right\} \Rightarrow N = 375\,Kg \;\&\; W = 940\,mm \quad (۱۸)$$

همچنین در شرایط محدودیت آب، حل معادله ۹ منجر به دستگاه معادلات ۱۹ شده که پس از حل نهایی دستگاه، ترکیب بهینه به ترتیب ۳۵۷ کیلوگرم کود اوره و ۷۷٤ میلی‌متر می‌باشد. به عبارت دیگر در شرایط محدودیت آبی، سطح آبی ۷۷ درصد نیاز آبی (اعمال ۲۳ درصد کم‌آبیاری) و سطح کودی ۹۰ درصد توصیه کودی (۱۰ درصد کاهش میزان کود مصرفی) ترکیب بهینه آب و کود مصرفی محاسبه شد. در شرایط کم‌آبی می‌توان با کاهش

۲۳ درصدی مصرف آب در واحد هکتار، سطح کشت را به میزان ۲۳ درصد افزایش داده و از این طریق به درآمد خالص بیشتری نسبت به حالت آبیاری کامل دست یافت.

$$\left.\begin{aligned} &11.24N^2 + 0.59415X^2 - 6216.57y + 431096.7 = 0 \\ &-2.3396W + 22.4859N - 6216.57 = 0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$N = 357Kg \;\&\; W = 774mm$$

(۱۹)

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بهینه‌سازی مصرف آب و کود نیتروژنه برای تولید ذرت دانه‌ای تحت مدیریت کم‌آبیاری انجام شد. برای دستیابی به هدف فوق تابع تولید عملکرد بر حسب آب و کود مصرفی در شرایط محدودیت آب و محدودیت زمین با استفاده از آزمون رگرسیون چندگانه استخراج شد. نتایج آزمون رگرسیون چندگانه در سطح پنج درصد نشان داد که رابطه بین عملکرد ذرت دانه‌ای و مقدار مصرف هر یک از نهاده‌های آب و کود تابع درجه دوم می‌باشد. با افزایش مقدار آب و کود تا سطح بهینه مصرف عملکرد ذرت افزایش می‌یابد. سطح بهینه کود مصرفی به عمق آب آبیاری وابسته است. به طوری که با افزایش مقدار آب آبیاری، سطح بهینه کود مصرفی افزایش می‌یابد. در صورتی که آب آبیاری بیش از نیاز گیاه مصرف شود، آبشویی بیشتر نیترات باعث کاهش عملکرد می‌شود. از طرف دیگر افزایش مقدار نیتروژن برای خنثی کردن اثر تنش خشکی بر کاهش عملکرد راهکار درستی نیست. بلکه مقدار کود بکار رفته در شرایط کم‌آبی باید کاهش یابد. نتایج بهینه‌سازی توابع تولید نشان داد که در شرایط محدودیت زمین استفاده از سطوح آب و کود کامل منجر به حداکثر درآمد خالص می‌شود. لیکن در شرایط محدودیت آب سطح آبی ۷۷ درصد نیاز آبی و سطح کودی ۹۰ درصد توصیه کودی سطوح بهینه مصرف آب و کود می‌باشند.

فهرست منابع

۱. توکلی،ع و فرداد، ح. ۱۳۸۱. به‌گزینی مدیریت آبیاری تکمیلی و بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن برای گندم. گزارش طرح پژوهشی اجراشده در مرکز تحقیقات دیم مراغه. ۱٤۰ صفحه.

۲. عباسی، ف. چوگان، ر. علیزاده، ح. ع و لیاقت، ع. ۱۳۹۱. بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف آب و کود، عملکرد و برخی صفات ذرت دانه‌ای. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران. ٤۳ (٤): ۳۸۵-۳۷۵.

۳. عباسی، ف.؛ لیاقت. ع. م.، گنجه، ا. ۱۳۸۸. ارزیابی یکنواختی کودآبیاری در آبیاری جویچه‌ای. مجله خاک و آب، ۳۹ (۱): ۱۲۹-۱۱۷.

٤. علیزاده، ح. ع؛ عباسی، ف و لیاقت، ع .۱۳۸۹. ارزیابی یک‌نواختی توزیع و تلفات نیترات در کودآبیاری جویچه‌ای. نشریه علوم آب و خاک: ۱٤(۵۱): ٤۹-۳۹.

۵. ملکوتی، م. ج. و ریاضی همدانی. س. ع. ۱۳۷۰. کودها و حاصلخیزی خاک (ترجمه). انتشارات دانشگاه تهران. ۸۰۰ صفحه.

6. Boldt, A. L., Watts, D. G., Eisenhauer, D. E., and Schepers, J. S. 1994. Simulation of water applied nitrogen distribution under surge irrigation. Trans. ASAE. 37(4):1157-1165.

7. Cakir, R., 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Res. 89:1–16.

8. Englich, M. 1990. Deficit irrigation. I: Analytical framework. J. Irrig. Drain. Eng., ASCE. 116(IR3): 399-412.
9. Farre, I.,Faci, J. M., 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. Agric Water Manage. 96: 383–394.
10. Hou, Z., Li, P., Li, B., Gong, J., Wang, Y. 2007. Effects of fertigation scheme on N uptake and N use. J. Plant Soil. 290:115–126.
11. Liang, B.C., and Mackenzie, A.F. 1994. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. Can. J. Soil Sci. 74:235–240.
12. Liua, W.Z., Zhang, X. 2007. Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: a case study with maize in the loess plateau of china. Field Crops Res. 100 (2–3): 302–310.
13. Oikeh, S. O., Kling, J. G., Okoruwa, A. E. 1988. Nitrogen fertilizer management effects on maize grain quality in the west African Moist Savanna. J. Crop Sci. 38:1056-1061
14. Pandey, R.K., Maranwille, J.W., Admou, A., 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. Agric. Water Manage. 46 (1): 1–13.
15. Pang, X.P., Letey, J., 1998. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water, salinity, and nitrogen model. Soil Sci. Soc. Am. J. 62 (5): 1418–1427.
16. Payero, J.O., Melvin, S. R., Irmak, S., Tarkalson, D., 2006. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. Agric. Water Manage. 84, 101–112.
17. Playan, E. and J. M, Faci, 1997. Border irrigation: Field experiment and a simple model. Irrig. Sci., 17(4):163-171.
18. Tiercelin, J.R., Vidal, A., 2006. Traite´ d'Irrigation, 2nd edition. Lavoisier edition.
19. Traore, S.B., Carlson, R.E., Pilcher, C.D., Rice, M.E., 2000. Bt and Non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. Agron. J. 92: 1027–1035.
20. Ulger, A. C., Ibrikci, H., Cakir, B., Guzel, N. 1997. Influence of nitrogen rates and row spacing on corn yield, protein content, and other plant parameters. J. Plant Nutr. 20:1697-1709.
21. Zand-Parsa, Sh., Sepaskhah, A.R., 2001. Optimal applied water and nitrogen for maize. Agric. Water Manage. 52(1): 73–85.
22. Zhang, H and Oweis, T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agric. Water Manage. 38: 195-211.