

## بهینه‌سازی کاربرد کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در زراعت گندم پاییزه (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از روش سطح-پاسخ (RSM)

محسن جهان<sup>۱\*</sup> - مهدی نصیری محلاتی<sup>۲</sup> - حمیده خلیل زاده<sup>۳</sup> - ریحانه بیگناه<sup>۴</sup> - احمدرضا رضوی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۳۰

### چکیده

نیاز روزافزون به تولید گندم به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین انرژی جوامع انسانی، استفاده‌ی گسترده از کودهای شیمیایی را به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به‌دنبال داشته است. اولین گام در جهت کاهش مصرف کودهای شیمیایی و پیش‌گیری از پی‌آمدهای منفی زیست‌محیطی حاصل، بهینه‌سازی مصرف و افزایش کارایی این نهاده‌ها است. در این راستا و به‌منظور برآورد مقادیر بهینه مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن و فسفر و کود دامی در زراعت گندم، با استفاده از روش سطح-پاسخ، آزمایشی در قالب باکس-بنکن طراحی و طی دو سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۲-۱۳۹۱ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین کود نیتروژن (صفر و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار)، کود فسفره (صفر و ۲۰۰ کیلوگرم  $P_2O_5$  در هکتار) و کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) طراحی شدند، به‌طوری‌که نقطه مرکزی در هر تیمار سه مرتبه تکرار شد و کلاً ۱۵ ترکیب تیماری به‌دست آمد. عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، تعداد پنجه‌ی بارور، محتوای نسبی رطوبت، تلفات نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. سپس با استفاده از مدل رگرسیونی گام‌به‌گام و برازش تابع درجه‌دو کامل به داده‌ها، سطوح پاسخ متغیرهای وابسته تحت تأثیر تیمارها محاسبه شد. نتایج نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن و فسفر تا سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه افزایش یافت. تعداد پنجه بارور در بوته در سطح ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، با افزایش مصرف فسفر از صفر تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، به‌صورت تقریباً خطی افزایش یافت. محتوای نسبی رطوبت با افزایش سطح مصرف کود دامی افزایش یافت. تلفات نیتروژن به موازات افزایش سطوح مصرف نیتروژن و کود دامی، به‌صورت خطی افزایش یافت. روند افزایش کارایی مصرف نیتروژن، به موازات افزایش کاربرد نیتروژن و فسفر به‌صورت تابع درجه دو کاهش یافت. مقادیر بهینه‌شده‌ی کودهای نیتروژن، فسفر و دامی براساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی برآورد شد. در سناریوی اقتصادی، مصرف ۱۴۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و ۱۸ تن در هکتار کود دامی، منجر به تولید ۶۵۰۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن برابر با ۱۰/۴۹ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن مصرفی شد. در سناریوی زیست‌محیطی، با مصرف ۲۱ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بدون کاربرد فسفر، با مصرف ۱۶ تن در هکتار کود دامی، عملکرد دانه‌ی برابر با ۳۱۶۰ کیلوگرم در هکتار و کارایی مصرف نیتروژن برابر با ۹/۰۸ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن مصرفی حاصل شد. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، کاربرد ۱۴۵ و ۳۴ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب نیتروژن و فسفر و ۳۰ تن در هکتار کود دامی، عملکرد دانه‌ی برابر با ۴۰۳۱ کیلوگرم در هکتار داشت و افزایش ۳۶ درصدی در کارایی مصرف نیتروژن نسبت به سناریوی اقتصادی (۱۶/۵۰ در برابر ۱۰/۴۹) را به‌دنبال داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌نظر می‌رسد که برای تولید گندم پاییزه، سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی نسبت به دو سناریوی دیگر اولویت داشته باشد، هرچند، منافع و مضار هر سناریو در برابر سناریوهای دیگر، باید در عمل و تحت شرایط واقعی سنجیده و نسبت به کاربرد آن تصمیم‌گیری شود.

**واژه‌های کلیدی:** تلفات نیتروژن، سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، طرح باکس بنکن، عملکرد دانه، کارایی زراعی مصرف نیتروژن

### مقدمه

از بین تمام گونه‌های زیر کشت در سطح جهان، گندم

(*Triticum aestivum* L.) هم از نظر سطح زیر کشت و هم از نظر

میزان تولید، به‌همراه برنج و ذرت، جزو سه محصول عمده‌ی جهان محسوب می‌شود (۱۹). در ایران نیز، تولید سالانه نزدیک ۷ تا ۹ میلیون تن گندم، در کنار ۴ تا ۶ میلیون تن واردات، سبب شده است تا این محصول به‌عنوان مهمترین گیاه زراعی استراتژیک، از جایگاه ویژه‌ای در امر برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و تخصیص منابع و نهاده‌ها برخوردار گردد (۴۵). حدود ۴۵ درصد از کالری و ۷۰ درصد از پروتئین

۱، ۲، ۳، ۴ و ۵- به‌ترتیب دانشیار، استاد، دانشجویان کارشناسی ارشد و دانشجوی دوره دکتری آگرواکولوژی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
\* - نویسنده مسئول:  
(Email: jahan@um.ac.ir)

کارایی پایین جذب کودها در بسیاری از گیاهان زراعی، عامل مهمی در تشدید تلفات از طریق آبشویی، تصعید و انتشار کودهای شیمیایی محلول است که به راحتی در خاک و اتمسفر رها می‌شوند (۲).

بین کاربرد کودهای شیمیایی NPK در زراعت گندم و بهره‌وری گیاه زراعی، همستگی مستقیمی گزارش شده است (۲۳، ۳۰ و ۳۹). از سوی دیگر، کاربرد توأم کودهای شیمیایی با مواد آلی مثل کودهای دامی، می‌تواند به عنوان سیستم مدیریتی صحیح و منطقی علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف کودهای شیمیایی و جلوگیری از اثرات زیان‌آور آن‌ها بر آب‌های سطحی و زیرزمینی، توازن عناصر غذایی در خاک و گیاه و میزان عملکرد را در کشت‌های متوالی بهبود بخشد. همچنین، از آنجایی که یکی از عوامل تأثیرگذار بر هدررفت نیتروژن، عدم تطابق زمان کاربرد با مراحل رشدی گیاه است (۲۱)، بنابراین، کاربرد توأم کودهای آلی مثل کود دامی به سبب آهسته و پیوسته آزاد کردن نیتروژن و برهمکنش با عوامل دیگر، می‌تواند تلفات این عنصر را کاهش دهد. کودهای آلی و انواع مختلفی از کودهای ویژه مانند کودهای گند رها، کودهای با رهایش کنترل‌شده، همچنین، اوره و بازدارنده‌های نیتریفیکاسیون، بقای بیشتری داشته و به صورت پیوسته عناصر غذایی را در ریزوسفر گیاهان آزاد می‌کنند، بنابراین، کاربرد آن‌ها می‌تواند تلفات زیست‌محیطی عناصر غذایی گیاهی گران‌قیمت را در طی کشت و کار گیاهان زراعی کاهش دهد (۱۴، ۴۳ و ۴۸). نیتروژن اولین عنصر غذایی است که کمبود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک آشکار می‌شود، زیرا مقدار مواد آلی خاک که عمده‌ترین منبع نیتروژن خاک هستند در این مناطق ناچیز است.

امروزه به علت هزینه‌های سنگین کودهای شیمیایی، لازم است که جذب و مصرف عناصر غذایی از کارایی بالایی برخوردار باشند تا بدین وسیله از هزینه‌های تولید کاسته و سود بیشتری نصیب کشاورزان شود (۱۶). براساس سناریوهای موجود، برای تأمین نیاز جهانی غلات در سال ۲۰۵۰، میانگین کارایی مصرف نیتروژن غلات باید سالانه ۰/۱ تا ۰/۴ درصد افزایش یابد (۱۲). بهبود راندمان نیتروژن، پتانسیل آلودگی‌های محیط‌زیست را کاهش و درآمد اقتصادی را افزایش خواهد داد (۱۶). در مزارع تحقیقاتی حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد از کود نیتروژن مصرف‌شده از دسترس گیاه خارج می‌شود. باین‌حال، نتایجی که در کرت‌های آزمایشی به دست می‌آید را نمی‌توان برای برآورد کارایی مصرف نیتروژن در مقیاس منطقه‌ای یا جهانی استفاده کرد، زیرا مقدار تلفات نیتروژن در مزارع کشاورزان بسیار بیشتر از این مقدار است. به‌طور میانگین حدود ۵۰ درصد از کود نیتروژن مصرف‌شده در سال اول، از دسترس گیاه زراعی خارج می‌شود (۱۳). آزمایش‌های انجام‌شده در دهه‌های گذشته بیشتر با هدف بررسی اثرات افزایش مصرف نیتروژن بر عملکرد گیاهان مختلف بوده، درحالی‌که در حال حاضر بیشتر بر بهینه‌سازی و کاهش مصرف نیتروژن تأکید می‌شود (۴ و ۳۱).

مصرفی جمعیت ایران، از گندم تأمین می‌شود. گندم ۷۲/۴ درصد از سطح زیر کشت غلات و ۶۲/۲ درصد از کل تولید غلات را در سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ به‌خود اختصاص داد (۴۵). مجموع کود اوره توزیع شده در سطح کشور، ۱/۷ میلیون تن در سال ۱۳۸۹ و ۱/۱ میلیون تن در سال ۱۳۹۰ بوده، که از این مقدار، حدود ۷۶۴۲۶ تن به استان خراسان رضوی اختصاص یافت. میزان واردات طی دو سال مذکور، صفر گزارش شده است. از سوی دیگر، آلودگی‌ها و پی‌آمدهای ناشی از مصرف گسترده‌ی نهاده‌های شیمیایی، سبب تغییر نگرش در زمینه‌ی تولید غذا شده است. یکی از مهم‌ترین این نگرش‌ها، تولید پایدار غذای کافی در کنار توجه به ابعاد اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی است. گلیسمن، اولین گام در جهت رسیدن به این هدف راه، بهینه‌سازی و افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها دانسته است.

از بین ۱۶ عنصر ضروری مورد نیاز برای رشد و نمو گیاهان، نیتروژن مقام اول را به خود اختصاص داده، ۲ تا ۵ درصد از وزن خشک گیاهان را نیتروژن تشکیل می‌دهد و کمبود آن بیش از سایر عناصر غذایی، عملکرد کمی و کیفی را محدود می‌سازد (۳۷ و ۴۹). میانگین میزان جذب نیتروژن توسط گیاهان، ۵۰ درصد گزارش شده است (۴۶). در حال حاضر، پنجاه درصد نیتروژن مصرفی مربوط به غلات است و بقیه‌ی آن صرف سایر گونه‌های گیاهی و درختان می‌شود (۲۶).

بیش از ۵۰ درصد نیتروژن مصرف‌شده می‌تواند از سیستم‌های کشاورزی به شکل‌های مختلف نیتروژن گازی و انواع ترکیبات نیتروژنی فعال‌شده، هدر رود (۱، ۲۷ و ۴۶). سفر نیز زمانی که به‌میزان زیادی در مقایسه با سایر عناصر غذایی به کار برده می‌شود، تا ۹۰ درصد از آن به‌صورت ترکیب با سایر عناصر فلزی در خاک رسوب می‌کند و سبب آلودگی‌های بعدی فسفره می‌شود (۱). گزارش‌شده است که نیتروژن باقی‌مانده در خاک پس از برداشت محصول معمولاً ۱۸ تا ۴۱ درصد نیتروژن مصرف‌شده را شامل می‌شود (۱۶). برخی محققان مقدار آبشویی نیترات به آب‌های زیرزمینی را ۳۳ تا ۵۰ درصد کود نیتروژن مصرف‌شده گزارش کرده‌اند (۱۳ و ۲۷). تلفات کودهای نیتروژنی به روش‌های متفاوتی مانند تصعید آمونیومی در خاک‌های آهکی (۱۰ تا ۷۰ درصد)، نیترات‌زدایی (۹ تا ۲۲ درصد) و آبشویی (۱۵ تا ۴۰ درصد) انجام می‌گیرد. مصرف این کودها به دلایلی همچون ارزان بودن، در دسترس بودن و سهولت تهیه توسط کشاورزان بی‌رویه بوده و کارایی پایینی دارند (۱۶ و ۴۱). اسپارلینگ و همکاران (۴۴) گزارش کردند که با مصرف زیاد و مستمر کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار، اتلاف ازت از طریق آبشویی و انتقال آن به منابع آب‌های زیرزمینی (آلودگی آب) و تصعید این عنصر (آلودگی هوا) افزایش می‌یابد. سرعت تجزیه ماده آلی در خاک نیز تشدید یافته و مقادیر زیادی نیتروژن و دی‌اکسیدکربن به اتمسفر وارد می‌شود که این گازهای گلخانه‌ای در گرمایش جهانی و تغییر اقلیم مؤثر هستند.

(۶).

با استفاده از طرح باکس- بنکن این امکان فراهم می‌شود که بیشترین اطلاعات را از حداقل عملیات اجرایی از طریق توزیع نقاط آزمایشی در محدوده‌ی تیمارها به‌دست آورد. بر این اساس، تیمارهای آزمایشی مورد نیاز با توجه به سطوح پایین و بالای نیتروژن (صفر و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) و کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) توسط نرم‌افزار مشخص شدند. براساس رابطه‌ی (۱) و با در نظر گرفتن سه تکرار برای نقطه‌ی مرکزی، ۱۵ ترکیب تیماری مشخص شد (جدول ۱). مقادیر بیشینه، مرکزی و کمینه‌ی پارامترها به‌ترتیب متناظر با ۱، صفر و ۱- در جدول ۱ نشان داده شده است.

قبل از انجام آزمایش، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌گیری انجام و به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. اندازه‌گیری EC و pH خاک به روش تهیه‌ی محلول با نسبت ۲ به ۱ (آب به خاک) (۵) انجام شد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌منظور اعمال کود آلی، میزان عناصر غذایی کود گاوی تعیین و سپس بر حسب نیاز غذایی گندم، عرف منطقه و با توجه به بررسی منابع انجام شده، بر مبنای ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار، یک ماه قبل از کشت به‌طور یکنواخت در سطح کرت‌های مورد نظر پخش و بلافاصله توسط بیل دستی وارد خاک شد. نتایج تجزیه کود گاوی مصرفی نشان داد که دارای ۱/۱۸ درصد نیتروژن، ۰/۲۹ درصد فسفر و ۱/۰۴ درصد پتاسیم بود. کرت‌هایی با ابعاد ۳ در ۴ متر ایجاد و در داخل هر کرت ۶ ردیف دوطرفه برای کاشت در نظر گرفته شد. سپس قسط اول کود نیتروژن و تمام کود فسفر با توجه به تیمارهای مورد نظر به کرت‌ها اضافه و با خاک مخلوط شد. به‌منظور جلوگیری از اختلاط آب آبیاری کرت‌ها با یکدیگر فاصله کرت‌ها از یکدیگر ۱ متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت در هر دو سال آزمایش در یک تاریخ یکسان (۹۱/۷/۳۰ و ۹۲/۷/۳۰) در دو طرف پشته و در ردیف‌هایی به فاصله ۵۰ سانتی‌متر انجام شد.

رقم گندم مورد استفاده، گاسکوژن (حساس به تنش، بدون ریشک و مناسب شرایط آب‌وهوایی منطقه) بود. زمین زیر کشت در دو سال آزمایش متفاوت و مجاور یکدیگر و سال قبل از آزمایش تحت آیش بود. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی، به فاصله هر ۱۰ روز یکبار به‌روش شیری انجام شد. وجین علف‌های هرز در دو نوبت و به روش دستی انجام گرفت. در کلیه‌ی مراحل آماده‌سازی زمین، کاشت و همچنین در طول دوره‌ی رشد، هیچ‌گونه علف‌کش، آفت‌کش و قارچ‌کش شیمیایی استفاده نشد. هر کرت به دو قسمت تقسیم شد. یک بخش برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و اجزای عملکرد آن در نظر گرفته شد و بخش دیگر برای نمونه‌گیری‌های تخریبی در طول فصل رشد اختصاص یافت.

روش سطح-پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌های یک فرآیند استفاده می‌شود و هدف نهایی آن بهینه‌سازی فرآیند است (۳۸). طرح مرکب مرکزی، باکس-بنکن، و دهلرت<sup>۱</sup> سه روش اصلی طراحی سطح-پاسخ هستند. هدف از روش سطح-پاسخ یافتن مقادیر مناسب هر یک از متغیرها برای رسیدن به مطلوب‌ترین پاسخ‌ها است. می‌توان از شبیه‌سازی با مدل ساخته‌شده به‌جای انجام آزمایش‌های واقعی که مستلزم وقت و هزینه‌ی زیاد هستند، جهت بررسی عوامل گوناگون استفاده نمود. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز یا سناریوهای شبیه‌سازی در این روش، برای تعداد مشخصی پارامتر ورودی، بسیار کمتر از دیگر روش‌ها (مانند آزمایشات فاکتوریل) است. این موضوع به‌ویژه با افزایش تعداد پارامترهای ورودی اهمیت دوچندان می‌یابد. همچنین، به‌دلیل آن که برای هر پارامتر سه مقدار ورودی تعیین می‌شود، طرح باکس-بنکن امکان بررسی و اندازه‌گیری تأثیر ترکیبات دوتایی از پارامترها علاوه بر تأثیر جداگانه و مستقیم هر یک از آن‌ها را فراهم می‌آورد (۱۵).

از آن‌جا که در زمینه‌ی بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه بررسی اثر تلفیقی کودهای شیمیایی با کود دامی با استفاده از الگوها و مدل‌های ریاضی مبتنی بر داده‌های تجربی، پژوهش‌چندانی صورت نگرفته، بنابراین، پژوهش حاضر با تأکید بر بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و آلی در کشت گندم پاییزه در شرایط مشهد، بررسی روند تغییرات و اثر نسبت‌های مختلف کودهای نیتروژن، فسفر و دامی بر ویژگی‌های گندم و روند تغییرات آن، همچنین مقایسه میزان تأثیر کود دامی با کود شیمیایی بر کارایی مصرف نیتروژن و افزایش عملکرد گندم طراحی و اجرا شد.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۲-۱۳۹۱ در قالب طرح باکس-بنکن در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه‌ی شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه‌ی شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل ترکیبی از کودهای نیتروژن، فسفر و کود گاوی در مقادیر مختلف بود. تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز (یا همان تیمارها)، ۱۵ تیمار شامل ۱۲ ترکیب فاکتوریل و ۳ بار تکرار نقطه مرکزی بود. طرح باکس-بنکن اساساً با یک تکرار قابل اجرا و آنالیز است، البته برای برازش معادلات سطح پاسخ لازم است تا نقاط مرکزی که معرف میانگین سطوح بالا و پایین هر یک از فاکتورهای تحت بررسی هستند حداقل سه بار تکرار شوند

جدول ۱- مقادیر و ضرایب تیمارها با توجه به طرح باکس- بنکن  
Table 1- Values and coefficients of treatments based on Box-Behnken design

شماره تیمار Treatment Number	ضرایب Coefficients			مقادیر تیمارها* Treatment values*		
	نیتروژن Nitrogen (X <sub>1</sub> )	فسفر Phosphorus (X <sub>2</sub> )	کود دامی Manure (X <sub>1</sub> )	نیتروژن Nitrogen (kg ha <sup>-1</sup> )	فسفر Phosphorus (kg ha <sup>-1</sup> )	کود دامی Manure (ton ha <sup>-1</sup> )
1	+1	-1	0	300	0	15
2	0	-1	0	150	0	15
3	+1	0	+1	300	100	30
4	+1	0	-1	300	100	0
5	-1	0	+1	0	100	30
6	0	0	0	150	100	15
7	0	-1	+1	150	0	30
8	-1	0	-1	0	100	0
9	0	-1	-1	150	0	0
10	0	+1	-1	150	200	0
11	0	+1	+1	150	200	30
12	0	0	0	150	100	15
13	-1	+1	0	0	200	15
14	+1	+1	0	300	200	15
15	0	0	0	150	100	15

\* +۱، -۱ و ۰، به ترتیب سطوح بالا، پایین و میانگین هر فاکتور را نشان می‌دهد.

\* +1, -1, and 0 indicates up, down and medium level of each factor

به منظور مطالعه شاخص‌های رشدی گیاه، نمونه‌برداری‌های تخریبی هر دو هفته یکبار انجام شد و در این نمونه‌ها، سطح برگ و وزن خشک گیاهان اندازه‌گیری شد. اعمال سطوح مختلف تیمار نیتروژن به صورت سرک در سه نوبت انجام شد. نوبت اول همزمان با کاشت، نوبت دوم در مرحله پنجه‌دهی و نوبت سوم در مرحله خوشه‌دهی (نیمه‌ی اسفند ماه) صورت گرفت. قبل از برداشت نهایی، پنج بوته به صورت تصادفی انتخاب و تعداد پنجه‌ی بارور در آن‌ها تعیین شد. جهت تعیین عملکرد دانه، زمانی که قسمت اعظم بوته‌ها زرد شدند، برداشت گیاهان از بخش اختصاص یافته به این منظور (سطح چهار متر مربع) با حذف دو ردیف کناری و ۲۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای انجام شد. گیاهان برداشت شده در هوای آزاد خشک شدند، سپس عملکرد بیولوژیک (مجموع عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش) آنها اندازه‌گیری شد. بعد از بوجاری بذرها، میزان عملکرد دانه هر کرت تعیین و شاخص برداشت محاسبه گردید. پس از برداشت نهایی (سوم خرداد ماه)، نمونه‌برداری از گیاهان هر تیمار به منظور تعیین محتوای نیتروژن گیاه انجام شد. جهت تعیین محتوای نیتروژن اندام هوایی از دستگاه کجلدال استفاده گردید. پروتئین دانه و میزان نیتروژن خاک به روش AOAC (4.2.04) Official Method 968.06 براساس تعیین نیتروژن به روش کجلدال و با استفاده از دستگاه

به منظور مطالعه شاخص‌های رشدی گیاه، نمونه‌برداری‌های تخریبی هر دو هفته یکبار انجام شد و در این نمونه‌ها، سطح برگ و وزن خشک گیاهان اندازه‌گیری شد. اعمال سطوح مختلف تیمار نیتروژن به صورت سرک در سه نوبت انجام شد. نوبت اول همزمان با کاشت، نوبت دوم در مرحله پنجه‌دهی و نوبت سوم در مرحله خوشه‌دهی (نیمه‌ی اسفند ماه) صورت گرفت. قبل از برداشت نهایی، پنج بوته به صورت تصادفی انتخاب و تعداد پنجه‌ی بارور در آن‌ها تعیین شد. جهت تعیین عملکرد دانه، زمانی که قسمت اعظم بوته‌ها زرد شدند، برداشت گیاهان از بخش اختصاص یافته به این منظور (سطح چهار متر مربع) با حذف دو ردیف کناری و ۲۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای انجام شد. گیاهان برداشت شده در هوای آزاد خشک شدند، سپس عملکرد بیولوژیک (مجموع عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش) آنها اندازه‌گیری شد. بعد از بوجاری بذرها، میزان عملکرد دانه هر کرت تعیین و شاخص برداشت محاسبه گردید. پس از برداشت نهایی (سوم خرداد ماه)، نمونه‌برداری از گیاهان هر تیمار به منظور تعیین محتوای نیتروژن گیاه انجام شد. جهت تعیین محتوای نیتروژن اندام هوایی از دستگاه کجلدال استفاده گردید. پروتئین دانه و میزان نیتروژن خاک به روش AOAC (4.2.04) Official Method 968.06 براساس تعیین نیتروژن به روش کجلدال و با استفاده از دستگاه

$$N_{\text{loss}} = N_{\text{initial}} + N_{\text{fertilizer}} - (N_{\text{plant}} + N_{\text{soil}}) \quad (1)$$

که در آن،  $N_{\text{loss}}$ : تلفات نیتروژن  $\text{kg m}^{-2}$ ;  $N_{\text{initial}}$ : نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد  $\text{kg m}^{-2}$ ;  $N_{\text{fertilizer}}$ : نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره  $\text{kg m}^{-2}$ ;  $N_{\text{plant}}$ : میزان نیتروژن گیاه در انتهای فصل رشد  $\text{mg g}^{-1}$ ;  $N_{\text{soil}}$ : نیتروژن موجود در خاک پس از برداشت  $\text{kg m}^{-2}$  بود. تمام متغیرها براساس واحد کیلوگرم نیتروژن در هکتار محاسبه شدند. جهت محاسبه کارایی زراعی مصرف نیتروژن ( $\text{ANUE}^1$ ) (kg Seed/kg N) در گیاه گندم از رابطه (۲) استفاده شد (۴۰).

$$ANUE = \frac{Y_s}{N_{\text{initial}} + N_{\text{fertilizer}}} \quad (2)$$

که در این معادله،  $Y_s$ : عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد.

تلفات نیتروژن و کارایی نیتروژن به صورت جداگانه محاسبه شدند؛  $X_i$ : متغیر مستقل  $i$  ام و  $X_i X_j$ : اثر متقابل متغیر مستقل  $i$  ام و متغیر مستقل  $j$  ام،  $X_i^2$  توان دوم متغیر مستقل  $i$  ام و  $\beta_i$  تا  $\beta_{ii}$  ضرایب معادله بودند. پس از به دست آوردن نتایج شبه‌سازی، با استفاده از محاسبات و روش‌های آماری، یک چندجمله‌ای درجه دوم حاصل می‌شود که میزان پاسخ (عملکرد) را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی بیان می‌کند. در پایان و پس از بهینه‌سازی رابطه‌ی به دست آمده و حذف جملات کم‌اثر، با استفاده از آزمون‌های آماری و معیارهایی چون مقدار آزمون F، آزمون عدم برازش  $\chi^2$ ، P value و ضریب تبیین  $R^2$ ، یک رابطه‌ی نهایی برای پیش‌بینی عملکرد و سایر متغیرهای پاسخ مورد نظر در پژوهش حاضر محاسبه شد (رابطه ۵). رابطه‌ی به دست آمده، صرفاً در محدوده‌های تعریف شده برای پارامترهای ورودی صادق بوده و در خارج از این محدوده، قدرت پیش‌بینی ندارد.

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1^2 + a_5 X_2^2 + a_6 X_3^2 + a_7 X_1 X_2 + a_8 X_1 X_3 + a_9 X_2 X_3 \quad (5)$$

در این معادله،  $Y$ : متغیر وابسته است و با توجه به عملکرد دانه گندم، عملکرد بیولوژیک، تعداد پنجه بارور، محتوای نسبی رطوبت، تلفات نیتروژن و کارایی نیتروژن به صورت جداگانه محاسبه شدند؛  $X_1$ : متغیر مستقل کود نیتروژن و  $X_2$ : متغیر مستقل کود فسفر،  $X_3$ : متغیر مستقل کود دامی و  $a_1$  تا  $a_9$  ضرایب معادله بودند. مقادیر بهینه نیتروژن، فسفر و کود دامی مصرفی با توجه به سه سناریوی اقتصادی، زیست محیطی و اقتصادی-زیست محیطی تعیین گردید. بدین ترتیب که در سناریوی اقتصادی، عملکرد دانه گندم؛ در سناریوی زیست محیطی، تلفات نیتروژن و در سناریوی اقتصادی-زیست محیطی، کارایی استفاده از منابع نیتروژن به عنوان مبنای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. در ادامه، سطوح بهینه فاکتورها برای حصول هریک از سناریوهای تعریف شده براساس الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی تعیین گردید.

در نهایت نتایج برازش شده با داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از آزمون‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (رابطه ۶) و رگرسیون خطی یک به یک ارزیابی شدند.

$$RMSE (\%) = \frac{100}{O} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

که در این معادله  $\bar{O}$ : میانگین مشاهدات،  $P$ : مقادیر برازش شده و  $O_i$ : مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی خاک زمین محل انجام آزمایش

Table 2- Physical and chemical properties of experimental field soil before planting

عمق خاک	Soil depth (cm)		
	15-30	0-15	
	0.068	0.077	نیتروژن کل (%) Total N
	7	11	فسفر قابل دسترس (ppm) Available P
	465	480	پتاسیم قابل دسترس (ppm) Available K
	12.5	13.2	نسبت کربن به نیتروژن C/N
	7.6	7.8	pH (عصاره اشباع)
	0.52	0.58	کربن آلی (%) Organic C
	22	24.3	ظرفیت نگه‌داری آب (%) Water holding capacity
	1.54	1.42	وزن مخصوص ظاهری (g cm <sup>-3</sup> ) Bulk density
	1.1	1.2	هدایت الکتریکی (dS m <sup>-1</sup> ) Electrical Conductivity
	لوم سیلتی	لوم سیلتی	بافت خاک Soil Texture

به منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ‌ها<sup>۱</sup>، اواسط مرحله گلدهی از برگ‌های یکسان بوته‌های مربوط به هر تیمار قطعه‌های ۲×۲ سانتی‌متری بریده شد و با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم گرم، وزن تر (FW) آن‌ها تعیین گردید. قطعات بریده شده به مدت شش ساعت در دمای آزمایشگاه در آب مقطر قرار داده شدند و پس از اندازه‌گیری وزن آن‌ها و در نظر گرفتن آن به عنوان وزن آماس (TW) به مدت ۴۸ ساعت در آون با درجه حرارت ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند، سپس وزن آن‌ها به عنوان وزن خشک (DW) برگ یادداشت شد و در نهایت با استفاده از رابطه‌ی (۳) محتوای نسبی آب برگ محاسبه شد (۲۹):

$$RWC = \frac{(FW - DW)}{(TW - DW)} \quad (3)$$

در روش باکس-بنکن، متغیر پاسخ (y) توسط رابطه‌ی (۴) برآورد می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 \quad (4)$$

در این معادله،  $y$ : متغیر وابسته است و با توجه به عملکرد دانه گندم، عملکرد بیولوژیک، تعداد پنجه بارور، محتوای نسبی رطوبت،

2- Lack of Fit

3- RMSE (Root mean square error)

1- Relative Water Content

ضرایب رگرسیون برای مدل‌های برازش شده در مورد هریک از صفات مورد مطالعه در آزمایش در جدول ۴ ذکر شده است. ضرایب تبیین ( $R^2$ ) نشان‌دهنده درصد تغییرات هر کدام از متغیرهای وابسته تحت تأثیر متغیرهای مستقل است و ضرایب تبیین بالا در این معادلات نشان‌دهنده برازش خوب مدل برآورد شده است (جدول ۴).

#### عملکرد دانه

نمودار رگرسیون خطی مقادیر برازش داده شده و مشاهده شده در مورد عملکرد دانه گندم در شکل ۱ نشان داده شده است. مقدار پایین  $RMSE$  نشان‌دهنده برازش خوب مدل می‌باشد. به علاوه، اختلاف معنی‌داری بین عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون و شیب و عرض از مبدأ معادله خط ۱:۱ مشاهده نشد.

کمترین مقدار عملکرد دانه مشاهده شده گندم (۲۳۵۰ کیلوگرم در هکتار) در نتیجه‌ی کاربرد صفر کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و ۳۰ تن در هکتار کود دامی به دست آمد و با افزایش سطوح متغیرهای مستقل در تیمارها، عملکرد دانه نیز افزایش یافت (شکل ۱).

سطح - پاسخ تغییرات عملکرد دانه با توجه به متغیرهای مستقل (کود نیتروژن و فسفر) در مقدار ثابت ۳۰ تن در هکتار کود دامی، در شکل ۲ نشان داده شده است. از آنجا که اثر کود دامی بر عملکرد تنها به صورت خطی معنی‌دار بود (جدول ۳) و فرم درجه دوم آن اثر معنی‌داری بر عملکرد نداشت، جهت ارائه‌ی بهتر تأثیر/تتایج کود شیمیایی، این اثر در بالاترین سطح کود دامی بررسی شد. بیشترین مقدار عملکرد دانه (۶۳۰۰، ۶۲۵۰ و ۶۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب از تیمارهای ۱۵۰-۰-۰؛ ۱۵۰-۲۰۰-۰؛ ۱۵۰-۳۰-۲۰۰ که به ترتیب N-P-M از چپ به راست، بر حسب کیلوگرم در هکتار/کیلوگرم در هکتار/تن در هکتار می‌باشند، به دست آمد. با توجه به نتایج آزمایش، برهمکنش اثرات کود نیتروژن و فسفر بر عملکرد دانه معنی‌دار نبود.

مراقبی و همکاران (۳۵) گزارش کردند که با افزایش میزان مصرف نیتروژن (از صفر تا ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) عملکرد دانه، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین دانه افزایش یافت. هاتفیلد و همکاران (۲۲) گزارش کردند که کود نیتروژن از طریق افزایش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه باعث افزایش عملکرد دانه گندم شد.

واکنش عملکرد دانه گندم در کلیه‌ی سطوح نیتروژن، در سطح بالای کود فسفر (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، بیشتر از سطوح پایین و میانی فسفر بود، ضمن این‌که فرم درجه‌ی ۲ واکنش به نیتروژن در تمام سطوح فسفر ثابت مانده و افزایش عملکرد ناشی از افزایش فسفر بود (شکل ۲ و جدول ۳). این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که در

$RMSE$  به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و براساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی که مقدار  $RMSE$  کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰ درصد باشد، ضعیف برآورد می‌شود (۳۸). همچنین، برای ارزیابی مدل می‌توان از نمودار مقادیر مشاهده شده در برابر مقادیر برازش شده استفاده کرد. بر این اساس معادله خط راست مقادیر مشاهده شده و برازش شده با توجه به مدل‌های نهایی که در هریک از صفات انتخاب شدند رسم شد (رابطه ۷).

$$P_i = a + b O_i \quad (7)$$

قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نرمال بودن توزیع آن‌ها اطمینان حاصل شد. برای داده‌های شمارشی، عملیات تبدیل داده انجام گرفت. به منظور اطمینان از یکنواختی واریانس تیمارها، آزمون بارتلت بر روی داده‌ها انجام و صحت آن‌ها تأیید شد. از آنجا که بین دو سال آزمایش از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، بنابراین، داده‌ها تجزیه‌ی مرکب شدند و میانگین هر صفت طی دو سال آزمایش گزارش شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها براساس طرح آماری مورد استفاده، توسط نرم‌افزارهای MINITAB Ver. 14، Ver. 17 MS Excel انجام شد.

#### نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل<sup>۱</sup> برای هر کدام از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، تعداد پنجه بارور، محتوای نسبی رطوبت، تلفات نیتروژن و کارایی نیتروژن در جدول ۳ نشان داده شده است. در مورد عملکرد دانه، اثرات نیتروژن و فسفر از جزء خطی مدل رگرسیونی و اثرات درجه دو آن‌ها از جزء درجه دو مدل رگرسیونی براساس آزمون F به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳)، در حالی‌که اثر متقابل معنی‌داری بین کوددهی نیتروژن و فسفر، نیتروژن و کود دامی و فسفر و کود دامی در متغیرهای تلفات نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن مشاهده نشد. اثر درجه دو متغیرهای مستقل نیتروژن (نیتروژن × نیتروژن) و فسفر (فسفر × فسفر) بر صفات عملکرد دانه ( $p \leq 0/01$ )، تعداد پنجه بارور ( $p \leq 0/01$ ) و کارایی مصرف نیتروژن ( $p \leq 0/05$ )، معنی‌دار بود. همچنین، اثر متقابل نیتروژن × فسفر و فسفر × کود دامی بر تعداد پنجه بارور گندم معنی‌دار بود ( $p \leq 0/01$ ). آزمون عدم برازش، عدم وجود اختلاف معنی‌دار تجزیه رگرسیونی برای کلیه صفات مورد بررسی (به جز محتوای رطوبت نسبی) را با روش تجزیه واریانس نشان داد، که بیانگر قابلیت بالای برازش مدل بود.

صورت وجود نیتروژن کافی در دسترس، فسفر نقش تعیین‌کننده در عملکرد دانه خواهد داشت (۱۷ و ۲۳).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل  
Table 3- Analysis of variance of the full quadratic regression model

منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی Degree of Freedom	عملکرد دانه Seed Yield	عملکرد بیولوژیک Biological Yield	تعداد پنجه بارور Fertile tiller number	محتوای نسبی رطوبت Relative Water Content	تلفات نیتروژن Nitrogen Loss	کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen Use Efficiency
مقدار ثابت Constant مدل رگرسیون Regression model	9	2.2907*	6.7192ns	**	28.1721ns	13742*	**
خطی Linear	3	1.1854ns	4.8728ns	**	23.2676ns	21374*	**
نیتروژن Nitrogen (N)	1	2.1275*	0.9773ns	**	0.5822ns	62121**	**
فسفر Phosphorus (P)	1	1.6689*	12.3070*	**	66.2452*	1407ns	**
کود دامی Manure (M)	1	0.5512ns	2.3086ns	**	1.4238ns	1100.2ns	**
درجه ۲ 2 Order	3	5.3810*	7.6513ns	**	21.5724ns	16584*	**
نیتروژن × نیتروژن N×N	1	7.7415**	0.0601ns	**	32.5710ns	13492*	**
فسفر × فسفر P×P	1	4.5876**	2.9008ns	**	24.8508ns	3105ns	**
کود دامی × کود دامی M×M	1	0.1060ns	19.6578*	**	13.1493ns	21375*	**
اثر متقابل Interaction	3	0.4975ns	9.0963ns	**	24.9888ns	774ns	**
نیتروژن × فسفر N×P	1	0.9848ns	7.9929ns	**	29.7493ns	256.2ns	**
نیتروژن × کود دامی N×M	1	0.0351ns	0.2576ns	**	1.7889ns	22.8ns	**
فسفر × کود دامی P×M	1	0.4726ns	19.0205*	**	43.4281ns	2044.8ns	**
عدم برازش Lack of Fit	3	0.2795ns	2.6974ns	**	18.1179ns	1396.4ns	**

\*\* و \* به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱٪ و ۵٪ و ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار را نشان می‌دهد.  
\* , \*\* and ns represent significant at 5% level, Significant at 1% level and non-significant

### عملکرد بیولوژیک

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در تمام سطوح کاربرد فسفر تا سطح میانی کاربرد کود دامی، عملکرد بیولوژیک افزایش و پس از آن تا سطح بالای کود دامی کاهش یافت، با این تفاوت که شدت این کاهش در سطوح میانی و بالای فسفر بیشتر از سطح پایین فسفر بود. به نظر می‌رسد که برهمکنش بین فسفر و کود دامی در

سطح بالای کود دامی (۳۰ تن در هکتار) با افزایش میزان فسفر (از صفر تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) تشدید شد. قابلیت دسترسی فسفر به میزان زیادی وابسته به pH است (۳۴)، احتمالاً با افزایش سطح کود دامی و افزایش pH از میزان فراهمی فسفر کاسته شد و بنابراین این عنصر در افزایش عملکرد بیولوژیک مؤثر واقع نشد. برخلاف نیتروژن که جابه‌جایی آن در خاک به‌طور عمده توسط حرکت توده‌ای انجام

می‌گیرد، جابه‌جایی فسفر در خاک وابسته به شیب انتشار است و بنابراین افزایش رطوبت ناشی از کود دامی و اثر آن بر دسترس‌پذیری فسفر برای گیاه، منفی است (۲۳).

جدول ۴- ضرایب رگرسیون و تبیین معادله

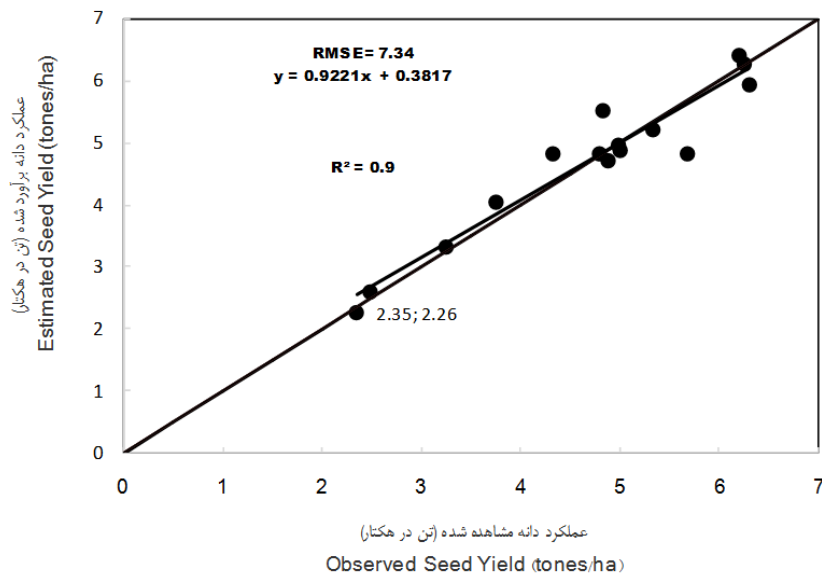
Table 4- Regression coefficients of the equation of

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_1^2 + a_5X_2^2 + a_6X_3^2 + a_7X_1X_2 + a_8X_1X_3 + a_9X_2X_3^*$$

متغیرهای پاسخ Response Variables						ضرایب Coefficient
کارایی نیتروژن NUE	تلفات نیتروژن N Losses	محتوای نسبی رطوبت RWC	تعداد پنجه بارور Fertile tiller No.	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	
12.64	65.5	78.97	2.863	15.11	2.939	<b>a<sub>0</sub></b>
0.0008	-0.136	-0.0258	-0.00852	-0.0155	0.03063	<b>a<sub>1</sub></b>
0.0606	0.640	-0.0821	-0.00836	0.0077	-0.01522	<b>a<sub>2</sub></b>
-0.424	-11.36	-0.496	0.0203	0.410	-0.0108	<b>a<sub>3</sub></b>
0.000148	0.00298	0.000146	0.000023	-0.000006	-0.000071	<b>a<sub>4</sub></b>
-0.000326	-0.00306	0.000274	0.000069	-0.000094	0.000118	<b>a<sub>5</sub></b>
0.01252	0.349	0.00866	-0.000067	-0.01059	-0.00078	<b>a<sub>6</sub></b>
0.000019	-0.00073	-0.000247	0.000023	0.000128	-0.000045	<b>a<sub>7</sub></b>
0.000604	0.00106	0.000297	0.000067	0.000117	-0.000042	<b>a<sub>8</sub></b>
0.000577	0.0151	0.00220	-0.000333	-0.001454	0.000229	<b>a<sub>9</sub></b>
95.31	92.86	82.02	98.24	83.08	92.06	<b>R<sup>2</sup></b>

X<sub>1</sub>، X<sub>2</sub> و X<sub>3</sub> به ترتیب متغیرهای مستقل کود نیتروژن، کود فسفر و کود دامی هستند.

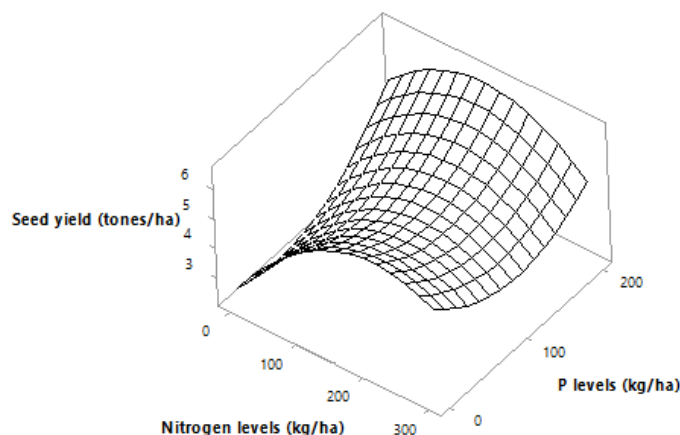
X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> and X<sub>3</sub> indicates independent variables of nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer and manure, respectively



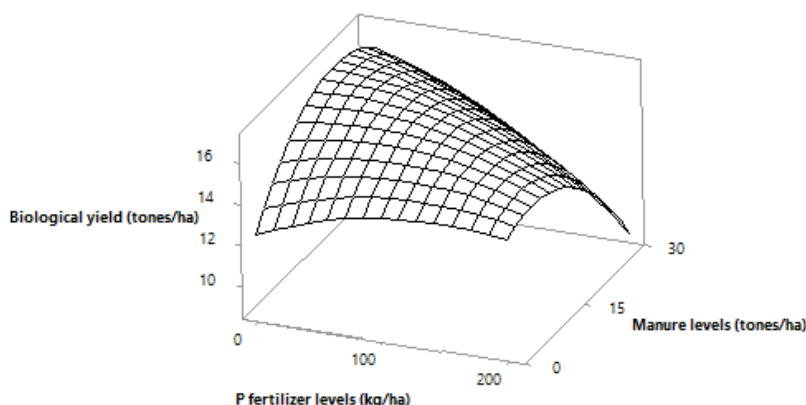
شکل ۱- نمودار و معادله خط رگرسیون مقادیر برآزش داده شده و مقادیر مشاهده شده برای عملکرد دانه و مقدار RMSE با توجه به مدل رگرسیون درجه دو کامل

Figure 1- Graph and equation of the regression line and the value of RMSE for observed and predicted values of the wheat seed yield based on full quadratic regression model





شکل ۲- سطح- پاسخ عملکرد دانه گندم نسبت به سطوح مختلف کودهای نیتروژن و فسفر در سطح ثابت ۳۰ تن در هکتار کود دامی  
Figure 2- Response surface for seed yield in different nitrogen and phosphorus fertilization at constant level of 15 tonnes/ha of manure



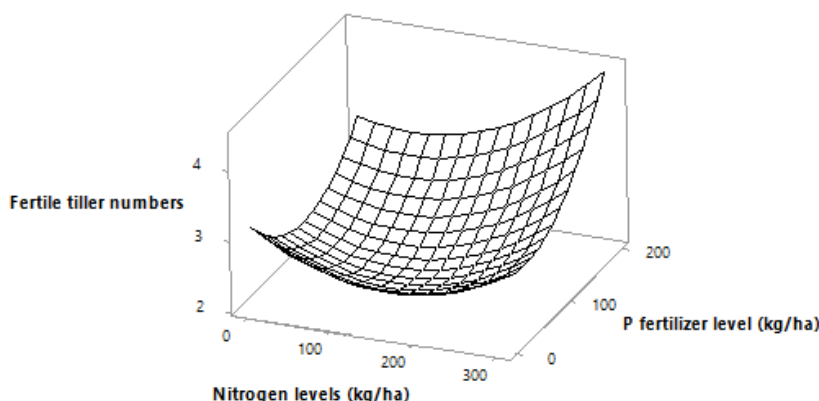
شکل ۳- سطح- پاسخ عملکرد بیولوژیک گندم نسبت به سطوح مختلف کودهای فسفر و دامی در سطح ثابت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن  
Figure 3- Response surface for biological yield in different phosphorus and manure fertilization at constant level of 150 kg/ha of nitrogen

احتمالاً به دلیل محدود شدن اثر نیتروژن در غیاب فسفر بود. همین اتفاق برای اثر برهمکنش نیتروژن و فسفر برای عملکرد دانه نیز دیده شد (شکل ۲).

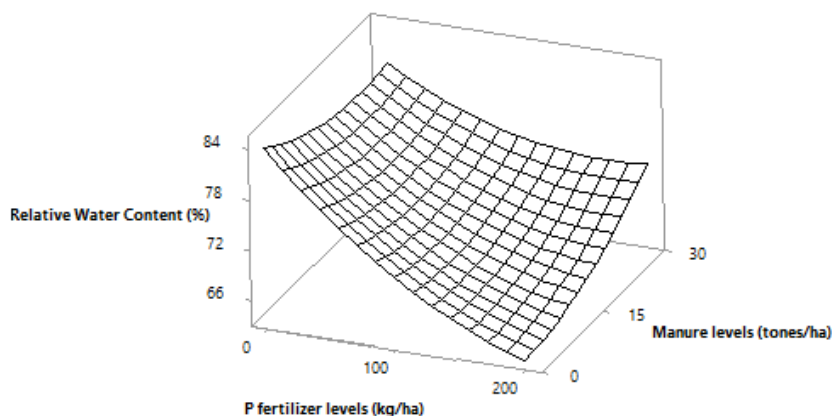
نیتروژن علاوه بر مشارکت در ساختار بیوشیمیایی پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و کلروفیل (۳۴) سبب تقسیم و بزرگ‌شدن سلول‌ها، افزایش سطح و دوام برگ و افزایش تعداد پنجه و دوام آن می‌شود که در نهایت افزایش ظرفیت سیستم فتوسنتزی گیاه و تولید ماده‌ی خشک را به دنبال دارد (۱۱). ظاهراً نیتروژن تعداد پنجه (رشد رویشی) را زیاد می‌کند نه پنجه‌ی بارور را. باروری به فسفر وابسته است، بنابراین، وقتی مقدار فسفر زیاد شده تعداد پنجه بارور هم زیاد شده است. در فسفر کم، نیتروژن زیاد، پنجه‌ی بارور را کم می‌کند.

#### تعداد پنجه بارور در بوته

تعداد پنجه بارور با افزایش سطح کاربرد فسفر افزایش یافت و شیب این افزایش در سطح ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بیشتر از سطوح ۱۵۰ و صفر آن بود، ضمن این‌که افزایش مصرف نیتروژن از صفر تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، اثر منفی بر تولید پنجه بارور در گندم داشت، اگرچه این اثر منفی در سطوح پایین و میانی فسفر بیشتر از سطح بالای کاربرد فسفر بود (شکل ۴). قبلاً نیز اشاره شد که اثرات مثبت نیتروژن بر رشد و نمو گیاه، در صورت وجود مقادیر کافی از سایر عناصر به‌ویژه فسفر به ظهور می‌رسد. در پژوهش حاضر، اثر مثبت نیتروژن در افزایش تعداد پنجه بارور در سطوح میانی و بالای فسفر کاملاً آشکار بود، اما در سطح صفر فسفر این تأثیر دیده نشد که



شکل ۴- سطح- پاسخ تعداد پنجه بارور در بوته گندم نسبت به سطوح مختلف کودهای نیتروژن و فسفر در سطح ثابت ۱۵ تن در هکتار کود دامی  
 Figure 4- Response surface for fertile tiller number of wheat in different nitrogen and phosphorus fertilization at constant level of 15 tones/ha of manure



شکل ۵- سطح- پاسخ محتوای نسبی رطوبت گندم نسبت به سطوح مختلف کودهای دامی و فسفر در سطح ثابت ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار  
 Figure 5- Response surface for relative water content of wheat in different phosphorus and manure fertilization at constant level of 300 kg/ha of nitrogen

#### محتوای نسبی رطوبت

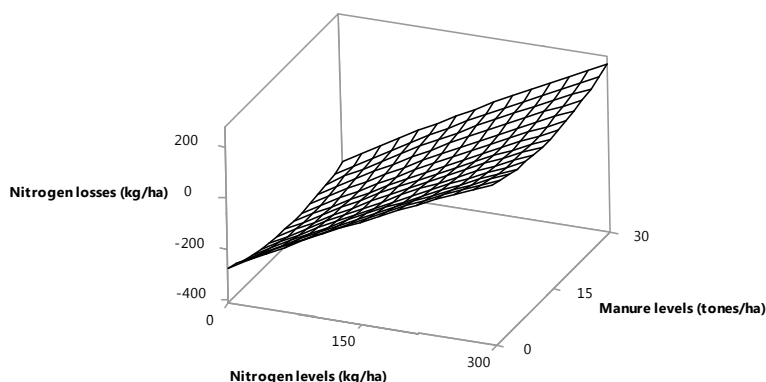
اثر خطی فسفر بر محتوای رطوبت نسبی معنی‌دار بود (جدول ۳) به طوری که با افزایش سطوح کاربرد فسفر، محتوای رطوبت نسبی کاهش یافت و این کاهش در سطوح صفر و میانی کود دامی شدیدتر از سطح بالای کود دامی بود (شکل ۵). نتیجه‌ی حاصل اندکی غیر عادی به نظر می‌رسد، شاید دلیل احتمالی آن اثر مثبت فسفر بر توسعه‌ی سیستم ریشه و اختصاص مواد فتوسنتزی به آن باشد (۳۴). اثر احتمالی دیگر، همان گونه که قبلاً نیز بیان شد، تأثیر بیشتر فسفر بر رشد زایشی نسبت به رشد رویشی است که با کاهش محتوای رطوبت گندم در دوره‌ی زایشی مطابقت دارد.

شلمر و همکاران (۴۲) گزارش کردند که کمبود نیتروژن موجب کاهش پتانسیل آب، افزایش میزان اسید آسبیزیک در برگ می‌شود، بنابراین نقش مهمی در فرآیند پیری ایفا می‌کند. آن‌ها همچنین بیان کردند که نیتروژن سبب افزایش محتوای نسبی آب در گیاهان

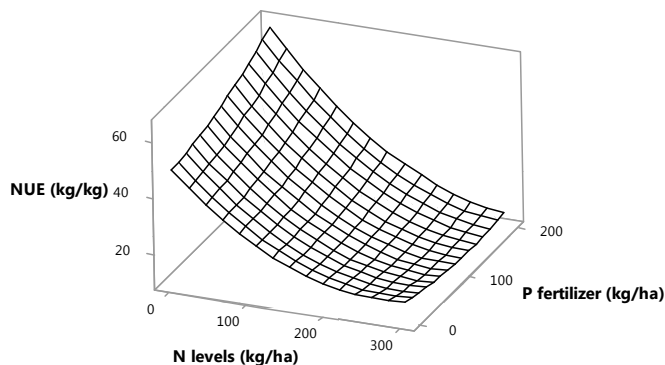
می‌گردد و در گیاهانی که از درصد آب بیشتری برخوردارند، محتوای کلروفیل هم بیشتر است. دمای محیط ریشه می‌تواند جذب نیترات را تحت تأثیر قرار دهد. از آن‌جا که مواد آلی از جمله کود گاوی می‌توانند ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش دهند، بنابراین از این طریق بر نگهداری و جذب عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن تأثیر می‌گذارند. نتایج برخی تحقیقات نشان داده‌اند که در دامنه‌ی دمای بین ۴ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد جذب نیترات بیشتر از آمونیوم تحت تأثیر افزایش دما قرار می‌گیرد (۴۷). در شرایط سمیت نیتروژن، تنفس گیاه بالا خواهد بود و در نتیجه کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. گزارش شده است که مقدار پروتئین دانه شاخصی از مقدار نیتروژن در دسترس گیاه و بیانگر وضعیت آب گیاه است (۱۶).

#### تلفات نیتروژن

تلفات نیتروژن به موازات افزایش سطوح کاربرد کود نیتروژن و کود دامی، با روند درجه‌ی ۲ افزایش یافت (شکل ۶).



شکل ۶- پاسخ تلفات نیتروژن نسبت به سطوح مختلف کودهای نیتروژن و دامی در سطح ثابت ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار  
Figure 6- Response surface for nitrogen losses different nitrogen and manure levels fertilization at constant level of 100 kg/ha of phosphorus



شکل ۷- سطح- پاسخ کارایی نیتروژن نسبت به سطوح مختلف کودهای نیتروژن و فسفره در سطح ثابت ۳۰ تن در هکتار کود دامی  
Figure 7- Response surface for nitrogen use efficiency in different nitrogen and phosphorus levels fertilization at constant level of 30 t/ha of manure

مورد کارایی نیتروژن گندم در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار پایین  $RMSE$  نشان‌دهنده برازش خوب مدل می‌باشد. به‌علاوه، اختلاف معنی‌داری بین عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون و شیب و عرض از مبدأ معادله خط ۱:۱ مشاهده نشد.

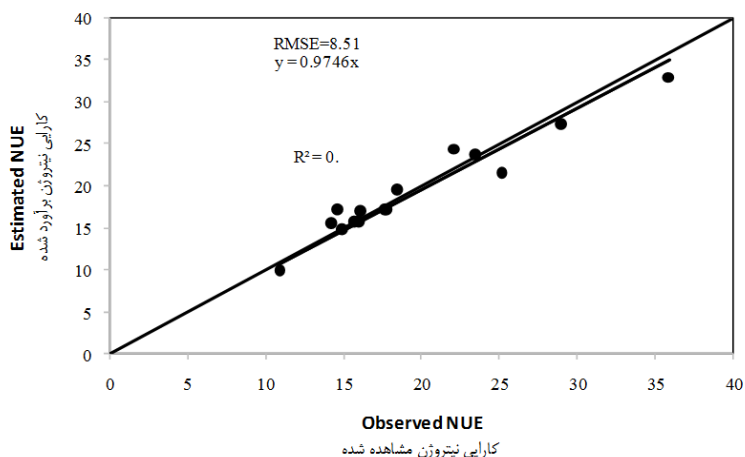
#### بهینه‌سازی منابع

بهینه‌سازی مقادیر کوددهی نیتروژن، فسفر و کود دامی با توجه به سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی صورت گرفت.

#### کارایی مصرف نیتروژن

کارایی مصرف نیتروژن با افزایش سطوح مصرف کود نیتروژن کاهش یافت (شکل ۷). مارینو و همکاران (۳۳) گزارش کردند که کارایی مصرف نیتروژن گندم با افزایش سطح کود نیتروژن از ۵۰ به ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، ۶۰ درصد کاهش یافت و از ۴۴/۲ به ۱۷/۶ کیلوگرم ماده خشک بر کیلوگرم نیتروژن رسید.

مراقبی و همکاران (۳۵) گزارش کردند که با افزایش میزان مصرف نیتروژن (از صفر تا ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) عملکرد دانه افزایش ولی کارایی مصرف نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. نمودار رگرسیون خطی مقادیر برازش داده شده و مشاهده شده در



شکل ۸- نمودار و معادله خط رگرسیون مقادیر برآزش شده و مشاهده شده برای کارایی نیتروژن و مقدار RMSE با توجه به مدل رگرسیونی درجه دو کامل

Figure 8- Graph and equation of the regression line and the value of RMSE for observed and predicted values of the wheat nitrogen use efficiency based on full quadratic regression model

جدول ۵- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین توابع برآزش شده برای متغیرهای پاسخ  
Table 5- RMSE values and coefficients of determination of fitted equations for response variables

متغیرهای پاسخ Response Variables							
کارایی مصرف نیتروژن NUE	تلفات نیتروژن N Losses	محتوای نسبی رطوبت RWC	تعداد پنجه بارور Fertile tiller No.	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	RMSE (%)	
8.51	18.98	2.67	6.47	6.35	7.34		
0.92	0.92	0.78	0.91	0.81	0.92	R <sup>2</sup>	

۱۱۶۹۲ کیلوگرم در هکتار و کارایی مصرف نیتروژن ۹/۰۸ برآورد شد (جدول ۶).

در سناریوی اقتصادی - زیست‌محیطی، کارایی مصرف نیتروژن، تلفات نیتروژن و عملکرد دانه، به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در بهینه‌سازی منابع مصرفی مورد توجه قرار گرفت و کاربرد ۱۴۴/۷۳ و ۳۴/۳ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب نیتروژن و فسفر و ۳۰ تن در هکتار کود دامی، منجر به عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب ۴۰۳۱ و ۱۵۳۱۱ کیلوگرم در هکتار شد و افزایشی ۳۶ درصدی در کارایی مصرف نیتروژن نسبت به سناریوی اقتصادی (۱۶/۵۰ در برابر ۱۰/۴۹) را به‌دنبال داشت.

در سناریوی اقتصادی - زیست‌محیطی، علاوه بر توجه به جنبه اقتصادی تولید (عملکرد دانه) به‌صورت همزمان مسائل زیست‌محیطی تولید که در این مطالعه تلفات نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن را شامل می‌شد، نیز در نظر گرفته شد. لذا به‌نظر می‌رسد که مصرف منابع با توجه به مقادیر بهینه‌سازی شده براساس این سناریو (به‌ترتیب ۱۴۵ و ۳۴ کیلوگرم نیتروژن و فسفر در هکتار و ۳۰ تن کود دامی در هکتار) می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین سطوح مصرف کودهای

در سناریوی اقتصادی عملکرد دانه گندم به‌عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده مقادیر بهینه منابع در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، نتایج نشان داد که با کاربرد ۱۴۵/۴۵ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار، ۲۰۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار و مقدار ۱۸/۴۸ تن کود دامی در هکتار در طول فصل رشد می‌توان به عملکرد دانه‌ای برابر با ۶۵۰۰ کیلوگرم در هکتار و عملکرد بیولوژیک ۱۳۱۳۰ کیلوگرم در هکتار دست یافت. در چنین شرایطی کارایی مصرف نیتروژن ۱۰/۴۹ و تلفات نیتروژن معادل ۶۱ کیلوگرم در هکتار خواهد بود (جدول ۶).

در سناریوی زیست‌محیطی، کاهش تلفات نیتروژن، عامل تعیین‌کننده در بهینه‌سازی منابع مصرفی در نظر گرفته شد. در واقع هدف از این سناریو کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف زیاد کودهای نیتروژن، فسفر و احتمالاً کود دامی بود و عملکرد اقتصادی اهمیت کمتری داشت. با توجه به این سناریو، کوددهی نیتروژن به‌میزان ۲۱/۲۱ کیلوگرم در هکتار، بدون کاربرد فسفر در کنار مصرف ۱۶/۳۶ تن کود دامی در هکتار، تلفات نیتروژن را به صفر رساند. با توجه به مقدار بهینه منابع مصرفی در این سناریو میزان عملکرد دانه ۳۱۶۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد بیولوژیک

نیتروژن، فسفر و کود دامی در این پژوهش در نظر گرفته شوند.

جدول ۶- مقادیر بهینه سازی شده کود نیتروژن، کود فسفر و کود دامی به منظور دستیابی به متغیرهای وابسته مورد انتظار در سناریوهای مختلف  
Table 6- Optimized values of nitrogen fertilizer and irrigation for reaching the dependent variables based on evaluated scenarios

متغیرهای وابسته (Y) Dependent variables (Y)						متغیرهای مستقل (X) Independent Variables (X)			
کارایی نیتروژن NUE (kg DM/ kg N)	تلفات نیتروژن N Losses (kg ha <sup>-1</sup> )	محتوای نسبی رطوبت RWC (%)	تعداد پنجه Fertile Tiller .No	عملکرد بیولوژیک Biological Yield (kg ha <sup>-1</sup> )	عملکرد دانه Seed Yield (kg ha <sup>-1</sup> )	کود دامی Manure (ton ha <sup>-1</sup> )	فسفر Phosphorus (kg ha <sup>-1</sup> )	نیتروژن Nitrogen (kg ha <sup>-1</sup> )	سناریوهای مختلف Scenarios
10.49	61.04	68.38	3.16	13130	6500	18.48	200	145.45	اقتصادی Economic
9.08	0	72.79	3.03	11692	3160	16.36	0	21.21	زیست محیطی Environmental اقتصادی- زیست
16.50	0	71.04	2.51	15311	4031	30	34.3	144.73	محیطی Eco- Environmental

### نتیجه گیری

به سوی گسترش تجارتي کودهای آلی که می‌توانند بهره‌وری گیاه زراعی را به موازات کودهای شیمیایی حفظ کنند و هم‌زمان دوست‌دار محیط‌زیست، به صرفه و غنی‌کننده‌ی خاک هستند، می‌گشاید. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به نظر می‌رسد که برای تولید گندم پاییزه، سناریوی اقتصادی- زیست محیطی نسبت به دو سناریوی دیگر اولویت داشته باشد، هرچند، منافع و مضار هر سناریو در برابر سناریوهای دیگر، باید در عمل و تحت شرایط واقعی سنجیده و نسبت به کاربرد آن تصمیم‌گیری شود.

### سپاسگزاری

هزینه‌ی انجام یک سال این تحقیق توسط معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهش به‌شماره ۱۹۸۰۰ تأمین شده است که بدین‌وسیله قدردانی می‌شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که میزان مصرف کودهای نیتروژنی و فسفره که معمولاً برای زراعت گندم پاییزه در مشهد به کار برده می‌شود، بازتاب دقیقی از نیازهای واقعی کودی برای گیاهان زراعی مختلف در نواحی آگروکلیماتیکی متفاوت این منطقه نیست و نیاز به بازبینی دارد. در پژوهش حاضر، استفاده از ۱۵ تن کود دامی در هکتار (در سناریوی اقتصادی-زیست محیطی)، سبب دسترس‌پذیری بیشتر نیتروژن و فسفر و احتمالاً سایر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و افزایش بهره‌وری گیاه زراعی شد. علاوه بر این، به دام افتادن و حبس عناصر غذایی در ماتریکس آلی کود دامی، که یک نهاده‌ی بوم‌سازگار و کم‌هزینه محسوب می‌شود و امکان تهیه آن به صورت محلی وجود دارد، اثربخشی کودهای شیمیایی را در طول زمان بهبود می‌بخشد. کاربرد کود دامی به همراه کودهای نیتروژن و فسفر، افق‌های جدیدی

### References

- Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., and Klopfer, J. W. 2009. Plant growth promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology* 58: 921-929.
- Akiyama, H., Tsuruta, H., and Watanabe, T. 2000. N<sub>2</sub>O and NO emission from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere- Global Change Science* 2: 313-320.
- Al Imran, M., and Rengel, Z. 2013. Physiology of nitrogen-use efficiency. In: *Improving water and nutrient use efficiency in food production system*. Rengel, Z. (Ed.). 2013. WILEY-BLACKWELL. ISBN: 978-0-8138-1989-1.
- Alexandratos, N., and Bruinsma, J. 2012. *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. Global Perspective Studies Team, FAO Agricultural Development Economics Division.
- Black, C. A., Evans, D. D., White, J. L., Ensminger, L. E., and Clark, F. E. 1965. *Methods of soil analysis*. In:

- page A.L. (Eds.). American Society of Agronomy, p. 1562.
6. Box, G., and Behnken, D. 1960. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics* 2: 455-475.
  7. Carly, S., Dupre, C., Edu, D., Gaudnik, C., Gowing, D. J. G., Bleeker, A., Diekmann, M., Alard, D., Bobbink, R., Fowler, D., Corcket, E., Mountford, J. O., Vandvik, V. A., Per A., Muller, S., and Dise, N. B. 2010. Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe. *Environmental Pollution* 158 (9): 2940-2945.
  8. Cassidy, E. S., West, P. C., Gerber, J. S., and Foley, J. A. 2013. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environmental Research Letters*. 8 (2013) 034015 (8pp).
  9. Ciampitti, I. A., and Vyn, T. J. 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research* 133: 48-67.
  10. Conant, R. T., Berdanier, A. B., and Grace, P. R. 2013. Patterns and trends in nitrogen use and nitrogen recovery efficiency in world agriculture. *Global Biogeochemical Cycles* 27 (2): 558-566.
  11. Davis, J. G., Westfall, D. G., Mortvedt, J. J., and Shanahan, J. F. 2002. Fertilizing winter wheat. *Agronomy Journal* 84: 1198-1203.
  12. Doberman, A., and Cassman, K. G. 2005. Cereal area, yield and nitrogen use efficiency and drives for future nitrogen fertilizer consumption. *Science in China* 48: 745-758.
  13. Dobermann, A., and Cassman, K. G. 2004. Environmental dimension of fertilizer N: what can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security? In: *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer use on Food Production and the Environment* (ed. Mosier AR), pp. 261-278. Island Press, Washington, DC.
  14. Emilsson, T., Brendtsson, J. C., Mattsson, J. E., and Rolf, K. 2007. Effect of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Ecological Engineering* 29: 260-271.
  15. Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstrom, C., and Wold, S. 2008. *Design of Experiments-Principales and Applications*. 3<sup>rd</sup> Edition, UMETRICS Academy, Sweden.
  16. Fageria, N. K. 2014. *Nitrogen Management in Crop Production*. New York: CRC Press. ISBN: 978-1-4822-2283-8.
  17. Fageria, N. K., and Baligar, V. C. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88: 97-185.
  18. FAO Country Profiles for IRAN. 2014. Available at: <http://www.fao.org/countryprofiles/index/en/?iso3=IRN>
  19. FAO Statistical Yearbook: World Food and Agriculture. 2013. Available at: <http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>
  20. FAO. 2012. *The State of Food and Agriculture 2012 - Investing in Agriculture for a Better Future*, FAO, Rome, Italy. Available at: <http://www.fao.org/docrep/017/i3028e/i3028e.pdf>
  21. Gastal, F., and Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* 53 (370): 789-799.
  22. Hatfield, J. L., and Prueger, J. H. 2004. Nitrogen over-use, under-use, and efficiency. *Crop Science* 26: 156-168.
  23. Hawkesford, M. J., and Barraclough, P. 2011. *The Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops*. WILEY-BLACKWELL, USA. ISBN: 978-0-8138-1992-1.
  24. Horwitz, W., and Latimer, G. W. 2005. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 18<sup>th</sup> Edition. Maryland, USA.
  25. Hosseini, R., Galeshi, S., Soltani, A., and Kalateh, M. 2012. The effect of nitrogen on yield and yield component in modern and old wheat cultivars. *Electronic Iranian Journal of Crop Production* 4: 187-199. (in Persian with English abstract).
  26. International Fertilizer Industry Association. 2009. *Statistics* (Online). Assessment of fertilizer use by crop at the global level. Available at: [www.fertilizer.org](http://www.fertilizer.org) (verified 17 May 2010), Paris, France.
  27. Jarvis, S., Hutchings, N., Brentrup, F., Olesen, J. E., and Van Der Hock, K. W. 2011. Nitrogen flows in farming systems across Europe. In: *The European Nitrogen Assessment: source, effects and policy perspectives*. Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, G., Grennfelt, A., Grinsven, H. V., and Grizzetti, B. 2011. Cambridge University Press. Part III, Chapter 10.
  28. Kell, D. B. 2012. Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 367 (1595): 1589-1597.
  29. Kramer, P. 1988. Measurement of plant water status: Historical perspectives and current concerns. *Irrigation Science* 9: 275-287.
  30. Kumar, M., and Nanwal, R. K. 2006. Effect of integrated nutrient management on productivity and uptake of N and P in Pearl millet-wheat cropping system. *Indian Journal of Fertilizer* 2 (4): 49-53.
  31. Lawlor, D. W., Lemair, G., and Gastal, F. 2001. Nitrogen, plant growth and crop yield. In: *Plant nitrogen*. Lea, P. J., and Morot Guarday, J. F. (Eds.). Berlin: Springer-Verlag.
  32. Lehmeier, C. A., Wild, M., and Schnyder, H. 2013. Nitrogen Stress Affects the Turnover and Size of Nitrogen Pools Supplying Leaf Growth in a Grass. *Plant Physiology* 162 (4): 2095-2105.

33. Marino, M. A., Mazzanti, A., Assuero, S. G., Gastal, F., Echeverria, H. E., and Andrade, F. 2004. Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter-spring growth of annual ryegrass. *Agronomy Journal* 96: 601-607.
34. Mengel, K., and Kirkby, E. H. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers, Boston. 849pp. ISBN: 978-1-4020-0008-9.
35. Moraghebi, F., Akbari Famile, M., and Hooshmandfar, A. 2011. The effect of amount and time application of nitrogen on seed protein percentage and ANU of wheat cultivar Pishtaz in Saveh region. *Quarterly of Plant and Ecosystem* 7 (1-29): 65-76. (in Persian with English abstract).
36. Mosier, A., Syers, J. K., and Freney, J. R. 2013. Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. Island Press, USA. 344 pages. ISBN: 1-55963-710-2.
37. Mosier, A. R., and Syers, J. K. 2004. Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed and fiber production in agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment. Mosier, A. R., Syers, J. K., Freney, J. R., (Eds.) SCOPE, Island Press, Washington DC, USA 65: 3-15.
38. Myers, R. H., and Montgomery, D. C. 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Willey & Sons, New York, USA.
39. Osborne, S. L. 2007. Utilization of existing technology to evaluate spring wheat growth and nitrogen nutrition in South Dakota. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 38: 949-958.
40. Rathke, G. W., Behrens, T., and Diepenbrock, W. 2006. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117: 80-108.
41. Raun, W. R., and Johnson, G. V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 91: 357-363.
42. Schlemmer, M. R., Francis, D. D., Shanahan, J. F., and Schepers, J. S. 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agronomy Journal* 97: 106-112.
43. Seiling, K., Brase, T., and Svib, V. 2006. Residual effect of different N fertilizer treatments on growth, N uptake and yield of oilseed rape, wheat and barley. *European Journal of Agronomy* 25: 40-48.
44. Sparling, G. P., Wheeler, D., Vesely, E. T., and Schipper, L. A. 2006. What is soil organic matter worth? *Journal of Environmental Quality* 35: 548-557.
45. The Office for data and information technology of the ministry of Jihad Keshavarzi. 2011. Agricultural data, Vol. 1: Crops, year of 2010-2011. Publication of Deputy for Planning, Economic and International, The Office for Data and Information Technology. <http://www.maj.ir/Portal/Home/Default.aspx?CategoryID=95a8e7d0-e5f0-4f2d-a241-792106c74dcc> (Available On-line at: 9.8.2014).
46. Weligama, C., Sale, P. W. G., Conyers, M. K., Liu, D. L., and Tang, C. 2010. Nitrate leaching stimulates subsurface root growth of wheat and increase rhizosphere alkalization in a highly acidic soil. *Plant and Soil* 328: 119-132.
47. Wuest, S. B., and Cassman, K. G. 1992. Fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated wheat: II. Partitioning efficiency of preplant versus late-season application. *Agronomy Journal* 84: 689-694.
48. Zamen, M., and Blennerhassett, J. D. 2010. Effects of the different rates of ureas and nitrification inhibitors on gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, nitrate leaching and pasture production from urine patches in an intensive grazed pasture system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 136: 236-246.
49. Zhao, D., Reddy, K. R., Kakani, V. G., and Reddy, V. R. 2005. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis and hyper spectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy* 22: 391-403.

## Optimizing of Nitrogen, Phosphorus and Cattle Manure Fertilizers Application in Winter Wheat Production Using Response-Surface Methodology (RSM)

M. Jahan<sup>1\*</sup> - M. Nassiri Mahallati<sup>2</sup> - H. Khalilzade<sup>3</sup> - R. Bigonah<sup>4</sup> - A. R. Razavi<sup>5</sup>

Received: 28-07-2014

Accepted: 21-12-2014

### Introduction

It is estimated that up to 50 percent of applied nitrogen would drift from agricultural systems as gaseous compounds and other types of activated nitrogen (27 and 46). When applied in high amounts, up to 90% of phosphorous fertilizers could be fixed in soil together with metallic elements as insoluble forms leading to further phosphorus pollution (1). In many crops, low absorption efficiency of fertilizers is the main reason of losses through leaching, volatilization and diffusion of soluble chemical fertilizers which easily released to soil and air. It has been reported that between 18-41 percent of applied nitrogen retain in soil after crop harvesting (Fageria, 2014). Nitrogen losses happens in different ways as ammonium volatilization in lime soils (10-70%), denitrification (9-22%) and leaching (14-40%) (13).

Chemical fertilizers are widely used by farmers due to low costs, easy availability and easy applicability. Chemical fertilizers increase the rate of organic matter decomposition in soil, thus increase the amount of greenhouse gasses such as N, CO<sub>2</sub> released in air which aggravate global warming and climate change (2)

This research was aimed to emphasize on optimizing of chemical and organic fertilizer use in winter wheat production in Iran, study the trend of change in different N, P and cattle manure levels and their effects on wheat characteristics and its changes trend also, comparison of the effectiveness of manure by chemical fertilizer related to NUE and yield increase of wheat.

### Materials and Methods

By conducting Box-Behnken design, it is possible to obtain the most information from the least operational practices due to distribution of experimental points through treatments confined. The design points were defined based on low and high levels of N (0, 300 kg ha<sup>-1</sup>), P (0, 200 kg ha<sup>-1</sup>) and manure (0, 30 tones ha<sup>-1</sup>) as shown in Table 2. Manure was analyzed for N, P and K content (1.18% of N, 0.29% of P and 1.04% of K). The high and low levels of manure were determined based on nutrient content and local recommendations.

Response of measured variables ( $y$ ) to experimental factors ( $X$ ) was estimated by using second order polynomials with interaction (Equation 1):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i<j}^m \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

Where  $\beta_0$  is constant and  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$  and  $\beta_{ii}$  are coefficients for linear, interaction and quadratic terms, respectively.

After simulation, using statistical methods, the result is a second order polynomial which states the estimated of response (yield) as a function of inputs variables. Finally, after optimizing of resulted function and eliminating of low effect terms, using statistical tests and criteria such as, F test, lack of fit test, coefficient of determination ( $R^2$ ), a final function to predict yield and other expected variables was calculated (Equation 2):

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1^2 + a_5 X_2^2 + a_6 X_3^2 + a_7 X_1 X_2 + a_8 X_1 X_3 + a_9 X_2 X_3 \quad (2)$$

In this function, Y is a dependent variable, X is the independent variable of N fertilizer, X<sub>2</sub> is independent variable of P fertilizer, X<sub>3</sub> is independent variable of manure, and a<sub>0</sub> to a<sub>9</sub> are coefficients of function. The equation is functional only in the defined range of input variables and could not predict values out of the range.

The optimized rates of N, P and manure, determined considering 3 scenarios including: economic, environmental and eco-environmental, which seed yield, N loss and NUE and N loss were the main determining factors, respectively.

1, 2, 3, 4, 5- Associate professor, Professor, M.Sc. students, and Ph.D. student of Agroecology respectively, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(\* - Corresponding Author Email: jahan@um.ac.ir)



To obtain optimized levels, response-surface methodology was used. Finally, the fitted values compared to observed values then validity of regression models evaluated by *RMSE* test (Equation 3) and 1:1 regression line.

$$(\%) RMSE = \frac{100}{O} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

## Results and Discussion

Optimization of nitrogen, phosphorus and manure fertilization were done according to 3 scenarios of economic, environmental and eco-environmental. In economic scenario, wheat seed yield was considered as the main determining factor of optimized resource, thus the result showed by applying of 145.45 kg ha<sup>-1</sup> N, 200 kg ha<sup>-1</sup> P and 18.48 tones ha<sup>-1</sup> manure, it would be attained the seed yield of 6500 kg ha<sup>-1</sup> and dry matter yield of 13130 kg ha<sup>-1</sup>. In eco-environmental scenario, the determining factor for optimizing resource was considered as nitrogen losses. The main objective of this scenario was reduction of environmental hazards resulted from the high rates of using of N, P and possibly manure, so, the economic yield had less importance. According to this scenario N application by 21.21 kg ha<sup>-1</sup> with no use of P, plus 16.36 tones ha<sup>-1</sup> of manure, minimize N losses (0 kg ha<sup>-1</sup>). Considering the optimized amount of used resource in this scenario, seed yield, dry matter yield and NUE were estimated of 3160 kg ha<sup>-1</sup>, 11692 kg ha<sup>-1</sup> and 9.08 kg DM/kg N, respectively.

Under eco-environmental scenario the main determining factors for optimizing resource, were considered as NUE, N losses and seed yield. As applying of 144.73 and 34.3 kg ha<sup>-1</sup> of N and P, respectively, and 30 tones ha<sup>-1</sup> of manure, resulted in seed yield of 4031 and dry matter yield of 15311 kg ha<sup>-1</sup>, respectively, which showed an increase of 36 percent for NUE compared to economic scenario (16.50 vs. 10.49).

## Conclusions

The results of this study showed that N and P fertilizers which used for wheat production did not reflect the actual needs of different crops under different agro-climatic areas indeed, as it should be reconsidered. In this experiment, applying of 30 tones ha<sup>-1</sup> of manure in eco-environmental scenario caused high availability of N, P and possibly other needed nutrients for plant, finally improved crop productivity. Moreover, trapped and retained nutrients in manure matrix which considered as an ecofriendly and low cost input, which simply preparable locally, improve effectiveness of chemical fertilizer in long term use.

## Acknowledgements

Financial support of Ferdowsi University of Mashhad (ratified no. 19800) for conducting this experiment is acknowledged.

**Keywords:** ANUE, Box-Behnken design, Eco-Environmental scenario, Nitrogen losses, Seed yield