نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد 15، شماره 4، زمستان 1396، ص. 810-798

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 15, No. 4, Winter. 2018, p. 798-810

بهینه‌سازی تراکم بوته و نیتروژن در زراعت ذرت (*Zea mays* L.) با استفاده از طرح مرکب مرکزی

علیرضا کوچکی[1*]- مهدی نصیری محلاتی[1]- سرور خرم دل[2]- سحر مرید احمدی[3]

تاریخ دریافت: 1394/12/10
تاریخ پذیرش: 1395/06/09

چکیده

یکی از معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت بهینه‌سازی عوامل مختلف و تخمین مدل رگرسیونی چندجمله‌ای، استفاده از طرح مرکب مرکزی است که روشی جایگزین و مناسب برای آزمایشات فاکتوریل می‌باشد. به‌منظور تعیین میزان بهینه نیتروژن و تراکم بهینه ذرت و اثر متقابل این عوامل بر عملکرد و شاخص‌های کارایی نیتروژن آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی با 13 تیمار و دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی 95-1394 اجرا شد. سطوح بالا و پایین تراکم به‌ترتیب 7 و 10 بوته در متر مربع و سطوح بالا و پایین نیتروژن به‌ترتیب صفر و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار در نظر گرفته شدند. عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه، کارایی بهره‌وری نیتروژن، کارایی جذب و کارایی مصرف نیتروژن به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و با استفاده از مدل رگرسیونی، تغییرات این متغیرها تحت تأثیر تیمارها بررسی شد. مقدار بهینه تراکم بوته و نیتروژن براساس سناریوهای اقتصادی، زیست محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی برای حصول مقادیر مورد انتظار عملکرد و شاخص‌های کارایی نیتروژن محاسبه شد. نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر عملکرد بیولوژیکی و دانه و شاخص‌های کارایی نیتروژن ذرت، اثر جزء درجه دو بر تمام صفات به‌جز عملکرد دانه و کارایی جذب نیتروژن و اثر متقابل درجه دو کامل بر عملکرد بیولوژیکی و کارایی جذب نیتروژن معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌یک از صفات به‌جز کارایی مصرف نیتروژن مورد بررسی معنی‌دار نشد. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده برای تراکم 7 بوته در متر مربع و 150 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (11/71 تن در هکتار) و بالاترین عملکرد برازش شده برای تراکم 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (12/22 تن در هکتار) به‌دست آمد. بالاترین کارایی جذب نیتروژن مشاهده شده و برازش شده به‌ترتیب برای تراکم 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (86/45 درصد) و تراکم 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (90/14 درصد) تعیین گردید. مقدار بهینه تراکم و نیتروژن در سناریوهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی به‌ترتیب 8/12 بوته در متر مربع و 225/27 کیلوگرم نیتروژن در هکتار، 7 بوته در متر مربع و 46/95 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و 7 بوته در متر مربع و 69/42 کیلوگرم نیتروژن در هکتار محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: عدم برازش، کارایی مصرف نیتروژن، کارایی بهره‌وری نیتروژن، مدل رگرسیون درجه دو کامل

مقدمه

جهت تعیین حد بهینه‌عوامل بهینه کنترل‌کننده رشد، استفاده از مدل‌ها و روابط تجربی‌ریاضی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. یکی از معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت بهینه‌سازی عوامل مختلف و تخمین مدل رگرسیونی چندجمله‌ای، استفاده از طرح مرکب مرکزی[4] است (Wu and Hamada, 2000). این طرح روشی جایگزین و مناسب برای آزمایشات فاکتوریل می‌باشد که اولین بار در سال 1951 میلادی توسط باکس و ویلسون ارائه و توسط باکس و هانتر (Box and Hunter, 1957) اصلاح گردید. مزیت استفاده از طرح مرکب مرکزی نسبت به آزمایشات فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز می‌باشد که اجرای آن‌را آسان‌تر می‌کند. این طرح همچنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را فراهم می‌آورد (Aslan, 2007). کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2014) با

1، 2 و 3- به‌ترتیب استاد، دانشیار و دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: akooch@um.ac.ir
DOI: 10.22067/gsc.v15i4.54235

4- Central Composite Design

برآورد مقادیر بهینه مصرف منابع آب و نیتروژن در زراعت گندم در قالب طرح مرکب مرکزی اظهار داشتند که افزایش مصرف کود نیتروژن و آبیاری اثر مثبتی بر افزایش عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب داشت؛ در حالی‌که افزایش آبیاری منجر به کاهش کارایی مصرف نیتروژن و افزایش تلفات نیتروژن شد. این محققان در سناریوی اقتصادی، مقدار بهینه کوددهی و آبیاری را به‌منظور دستیابی به 4045 کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه و 9908 کیلوگرم در هکتار عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب 274 کیلوگرم اوره در هکتار و 3964 مترمکعب آب در هکتار تعیین کردند. آنها در سناریوی زیست‌محیطی، مقدار بهینه این منابع را به‌منظور کاهش تلفات نیتروژن برای کوددهی و آبیاری به‌ترتیب 64 کیلوگرم در هکتار و 2651 مترمکعب در هکتار محاسبه نمودند. همچنین در سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی عملکرد دانه و کاهش تلفات نیتروژن همزمان مورد نظر قرار گرفت، درنتیجه مقادیر بهینه سطوح کوددهی و آبیاری به‌ترتیب معادل 153 کیلوگرم در هکتار و 3030 مترمکعب به‌دست آمد. نتایج دیگر مطالعه این محققان (Koocheki *et al.*, 2015b) روی تعیین میزان بهینه مصرف منابع آب، نیتروژن و همچنین تراکم بهینه کلزا با استفاده از طرح مرکب مرکزی نشان داد که افزایش سطوح آبیاری و کود باعث افزایش عملکرد دانه و تلفات نیتروژن گردید، در صورتی‌که افزایش تراکم باعث افزایش عملکرد و کاهش تلفات نیتروژن شد. در سناریوی اقتصادی، مقدار بهینه آب، کود و تراکم کلزا به‌ترتیب برابر با 3643 متر مکعب، 186 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و 149 بوته در متر مربع برآورد شد. این محققان مقادیر بهینه این تیمارها در سناریوی زیست‌محیطی را به‌ترتیب 1813، 12 و 150 و در سناریوی اقتصادی- زیست محیطی به‌ترتیب معادل 2639، 105 و 144 گزارش نمودند. نصیری محلاتی و همکاران (Nassiri Mahallati *et al.*, 2015) با بررسی اثر متقابل تراکم و اندازه بنه زعفران با استفاده از طرح مرکب مرکزی بیان داشتند که افزایش اندازه بنه و تراکم اثر مثبتی بر افزایش عملکرد اقتصادی، قطر بنه، تعداد بنه دختری، تعداد بنه اصلی، تعداد گل و وزن تر گل داشت. آنها همچنین اظهار داشتند که کاشت بنه‌هایی با وزن متوسط در تراکم بالا مناسب‌تر بوده و بر این اساس، مقدار بهینه اندازه بنه و تراکم زعفران را به‌ترتیب با 7 گرم و 250 بنه در متر مربع برآورد کردند.

نیتروژن یکی از عناصر ضروری برای رشد و افزایش عملکرد تمامی گیاهان از جمله ذرت می‌باشد (Zhao *et al.*, 2003). یوهارت و آندره (Uhart and Andrade, 1995) اظهار داشتند که کمبود نیتروژن در ذرت باعث کاهش تعداد و وزن دانه شد که این امر منجر به کاهش عملکرد دانه گردید. اگرچه نیتروژن نقشی اساسی در دستیابی به عملکرد بالای کمی و کیفی در محصولات زراعی دارد، ولی به آسانی از خاک شسته شده و باعث بروز آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. حدود 40 تا 60 درصد کود نیتروژن اضافه شده از خاک خارج می‌شود و این مقدار با افزایش کاربرد کود افزایش می‌یابد (Wenxue *et al.*, 2005) که درنتیجه باقی‌مانده کود در خاک افزایش یافته و باعث تشدید بروز آلودگی‌های منابع آبی می‌شود (Timsina *et al.*, 2001).

بنابراین توسعه سیستم‌های زراعی که نیتروژن را به‌طور مؤثری مصرف می‌کنند، جهت کاهش تلفات نیتروژن، به حداقل رسانیدن آلودگی‌های نیتراتی، کاهش هزینه‌های مصرفی و به‌تبع آن افزایش کارایی مصرف این عنصر پرمصرف حائز اهمیت می‌باشد. علاوه بر نیتروژن عوامل مدیریتی متعدد دیگری نظیر تراکم بوته نیز می‌تواند بر ارتباط بین رشد گیاه و میزان کلروفیل برگ مؤثر باشد (Barraclough and Kyle, 2001).

تعیین تراکم بهینه و الگوی مناسب کاشت برای استفاده مطلوب از نهاده‌ها مانند زمین، آب، نور و عناصر غذایی نقش مؤثری دارد و موجب افزایش کمی و کیفی محصول می‌شود. ذرت گیاهی است که نسبت به تراکم بوته بسیار حساس می‌باشد؛ به‌طوری‌که در تراکم‌های کم، از عوامل تولید، بهره‌برداری بهینه نمی‌شود، از سوی دیگر، افزایش بیش از حد تراکم، با تشدید رقابت، باعث عقیمی گل‌ها و کاهش عملکرد دانه می‌شود (Harper, 1983). هاشمی- دزفولی و هربرت (Hashemi-Dezfouli and Herbert, 1992) گزارش کردند که کاهش میزان مواد پرورده قابل دسترس در سطوح بالای تراکم بوته به‌واسطه کاهش نور، موجب کاهش تعداد دانه در ردیف بلال و سقط دانه‌ها در انتهای بلال می‌شود. جنتر وکمپر (Genter and Camper, 1993) گزارش کردند که با افزایش تراکم بوته، رقابت جهت دریافت نور بیشتر شده که در نتیجه طول میانگره‌ها و ارتفاع ساقه اصلی افزایش می‌یابد و از قطر ساقه نیز کاسته می‌شود. با افزایش تراکم بوته و کاهش فواصل ردیف، ارتفاع گیاه و قطر ساقه تغییر می‌کند و هرچه تعداد بوته افزایش و فاصله ردیف کاهش یابد نور رسیده به کف کانوپی کاهش یافته و رقابت بین اندام‌های گیاه برای جذب بیشتر تشعشع زیاد می‌شود. از طرف دیگر، تخریب نوری اکسین صورت نمی‌گیرد که مجموعه این عوامل می‌توانند باعث افزایش طول میانگره، کاهش قطر ساقه و افزایش ارتفاع بوته گردد (Tetio-Kagho and Gardner, 1988).

بر این اساس، از آن‌جا که کمی کردن نیاز کودی گیاهان به‌منظور بهبود مدیریت نیتروژن و همچنین انتخاب تراکم بوته مناسب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک امری ضروری در تولید گیاهان محسوب می‌شود، این مطالعه با هدف تعیین میزان بهینه نیتروژن و تراکم مطلوب بوته ذرت و اثر متقابل این عوامل جهت تولید بالاترین عملکرد دانه و پایین‌ترین آلودگی‌های زیست‌محیطی در شرایط آب و هوایی مشهد با استفاده از طرح مرکب مرکزی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی 36 درجه و 16 دقیقه شمالی و طول جغرافیایی 59 درجه و 38 دقیقه شرقی و ارتفاع 985 متر از سطح دریا با استفاده از طرح مرکب مرکزی با دو تکرار در سال زراعی 95-1394 اجرا شد. تعداد تیمارها با استفاده از معادله (1) محاسبه شد.

معادله (1) $t = 2^k + 2k + r$

در این فرمول، k: نشان‌دهنده تعداد فاکتورهای تحت بررسی و r: تعداد تکرار برای نقطه مرکزی می‌باشد (Box and Hunter, 1957; Wu and Hamada, 2000). بر این اساس، ترکیب تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین تراکم (7 و 10 بوته در متر مربع) و سطوح بالا و پایین نیتروژن (صفر و 300 کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) به شرح زیر تعیین شدند (جدول 1):

جدول 1- مقادیر و ضرایب تیمارها بر مبنای طرح مرکب مرکزی

Table 1- Amounts and coefficients for treatments based on central composite design

مقادیر تیمارها*				
تراکم بوته Plant density (No m^{-2})	نیتروژن Nitrogen (kg ha^{-1})	x_2	x_1	Runs
7	0	-1	-1	1
10	0	-1	+1	2
7	300	+1	-1	3
10	300	+1	+1	4
7	150	0	-1	5
10	150	0	+1	6
8.5	0	-1	0	7
8.5	300	+1	0	8
8.5	150	0	0	9
8.5	150	0	0	10
8.5	150	0	0	11
8.5	150	0	0	12
8.5	150	0	0	13

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل نیتروژن و تراکم بوته هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

همان‌گونه که در جدول 1 مشاهده می‌شود به دلیل اصول اجرای بالاترین تعداد تکرار به دلیل نیاز به دقت بالاتر برای نقطه عطف در طرح‌های بهینه‌سازی برای نقطه عطف در نظر گرفته شده است.

در مرحله آماده‌سازی زمین و پیش از کاشت، نمونه‌ای مرکب از عمق 30 سانتی‌متری خاک محل اجرای آزمایش به‌صورت تصادفی تهیه شد و به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مورد آزمایش قرار گرفت (جدول 2).

جدول 2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Physical and chemical properties of soil

بافت Texture	نیتروژن N (%)	فسفر P (mg kg^{-1})	پتاسیم K (mg kg^{-1})	اسیدیته pH	کربن آلی Organic carbon (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	آهک T.N.V (%)	اشباع SP (%)
لومی- سیلتی Loamy-silt	0.067	37	234	8.13	0.78	1.71	16.45	38.3

بذر ذرت هیبرید S.C. 704 در نیمه دوم اردیبهشت ماه روی چهار ردیف سه متری با فاصله 75 سانتی‌متر به روش خشکه‌کاری و با دست کاشته شد. جهت یکنواختی در سبز شدن گیاهان، اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر هفت روز یکبار به شیوه نشتی انجام شد. جهت جلوگیری از اختلاط اثر تیمارها انتهای کرت‌ها به‌طور کامل بسته و آبیاری کرت‌ها به‌طور کاملاً جداگانه انجام گردید. کنترل علف‌های هرز در طول فصل رشد انجام گرفت. در مرحله 6-4 برگی گیاهان برای رسیدن به تراکم مورد نظر تنک شدند. اعمال سطوح مختلف نیتروژن به‌صورت سرک در سه نوبت همزمان با کاشت، یک ماه پس از سبز شدن و همزمان با

گلدهی همراه با آبیاری انجام شد.

برداشت در مرحله رسیدگی کامل و پس از زرد شدن بوته‌های ذرت پس از حذف اثرات حاشیه‌ای انجام گردید. پس از آن، نمونه‌ای از عمق 0 تا 30 سانتی‌متری خاک برداشت و میزان نیتروژن به‌روش AOAC Official Method 968.06 (4.2.04) براساس تعیین نیتروژن به‌طریق هضم تر و با استفاده از دستگاه Semi-Automated Distillation Unit اندازه‌گیری شد (Horwitz and Latimer, 2005).

کارایی جذب نیتروژن[1] (NUpE)[2] براساس نسبت بین عملکرد نیتروژن در گیاه (کیلوگرم نیتروژن جذب شده در هکتار) بر کل مقدار نیتروژن در خاک (کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد (معادله 2) (Hatermink *et al.*, 2000).

معادله (2) $NUpE=plant\ N\ content/available\ N$

کارایی بهره‌وری نیتروژن[3] (NUeE) براساس نسبت بین عملکرد دانه (کیلوگرم دانه در هکتار) بر عملکرد نیتروژن در خاک (کیلوگرم نیتروژن خاک در هکتار) محاسبه شد (معادله 3) (Cassman *et al.*, 2003).

جهت محاسبه کارایی مصرف نیتروژن (NUE)[4] (kg grain.kg $^{-1}$ Nitrogen) از معادله (3) استفاده شد (Hatermink *et al.*, 2000):

معادله (3) $$NUE = \frac{Y_s}{N_{initial} + N_{fertilizer}}$$

در این معادله، Y_s: عملکرد دانه (kg ha^{-1})، $N_{initial}$: نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و $N_{fertilizer}$: نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) می‌باشد.

به‌منظور انتخاب مدل مناسب، مدل درجه دو کامل[5] با اثرات متقابل بین فاکتورها برازش داده (معادله 4) و سپس براساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مقادیر F، P value و R^2) و آزمون عدم برازش[6] بهترین مدل انتخاب و از این مدل برای بهینه‌سازی استفاده گردید.

معادله (4) $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

در این معادله، Y: متغیر وابسته بوده و با توجه به عملکرد دانه ذرت و یا کارایی بهره‌وری نیتروژن به‌صورت جداگانه محاسبه شد؛ X_1: متغیر مستقل کود نیتروژن و X_2: متغیر مستقل تراکم و a_1 تا a_5 ضرایب معادله می‌باشند.

عملکرد دانه، کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی جذب و کارایی مصرف نیتروژن به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی تعیین‌کننده میزان بهینه تراکم بوته و نیتروژن مصرفی منابع مورد استفاده تنها بر مبنای یک سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی در نظر گرفته شدند (Koocheki *et al.*, 2014; Koocheki *et al.*, 2015b).

برای برازش معادلات و انجام محاسبات آماری از نرم‌افزار Minitab ver. 17 استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل به همراه اجزای آن (شامل جزء خطی، درجه 2 و اثر متقابل) برای هریک از متغیرهای وابسته شامل عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه و شاخص‌های کارایی نیتروژن ذرت در جدول 3 ارائه شده است.

نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر تمام صفات مورد مطالعه شامل عملکرد بیولوژیکی و دانه، کارایی جذب نیتروژن، کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن ذرت معنی‌دار بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات به‌جز عملکرد دانه و کارایی جذب نیتروژن ذرت را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و تراکم بوته تنها بر عملکرد بیولوژیکی و کارایی جذب نیتروژن معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌یک از صفات به‌جز کارایی مصرف نیتروژن معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه 2 کامل بود (جدول 3).

آنالیز رگرسیون و ضریب تبیین برای برازش روابط بین متغیرهای نیتروژن و تراکم بوته با هریک از متغیرهای مستقل عملکرد دانه و بیولوژیکی و شاخص‌های کارایی نیتروژن ذرت در جدول 4 ارائه شده است که نمودارهای سطح پاسخ بر اساس این ضرایب به‌دست آمده است.

بر اساس این نتایج، مدل درجه دو کامل بین 55 تا 97 درصد از تغییرات کارایی جذب نیتروژن، عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه، کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن را توصیف کرد (جدول 4). به‌نظر می‌رسد که کارایی جذب نیتروژن نیتروژن، علاوه بر مقدار نیتروژن مصرفی و تراکم بوته به موارد دیگری نظیر خصوصیات خاک و سایر روش‌های مدیریتی همچون روش آبیاری، حجم آب مورد استفاده، تاریخ کاشت، زمان برداشت و غیره نیز بستگی دارد. هالورسون و همکاران (Halvorson *et al.*, 2008) گزارش کردند که افزایش سطوح آبیاری منجر به افزایش تلفات نیتروژن و کاهش کارایی جذب شد.

1- N recovery
2- N uptake efficiency
3- N utilization efficiency
4- Nitrogen use efficiency
5- Full quadratic regression
6- Lack of-fit

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل

Table 3- Analysis of variance of the full quadratic regression model

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	عملکرد بیولوژیکی Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	کارایی جذب نیتروژن N recovery	کارایی بهره‌وری نیتروژن N utilization efficiency	کارایی مصرف نیتروژن N use efficiency
مدل Model	6	177.291**	22.222**	374.85*	2209.3**	565.63**
تکرار Replication	1	20.548**	0.683ns	61.90ns	1.5ns	77.12ns
خطی: Linear:	2	497.124**	65.264**	684.38**	5099.7**	1200.34**
نیتروژن Nitrogen	1	7.579ns	0.017ns	247.41ns	8.0ns	0.23ns
تراکم Density	1	986.67**	130.51**	1121.35**	10191.3**	2400.46**
درجه 2: Square:	2	12.483*	0.896ns	69.54ns	1527.6**	407.67**
نیتروژن× نیتروژن Nitrogen× Nitrogen	1	0.217ns	1.722ns	12.10ns	43.1ns	132.58ns
تراکم× تراکم Density× density	1	22.82**	0.554ns	137.93ns	2327.2**	390.97*
اثر متقابل Interaction	1	23.983**	0.33ns	517.32*	0ns	100.63ns
تراکم × نیتروژن Density × Nitrogen	1	23.983**	0.33ns	517.32*	0ns	100.63ns
خطا Error	19	2.274	0.489	89.40	16.8	50.05
عدم برازش Lack of-fit	11	3.086ns	0.654ns	114.66ns	21.5ns	82.74**
خطای خالص Pure error	8	1.159	0.276	54.66	10.3	5.09
کل Total	25	-	-	-	-	-

جدول 4- ضرایب رگرسیون و ضریب تبیین برای مدل درجه دو کامل: $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

Table 4- Regression coefficients and R^2 for full quadratic model: $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

	مقادیر ضرایب Coefficient values						R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
عملکرد بیولوژیکی Biological yield	-81.3	0.0628	20.25	0.000009	-0.903	0.0077	96.10
عملکرد دانه Grain yield	-18.76	-0.0149	4.46	0.000025	-0.141	0.0009	93.48
کارایی جذب نیتروژن N recovery	-101	-0.293	38.8	0.000066	-2.22	0.0357	55.13
کارایی بهره‌وری نیتروژن N utilization efficiency	864.7	-0.0443	-174.5	0.000124	9.123	0.00019	97.65
کارایی مصرف نیتروژن N use efficiency	400.5	-0.198	75.4	0.000218	3.74	0.0158	78.11

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل نیتروژن و تراکم بوته هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

جدول ۵- مقایسه مقادیر مشاهده شده و برازش شده عملکرد و شاخص‌های کارایی نیتروژن ذرت تحت تأثیر سطوح نیتروژن و تراکم بوته

Table 5- Comparison of observed and predicted values of corn yield and nitrogen efficiency indices as affected by nitrogen and plant density levels

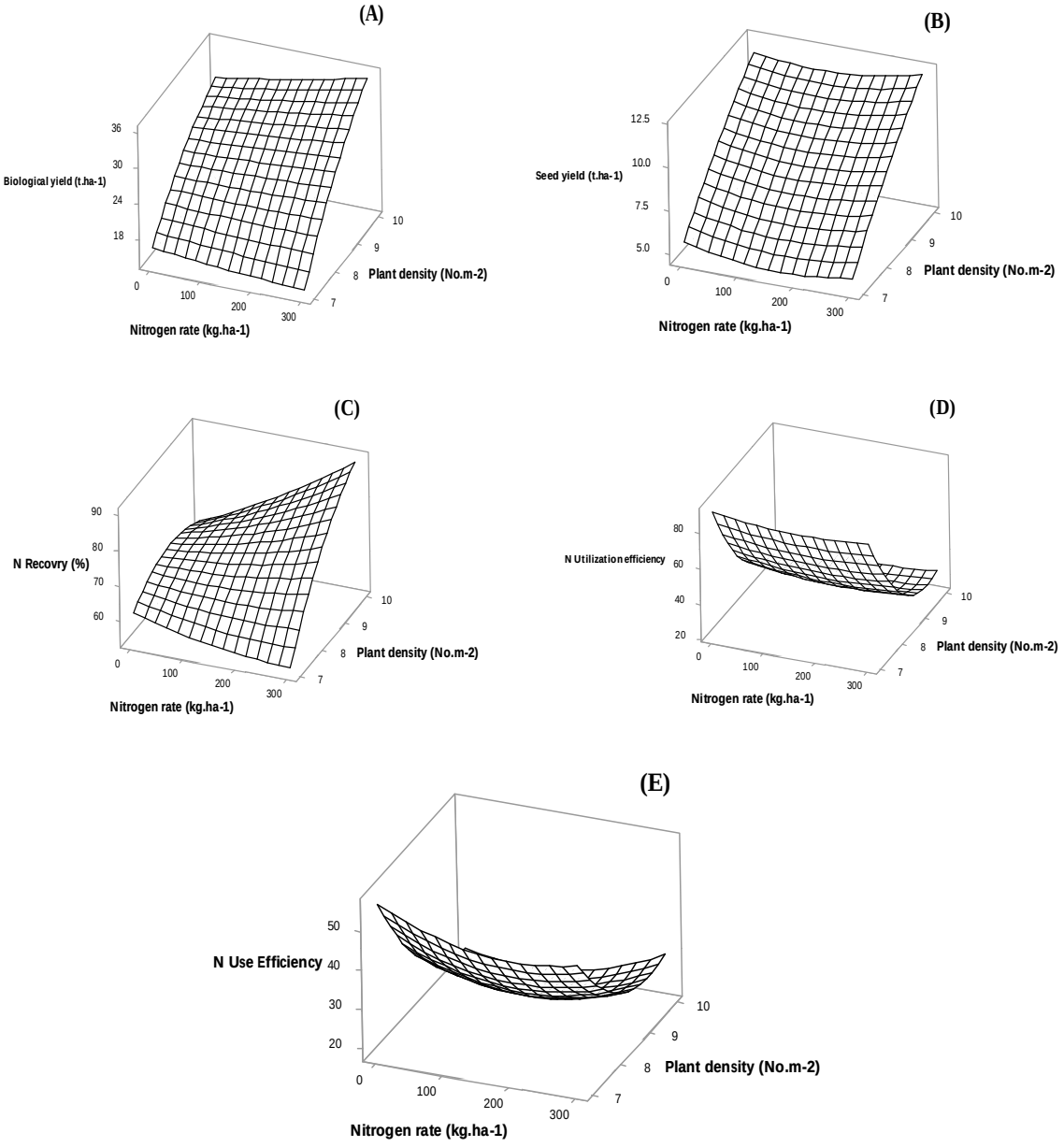
ردیف No.	تیمار Treatment		عملکرد بیولوژیکی Biological yield (ton ha^{-1})		عملکرد دانه Grain yield (ton ha^{-1})		کارایی جذب نیتروژن N recovery (%)		کارایی بهره‌وری نیتروژن N utilization efficiency (kg grain on kg N in soil)		کارایی مصرف نیتروژن N use efficiency (kg grain on kg N in plant)	
	x_2	x_1	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted
1	-1	-1	16.90	16.20	5.50	5.55	77.27	61.82	96.92	90.23	74.89	55.96
2	-1	+1	15.64	25.58	6.32	8.96	73.51	68.40	87.19	40.59	64.09	29.81
3	+1	1-	30.10	30.90	10.55	11.74	63.04	65.00	29.60	32.00	18.66	20.50
4	+1	+1	34.05	33.91	11.71	4.82	83.29	56.84	30.04	86.57	25.02	47.76
5	0	-1	27.45	45.02	8.74	8.44	58.54	71.46	42.60	36.97	24.94	25.16
6	0	+1	30.18	45.02	9.61	8.44	79.04	71.46	40.74	36.97	32.20	25.16
7	-1	0	14.97	45.02	4.66	8.44	47.22	71.46	91.51	36.97	43.21	25.16
8	+1	0	35.27	45.02	11.30	8.44	72.72	71.46	30.43	36.97	22.13	25.16
9	0	0	26.51	45.02	7.13	8.44	67.86	71.46	31.33	36.97	21.26	25.16
10	0	0	27.12	52.07	8.66	11.42	78.86	76.09	34.38	28.43	27.11	19.41
11	0	0	29.00	52.02	8.23	5.22	73.65	54.83	32.98	88.50	24.29	49.36
12	0	0	26.10	64.87	7.99	9.04	64.17	77.48	39.32	38.94	25.23	30.33
13	0	0	27.23	73.65	8.46	12.22	86.45	90.14	32.47	30.44	28.07	28.12

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل نیتروژن و تراکم بوته هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که آبشویی نیترات در روش آبیاری قطره‌ای به مراتب کمتر از آبیاری جوی پشته‌ای بود. بر این اساس، این محققین مدیریت آبیاری را به‌عنوان یکی از عوامل مدیریتی مؤثر در کاهش تلفات نیتروژن معرفی کردند.

مقادیر برازش شده و مشاهده شده عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه، کارایی جذب نیتروژن، کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن ذرت در جدول 5 نشان داده شده است.



شکل 1- سطح پاسخ عملکرد بیولوژیکی (الف)، عملکرد دانه (ب)، کارایی جذب نیتروژن (ج)، کارایی بهره‌وری نیتروژن (د) و کارایی مصرف نیتروژن (ه) ذرت تحت تأثیر سطوح تراکم بوته و کود نیتروژن

Figure 1- Response surface for biological yield (A), grain yield (B), N recovery (C), N utilization efficiency (D) and N use efficiency (E) of corn as affected by plant density and nitrogen fertilizer

بالاترین عملکرد بیولوژیکی مشاهده شده و برازش شده به‌ترتیب برای تراکم 8/5 بوته در متر مربع و 150 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار با 35/27 و 73/65 تن در هکتار حاصل گردید. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده برای تراکم 7 بوته در متر مربع و 150 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (11/71 تن در هکتار) و بالاترین عملکرد برازش شده برای تراکم 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (12/22 تن در هکتار) مشاهده شد (جدول 5). نتایج سطح پاسخ تراکم بوته و نیتروژن بر عملکرد بیولوژیکی و دانه ذرت نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن این صفات کاهش یافت و به‌واسطه افزایش تراکم بوته مقادیر این صفات افزایش یافت. همچنین شیب افزایش مقادیر صفات عملکرد ذرت تحت تأثیر افزایش تراکم بوته بیشتر از شیب کاهش این صفات تحت تأثیر کاربرد سطوح نیتروژن بود. شیب افزایش عملکرد بیولوژیکی با افزایش تراکم بوته، در سطوح پایین نیتروژن کمتر از سطوح بالای آن بود که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تراکم بر عملکرد دانه در سطوح بالای نیتروژن بود (شکل 1- الف و ب). نتایج سطح پاسخ تراکم بوته و نیتروژن بر عملکرد دانه ذرت نشان داد که در کلیه سطوح تراکم، با افزایش مصرف نیتروژن، عملکرد دانه احتمالاً به دلیل تحریک رشد رویشی و اختلال در نسبت رشد رویشی به زایشی کاهش یافت. با این‌وجود، شیب افزایش عملکرد دانه تحت تأثیر افزایش تراکم بوته، در سطوح پایین نیتروژن کمتر از سطوح بالای آن بود که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تراکم بوته بر عملکرد دانه در سطوح بالای نیتروژن به دلیل وجود نیتروژن کافی برای رشد و تولید دانه بود (شکل 1- الف).

مصرف نیتروژن از طریق تحریک تولید اندام‌های رویشی و بهبود دوام سطح برگ، سنتز پروتئین‌ها و همچنین اثر روی فعالیت آنزیم رابیسکو، فتوسنتز را تحریک نموده و به دلیل بهبود ظرفیت فتوسنتزی باعث افزایش عملکرد شده است (Wolton, 2005). تحقیقات وست (West, 2006) نیز مؤید وجود همبستگی بسیار بالا بین سرعت فتوسنتز و غلظت نیتروژن در هر واحد سطح برگ است. نونز و کمپرات (Nunez and Kamprath, 1969) دلیل اصلی اثر مصرف نیتروژن بر افزایش عملکرد را به تحریک رشد اندام‌های رویشی و به‌ویژه سطح برگ نسبت دادند. این محققین رابطه خطی را بین عملکرد دانه و شاخص سطح برگ گزارش نمودند. کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2015a) نیز با بررسی اثر سطوح مختلف نیتروژن بر رشد و عملکرد دو گونه زراعی پنبه و ذرت اظهار داشتند که با افزایش مصرف نیتروژن از صفر تا 300 کیلوگرم در هکتار، بیوماس هر دو گیاه افزایش یافت. آنها دلیل این امر را به تأثیر مثبت نیتروژن بر گسترش سطح برگ و تداوم بهتر آنها نسبت به عدم مصرف کود نسبت دادند.

بیشترین مقدار کارایی جذب نیتروژن مشاهده شده برای تراکم 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار با 86/45 درصد به‌دست آمد. بالاترین مقدار برازش شده این شاخص برای تراکم 10 بوته در متر مربع و 300 کیلوگرم نیتروژن در هکتار با 90/14 درصد برآورد گردید (جدول 5). نتایج سطح پاسخ تراکم بوته و نیتروژن بر کارایی جذب نیتروژن ذرت نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن این شاخص کاهش یافت. در حالی‌که به‌واسطه افزایش تراکم بوته مقدار این صفت افزایش یافت (شکل 1- ج). افزایش تراکم بوته احتمالاً به دلیل افزایش سطح تماس ریشه در واحد سطح باعث کاهش تلفات و جذب بیشتر نیتروژن از خاک شده و کارایی جذب را افزایش داده است. افزایش مصرف کود نیتروژنه به دلیل افزایش فراهمی نیتروژن برای آبشویی، باعث افزایش تلفات و کاهش کارایی جذب نیتروژن گردید. به نظر می‌رسد اگرچه کارایی جذب نیتروژن افزایش یافته، ولی الزاماً عملکرد به‌ازای واحد نیتروژن جذب شده افزایش نیافته است (Sadras and Lawson, 2013). استفاده بهینه از نیتروژن در افزایش بهره‌وری و سودمندی بوم‌نظام‌های زراعی و همچنین کاهش خطرات ناشی از اثرات آلایندگی نیتروژن بر محیط زیست نقش مهمی ایفا می‌کند (Dobermann and Cassman, 2004). اتلاف مستقیم کودها زمانی رخ می‌دهد که این عنصر متحرک بیش از نیاز گیاه زراعی، در زمان و به شکل نامناسب به‌کار برده می‌شود (Dawson *et al.*, 2008). از طرف دیگر، افزایش مصرف نیتروژن به دلیل افزایش بروز تلفات باعث عدم کارایی مصرف کود شده و تولید را کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد که علت کارایی پایین جذب نیتروژن در شرایط کاربرد مقدار زیاد کود نیتروژن تا حد زیادی ناشی از تفاوت در عملکرد دانه تولیدی تحت تأثیر مقادیر مختلف کود نیتروژن مصرفی است. در نتیجه اگرچه با افزایش کاربرد کود نیتروژن عملکرد افزایش یافت، ولی توانایی گیاه در جذب نیتروژن هم‌راستا با افزایش میزان مصرف کود نمی‌باشد، در حقیقت در سطوح بالای کاربرد نیتروژن، نیتروژن تجمع‌یافته در اندام‌ها هم‌راستا با مصرف آن نیست. کاهش کارایی جذب نیتروژن تحت تأثیر افزایش کاربرد کود نیتروژن توسط اکثر پژوهشگران تأیید شده است (Dawson *et al.*, 2008; Huggins and Pan, 1993; Lopez-Bellido *et al.*, 2001; Slafer *et al.*, 1990; Sowers *et al.*, 1994).

بالاترین مقادیر شاخص‌های کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن مشاهده شده برای تراکم 7 بوته در متر مربع و بدون مصرف نیتروژن در هکتار به‌ترتیب 96/92 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک و 74/89 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن گیاه حاصل گردید. بالاترین کارایی بهره‌وری نیتروژن و مصرف نیتروژن برازش شده برای تراکم 7 بوته در متر مربع و صفر کیلوگرم نیتروژن در

هکتار به‌ترتیب با 90/23 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک و 55/96 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن گیاه برآورد شد (جدول 5). با افزایش تراکم بوته، کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. در حالی‌که با افزایش مصرف نیتروژن، این صفات ابتدا کاهش یافت. همچنین شیب تغییرات این شاخص‌ها تحت تأثیر تراکم بوته به مراتب بالاتر از مصرف نیتروژن بود (شکل 1- د و ه). بدین ترتیب، به نظر می‌رسد افزایش نیتروژن مصرفی نقش مهمی در کاهش بهره‌وری این نهاده داشته است. همچنین با افزایش میزان مصرف نیتروژن در تراکم‌های مختلف بوته، کارایی مصرف نیتروژن با شیب تندی کاهش یافت، در حالی‌که در سطوح بالای کودی این روند شیب کمتری داشت. به نظر می‌رسد که در سطوح بالای کودی، افزایش عملکرد موجب بهبود کارایی مصرف نیتروژن شده است. همچنین به‌نظر می‌رسد که افزایش تراکم بوته علاوه بر افزایش عملکرد ذرت، باعث کاهش تلفات نیتروژن نیز شده که در نتیجه افزایش کارایی مصرف نیتروژن را به دنبال دارد. کارایی استفاده نیتروژن بیانگر عملکرد دانه به‌ازای مقدار نیتروژن جذب شده است (Moll *et al.*, 1982) که نشان‌دهنده توانایی گیاه در استفاده از نیتروژن موجود در اندام‌های مختلف برای تولید دانه می‌باشد. به عقیده مونتمورو و همکاران (Montemuro *et al.*, 2006) دو عامل اساسی در افزایش کارایی مصرف نیتروژن شامل جذب از خاک تا قبل از گلدهی گیاه و همچنین جذب در طی مراحل انتهایی رشد می‌باشند. نتایج مطالعه رحیمی‌زاده و همکاران (Rahimizadeh *et al.*, 2010) نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن کارایی مصرف آن کاهش یافت. کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2015a) نیز بیان داشتند که با افزایش مصرف نیتروژن از صفر تا 150 کیلوگرم، کارایی مصرف نیتروژن دو گیاه ذرت و پنبه به‌ترتیب 55 و 35 درصد کاهش یافت. هاگینز و پان (Huggins and Pan, 1993) اظهار داشتند اگر خاک به لحاظ نیتروژن آلی و بیوماس میکروبی غنی باشد، بدون مصرف نیتروژن عملکرد بالایی حاصل خواهد شد. علاوه بر این، مصرف مقدار کمی نیتروژن کارایی آن را افزایش خواهد داد. در این حالت، کاربرد بیشتر کود شیمیایی نیتروژن موجب کاهش کارایی مصرف آن خواهد شد. این محققان اظهار داشتند که علت این پدیده به این موضوع مربوط نیست که گیاه زراعی کود نیتروژن را با کارایی کمتری مصرف می‌کند، بلکه مربوط به کمرنگ شدن نقش نیتروژن آلی در حصول عملکرد دانه می‌باشد (Huggins and Pan, 1993). ارتیز و همکاران بیان کردند که به موازات افزایش کاربرد کود نیتروژن، کارایی جذب و بهره‌وری نیتروژن کاهش یافت که در نهایت، منجر به کاهش کارایی مصرف نیتروژن گردید (Ortiz *et al.*, 2002). هاگینز و پان (Huggins and Pan, 1993) دریافتند که در سطوح بالای مصرف کود نیتروژن، جذب آهسته این عنصر افزایش یافت که باعث کاهش کارایی مصرف آن گردید. هالورسون و همکاران (Halvorson *et al.*, 2008) نیز بیان نمودند که تلفات نیتروژن در سطوح بالای مصرف کود افزایش قابل توجهی در مقایسه با سطوح پایین کاربرد کود نشان داد. سایر بررسی‌ها نیز نشان داده است که کاربرد مقدار بیشتر کود نیتروژن از طریق کاهش کارایی جذب نیتروژن به دلیل افزایش تلفات نیتروژن از طریق دنیتریفیکاسیون، تبخیر آمونیومی، رواناب و آبشویی موجب کاهش کارایی مصرف این عنصر می‌گردد (Akintoye*et al.*, 1999).

نتایج برخی آزمایش‌ها در مورد غلات مؤید این مطلب است که تعدیل در کاربرد مقادیر کود شیمیایی نیتروژن و یا تقسیط آن راهکار مناسبی برای افزایش کارایی مصرف نیتروژن هستند (Gan *et al.*, 2008; Alcoz *et al.*, 1993). کارایی پایین کود شیمیایی به دلیل کاربرد مقادیر بالای کود شیمیایی است، خصوصاً زمانی‌که نیتروژن معدنی موجود در خاک قبل از کشت و یا نیتروژن معدنی‌شده در طول فصل رشد نادیده گرفته شود (Arregui and Quemada, 2008). کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2012) با بررسی جریان نیتروژن و کارایی مصرف آن در چرخه تولید و مصرف گندم و ذرت در ایران نشان دادند که کل نیتروژن برداشت شده توسط دو گیاه گندم و ذرت به‌ترتیب 387 و 81/7 هزار تن، با کارایی 25 و 60 درصد بود. براساس مطالعه نصیری محلاتی و کوچکی (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2015) کارایی بهره‌وری نیتروژن در نظام‌های تولید گندم ایران در طی چهار دهه گذشته سالانه برابر با 0/17 کیلوگرم دانه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن جذب شده افزایش یافته است. ایکهورت و همکاران (Eickhout *et al.*, 2006) نیز بیان داشتند که کارایی جذب منابع مختلف نیتروژن اعم از شیمیایی و آلی در فاصله سال‌های 1970 تا 1995 میلادی در جهان از 46 به 42 درصد، در خاورمیانه از 54 به 47 درصد و در کشورهای در حال توسعه از 53 به 43 درصد کاهش یافته است.

بهینه‌سازی منابع

مقدار بهینه تراکم بوته و سطوح نیتروژن در ذرت براساس سناریوی‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی برای حصول مقادیر مورد انتظار متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه و شاخص‌های کارایی نیتروژن در جدول 6 نشان داده شده است.

نتایج بهینه‌سازی مقدار نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد دانه و شاخص‌های کارایی نیتروژن نشان داد که کاربرد 225/27 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و تراکم 8/12 بوته در متر مربع موجب حصول بالاترین عملکرد دانه (10 تن در هکتار) در سناریوی اقتصادی شد.

جدول 6- مقادیر بهینه عملکرد دانه و شاخص‌های کارایی نیتروژن ذرت تحت تأثیر سطوح تراکم بوته و نیتروژن در سناریوهای مختلف
Table 6- Optimization of grain yield and nitrogen efficiency indices of corn based on plant density and nitrogen levels in different scenarios

متغیر Variable		اقتصادی Economic scenario	زیست‌محیطی Environmental scenario	اقتصادی - زیست‌محیطی Economic- environmental scenario
وابسته (Y) Dependent (Y)	عملکرد دانه (تن در هکتار) Grain yield (ton ha^{-1})	10.00	-	7.19
	کارایی بهره‌وری نیتروژن (کیلوگرم دانه بر کیلوگرم N خاک) N utilization efficiency (kg grain on kg N in soil)	-	69.99	61.86
	کارایی جذب نیتروژن (٪) N recovery (%)	-	64.75	65.91
مستقل (X) Independent (X)	تراکم بوته ($No\ m^{-2}$) Plant density ($No\ m^{-2}$)	8.12	7.0	7.0
	نیتروژن ($kg\ ha^{-1}$) Nitrogen ($kg\ ha^{-1}$)	225.27	46.95	69.42
شاخص مطلوبیت Desirability index		0.99	0.90	0.71

در حالی‌که در سناریوی زیست‌محیطی بالاترین مقادیر شاخص‌های نیتروژن شامل کارایی استفاده و کارایی جذب نیتروژن تحت تأثیر کاربرد 46/95 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و تراکم 7 بوته در متر مربع (به‌ترتیب برابر با 69/99 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک و 64/75 درصد) محاسبه گردید. بیشترین مقادیر این صفات شامل عملکرد دانه، کارایی بهره‌وری نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن در سناریوی اقتصادی زیست محیطی تحت تأثیر مصرف 69/42 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و تراکم 7 بوته در متر مربع (به‌ترتیب برابر با 7/19 تن در هکتار، 86/61 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک و 65/91 درصد) به‌دست آمد (جدول 6). با توجه به میزان کود مصرفی (65/42 کیلوگرم در هکتار) برای حصول بالاترین عملکرد، به نظر می‌رسد که کاربرد سطوح بالاتر از این میزان، تأثیر معنی‌داری در عملکرد دانه ذرت ندارد و به‌صورت آبشویی یا تصعید از دسترس گیاه خارج شود که این امر علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید می‌تواند منجر به افزایش بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی گردد. سایر بررسی‌ها نیز نشان داده است که توجه به میزان مصرف بهینه کود نیتروژن و عدم کاربرد کود مازاد که تغییری در افزایش عملکرد گیاهان ندارد، می‌تواند علاوه بر کاهش بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی، شرایط رشدی گیاهان را بهبود و عملکرد را افزایش دهد (Ozer, 2003).

نتیجه‌گیری

به‌منظور دستیابی به تولید پایدار محصولات زراعی، از جمله اصول اولیه بهبود کارایی مصرف منابع و جلوگیری از هدررفت نهاده‌های کشاورزی است. به بیان دیگر، تعیین مقدار بهینه منابع از قبیل تراکم بوته و نیتروژن و واکنش گیاه نسبت به این نهاده‌ها برای کاهش تلفات و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و از طرف دیگر، حصول عملکرد مناسب، امری مهم و ضروری است.

نتایج مطالعات مختلف نشان داده‌است که با وجود افزایش بیش از اندازه مصرف نهاده‌ها در بخش کشاورزی به‌ویژه افزایش مصرف کودهای نیتروژنه، عملکرد گیاهان زراعی به همان نسبت افزایش نیافته است. لذا بهبود مدیریت نظام‌های زراعی و استفاده بهینه از منابع همچون انتخاب تراکم مطلوب امری ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه مقادیر بهینه کود نیتروژن و تراکم بوته به‌صورت همزمان در زراعت ذرت محاسبه شدند. بر این اساس، به نظر می‌رسد مصرف منابع با توجه به مقادیر بهینه‌سازی شده می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین سطوح مصرف کود نیتروژن و تراکم بوته به‌منظور نیل به حصول عملکرد قابل قبول به همراه کاهش آلودگی‌های زیست محیطی با توجه به شرایط مطالعه انجام شده در نظر گرفته شوند.

سپاسگزاری

بودجه این طرح از محل پژوهه شماره 37623/2 مورخ 1394/03/09 معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Akintoye, H. A., Klinga, J. G., and Lucas, E. O. 1999. N-use efficiency of single, double and synthetic maize lines grown at four N levels in three ecological zones of West African. Field Crops Research 60: 189-199.
2. Alcoz, M. M., Homs, F. M., and Haby, V. A. 1993. Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual nitrogen. Agronomy Journal 85: 1198-1203.
3. Arregui, L. M., and Quemada, M. 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rain fed conditions. Agronomy Journal 100: 277-284.
4. 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.
5. Barraclough, P. B., and Kyle, J. 2001. Effect of water stress on chlorophyll meter reading in winter wheat. P. 722-723. Horst, W.J. (Ed.). In: Plant nutrition-Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
6. Box, G. E. P., and Hunter, J. S. 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. The Institute of Mathematical Statistics, p. 195-241.
7. Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., and Yang, H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annual Review of Environment and Resources 28: 315-358.
8. Dawson, J. C., Huggins, D. R., and Jones, S. S. 2008. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agriculture systems. Field Crops Research 107: 89-101.
9. Dobermann, D. I., and Cassman, K. G. 2004. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production of United States and Asia. Plant and Soil 247: 153-175.
10. Eickhout, B., Bouwman, A. F., and van Zeijts, H. 2006. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability Agriculture, Ecosystems and Environment 116: 4-14.
11. Gan, Y., Malhi, S. S., Brandt, S., Katepa-Mupondwa, F., and Stevanson, C. 2008. Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of juncea Canola under diverse environments. Journal of Agronomy 100: 285-295.
12. Genter, C. F., and Camper, H. M. 1993. Component plant part development in maize as affected by hybrids and population density. Agronomy Journal 65: 669-671.
13. Halvorson, A. D., Bartolo, M. E., Reule, C. A., and Berrada, A. 2008. Nitrogen effects on onion yield under drip and furrow irrigation. Agronomy Journal 100 (4): 1062-1069.
14. Harper, J. L. 1983. Approaches to the study of plant competition. Pp. 1-39. In: F.L. Milthorpe (Ed.), Mechanisms in Biological Competition. 15th Symposium of Society of Experimental Biology.
15. Hashemi-Dezfouli, A., and Herbert, S. J. 1992. Intensifying plant density response of corn with artificial shade. Agronomy Journal 84: 547-551.
16. Hatermink, A. E., Johnston, M. O., Sullivan, J. N., and Poloma, S. 2000. Nitrogen use efficiency of taro and sweet potato in the humid lowlands of Papua New Guinea. Agriculture, Ecosystems and Environment 79: 271-280.
17. Horwitz, W., and Latimer, G. W. 2005. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 18th Edition. Maryland, USA.
18. Huggins, D. R., and Pan, W. L. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. Journal of Agronomy 85: 898-905.
19. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Amiri, M. B., and Fallapoor, F. 2014. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. Journal of Agroecology. (in Press). (in Persian with English abstract).
20. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Mansory, A., and Moradi, R. 2012. Investigation of flow and nitrogen use efficiency in wheat production and consumption cycles (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in Iran. Journal of Agroecology 4 (3): 192-200. (in Persian with English abstract).
21. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Alizadeh, Y. 2015a. Evaluation of yield and nitrogen use efficiency of maize and cotton intercropping under different nitrogen levels. Iranian Journal of Field Crops Research 13 (1):1-13. (in Persian with English abstract).
22. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Manssori, H. 2015b. Optimization of water, nitrogen and density in canola cultivation by central composite design. Journal of Agroecology 1 (3):1-16. (in Persian with English abstract).
23. Lopez-Bellido, L., Lopez-Bellido, R. J., Castillo, J. E., and Lopez-Bellido, F. J. 2001. Effects of long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on bread-making quality of hard red spring wheat. Field Crops Research 42: 197-210.
24. Moll, R. H., Kamprath, E. J., and Jackson, W. A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy Journal 74: 562-564.

25. Montemuro, F., Maiorana, M., Ferri, D., and Convertini, G. 2006. Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and source of N fertilization. Field Crops Research 99: 114-421.
26. Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2015. Trend analysis of nitrogen use and productivity in cereal production systems of Iran. Journal of Agroecology. (in Press). (in Persian with English abstract).
27. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Amin Ghafouri, A., and Mahluji Rad, M. 2015. Optimizing corm size and density in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation by central composite design. Journal of Saffron Agronomy and Technology 3 (3): 161-177. (in Persian with English abstract).
28. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., and Beheshti, S. A. R. 2001. Agroecology. Ferdowsi University of Mashhad Press 459 pp. (in Persian).
29. Nunez, R., and Kamprath, E. J. 1969. Relationships between N response, plant population. And row width on growth and yield of corn. Agronomy Journal 61: 279-282.
30. Ortiz, R., Nurminen, M., Madsen, S., Rognil, O. A., and Bjornstad, A. 2002. Genetic gains in Nordic spring barley breeding over sixty years. Euphytica 126: 283-289.
31. Ozer, H. 2003. Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapeseed cultivars. European Journal of Agronomy 19: 453-463.
32. Rahimizadeh, M., Kashani, A., Zare Faizabadi, A., Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2010. Investigation of nitrogen use efficiency in wheat-based double cropping systems under different rate of nitrogen and return of crop residue. Gorgan University of Agricultural Science and natural Research 3 (3): 125-142. (in Persian with English abstract).
33. Sadras, V. O., and Lawson, C. 2013. Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. European Journal of Agronomy 46: 34- 41.
34. Slafer, G. A., Andrade, F. H., and Feingold, S. E. 1990. Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in Argentina: Relationship between nitrogen and dry matter. Euphitica 50: 63-71.
35. Sowers, K. E., Pan, W. L., Miller, B. C., and Smith, J. L. 1994. Nitrogen use efficiency of split nitrogen application in soft white winter wheat. Agronomy Journal 86: 942-948.
36. Tetio-Kagho, F., and Gardner, F. P. 1988. Response of maize to plant population density. II. Reproductive development yield and yield adjustments. Agronomy Journal 80: 935-940.
37. Timsina, T., Singh, U., Badaruddin, M., Meisner, C., and Amin, M. R. 2001. Cultivar, nitrogen, and water effects productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice–wheat sequences of Bangladesh. Field Crops Research 72:143-161.
38. Uhart, S. A., and Andrade, F. H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. Crop Science 35: 1384-1389.
39. Waner, L. A., and Junttila, O. 1999. Cold-induced freezing tolerance in Arobidopsis. Journal of Plant Physiology 120 (2): 391-400.
40. Wenxue, L., Long, L., Jianhao, S., Tianwen, G., Fusuo, Z., Xingguo, B., Peng, A., and Tang, C. 2005. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. Agriculture, Ecosystems and Environment 105: 483-491.
41. West, M. L. 2006. Response of corn hybrids to varying plant population densities. Field Crops Abstract, 42:8569.
42. Wolton, W. 2005. Leaf area index and radiation as related to corn yield. Agronomy Journal 65: 459-461.
43. Wu, C. F. J., and Hamada, M. 2000. Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization. New York.
44. Zhao, D., Reddy, K. R., Kakani, V. G., Read, J. J., and Carter, G. A. 2003. Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. Plant and Soil 257 (1): 205-218.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 15, No. 4, Winter. 2018, p. 798-810

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد 15، شماره 4، زمستان 1396، ص. 810-798

Optimization of Plant Density and Nitrogen Use in Corn (*Zea mays* L.) by Central Composite Design

A. Koocheki[1*]- M. Nassiri Mahallati[1]- S. Khorramdel[2]- S. Morid Ahmadi[3]

Received: 29-02-2016
Accepted: 30-08-2016

Introduction

Response Surface Methodology (RSM) is a statistical tool for modelling and optimization of multiple factors which determine optimum process conditions by combining experimental designs with interpolation by first- or second degree polynomial equations in a sequential testing format. Nitrogen (N) and plant density are two factors crucial to the successful implementation of crop management practices used in corn production systems. Numerous studies have reported the effects of N fertilization on yield of corn. The optimum resource level in agro-ecosystems should be determined to decrease production costs, conserve resources and reduce environmental pollution which occurs as a result of excessive use of these resources. In this work, optimization of nitrogen fertilizer and plant density of corn using central composite design for RSM was done.

Materials and Methods

An experiment was conducted using central composite design with 13 treatments and two replications at the Research Field of Ferdowsi University of Mashhad during the growing season of 2015-2016. The treatments were allocated based on low and high levels of plant density (7 and 10 plants m^{-2}, respectively) and nitrogen (0 and 300 kgN ha^{-1}, respectively). Biological yield, grain yield, N utilization efficiency, N recovery and N use efficiency were calculated as independent variables and changes of these variables were evaluated by a regression model. Optimum levels of nitrogen and plant density were proposed to obtain the expected level of these traits based on economic, environmental and economic-environmental scenarios.

Results and Discussion

The results showed that the effect of linear component was significant on biological and grain yield and nitrogen efficiency indices of corn. Effect of square component was significant on all studied traits except for biological yield and N recovery. Interaction effect of full quadratic was significant on biological yield and N recovery. Lack of fit test had no significant effect on the studied traits except for NUE. The highest observed and predicted values of grain yield were obtained in 7 plants.m^{-2} with 150 kg N per ha (11.71 ton ha^{-1}) and 10 plants m^{-2} with 300 kg N per ha (12.22 ton ha^{-1}), respectively. The maximum observed and predicted values of N recovery were obtained in 10 plants.m^{-2} with 300 kg N per ha (86.45%) and 10 plants.m^{-2} with 300 kgN ha^{-1} (90.14%), respectively. The optimum levels of nitrogen fertilizer and density were 8.12 plants.m^{-2} with 225.27 kg N per ha, 7 plants.m^{-2} with 46.95 kg N per ha and 7 plants.m^{-2} with 69.42 kg N per ha for economic, environmental economic-environmental scenarios, respectively.

Conclusions

Increasing nitrogen fertilizer led to an increase in grain yield and a decrease in nitrogen use efficiency whereas increasing density caused an increase in grain yield and nitrogen use efficiency.

Keywords: Lack of fit, Full quadratic regression model, N use efficiency, N utilization efficiency

1, 2 and 3- Professor, Associate Professor and PhD Student in Crop Physiology, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.
(*- Corresponding Author Email: akooch@um.ac.ir)