



اثر کود نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد کمی و کیفی کنگد با استفاده از طرح مرکب مرکزی

هدا لطیفی^۱، سرور خرم دل^{۲*}، مهدی نصیری محلاتی^۳، جواد وفابخش^۴، عبدالله ملافیلابی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲

چکیده

بهینه‌سازی نیتروژن و تراکم یکی از راهکارهای مدیریتی برای حفاظت از منابع و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود. مدل سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری مورد استفاده برای بهینه‌سازی نهاده‌های تولید به‌شمار می‌آید. در این مطالعه، اثر کود نیتروژن و تراکم بوته کنگد با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) برای مدل سطح پاسخ بررسی شد. این آزمایش با ۱۳ تیمار و دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ انجام شد. تیمارها بر اساس سطح پایین و بالای تراکم بوته (به ترتیب با ۱۰ و ۴۰ بوته در متر مربع) و نیتروژن (به ترتیب با صفر و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) تعیین شدند. ارتفاع بوته، اجزای عملکرد (شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه)، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد روغن، عملکرد روغن، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین به‌عنوان متغیر وابسته مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و تغییرات این متغیرها با استفاده از مدل رگرسیونی ارزیابی شد. به‌منظور ارزیابی کیفیت مدل برازش شده از آزمون عدم برازش استفاده شد. بسندگی مدل با استفاده از آنالیز واریانس مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی، معادله چند جمله‌ای درجه دوم کامل برای تعیین معنی‌داری مدل و اجزای مدل (خطی، درجه دو و اثر متقابل) مورد بررسی قرار گرفت. کیفیت مدل برازش شده با استفاده از ضریب تبیین (R^2) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات به‌جز شاخص برداشت، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و تراکم بوته تنها بر کارایی مصرف نیتروژن، ارتفاع بوته و تعداد کپسول در بوته و درصد پروتئین معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیونی درجه دو کامل بود. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و برازش شده به ترتیب برای تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار با ۱۳۲۰/۵۲ و ۱۲۷۲/۴۵ کیلوگرم در هکتار به ترتیب به‌دست آمد. بیشترین درصد روغن و درصد پروتئین مشاهده شده به ترتیب از تراکم ۱۰ بوته در متر مربع و عدم مصرف اوره (۴۶/۶۷ درصد) و ۴۰ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (۲۵/۳۱ درصد) حاصل شد و بالاترین مقادیر مشاهده شده این صفات به ترتیب مربوط به تراکم ۱۰ بوته در متر مربع و عدم مصرف اوره (۴۶/۴۹ درصد) و ۴۰ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (۲۵/۰۱ درصد) بود. به‌طور کلی، اثر تراکم بوته بر افزایش عملکرد در سطوح بالای کود نیتروژن افزایش یافت که به‌طور آشکار نشان‌دهنده اهمیت نیتروژن در بهبود عملکرد دانه کنگد می‌باشد. بهینه‌سازی میزان مصرف منابع با استفاده از طرح مرکب مرکزی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مطلوب در تولید پایدار کنگد مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آزمون عدم برازش، تولید پایدار، مدل سطح پاسخ

مقدمه

بهبود کارایی سامانه‌ها و افزایش کارایی فرآیندها بدون افزایش هزینه دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. روش مورد استفاده بدین

منظور، بهینه‌سازی^۶ نامیده می‌شود. جهت تعیین حد بهینه عوامل کنترل‌کننده رشد، استفاده از مدل‌ها و روابط تجربی ریاضی امری اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد (Amini, 2007). به منظور دستیابی به عملکرد قابل قبول و کاهش هم‌زمان آلودگی‌های زیست‌محیطی، نهاده‌های مورد استفاده در مزرعه باید بر مبنای عملکرد مورد انتظار به‌صورت بهینه مصرف شوند. یکی از روش‌های آماری برای حصول مقادیر بهینه نهاده‌ها، استفاده از مدلسازی سطح پاسخ^۷ می‌باشد (Aslan, 2007; Kwak, 2005). مدل سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری مورد استفاده برای بهینه‌سازی نهاده‌های تولید به‌شمار می‌آید (Box and Wilson, 1951; Wang)

۱- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

۵- استادیار گروه زیست فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

(*- نویسنده مسئول)

(Email: khorramdel@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/gsc.v17i3.72836

6- Optimization

7- Response-Surface Methodology

داشتند که افزایش اندازه بانه و تراکم اثر مثبتی بر افزایش عملکرد اقتصادی، قطر بانه، تعداد بانه دختری، تعداد بانه اصلی، تعداد گل و وزن تر گل داشت (Nassiri Mahallati et al., 2015).

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و تغییر در الگوی غذایی جوامع، مصرف روغن‌های گیاهی نیز در حال افزایش است. لذا با توجه به اینکه بخش زیادی از روغن مورد نیاز کشور از طریق واردات تأمین می‌گردد، افزایش تولید و کیفیت دانه‌های روغنی در داخل کشور بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Mohajer, 2017). در بین گیاهان دانه روغنی، کنجد (*Sesamum indicum*) طی سالیان طولانی به‌صورت گسترده‌ای کشت و کار می‌شده است، اما امروزه همانند بسیاری از گیاهان زراعی دیگر نظیر یولاف (*Avena sativa*)، گندم سیاه (*esculentum Fagopyrum*) به دلایلی مثل توجه کمتر به اصلاح خصوصیات ژنتیکی، این گیاهان در مقایسه با گیاهان زراعی غالب بسیار کمتر مورد توجه بوده و لذا کشت و کار این گیاهان در معرض فراموشی قرار گرفته است (Rezvani Moghaddam, 2008). کنجد با نام علمی (*Sesamum indicum* L.) به دلیل محتوی بالای روغن در دانه (۶۰-۵۰ درصد) به‌عنوان ملکه گیاهان دانه روغنی شناخته شده است (Jefferson, 2003; Toan et al., 2010).

نیترژن یکی از عناصر پرمصرف و مؤثر در افزایش تولید گیاهان زراعی است همچنین یکی از مهمترین عناصر غذایی در نظام‌های تولید گیاهی محسوب می‌شود و تحقیقات انجام شده در این ارتباط، بازگوکننده این مطلب هستند که افزایش تولیدات کشاورزی در طی ۵۰ سال گذشته عمدتاً به‌دلیل کاربرد کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیترژن بوده است (Laegreid et al., 1999; Maman et al., 2003). اگرچه نیترژن 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 ۴۰ تا ۶۰ درصد کود نیترژن اضافه شده به خاک از آن خارج می‌شود و این مقدار با افزایش کاربرد کود نیترژن افزایش می‌یابد (Wenxue et al., 2005). در آزمایشی روی بررسی اثرات مقادیر نیترژن (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و زمان‌های مختلف مصرف نیترژن بر خصوصیات کمی و کیفی کنجد، بهترین تیمار برای عملکرد مربوط به مصرف ۷۵ کیلوگرم نیترژن در هکتار بود و بهترین زمان مصرف در دو مرحله پیش از کاشت و قبل از گلدهی توصیه گردید که افزایش عملکرد به افزایش تعداد کپسول در بوته و افزایش وزن هزار دانه نسبت داده شد (Garshasbi et al., 2011).

یکی دیگر از عوامل مهم و تعیین‌کننده در عملکرد گیاهان زراعی تراکم بوته در واحد سطح است، چرا که در تراکم‌های بیش از تراکم مطلوب، بروز رقابت درون گونه‌ای باعث کاهش عملکرد شده و در تراکم‌های کمتر از حد مطلوب، از امکانات محیطی اعم از نور،

مدل سطح پاسخ یک روش آماری برای بهینه‌سازی چند فاکتور است که با استفاده از ترکیب طرح‌های آزمایشی شرایط بهینه عوامل تولید را تعیین می‌کند (Dean and Voss, 2002). مراحل RSM به‌ترتیب شامل انتخاب متغیرهای مستقل و سطوح آنها، گزینش طرح آماری مناسب، پیش‌بینی و ارزیابی اعتبار مدل و ارائه گرافیکی مدل پیش‌بینی و تعیین سطح بهینه فاکتورهای تحت بررسی می‌باشد. عینی کردن رابطه پیش‌بینی شده مدل برآزش شده را می‌توان به‌وسیله نمودار سطح پاسخ انجام داد. سطح پاسخ نموداری سه‌بعدی تئوریک است که رابطه میان پاسخ و متغیرهای مستقل را به نمایش درمی‌آورد.

طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design) یکی از انواع طرح‌های آماری برای مدلسازی سطح پاسخ است که به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آزمایشات فاکتوریل محسوب می‌شود. این طرح توسط باکس و ویلسون (Box and Wilson, 1951) مطرح و توسط باکس و هانت (Box and Hunter, 1957) تکمیل گردید. با استفاده از طرح مرکب مرکزی می‌توان حداکثر اطلاعات را با استفاده از کمترین اجرا از طریق توزیع نقاط آزمایشی در محدوده مورد نظر استخراج کرد (Mansouri, 2014). طرح مرکب مرکزی به‌عنوان طرحی به‌منظور تعیین مقادیر متغیرهای مستقل برای توصیف تغییرات متغیر وابسته تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح فاکتورها به‌عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Clarke et al., 1997; Kalavathy et al., 2009). کوچکی و همکاران (۱۳۹۲) طی آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی به‌منظور تعیین بهینه میزان مصرف آب (۱۵۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب)، کود نیترژن (صفر و ۴۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) و تراکم (۵۰ و ۱۵۰ بوته در متر مربع) در کشت کلزا (*Brassica napus*) گزارش نمودند که افزایش سطوح آبیاری و کود باعث افزایش عملکرد دانه و تشدید تلفات نیترژن گردید، در صورتی که افزایش تراکم باعث افزایش عملکرد شد و به دلیل افزایش جذب نیترژن، کاهش تلفات آن را به دنبال داشت (Koocheki et al., 2013). منصور و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی کود نیترژن (۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار)، آبیاری (۱۵۰۰ و ۳۵۰۰ مترمکعب) و تراکم (۱۰ و ۱۸ بوته در مترمربع) در گیاه دارویی موسیر ایرانی با استفاده از طرح مرکب مرکزی دریافتند که افزایش کود و سطوح آبیاری باعث افزایش عملکرد غده موسیر و تلفات نیترژن گردید، در صورتی که افزایش تراکم باعث افزایش عملکرد و کاهش تلفات نیترژن شد. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی به‌ترتیب معادل ۱۶۹ کیلوگرم کود اوره در هکتار، ۲۰۲۵ مترمکعب آب در هکتار و ۱۷/۷ بوته در مترمربع به‌دست آمد (Mansouri et al., 2014). نصیری محلاتی و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی اثر متقابل تراکم (۵۰ و ۲۵۰ بانه در مترمربع) و وزن بانه (کمتر از ۴ و ۸-۴ گرم) زعفران با استفاده از طرح مرکب مرکزی بیان

هکتار) با مطالعه مقالات در خصوص تاثیر فاکتورهای فوق بر روی گیاه کنجد تعیین شد (جدول ۱). نقطه مرکزی تیمارها (۲۵ بوته در مترمربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) پنج بار تکرار شد.

جدول ۱- ضرایب و مقادیر تیمارها بر اساس طرح مرکب مرکزی
Table 1- Rates and coefficients for treatments based on central composite design

تیمارها Treatments		ضرایب* Coefficients*	
سطح کود اوره Nitrogen (kg.ha ⁻¹) fertilizer	تراکم بوته Plant (No.m ⁻²) density	X ₂	X ₁
0	10	-1	-1
0	40	-1	+1
100	10	+1	-1
100	40	+1	+1
50	10	0	-1
50	40	0	+1
0	25	-1	0
100	25	+1	0
50	25	0	0
50	25	0	0
50	25	0	0
50	25	0	0

X₁ و X₂: به ترتیب نشان دهنده متغیرهای مستقل نیتروژن و تراکم بوته هستند.
X₁ and X₂: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

در مرحله آماده سازی زمین و پیش از کاشت، نمونه ای مرکب از خاک مزرعه از عمق ۰-۳۰ سانتی متری به صورت تصادفی تهیه و جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج آزمون خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 2- Physical and chemical properties of soil

بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)
لوم سیلتی	7.92	0.58	0.62	0.058	29.2	186

استقرار) و بخش سوم، دو ماه پس از کاشت (در مرحله گلدهی) توزیع شد.

اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری های بعدی تا پایان رشد محصول، به شیوه نشتی و با استفاده از سیفون به صورت هفتگی انجام شد. به منظور جلوگیری از اختلاط اثر تیمارهای کودی، انتهای کرت ها مسدود و آبیاری کرت ها به صورت جداگانه انجام شد. وجین علف های هرز از هفته سوم و به صورت مستمر و تا بسته شدن کانوپی گیاهان، به صورت دستی انجام شد. برای حصول تراکم نهایی در هر کرت، تنک شدن در سه مرحله پس از استقرار بوته ها و حصول

فضا، آب و خاک به نحو مطلوب استفاده نشده که در نهایت، سبب کاهش عملکرد می گردد (Martin and Deo, 2000). روی و همکاران (Roy et al., 2009) در بررسی اثر فواصل بین ردیف مختلف (۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی متر) بر عملکرد کنجد مشاهده کردند که عملکرد و اجزای عملکرد با افزایش فاصله بین بوته از ۱۵ به ۳۰ سانتی متر افزایش یافت. بالاسوبرامانیان و همکاران (Balasubramaniyan et al., 1995) گزارش کردند که تراکم بوته بر رشد و عملکرد کنجد تأثیر دارد، به طوری که تراکم زیاد موجب افزایش ارتفاع بوته و کاهش شاخه دهی و تعداد کپسول در بوته شد. با توجه به آنچه گفته شد، هدف از اجرای این تحقیق بررسی اثر کود نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد کمی و کیفی کنجد با استفاده از طرح مرکب مرکزی در شرایط آب و هوایی مشهد بود.

مواد و روش ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا با دو تکرار اجرا شد. تعداد تیمارهای طراحی شده در طرح مرکب مرکزی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Aslan, 2007; Box and Hunter, 1957).

$$t = 2^k + 2k + r \quad (1)$$

در این معادله، k: نشان دهنده تعداد فاکتور و r: تعداد تکرار تیمار در سطح میانگین می باشد. بر این اساس، ترکیب تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین تراکم (۱۰ و ۴۰ بوته در مترمربع) و سطوح بالا و پایین کود نیتروژن (۰ و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در

بذر مورد استفاده جهت کاشت قبل از شروع آزمایش از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی تهیه شد. بذر لاین شماره پنج، در گروه متوسط رس قرار دارد. این لاین، چند شاخه، کم کرک، بذر قهوه ای رنگ و محتوی روغن حدود ۴۹ درصد می باشد. پس از آماده سازی زمین، عملیات کاشت دستی در ۴ خرداد ماه در عمق ۳-۲ سانتی متری انجام شد. کود نیتروژن مصرفی (به صورت کود اوره با ۴۶ درصد نیتروژن) برای هر کرت و بر اساس جدول ۱ به سه قسمت مساوی تقسیم شد که یک سوم آن در زمان کاشت اعمال گردید. بخش دوم کود نیتروژن یک ماه پس از کاشت (در مرحله

۲۰ درصد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد، ضعیف برآورد می‌شود (Koocheki et al., 2016). در نهایت، مقادیر بهینه کاربرد کود نیتروژن و تراکم کاشت کنجد برای حصول پاسخ عملکرد دانه و درصد روغن مورد بررسی قرار گرفت. جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار ver.17 Minitab استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل برای هر کدام از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد روغن، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، اجزای عملکرد شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه کنجد در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که اثر خطی بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات به‌جز تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و تراکم بوته تنها بر تعداد کپسول در بوته و درصد پروتئین معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل می‌باشد. مقدار پایین RMSE نشان‌دهنده برازش خوب مدل می‌باشد (جدول ۳).

آنالیز رگرسیون و ضریب تبیین برای برازش روابط بین متغیرهای نیتروژن و تراکم بوته با هریک از متغیرهای وابسته در جدول ۴ ارائه شده که نمودارهای سطح پاسخ بر اساس این ضرایب به‌دست آمده است.

مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد روغن، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، اجزای عملکرد شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه کنجد در جدول ۵ نشان داده شده است.

نتایج سطح پاسخ اثر تراکم بوته و نیتروژن بر اجزای عملکرد نشان داد که با افزایش تراکم، موجب کاهش تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه گردیده است. همچنین با افزایش تراکم تا ۲۵ بوته در مترمربع، عملکرد دانه ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت (شکل ۱).

نتایج نشان داد بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده با ۱۳۲۰/۵۲ و ۱۲۷۲/۴۵ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب برای تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد و کمترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده ۹۰۴/۵۵ و

اطمینان از سبز شدن مناسب بوته‌ها انجام گردید. برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد (شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه) از هر کرت در انتهای فصل رشد و هم‌زمان با رسیدگی بوته‌ها، ۵ بوته به‌صورت تصادفی در هر کرت انتخاب و صفات فوق‌الذکر شمارش و ثبت شد. برداشت محصول در مرحله رسیدگی کپسول‌ها و هم‌زمان با زرد شدن بوته‌ها در ۱۱ مهرماه انجام شد. پس از حذف حاشیه‌های نیم‌متری کرت‌ها، برداشت از سه متر مربع (۱/۵×۲ متر) انتهای هر کرت انجام شد. در هنگام برداشت، در سطح مذکور کلیه بوته‌ها از محل طوقه توسط داس جدا شد. پس از خشک شدن بوته‌ها، دانه با استفاده از الک از کاه و کلش، کاملاً جدا و تمیز شد. دانه‌های برداشت شده به‌طور جداگانه با ترازوی دقیق توزین شدند. جهت اندازه‌گیری درصد روغن دانه از دستگاه سوکسله استفاده شد. عملکرد روغن نیز از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد روغن هر تیمار محاسبه گردید. برای تعیین نیتروژن و پروتئین خام از دستگاه میکروکجلدال خودکار استفاده شد. سپس نیتروژن دانه در ضریب ۶/۲۵ ضرب شد و عدد حاصل به‌عنوان پروتئین مد نظر قرار گرفت (AOAC, 1990). عملکرد پروتئین از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد نیتروژن دانه هر تیمار به‌دست آمد.

به‌منظور انتخاب مدل مناسب، مدل درجه دو کامل^۱ به همراه اجزای آن (خطی، درجه ۲ و اثر متقابل) با اثرات متقابل بین فاکتورها برازش داده شد (رابطه ۲). سپس بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مقادیر F ، P و R^2) و آزمون عدم برازش^۲ بهترین مدل انتخاب و از این مدل برای بهینه‌سازی استفاده گردید (Koocheki et al., 2016; Koocheki et al., 2013).

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

در این معادله، Y : متغیر وابسته (که پاسخ به عملکرد دانه، بیولوژیک و سایر صفات تحت بررسی بودند)، x_1 : متغیر مستقل کود نیتروژن، x_2 : متغیر مستقل تراکم و a_1 تا a_5 : ضرایب معادله می‌باشند. در نهایت، نتایج پیش‌بینی با داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا^۳ انجام شد (رابطه ۳).

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

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

RMSE به‌صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و براساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی که RMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی، بین ۱۰ تا

- 1- Full quadratic regression
- 2- Lack of-fit
- 3- RMSE: Root mean square error

۹۱۰/۶۸ کیلوگرم در هکتار برای تراکم ۴۰ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به دست آمد (جدول ۵).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات 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 بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه 1000-seed weight	کپسول Seed number per capsule	تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule	تعداد کپسول Capsule number per plant	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	درصد پروتئین Protein content	عملکرد پروتئین Protein yield
مدل Model	6	915263**	79835**	0.145556**	14.6200**	1547.62**	13.3280**	17780.3**	5.6696**	5761.5**	
تکرار Replication	1	66 ^{ns}	1100 ^{ns}	0.006154 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.15 ^{ns}	12.2547**	2759.6*	0.0424 ^{ns}	41.3 ^{ns}	
خطی Linear	2	1565937**	147573**	0.416667**	42.0833**	4439.08**	23.7513**	44089.2**	9.0135**	5686.3**	
تراکم Density	1	3044012**	292459**	0.270000**	14.0833**	8694.08**	31.7092**	87680.7**	8.9269**	9121.5**	
نیتروژن Nitrogen	1	87862 ^{ns}	2688 ^{ns}	0.563333**	70.0833**	184.08**	15.7934**	497.6 ^{ns}	9.1002**	2251**	
درجه ۲ Square	2	1175793**	91121**	0.011300 ^{ns}	1.6373 ^{ns}	200.63**	9.9646**	7871.6**	7.4041**	11349.3**	
تراکم × تراکم Density × Density	1	2100814**	166720**	0.21281 ^{ns}	3.2516 ^{ns}	357.34**	18.9052**	14361.1**	14.3781**	21070.7**	
نیتروژن × نیتروژن Nitrogen × Nitrogen	1	7948 ^{ns}	1628 ^{ns}	0.007947 ^{ns}	0.2993 ^{ns}	1.15 ^{ns}	0.5195 ^{ns}	127.2 ^{ns}	0.7026 ^{ns}	323.8 ^{ns}	
اثر متقابل Interaction	1	8052 ^{ns}	519 ^{ns}	0.011250 ^{ns}	0.1250 ^{ns}	6.13*	0.2813 ^{ns}	0.9 ^{ns}	1.1400*	456.6 ^{ns}	
تراکم × نیتروژن Density × Nitrogen	1	8052 ^{ns}	519 ^{ns}	0.011250 ^{ns}	0.1250 ^{ns}	6.13*	0.2813 ^{ns}	0.9 ^{ns}	1.1400*	456.6 ^{ns}	
خطا Error	19	31012	3026	0.010796	0.7597	0.93	0.5875	603.2	0.2243	219.6	
عدم برازش Lack of-fit	11	36218 ^{ns}	3859 ^{ns}	0.014284 ^{ns}	0.6940 ^{ns}	1.03 ^{ns}	0.6185 ^{ns}	747.8 ^{ns}	0.1504 ^{ns}	254.4 ^{ns}	
خطای خالص Pure error	8	23854	1880	0.006000	0.8500	0.8	0.5449	404.3	0.3261	171.8	
RMSE (%)	-	2.37	2.72	2.47	1.92	0.59	0.99	2.78	1.51	3.28	

ns, * and ** represent non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.
* و ** به ترتیب نشان دهنده غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد است.

جدول ۴- ضرایب رگرسیون و 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 R² 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 بیولوژیک Biological yield	2793	105.6	1.25	-2.741	0.0152	-0.0423	90.31
عملکرد دانه Seed yield	1006.5	28.74	-0.12	-0.772	0.00687	-0.0107	89.28
وزن هزار دانه 1000-seed weight	2.940	0.0063	0.00407	-0.000276	0.000015	-0.000050	80.98
تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule	29.14	0.1066	0.0432	-0.00341	0.000093	-0.000167	85.87
تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	104.17	-0.654	0.0309	-0.03575	0.000183	0.001167	99.81
درصد روغن Oil percentage	50.983	-0.532	-0.0169	0.00822	-0.000123	0.000250	87.75
عملکرد روغن Oil yield	532.9	5.61	-0.332	-0.2266	0.00192	0.0005	89.23
درصد پروتئین Protein content	17.846	0.4412	0.0157	-0.007170	0.000143	-0.000503	88.86
عملکرد پروتئین Protein yield	164.9	12.39	0.22	-0.2745	0.00306	-0.01007	89.23

X₁ و X₂: به ترتیب نشان دهنده متغیرهای مستقل تراکم بوته و نیتروژن هستند.
 X₁ and X₂: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

جدول ۵- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد کنگد تحت تأثیر سطوح نیتروژن و تراکم بوته
Table 5- Comparison of observed and predicted values of sesame yield as affected by nitrogen and plant density levels

تیمار Treatment	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)		عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)		وزن هزار دانه 1000-seed weight (g)		تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule		تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant		درصد روغن Oil percentage		درصد پروتئین Protein percentage		
	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	
X ₁															
0	3574.11	3574.9	1231.62	1216.7	3	2.98	30.5	29.87	100	99.94	46.67	46.49	21.32	21.54	
40	2611.21	2631.4	913.92	920.9	2.65	2.75	28	27.95	44	44.35	43	42.86	23.97	24.02	
100	3850.66	3809.6	1296.55	1262.7	3.55	3.48	35.5	34.95	106	106	43.68	43.82	24.17	24.04	
0	2760.85	2739.2	946.62	934.8	3.05	3.11	32.5	32.53	53.5	53.94	40.77	40.94	25.31	25.01	
50	3612.64	3654.25	11731.61	1222.53	3.1	3.19	31	32.17	102.5	102.5	45.41	45.46	22.52	22.43	
40	2643.43	2647.3	904.55	910.68	3.05	2.89	30	30.01	49.5	48.69	42.24	42.2	23.92	24.16	
25	0	3739.06	3719.88	1233.89	1242.5	3	2.93	29	29.67	80.5	80.19	42.5	42.82	24.67	24.39
25	100	3826.28	3891.13	1226.07	1272.45	3.35	3.36	34	34.51	88.5	88.03	40.83	40.53	25.71	26.14
25	50	3733.74	3767.5	1232.13	1240.3	3.1	3.1	32.5	31.86	83	83.65	40.89	41.98	25.84	24.91
25	50	3999.64	3767.5	1320.52	1240.3	3.05	3.1	32.5	31.86	83.5	83.65	41.87	41.98	24.99	24.91
25	50	3742	3767.5	1222	1240.3	3.05	3.1	32.5	31.86	83.5	83.65	42.57	41.98	24.78	24.91
25	50	3791.5	3767.5	1243.4	1240.3	3.05	3.1	31	31.86	84.5	83.65	41.93	41.98	24.82	24.91
25	50	3611.92	3767.5	1237	1240.3	3.05	3.1	32	31.86	83	83.65	42.66	41.98	24.29	24.91

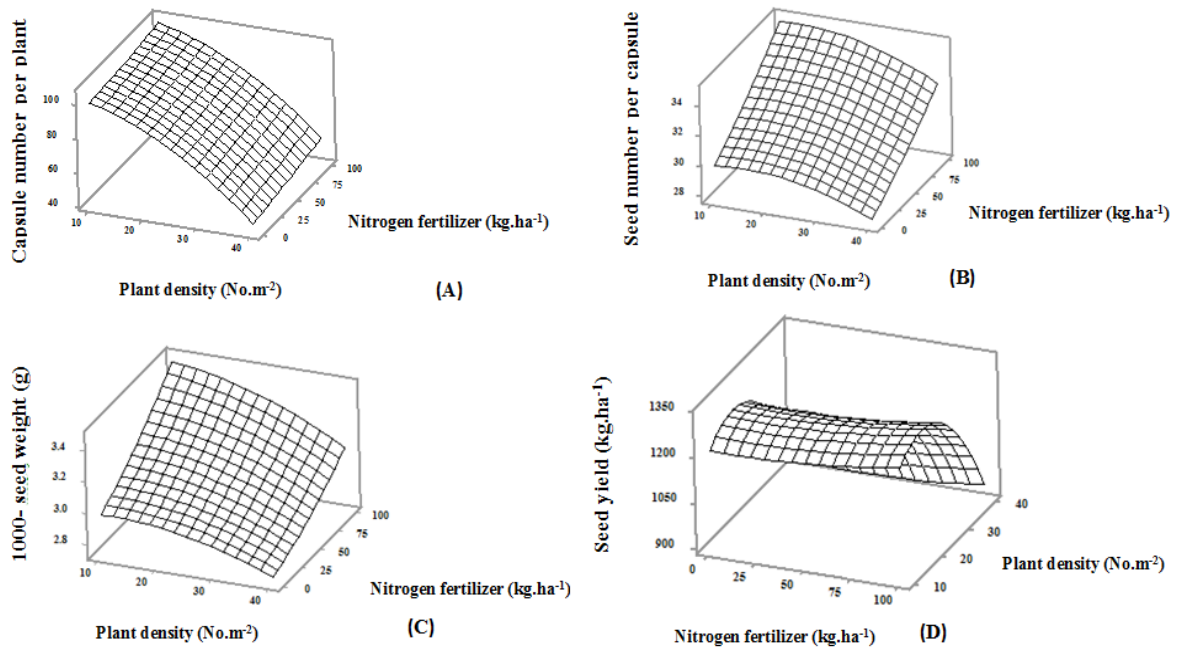
X₁ و X₂: به ترتیب نشان دهنده متغیرهای مستقل تراکم (بوته در مترمربع) و نیتروژن (کود اوره در هکتار) هستند.
 X₁ and X₂: indicate independent variables such as nitrogen and plant density, respectively.

نیتروژن این صفات افزایش یافت (شکل ۱). نتایج احمدی و بحرانی (Ahmadi and Bahrani, 2009) نشان داد که تأثیر نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد کنگد به جز وزن هزار دانه معنی‌دار بود. کاربرد بیش از حد از نیتروژن باعث کاهش کارایی مصرف نیتروژن می‌شود. گزارش شده است که کمتر از ۳۳ درصد نیتروژن مصرفی

همچنین نتایج نشان داد اثر نیتروژن بر عملکرد معنی‌دار نشد، اما اجزای عملکرد را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد و در بین اجزای عملکرد فقط اثرات متقابل کود نیتروژن و تراکم بر تعداد کپسول در بوته معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج سطح پاسخ اجزای عملکرد به تراکم بوته و نیتروژن نشان داد که با افزایش مصرف

گلخانه‌ای می‌شود (Shindo et al., 2009).

توسط گیاه جذب می‌شود، در حالی که باقیمانده از دسترس خارج شده و باعث تشدید بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی نظیر انتشار گازهای

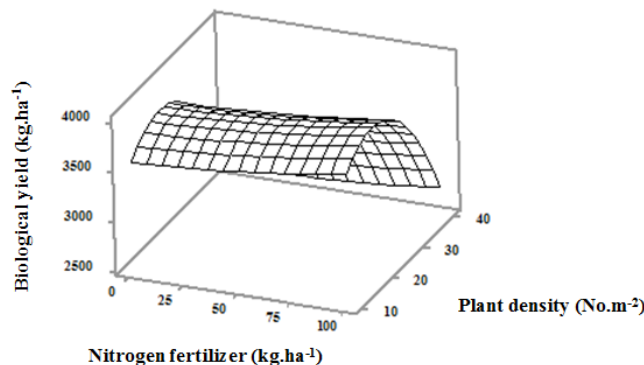


شکل ۱- مدل سطح پاسخ تعداد کپسول در بوته (الف)، تعداد دانه در کپسول (ب)، وزن هزار دانه (ج) و عملکرد دانه (د) کنجد تحت تأثیر سطوح تراکم و کود نیتروژن

Figure 1- Response surface model for capsule number per plant (A), seed number per capsule (B), 1000-seed weight (C) and seed yield (D) of sesame affected as plant density and nitrogen fertilizer

نتایج به‌دست آمده برای عملکرد بیولوژیک مشابه عملکرد دانه است، به‌نظر می‌رسد در تراکم ۲۵ بوته در مترمربع که شرایط بهتری برای رشد بوته‌ها اعم از نور، فضا و عناصر غذایی فراهم شده است که در نتیجه نسبت به تراکم‌های بالاتر شاخه‌زایی مطلوب‌تری انجام شده و موجب افزایش عملکرد بیولوژیک بالاتر شده است. همچنین افزایش مصرف کود اوره تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار به دلیل تحریک رشد رویشی باعث افزایش عملکرد بیولوژیک گردید.

نتایج نشان داد بیشترین عملکرد بیولوژیک مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با ۳۹۹۹/۶۴ و ۳۸۹۱/۱۳ کیلوگرم در هکتار در تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد (جدول ۵). نتایج سطح پاسخ عملکرد بیولوژیک به تراکم بوته و نیتروژن نشان داد با افزایش تراکم تا ۲۵ بوته در متر مربع، عملکرد بیولوژیک ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت ولی افزایش مصرف نیتروژن، بهبود عملکرد بیولوژیک را موجب گردید (شکل ۲).



شکل ۲- مدل سطح پاسخ عملکرد بیولوژیک کنجد تحت تأثیر سطوح تراکم و کود نیتروژن

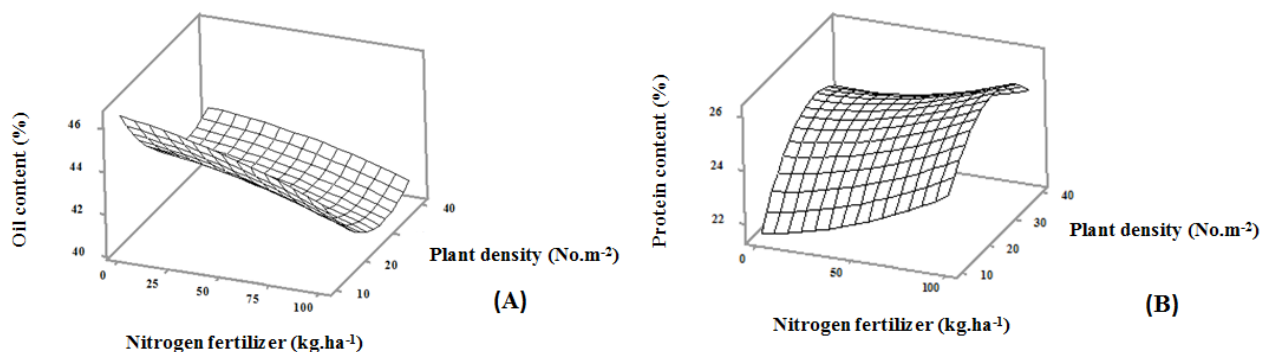
Figure 2- Response surface model for biological yield of sesame affected as plant density and nitrogen fertilizer

نتایج سطح پاسخ درصد روغن کنجد به تراکم بوته و نیتروژن نشان داد که با افزایش تراکم، درصد روغن ابتدا کاهش، سپس افزایش یافت ولی با افزایش نیتروژن، درصد روغن روند کاهشی نشان داد (شکل ۳- الف). نتایج سطح پاسخ درصد پروتئین کنجد به تراکم بوته و نیتروژن نشان داد با افزایش تراکم درصد پروتئین افزایش و سپس کاهش یافت و با افزایش میزان مصرف نیتروژن روند افزایشی برای درصد پروتئین مشاهده شد (شکل ۳- ب). همچنین نتایج نشان داد بیشترین درصد روغن مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با ۴۶/۶۷ و ۴۶/۴۹ درصد در تراکم ۱۰ بوته در متر مربع و عدم مصرف نیتروژن به‌دست آمد و بیشترین درصد پروتئین مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با ۲۵/۳۱ و ۲۵/۰۱ درصد در تراکم ۴۰ بوته در مترمربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار حاصل شد (جدول ۵) و اثر متقابل تراکم و کود نیتروژن بر درصد پروتئین معنی‌دار بود (جدول ۳).

آن‌چنان که انتظار می‌رود در اثر افزایش کود نیتروژن، درصد روغن کاهش یافت چرا که با کاربرد نیتروژن درصد پروتئین دانه افزایش می‌یابد و کاربرد نیتروژن باعث ترکیبات نیتروژنه (نظیر آمیدها و آمین‌ها) بیشتری به بذر شده که برای تولید پروتئین‌ها با استفاده از اسکلک کربنی حاصل از ساکارز مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نتیجه کربن کمتری برای تولید روغن در دانه باقی می‌ماند که باعث کاهش درصد روغن دانه می‌شود (Babaei Abarghouei, 2016). نتایج حقانیان و همکاران (Haghanian et al., 2016) و شارما (Sharma et al., 1998) بر روی گیاه کنجد و نتایج چائوهان و همکاران (Chauhan et al., 1993) بر روی گیاه کلزا موبد این مطلب است.

مقادیر بهینه کاربرد کود نیتروژن و تراکم کاشت کنجد برای حصول پاسخ عملکرد دانه و درصد روغن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که کاربرد ۲۲ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۱۴ بوته در متر مربع باعث تولید ۱۲۵۰ کیلوگرم دانه در هکتار با ۴۲ درصد روغن می‌شود. مقدار شاخص مطلوبیت بهینه‌سازی ($0 < DI \leq 1$) یک به‌دست آمد که نشان‌دهنده نتایج قابل قبولی برای سطوح پاسخ تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد. لازم به ذکر است که هرچه این شاخص به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهای وابسته تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد (Kalavathy et al., 2009).

رضوانی مقدم و همکاران (۱۳۸۴) گزارش کردند که افزایش تراکم کنجد از ۲۰ به ۵۰ بوته در مترمربع تأثیر معنی‌داری بر ماده خشک تک بوته داشت؛ به‌طوری‌که با افزایش تراکم، ماده خشک تک بوته کاهش یافت (Rezvani Moghaddam, 2008). قوش و پاتر (Ghosh and Patar, 1994) و اوسی بانسو (OseiBonsu, 1977) نیز طی مطالعات مختلف روی اثر تراکم در کنجد بیان داشتند که بیشترین میزان ماده خشک تک بوته در تراکم‌های پایین به‌دست آمد. آن‌ها علت این امر را وجود رقابت شدید بین گیاهان، کاهش دسترسی به منابع، کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش تولید ماده خشک در تراکم‌های بالا ذکر کردند. کالسیکان و همکاران (Caliskan et al., 2004)، چیمان‌شیت و دوپل (Chimanshette and Dhoble, 1992) و ماجومادر و روی (Majumdar and Roy, 1992) گزارش نمودند که در کنجد با افزایش تراکم بوته در واحد سطح، عملکرد دانه افزایش پیدا کرده، نتایج این آزمایش نیز نشان داد که با افزایش تراکم از ۱۰ به ۲۵ بوته در مترمربع عملکرد دانه افزایش و سپس با افزایش بیشتر تراکم، مقدار آن کاهش یافت که با نتایج تحقیقات بهروز و همکاران (Behrooz et al., 2010) مطابقت نداشت. بیشترین عملکرد دانه در آزمایشات فوق در تراکم‌های ۴۰ و ۵۰ بوته در متر مربع به‌دست آمد اما با نتیجه تحقیق پاپری مقدم فرد و بحرانی (PapariMoghaddam Fard and Bahrani, 2005) که تراکم‌های ۱۰، ۱۶/۶ و ۲۵ بوته در مترمربع را مورد آزمایش قرار دادند، مطابقت داشت. همچنین شارما و همکاران (Sharma, 2005) نیز گزارش نمودند که بین تراکم‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ هزار بوته در هکتار اختلاف معنی‌داری در عملکرد دانه کنجد به وجود نیامد. رقم کشت شده در تحقیق حاضر رقم چند شاخه است که احتمالاً در تراکم‌های کمتر به دلیل وجود فضای کافی رشد رویشی بیشتری صورت گرفته و ماده خشک بیشتری برای شاخه‌زایی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. همچنین در تراکم‌های پایین، رقابت کمتری برای جذب آب و عناصر غذایی بین بوته‌ها وجود دارد. از سوی دیگر، در تراکم‌های کم به دلیل رقابت کمتر و نفوذ نور بیشتر، گل‌های بیشتری تبدیل به کپسول شده و در نهایت، تعداد کپسول باقی‌مانده در زمان برداشت نیز بیشتر گردید. در تراکم‌های بالا نفوذ نور به درون کانوبی کاهش یافته که سبب ایجاد محدودیت در نفوذ نور به پایین بوته گردید و بنابراین، تعداد کمتری کپسول در گره‌های پایین گیاه تشکیل شده و گاهی گره‌های پایین بدون کپسول بودند. در تراکم ۲۵ بوته در مترمربع، فضای کافی و مطلوبی برای رشد و ایجاد شاخه فراهم شد و موجب گردد که بیشترین عملکرد حاصل گردد.



شکل ۳- مدل سطح پاسخ درصد روغن (الف) و درصد پروتئین (ب) کنجد تحت تأثیر سطوح تراکم و کود نیتروژن

Figure 3- Response surface model for Oil content (A) and Protein content (B) of sesame affected as plant density and nitrogen fertilizer

همچنین مصرف بیش از مقادیر ذکر شده نهاده‌ها برای حصول بالاترین عملکرد دانه و روغن کنجد (تراکم ۲۵ بوته در مترمربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار البته با توجه به نیتروژن موجود در خاک مزرعه) فقط باعث افزایش هزینه‌ها و آلودگی زیست‌محیطی می‌گردد. همچنین بر مبنای نتایج بهینه‌سازی کاربرد کود نیتروژن و تراکم کاشت کنجد برای حصول پاسخ بررسی و عملکرد دانه و محتوی روغن دانه به‌عنوان شاخص اقتصادی، به نظر می‌رسد مصرف منابع با توجه به مقادیر بهینه‌سازی شده می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین سطوح مصرف کود نیتروژن و تراکم بوته با توجه به شرایط مطالعه شده در نظر گرفته شوند و کاربرد ۲۲ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۱۴ بوته در مترمربع باعث تولید ۱۲۵۰ کیلوگرم دانه در هکتار با ۴۲ درصد روغن می‌شود.

نتیجه‌گیری

برای دستیابی به تولید پایدار محصولات زراعی، توجه به اصول اولیه بهبود مدیریت انرژی، کارایی مصرف منابع و جلوگیری از هدر رفت نهاده‌ها بر مبنای استفاده از مدل‌های آماری همچون طرح مرکب مرکزی امری اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. نتایج این مطالعه روی اثر کود نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد کمی و کیفی کنجد با استفاده از طرح مرکب مرکزی نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۱۳۲۰/۵۲ کیلوگرم در هکتار) در تراکم ۲۵ بوته در مترمربع و مصرف ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد که به‌نظر می‌رسد در این تراکم پوشش گیاهی توانسته از نور خورشید، آب و کود اوره مصرف شده، بیشترین استفاده را نماید و همچنین با توجه به رشد کند کنجد در مراحل اولیه رشد، گیاه کنجد در تراکم مذکور توانسته بر رشد علف‌های هرز پیشی گرفته و استفاده مناسبی از منابع نموده است.

References

- Ahmadi, M., and Bahrani, M. 2009. Effect of nitrogen fertilizer on yield and yield components of three sesame cultivars in Bushehr province. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 48: 123-131. (in Persian with English abstract).
- Amini, M. 2007. Optimization the conditions for extraction of hydrocolloid compounds of Ballengo-Shirazi seed and studying the effect of its addition on rheological properties and bulk bread quality compared to Gazanthan gum. M.Sc. Thesis, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract).
- AOAC. 1990. Official methods of analyses. Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC.
- Aslan, N. 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-ravity Separator for coal cleaning. *Fuel* 86: 769-776.
- Babaei Abarghouei, G. H. 2016. Effects of sowing date and integrative nitrogen application on nitrogen efficiency, yield and quality criteria of sesame. Ph.D. Thesis, College of agriculture, University of Ferdowsi. Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract).
- Balasubramanian, P., Gnanamurthy, P., and Dharmalingam, V. 1995. Response of irrigated sesame varieties to planting density and nitrogen. *Sesame and Safflower Newsletter* 10: 59-66.
- Behrooz, Z., Khodabandeh, N., Madani, H., and Shirzadi, M. H. 2010. Study of bush accumulation and division of nitrogen fertilizer on agronomic characteristic of local sesame Jiroft area. *New Finding in Agriculture* 4 (2): 91-99. (in Persian with English abstract).
- 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.

9. Box, G. E. P., and Wilson, K. B. 1951. On the experiment attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 13: 1-45.
10. Caliskan, S., Arslan, M., Arioglu, H., and Isler, N. 2004. Effect of planting method and plant population on growth and yield of sesame in a Mediterranean type of environment. *Asian Journal of Plant Sciences* 3: 610-613.
11. Chauhan, A. K., Manak, S., and Daolhowal, B. K. 1993. Effect of nitrogen level and row spacing of performance of rape (*Brassica napus* L.). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 37: 851-853.
12. Chimanshette, T., and Dhoble, M. 1992. Effect of sowing date and plant density on seed yield of sesame varieties. *Indian Journal of Agronomy* 37: 280-282.
13. Clarke, G. M., and Kempson, R. E. 1997. *Introduction to the Design and Analysis of Experiments*. Arnold, London. 334p.
14. Dean, A., and Voss, D. 2002. *Design and Analysis of Experiments*. Springer Texts in Statistics. New York.
15. Garshasbi, M., Dadnia, M. R., and Rafie, M. R. 2011. Evaluating the effects of amounts and different times of nitrogen consumption on quantitative and qualitative traits in sesame (*Sesamum indicum* L.) in Behbahan Province. *Crop Physiology Journal* 9 (3): 95-123. (in Persian with English abstract).
16. Ghosh, D. C., and Patar, A. K. 1994. Effect of plant density and fertility levels on productivity and economic of summer sesame. *Indian Journal of Agronomy* 39: 71-75.
17. Haghanian, S., Yadavi, A., Balouchi, H. R., and Moradi, A. 2016. Grain, oil yield and nitrogen use efficiency in different varieties of sesame (*Sesamum indicum* L.) under nitrogen fertilizer and weed competition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 26 (1): 67-81. (in Persian with English abstract).
18. Jefferson, T. 2003. Sesame a High Value Oil Seed. *Growing Sesame Production Tips, Economics and Mare*. Htm, p. 1-4.
19. Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G., and Miranda, L. R. 2009. Modeling, analysis and optimization of adsorption parameters for H₃PO₄ activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). *Colloids and Surfaces B: Bionterfaces* 70: 35-45.
20. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Amiri, M. B., and Fallah Poor, F. 2016. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. *Journal of Agroecology* (in press). (in Persian with English abstract).
21. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Mansouri, H. 2013. Optimization of water, nitrogen and density in canola cultivation by central composite design. *Journal of Agroecology* 3 (1): 1-16. (in Persian with English abstract).
22. Kwak, J. S. 2005. Application of taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45: 327-341.
23. Laegreid, M., Bockman, O. C., and Kaarstad, O. 1999. *Agriculture, Fertilizers, and the Environment*. CABI Publishing.
24. Majumdar, D., and Roy, S. 1992. Response of summer sesame to irrigation, row spacing and plant population. *Indian Journal of Agronomy* 37: 758-762.
25. Maman, N., Lyon, D. J., Mason, S. C., Galusha, T. D., and Higgins, R. 2003. Pearl millet and grain sorghum yield response to water supply in Nebraska. *Agronomy Journal* 95: 1618-1624.
26. Mansouri, H. 2014. Modeling of growth and nitrogen fertilization management in the production of Persian shallot and onion. Ph.D. Thesis, College of agriculture, University of Ferdowsi. Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract).
27. Martin, R. J., and Deo, B. 2000. Effect of plant population on calendula (*Calendula officinalis* L.) flower production. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 28: 37-44.
28. Mohajer, A. R. 2017. Imports 38 billion dollars of oil and meal over the past 25 years to the country. Interview with the Project Manager of Oil Seeds Project, Ministry of Jihad-e-Agriculture. Mehr news agency. 5 September 2017. (in Persian).
29. 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).
30. OseiBonsu, K. 1977. The effect of spacing and fertilizer application on the growth, yield and yield components of sesame. *Acta Horticulturae* 53: 355-374.
31. Papari Moghaddam Fard, A., and Bahrani, M. J. 2005. Effect of nitrogen fertilizer rates and plant density on some agronomic characteristics, seed yield, oil and protein percentage in two sesame cultivars. *Iranian Journal of Agricultural Science* 36 (1): 129-134. (in Persian with English abstract).
32. Rezvani Moghaddam, P. 2008. Modern and Neglected Plants. In: *Modern Agronomy*, Koocheki, A., and Khajeh Hosseini, M. Press of Jihad-e Daneshgahi of Mashhad, Iran. (in Persian)
33. Roy, N., Abdullah Mamun, S. M., and SarwarJahan, M. D. 2009. Yield performance of sesame varieties at varying levels of row spacing. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 5 (5): 823-827.

34. Sharma, P. B. 2005. Fertilizer management in sesame (*Sesamum indicum* L.) based intercropping system in Tawa command area. Journal of Oilseeds Research 22: 63-65.
35. Sharma, P. B., Parshar, R. R., Ambawatia, G. R., and Pillai, P. V. A. 1998. Response of sesame varieties to plant population and nitrogen levels. Field Crop Abstracts 51: 481.
36. Shindo, J., Okamoto, K., Kawashima, H., and Konohira, E. 2009. Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005. Soil Science and Plant Nutrition 55: 532-545.
37. Toan, D. P., Thuy-Duong, T. N. A., Carlsson, S., and Bui, T. M. 2010. Morphological evaluation of sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties from different origins. Australian Journal of Crop Science 4: 498-504.
38. Wang, J. P., Chen, Y. Z., Ge, X. W., and Yu, H. Q. 2007. Optimization of coagulation-flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 302: 204-210.
39. 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.



Effect of Nitrogen Fertilizer and Plant Density on Seed Yield and Oil Yield of Sesame Using a Central Composite Design

H. Latifi¹, S. Khorramdel^{2*}, M. Nassiri Mahallati³, J. Vafabakhsh⁴, A. Mollafilabi

Received: 19-05-2018

Accepted: 13-11-2018

Introduction

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is known as the king of oil seeds due to the high oil content (50-60%) of its seed. Nitrogen (N) is one of the most important nutrients in crop production systems. Excessive use of N in crop production causes a declining trend in nitrogen use efficiency (NUE). It has been reported that not more than 33% of N applied is used by the plant, while the remainder is lost and causes environmental pollution as well as emission of greenhouse. Optimization of nitrogen and plant density is a management approach to conserve resources and decline environmental pollutions. Response surface methodology (RSM) is defined as a set of mathematical and statistical techniques that are used to develop, to improve or to optimize a product. RSM is a statistical method for optimization of multiple factors which determine optimum process conditions by combining experimental designs. In this work, optimization of nitrogen fertilizer and plant density of sesame using central composite design for Response surface methodology was done.

Materials and Methods

This research 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 (10 and 40 plants.m⁻², respectively) and nitrogen (0 and 100 kg Urea ha⁻¹, respectively). Plant height, yield components, seed yield, biological yield, harvest index, oil percentage, oil yield, protein percentage and, protein yield were calculated as dependent variables and changes of these variables were evaluated by a regression model. Lack-of-fit test was used to evaluate the quality of the fitted model. The adequacy of the model was tested by analysis of variance. In general, the full quadratic polynomial equation was tested to determine the significance of the model and the component of the model (linear, squared, first-order interaction terms). The quality of the fitted model was judged using the determination coefficient (R²).

Results and Discussion

The results showed that effect of linear component was significant on all studied characteristics. Effect of square component was significant on all studied criteria except harvest index, seed No. per capsule and 1000-seed weight. Interaction effect of full quadratic was significant on plant height, seed No. per plant and protein percentage. Lack of fit test had no significant effect on the studied traits. The full square model for the response variables gave insignificant lack-of-fit indicating that the data of experimental were satisfactorily explained. The highest estimated and observed values of seed yield were obtained for 25 plants.m⁻² and 50 kg Urea ha⁻¹ and 25 plants.m⁻² and 100 kg Urea ha⁻¹ with 1320.5 and 1272.4 kg.ha⁻¹, respectively. The highest estimated values of oil percentage and protein percentage were obtained for 10 plants.m⁻² and without Urea application (46.7%) and 40 plants.m⁻² and 100 kg Urea ha⁻¹ kg Urea ha⁻¹ (25.3%) and these maximum observed amounts were recorded in 10 plants.m⁻² and without Urea application (46.5%) and 40 plants.m⁻² and 100 kg Urea ha⁻¹ kg Urea ha⁻¹ (25.0%), respectively.

1- PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

5- Assistant Professor, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

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

Conclusions

The slope of seed yield increased by an increase in density up to 25 plants.m⁻² and was higher under high levels of N fertilizer (optimum level= 50 kg Urea ha⁻¹) than under low levels, because the plant growth was improved in high amount of N fertilizer and resulted in high yield components and seed yield. Therefore, the effect of plant density on yield improvement could be increased at high levels of N fertilizer which clearly suggest the importance of N for higher seed production in sesame. In general, it seems that resource use optimization based on the central composite design may be suitable cropping approach for sustainable production of sesame.

Acknowledgement

This research was funded by Vice Chancellor for Research of Ferdowsi University of Mashhad, which is hereby acknowledged.

Keywords: Lack-of-fit test, Response surface methodology, Sustainable production