نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص ۷۲-۵۷

Journal of Agroecology
Vol. 13, No.1, Spring 2021, p. 57-72

مقاله علمی- پژوهشی

بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و آب در چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) با استفاده از مدل‌سازی سطح- پاسخ

حامد منصوری[1]*، حمید نوشاد[2] و مهدی حسنی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

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

چکیده

هدف از انجام تحقیق حاضر، بهینه‌سازی منابع کود نیتروژن و آب در چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) در شرایط آب‌وهوایی همدان با استفاده از روش سطح- پاسخ بود. برای این منظور، داده‌های مورد نیاز از منابع موجود استخراج و در قالب طرح مرکب مرکزی بهینه‌سازی در شرایط آب‌وهوایی همدان انجام گرفت. سطوح بالا و پایین کود نیتروژن و آبیاری به‌ترتیب ۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار و ۸۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار بودند. نتایج ارزیابی مدل بر اساس شاخص‌های آماری نشان داد که مدل از دقت قابل قبول و معنی‌داری برای شبیه‌سازی صفات چغندرقند برخوردار بود، *به‌طوری‌که* مقدار شاخص RMSE برای تمام صفات مورد ارزیابی کمتر از هشت درصد به‌دست آمد. برای بهینه‌سازی از دو روش هم‌پوشانی لایه‌ها و حل عددی استفاده شد. بر اساس روش *هم‌پوشانی* لایه‌ها، میزان مصرف ۹۵۰۰ تا ۱۲۰۰۰ مترمکعب آب در هکتار و کاربرد ۱۱۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌عنوان بهینه مصرف آبیاری و کود نیتروژن برآورد گردید. در روش حل عددی نیز کاربرد ۱۳۳ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار به‌همراه ۱۰۶۶۷ مترمکعب آب به‌عنوان مقادیر بهینه تیمارها شبیه‌سازی شد. بر اساس مقادیر بهینه پیشنهادی توسط مدل در روش حل عددی، میزان عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید، میزان نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و نیتروژن به‌ترتیب معادل ۸۰/۱ تن در هکتار، ۱۴/۹۴ تن در هکتار، ۱۲/۴۹ تن در هکتار در هکتار، ۲/۵۶ میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم، ۱/۳۹ کیلوگرم شکر بر مترمکعب آب و ۷۴/۲۴ کیلوگرم شکر بر کیلوگرم نیتروژن برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: طرح مرکب مرکزی، عملکرد بهینه، عملکرد شکر، کارایی مصرف آب، کارایی مصرف نیتروژن

مقدمه

به‌منظور دستیابی به عملکرد اقتصادی قابل قبول و کاهش همزمان آلودگی‌های زیست‌محیطی، نهاده‌های مورد استفاده در مزرعه باید با توجه به عملکرد مورد انتظار به‌صورت بهینه مصرف شوند. یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری برای حصول مقادیر بهینه نهاده‌ها، استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد (Aslan, 2007; Kwak, 2005). روش سطح پاسخ یک روش آماری پیشرفته می‌باشد که می‌تواند در بهینه‌سازی منابع مورد استفاده قرار گیرد که اساس آن بر پایه یک مدل غیرخطی چند متغیره استوار است (Zulkali et al., 2006; Kalavathy et al., 2009). این مدل به‌منظور به‌دست آوردن سطح پاسخ مطلوب، ترکیبی از تیمارها را طراحی کرده و یک مدل آماری با بهترین برازش برای داده‌های به‌دست آمده از نتایج طرح آزمایشی ایجاد می‌کند و در نهایت، مقادیر بهینه متغیرهای مستقل را برای حصول مقدار مورد انتظار برای متغیر وابسته تعیین می‌کند

۱- استادیار بخش تحقیقات چغندرقند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش وترویج کشاورزی، همدان، ایران.
۲- استادیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: h.mansori@areeo.ac.ir)
Doi:10.22067/jag.v13i1.79767

(Montgomery, 2001; Kalavathy et al., 2009). از مزایای دیگر استفاده از روش سطح پاسخ، می‌توان به بررسی اثرات متقابل مؤثر بر متغیر وابسته و همچنین ترکیب تیمارهای مختلف به‌صورت همزمان با تعداد آزمایشات محدود اشاره کرد (Kalavathy et al., 2009). یکی از انواع روش‌های سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی می‌باشد که این طرح به‌عنوان یک طرح جایگزین و مناسب برای طرح فاکتوریل می‌باشد که توسط باکس و ویلسون (Box & Wilson, 1951) مطرح و توسط باکس و هانتر (Box & Hunter, 1957) تکمیل گردید. مزیت استفاده از طرح مرکب مرکزی نسبت به طرح فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش می‌باشد که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند .همچنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Obeng et al., 2005; Aslan, 2007).

با توجه به اینکه کشور ایران در بخش خشک و نیمه‌خشک دنیا واقع شده است و از نظر منابع آب محدود می‌باشد، بنابراین ذخیره و صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش کشاورزی، نقش مؤثری در افزایش تولیدات خواهد داشت. استفاده بهینه از آب تا حد زیادی به کمیابی آب بستگی دارد و برای مدیریت آن باید اصول اقتصادی لازم را مورد استفاده قرار داد. بنابراین، مدیریت صحیح آب در تخصیص بهینه این نهاده، بسیار مهم تلقی می‌شود.

نیتروژن یکی از نهاده‌های تأثیرگزار بر کمیت و کیفیت گیاهان زراعی است و باعث بهبود دوام سطح برگ و افزایش آسیمیلاسیون محصول و در نتیجه، افزایش عملکرد می‌گردد. در عین حال، این عنصر به‌آسانی از خاک شسته شده و باعث آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. طبق برآوردهای انجام شده فقط حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد کود نیتروژن مصرفی، از طریق محصول کشاورزی از خاک جذب می‌شود و این نسبت با افزایش مصرف کود کاهش می‌یابد (Wenxue et al., 2005). اثرات متقابل پیچیده‌ای بین میزان آب آبیاری و میزان کود نیتروژن وجود دارد. بنابراین، بهینه مصرف منابع نیتروژن و آب و در نظر گرفتن ترکیب تیماری آن‌ها ضروری می‌باشد، به‌طوری‌که آبیاری زیاد منجر به آب‌شویی نیتروژن شده و علاوه‌بر غیر قابل دسترس کردن این عنصر برای گیاه منجر به آلودگی زیست‌محیطی نیز می‌شود؛ از طرف دیگر، آبیاری کم و خشکی سطح خاک، معدنی شدن نیترات را کاهش می‌دهد و بنابراین، جذب آن را توسط گیاه کاهش می‌دهد. در این شرایط رشد قسمت هوایی و ریشه تا حدی کاهش یافته و در نتیجه، ساکارز به‌جای مصرف برای رشد، در ریشه ذخیره‌سازی می‌شود. البته چنین تنش رطوبتی بایستی در آخر دوره رشد باشد تا بتواند مفید باشد (Mohammadian et al., 2010; Hills et al., 1990).

استفاده از روش‌های پیشرفته آماری مانند روش سطح- پاسخ در تعیین بهینه مصرف منابع در گیاهان مختلفی از جمله کلزا (*Brassica napus* L.) (Koocheki et al., 2014)، گندم (*Triticum aestivum* L.) (Jahan et al., 2016) و گیاهان غده‌ای مانند پیاز (*Allium cepa* L.) (Mansouri et al., 2014) و موسیر (*Allium stipitatum* L.) (Mansouri et al., 2015) در سال‌های اخیر در کشور رو به گسترش بوده است. ولی مطالعه‌ای در خصوص استفاده از این روش در بهینه‌سازی گیاه چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) انجام نگرفته است. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2014) برای بهینه‌سازی کود نیتروژن، آبیاری و تراکم کاشت در گیاه کلزا از روش سطح- پاسخ استفاده کرده و با توجه به معنی‌داری مدل و همچنین دقت بالای آن، استفاده از روش سطح- پاسخ را روشی مناسب در جهت بهینه‌سازی مدیریت زراعی منابع تولید عنوان کردند و کاربرد ۹۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار با حجم آبیاری ۲۳۴۷ مترمکعب آب در هکتار را به‌عنوان بهترین تیمار برای به‌دست آوردن عملکرد کلزا با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی و کاهش تلفات نیتروژن توصیه نمودند. منصوری و همکاران (Mansouri et al., 2014) نیز در مطالعه مشابهی بر روی گیاه پیاز، استفاده از روش سطح- پاسخ را روشی مؤثر در بهینه‌سازی منابع تولید،کاهش هزینه‌های تولید و آلودگی زیست‌محیطی عنوان کردند. این محققان مصرف ۹۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار با مقدار آب آبیاری معادل ۸۹۳۰ مترمکعب آب در هکتار را در کشت پیاز به‌عنوان تیمار بهینه کود نیتروژن و آب در منطقه آذرشهر گزارش کردند. بنابراین، هدف از این مطالعه بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و آب در گیاه چغندرقند با استفاده از روش سطح- پاسخ و طرح مرکب مرکزی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین مقادیر بهینه کود نیتروژن و آب در زراعت چغندرقند در همدان از اطلاعات و داده‌های موجود بر اساس تحقیقات انجام گرفته در این زمینه (Mirzaei & Ghadami, 2005; Jahedi

et al., 2012) استفاده شد. بنابراین، تیمارهای مورد نیاز با توجه به سطوح بالا و پایین کود نیتروژن (۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) و آب (۸۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶ به‌صورت طرح مرکب مرکزی تعریف شد.

روش سطح پاسخ به‌صورت یک تابع چند متغیره بر اساس معادله ۱ تعریف می‌شود (Kalavathy et al., 2009):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad \text{معادله (۱)}$$

که در این تابع، y: به‌عنوان متغیر پاسخ و x_i: به‌عنوان متغیر مستقل می‌باشند. همان‌طور که در قبل نیز بیان شد یکی از انواع روش‌های سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی می‌باشد. طرح مرکب مرکزی به‌صورت یک طرح آزمایشی به‌منظور تعیین مقادیر متغیرهای مستقل برای حصول متغیر وابسته پیش‌بینی شده تعریف می‌شود که در این طرح میانگین سطوح فاکتورها به‌عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Kalavathy et al., 2009). در طرح مرکب مرکزی، تیمارهای آزمایشی به‌صورت کدهای بدون واحد ۱+، ۱− و ۰ نشان داده می‌شوند که به‌ترتیب بیانگر بالاترین سطح، پایین‌ترین سطح و میانگین سطوح متغیرهای مستقل می‌باشند. تعداد تیمارهای طراحی شده در طرح مرکب مرکزی با استفاده از فرمول $2^k + 2k + r$ محاسبه می‌شود. در این فرمول، k: نشان‌دهنده تعداد فاکتورهای مورد بررسی و r: تعداد تکرار برای نقطه مرکزی می‌باشد (Aslan, 2007). تعداد تکرار در نقطه مرکزی به‌دلیل برآورد خطای آزمایشی مهم می‌باشد. تعداد تکرار توصیه شده برای نقطه مرکزی در یک طرح مرکب مرکزی با دو فاکتور برابر پنج گزارش شده است (Aslan, 2007). بنابراین، برای طرح‌های مرکب مرکزی با دو فاکتور ۱۳ تیمار آزمایشی بر اساس معادله ۲ تعریف می‌شود.

$$2^k + 2k + r = 2^2 + (2\times2) + 5 = 13 \quad \text{معادله (۲)}$$

جدول ۱- کد ضرایب و مقادیر واقعی متغیرهای مستقل

Table 1- Coefficient code and actual values of independent variables

کد ضرایب Coefficient code		مقدار Value	
آبیاری Irrigation	کود نیتروژن N fertilizer	آبیاری Irrigation ($m^3.ha^{-1}$)	کود نیتروژن N fertilizer ($kg\ N.ha^{-1}$)
+1	+1	14000	240
0	+1	11000	240
0	0	11000	120
0	0	11000	120
-1	-1	8000	0
+1	0	14000	120
0	-1	11000	0
0	0	11000	120
0	0	11000	120
0	0	11000	120
-1	+1	8000	240
+1	-1	14000	0
-1	0	8000	120

جهت برازش داده‌ها، معادله رگرسیونی چند متغیره با افزودن جملات خطی، درجه ۲ و اثر متقابل بین فاکتورها، برازش و بر اساس تجزیه واریانس رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت، معنی‌داری مدل و دقت آن در برازش داده‌ها مشخص شد. برای ارزیابی و آزمون معنی‌داری آماری مدل، از تجزیه واریانس رگرسیونی استفاده شد. به‌منظور مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهده شده از جذر میانگین مربعات خط (RMSE[1])، کارایی مدل (ME[2])، ضریب تبیین (R^2) و همچنین مقایسه با خط ۱:۱ استفاده گردید (Mansouri et al., 2014). معادله چند جمله‌ای مورد استفاده در مدل رگرسیونی به‌صورت زیر می‌باشد (Aslan, 2007):

معادله (۳)

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2$$

1- Root mean square error
2- Model efficiency

که در آن، y: متغییر وابسته؛ i: خصوصیات کمّی و کیفی چغندرقند، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب؛ x_1 و x_2: به‌ترتیب متغیرهای مستقل کود نیتروژن و آبیاری و a: ضرایب معادله می‌باشند. همان‌طور که بیان شد برای مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهده شده از جذر میانگین مربعات خطا و کارایی مدل استفاده گردید که از معادلات زیر محاسبه شدند (Bannayan et al., 2014).

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}$$ معادله (۴)

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{O} - O_i)^2}$$ معادله (۵)

که در آن‌ها، P_i: مقادیر پیش‌بینی شده، Oi: مقادیر اندازه‌گیری شده، n: تعداد مشاهدات و $\bar{O}$: میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. مقادیر کمتر از ۱۰ درصد برای شاخص RMSE نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل برای شبیه‌سازی متغیرها می‌باشد. مقدار شاخص کارایی مدل نیز هر چقدر به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقت بالای مدل می‌باشد (Bannayan et al., 2014).

برازش رگرسیونی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ از جمله رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های اعتبار مدل‌هاست (Nassiri et al., 2006). مدل در صورتی از دقت کافی در پیش‌بینی مشاهدات برخوردار خواهد بود که خط رگرسیون دارای شیبی برابر یک بوده و بر خط ۱:۱ (y=x) منطبق باشد. برای این منظور معادله خط رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده[3] و پیش‌بینی شده[4] که معادله آن در زیر آمده است با خط ۱:۱ از طریق آزمون t مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$Predicted = a + (b \times Observed)$$ معادله (۶)

که در آن، b=1: به‌عنوان فرض صفر (H0) و b≠1: به‌عنوان فرض یک (H1) در آزمون t در نظر گرفته شد. همچنین برای ارزیابی عرض از مبدأ دو خط، a=0: به‌عنوان فرض صفر (H0) و a≠0: به‌عنوان فرض یک (H1) مدنظر قرار گرفت. اگر فرض صفر رد نشود به این معنی است که اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده معنی‌دار نیست و فرض یک نیز عکس این موضوع را نشان می‌دهد. صفات مورد مطالعه که به‌عنوان متغیرهای وابسته در مدل مورد بررسی قرار گرفتند، شامل عملکرد ریشه، عملکرد قند، میزان نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن بود. مقدار کارایی مصرف آب (WUE) و کارایی مصرف نیتروژن (NUE) نیز با استفاده از معادلات ۷ و ۸ به‌دست آمد (Koocheki et al., 2014).

$$WUE = \frac{SY}{water}$$ معادله (۷)

$$NUE = \frac{SY}{N_{soil} + N_{fertilizer}}$$ معادله (۸)

که در آن‌ها، SY: عملکرد شکر بر حسب کیلوگرم در هکتار، water: مقدار آب مصرف شده بر حسب مترمکعب در هکتار، N_{soil}: نیتروژن موجود در خاک (۱۳/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و $N_{fertilizer}$: نیتروژن موجود در کود مصرفی بر حسب کیلوگرم در هکتار می‌باشند.

بعد از ارزیابی مدل، حد مطلوب صفات چغندرقند وارد مدل شده و مقادیر بهینه نیتروژن و آب به دو روش بر هم نهادن جواب‌ها (هم‌پوشانی لایه‌ها) و حل عددی برآورد گردید. حد مطلوب صفات مربوط به چغندرقند با توجه به داده‌های آزمایش برای عملکرد چغندرقند، عملکرد قند، میزان نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و نیتروژن در روش بر هم نهادن جواب‌ها به‌ترتیب ۷۵–۱۰۰ تن در هکتار، ۱۴–۱۸ تن در هکتار، ۱۱–۱۴ تن در هکتار، ۱/۸–۲/۵ میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر، ۱/۱–۱/۵ کیلوگرم شکر بر مترمکعب آب و ۷۵–۱۰۰ کیلوگرم شکر بر کیلوگرم نیتروژن و در حل عددی به‌ترتیب ۸۰ تن در هکتار، ۱۵ تن در هکتار، ۱۲/۵ تن در هکتار، ۲ میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر، ۱/۴ کیلوگرم شکر بر مترمکعب آب و ۸۰ کیلوگرم شکر بر کیلوگرم نیتروژن در نظر گرفته شد. در روش هم‌پوشانی لایه‌ها، محدوده‌ای از تیمارها که در تمام لایه‌ها با مقدار تعیین شده برای هر صفت هم‌پوشانی داشت، به‌عنوان محدوده مطلوب تیمارها انتخاب گردید. در نهایت، برای ارزیابی میزان دقت مدل در تعیین مقادیر بهینه متغیرهای مستقل (نیتروژن و آبیاری) در روش حل عددی از شاخص مطلوبیت استفاده شد که مقدار این شاخص هرچقدر به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل می‌باشد. برای انجام طرح مرکب مرکزی و بهینه‌سازی از نرم‌افزار Minitab ver.16 و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel ver. 10 استفاده گردید. لازم به ذکر است نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار Minitab ver.16 ترسیم و تعیین شد.

1- Observed
2- Predicted

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مدل رگرسیونی درجه دو کامل و اجزای آن به‌استثنای اثر متقابل بر اساس آزمون F در سطح احتمال یک درصد برای برآورد تمام متغیرهای وابسته معنی‌دار بود (جدول ۲). با توجه به عدم معنی‌داری آزمون عدم برازش (به‌غیر از متغیر نیتروژن مضره)، تجزیه رگرسیونی در کلیه صفات اختلاف معنی‌داری را با روش تجزیه واریانس نشان نداد که بیانگر قابلیت بالای مدل رگرسیونی در برآورد متغیرهای وابسته و برازش منحنی می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس رگرسیونی برای متغیرهای وابسته گیاه چغندرقند

Table 2- The results of regression variance analysis for the dependent variables in sugar beet

منابع تغییر رگرسیون S.O.V.	درجه آزادی d.f	عملکرد ریشه RY	عملکرد شکر SY	عملکرد شکر سفید WSY	نیتروژن مضره N	کارایی مصرف آب WUE	کارایی مصرف نیتروژن NUE
رگرسیون Regression	5	907**	30.9**	20.6**	0.615**	0.344**	770**
خطی Linear	2	1800**	52.9**	33.7**	0.861**	0.715**	1584**
درجه ۲ Square	2	461**	24.1**	17.7**	0.665**	0.136**	330**
اثر متقابل Interaction	1	15.4ns	0.360ns	0.250ns	0.024ns	0.019ns	22.1ns
اشتباه Error	7	22.9	0.753	0.418	0.056	0.007	15.2
عدم برازش Lack of fit	3	31.0ns	1.23ns	0.587ns	0.124**	0.013ns	20.9ns
اشتباه خالص Pure error	4	16.2	0.398	0.291	0.004	0.003	11.1
R^2	-	96.6	96.7	97.2	88.8	97.1	97.3

RY, SY, WSY, N, WUE, and NUE: به‌ترتیب بیانگر عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید، نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن.

RY, SY,WSY,N, WUE, and NUE: Root Yield; Sugar Yield; White Sugar Yield; α-amino nitrogen; Water Use Efficiency and Nitrogen Use Efficiency, respectively.

ضریب تبیین به‌دست آمده برای متغیرهای عملکرد ریشه، شکر، شکر سفید، کارایی مصرف آب و نیتروژن بالای ۹۶ درصد و برای صفت نیتروژن مضره معادل ۸۸/۸ درصد بود؛ بنابراین، بیش از ۹۶ درصد از تغییرات اکثر صفات مورد مطالعه در گیاه چغندرقند را می‌توان به‌وسیله مدل رگرسیونی توصیف نمود (جدول ۲).

ضرایب رگرسیون مورد استفاده برای برازش روابط بین صفات چغندرقند به‌عنوان متغیرهای وابسته و تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن به‌عنوان متغیرهای مستقل در جدول ۳ مشاهده می‌شود که برای برازش و ترسیم نمودارها از این ضرایب استفاده گردید (جدول ۳). با توجه به اینکه مقادیر محاسبه شده برای شاخص جذر میانگین مربعات خطا در تمام صفات کمتر از ۱۰ درصد و برای شاخص کارایی مدل بالای ۰/۸۹ بود، می‌توان بیان کرد که مدل برآورد مناسب و قابل قبولی برای پیش‌بینی صفات مورد مطالعه در گیاه چغندرقند داشت (جدول ۴). در بین صفات، کارایی مصرف نیتروژن و میزان نیتروژن مضره به‌ترتیب کمترین و بالاترین جذر میانگین مربعات خطا را به خود اختصاص دادند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل مقدار کارایی مصرف نیتروژن را با خطای کمتر و دقت بیشتر و میزان نیتروژن مضره را با دقت کمتری نسبت به سایر صفات چغندرقند شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۴)؛ به‌طوری‌که کارایی مصرف نیتروژن و میزان نیتروژن مضره به‌ترتیب با اختلاف ۳/۹۸± و ۷/۲۲± درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط مدل شبیه‌سازی شدند (جدول ۴).

داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط مدل و مقایسه رگرسیون برازش داده شده بین آن‌ها با خط ۱:۱ در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش

داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تمام صفات شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۵). صفات مورد مطالعه چغندرقند به‌طور کلی، ارزیابی مدل رگرسیونی بر اساس شاخص‌های آماری نشان داد که مدل از توانایی و دقت کافی در پیش‌بینی صفات مورد بررسی گیاه چغندرقند با توجه به تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن برخوردار می‌باشد که با توجه به ضریب تبیین بیش از ۹۶ درصد از تغییرات اکثر صفات مورد مطالعه در گیاه چغندرقند را می‌توان به‌وسیله مدل رگرسیونی توصیف نمود و باقی‌مانده تغییرات که در اکثر صفات کمتر از چهار درصد بود به‌عنوان خطای مدل می‌باشد. از این‌رو در بهینه‌سازی مقدار آب و کود نیتروژن با استفاده از روش سطح- پاسخ و طرح مرکب مرکزی از آن استفاده شد. دقت بالای مدل مورد استفاده در طرح مرکب مرکزی در پیش‌بینی صفات سایر گیاهان زراعی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2014) برای بهینه‌سازی کود نیتروژن، آبیاری و تراکم کاشت در گیاه کلزا از طرح مرکب مرکزی استفاده کردند و دقت بالای مدل را بر اساس شاخص‌های آماری گزارش کردند. منصوری و همکاران (Mansouri et al., 2014) نیز در مطالعه مشابهی بر روی گیاه پیاز گزارش کردند که با استفاده از مدل چندجمله‌ای درجه دوم کامل در طرح مرکب مرکزی می‌توان بیش از ۹۷ درصد از تغییرات صفات مورد بررسی در پیاز را توصیف نمود و به برآورد قابل قبول و معنی‌دار مدل برای پیش‌بینی صفات مربوط به این گیاه اشاره نمودند.

جدول ۳- ضرایب رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو کامل برای متغیرهای وابسته

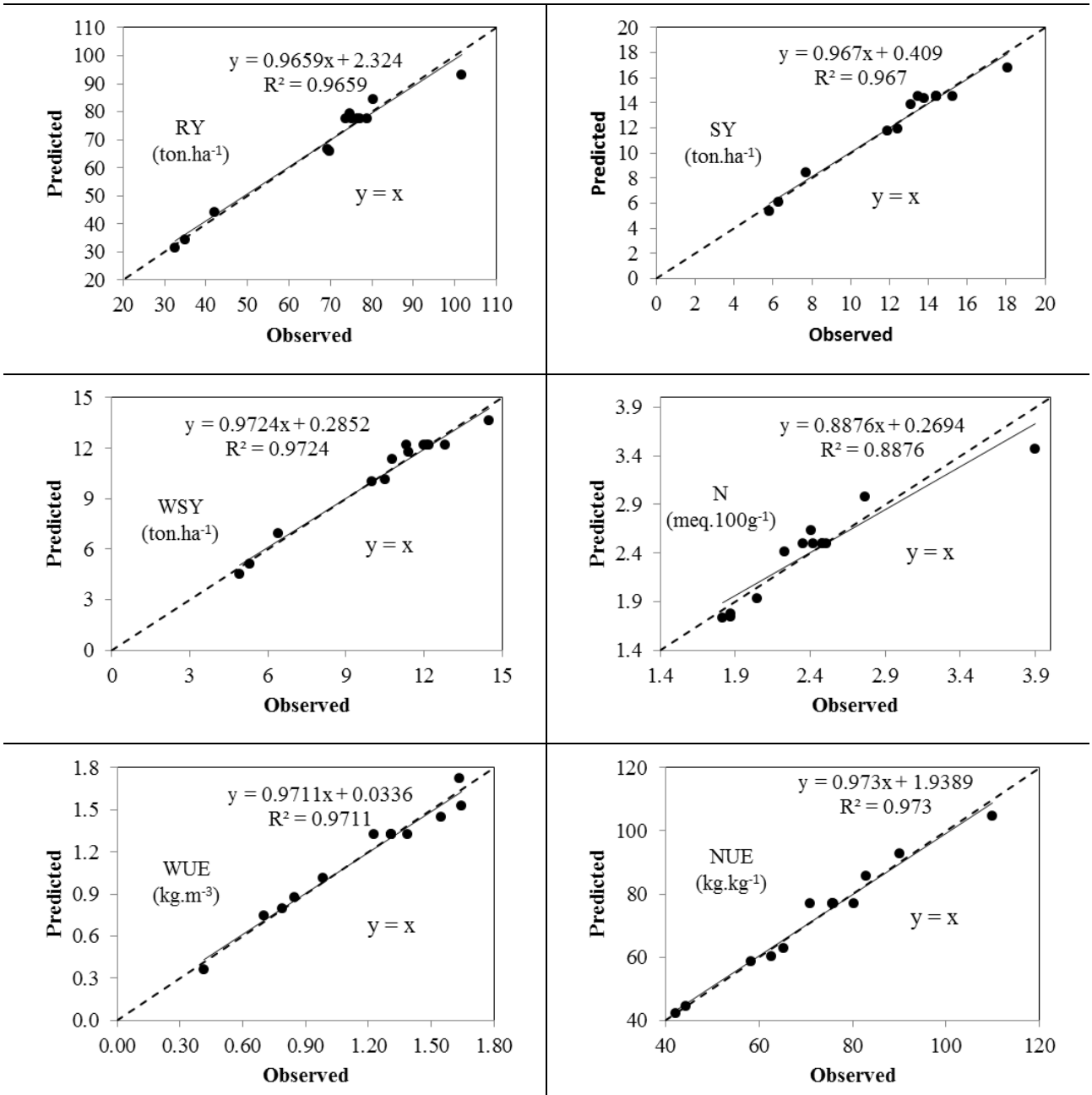
Table 3- Coefficients of polynomial full quadratic regression for dependent variables.

	$(y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2)$					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
عملکرد ریشه Root Yield	77.6	0.442	24.5	-11.3	-8.99	1.96
عملکرد شکر Sugar Yield	14.5	-0.050	4.20	-2.68	-1.93	0.300
عملکرد شکر سفید White Sugar Yield	12.2	-0.050	3.35	-2.09	-1.89	0.250
نیتروژن مضره α-amino nitrogen	2.49	-0.098	0.527	-0.662	0.442	-0.077
کارایی مصرف آب Water Use Efficiency	1.32	-0.287	0.394	-0.161	-0.188	-0.069
کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen Use Efficiency	76.8	-1.25	-22.9	-15.4	4.81	2.35

جدول ٤- مقادیر RMSE و ME برای صفات مورد مطالعه چغندرقند

Table 4- Values of RMSE and ME for studied traits of sugar beet

	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (%)	کارایی مدل ME
عملکرد ریشه Root yield	5.14	0.96
عملکرد شکر Sugar yield	5.13	0.96
عملکرد شکر سفید White sugar yield	4.56	0.97
نیتروژن مضره α-amino nitrogen	7.22	0.89
کارایی مصرف آب Water use efficiency	5.39	0.97
کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency	3.98	0.97



شکل ۱- داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده صفات عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید، نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و نیتروژن و مقایسه خط ۱:۱ (خط ممتد) با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط منقطع)

Fig. 1- Observed and predicted values of RY, SY, WSY, N, WUE and NUE and comparison of the 1:1 line (solid line) against the fitted regression between observed and predicted data (dotted line)

جدول ۵- نتایج تست t برای مقایسه شیب و عرض از مبدأ خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (شبیه‌سازی شده = a + b × مشاهده شده)

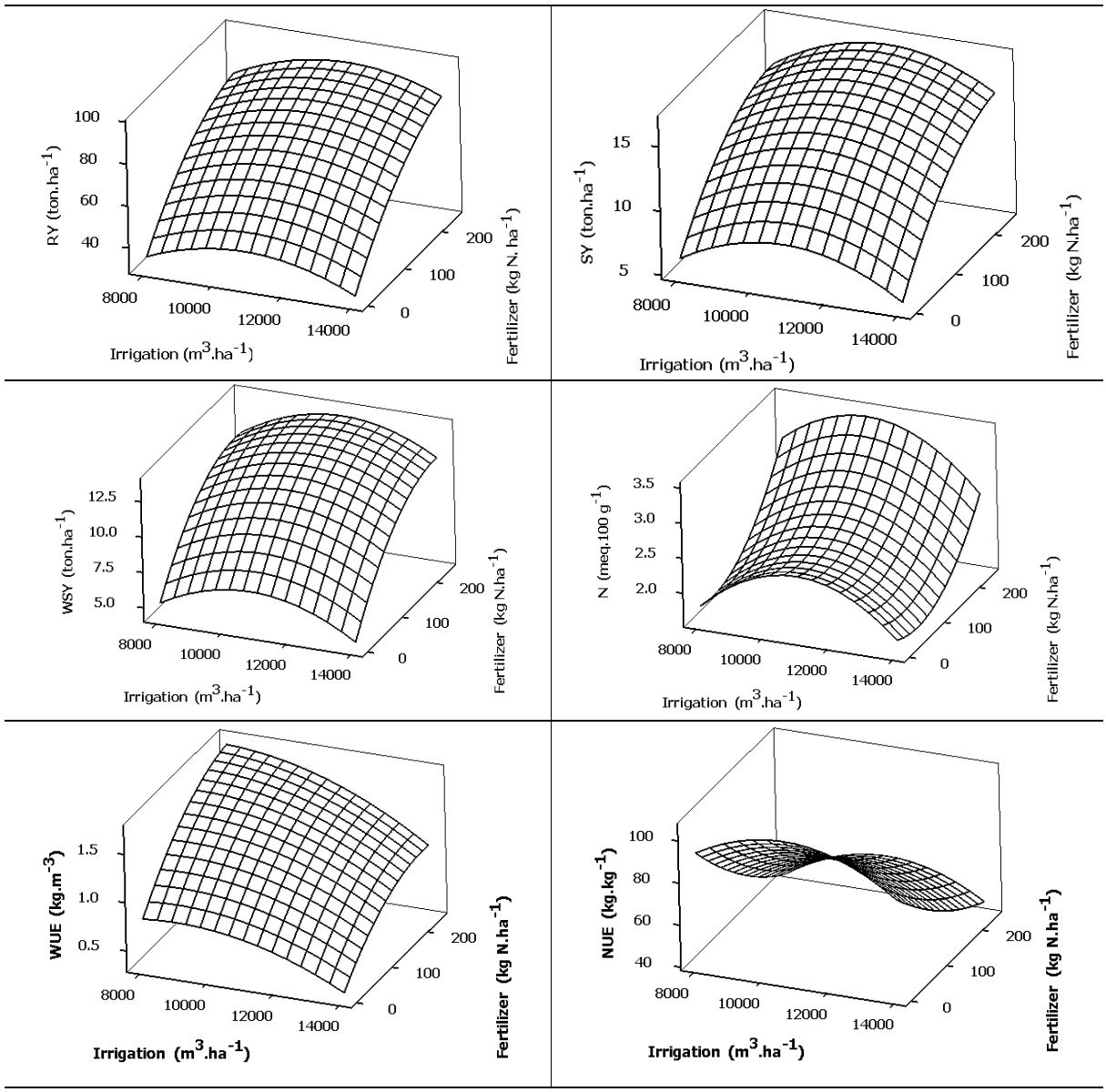
Table 5- Results of the t-test for comparing the slop (b) and intercept (a) of the 1:1 line against the fitted linear regression between observed and predicted data (Predicted = a + b × Observed)

صفت Trait	عرض از مبدأ (a) Intercept (a)		شیب (b) Slope (b)		t		فرض صفر (H0)
	مقدار Value	انحراف معیار SE	مقدار Value	انحراف معیار SE	t_a مقدار t برای عرض از مبدأ	t_b مقدار t برای شیب	(a=0), (b=1)
عملکرد ریشه Root yield	2.32	3.87	0.966	0.055	0.602	0.625	قبول Accepted
عملکرد شکر Sugar yield	0.409	0.693	0.967	0.054	0.600	0.624	قبول Accepted
عملکرد شکر سفید White sugar yield	0.285	0.592	0.972	0.049	0.547	0.563	قبول Accepted
نیتروژن مضره α-amino nitrogen	0.269	0.234	0.887	0.095	1.15	1.17	قبول Accepted
کارایی مصرف آب Water use efficiency	0.034	0.061	0.971	0.050	0.570	0.638	قبول Accepted
کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency	1.94	3.61	0.973	0.049	0.535	0.550	قبول Accepted

SE: Standard Error.

واکنش صفات مختلف چغندرقند تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کود نیتروژن در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج برازش مدل رگرسیونی نشان داد که منحنی سطح پاسخ عملکرد ریشه، عملکرد شکر و عملکرد شکر سفید به سطوح مختلف متغیرهای مستقل آب و نیتروژن مشابه بود (شکل ۲). نتایج نشان داد که در کلیه سطوح آبیاری با افزایش سطوح کود نیتروژن عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید افزایش یافت. در صورتی که با افزایش آبیاری، در تمامی سطوح کود نیتروژن مقدار عملکرد ابتدا افزایش یافته و سپس روند کاهشی داشت و حالت زنگوله‌ای در نمودار سطح پاسخ مشاهده شد؛ با این وجود روند افزایشی و کاهشی عملکرد ریشه نسبت به عملکرد شکر و شکر سفید کمتر بود. به نظر می‌رسد در سطوح بالای آبیاری به‌دلیل تغییر نسبت اندام هوایی به ریشه و تخصیص مواد فتوسنتزی بیشتر به اندام هوایی و برگ‌ها، عملکرد ریشه کاهش پیدا می‌کند، به‌عبارتی تخصیص مواد فتوسنتزی بیشتر به برگ‌ها اختصاص پیدا می‌کند تا اینکه به ریشه انتقال یابد و در نتیجه، رشد رویشی برگ‌ها بیشتر شده و کاهش عملکرد ریشه اتفاق می‌افتد. هوساین و موهونا (Hossain & Mohona, 2018) نیز به تغییر نسبت اندام هوایی به ریشه در اثر افزایش مقدار آبیاری اشاره کردند و بیان داشتند که افزایش رژیم آبیاری منجر به افزایش رشد رویشی اندام هوایی شده و کاهش مقدار ریشه را به‌دنبال دارد.

به‌طوری‌که در مقادیر بالای مصرف کود نیتروژن با افزایش مصرف آب، روند افزایش و کاهش عملکرد ریشه با شیب خیلی ملایم و کند همراه بود. منحنی سطح پاسخ میزان نیتروژن مضره تحت تأثیر آبیاری و نیتروژن نشان داد که در کلیه سطوح تیمار آبیاری، با افزایش مقدار مصرف کود نیتروژن (از حدود ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) میزان نیتروژن مضره ریشه چغندرقند نیز افزایش یافت. محمدیان (Mohammadian, 2016) نیز در مطالعه خود افزایش میزان نیتروژن مضره در ریشه چغندرقند با افزایش میزان مصرف کود نیتروژن را گزارش نمود. همچنین با توجه به منحنی در تمام سطوح کودی، میزان نیتروژن موجود در ریشه در کمترین و بیشترین مقدار آبیاری، در حداقل میزان خود قرار داشت.



شکل ۲- سطح پاسخ صفات عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید، نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و نیتروژن چغندرقند تحت تأثیر متغیرهای مستقل کود نیتروژن و آبیاری

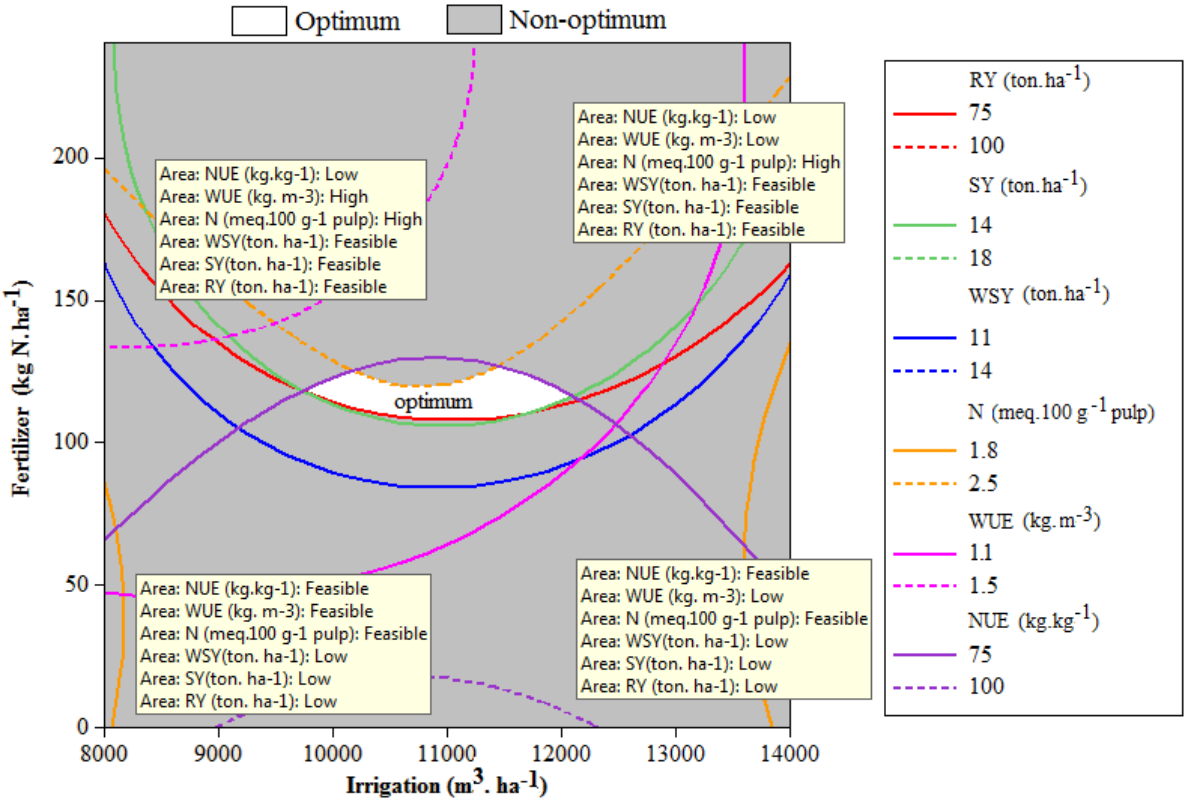
Fig. 2- Response- surface of sugar beet traits included RY, SY, WSY, N, WUE and NUE affected as independent variables of nitrogen fertilizer and irrigation

زیرا آبیاری زیاد منجر به آب‌شویی نیتروژن و غیر قابل دسترس کردن این عنصر برای گیاه می‌شود و آبیاری کم و خشکی سطح خاک نیز معدنی شدن نیترات را کاهش می‌دهد؛ بنابراین جذب نیتروژن توسط گیاه در هر دو شرایط (کمترین و بیشترین مقدار آبیاری) کاهش می‌یابد (Mohammadian et al., 2010; Hills et al., 1990)، با توجه به اینکه اثرات متقابل پیچیده‌ای بین میزان آب آبیاری و میزان کود نیتروژن وجود دارد؛ بنابراین، تعیین بهینه مصرف منابع نیتروژن و آب و در نظر گرفتن ترکیب بهینه تیماری آن‌ها ضروری می‌باشد.

در کلیه سطوح نیتروژن با افزایش آب مصرفی، کارایی مصرف

آب کاهش نشان داد. همچنین برهم‌کنش کود نیتروژن و آبیاری بر میزان کارایی مصرف آب نشان داد که افزایش کود نیتروژن در تمامی سطوح آبیاری منجر به بهبود کارایی مصرف آب می‌گردد. به‌طوری‌که کمترین مقدار کارایی مصرف آب در کاربرد کمترین مقدار کود نیتروژن و بیشترین سطح آبیاری مشاهده شد و بیشترین کارایی مصرف آب نیز در بالاترین مقدار نیتروژن و پایین ترین مقدار آبیاری به‌دست آمد (شکل ۲). حسین‌پور (Hosseinpour, 2008)، توپاک و همکارن (Topak et al., 2011) و مارسی و همکاران (Masri et al., 2015) نیز در پژوهش‌های خود بر روی گیاه چغندرقند به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان مصرف آب آبیاری از ۵۰ درصد تا ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه، کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. زیرا به همان نسبتی که مقدار آب افزایش پیدا می‌کند به همان نسبت عملکرد افزایش پیدا نمی‌کند و با توجه به اینکه عملکرد در صورت و مقدار آب در مخرج کسر قرار دارد، در نتیجه با افزایش مقدار آبیاری، کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد.

منحنی پاسخ کارایی مصرف نیتروژن تحت تأثیر اثر متقابل آبیاری × کود نیتروژن نیز نشان داد که با افزایش مقدار مصرف کود نیتروژن در تمامی سطوح آبیاری میزان کارایی مصرف نیتروژن کاهش می‌یابد؛ با این وجود میزان کاهش کارایی مصرف نیتروژن در مقایر متوسط مصرف آب (۱۱۰۰۰ – ۱۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار) نسبت به سطوح پایین و بالای مصرف آب کمتر بود (شکل ۲). این نتایج با گزارش‌های سایر مطالعات (Noshad et al., 2012; Mohammadian, 2016; Laufer et al., 2016) مبنی بر کاهش میزان کارایی مصرف نیتروژن با افزایش مصرف کود در گیاه چغندرقند مطابقت دارد.



شکل ۳- نقشه هم‌پوشانی لایه‌ها برای حد مطلوب متغیرهای وابسته چغندرقند شامل صفات عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید، نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و نیتروژن

Fig. 3- Overlapped plot of layers for optimum level of dependent variables of sugar beet included RY, SY, WSY, N, WUE, and NUE

دامنه بهینه متغیرهای مستقل آب و کود نیتروژن برای به‌دست آوردن حد مطلوب متغیرهای وابسته با استفاده از روش بر هم نهادن جواب‌ها و هم‌پوشانی لایه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در این روش حد مطلوب صفات با توجه به داده‌های آزمایش برابر با ۷۵–۱۰۰ تن در هکتار برای عملکرد ریشه چغندرقند، ۱۴–۱۸ تن در هکتار برای عملکرد شکر، ۱۱–۱۴ تن در هکتار برای عملکرد شکر سفید، ۱/۸–۲/۵ میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر برای میزان نیتروژن مضره ریشه، ۱/۱–۱/۵ کیلوگرم شکر بر مترمکعب آب برای کارایی مصرف آب و ۷۵–۱۰۰ کیلوگرم شکر بر کیلوگرم نیتروژن برای کارایی مصرف نیتروژن در نظر گرفته شد و بر این اساس دامنه بهینه تیمارها بعد از لایه‌گذاری جواب‌ها و هم‌پوشانی بین لایه‌ها، به‌ترتیب مصرف ۹۵۰۰ تا ۱۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار برای تیمار آبیاری و کاربرد ۱۱۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار برای تیمار کود نیتروژن به‌دست آمد (شکل ۳). مقادیر مصرف بالاتر و کمتر از دامنه بهینه مصرف تیمارها منجر به فاصله گرفتن یک یا چند متغیر وابسته از حد مطلوب می‌شود؛ به‌طوری‌که در سطوح پایین آبیاری و کود نیتروژن (پایین – چپ نمودار) وضعیت سه متغیر نیتروژن مضره، کارایی مصرف نیتروژن و آب در حد مطلوب، ولی سه متغیر عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید پایین‌تر از حد مطلوب برآورد شد. کاربرد مقدار کود نیتروژن بیشتر از دامنه بهینه در سطوح کم آبیاری (بالا – چپ نمودار) منجر به تولید عملکرد ریشه، شکر و عملکرد شکر سفید در حد مطلوب شد، ولی میزان نیتروژن مضره بالاتر از حد مطلوب و کارایی مصرف نیتروژن پایین‌تر از حد مطلوب قرار گرفت. افزایش مقدار آب آبیاری بیش از حد بهینه در سطوح پایین کاربرد کود نیتروژن (پایین – راست نمودار)، کاهش عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید و کارایی مصرف آب را به‌همراه داشت، در صورتی که میزان نیتروژن مضره و کارایی مصرف نیتروژن در حد مطلوب بود. در سطوح بالای مصرف آب و کود نیتروژن (بالا – راست نمودار) نیز با وجود اینکه برای متغیرهای عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید حد مطلوب این صفات به‌دست آمد، ولی میزان نیتروژن مضره بیش از حد مطلوب و میزان کارایی مصرف آب و نیتروژن کمتر از حد مطلوب برآورد شد (شکل ۳).

جدول ٦. مقادیر هدف و شبیه‌سازی شده متغیرهای وابسته و مقدار بهینه متغیرهای مستقل در گیاه چغندرقند.

Table 6. Target and simulated values of dependent variables along with optimum values of independent variables in sugar beet.

		هدف Target	شبیه‌سازی شده Simulated	مقدار بهینه Optimum
متغیر وابسته (y) Dependent variable	عملکرد ریشه Root Yield (.ha^{-1})	80	80.1	-
	عملکرد شکر Sugar yield (t.ha^{-1})	15	14.94	-
	عملکرد شکر سفید White sugar yield (t.ha^{-1})	12.5	12.49	-
	نیتروژن مضره α-amino nitrogen (meq.100 g^{-1})	2	2.56	-
	کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg.m^{-3})	1.4	1.39	-
	کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency (kg.kg^{-1})	80	74.24	-
متغیر مستقل (x) Independent variable	آبیاری Irrigation (m^3.ha^{-1})	-	-	10667
	کود نیتروژن N fertilizer (kg N.ha^{-1})	-	-	133
شاخص مطلوبیت (DI)			0.833	

نتایج بهینه‌سازی تیمارها با استفاده از روش حل عددی نیز در جدول ۶ نشان داده شده است که در این روش کاربرد ۱۳۳ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار به‌همراه ۱۰۶۶۷ مترمکعب آب به‌عنوان مقادیر بهینه تیمارها پیشنهاد شد. بر اساس مقادیر بهینه پیشنهادی توسط مدل، میزان عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید، میزان نیتروژن مضره، کارایی مصرف آب و نیتروژن به‌ترتیب معادل ۸۰/۱ تن در هکتار، ۱۴/۹۴ تن در هکتار، ۱۲/۴۹ تن در هکتار، ۲/۵۶ میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم، ۱/۳۹ کیلوگرم شکر بر مترمکعب آب و ۷۴/۲۴ کیلوگرم شکر بر کیلوگرم نیتروژن برآورد شد (جدول ۶). شاخص مطلوبیت بیانگر میزان دقت مدل در تعیین ترکیب تیمارهای مورد بررسی برای دستیابی به عملکرد هدف می‌باشد که مقدار این شاخص هر چقدر به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهای وابسته تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد. مقدار شاخص مطلوبیت در روش حل عددی برای تعیین مقدار بهینه تیمارها برابر با ۰/۸۳۳ به‌دست آمد که بیانگر دقت قابل قبول و مناسب مدل در برآورد مقدار بهینه تیمارها بود (جدول ۶).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج ارزیابی مدل سطح- پاسخ نشان داد که روش سطح- پاسخ و طرح مرکب مرکزی از دقت و توانایی کافی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی صفات چغندرقند تحت تأثیر تیمارهای کود نیتروژن و آب برخوردار بود. بر اساس نتایج مدل و با درنظر گرفتن مقادیر هدف برای متغیرهای وابسته (صفات)، مصرف ۱۳۳ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار و ۱۰۶۶۷ مترمکعب آب در هکتار به‌عنوان تیمارهای بهینه توسط مدل پیشنهاد شد. مقدار مصرف کود نیتروژن با استفاده از طرح آماری فاکتوریل که در منابع مورد استفاده در همدان گزارش شد، معادل مصرف ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار با حجم آب ۱۲۹۳۰ مترمکعب در هکتار بود. نتایج نشان داد که مقادیر بهینه تیمارها در روش سطح- پاسخ کمتر (حدود ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن و تقریباً ۲۰۰۰ مترمکعب آب در هکتار) از مقادیر به‌دست آمده در منابع پیشنهاد گردید. همچنین بر اساس روش ارائه شده برای تعیین نیاز کود نیتروژن چغندرقند که بر اساس نیتروژن قابل دسترس خاک توصیه می‌شود، مقدار کود نیتروژن برای به‌دست آوردن ۸۰ تن ریشه در هکتار برابر با ۱۸۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آمد. لازم به ذکر است میزان نیتروژن قابل دسترس خاک برابر با ۱۳/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که مقدار بهینه توصیه شده در روش سطح- پاسخ نسبت به دو روش دیگر پایین می‌باشد؛ بنابراین تعیین مصرف بهینه تیمارها با استفاده از این روش علاوه‌بر کاهش هزینه تولید، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از حد منابع را نیز به‌همراه خواهد داشت. علاوه‌براین، مقدار بهینه تیمارها در روش سطح- پاسخ با در نظر گرفتن تمام صفات مورد مطالعه توصیه گردید، در حالی‌که در سایر روش‌ها این امکان برای توصیه مقادیر بهینه تیمارها وجود ندارد. به عبارتی، در طرح فاکتوریل بسته به صفت مورد نظر، تیمار پیشنهادی متفاوت خواهد بود. در روش تعیین کود نیتروژن بر اساس نیتروژن قابل دسترس خاک نیز تنها عملکرد ریشه در هکتار ملاک تعیین کود نیتروژن قرار می‌گیرد.

سپاسگزاری

بودجه این طرح از پروژه مصوب به شماره ۹۷۰۰۳۴-۰۰۱-۰۲-۶۳-۲ معاونت پژوهش و فناوری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تأمین شده است که بدینوسیله سپاسگزاری می‌شود.

References

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 coal cleaning. Fuel 86: 769–776.

Bannayan, M., Mansoori, H., and Eyshi Rezaei, E., 2014. Estimating climate change, CO_2 and technology development effects on wheat yield in northeast Iran. International Journal of Biometeorology 58: 395-405.

Box, G.E.P., and Hunter, J.S., 1957. Multi-factor experimental design for exploring response surfaces. Annals of Mathematical Statistics 28:195–241.

Box, G.E.P., and Wilson, K.B., 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 13: 1–45.

Hills, F.J., Winter, S.R., and Henderson, D.W., 1990. Sugar beet. In: Stewart, B.A., Nielsen, D.R., (Eds.). Irrigation of Agricultural Crops. pp. 795-810, Madison, Wisconsin, USA.

Hossain, M., and Mohona, M.J., 2018. Shoot-root traits of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.) as influenced by different irrigation schedules. International Journal of Horticultural Science and Technology 5(1): 11-18.

Hosseinpour, M., 2008. Water and radiation use efficiency of winter sugar beet affected by nitrogen, irrigation, and growth duration management. Final Report of Sugar Beet Seed Institute. Karaj, Iran. (In Persian with English Summary)

Jahan, M., Nassiri Mahallati, M., Khalilzade, H., Bigonah, R., and Razavi, A.R., 2016. Optimizing of nitrogen, phosphorus and cattle manure fertilizers application in winter wheat production using response-surface methodology (RSM). Iranian Journal of Field Crops Research 13(4): 823-839. (In Persian with English Summary)

Jahedi, A., Nourozi, A., Hassani, M., and Hamdi, F., 2012. Effect of irrigation methods and nitrogen application on sugar beet yield and quality. Sugar Beet 28(1): 43-53. (In Persian with English Summary)

Kalavathy, H.M., Regupathib, I., Pillai, M.G., and Miranda, L.R., 2009. Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H_3PO_4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 70: 35–45.

Koocheki, A., Nassiri, M., Moradi, R., and Mansouri, H., 2014. Optimizing water, nitrogen, and crop density in canola cultivation using response surface methodology and central composite design. Soil Science and Plant Nutrition 1: 1-13.

Kwak, J.S., 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45: 327–34.

Laufer, D., Nielsen, O., Wilting, P., Koch, H.J., and Märländer, B. 2016. Yield and nitrogen use efficiency of fodder and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in contrasting environments of Northwestern Europe. European Journal of Agronomy. 73: 124-132.

Mansouri, H., Bannayan, M., Rezvani Moghaddam, P., and Lakzian, A., 2014. Management of nitrogen fertilizer, irrigation, and plant density in onion production using response surface methodology as optimization approach. African Journal of Agricultural Research 9(7): 676-687.

Mansouri, H., Bannayan, M., Rezvani Moghaddam, P., and Lakzian, A., 2015. Management of nitrogen, irrigation, and planting density in Persian shallot (*Allium hirtifolium*) by using central composite optimizing method. Agricultural Science and Sustainable Production 24(4): 41-60.

Masri, M.I., Ramadan, B.S.B., El-Shafai, A.M.A., and El-Kady, M.S., 2015. Effect of water stress and fertilization on yield and quality of sugar beet under drip and sprinkler irrigation systems in sandy soil. International Journal of Agriculture Sciences 5(3): 414-425.

Mirzaei, M.R., and Ghadami, A., 2005. Evaluation of quantity and quality of sugar beet under furrow and tape irrigation systems. Final Report of Sugar Beet Seed Institute. Karaj, Iran. (In Persian with English Summary)

Mohammadian, R., 2016. Determination of the best plant population and nitrogen amount of sugar beet under tape drip irrigation system. Final Report of Sugar Beet Seed Institute. Karaj, Iran. (In Persian with English Summary)

Mohammadian, R., Taleghani, D., and Sadeghzadeh, S., 2010. Effect of different irrigation managements on quantity and quality of sugar beet. Sugar Beet 26(2): 139-156.

Montgomery, D.C., 2001. Design and Analysis of Experiments, fifth ed., John Wiley & Sons, New York. 734 p.

Nassiri, M., Koocheki, A., Kamali, G.A., and Shahandeh, H., 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. Archives of Agronomy and Soil Science 52: 113-124.

Noshad, H., Abdollahian-Noghabi, M., and Babaei, B., 2012. Effect of Nitrogen and Phosphorous Application on the Efficiency of Nitrogen Uptake and Consumption in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). Iranian Journal of Crop Sciences 43(3): 529-539. (In Persian with English Summary)

Obeng, D.P., Morrell, S., and Napier, T.J.N., 2005. Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone. International Journal of Mineral Processing 769: 181–92.

Topak, R., Süheri, S., and Acar, B., 2011. Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality, and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey. Irrigation Science 29(1): 79-89.

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.

Zulkali, M.M.D., Ahmad, A.L., and Norulakmal, N.H., 2006. Oryza sativa L husk as heavy metal adsorbent: optimization with lead as model solution. Bioresource Technology 97: 21-25.

Journal of Agroecology
Vol. 13, No.1, Spring 2021, p. 57-72

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص ۷۲-۵۷

Optimization of Nitrogen Fertilizer and Water Consumption in Sugar Beet by using Response–Surface Method

H. Mansouri[1]*, H. Noshad[2] and M. Hassani[1]
Submitted: 17-03-2019
Accepted: 11-11-2019

Mansouri, H., Noshad H., and Hassani, M., 2021. Optimization of nitrogen fertilizer and water consumption in sugar beet by using response–surface method. Journal of Agroecology 13(1):57-72.

Introduction

With respect to this issue that Iran is located in semi-arid conditions and limited by water resources, so water conservation in agricultural systems plays main role to increase production and determination of water optimum amount is first step to gain this purpose. Nitrogen is one of the main effective factors on quantity and quality of crops. According to the studies, only 40-60% of nitrogen fertilizers is used by crops and this value decreases with increasing of fertilizer application. There is complicated interaction between amount of irrigation water and nitrogen fertilizer, thus it is necessary to consider optimum level of them simultaneously. To obtain acceptable economical yield and reducing environmental pollutions, used inputs in farms should be applied as optimum with respect to expected target. One of the important methods to gain optimum level of inputs is response-surface method. There is no study to investigate usage of this method for inputs optimization in sugar beet. Therefore, the purpose of the study was optimizing of nitrogen fertilizer and irrigation in sugar beet via the response-surface method by using a central composite design.

Material and Methods

We used available data and information from studies which had been accomplished about nitrogen fertilizer and irrigation in Hamedan, Iran to determine optimum levels of these treatments. So needed treatments were designed based on high and low levels of nitrogen fertilizer (0 and 240 $kg.ha^{-1}$) and irrigation (8000 and 14000 $m^3.ha^{-1}$) by Minitab software ver.16 as central composite design (CCD). CCD is one of the response-surface methods and the number of treatments in this design is calculated by equation of $2^k + 2k + r$, where k is the studied factors and r is number of replication for central point. Number of replication for central point under two factors has been reported as 5, thus for central composite design with two factors, 13 treatments is needed. To fit data, regression equation was used and evaluated based on regression variance analysis. In general, the full quadratic polynomial equation was tested to determine the significance of the model and the components of the model. RMSE, ME, R^2 indexes, and 1:1 line were used to judge the difference between simulated and observed data.

Results and Discussion

ANOVA results showed that regression model was significant to estimate all dependent variables based on F test. Correlation coefficient of dependent variables including root yield, sugar, and sugar white, water use efficiency and nitrogen use efficiency determined as higher than 96%. It implies that the high proportion of the variability for these traits was explained by the fitted regression model. According to the lower values of RMSE than 10 and higher values of ME than 0.89, it could be concluded that the model had acceptable and suitable results to estimate studied traits in sugar beet. The results of t-test to compare fitted regression with line 1:1 illustrated that slope and intercept values in fitted and 1:1 line had no significant difference. The results showed that root, sugar and white sugar yield were increased by increasing nitrogen fertilizer under all levels of irrigation. Response-surface curve of α-amino

1- Assistant Professor, Sugar Beet Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran.
2- Assistant Professor, Sugar Beet Seed Institute, AREEO, Karaj, Iran.
(*- Corresponding Author Email: h.mansori@areeo.ac.ir)
Doi:10.22067/jag.v13i1.79767

nitrogen as affected by irrigation and nitrogen fertilizer indicated that α-amino was elevated by increasing nitrogen fertilizer application. As data, water use efficiency decreased by water consumption. In the other hand, nitrogen use efficiency was decreased by applying nitrogen fertilizer under all levels of irrigation. Optimum range of treatments were obtained as 9500-12000 $m^3.ha^{-1}$ for irrigation and 110-130 $kg.ha^{-1}$ for nitrogen fertilizer treatment based on overlaid plot method. The results of treatments optimization by using analytical solution method illustrated that applying 133 $kg.ha^{-1}$ and 10667 $m^3.ha^{-1}$ were suggested as optimum amounts of treatments. Based on these optimum levels of treatments, root yield, sugar and white sugar yield, α-amino, water use efficiency and nitrogen use efficiency were estimated as 80.1 $t.ha^{-1}$, 14.94 $t.ha^{-1}$, 12.49 $t.ha^{-1}$, 2.56 $meq.100\ g^{-1}$, 1.39 kg $sugar.m^{-3}$ and 74.24 kg $sugar.\ kg^{-1}$, respectively.

Conclusion

As result, to optimize treatments including nitrogen fertilizer and irrigation, response-surface method had acceptable adequate to predict variables in sugar beet based on statistical indexes. Optimum value of nitrogen fertilizer and irrigation were predicted as 133 $kg.ha^{-1}$ and 10667 $m^3.ha^{-1}$, respectively by using analytical solution. Therefore, the results indicate that the application of optimum values can reduce environmental hazards and produced acceptable sugar yield.

Keywords: Central Composite Design, Optimum Treatment, Sugar Yield, Water Use Efficiency, Nitrogen Use Efficiency