Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 17, No. 1, 2025, p. 165-179

The Effect of Nitrogen and Sulfur Fertilization in Combination with *Pseudomonas aeruginosa* and Seaweed on Agricultural Traits and Seed Yield of Rapeseed (*Brassica napus* L.) in Fields after Rice (*Oryza sativa* L.) Harvest

Seyyed Mohammad Akhgar[1], Naser Mohammadian Roshan[2*], Hamid Reza Doroudian[2], Majid Ashouri[3] and Seyyed Mostafa Sadeghi[3]

1- PhD student of Agronomy, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan,Iran
3- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
(*- Corresponding author's Email: Nmroshan71@yahoo.com)

Received: 06-12-2024
Revised: 06-02-2025
Accepted: 15-02-2025
Available Online: 21-05-2025

How to cite this article:
Akhgar, S.M., Mohammadian Roshan, N., Doroudian, H.R., Ashouri, M., & Sadeghi, S.M. (2025). The effect of nitrogen and sulfur fertilization in combination with *Pseudomonas aeruginosa* and Seaweed on agricultural traits and seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) in fields after rice (*Oryza sativa* L.) harvest. *Journal of Agroecology*, *17*(1), 165-179. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22067/agry.2025.91118.1225

Introduction

Rapeseed (*Brassica napus* L.) is one of the most important oilseed crops globally, ranking third in oil production after soybean and oil palm. The seeds contain over 40% oil, with rapeseed oil being the only edible oil that includes sulfur-containing fatty acids. Nitrogen is one of the most important nutritional elements and a key factor in achieving optimal yield in rapeseed. The bacterium Pseudomonas aeruginosa is used as a plant growth promoter in agriculture. This bacterium helps increase nitrogen uptake and improve root growth in plants. This study aims to assess the combined effects of nitrogen and sulfur fertilizers and a growth regulator on rapeseed performance in a rice-paddy rotation system.

Materials and Methods

A split-factorial experiment was carried out to investigate the effects of nitrogen and sulfur fertilizers, as well as a growth regulator (a blend of Pseudomonas aeruginosa and seaweed), on the yield and quality of rapeseed (Hyola 401 variety) in the second crop following rice cultivation in Gilan Province. The study was designed in a completely randomized block design with three replications over two crop years (2021-2022 and 2022-2023) at a farm located in Bazkiagurab, Lahijan City. The main experimental factors included: (1) the application (or non-application) of a growth regulator at a concentration of 5 $mg.L^{-1}$, and (2) nitrogen fertilization at four levels (0, 90, 180, and 270

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/agry.2025.91118.1225

kg.ha^{-1}) using urea (46% N) and sulfur fertilization at three levels (0, 35, and 70 kg.ha^{-1}) using ammonium sulfate (24% S, 12% N).

Results and Discussion

The results revealed that the highest seed yield (4081 kg.ha^{-1}) and oil yield (1135 kg.ha^{-1}) were obtained from the treatment involving the growth regulator, 270 kg.ha^{-1} of nitrogen, and 70 kg.ha^{-1} of sulfur. Conversely, the lowest seed yield (1085 kg.ha^{-1}) and oil yield (368 kg.ha^{-1}) were recorded when the growth regulator was applied without nitrogen, and with 70 kg.ha^{-1} of sulfur fertilizer. The application of nitrogen fertilizer improved soil microbial activity, enhanced the availability of growth hormones and stimulants, and increased nutrient uptake, all of which contributed to higher photosynthesis and improved plant dry matter. These factors played a significant role in boosting seed yield

The treatment involving 270 kg of nitrogen and 70 kg of sulfur fertilizer resulted in the highest plant height (171.3 cm). In contrast, the lowest plant height (137.3 cm) was observed in the treatment that did not include a growth regulator, nitrogen fertilizer, and only 35 kg.ha^{-1} of sulfur fertilizer. Additionally, the growth regulator and the nitrogen and sulfur fertilization treatments significantly affected the duration of flowering, vegetative growth, and seed filling ($p \leq 0.01$). The longest durations for flowering (31 days), vegetative growth (207 days), and seed filling (82 days) were recorded in the treatment combining 270 kg.ha^{-1} of nitrogen, 70 kg.ha^{-1} of sulfur, and the growth regulator.

Conclusion

The findings suggest that plant height is strongly influenced by both the number of nodes and the length of internodes, with a significant relationship observed between plant height and the application of nitrogen and sulfur fertilizers. A positive and significant correlation was found between plant height and seed yield, highlighting the importance of plant height in determining seed production. The highest seed yield (4081 kg.ha^{-1}) was achieved when nitrogen and sulfur fertilizers were applied along with the growth regulator. Overall, the interactions between nitrogen and sulfur fertilizers were found to impact grain yield and its components significantly. Future research exploring these interactions, particularly in combination with microbial agents, could provide valuable insights for optimizing rapeseed cultivation and better addressing the nutritional needs of plants.

Keywords: Bacteria, Flowering period, Growth regulator, Oil percentage

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤، ص ۱۷۹-۱٦۵

تأثیر نیتروژن و گوگرد در حضور ترکیب *سودوموناس آئروژینوزا* - جلبک دریایی (*Pseudomonas aeruginosa*) بر صفات زراعی و عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L.) در اراضی پس از برداشت برنج (*Oryza sativa* L.)

سید محمد اخگر[۱]، ناصر محمدیان روشن[۲*]، حمیدرضا دورودیان[۲]، مجید عاشوری[۳] و سید مصطفی صادقی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

چکیده

این مطالعه به‌منظور بررسی اثرات کودهای شیمیایی نیتروژنی و گوگردی و تنظیم‌کننده رشد (ترکیب فرموله‌شده باکتری *سودوموناس آئروژینوزا* و جلبک دریایی) بر صفات کمّی و کیفی کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) در کشت دوم شالیزارهای استان گیلان انجام شد. آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در مزرعه‌ای واقع در بازکیاگوراب شهرستان لاهیجان اجرا گردید. در این تحقیق، عامل‌های آزمایشی شامل عدم مصرف و مصرف پنج میلی‌گرم در لیتر تنظیم‌کننده رشد به‌عنوان عامل اصلی و چهار سطح کود نیتروژن خالص شامل صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار (از منبع اوره) و سه سطح کود شیمیایی گوگرد خالص (صفر، ۳۵ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع سولفات آمونیوم (گوگرد ۲۴ درصد و نیتروژن ۱۲ درصد) به‌عنوان عامل فرعی بودند. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه و روغن به‌ترتیب به‌میزان ۴۰۸۱ و ۱۱۳۵ کیلوگرم در هکتار در تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد، کاربرد ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنی و ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی مشاهده گردید. در مقابل، کمترین عملکرد دانه و روغن به‌ترتیب به‌میزان ۱۰۸۵ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار در تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد بدون نیتروژن و مصرف ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی به دست آمد. همچنین، طول دوره گل‌دهی، رشد و پرشدن دانه تحت تأثیر تنظیم‌کننده رشد و کودهای شیمیایی نیتروژنه و گوگردی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین طول دوره گل‌دهی (۳۱ روز)، رشد (۲۰۷ روز) و پرشدن دانه (۸۲ روز) مربوط به تیمار مصرف ۲۷۰ کیلوگرم نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم گوگردی همراه با تنظیم‌کننده رشد بود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده همزمان از تنظیم‌کننده‌های رشد و کودهای نیتروژنی و گوگردی در بهبود عملکرد و کیفیت محصول کلزا در اراضی پس از برداشت برنج است.

واژه‌های کلیدی: باکتری، تنظیم‌کننده رشد، درصد روغن، دوره گل‌دهی

مقدمه

کلزا (*Brassica napus L.*) از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در دنیا و پس از سویا و نخل روغنی، به‌عنوان سومین منبع تولید روغن شناخته می‌شود. دانه‌های این گیاه حاوی بیش از ۴۰ درصد روغن بوده که اغلب از اسیدهای چرب غیراشباع تشکیل شده‌اند (Seyedi

۱- دانشجوی دکترا، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
۲- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
۳- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

(*- نویسنده مسئول: (Email: Nmroshan71@yahoo.com
https://doi.org/10.22067/agry.2025.91118.1225

Das et al., 2020;& Hamzei, 2021). روغن کلزا به‌عنوان تنها روغن خوراکی حاوی اسیدهای چرب گوگرددار شناخته می‌شود که ویژگی‌های تغذیه‌ای برجسته‌ای را به این محصول می‌بخشد (Ohara et al., 2009). درصد بالای روغن و قابلیت رشد و توسعه گیاه در شرایط مختلف جغرافیایی، از جمله در ایران باعث می‌شود که کلزا به‌عنوان یک منبع امیدبخش برای تأمین نیازهای روغن کشور مورد توجه قرار گیرد. در کنار ارزش غذایی بالا، روغن کلزا مشابه آفتابگردان (*Helianthus annuus*)، سویا (*Glycine max*) و ذرت (*Zea mays*)، به‌دلیل داشتن اسیدهای چرب اشباع نشده و عدم وجود کلسترول، از نظر تغذیه‌ای بسیار ارزشمند است. این گیاه، با وجود ارقام پاییزه و بهاره، در مناطق وسیعی از جهان در عرض‌های جغرافیایی مختلف کشت می‌شود و از پتانسیل بالایی برای توسعه برخوردار است (Ortas et al., 2019).

با توجه به رشد جمعیت جهانی و بهبود استانداردهای زندگی، تقاضا برای تولید روغن‌های گیاهی از جمله روغن کلزا افزایش یافته است. در عین حال، توسعه ارقام ویژه و ایجاد بازارهای خاص برای این محصول، کشت و تولید آن را در بسیاری از کشورها تقویت کرده است (Safikhani et al., 2015). ازآنجاکه ناپایداری تأمین نفت در سطح جهانی وجود دارد، روغن کلزا به‌عنوان یک گزینه قابل توجه برای تأمین انرژی زیستی در حال گسترش است (Hama, 2021). از جمله کشورهای تولیدکننده اصلی کلزا می‌توان به کانادا، چین، هند، آلمان، فرانسه و استرالیا اشاره کرد که بیش از ۷۴ درصد از تولید جهانی کلزا را به خود اختصاص می‌دهند (FAO, 2023).

حاصلخیزی خاک و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز برای گیاه کلزا، تأثیر زیادی بر عملکرد دانه و کیفیت آن دارد. استفاده از کودهای شیمیایی، به‌ویژه در بهینه‌سازی مصرف عناصر غذایی، می‌تواند نقش مهمی در افزایش عملکرد دانه کلزا ایفا کند (Mostafavirad et al., 2018). میزان و نوع کودهای مورد استفاده در تغذیه گیاه کلزا نه تنها بر میزان تولید دانه تأثیرگذار است، بلکه کیفیت روغن تولیدی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Asare & Scarisbrick, 1995). نیتروژن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی و عامل کلیدی در دستیابی به عملکرد مطلوب در محصولات زراعی، به‌ویژه در کلزا شناخته می‌شود (Tedone et al., 2018). کلزا نیاز بالایی به نیتروژن دارد و در بسیاری از اراضی زراعی ایران که با کمبود نیتروژن قابل جذب مواجه هستند، استفاده از کودهای نیتروژنی به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد ضروری است. علاوه‌بر نیتروژن، گوگرد نیز به‌عنوان یکی از عناصر غذایی پرمصرف در گیاهان زراعی، نقش مهمی در بهبود عملکرد کلزا ایفا می‌کند. کمبود گوگرد می‌تواند نه تنها بر کاهش عملکرد گیاه تأثیر بگذارد، بلکه باعث کاهش کیفیت روغن و پروتئین دانه‌ها نیز گردد (Malhi & Gil, 2006; Ghaderi et al., 2017). این عنصر به‌ویژه در خاک‌های کم‌حاصل و بافت سنگین، در شرایط خشک و در مناطقی که مقدار نیتروژن زیادی به خاک اضافه می‌شود، بیشتر دچار کمبود می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که در این شرایط، عملکرد کلزا با استفاده از کود گوگردی می‌تواند تا چهار برابر افزایش یابد (Mostafavirad et al., 2018). با توجه به قیمت بالای کودهای شیمیایی و اثرات مخرب مصرف بی‌رویه آن‌ها بر محیط زیست، توجه به استفاده بهینه از منابع غذایی نظیر گوگرد می‌تواند در افزایش بهره‌وری کشاورزی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی مؤثر باشد (Ghaderi et al., 2017). در این راستا، کاربرد گوگرد در کشاورزی به‌ویژه در تولید دانه‌های روغنی مانند کلزا، به‌عنوان یکی از اولویت‌های پژوهشی و کاربردی در نظر گرفته می‌شود (Jamal et al., 2010). مصرف گوگرد به‌میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار می‌تواند به افزایش ۱۵ درصدی عملکرد دانه کلزا منجر شود (Singh et al., 2022). کاربرد توأم گوگرد و نیتروژن سبب افزایش معنادار تعداد شاخه جانبی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و عملکرد روغن در کلزا در مقایسه با شاهد شد (Habibi et al., 2014). در بین فیتوهورمون‌ها، اکسین‌ها که عمدتاً در انتهای ساقه‌ها و ریشه‌ها تولید می‌شوند، نقش کلیدی در توسعه و رشد اندام‌ها دارند و موجب تحریک کشش سلولی و افزایش طول ساقه می‌شوند. سیتوکینین‌ها که در بافت‌های مریستمی و جوان تولید می‌شوند، به تقسیم سلولی کمک کرده و موجب تأخیر در پیری سلول‌ها می‌شوند. از سوی دیگر، جیبرلین‌ها در جوانه‌زنی بذر و رشد ساقه‌ها مؤثرند و به تحریک رشد طولی گیاه کمک می‌کنند. ارتباطات پیچیده‌ای بین این هورمون‌ها وجود دارد که موجب تعادل در فرآیندهای فیزیولوژیک و رشدی گیاه می‌شود (Ljung, 2013). تنظیم‌کننده‌های رشد، ترکیبات تولیدشده‌ای هستند که فرآیندهای فیزیولوژیکی را تغییر می‌دهند. این مواد با تقلید اثرات هورمون‌ها، کاهش ساخت هورمون‌ها و از بین بردن و یا انتقال و یا تغییر محل تأثیر یک هورمون، رشد و نمو را در گیاه تنظیم می‌کنند (Pirasteh-Anosheh & Emam, 2019). باکتری *سودوموناس آئروژینوزا* (*Pseudomonas aeruginosa*) به‌عنوان

یک محرک رشد گیاه در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این باکتری به افزایش جذب نیتروژن و بهبود رشد ریشه در گیاهان کمک می‌کند (Klockgether, et al., 2011). جلبک‌های قهوه‌ای دریایی (مثل جلبک‌های خانواده Laminariaceae) حاوی هورمون‌های طبیعی گیاهی مانند اکسین، سیتوکین و جیبرلین هستند که می‌توانند به تحریک رشد ریشه و جوانه‌زنی کمک کنند. این هورمون‌ها همچنین به بهبود تولید میوه و کیفیت محصولات کمک می‌کنند (Pérez-López et al., 2015). عصاره جلبک دریایی قهوه‌ای، به‌طور وسیعی، درکشت گیاهان برای تحریک رشد و ارتقاء تحمل آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری، دمایی و کمبود عناصر غذایی، استفاده می‌شود (Yaghoobi, 2020). این پژوهش با هدف بررسی کودهای شیمیایی نیتروژنه و گوگردی در شرایط استفاده از تنظیم‌کننده رشد بر صفات کمّی و کیفی کلزا در اراضی پس از برداشت برنج طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱، در مزرعه‌ای واقع در بازکیاگوراب شهرستان لاهیجان، به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عرض جغرافیایی محل آزمایش ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی بود. محل آزمایش دارای آب و هوای معتدل و مرطوب است و میزان بارندگی سالانه برحسب میانگین ۱۰ ساله برابر با ۱۳۳۰ میلی‌متر می‌باشد (Statistics of the Ministry of Agricultural Jihad, 2022). اطلاعات هواشناسی منطقه در طول اجرای این آزمایش در جدول ۱ آمده است. قبل از اجرای آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اندازه‌گیری شد (جدول ۲). در این آزمایش از کلزا رقم هایولا ۴۰۱ استفاده شد. از ترکیب تجاری شوتکس (باکتری *سودوموناس آئروژینوزا* ATCC 10145با غلظت 10^7 CFU.ml^{-1} با عصاره جلبک دریایی (*Ascophyllum nodosum*) در شرکت دانش‌بنیان نوآوران عرصه اندیشه کاسپین پارسیان) به‌عنوان تنظیم‌کننده رشد استفاده شد. عامل‌های آزمایشی شامل مصرف و عدم مصرف تنظیم‌کننده رشد به‌مقدار پنج میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان عامل اصلی و مقادیر کود نیتروژن خالص در چهار سطح صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار (از منبع اوره با نیتروژن ۴۶ درصد) و کود شیمیایی گوگرد در سه سطح (صفر، ۳۵ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع سولفات آمونیوم (گوگرد ۲۴ درصد و نیتروژن ۱۲ درصد) به‌عنوان عامل فرعی بودند. کاشت در نیمه اول آبان هر سال انجام شد. کود نیتروژنه در سه زمان یک‌سوم در زمان کاشت (BBCH 00)، یک‌سوم در زمان به ساقه رفتن (BBCH 30) و یک‌سوم در زمان قبل گل‌دهی (BBCH 60) کلزا به زمین داده شد.

جدول ۱- میانگین پارامترهای هواشناسی منطقه مورد آزمایش در طول دوره رشد

Table 1- Average meteorological parameters of the study area during the growing season

پارامترهای هواشناسی Climatic item	آذر 22 Nov. -21 Dec.		دی 22 Dec. -20 Jan.		بهمن 21 Jan. -19 Feb.		اسفند 20 Feb. -12 Mar.		فروردین 13 Mar.-20 Apr.		اردیبهشت 21 Apr.-20 May	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
بارندگی (میلی‌متر) Rainfall (mm)	141	130	90	52	106	101	132	63	98	57	81	47
رطوبت نسبی (درصد) Humidity (%)	92	91	92	96	93	90	94	92	90	93	95	90
میانگین دما (سانتی‌گراد) T mean (°C)	14	10	7	8	8	7	10	12	14	14	17	17
سرعت باد (متر بر ثانیه) Wind speed (m.s^{-1})	22	11	20	12	18	11	22	14	18	13	14	12

جدول ۲- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 2- Physical and chemical properties of soil in the experiment site

بافت Texture	هدایت الکتریکی EC (dS.m^{-1})	ماده آلی Organic matter (%)	اسیدیته pH	فسفر P	پتاسیم K	نیتروژن کل Total N (%)
				----------(mg.kg^{-1})----------		
Clay silty	1.17	1.7	7.4	15.1	217	0.179

کود آمونیوم سولفات برای تأمین میزان گوگرد در مرحله به ساقه رفتن به زمین داده شد (Mostafavirad et al., 2018). بافت خاک محل آزمایش، سیلتی رسی با اسیدیته برابر ۷/۴ و میزان کربن آلی خاک ۱/۹ درصد بود. هر کرت آزمایش شامل هشت خط کاشت به فاصله ۲۵ سانتی‌متر و به‌طول سه متر بود. بعد از برداشت برنج در اوایل مهر ،عملیات شخم حداقل با استفاده از دو بار روتیواتور به‌عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت و برای مبارزه با علف‌های هرز از علف‌کش ترفلان به‌میزان سه لیتر در هکتار استفاده شد. کود آمونیوم سولفات به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و پتاسیم سولفات به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار برحسب نتایج تجزیه خاک به مزرعه داده شد. میزان نیتروژن در آمونیوم فسفات به نیتروژن مورد استفاده به کود اوره اضافه شد. به‌منظور خروج زه‌آب و جلوگیری از غرقابی شدن مزرعه، دور تا دور زمین زهکش‌هایی به‌عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متر و به‌عرض ۴۰-۳۵ سانتی‌متر احداث گردید. فاصله بین تیمارها یک متر و بین تکرارها دو متر در نظر گرفته خواهد شد. کاشت بذرها در اوایل آبان به‌صورت دستی و میزان بذر مصرفی در هر کرت، ۱۰ گرم و برحسب ۱۰ کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. تنظیم‌کننده رشد به‌میزان پنج میلی‌گرم در لیتر به‌صورت پاششی در مرحله رزت طبق فاکتور آزمایشی روی بوته‌های کلزا محلول‌پاشی ترکیب فرموله‌شده شوتکس انجام شد. در طول فصل رشد، عملیات زراعی لازم مانند مبارزه با علف‌های هرز و آفات انجام خواهد گرفت. پس از کاشت کلزا و در مرحله شش‌برگی برای مهار علف‌های هرز باریک‌برگ از علف‌کش گالانت به‌میزان سه لیتر در هکتار استفاده گردید. برای مبارزه با حلزون در دو زمان ابتدای سبزشدن کلزا و در زمان ۴-۳ برگی، از سم متالدهاید استفاده شد. برای محاسبه ارتفاع، تعداد ۲۰ بوته از هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و میانگین ارتفاع (ارتفاع بوته‌ها از سطح زمین تا نقطه انتهایی ساقه اصلی) هر تیمار ثبت شد. مرحله گل‌دهی با کد ۶۱ از شاخص Scale- BBCH (باز شدن ۱۰ درصد از گل‌های شاخه اصلی و طویل شدن شاخه اصلی) تعیین شد. روغن دانه‌ها با استفاده از حلال استن و دستگاه سوکسله استخراج و مقدار آن به درصد محاسبه خواهد شد. بر این اساس، جهت استخراج روغن، مقدار ۱۰ گرم بذر خرد شده و ۳۰۰ سی‌سی بنزن در دستگاه سوکسله قرار داده شد. عملکرد روغن از حاصل‌ضرب درصد روغن در عملکرد دانه محاسبه شد (Yahyapoor et al., 2023; Fanaei et al., 2014). در مرحله نهایی، از هر کرت مساحت دو مترمربع با داس برداشت و عملکرد دانه آن تعیین شد (Soleimanzadeh et al., 2007). برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

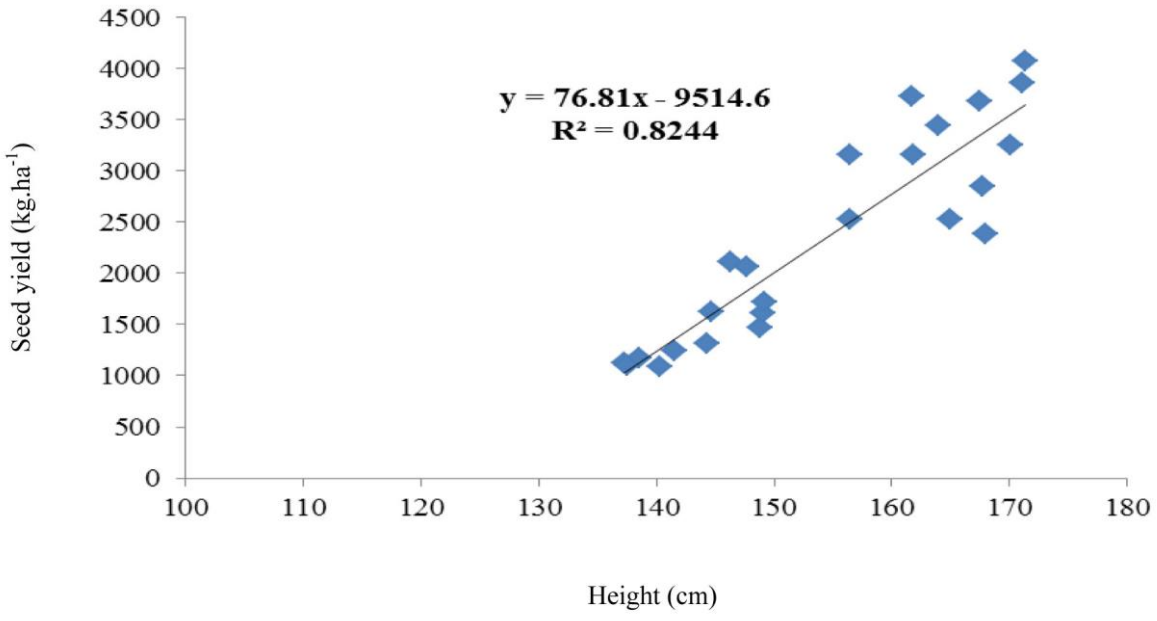
ارتفاع بوته

ارتفاع گیاه بیانگر رشد و بهره‌برداری از منابع محیطی است و تحت‌تأثیر تعداد گره در ساقه و طول میان‌گره قرار می‌گیرد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنظیم‌کننده رشد، تیمارهای کود نیتروژن و گوگردی (در سطح احتمال یک درصد) معنی‌دار بود (جدول ۳). استفاده از تنظیم‌کننده رشد سبب افزایش ارتفاع در کلزا گردید که این ترکیب به همراه مصرف ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم کود گوگردی با میانگین ۱۷۱/۳ سانتی‌متر بیشترین ارتفاع بوته را داشت. تیمار بدون مصرف تنظیم‌کننده رشد و کود نیتروژن و ۳۵ کیلوگرم کود گوگردی با ارتفاع میانگین ۱۳۷/۳ سانتی‌متر کم‌ترین ارتفاع بوته را داشت. نتایج این آزمایش نشان داد که تنظیم‌کننده رشد به‌تنهایی روی ارتفاع بوته تأثیر معنی‌داری نداشته است، درصورتی‌که به همراه کود نیتروژن و گوگرد، اثر افزایشی در رشد و ارتفاع گیاه داشته است (جدول ۴). معادله خطی برازش‌شده بر داده‌ها نشان داد که رابطه ارتفاع گیاه و عملکرد دانه مستقیم است به‌طوری‌که بالاترین عملکرد دانه در ارتفاع ۱۷۱ سانتی‌متر به دست آمد (شکل ۱). نتایج همبستگی ارتفاع بین صفات مختلف نشان داد که میزان همبستگی بین ارتفاع با عملکرد دانه بالاترین مقدار بین صفات به‌میزان**۰/۸۱۴ بود (نتایج ارائه نشده است). رامئه (Rameeh, 2014) در مطالعه خود نشان داد که عملکرد دانه با ارتفاع بوته دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری می‌باشد. شروع گل‌دهی در کلزا با افزایش ارتفاع سریع گیاه از طریق افزایش فواصل بین گره‌ها و رشد ساقه گل‌دهنده همراه است (Safari et al., 2021). ارتفاع بیشتر بوته باعث افزایش مقدار کپسول در بوته و در نتیجه، تعداد دانه

بیشتری در بوته می‌گردد که با نتایج مطلبی‌پور و همکاران (Motablipour et al., 2000) مطابقت دارد. استفاده از ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن سبب افزایش ارتفاع گیاه کلزا به‌ترتیب ۳۴، ۴۲ و ۳۹ درصد نسبت به بدون استفاده از کود نیتروژنه شد (Mosavian et al., 2022).

عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تنظیم‌کننده رشد، کود نیتروژن و کود گوگرد و اثر متقابل تنظیم‌کننده رشد، تیمارهای کود نیتروژن و گوگردی بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین عملکرد دانه به‌میزان ۴۰۸۱ کیلوگرم در هکتار در تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد، کاربرد ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنه و ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی به دست آمد. کمترین عملکرد دانه به‌میزان ۱۰۸۵ کیلوگرم در هکتار در مصرف تنظیم‌کننده رشد بدون نیتروژن و مصرف ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی ثبت شد. معادله خطی براش‌شده بر داده‌های مختلف اجزای عملکرد و عملکرد روغن کلزا نشان داد که رابطه تعداد ارتفاع بوته، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه درخورجین، وزن هزار دانه و عملکرد روغن بر عملکرد دانه مستقیم و مثبت است. عملکرد بالا اغلب با تولید تعداد بیشتر خورجین در بوته یا واحد سطح همراه است (Paseban Islam et al., 2001). در این تحقیق، استفاده از کود نیتروژن و گوگرد در سطوح پایین نیز منجر به افزایش عملکرد شده است، امّا مصرف نیتروژن از ۹۰ تا ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش عملکرد دانه تا ۷۰ درصد شد. همچنین با افزایش میزان گوگرد، عملکرد و عملکرد روغن نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. استفاده از کود نیتروژن از طریق بهبود فعالیت میکروبی خاک و در دسترس قرار دادن انواع هورمون‌ها و مواد محرک رشد، همچنین فراهمی عناصر غذایی، باعث افزایش فتوسنتز و بهبود ماده خشک گیاهی شده است که این مسئله در نهایت، موجب بهبود عملکرد دانه شده است (Yaw et al., 2008). میزان همبستگی بین عملکرد دانه و طول دوره رشد (۰/۷۲۸**) با طول دوره گل‌دهی (۰/۹۴۱**) و با طول دوره پرشدن دانه (۰/۷۲۶**) دارای یک رابطه مستقیم و معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. میزان همبستگی با درصد روغن معکوس و معنی‌دار (سال اول ۰/۷۷۹**- و سال دوم ۰/۸۱۳**-)، در سطح احتمال یک درصد بود (نتایج ارائه نشده است).



شکل ۱- رابطه رگرسیونی بین ارتفاع بوته و عملکرد دانه کلزا در اثر متقابل سه عامل تنظیم‌کننده رشد و کودهای نیتروژن و گوگرد

Fig. 1- Regression relationship between plant height (cm) and seed yield (kg.ha^{-1}) of rapeseed in the interaction of growth regulator, nitrogen, and sulfur fertilizer treatments

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثر سال، تنظیم‌کننده رشد و کودهای نیتروژنه و گوگردی بر صفات ارتفاع گیاه، عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن، طول دوره رشد، گل‌دهی و پرشدن در کلزا

Table 3- Combined analysis of variance (ANOVA) for the effect of year, growth regulator, and nitrogen, and sulfur fertilizers on plant height, seed yield, oil content, oil yield, growth duration, flowering duration, and seed filling duration in rapeseed

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)						
		ارتفاع گیاه Plant height	عملکرد دانه Seed yield	درصد روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield	طول دوره رشد Growth duration	طول دوره گل‌دهی Flowering duration	طول دوره پرشدن Seed filling duration
سال (Y)	1	0.56	389168	14.06	88446.7*	845.8**	160.4**	164.6*
بلوک (سال)	4	157.4	166788	24.8	8728	26.52	2.69	10.13
R × Y	1	7.56	18814	1.56	69.1	0.84	0.44	0.69
تنظیم‌کننده (R)	1	416.8	5178658**	11.67	411073.3**	55.01	20.25*	0.694
خطای اصلی Erorr 1	4	88.05	74317	1.53	17053.2	1.319	4.972	3.361
نیتروژن (N)	3	5854.8**	43515149**	576.08**	2373923**	1733.1**	1338.5**	272.04**
گوگرد (S)	2	93.39*	625158**	5.75	81675.2*	114.7**	1.506	18.58*
R × N	3	92.6*	419916**	0.87	34440.8	1.803	3.7129	0.935
R × S	2	18.8*	9745	21.14**	5374.2	0.632	0.145	0.361
N × S	6	165.9**	228760**	3.3	34296**	22.96**	17.75**	4.046*
R ×N×S	6	11.8**	47760**	4.62**	4774.5*	2.956	3.803**	0.824
Y × N	3	4.62	109380*	2.89	16758.1*	2.525	0.018	2.0462
Y × S	2	0.1457	6251	1.27	1143.8	0.923	0.3402	0.694
Y × R × N	3	1.87	42338	0.136	3333.3	2.5254	0.0185	2.0463
Y × R × S	2	0.817	9695	0.021	398.3	0.923	0.3402	0.695
Y × N × S	6	1.67	23962	0.91	1457.3	1.0811	0.2199	0.768
Y ×R × N × S	6	0.47	3436	0.456	725.2	1.081	0.212	0.7685
خطای دوم Erorr 2	88	30.53	33639	4.04	5702.9	12.6	2.2	2.5
درصد ضریب تغییرات CV		3.5	7.8	6.3	10.5	1.7	6.6	2.1

^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.

^{ns},*and ** non significant and significant at 1% and 5%.

جدول ٤- مقایسه میانگین صفات ارتفاع بوته، عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن کلزا در اثر تیمارهای تنظیم‌کننده رشد، کود نیتروژنه و کود گوگردی

Table 4- Comparison of mean values for plant height, seed yield, oil content, oil yield and flowering duration of rapeseed under the effect of growth regulator, nitrogen, and sulfur fertilizer treatments

تنظیم‌کننده رشد R	نیتروژن N	گوگرد S	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})	درصد روغن دانه Oil content (%)	عملکرد روغن Oil yield (kg.ha^{-1})	طول دوره گل‌دهی Flowering duration (days)
بدون تنظیم‌کننده رشد Without growth regulator (R_1)	0	0	138.5^{d}	1168^{l}	34.5^{abc}	403.8^{m}	15.1kl
	0	35	137.3^{d}	1129^{l}	34.8^{abc}	385.4^{m}	15.3^{kl}
	0	70	137.5^{d}	1098^{l}	35.7^{a}	398.1^{m}	14.1^{l}
	90	0	148.8^{cd}	1470^{jkl}	34.3^{abc}	498.8^{jkl}	20.3^{ghi}
	90	35	149.1^{cd}	1617^{jk}	37.8^{a}	612.3^{ijk}	19.6^{ghi}
	90	70	144.6^{cd}	1622^{jk}	36.6^{a}	587.4^{ijkl}	19.6^{ghi}
	180	0	168.1^{ab}	2390^{gh}	29.5^{defg}	702.8^{ghi}	22.6^{efg}
	180	35	156.5^{bc}	2533^{fg}	31.1^{cde}	785.2^{efgh}	25.1^{de}
	180	70	165.1^{ab}	2525^{fg}	30.8^{cdef}	778.5^{efgh}	26.3^{dc}
	270	0	161.8^{ab}	3156de	26.3^{g}	831.3^{cdefg}	30.6^{a}
	270	35	164.2^{ab}	3450^{d}	26.7^{efg}	921.4^{bcde}	28.3^{abc}
	270	70	161.6^{ab}	3734^{abc}	28.8d^{efg}	1078.8^{ab}	29.6^{ab}
مصرف تنظیم‌کننده رشد With growth regulator (R_2)	0	0	144.3^{d}	1320^{kl}	24.2^{abc}	452.1^{klm}	17.3^{ijk}
	0	35	141.5^{d}	1247^{kl}	34.7^{abc}	433.3^{lm}	16.3^{jkl}
	0	70	140.3^{d}	1085^{l}	34.1^{abc}	368.1^{m}	15.6^{kl}
	90	0	149.2^{cd}	1720^{ij}	36.2^{a}	622.9^{hij}	19.1h^{ij}
	90	35	147.6^{cd}	2070^{hi}	34.5^{abc}	711.6^{ghi}	21.3^{fgh}
	90	70	146.3^{cd}	2115^{hi}	35.5^{ab}	748.5^{efgh}	20.3^{ghi}
	180	0	167.6^{ab}	2851^{ef}	31.2^{bcd}	890.3^{cdef}	24.5^{def}
	180	35	156.5^{bc}	3157de	29.3^{defg}	925.1^{bcde}	25.1^{de}
	180	70	170.1^{a}	3254^{d}	29.3^{defg}	957.4^{bcd}	26.6^{bcd}
	270	0	167.5^{ab}	3682^{bc}	27.1^{defg}	995.5^{abc}	31.3^{a}
	270	35	171.1^{a}	3862^{ab}	26.5^{fg}	1026.1^{abc}	28.3^{abc}
	270	70	171.3^{a}	4081^{a}	27.8^{defg}	1135.1^{a}	29.8^{ab}

تنظیم‌کننده رشد (R) در دو سطح بدون استفاده (R_1) و استفاده پنج میلی‌گرم در لیتر (R_2)، نیتروژن (N) در چهار سطح ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار و گوگرد (S) در سه سطح ۰، ۳۵ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری بین تیمارها در سطح پنج درصد می‌باشد.

Growth regulator (R) at two levels of no use (R1) and use of five mg l^{-1} (R2), nitrogen (N) at four levels of 0, 90, 180 and 270 kg ha^{-1} and sulfur (S) at three levels of 0, 35 and 70 kg ha^{-1}. Like letters indicate non-significance between treatments at the five percent level.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات طول دوره رشد و دوره پرشدن دانه در اثر تیمارهای کود نیتروژنه و کود گوگردی

Table 5- Comparison of mean values for growth duration, and seed filling duration in the effect of nitrogen and sulfur fertilizer treatments

نیتروژن(کیلوگرم در هکتار) N(kg ha^{-1})	گوگرد (کیلوگرم در هکتار) S (kg ha^{-1})	طول دوره رشد Growth duration (days)	طول دوره پر شدن دانه Seed filling duration (days)
0	0	192^{e}	75.9^{c}
	35	186^{f}	73.4^{d}
	70	192^{e}	75.8^{c}
90	0	202^{cd}	79.6^{b}
	35	201^{d}	79.1^{b}
	70	202^{cd}	79.7^{b}
180	0	204^{bc}	80.3^{ab}
	35	203^{cd}	80.1^{ab}
	70	204^{bc}	80.1^{ab}
270	0	207^{a}	81.6^{a}
	35	204^{c}	80.6^{ab}
	70	206^{ab}	81.5^{a}

نیتروژن (N) در چهار سطح ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار و گوگرد (S) در سه سطح ۰، ۳۵ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری بین تیمارها در سطح پنج درصد می‌باشد.

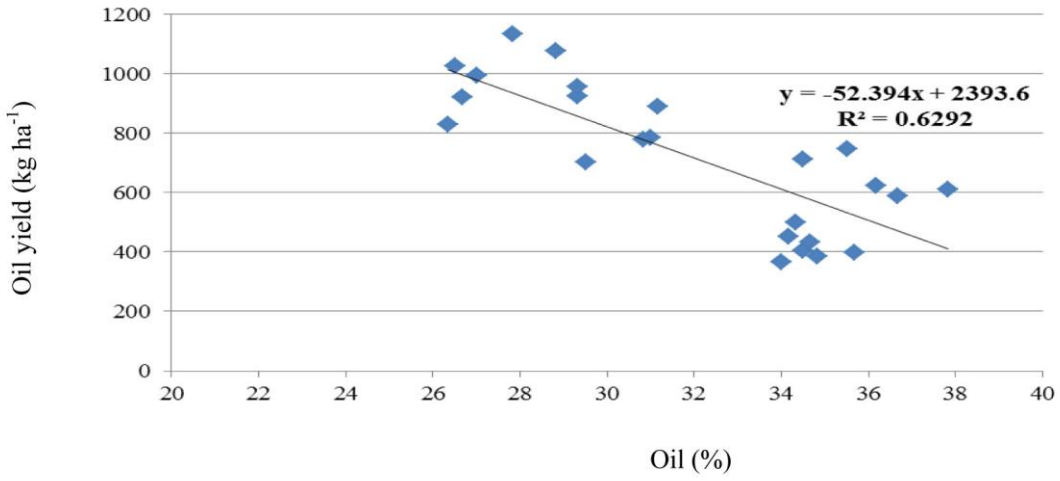
Nitrogen (N) at four levels of 0, 90, 180 and 270 kg/ha and sulfur (S) at three levels of 0, 35 and 70 kg ha^{-1}. Like letters indicate non-significance between treatments at the five percent level.

افزایش عملکرد دانه کلزا در شرایط نیتروژن بالای مصرفی عمدتاً مربوط به تعداد خورجین بالاتر و وزن دانه بالاتر است، درحالی‌که تعداد دانه در هر غلاف تحت‌تأثیر قرار نمی‌گیرد (Safari et al., 2021). پژوهش‌ها بیانگر نقش مثبت گوگرد در مرحله رشد زایشی، فرآیند گل‌دهی و همچنین تعداد غلاف‌های رسیده، تعداد دانه در غلاف و وزن دانه‌ها است (Fismes et al., 2000;Singh, 2001). به نظر می‌رسد که گوگرد از طریق تأثیر بر افزایش تعداد خورجین باعث افزایش عملکرد شده است (Majidian et al., 2008). بیشترین عملکرد دانه کلزا با مصرف ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن حاصل می‌شود و مصرف این میزان کود نیتروژن‌دار در مقایسه با مقادیر کمتر (۶۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) باعث افزایش تولید دانه و وزن دانه می‌شود، امّا در مقایسه با مصرف مقادیر بیشتر کود نیتروژن (۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) وزن دانه تفاوتی نداشت (Mosavian et al., 2022). همچنین، کشت مداوم کلزا در یک قطعه زمین باعث کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی تولید دانه می‌شود (Sieling & Christen, 2015). تحقیقات نشان داده‌اند که تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اکسین‌ها و سیتوکینین‌ها می‌توانند به بهبود عملکرد کلزا از طریق افزایش رشد و توسعه ریشه، بهبود جذب مواد غذایی و افزایش تعداد خورجین و دانه‌ها در بوته کمک کنند. مطالعه‌ای دیگر نشان داده است که استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد باعث افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی در عملکرد دانه کلزا می‌شود (Lee et al., 2021). نتایج یک تحقیق اخیر نیز نشان داد که استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد در کنار کود نیتروژن می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد کلزا را به‌ویژه در شرایط کمبود مواد غذایی افزایش دهد (Wang et al., 2024).

درصد و عملکرد روغن دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که عملکرد و درصد روغن دانه تحت‌تأثیر تنظیم‌کننده رشد و کودهای شیمیایی نیتروژنی و گوگردی معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد روغن دانه از تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد، ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم کود گوگردی در هکتار با میانگین ۱۱۳۵ کیلوگرم در هکتار به دست آمد و کمترین مقدار نیز متعلق به تیمارهای مصرف تنظیم‌کننده رشد،

بدون کود نیتروژن و مصرف ۷۰ کیلوگرم کود گوگردی با میانگین ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار ثبت شد (جدول ۴). عملکرد روغن تابعی از محتوای روغن و عملکرد دانه می‌باشد (Safari et al., 2021). معادله خطی براش‌شده بر داده‌ها نشان داد که رابطه درصد و عملکرد روغن معکوس است. بالاترین درصد روغن به‌میزان ۳۸ درصد در عملکرد روغن ۶۱۲ کیلوگرم در هکتار ثبت شده است (شکل ۲). نتایج حاصل از این تجزیه نشان داد که عملکرد روغن اثر مستقیم و مثبتی بر عملکرد دانه داشت، درحالی‌که درصد روغن رابطه مستقیم و منفی بر عملکرد نشان داد. بیشترین درصد روغن دانه از تیمار بدون تنظیم-کننده رشد، ۹۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۳۵ کیلوگرم کود گوگردی با میانگین ۳۷/۸ درصد و کم‌ترین مقدار درصد روغن در تیمار ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و بدون مصرف تنظیم‌کننده و کود گوگردی در هکتار با میانگین ۲۶/۳ درصد به دست آمد. تحقیقات منطقه‌ای احمدی و جاویدفر (Ahmadi & Javidfaar, 2000) نشان داد که علاوه‌بر عوامل ژنتیکی، عوامل محیطی نیز بر درصد روغن تأثیر دارد. در مطالعه گوگرد بر کلزا در هندوستان گزارش شده است که کاربرد منابع مختلف گوگرد در مرحله قبل از گل‌دهی سبب افزایش عملکرد دانه و درصد روغن گردید (Kumar et al., 2018). احمد و همکاران (Ahmad et al., 2007) دریافتند که افزایش تیمار گوگرد به‌میزان ۲۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش روغن دانه در کلزا می‌شود. مالهی و همکاران (Malhi et al., 2006) نشان دادند که با کاربرد گوگرد، میزان روغن و پروتئین دانه افزایش یافت. مقدار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در سه مرحله با میانگین عملکرد روغن ۱۳۸۳ کیلوگرم در هکتار و مقدار ۶۰ کیلوگرم در هکتار تماماً در زمان کاشت با میانگین ۵۰۶ کیلوگرم در هکتار پس از شاهد به‌ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد روغن کلزا را به خود اختصاص دادند (Rabiei et al., 2011). مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد در بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea*) باعث افزایش عملکرد، محتوای گوگرد، پروتئین و درصد روغن گیاه شد (Surendra & Singh, 1991). با کاربرد نیتروژن، سوبسترای بیشتری برای سنتز پروتئین فراهم و مواد فتوسنتزی بیشتری به ساخت پروتئین اختصاص داده می‌شود و در نتیجه، جهت سنتز روغن، سوبسترای کافی در اختیار نخواهد بود. بنابراین، میزان روغن کاهش می‌یابد، امّا این کاهش منجر به کاهش عملکرد روغن نگردید. در واقع، کاربرد نیتروژن بیشتر برای حصول عملکرد اقتصادی بالاتر مانعی ندارد، چون با کاهش مقدار نیتروژن، افزایش میزان روغن نمی‌تواند کاهش حاصل در عملکرد دانه را جبران کند (Hasanzadeh & Javadi, 2015). یافته‌های حاصل از این آزمایش نیز با این تحقیق تطابق دارد.



شکل ۲- رابطه رگرسیونی بین درصد روغن و عملکرد روغن کلزا در اثر متقابل سه عامل تنظیم‌کننده رشد و کودهای نیتروژن و گوگرد

Fig. 2- Regression relationship between oil content (%) and oil yield (kg.ha^{-1}) of rapeseed under the interaction of growth regulator, nitrogen, and sulfur fertilizer treatments

طول دوره رشد، گل‌دهی و پرشدن دانه کلزا

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که طول دوره گل‌دهی تحت‌تأثیر تنظیم‌کننده رشد، کود شیمیایی نیتروژنی و گوگردی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین طول دوره گل‌دهی از تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد، ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم کود گوگردی در هکتار با میانگین ۳۱ روز در سال اول به

دست آمد و کمترین مقدار نیز متعلق به تیمارهای عدم مصرف تنظیم‌کننده رشد، بدون استفاده از کود نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد با میانگین ۱۴ روز ثبت شد (جدول ۴). تحقیقات اخیر، تأثیرات قابل توجهی از مصرف کودهای شیمیایی و تنظیم‌کننده‌های رشد بر طول دوره گل‌دهی کلزا نشان داده‌اند. چن و دیک (Chen & Dick, 2011) گزارش کردند که مصرف بالای نیتروژن و گوگرد در ترکیب با تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی طول دوره گل‌دهی را افزایش دهد و کیفیت و کمیت محصول را بهبود بخشد. در تحقیق مشابه، خان و همکاران (Khan et al., 2021) بیان کردند که افزایش میزان نیتروژن و گوگرد به همراه استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد باعث طولانی‌تر شدن دوره گل‌دهی و افزایش عملکرد دانه می‌شود که با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد. در مقابل، اسمیت و همکاران (Smith et al., 2020) و یانگ و همکاران (Wang et al., 2024) اشاره کردند که کمبود نیتروژن و استفاده نامناسب از کودهای شیمیایی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه طول دوره گل‌دهی شود. این کاهش به‌ویژه در شرایطی که تنها از کود گوگرد استفاده می‌شود و تنظیم‌کننده رشد به کار نمی‌رود، مشاهده شده است. این یافته‌ها با نتایج این تحقیق که نشان‌دهنده کمترین طول دوره گل‌دهی در این تیمارها است، سازگار است. تحلیل‌های اخیر همچنین نشان داده‌اند که مدیریت صحیح کودهای نیتروژنی و گوگردی به‌ویژه در مراحل ابتدایی رشد گیاه می‌تواند به‌طور چشمگیری بر بهبود طول دوره گل‌دهی و عملکرد نهایی تأثیر بگذارد (Zhang et al., 2020). این نتایج تأکید می‌کند که ترکیب مناسب کودها و تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند به‌طور مؤثری به بهینه‌سازی عملکرد و کیفیت محصول کلزا کمک کند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که طول دوره رشد تحت‌تأثیر کودهای شیمیایی نیتروژنی و گوگردی (اثرات متقابل) در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین طول دوره رشد از تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد، ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم کود گوگردی (و بدون مصرف کود گوگردی) در هکتار با میانگین ۲۰۷ روز به دست آمد و کمترین مقدار نیز متعلق به تیمارهای عدم مصرف تنظیم‌کننده رشد، بدون استفاده از کود نیتروژن و کود گوگرد با میانگین ۱۹۲ روز ثبت شد (جدول ۵). معادله خطی برازش‌شده بر داده‌ها نشان داد که رابطه طول دوره رشد و دوره پر شدن دانه مستقیم است. بین مقادیر کودی، مقدار ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار با میانگین طول دوره رویش ۲۰۶ روز بیشترین و مقدار ۶۰ کیلوگرم در هکتار با میانگین ۲۰۳ روز پس از شاهد کمترین طول دوره رویش را به خود اختصاص دادند (Rabiei et al., 2011). به‌کارگیری مقدار بیشتر نیتروژن در کلزا سبب افزایش رشد سبزینه‌ای شده و موجب افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد خورجین و در نتیجه، باعث افزایش طول دوره رویش می‌گردد. ابراهیم و همکاران (Ibrahim et al., 1989) با افزایش مقدار نیتروژن مصرفی تا مقدار ۲۱۳ کیلوگرم در هکتار، یک افزایش ثابت و تصاعدی در عملکرد کلزا مشاهده کردند و گزارش نمودند که طول دوره رسیدگی گیاه کلزا با مصرف بیشتر نیتروژن افزایش می‌یابد. با فرارسیدن دوره رشد سریع گیاه زراعی همراه با مرحله ساقه رفتن گیاه و افزایش تعداد برگ، شاخص سطح برگ روندی افزایشی دارد و در مرحله گل‌دهی به حداکثر مقدار خود می‌رسد، پس از آن به‌دلیل سایه‌اندازی برگ‌های بالایی، زرد شدن و پیری برگ‌های پایینی و فرآیند انتقال مجدد مواد به‌سمت اندام‌های زایشی، شاخص سطح برگ کاهش خواهد یافت (Taheri & Soleimani, 2015).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که طول دوره پر شدن دانه تحت تأثیر سال، تحت‌تأثیر تنظیم‌کننده رشد و کودهای شیمیایی نیتروژنی و گوگردی معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین طول دوره پر شدن دانه از تیمار مصرف تنظیم‌کننده رشد، ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم کود گوگردی (و ۲۷۰ کیلوگرم کود نیتروژن و بدون مصرف کود گوگردی) در هکتار با میانگین ۸۲ روز به دست آمد و کمترین مقدار نیز متعلق به تیمارهای عدم مصرف تنظیم‌کننده رشد، بدون استفاده از کود نیتروژن و ۳۵ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد با میانگین ۷۳ روز ثبت شد (جدول ۵). نتایج پژوهش‌ها نشان دادند که افزایش کاربرد نیتروژن به‌جهت افزایش دوام سطح سبز فتوسنتزی پس از گل‌دهی و طول دوره پرشدن دانه شد (Safikhani et al., 2015). گزارش شده است که کمبود گوگرد، عملکرد دانه سویا را از طریق تأثیر بر رشد گیاه در دوره پر شدن دانه کاهش می‌دهد (Boem et al., 2007). افزایش کاربرد نیتروژن به‌جهت افزایش دوام سطح سبز فتوسنتزی پس از گل‌دهی و طول دوره پرشدن دانه باعث افزایش وزن هزار دانه می‌شود. دلیل این امر به افزایش در فرآیند فتوسنتز است، به‌طوری که کربوهیدرات‌ها و نیتروژن ذخیره‌شده در طول دوره گل‌دهی تعیین‌کننده میزان دانه‌بندی بوده و کمبود نیتروژن، وزن دانه را از طریق کاهش مواد فتوسنتزی کاهش می‌دهد

(Moraditochaee, et al., 2012).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت تلفیقی تغذیه کلزا با استفاده از تنظیم‌کننده رشد، کود نیتروژن و گوگرد می‌تواند به‌طور معنی‌داری عملکرد و کیفیت محصول را در اراضی پس از برداشت برنج بهبود بخشد. بیشترین عملکرد دانه (۴۰۸۱ کیلوگرم در هکتار) و طولانی‌ترین دوره گل‌دهی (۳۱ روز) و رشد (۲۰۷ روز) در تیمار ۲۷۰ کیلوگرم نیتروژن و ۷۰ کیلوگرم گوگرد همراه با تنظیم‌کننده رشد مشاهده شد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ارتفاع گیاه و عملکرد دانه وجود داشت که اهمیت رشد رویشی مناسب در بهبود عملکرد را نشان می‌دهد. افزایش مصرف نیتروژن اگرچه درصد روغن را کاهش داد، امّا به‌دلیل افزایش عملکرد دانه، منجر به افزایش عملکرد روغن شد. رابطه معکوس بین درصد و عملکرد روغن مشاهده گردید، به‌طوری‌که بالاترین درصد روغن (۳۸ درصد) در عملکرد روغن ۶۱۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. این یافته‌ها اهمیت مدیریت دقیق تغذیه گیاه را در بهینه‌سازی تولید کلزا آشکار می‌سازد و پیشنهاد می‌کند که برای دستیابی به عملکرد مطلوب، استفاده متعادل از کودهای نیتروژن و گوگرد همراه با تنظیم‌کننده‌های رشد ضروری است. این نتایج می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای کشاورزان در مدیریت مزارع کلزا باشد و به توسعه راهکارهای پایدار برای افزایش تولید روغن در کشور کمک کند. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده، اثرات طولانی‌مدت این روش‌های مدیریتی بر حاصلخیزی خاک و پایداری تولید مورد بررسی قرار گیرد.

References

1. Ahmad, G., Jan, A., Arif, M., & Khattak, R.A. (2007). Influence of nitrogen and sulfur fertilization on quality of canola (*Brassica napus* L.) under rainfed conditions. *Journal of Zhejiang University Science*, *8*, 731-737. https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0731
2. Ahmadi, M.R., & Javaidfar, F. (2000). Methods of Evaluation and Correction of Drought Resistance in Oil Species of *Brassica* Genus. (Translation). Publication of Agricultural Education, Karaj, Iran. 141 p. (in Persian).
3. Asare, E., & Scarisbrick, D.H. (1995). Rate of nitrogen and sulfur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crop Research*, *44*(1), 41-46. https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00051-7
4. Boem, F.H.G., Prystupa, P., & Ferraris, G. (2007). Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Plant Nutrition*, *30*, 93-104. https://doi.org/10.1080/01904160601055095
5. Chen, L., & Dick, W.A. (2011). Gypsum as an Agricultural Amendment: General Use Guidelines. Ohio State University Extension. Bulletin 945. 36 p.
6. Das, J., Pathak, K., Das, S., Dey, J., & Debanth, A. (2020). Response of late sown rapeseed varieties for physiological traits under different levels of irrigation. *The Pharma Innovation Journal*, *10*(2), 639-642. https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i2i.5750
7. Fanaei, H.R., Kakha, G., Davtalab, N., & Sarananie, F. (2014). Evaluation of seed yield and yield components of canola (*Brassica napus* L.) genotypes in response to delay planting. *Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi)*, *108*, 65-73. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/aj.2015.106713
8. FAO. (2021). FAOSTAT. Available online: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.
9. Fismes, J., Vong, G., Guckert, P.C., & Frossard, E. (2000). Influence of sulphur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed grown on calcareous soil. *European Agronomy Journal*. *12*, 127-141. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00052-0
10. Ghaderi, J., Malkuti, M.J., Khavazi, K., & Davoudi, M.H. (2017). Investigating the effect of applying elemental sulfur on the yield and some quality characteristics of blue wheat. *Physiology of Agricultural Plants*, *9*(33), 69-94. (in Persian with English abstract).
11. Habibi, M., Majidian, M., & Rabiei, M. (2014). The effect of zinc, zinc and sulfur elements on seed yield and fatty acid composition of rapeseed oil. *To-Agricultural Agriculture*, *16*(1), 69-84. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2014.51943
12. Hasanzadeh Ghorttapeh, A., & Javadi, H. (2015). Studying the effects of nitrogen fertilizer application and inoculation with biological fertilizers (*Azospirillum* and *Azotobacter*) on yield, yield components and oil of spring rapeseed in West Azerbaijan. *Journal of Production and Processing of Agricultural and Horticultural Products*, *5*(18), 39-49. (in Persian with English abstract).
13. Hama, S.J. (2021). Effect of NPK levels on seed yield and oil contents of Rapeseed (*Brassica napus* L.) under

Sulaimani Condition-Iraq Kurdistan Region. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, *21*(2), 99-111. https://doi.org/10.25130/tjas.21.2.11

14. Ibrahim, A.F., Abusteit, E., & Metwall, E.M. (1989). Response of rape seed growth, yield, oil content and its fatty acids to nitrogen rates and application times. *Journal of Agronomy Crop Science Egypt,162*: 107-112. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1989.tb00695.x
15. Jamal, A., Moon, Y.S., & Abdin, M.Z. (2010). Sulphur: A general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Sciences*, *4*, 523-529.
16. Khan, A., Bakhsh, A., & Morteza, G. (2021). GA3 Effects on Potato Growth. *Journal of Plant Physiology*, *258*, 50-58.
17. Klockgether, J., Munder, A., & Tümmler, B. (2011). Interspecies and interspecies diversity of *Pseudomonas aeruginosa*. *Clinical Microbiology Reviews, 24* (2), 164-208.
18. Kumar, Vinod., Tyagi, Sh., Paul, S. C., Dubey1, S. K., Suman, Sh., 2018. Effect of sources and doses of sulphur on S uptake and yield of Mustard (*Brassica juncea* L.). *Intenational Journal Microbiol Science, 7*, 5042-5047.
19. Lee, C., Kim, J., & Park, S. (2021). Optimizing fertilizer use and growth regulators for enhancing rice yield and quality. *Agronomy Journal*, *113*(4), 1882-1894.
20. Ljung, K. (2013). Auxin metabolism and homeostasis during plant development. *Development, 140*(5), 943-945. https://doi.org/10.1242/dev.086363
21. Majidian, M., Qalavand, A., Crimean, N.A., & Kamgar, A.A., (2008). Effects of nitrogen different amounts, manure and irrigation water on yield and yield components of corn. *Electronic Journal of Crop Production*, *1*(2),67-85. (in Persian with English abstract).
22. Malhi, S.S., & Gill, K.S. (2006). Cultivar and fertilizer S rate interaction effects on canola yield, seed quality and S uptake. *Canadian Journal of Plant Science, 86*, 91-98. https://doi.org/10.4141/P05-058
23. Moraditochaee, M., Motamed, M.K., Azarpour, A., & Khosravi Danesh, R. (2012). Effects of Plant Density on Sweet and Baby Corn (Hybrid KSC 403) Yield and Yield Components. *Iranian Journal of Field Crops Research*. *7*(2), 133-137. https://doi.org/10.22067/GSC.V14I1.34172
24. Mosavian, S.N., Eskandari, H. A., Mossadeghi, A.A., & Kazemi, K. (2022). The effect of the type of pre-sowing plant and different amounts of nitrogen fertilizer on the yield and quality of rapeseed oil. *Production and Processing of Crops and Livestock*, *12*(4): 83-96. (in Persian with English abstract).
25. Mostafavirad, M., Nobahar, A., & Mahjub Khammami, A. (2018). Nutrition management in canola cultivation. Research and training center for agriculture and natural resources of Gilan province. Library registration number 54304. 24 p. (in Persian).
26. Motablipour, S., Ahmadi, M.R., & Jokar, L. (2000). Compatibility study and performance comparison of canola cultivars and lines in Zarghan (Persian). *Journal of Agricultural Sciences of Iran*, *2*(3), 39-50. (in Persian with English abstract).
27. Ohara, N., Naito, Y., Kasama, K., Shindo, T., Yoshida, H., Nagata, T., & Okuyama, H. (2009). Similar changes in clinical and pathological parameters in Wistar Kyoto rats after a 13-week dietary intake of canola oil or fatty acid composition-based interesterified canola oil mimic. *Food Chemistry and Toxicology*, *47*, 157-162. https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.10.022
28. Ortas, I., Iqbal, T., & Yücel, Y.C. (2019). Mycorrhizae enhances horticultural plant yield and nutrient uptake under phosphorus deficient field soil condition. *Journal of Plant Nutrition*. *42*, 1152-1164. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609500
29. Paseban Islam, B.M., Shakiba, R., Moghadam, M., & Ahmadi, M. R. (2001). The effects of water deficit stress on the quantitative and qualitative characteristics of oil turnip. *Scientific Research Journal of the University of Agriculture, Tabriz University*, *10*, 4. (in Persian with English abstract).
30. Pérez-López, E., Duran, J., & López-Romero, J.M. (2015). Seaweed extracts as bio stimulants in agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 27(6), 2095-2106.
31. Pirasteh-Anosheh, & H., Emam, Y. (2019). The role of plant growth regulators in enhancing crop yield under saline conditions: from theory to practice. *Journal of Agricultural Sciences of Iran*, *21*(3): 188-209. (in Persian with English abstract).
32. Rabiei, M., Kavoosi, M., & Tousi Kehal, P. (2011). Investigating the effect of nitrogen fertilizer levels and its distribution time on seed yield and some agricultural traits of canola (Hyola number 401) in autumn cultivation in Gilan. *Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources*, *15*(58): 199-212. (in Persian with English abstract).
33. Rameeh, V. (2014). Comparison of yield and other dependent traits of seed yield in spring and hybrid canola cultivars. The 8th Congress of Agriculture and Plant Breeding. Gilan University, Iran. 46 p. (in Persian).

34. Safari, M.R., Faraji, A., Dadashi, M.R., & Armin, M. (2021). The effect of nitroxin application and irrigation levels on quantitative and qualitative traits of rapeseed cultivars. *Plant Physiology*, *13* (44), 43-57. (in Persian with English abstract).
35. Safikhani, S., Biabani, A., Faraji, A., Rahmi Karizki, A., & Qolizadeh, A.A. (2015). The response of some agricultural characteristics of rapeseed cultivars to nitrogen fertilizer and planting date. *Ecophysiology of Agricultural Plants*, *9*(3): 429-446. (in Persian with English abstract).
36. Seyedi, M., & Hamzei, J. (2021). Evaluation of Rapeseed growth and yield under nitrogen fertilizer in rotation with Corn and Chickpea. *Journal of Plant Production Research*, *28*(1): 81-91. https://doi.org/10.22069/JOPP.2020.17248.2590
37. Sieling, K., & Christen, O. (2015). Crop rotation effects on yield of oilseed rape, wheat and barley and residual effects on the subsequent wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61, 16531-16549. https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1017569
38. Singh, M.V. (2001). Importance of sulphur in balanced fertilizer use in India. *Fertilizer News*, *46*(10), 13-18, 31-35.
39. Singh, Y.P., Arora, S., Mishra, V.K., & Singh, A.K. (2022). Synergizing microbial enriched municipal solid waste compost and mineral gypsum for optimizing rice-wheat productivity in sodic soils. *Sustainability*, *14*, 7809. https://doi.org/10.3390/su14137809
40. Smith, J., Johnson, L., & Davis, M. (2020). Effects of growth regulators and nitrogen fertilizers on grain filling rate in corn. *Journal of Agricultural Science*, *158*(3): 245-259.
41. Soleimanzadeh, H., Latifi, N., & Soltani, A. (2007). Relationship between phenology and physiological traits with seed yield in different rapeseed cultivars under rainfed conditions. *Agricultural Sciences and Natural Resources*. 14(5): 25-38.
42. Statistics of the Ministry of Agricultural Jihad. (2022). Ministry of Jihad and Agriculture, Planning and Economic Deputy, Information and Communication Technology Center, Iran. 89 p.
43. Surendra, S., & Singh, A. (1991). Direct and residual effect of pyrites on yield, sulphur content and quality characters of groundnut. *Journal of Indian Society of Soil Science*, *39*(2), 328-331.
44. Taheri, A., & Soleimani. A. (2015). The effect of different levels of nitrogen fertilizer on light absorption in the canopy and growth indicators of rapeseed cultivars. *Journal of Agricultural Research*, *8*(3), 235-258. (in Persian with English abstract).
45. Tedone, L., Ali, S.A., Verdini, L., & De Mastro, G. (2018). Nitrogen management strategy for optimizing agronomic and environmental performance of rainfed durum wheat under Mediterranean climate. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 2058-2074. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.215
46. Wang, L., Wang, Y., & Zhang, Y. (2024). Combined effects of organic and inorganic fertilizers on chlorophyll and growth performance in oilseed crops. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *26*(1), 112-124.
47. Yahyapoor, H., Niknezhad, Y., Fallah, H., Dastan, S., & Barati, D. (2023). Effect of soil amendments on yield components, yield and seed oil percentage of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Plant Production*, *13*(1):15-29. (in Persian with English abstract).
48. Yaghoobi, S.R. (2020). Seaweed Extract: Innovation for Organic Agriculture. *Journal of Technical and Vocational University*, *17*(2), 23-31. (in Persian).
49. Yaw, A.J., Richard, A., Osei, S., Kofi, H., Seth, O.D., & Adelaide, A. (2008). Chemical composition of groundnut, *Arachis hypogaea* (L) landraces. *African Journal of Biotechnology*, *7*(13): 2203-2208.
50. Zhang, Y., Liu, H., & Wang, X. (2020). Effect of nitrogen fertilizer on grain yield and harvest index in rice. *Field Crops Research*, *244*, 107-115.