

Research Article

Vol. 39, No. 5, Dec. 2025-Jan. 2026, p. 515-527

Reducing Phosphorus Fertilizer Consumption and Increasing Sesame (*Sesamum indicum*) Yield by Using an Appropriate Variety in Calcareous Soils of Southern Fars

F. Nourgholipour^{1*}, M. Rajai²

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: f.nourgholi@areeo.ac.ir)

2- Fars Province Agricultural and Natural Resources Research Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Darab, Iran

Received: 18 December 2025

Revised: 19 February 2026

Accepted: 28 February 2026

Available Online: 28 February 2026

How to cite this article:Nourgholipour, F., & Rajai, M. (2026). Reducing phosphorus fertilizer consumption and increasing sesame (*Sesamum indicum*) yield by using appropriate variety in calcareous soils of southern Fars. *Journal of Soil and Water*, 39(5), 515-527. (In Persian with English abstract).<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97072.1514>

Introduction

Phosphorus (P) is an essential nutrient for plant growth. In calcareous soils, the presence of calcium carbonate affects the availability of phosphorus to plants. Due to the special behavior of phosphorus and its low availability in calcareous soils of Iran, the need to identify crop varieties that are efficient in absorbing and utilizing this nutrient is vital. On the other hand, following the global fertilizer crisis and the sharp increase in input prices, focusing on efficient fertilization strategies has become an important priority. Among oilseed plants, sesame (*Sesamum indicum*) ranks fifth in the world and second in Iran in terms of oil production. Despite its economic importance, sesame has received less attention in phosphorus nutrition management studies. Therefore, this research was designed and implemented with the aim of providing a practical solution to improve yield per unit of phosphorus consumed, as a necessary step towards increasing farmers' profitability and strengthening the country's food security.

Materials and Methods

This study was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design at Darab Agricultural Research Station, Fars Province, for two years during the 2019 and 2020 growing seasons. Soil available phosphorus was below the optimal range and the irrigation system used was drip irrigation. The soil texture was relatively heavy, the percentage of soil organic carbon was low, and the equivalent calcium carbonate was high. The soil was non-saline and the amount of available phosphorus and zinc was insufficient. The irrigation water was non-saline. The treatments studied included five phosphorus levels (0, 5, 10, 15, and 20 kg ha⁻¹ of phosphorus from a triple superphosphate source with 20% phosphorus) and two sesame cultivars, Darab 14 and Darab 1. The phosphorus levels, along with 50% of nitrogen fertilizer, 50 kg ha⁻¹ potassium sulfate and 30 kg ha⁻¹ of zinc sulfate were applied before planting. The remaining required nitrogen fertilizer (50 kg ha⁻¹ of urea) was applied before flowering. At the harvest stage, yield and yield components, phosphorus and micronutrients concentrations in the grain were measured. Nutrient uptake in the grain, seed oil percentage, and phosphorus efficiency indices of the grain were also determined.

Results and Discussion



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97072.1514>

Based on the two-year average results, the grain and oil yield of the Darab 14 cultivar were 20.4% and 30.6% higher than those of the Darab 1 cultivar, respectively. The number of capsules per plant, the number of seeds per capsule, grain yield, and oil yield increased significantly up to the application level of 10 kg of phosphorus per hectare (by 23.5%, 20.4%, 42.7%, and 52.9%, respectively), although they showed no significant difference compared with the 5 kg P ha⁻¹ treatment. Therefore, for these cultivars, the application of 5 kg P ha⁻¹ is recommended in terms of grain and oil yield. Measurement of seed phosphorus concentration at different phosphorus levels indicated that a range of 0.25% to 0.28% can be considered as the seed phosphorus sufficiency threshold for these cultivars. Over the two-year average, the uptake of phosphorus, nitrogen, iron, manganese, and zinc was higher in Darab 14 than in Darab 1. The maximum uptake of nitrogen was recorded at 10 kg P ha⁻¹ (49.3 kg ha⁻¹), which was significantly different from the control treatment (36.3 kg ha⁻¹). However, with further increase in phosphorus application, the amount of nitrogen uptake decreased. The maximum uptake of iron occurred at 10 kg P ha⁻¹, but was not significantly different from the level of 5 kg P ha⁻¹. For the elements manganese, zinc, and copper, the maximum uptake was also recorded at 10 kg phosphorus/ha. Further increase in phosphorus application rate decreased the uptake of these elements. The uptake of zinc at 20 kg P ha⁻¹ decreased by about 4.9% compared to the control treatment. At all phosphorus application levels, Darab 14 outperformed Darab 1 in terms of grain yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. Darab 14 produced a higher yield per unit of phosphorus applied compared to Darab 1. Sesame seed yield was positively and significantly correlated with seed phosphorus uptake (0.82**). Sesame is known for its strong root system and low nutrient requirements, but the present study showed that sesame's ability to uptake phosphorus is limited at this level of available phosphorus (8.2 mg kg⁻¹). Seed yield was significantly correlated with nitrogen uptake (0.82**), iron uptake (0.59**), manganese uptake (0.86**), zinc uptake (0.75**), and copper uptake (0.73**).

Conclusion

By cultivating phosphorus-deficiency tolerant cultivars such as Darab 14, along with minimal phosphorus fertilizer application (5 kg ha⁻¹ under the present experimental conditions), farmers can not only achieve optimal yield but also significantly enhance profitability and increase resource use efficiency in calcareous soils with phosphorus deficiency.

For farmers, grain yield is more important than oil yield because sesame seeds are purchased based on seed weight rather than oil content. This results in a more favorable profit-to-cost ratio based on the harvested seed weight.

Acknowledgements

This project was part of the National Project of the Soil and Water Research Institute. The cooperation of this institute, as well as the cooperation of the Darab Agricultural Research Station of Fars Province, and the General Directorate of Cotton and Oilseeds of the Ministry of Agricultural Jihad for providing project fundings gratefully acknowledged.

Keywords: Benefit-to-cost ratio, Efficiency, Oil, Phosphorus uptake, Yield components

کاهش مصرف کود فسفر و افزایش عملکرد کنجد با به کارگیری رقم مناسب در خاک‌های آهکی جنوب فارس

فریدون نورقلی پور^{۱*} - مجید رجایی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

چکیده

کمبود فسفر در خاک‌های آهکی، یکی از موانع اصلی تولید دانه‌های روغنی در ایران و مناطق نیمه‌خشک است. از طرفی کمبود جهانی کودهای فسفره و افزایش قیمت آن، تعیین راهبردهای مدیریتی کم‌هزینه و اقتصادی را ضروری می‌سازد. از این رو آزمایشی مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی به مدت دو سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹) در منطقه داراب استان فارس روی دو رقم کنجد (داراب ۱۴ و داراب ۱) در پنج سطح فسفر (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل) در خاکی با فسفر قابل دسترس کم در سه تکرار اجرا شد تا رقم کارا برای جذب فسفر با عملکرد بهینه مشخص شود. عملکرد دانه و روغن، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، غلظت و جذب عناصر فسفر، نیتروژن، روی، آهن، منگنز و مس دانه، شاخص‌های کارایی مصرف فسفر، کارایی جذب فسفر، کارایی فسفر و نسبت سود به هزینه در ارقام محاسبه شد. بر اساس نتایج میانگین دوساله، عملکرد دانه و روغن داراب ۱۴ به ترتیب ۲۰/۴ و ۳۰/۶ درصد بیشتر از رقم داراب ۱ بود. تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه و عملکرد روغن تا سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به طور معنی‌داری افزایش یافت (به ترتیب ۲۳/۵، ۲۰/۴، ۴۲/۷ و ۵۲/۹ درصد) که البته با تیمار ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار، تفاوت معنی‌داری نداشت. بنابراین، برای این ارقام مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار از نظر عملکرد دانه و روغن قابل توصیه است. اندازه‌گیری فسفر دانه در سطوح مختلف فسفر نشان داد که می‌توان برای این ارقام غلظت ۰/۲۵ تا ۰/۲۸ درصد را به عنوان مقدار کفایت فسفر دانه در نظر گرفت. در میانگین دو سال، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز و روی در رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود. در تمامی سطوح فسفر مصرفی، رقم داراب ۱۴ از نظر عملکرد دانه، جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر نسبت به رقم داراب ۱ برتری داشت. رقم داراب ۱۴ نسبت به رقم داراب ۱ مقدار عملکرد بیشتری به ازای هر واحد فسفر مصرفی تولید کرد. نسبت سود به هزینه در رقم داراب ۱۴ بیشتر از داراب ۱ بود. در مجموع با کشت ارقام متحمل به کمبود فسفر همچون داراب ۱۴ همراه با مصرف حداقلی فسفر (۵ کیلوگرم فسفر در هکتار در شرایط آزمایش حاضر) می‌توان علاوه بر دستیابی به عملکرد بهینه، سودآوری و کارایی مصرف منابع را در خاک‌های آهکی دارای کمبود فسفر به طور چشمگیری افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: اجزای عملکرد، جذب فسفر، روغن، کارایی، نسبت سود به هزینه

مقدمه

می‌شود. علت اصلی این رویداد تشکیل ترکیبات فسفات کلسیم با خلالت بسیار کم در چنین خاک‌هایی است (Raiesi et al., 2022; Nourgholipour et al., 2022). این محدودیت در سطح وسیعی از اراضی زراعی ایران به گونه‌ای است که غلظت فسفر قابل دسترس در بسیاری از موارد، پایین‌تر از سطح بحرانی (۱۵ میلی گرم در کیلوگرم) گزارش شده است (Tehrani et al., 2012).

فسفر (P) از عناصر ضروری برای رشد گیاهان به شمار می‌رود (Raiesi et al., 2022). در خاک‌های آهکی، وجود کربنات کلسیم بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی تأثیر گذاشته (Taalab et al., 2019) و سبب کاهش قابلیت دسترسی عناصر به‌ویژه فسفر برای گیاهان

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*- نویسنده مسئول: Email: f.nourgholi@areeo.ac.ir

۲- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب، ایران

کمتر در مطالعات مدیریت تغذیه فسفر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، این پژوهش باهدف ارائه راهکاری عملی برای بهبود عملکرد در ازای هر واحد فسفر مصرفی، بهعنوان گامی ضروری در راستای افزایش سودآوری کشاورزان و تقویت امنیت غذایی کشور، طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب، استان فارس (عرض جغرافیایی ۲۶° ۵۴' شمالی، طول جغرافیایی ۴۴° ۲۸' شرقی، ارتفاع ۱۰۸۰ متر از سطح دریا) اجرا شد. خاک مورد مطالعه در رده‌بندی سامانه طبقه‌بندی خاک وزارت کشاورزی ایالات متحده از تیپ Carbonatic, Hyperthermic Aridic Calcustepts بود. میانگین بارش سالانه منطقه کمتر از ۲۸۰ میلی‌متر است. رژیم رطوبتی منطقه خشک-یوستیک و رژیم حرارتی آن هایپرترمیک می‌باشد. میانگین دمای هوا در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر در سال اول آزمایش (۱۳۹۸) به‌ترتیب ۳۳/۵، ۳۳/۶، ۲۹/۷ و ۲۳/۹ و در سال دوم (۱۳۹۹) به ترتیب ۳۴/۳، ۳۳/۵، ۳۰/۲ و ۲۶ درجه سانتی‌گراد بود.

هر سال قبل از شروع آزمایش در ابتدای خرداد ماه نمونه‌برداری از خاک مزرعه انجام و خصوصیات خاک همچون قابلیت هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی (Rhoades, 1982)، بافت خاک به‌روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، پی‌اچ در خمیر اشباع، کربنات کلسیم معادل (CCE) به‌روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک، کربن آلی به‌روش واکی بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، فسفر قابل‌جذب به روش آبی آسکوربیک (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم قابل‌دسترس (Sparks et al., 1996) و روی، مس، منگنز و آهن قابل استفاده به‌روش دی‌تی‌پی‌ا (Lindsay & Nortvell, 1987) اندازه‌گیری شد. همچنین خصوصیات آب چاه مورد استفاده در مزرعه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. آبیاری با نوار تیپ و دور آبیاری ۷ تا ۱۵ روز بود. به‌ترتیب در سال اول و دوم حجم کل آب مصرفی ۴۹۸۰ و ۵۰۶۰ متر مکعب بود. خصوصیات خاک و آب محل انجام آزمایش به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ذکر شده است.

در میان گیاهان دانه روغنی، کنجد (*Sesamum indicum*) از نظر تولید روغن در رتبه پنجم قرار دارد. سویا (*Glycine max* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.)، آفتابگردان (*Helianthus annus* L.)، بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.)، تخم پنبه و هسته نخل (palm kernel) در رتبه‌های بالاتری قرار دارند (Statista, 2023). سطح زیرکشت کنجد در ایران در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ مقدار ۵۸۱۷۵ هکتار و مقدار تولید دانه آن حدود ۶۱۶۲۷ تن بوده است (Anonymous, 2025).

بر اساس مطالعه انجام شده، کنجد حدود ۳۰ روز پس از کشت، فسفر کمی جذب می‌کند و پس‌ازآن، نیاز گیاه به فسفر به سرعت افزایش می‌یابد. حداکثر نیاز گیاه به فسفر بین روزهای ۶۰ تا ۹۰ پس از کشت رخ می‌دهد. به‌طور کلی، برای تولید ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار دانه، کنجد به ۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۱۴ کیلوگرم در هکتار اکسید فسفر و ۶۰ کیلوگرم در هکتار اکسید پتاسیم نیاز است (Ribeiro et al., 2019). نقش حیاتی فسفر بر عملکرد کنجد توسط محققین مختلفی گزارش شده است (Shehu et al., 2010 & 2014; Vora et al., 2018; Jat et al., 2020; Suchitha et al., 2021; Priyadarshini et al., 2021; Ibrahim et al., 2014; Arslan & Güre, 2018; Younis et al., 2020; Amare et al., 2019). مقدار بهینه فسفر خالص برای دستیابی به عملکرد مطلوب کنجد از ۲۵ تا ۸۰ کیلوگرم در هکتار متغیر است که این مقدار به مقدار فسفر قابل دسترس خاک بستگی دارد (Akhtar et al., 2015; Amare et al., 2019; Suchitha et al., 2021; Priyadarshini et al., 2021; Ibrahim et al., 2014; Arslan & Güre, 2018; Younis et al., 2020; El Mahdi, 2008). گیاهان در شرایط کمبود فسفر، سازوکارهای مختلفی را برای جذب فسفر اتخاذ می‌کنند (Korkmaz & Altıntaş, 2016). کارایی مصرف عناصر غذایی در گیاهان مختلف، با نوع عنصر، گونه‌ها/ارقام و محیط رشد مرتبط است (Adhikari et al., 2023).

با توجه به رفتار ویژه فسفر و زیست‌فراهمی پایین آن در خاک‌های آهکی ایران، شناسایی ارقام زراعی کارآمد از نظر جذب و استفاده از این عنصر، اهمیت به‌سزایی دارد. علاوه بر آن به‌دلیل بحران جهانی کود و افزایش شدید قیمت نهاده‌ها، تمرکز بر راه‌کارهای کوددهی کارآمد به یک اولویت ملی تبدیل شده است. گیاه کنجد باوجود اهمیت اقتصادی،

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the soil in experimental location

بافت Texture	Cu	Mn	Zn	Fe	P	K	OC	CCE	SP	EC	pH	سال Year
-			mg kg ⁻¹					%		dS m ⁻¹	-	
Silty loam	0.54	5.1	0.66	4.3	8.2	221	0.81	35	34	0.82	8.2	Year 1
Silty loam	0.41	4.3	0.51	5.6	8.5	230	0.76	32	36	0.86	8.1	Year 2

جدول ۲- نتایج تجزیه آب مورد استفاده در آزمایش
Table 2- Results of water analysis used in the experiment

SAR	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	pH	EC	سال Year
					meq l ⁻¹				-	dS m ⁻¹	
2.7	8.1	10.3	13.7	4.3	4.4	31.5	1.3	ناچیز Negligible	7.5	0.68	سال اول Year 1
2.77	7.2	9.9	14.9	5.1	4.8	30.5	1.2	ناچیز Negligible	7.2	0.78	سال دوم Year 2

استفاده از روش (Chapman & Pratt, 1962) و غلظت عناصر کم‌مصرف (میلی گرم بر کیلوگرم) با روش‌های استاندارد (Elmer & Conn, 1982; Walinga et al., 1989) اندازه‌گیری گردید. جذب عناصر غذایی در دانه نیز از طریق ضرب غلظت عنصر در عملکرد دانه محاسبه شد. درصد روغن دانه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج NMR (رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، بروکر، آلمان، سری ام کیو ۲۰) بر اساس روش استاندارد ISO ۱۰۵۶۵ (ISO organization, 1998) اندازه‌گیری شد. عملکرد روغن نیز از ضرب درصد روغن در عملکرد دانه، محاسبه گردید.

با استفاده از روش رز و ویسووا (Rose & Wissuw, 2012) با کارایی مصرف فسفر (PTE^۱) محاسبه شد (رابطه ۱). مقدار بالاتر PTE با تولید زیست‌توده بیشتر به ازای هر واحد جذب فسفر در گیاه مرتبط است. همچنین، کارایی جذب فسفر (PACE^۲) (رابطه ۲) و کارایی فسفر (PE^۳) (رابطه ۳) نیز مورد محاسبه قرار گرفتند (Nourgholipour et al., 2024).

کارایی فسفر یا نسبت عملکرد در حالت محدودیت به نسبت عملکرد در حالت کفایت، هر دو عامل کارایی در جذب و کارایی در مصرف فسفر را در نظر می‌گیرد.

کارایی مصرف فسفر (کیلوگرم بر کیلوگرم) = عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) / جذب فسفر (کیلوگرم در هکتار) در دانه (رابطه ۱)
کارایی جذب فسفر = جذب فسفر در تیمار شاهد (کیلوگرم در هکتار) / جذب فسفر (کیلوگرم در هکتار) در هر تیمار فسفر (رابطه ۲)
کارایی فسفر = عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در تیمار شاهد / عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در هر تیمار فسفر (رابطه ۳)
$$PTE \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \text{grain yield (kg ha}^{-1}\text{)} / P \text{ uptake in grain (kg ha}^{-1}\text{)}$$
 (۱)

$$PACE = P \text{ uptake in } P_0 \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} / P \text{ uptake in } P_{\text{treatment}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$
 (۲)

$$PE = \text{grain yield (kg ha}^{-1}\text{)} \text{ at } P_0 / \text{grain yield (kg ha}^{-1}\text{)} \text{ at } P_{\text{treatment}}$$

آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با ۳ تکرار در کرت‌هایی به مساحت ۱۰ متر مربع (با فاصله ردیف کاشت ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین دو بوته ۱۰ سانتی‌متر) و در دو سال در بازه ۱۳۹۸-۱۴۰۰ انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل پنج سطح فسفر (سطوح ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص از منبع سوپر فسفات تریپل با ۲۰ درصد فسفر) و دو رقم کنگد بودند. ارقام کنگد مورد استفاده شامل داراب ۱۴ (رنگ بذر قهوه‌ای روشن، چند شاخه، شکوفا، ارتفاع بوته ۱۰۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر) و داراب ۱ (رنگ بذر قهوه‌ای روشن، چند شاخه، شکوفا، ارتفاع بوته ۱۵۰ تا ۱۳۰ سانتی‌متر) بودند که بذر این ارقام از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. کشت به صورت دستی در سال اول در ۲۴ خرداد ماه و برداشت در ۲۱ مهر ماه انجام گرفت. برای سال دوم عملیات کاشت در ۲۰ خرداد ماه و برداشت در ۲۰ مهر ماه انجام گرفت.

کوددهی بر اساس آزمون خاک و دستورالعمل‌های مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای تغذیه کنگد انجام شد. ۵۰ درصد کود نیتروژن مصرفی (۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره)، مقادیر فسفر در هر تیمار، ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۳۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی، پیش از کاشت مصرف شدند. پیش از مرحله گلدهی (مرحله رشد ۲/۰۱ بر اساس کد دو رقمی رشد زواره و همکاران (Zavareh et al., 2008)) باقی‌مانده کود نیتروژن مورد نیاز (۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) مصرف شد. تنک کردن نیز در مرحله ۴ تا ۶ برگی انجام شد. برای کنترل علف‌های هرز، علف‌کش ترفلان به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار با استفاده از سم‌پاش پخش و پیش از کشت با خاک سطحی توسط دیسک سبک مخلوط شد.

عملیات برداشت در سال اول، ۱۲۰ روز و در سال دوم ۱۲۳ روز پس از کاشت انجام گرفت. در هر سال عملکرد دانه و اجزای عملکرد (تعداد کپسول در هر گیاه و تعداد دانه در هر کپسول) مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. برای تعیین غلظت نیتروژن، نمونه‌های گیاه هضم شدند و بر اساس تیتراسیون بعد از تقطیر توسط دستگاه کج‌دال مدل V40 اندازه‌گیری انجام شد (Lang, 1958). همچنین غلظت فسفر دانه (با

(۳)

تجزیه و تحلیل اقتصادی برای اندازه‌گیری‌های این مطالعه نیز انجام شد (Rehim et al., 2020, Kumar et al., 2017).

تحلیل آماری

تحلیل آماری ($p < 0.05$) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج

عملکرد و اجزای عملکرد

جدول ۳ نشان می‌دهد که تیمارهای فسفر تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و روغن و اجزای عملکرد (تعداد کپسول در هر بوته و تعداد دانه در هر کپسول) داشتند. همچنین عملکرد دانه و روغن به‌طور

معنی‌داری تحت تأثیر ارقام کنگد قرار گرفت. اثر متقابل سال $\times$ رقم بر عملکرد دانه و عملکرد روغن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر متقابل سال $\times$ سطوح فسفر و همچنین اثر متقابل سه‌گانه سال $\times$ رقم $\times$ سطوح فسفر بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد معنی‌دار نبود (جدول ۳).

عملکرد دانه رقم داراب ۱۴ در سال اول به‌طور معنی‌داری (۴۱/۷ درصد) بیشتر از رقم داراب ۱ بود، اما در سال دوم، تفاوت معنی‌داری بین دو رقم از نظر عملکرد دانه مشاهده نشد (جدول ۴). اثر متقابل رقم $\times$ سال بر عملکرد ممکن است به دلیل تفاوت در شرایط اقلیمی دو سال باشد که به رقم داراب ۱ کمک کرد تا در سال دوم عملکرد بیشتری تولید کند. روند مشابهی در رابطه با عملکرد روغن مشاهده شد به نحوی که عملکرد روغن رقم داراب ۱۴ در سال اول به‌طور معنی‌داری (۵۵/۹ درصد) از رقم داراب ۱ بیشتر بود. در میانگین دو سال، عملکرد دانه و روغن در رقم داراب ۱۴ به ترتیب ۲۰/۳ و ۳۰/۶ درصد بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده در رقم داراب ۱ بود (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر شاخص‌های عملکرد ارقام کنگد
Table 3- Composite analysis of variance for the studied treatments on the sesame cultivars yield parameters

منابع تغییر SOV	درجه آزادی df	تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Seeds in capsule	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد روغن Oil yield
سال Year (A)	1	5841**	1.29	34368 ^{ns}	275 ^{ns}
بلوک Block	2	81 ^{ns}	123*	108519*	41663**
Block بلوک در سال (year)	2	240	1.99	7603	135
رقم Cultivar (B)	1	8.07 ^{ns}	43.70 ^{ns}	582529**	238594**
A $\times$ B	1	2.40 ^{ns}	0.45 ^{ns}	473126**	102804**
P rate (C) مقدار فسفر	4	590**	185.50*	254158*	70569**
A $\times$ C	4	44.40 ^{ns}	3.70 ^{ns}	306905 ^{ns}	5346 ^{ns}
B $\times$ C	4	22.20 ^{ns}	76.80 ^{ns}	10221 ^{ns}	17459 ^{ns}
A $\times$ B $\times$ C	4	10.03 ^{ns}	0.93 ^{ns}	30537 ^{ns}	7004 ^{ns}
خطا Error	36	140	31.50	25421	6846
CV (%) ضریب تغییرات	-	15	9.30	15	17.5

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{ns} بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها.

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments

جدول ۴- تأثیر رقم و سال بر عملکرد دانه و روغن گیاه کنگد

Table 4- The influence of cultivar and year on the grain and oil yield of sesame

رقم Cultivar	عملکرد دانه Grain yield kg ha ⁻¹			عملکرد روغن Oil yield kg ha ⁻¹		
	Year1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
	Year1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
Darab 1 داراب ۱	900 b	1030 a	965 b	372 c	450 b	411 b
Darab 14 داراب ۱۴	1275 a	1050 a	1162 a	580 a	493 b	537 a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

معنی‌داری تشکیل اندام‌های زایشی را کاهش داده و در نتیجه عملکرد و اجزای عملکرد را کم می‌کند (Nourgholipour et al., 2022). وضعیت تولید کپسول در گیاه به‌عنوان یک شاخص مهم مرتبط با عملکرد دانه در نظر گرفته می‌شود (Jan et al., 2014) و تحت مدیریت تغذیه بهینه و افزایش محتوای فسفر قابل‌دسترس خاک، به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Iqbal et al., 2023). فسفر از طریق مسیرهای مختلف می‌تواند عملکرد دانه و روغن را بهبود بخشد (Wei et al., 2015; Da Silva et al., 2015).

محتوای فسفر و سایر عناصر غذایی دانه

تیمارهای مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر جذب فسفر و سایر عناصر غذایی شامل نیتروژن، آهن، روی، منگنز و مس داشتند (جدول ۶). اثر متقابل سال $\times$ رقم بر جذب نیتروژن، فسفر، آهن، روی، منگنز و مس دانه معنی‌دار بود (برای نیتروژن، فسفر، روی، منگنز و مس در سطح احتمال ۱ درصد و برای آهن در سطح احتمال ۵ درصد). اثر متقابل سال $\times$ سطوح فسفر، سطوح فسفر $\times$ رقم و همچنین اثر متقابل سه‌گانه سال $\times$ رقم $\times$ سطوح فسفر بر جذب عناصر غذایی، معنی‌دار نبود (جدول ۶).

در سال اول مطالعه، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، روی و مس در رقم داراب ۱۴ به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود (جدول ۷). در سال دوم، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، روی و مس بین دو رقم تفاوت معنی‌داری نداشت. در میانگین دو سال، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز و روی در رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود (جدول ۷). منابع علمی بیان می‌کنند که ارقام کنگد به‌دلیل تفاوت‌های ژنتیکی، توانایی متفاوتی برای جذب عناصر غذایی دارند (Wei et al., 2015).

مقایسه میانگین اثر اصلی فسفر بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و عملکرد روغن کنگد در جدول ۵ آورده شده است. با افزایش فسفر مصرفی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه و عملکرد روغن تا سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (به‌ترتیب ۲۳/۵، ۲۰/۴، ۴۲/۷ و ۵۲/۹ درصد) که البته با تیمار ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت. مصرف بیشتر فسفر، افزایش معنی‌داری در پاسخ‌های گیاهی یاد شده نسبت به سطوح ۵ و ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ایجاد نکرد (جدول ۵). با توجه به نتایج به‌دست آمده، برای این ارقام و در شرایط آزمایش حاضر مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار از نظر عملکرد دانه و روغن به‌عنوان سطح بهینه قابل توصیه است.

علائم کمبود فسفر و کاهش عملکرد در خاک‌هایی با غلظت فسفر قابل‌دسترس کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم شایع است (Shehu et al., 2010 & 2014; Vora et al., 2018; Jat et al., 2020; Suchita et al., 2021; Priyadarshini et al., 2021; Ibrahim et al., 2014; Arslan & Gür, 2018; Younis et al., 2020). بنابراین افزایش عملکرد با مصرف فسفر در خاک محل انجام آزمایش به‌دلیل غلظت ناکافی فسفر قابل‌دسترس خاک (به‌ترتیب ۸/۲ و ۸/۵ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک برای سال اول و دوم) می‌باشد. عدم تغییر اجزای عملکرد و کاهش عملکرد دانه و روغن در تیمارهای فراتر از ۱۰ کیلوگرم در هکتار فسفر می‌تواند به‌دلیل برهمکنش منفی فسفر با سایر عناصر غذایی باشد (Colmer et al., 1995).

کنجد در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی مانند گلرنگ، محتوای روغن بالاتری دارد. در کنار عامل ژنتیکی، عملکرد روغن به‌طور قابل توجهی با مدیریت کوددهی مرتبط است. تغذیه بهینه با فسفر، می‌تواند تولید اسیدهای چرب و در نتیجه تولید روغن را بهبود بخشد (Gao et al., 2025; Kumari & Saritha, 2017). کمبود فسفر به‌طور

جدول ۵- اثر اصلی مقادیر مختلف فسفر بر شاخص‌های عملکرد کنگد

Table 5- The main effects of different P rates on yield parameters of sesame

مقدار فسفر P rate kg ha ⁻¹	تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Seeds in capsule	عملکرد دانه Grain yield kg ha ⁻¹	عملکرد روغن Oil yield kg ha ⁻¹
0	68 b	54 b	871 d	376 d
5	75 ab	60 a	1115 ab	522 ab
10	84 a	65 a	1243 a	575 a
15	83 a	62 a	1072 bc	458 bc
20	83 a	60 a	979 cd	439 cd

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

جدول ۶- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر جذب برخی از عناصر غذایی در دانه ارقام کنجد

Table 6- Composite analysis of variance for the studied treatments on the sesame nutrient uptake

منابع تغییر	df	جذب فسفر P uptake	جذب نیتروژن N uptake	جذب روی Zn uptake	جذب منگنز Mn uptake	جذب آهن Fe uptake	جذب مس Cu uptake
SOV							
سال Year (A)	1	1.19*	296*	282**	875*	3801 ^{ns}	20.8 ^{ns}
بلوک Block	2	0.4 ^{ns}	228*	219**	4902*	289551**	120**
Block(year)	2	0.22	39	4	316	55578	43
رقم Cultivar (B)	1	3.74**	1115**	576**	10186**	88355*	65 ^{ns}
A × B	1	4.6**	956**	462**	7567**	79373*	221**
P rate (C)	4	2.6**	422**	295**	3836**	83901**	120**
A × C	4	0.21 ^{ns}	53 ^{ns}	72 ^{ns}	459 ^{ns}	13765 ^{ns}	15 ^{ns}
B × C	4	0.18 ^{ns}	40 ^{ns}	31 ^{ns}	313 ^{ns}	2885 ^{ns}	28 ^{ns}
A × B × C	4	0.2 ^{ns}	52 ^{ns}	17 ^{ns}	492 ^{ns}	4289 ^{ns}	13 ^{ns}
خطا Error	36	0.24	52	37.4	433	11221	22
CV (%)	-	17	17	19	16	19	23

علامت *** و * بیانگر معنی داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{ns} بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین تیمارها.

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments.

جدول ۷- تأثیر رقم و سال بر جذب عناصر غذایی در دو رقم کنجد

Table 7- The influence of cultivar and year on N, P, and Mn uptake of two sesame cultivars

رقم Cultivar	N uptake			P uptake			Mn uptake		
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			g ha ⁻¹		
	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
Darab 1	38 b	41 b	39.4 b	2.50 b	2.77 b	2.64 b	108 c	123 bc	116 b
Darab 14	54 a	42 b	48 a	3.55 a	2.72 b	3.13 a	157 a	127 b	142 a
رقم Cultivar	Fe uptake			Cu uptake			Zn uptake		
	g ha ⁻¹			g ha ⁻¹			g ha ⁻¹		
	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
Darab 1	482 b	538 b	510 b	18 b	21 ab	19.8 a	28 b	29 b	28.8 b
Darab 14	631 a	542 b	587 a	24 a	19 b	21.9 a	40 a	30 b	35 a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار حاصل شد که با مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۵)، می‌توان برای این ارقام غلظت ۰/۲۵ تا ۰/۲۸ درصد را به عنوان مقدار کفایت فسفر دانه در نظر گرفت (جدول ۸).

مقایسه میانگین اثر اصلی فسفر بر غلظت فسفر دانه و جذب عناصر غذایی مورد مطالعه در جدول ۸ آورده شده است. غلظت فسفر در دانه با افزایش مصرف فسفر تا سطح ۵ کیلوگرم در هکتار افزایش معنی داری یافت، اما در این رابطه بین سطوح فسفر تفاوت معنی داری مشاهده نشد (جدول ۸). با عنایت به اینکه بیشترین عملکرد دانه و روغن در سطح

جدول ۸- اثر اصلی تیمارهای فسفر بر غلظت فسفر و جذب عناصر غذایی فسفر، نیتروژن، آهن، مس و منگنز

Table 8- The effect of the P treatments on P concentration and nutrients uptake of P, N, Fe, Zn, Cu, and Mn

مقدار فسفر P rate	غلظت فسفر P concentration		جذب Uptake				
			P فسفر	N نیتروژن	Mn منگنز	Fe آهن	Cu مس
			kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	g ha ⁻¹	g ha ⁻¹	g ha ⁻¹
0	0.247b		2.16 c	36.3 c	107 d	433 b	16 c
5	0.252 a		2.81 b	49.3 a	144 ab	611 a	22 ab
10	0.280 a		3.48 a	49.7 a	149 a	624 a	24 a
15	0.283 a		3.03 b	43.8 ab	129 bc	586 a	22 ab
20	0.298 a		2.92 b	39.4 bc	115 cd	488 b	19 bc

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

غذایی شناخته می‌شود، اما مطالعه حاضر نشان داد که توانایی کنگد در جذب فسفر در این سطح از فسفر قابل دسترس ($8/2$ میلی گرم بر کیلوگرم) محدود است. عملکرد دانه همبستگی معنی داری با جذب نیتروژن ($0/82^{**}$)، جذب آهن ($0/59^{**}$)، جذب منگنز ($0/86^{**}$)، جذب روی ($0/75^{**}$) و جذب مس ($0/73^{**}$) داشت.

شاخص‌های جذب و کارایی فسفر

میانگین دو ساله عملکرد دانه، جذب فسفر و شاخص‌های کارایی فسفر در جدول ۹ نشان داده شده است. در تمامی سطوح فسفر مصرفی، داده‌ها بیانگر برتری رقم داراب ۱۴ از نظر عملکرد دانه، جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر، نسبت به رقم داراب ۱ بود. به عبارتی، رقم داراب ۱۴ نه تنها عملکرد بیشتری نسبت به رقم داراب ۱ داشت بلکه توانایی بیشتری در جذب فسفر و مقدار عملکرد تولیدشده به ازای هر واحد فسفر مصرفی داشت. با افزایش مقدار فسفر مصرفی، کارایی مصرف فسفر به طور قابل توجهی کاهش یافت (جدول ۹). چنین رویدادی در گیاه کلزا نیز مشاهده شده است (Nourgholipour et al., 2019). استفاده از کارایی مصرف فسفر به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای تفکیک ارقام کلزا در برخی مطالعات مورد توجه قرار گرفته است (Hu et al., 2015; Chen et al., 2010). کاهش کارایی مصرف فسفر در کرت‌هایی که کود فسفر دریافت کردند در مقایسه با شاهد، به این معنی است که این تیمارها، عملکرد زیست توده خشک کمتری به ازای هر واحد فسفر مصرفی، تولید نمودند (Akhtar et al., 2009). در رابطه با کارایی مصرف فسفر در نظر گرفتن این نکته ضروری است که این شاخص می‌بایست عمدتاً در محدوده غلظت عناصر غذایی کمتر از حد بهینه در گیاه مورد اندازه‌گیری قرار گیرد (Santa-Maria et al., 2015).

بیشینه جذب فسفر در دانه در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد که در مقایسه با تیمار شاهد، افزایشی حدود $61/1\%$ داشت (جدول ۸). تغییرات در ساختار ریشه و ترشحات ریشه ممکن است به عنوان واکنش‌های احتمالی مرتبط با افزایش جذب فسفر تحت سطوح ۰ تا ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در نظر گرفته شوند (Hunter et al., 2014). همچنین، به دلیل غلظت کم فسفر قابل دسترس در خاک اولیه که کمتر از ۱۵ میلی گرم در کیلوگرم بود، پاسخ گیاه به کاربرد فسفر مورد انتظار بود. اگر گیاهی در خاک با محتوای فسفر کم، رشد و توسعه بهینه داشته باشد، کوددهی با سطوح بالاتر هم منابع را هدر می‌دهد و هم به کیفیت و سلامت خاک و محیط زیست آسیب می‌رساند. افزایش مصرف فسفر از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، باعث افزایش جذب این عنصر نشد که ممکن است با برهمکنش فسفر و سایر عناصر غذایی در ارتباط باشد (Colmer et al., 1995).

تیمارهای فسفر مورد مطالعه، جذب نیتروژن، آهن، منگنز، روی و مس در دانه را نیز به طور معنی داری تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۸). بیشینه جذب نیتروژن در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ($49/7$ کیلوگرم در هکتار) ثبت شد که با تیمار شاهد ($36/3$ کیلوگرم در هکتار)، تفاوت معنی داری داشت ولی تفاوت معنی داری با سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار نداشت. با افزایش بیشتر مصرف فسفر، مقدار جذب نیتروژن کاهش یافت. بیشینه جذب آهن، منگنز، روی و مس در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار رخ داد، اما با سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار، تفاوت معنی داری نداشت. افزایش بیشتر میزان مصرف فسفر، جذب این عناصر را کاهش داد (جدول ۸). با عنایت به نتایج به دست آمده، مقدار ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار برای جذب بهینه عناصر غذایی قابل توصیه است.

عملکرد دانه کنگد همبستگی مثبت و معنی دار با جذب فسفر دانه داشت ($0/82^{**}$). کنگد با سیستم ریشه‌ای قوی و نیاز کم به عناصر

جدول ۹- میانگین دو ساله کارایی مصرف فسفر (PUTE)، کارایی جذب فسفر (PACE) و کارایی فسفر (PE) متأثر از سطوح فسفر و ارقام کنگد

Table 9- Two-year mean of Phosphorus Acquisition Efficiency (PACE), Phosphorus Utilization Efficiency (PUTE), and Phosphorus Efficiency (PE) as influenced by phosphorus levels and sesame cultivars

رقم Cultivar	مقدار فسفر P rate	عملکرد دانه Grain yield	جذب فسفر P uptake	PUTE	PACE	PE
داراب ۱ Darab 1	0	819	2.07	396	-	-
	5	1067	2.71	393	0.76	0.77
	10	1122	3.15	356	0.66	0.73
	15	958	2.61	368	0.79	0.86
	20	875	2.63	332	0.79	0.94
داراب ۱۴ Darab 14	0	923	2.24	412	-	-
	5	1243	3.06	406	0.73	0.74
	10	1363	3.75	363	0.60	0.68
	15	1186	3.42	347	0.66	0.78
	20	1097	3.20	343	0.70	0.84

دارد و ممکن است بسته به شرایط حاکم تغییر کند. کشاورزان در هدف زراعی خود به کارایی اقتصادی توجه می‌کنند و اغلب محصول آن‌ها بر اساس وزن دانه و نه بر اساس ویژگی‌های کیفی محصول تولیدشده مانند درصد روغن دانه، قیمت‌گذاری می‌شود. بنابراین، کشاورزان نسبت سود به هزینه عملکرد دانه را انتخاب خواهند کرد. در این شرایط، رقم داراب ۱۴ کنگد با مصرف ۵ تا ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (بسته به شرایط قیمت) گزینه بهتری خواهد بود.

• BCR (درآمد خالص تقسیم بر هزینه کود سوپر فسفات تریپل، TSP (سوپر فسفات تریپل دارای ۲۰ درصد فسفر)

• قیمت هر کیلوگرم کود سوپر فسفات تریپل برابر با ۷۰ هزار تومان و قیمت هر کیلوگرم دانه کنگد ۲۵۰ هزار تومان و برای هر کیلوگرم روغن کنگد ۴۷۵ هزار تومان در نظر گرفته شد. قیمت‌ها در تاریخ ۲۶ آذرماه ۱۴۰۴ استفاده شد.

• عملکرد دانه به‌ترتیب ۹۲۳ و ۸۱۹/۲ کیلوگرم در هکتار برای ارقام Darab 1 و Drab14 در تیمار P0 (بدون فسفر). عملکرد روغن به‌ترتیب ۴۰۶/۶ و ۳۴۵ کیلوگرم در هکتار برای ارقام Drab14 و Darab 1 در تیمار P0.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز و روی در رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود. در تمامی سطوح فسفر مصرفی، رقم داراب ۱۴ از نظر عملکرد دانه، جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر، نسبت به رقم داراب ۱ برتری داشت.

در هر دو رقم، کمینه مقادیر کارایی جذب فسفر (PACE) و کارایی فسفر (PE) در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد. در مقابل بیشینه مقادیر کارایی جذب فسفر در سطح ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار مشاهده شد (جدول ۹). مقادیر عددی کارایی فسفر در رقم داراب ۱ بیش‌تر از رقم داراب ۱۴ بود (جدول ۹). کارایی فسفر، همبستگی بیش‌تری با کارایی جذب فسفر دانه ($R^2=0.63^{**}$) در مقایسه با همبستگی با کارایی مصرف فسفر ($R^2=0.15^{**}$) داشت. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که در ارقام مذکور، کارایی جذب فسفر، حیاتی‌تر از کارایی مصرف فسفر است. در گیاه کلزا نیز مشاهده‌شده است که کارایی فسفر، بیش‌تر تحت تأثیر کارایی جذب فسفر است تا کارایی مصرف فسفر (Nourgholipour et al., 2019).

نسبت سود به هزینه برای عملکرد دانه و روغن

با کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، بیشینه افزایش عملکرد دانه و روغن ثبت شد که البته با مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار، تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۱۰). برای رقم داراب ۱۴، بهترین نسبت سود به هزینه برای دانه و روغن به‌ترتیب در سطح ۵ و ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار حاصل شد (۴۵/۷۱ و ۱۹/۴۱)، اما برای رقم داراب ۱، بهترین نسبت سود به هزینه برای دانه در سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار (۳۵/۴۳) و برای روغن در سطح ۱۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌دست آمد (۲۳/۶۱). نسبت سود به هزینه دانه در رقم داراب ۱۴، برتر از رقم داراب ۱ بود، اما در مورد نسبت سود به هزینه روغن، رقم داراب ۱ برتری داشت (جدول ۱۰).

نسبت سود به هزینه تحت تأثیر قیمت کود و قیمت محصول قرار

جدول ۱۰- نسبت سود به هزینه (BCR) برای عملکرد دانه و عملکرد روغن در مقادیر مختلف فسفر

Table 10- The BCR of the grain and oil yields in different P rates

رقم Cultivar	مقدار فسفر P rate	هزینه فسفر Expense of P from TSP	افزایش عملکرد دانه Increased grain yield	افزایش عملکرد روغن Increased oil yield	سود خالص دانه Net income of grain	سود خالص روغن Net income of oil	سود به هزینه دانه BCR of grain	سود به هزینه روغن BCR of oil
		(Toman. ha ⁻¹)	(kg. ha ⁻¹)	(kg. ha ⁻¹)	(Toman. ha ⁻¹)	(Toman. ha ⁻¹)	-	-
Darab 1		-	-	-	-	-	-	-
	5	1750	248	75	62000	35625	35.43	20.36
	10	3500	303	149	75750	70775	21.643	20.22
	15	5250	139	261	34750	123975	6.62	23.61
	20	7000	41	165	10250	78375	-1.46	11.12
Darab 14		-	-	-	-	-	-	-
	5	25	320	51	80000	24225	45.71	13.84
	10	50	440	143	110000	67925	31.43	19.41
	15	75	263	136	65750	64600	12.52	12.30
	20	100	174	-1	43500	-475	-6.21	-0.07

The ratio of benefit-to-cost (BCR)

سود به هزینه عملکرد روغن برای رقم داراب ۱ تحت تیمار ۱۵ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد. باین‌حال، رقم داراب ۱۴ در تیمار ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، نسبت سود به هزینه روغن نسبتاً بیش‌تری ایجاد کرد. از آنجاکه عملکرد دانه برای کشاورزان مهم‌تر از عملکرد روغن است، رقم داراب ۱۴ می‌تواند به‌عنوان رقم برتر در شرایط کمبود فسفر در نظر گرفته شود و در سطح فسفر ۸/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار برای این رقم قابل توصیه است.

سپاسگزاری

این پروژه بخشی از پروژه ملی مؤسسه تحقیقات خاک و آب بود. از همکاری این مؤسسه و نیز همکاری ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب استان فارس و نیز اداره کل پنبه و دانه‌های روغنی وزارت جهاد کشاورزی برای تأمین اعتبار پروژه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

به عبارتی رقم داراب ۱۴ نسبت به رقم داراب ۱ مقدار عملکرد بیشتری به ازای هر واحد فسفر مصرفی، تولید کرد. با کشت ارقام متحمل به کمبود فسفر از جمله داراب ۱۴ همراه با مصرف حداقلی کود فسفر (۵ کیلوگرم در هکتار در شرایط آزمایش حاضر) می‌توان علاوه بر دستیابی به عملکرد بهینه، سودآوری و کارایی مصرف منابع را در خاک‌های آهکی دارای کمبود فسفر به‌طور چشمگیری افزایش داد. با در نظر گرفتن نتایج نسبت سود به هزینه، دو حالت برای انتخاب رقم برتر وجود دارد: ۱- رقم برتر بر اساس نسبت سود به هزینه دانه ۲- رقم برتر بر اساس نسبت سود به هزینه روغن. رقم داراب ۱۴ بر اساس حالت اول و در سطوح مختلف فسفر به‌عنوان رقم برتر انتخاب شد. نسبت سود به هزینه دانه برای رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود و بیشترین مقدار در سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد. سطوح مختلف فسفر باعث ایجاد مقادیر متفاوت نسبت سود به هزینه برای عملکرد روغن در ارقام کنجد مورد مطالعه شدند. بیشینه نسبت

References

- Adhikari, S., Anuragi, H., Chandra, K., Tarte, S.H., Dhaka, S.R., Jatav, H.S., & Hingonia, K. (2023). Molecular basis of plant nutrient use efficiency-concepts and challenges for its improvement. In *Sustainable plant nutrition* (pp. 107-151). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00001-8>
- Akhtar, J., Baqa, S., Khan, S., Kakar, A.K., Abro, B.A., & Baloch, P.A. (2015). Effect of different levels of nitrogen and phosphorus on growth and yield of sesame. *International Journal of Biology and Biotechnology*, 12, 493-498. <https://doi.org/10.3390/agriculture9100227>
- Akhtar, M.S., Oki, Y., & Adachi, T. (2009) Mobilization and acquisition of sparingly soluble P sources by *Brassica* Cultivars under P-Starved Environment: I. Differential growth response, P-efficiency characteristics and P remobilization. *Journal of Integrative Plant Biology*, 51(11), 1008-1023. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2009.00874.x>
- Amare, M., Fisseha, D., & Andreassen, C. (2019). The effect of N and P fertilizers on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) in low-fertile soil of north-western Ethiopia. *Agriculture*, 9(10), 227. <https://doi.org/10.3390/agriculture9100227>
- Anonymous. (2025). Agricultural Statistics, Volume 1 (Crops). Statistics Center, Information and Communication Technology, Economic Planning Deputy, Ministry of Agricultural Jihad. Tehran, Iran. (In Persian)
- Arslan, H., & Gür, M.A. (2018). Effects of phosphorus and nitrogen application on sesame (*Sesamum indicum* L.) yield in semi-arid climatic conditions. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(4), 483-489. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JSTR/article/view/42714/44006>
- Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1), 68.
- Chen, S., Ding, G., Wang, Z., Cai, H., & Xu, F. (2015). Proteomic and comparative genomic analysis reveals adaptability of *Brassica napus* to phosphorus-deficient stress. *Journal of Proteomics*, 117, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2015.01.012>
- Colmer, T.D., Epstein, E., & Dvorak, J. (1995). Differential solute regulation in leaf blades of various ages in salt sensitive wheat and a salt tolerant wheat (*Lanphophyrum elongatum*). *Journal of Plant Physiology*, 108, 1714-1715. <https://doi.org/10.1104/pp.108.4.1715>
- Da Silva, C.J., da Silva, A.C., Zoz, T., Toppa, E.V.B., Silva, P.B., & Zanotto, M.D. (2015). Genetic divergence among accessions of *Carthamus tinctorius* L. by morpho-agronomic traits. *African Journal of Agricultural Research*, 10(25), 4825-4830. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9859>
- El Mahdi, A.R.A. (2008). Response of sesame to nitrogen and phosphorus fertilization in Northern Sudan. *Journal of Applied Biosciences*, 8(2), 304-308. [https://www.m.elewa.org/JABS/2008/8\(2\)/1.pdf](https://www.m.elewa.org/JABS/2008/8(2)/1.pdf)
- Elmer, P., & Conn, N. (1982). Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry. Perkin Elmer, Norwalk, CT.
- Gao, G., Zhang, L., Tong, P., Yan, G., & Wu, X. (2025). Enhancing oil content in oilseed crops: Genetic insights, molecular mechanisms, and breeding approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(15), 7390. <https://doi.org/10.3390/ijms26157390>

14. Gee, G., & Bauder, J. (1986). Particle-size Analysis. In: A. Klute, (ed), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. SSSA and ASA*, Madison, WI, 383-411.
15. Hu, Y., Ye X., Shi, L., Duan, H., & Xu. F. (2010). Genotypic differences in root morphology and phosphorus uptake kinetics in *Brassica napus* under low phosphorus supply. *Journal of Plant Nutrition*, 33(6), 889-901. <https://doi.org/10.1080/01904161003658239>
16. Hunter, P.J., Teakle, G.R., & Bending G.D. (2014). Root traits and microbial community interaction on relation availability and acquisition, with particular reference to *Brassica*. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1- 18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00027>
17. Ibrahim, M., Hussain, M., Khan, A., Jamal, Y., Alie, M., & Malik, M.F.A. (2014). Effect of nitrogen and phosphorus on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.). *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 18(1), 95-101. <https://doi.org/10.13140/2.1.4456.8965>
18. Iqbal, A., Qiang, D., Xiangru, W., Huiping, G., Hengheng, Z., Xiling, Z., & Meizhen, S. (2023). Phosphorus and carbohydrate metabolism contributes to low phosphorus tolerance in cotton. *BMC Plant Biology*, 23(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04100-6>
19. ISO organization. (1998). Oilseeds . Simultaneous determination of oil and water contents. Method using pulsed nuclear magnetic resonance spectrometry. ISO 10565:1998, International Standards for Business, Government and Society. URL://:http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=26317.
20. Jan, A., Ali, S., Adail, M., & Khan, A. (2014). Growth and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) as influenced by phosphorus levels under different row spacing. *Growth*, 4(22), 150-154. <https://core.ac.uk/download/pdf/234663899.pdf>
21. Jat, M., Yadav, P., Singh, R., Tikkoo, A.B.H.A., & Dadarwal, R. (2020). Response of phosphorus in sesame (*Sesamum indicum* L.) on coarse textured soils of South West Haryana. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(1), 2098-2101. <https://www.phytojournal.com/archives/2020/vol9issue1/PartA1/9-1-438140.pdf>
22. Korkmaz, K., & Altıntaş, Ç. (2016). Phosphorus use efficiency in canola genotypes. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 4(6), 424-430. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i6.424-430.726>
23. Kumar, U.K., Vani, K.P., Srinivas, A., & Babu, P.S. (2017). Yield, nutrient uptake and economics of safflower as influenced by INM under irrigation and rainfed planting. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 2178-2183. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.258>
24. Kumari, M., & Saritha, J. (2017). Effect of phosphorus fertilizers on oil seed crops. *Agriculture Update*, 12, 749-754.
25. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal*, 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
26. Loeppert, R.H., & Suarez D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In: D. L. Sparks, (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA and ASA, Madison, W. I.*; 437-474.
27. Lang, C.A. (1958). Simple microdetermination of Kjeldahl nitrogen in biological materials. *Analytical Chemistry*, 30, 1692-1694.
28. Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D. L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA and ASA, Madison, W. I*, 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
29. Nourgholipour, F., Mousavi, S.M., Zamani, S., & Ahmadi Adli, R. (2024). Growth, yield, and phosphorus efficiency of safflower cultivars as affected by phosphorus application in East Azerbaijan Province, Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2305840>
30. Nourgholipour, F., Hosseini, H.M., Tehrani, M.M., Motesharezadeh, B., Moshiri, F., & Mousavi, S.M. (2022). Phosphorus fractionation affected by root induced changes of two canola cultivars. *Eurasian Soil Science*, 55, 819-829. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060102>
31. Olsen, S.R., & Sommers L.E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page et al. (eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus*. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI., 403-430. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
32. Priyadarshini, A., Umesha, C., & Meshram. M.R. (2021). Influence of phosphorus and potassium levels on growth, yield and economics of sesame (*Sesamum indicum* L.) under eastern Uttar Pradesh condition. *Biological Forum – An International Journal*, 13, 645-50. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36152.06409>
33. Raiesi, T., Moradi, B., & Mousavi, S.M. (2022). Alterations of P fractions and some biochemical features in rhizosphere soil induced by the root activities of citrus rootstocks with different P acquisition efficiency. *Eurasian Soil Science*, 55, 212-220. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020107>
34. Rehim, A., Khan, M., Imran, M., Bashir, M.A., Ul-Allah, S., Khan, M.N., & Hussain, M. (2020). Integrated use of farm manure and synthetic nitrogen fertilizer improves nitrogen use efficiency, yield and grain quality in wheat. *Italian Journal of Agronomy*, 15(1), 29-34. <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1360>

35. Rhoades, J. (1982). Soluble salts. In: A. L. Page (ed.), *Methods of soil analysis*, Part 2, Chemical and microbiological properties, SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P0673.pdf
36. Ribeiro, R.M.P., Albuquerque, J.D., Pereira, C.C.A., Pereira, L.A.F., Barros Júnior, A.P., Silveira, L.D., & Grangeiro, L.C. (2019). Nutrient uptake in sesame cultivars under cultivation in semiarid conditions. *Bioscience Journal*, 35(1), 137-147. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n1a2019-39468>
37. Rose, T.J., & Wissuwa, M. (2012). Rethinking internal phosphorus utilization efficiency: a new approach is needed to improve PUE in grain crops. *Advances in Agronomy*, 116, 185-217. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394277-7.00005-1>
38. Santa-María, G.E., Moriconi, J.I., & Oliferuk, S. (2015). Internal efficiency of nutrient utilization: what is it and how to measure it during vegetative plant growth? *Journal of Experimental Botany*, 66, 3011-3018. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv162>
39. Shehu, H.E. (2014). Uptake and agronomic efficiencies of nitrogen, phosphorus and potassium in sesame (*Sesamum indicum* L.). *American Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology*, 4(2), 41-56. <https://doi.org/10.3923/ajpnft.2014.41.56>
40. Shehu, H.E., Kwari, J.D., & Sandabe, M.K. (2010). Nitrogen, phosphorus and potassium nutrition of sesame (*Sesamum indicum*) in Mubi, Nigeria. *Research Journal of Agronomy*, 3, 32-36. <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=rjagr.2009.32.36>
41. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). Methods of soil analysis. *Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
42. Statista. (2023). Worldwide oilseed production in 2022/2023, by type (in million metric tons). <https://www.statista.com/statistics/267271/worldwide-oilseed-production-since-2008/>
43. Suchitha, N.S., Singh, V., & George, S.G. (2021). Effect of phosphorus and sulphur levels on growth and yield of summer sesame (*Sesamum indicum* L.). *The Pharma Innovation Journal*, 10(11), 1183-1186. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue11/PartQ/10-10-536-561.pdf>
44. Taalab, A.S., Ageeb, G.W., Siam, H.S., & Mahmoud, S.A. (2019). Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 8(1), 96-105. <https://www.curreweb.com/mejar/mejar/2019/96-105.pdf>
45. Tehrani, M., Balali, M., Moshiri, F., & Daryashenas, A. (2012). Recommendation and the estimation of mineral fertilizers in Iran: Challenges and Solutions. *Research of Soil*, 26(2), 123-144. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2012.126365>
46. Vora, V.D., Hirpara, D.S., Vekaria, P.D., Sutaria, G.S., & Vala, F.G. (2018). Effect of phosphorus management on yield, nutrient uptake by sesame and post-harvest soil fertility under rainfed condition. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 65-69. <https://www.phytojournal.com/archives/2018/vol7issue5/PartB/7-4-482-258.pdf>
47. Walinga, I., Van Vark, W., Houba, V., & Van Der Lee, J. (1989). Soil and plant analysis. Wageningen Agriculture University. Wageningen, Netherland.
48. Wei, X., Liu, K., Zhang, Y., Feng, Q., Wang, L., Zhao, Y., Li, D., Zhao, Q., Zhu, X., Zhu, X., & Li, W. (2015). Genetic discovery for oil production and quality in sesame. *Nature Communications*, 6(1), 8609. <https://doi.org/10.1038/ncomms9609>
49. Younis, M., Shah, S., Inamullah, R.G., Jalal, A., Khalil, F., Hussain, I., & Fahad, M.A. (2020). Effect of phosphorus and sulphur on yield and yield components of sesame. *Sarhad Journal of Agriculture*, 20(10), 1-7. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2020/36.2.722.728>
50. Zavareh, M., Hoogenboom, G., Rahimian, M.H., & Arabd, A. (2008). A decimal code to describe the growth stages of sesame (*Sesamum orientale* L.). *International Journal of Plant Production*, 2(3), 193-206. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.612>