



Influence of Nitrogen and Sulfur Application Rates on Photosynthetic Performance and Nitrogen Use Efficiency in Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.)

Sahar Kiani-Motlagh¹ | Seyed Farhad Saberali² | Majid AghaAlikhani³

1. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: sahar.kiani@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: saberali@modares.ac.ir
3. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: maghaalikhani@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 11 February 2026
Received in revised form
15 June 2026
Accepted 16 July 2026
Published online 23 September 2026

Keywords:
Nitrogen recovery efficiency
Leaf greenness index
Nitrogen use efficiency
Plant nutrition

ABSTRACT

Objective: Excessive nitrogen (N) use causes severe economic and environmental problems, making the development of sustainable cropping systems with high nitrogen use efficiency (NUE) essential. This study investigated the effects of nitrogen and sulfur (S) fertilization on the photosynthetic characteristics, physiological responses, and nitrogen use efficiency of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.), with the main goal of determining optimal fertilizer rates for sustainable production.

Method: A field experiment was conducted during the 2024 growing season at the Research Farm of Tarbiat Modares University to evaluate the growth performance and nitrogen productivity of guar. A factorial arrangement in a randomized complete block design with three replications was used. The treatments comprised four nitrogen rates (0, 50, 100, and 150 kg N ha⁻¹) and two sulfur rates (0 and 100 kg S ha⁻¹).

Results: Nitrogen application significantly influenced leaf area index (LAI), leaf greenness, photosynthetic rate, cumulative shoot nitrogen, agronomic and physiological nitrogen efficiency, nitrogen recovery and grain yield. Leaf area index and leaf greenness increased in response to nitrogen up to 100 kg ha⁻¹, with no further significant changes at higher rates, whereas leaf photosynthetic rate continued to increase up to 150 kg N ha⁻¹. Compared with the unfertilized control, nitrogen treatments increased cumulative shoot nitrogen by 67.2%, and the highest agronomic, recovery, and physiological nitrogen efficiencies were all recorded at 100 kg N ha⁻¹. Agronomic nitrogen use efficiency at 100 kg N ha⁻¹ did not differ significantly from that at 50 kg N ha⁻¹ but was significantly higher than at 150 kg N ha⁻¹. Grain yield also responded strongly to nitrogen, increasing by 12.8%, 33.8%, and 16.9% at 50, 100, and 150 kg ha⁻¹, respectively. Sulfur application increased the photosynthetic rate by 25.9% during grain filling; however, despite this physiological improvement, it did not significantly affect final grain yield (1203 kg ha⁻¹) compared with the untreated control (1235 kg ha⁻¹). Grain yield was strongly correlated with LAI ($r=0.75$), shoot nitrogen accumulation ($r=0.73$), leaf greenness ($r=0.62$), and photosynthetic rate ($r=0.50$).

Conclusions: Under the soil and climatic conditions of the study area, an application rate of 100 kg N ha⁻¹ optimized seed yield while maximizing nitrogen use efficiency, suggesting that this rate represents a sustainable fertilization strategy that can improve fertilizer use patterns and reduce the environmental risks associated with excessive nitrogen application.

Cite this article: Kiani-Motlagh, S., Saberali, S. F., & AghaAlikhani, M. (2026). Influence of Nitrogen and Sulfur Application Rates on Photosynthetic Performance and Nitrogen Use Efficiency in Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Journal of Crops Improvement*, 28 (3), 417-434. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.410963.2977>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.410963.2977>

Publisher: University of Tehran Press.



تأثیر میزان مصرف کود نیتروژن و گوگرد بر عملکرد فتوستتزی و بهره‌وری نیتروژن در گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.)

سحر کیانی مطلق^۱ | سید فرهاد صابری علی^۲ | مجید آقاعلیخانی^۳

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. sahar.kiani@modares.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. saberali@modares.ac.ir
۳. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. maghaalikhani@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

هدف: مطالعه حاضر به منظور تعیین تأثیر کوددهی نیتروژن و گوگرد بر ویژگی‌های فتوستتزی، پاسخ‌های فیزیولوژیکی و شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن در گیاه گوار و تعیین مقدار بهینه آن‌ها برای تولید پایدار انجام شد. توجه به پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی مصرف بی‌رویه نیتروژن و توسعه سیستم‌های زراعی با کارایی بالاتر مصرف نیتروژن به یک ضرورت تبدیل شده است.

روش پژوهش: به منظور بررسی رشد و بهره‌وری نیتروژن در گیاه گوار در پاسخ به سطوح مختلف نیتروژن و گوگرد، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار سطح نیتروژن (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و دو سطح گوگرد (صفر و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد مصرف نیتروژن تأثیر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ، شاخص سبزیگی برگ، سرعت فتوستتزی، میزان نیتروژن تجمعی در اندام هوایی، راندمان زراعی مصرف کود نیتروژن، راندمان بازیابی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن و عملکرد دانه داشت. علاوه بر این، شاخص سطح برگ و سبزیگی برگ گوار تا سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اگرچه پاسخ افزایشی به میزان مصرف نیتروژن نشان داد، با این وجود مصرف سطوح بیش‌تر کود نیتروژن منجر به تغییرات معنی‌دار در صفات مذکور نگردید. در مقابل، افزایش معنی‌دار سرعت فتوستتزی برگ تا سطح مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار ادامه داشت. همچنین مصرف کود گوگرد موجب افزایش ۲۵/۹ درصدی سرعت فتوستتزی در طول دوره پرشدن دانه شد. مصرف نیتروژن نسبت به عدم مصرف آن سبب افزایش ۲/۶۷ درصدی نیتروژن تجمعی‌یافته در اندام هوایی گردید. بیشینه راندمان زراعی مصرف کود نیتروژن، راندمان بازیابی نیتروژن و راندمان فیزیولوژیکی نیتروژن در سطح مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آمد. همچنین مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به تیمار عدم مصرف کود نیتروژن به‌ترتیب موجب افزایش ۱۲/۸، ۳۳/۸ و ۱۶/۹ درصدی عملکرد دانه گوار شد. با وجود افزایش سرعت فتوستتزی در پاسخ به مصرف گوگرد، نتایج نشان داد که مصرف گوگرد (۱۲۰۳ کیلوگرم در هکتار)، در مقایسه با عدم مصرف آن (۱۲۳۵ کیلوگرم در هکتار)، تغییر معنی‌داری در عملکرد دانه ایجاد نکرد.

نتیجه‌گیری: در نهایت می‌توان بیان نمود که مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در شرایط اقلیمی و خاک منطقه مورد مطالعه، علاوه بر حصول عملکرد دانه مناسب می‌تواند باعث بهبود راندمان مصرف کود نیتروژن مصرفی، و در نهایت اصلاح الگوی مصرف کود مصرفی و کاهش خسارت زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کود نیتروژن مصرفی شود.

کلیدواژه‌ها:

تغذیه گیاهی

شاخص سبزیگی برگ

کارایی بازیابی نیتروژن

کارایی مصرف نیتروژن

استناد: کیانی مطلق، سحر؛ صابری علی، سیدفرهاد و آقاعلیخانی، مجید (۱۴۰۵). تأثیر میزان مصرف کود نیتروژن و گوگرد بر عملکرد فتوستتزی و بهره‌وری نیتروژن در گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *به زراعی کشاورزی*، ۲۸ (۳)، ۴۱۷-۴۳۴.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.410963.2977>



۱. مقدمه

گیاه گوار^۱ یا لوبیای خوشه‌ای، گیاهی تابستانه و یک‌ساله از خانواده بقولات است (مهلا و همکاران، ۲۰۲۰). این گیاه به‌دلیل تحمل نسبی بالای خود در برابر تنش خشکی و گرما، گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید (مهلا^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). وجود صمغ گالاکتومانان^۳ (گوارگام)، این گیاه را به یک محصول صنعتی مهم در سطح جهانی تبدیل کرده است (احمد^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). ارزش صنعتی بالا و افزایش چشم‌گیر تقاضا در جهان باعث شده که کشت این گیاه علاوه بر هند و پاکستان، در کشورهای دیگر از جمله ایران نیز موردتوجه قرار گیرد (مهلا و همکاران، ۲۰۲۰). در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران، پس از تنش خشکی، کمبود عناصر غذایی به‌دلیل فقر خاک و کمبود مواد آلی خاک تأثیر چشم‌گیری بر پتانسیل تولید عملکرد گیاهان زراعی دارد (بلالی و همکاران، ۱۴۰۲). در میان عناصر موردنیاز برای رشد و نمو گیاهان، نیتروژن (N) و گوگرد (S) دو عنصر پرمصرف هستند که نقش کلیدی در فرایندهای فیزیولوژیک گیاه، سنتز پروتئین‌ها، عملکرد فتوسنتزی و کمیت و کیفیت تولید محصول دارند (نارایان^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). با وجود توانایی گوار در تثبیت زیستی نیتروژن، در خاک‌های شنی و با مواد آلی کم که فراهمی نیتروژن محدود است، مصرف کود نیتروژن در شرایط کمی جمعیت ریزوبیوم‌های هم‌زیست در خاک ضروری به‌نظر می‌رسد (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۰). هم‌چنین، فرایند تثبیت زیستی نیتروژن نیازمند انرژی زیادی بوده و می‌تواند حدود ۳۰ درصد از تولید گیاه را مصرف کند (آلمیدا^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). گوگرد نیز به‌عنوان جزء ساختاری اسیدهای آمینه گوگرددار (متیونین و سیستئین)، گلوتاتیون و کوفاکتورها، در متابولیسم پروتئین، فعالیت آنزیمی و تنظیم پاسخ گیاه به تنش‌ها نقش ایفا می‌کند (نارایان و همکاران، ۲۰۲۲). این عنصر هم‌چنین نقش ویژه‌ای به‌عنوان مولکول واسطه در شبکه‌های سیگنالینگ و القای اثرات تنش‌ها دارد (نارایان و همکاران، ۲۰۲۲).

۲. پیشینه پژوهش

نیتروژن به‌عنوان جزء اصلی آمینواسیدها، کلروفیل و اسیدهای نوکلئیک، تعیین‌کننده رشد رویشی، توسعه سطح برگ و تجمع زیست‌توده است (تایز^۷ و همکاران، ۲۰۱۵). مصرف کود نیتروژن می‌تواند باعث افزایش محتوای کلروفیل برگ، میزان روبیسکو و بهبود راندمان جذب نور و ظرفیت کربوکسیلاسیون شود که در نهایت به افزایش نرخ فتوسنتز خالص می‌انجامد (آلمیدا و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات نشان داده‌اند که مصرف کود نیتروژن موجب افزایش کلروفیل برگ، ماده خشک و عملکرد دانه گوار شد و کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار نسبت به ۵۰ کیلوگرم افزایش معنی‌دار عملکرد را به‌همراه داشت (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۰). هم‌چنین در لوبیا قرمز، مصرف تا ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بیش‌ترین زیست‌توده و عملکرد دانه را ایجاد کرد (صابرعلی و همکاران، ۱۳۹۹). این یافته‌ها نشان می‌دهد که تعیین سطح بهینه مصرف نیتروژن می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکردی داشته باشد، موضوعی که بررسی آن در گیاه گوار به‌ویژه تحت شرایط مدیریتی متفاوت ضروری است.

1. *Cyamopsis tetragonoloba* L.

2. Mahla

3. Galactomannan

4. Ahmed

5. Narayan

6. Almeida

7. Taiz

گوگرد در سنتز برخی آمینواسیدهای و عملکرد آنزیم‌ها و لیپیدها (فلوریدور^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ نارایان و همکاران، ۲۰۲۲) نقش ایفا می‌کند و کمبود آن نه تنها به‌طور مستقیم رشد گیاه را محدود می‌کند، بلکه به‌طور متقابل بر کارایی مصرف کود نیتروژن نیز تأثیر می‌گذارد (کومار^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات نشان می‌دهند که در شرایط کمبود گوگرد، گیاه قادر به استفاده بهینه از نیتروژن موجود نیست که این امر منجر به کاهش چشم‌گیر در بازدهی کودهای نیتروژنه و تجمع نیترات در بافت‌های گیاهی می‌شود (کوربت^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). در پژوهشی بر روی کلزا نیز گزارش شده است که مصرف گوگرد سبب افزایش محتوای کلروفیل برگ، سطح برگ و نرخ فتوسنتز شده است (کومار و همکاران، ۲۰۲۱). مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد در لوبیا همراه با باکتری تیوباسیلوس موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد (خیری‌استیار و همکاران، ۲۰۱۸) و در کلزا مصرف ۴۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار نسبت به عدم مصرف، عملکرد و اجزای عملکرد را به‌طور معنی‌دار افزایش داد (نامداری و همکاران، ۱۴۰۳). این نتایج اهمیت بررسی برهم‌کنش نیتروژن و گوگرد را در بهبود پاسخ فیزیولوژیک و عملکردی گیاهان زراعی برجسته می‌کند.

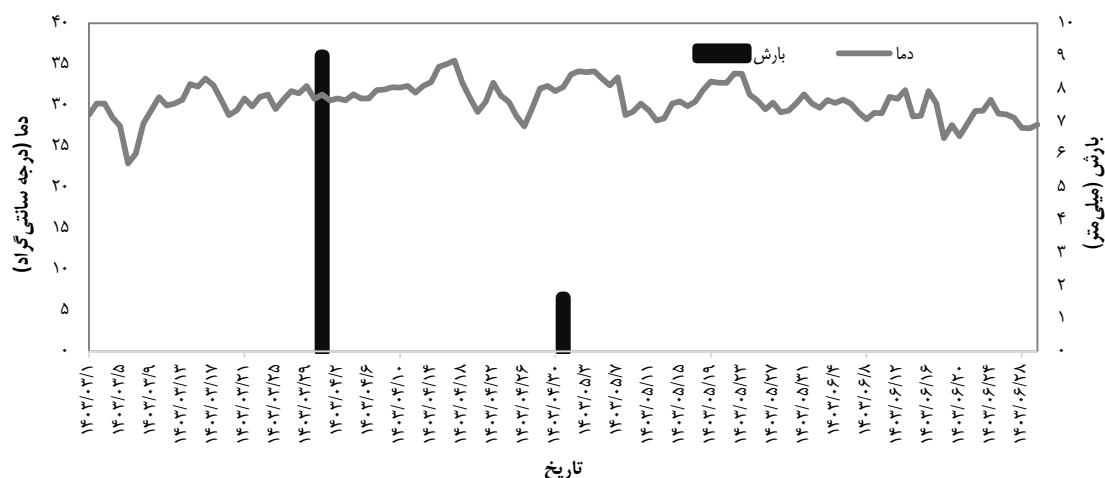
عملکرد بالای ارقام جدید مستلزم استفاده از کودهای معدنی است که علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، خطر آلودگی محیط‌زیست را نیز تشدید می‌کند. از این رو به‌دلیل چالش‌های اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از اندازه نیتروژن، توسعه سیستم‌های زراعی پایدارتر و با مصرف کود کم‌تر ضروری هستند (آینه‌بند^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش اسیدیته خاک، افزایش آب‌شویی نیترات، کاهش جمعیت و فعالیت میکروبی خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هدررفت منابع طبیعی از جمله مهم‌ترین اثرات ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنی است (آناس^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). در مستندات علمی، کارایی کود نیتروژن مصرفی به دو جز اصلی شامل کارایی جذب نیتروژن یا کارایی بازیابی و هم‌چنین کارایی استفاده از نیتروژن تقسیم شده است (علی و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به محدودبودن مطالعات درباره نیازهای تغذیه‌ای گوار در ایران و به‌ویژه کمبود اطلاعات درباره برهم‌کنش نیتروژن و گوگرد بر شاخص‌های فیزیولوژیک و کارایی مصرف نیتروژن، انجام پژوهش حاضر ضروری به‌نظر می‌رسد. از این رو، این تحقیق با هدف بررسی پاسخ عملکرد دانه و راندمان مصرف نیتروژن در گیاه گوار تحت شرایط مصرف و عدم مصرف کود گوگرد انجام شد تا بتواند مبنایی علمی برای تعیین سطوح بهینه مصرف این عناصر فراهم آورد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. محل اجرا

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳ و در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، واقع در ۱۷ کیلومتری غرب تهران (عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۹ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲۷۵ متر بالاتر از سطح دریا) اجرا شد. براساس آمار هواشناسی بلندمدت، میانگین بارندگی سالانه منطقه ۲۴۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. در طول فصل رشد گوار، میانگین دما ۲۸/۷ درجه سانتی‌گراد و مجموع بارندگی ۶/۱ میلی‌متر ثبت شد (شکل ۱). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش که پیش از کاشت نمونه‌گیری شده بود در جدول (۱) ارائه شده است. براساس نتایج آزمون خاک، بافت خاک مزرعه آزمایشی شنی لومی بود.

1. Fleuridor
2. Kumar
3. Courbet
4. Ayneband
5. Anas



شکل ۱. دمای روزانه و بارش ماهانه در طول دوره رشد گوار در سال ۱۴۰۳

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در عمق صفر-۳۰ سانتی‌متری

کربن آلی	پتاسیم	فسفر	گوگرد-سولفاتی	نیتروژن-نیتراتی	نیتروژن کل	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته	بافت خاک
(درصد)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(کیلوگرم بر هکتار)	(درصد)			
۰/۳۳	۱۹۲	۱۲/۹۵	۱۸	۶۴/۶۸	۰/۰۵۱	۱/۴۷	۸/۸	لومی شنی

۲.۳. نحوه اجرا

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. دو سطح گوگرد شامل شاهد (عدم کاربرد) و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و چهار سطح نیتروژن شامل شاهد (عدم کاربرد)، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، از منبع کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) به عنوان تیمارهای آزمایشی در این پژوهش در نظر گرفته شدند. با توجه به غیربومی بودن گیاه گوار در شرایط اقلیمی ایران و احتمال پایین استقرار و فعالیت جمعیت‌های مؤثر ریزوبیوم هم‌زیست در خاک، فرایند تثبیت زیستی نیتروژن ممکن است با محدودیت مواجه شود. از این رو، سطوح مختلف نیتروژن به منظور ارزیابی پاسخ گیاه به تأمین نیتروژن معدنی و تعیین میزان بهینه مصرف کود نیتروژن در نظر گرفته شد. نیاز گوگردی اغلب گیاهان زراعی معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ کیلوگرم گوگرد خالص در هکتار گزارش شده است (مارشنر^۱، ۲۰۱۲). با این حال، به دلیل نیاز به اکسیدشدن گوگرد عنصری و تبدیل آن به فرم سولفات قابل جذب، توصیه می‌شود مقدار مصرف گوگرد عنصری چند برابر میزان توصیه‌شده برای گوگرد سولفاتی باشد تا اثرگذاری مطلوبی بر رشد گیاه داشته باشد (فلوری‌دور و همکاران، ۲۰۲۳). بر این اساس، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد بنتونیت‌دار (۹۰ درصد گوگرد خالص) به عنوان سطح احتمالی مناسب و بهینه در این پژوهش انتخاب شد.

۳.۳. عملیات کاشت و داشت

مراحل آماده‌سازی بستر کاشت شامل اقداماتی مانند شخم عمیق با استفاده از گاوآهن برگرداندار در فصل پاییز، دیسک‌زدن زمین برای خردکردن کلوخه‌ها در فصل بهار و افزودن ۱۵۰ کیلوگرم کود منوپتاسیم فسفات قبل از کاشت بود. پس از تسطیح

زمین، بذره‌های گوار در تاریخ ۱۵ خردادماه ۱۴۰۳ کشت شدند. هر کرت آزمایشی دارای ابعاد ۶ متر طول و ۲/۵ متر عرض (۱۵ مترمربع) بود. فاصله بین بلوک‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. تراکم کشت ۲۰ بوته در مترمربع با فاصله ۱۰ سانتی‌متر روی ردیف و ۵۰ سانتی‌متر بین ردیف‌ها تعیین شد. هر کرت شامل پنج ردیف کاشت بود که نمونه‌برداری در طول دوره رشد بعد از رهاکردن ۰/۵ متر حاشیه از ردیف‌های دوم و چهارم انجام شد و قسمت مرکزی ردیف‌های دوم و سوم (سه متر طولی) دست نخورده باقی ماند. برای تعیین عملکرد دانه و اجزای مرتبط با آن نیز قسمت مرکزی در ردیف سوم (دو متر طولی) در انتهای فصل رشد برداشت شد. کود گوگرد بنتونیت‌دار دو هفته قبل از کاشت و کود اوره به دو بخش تقسیم شد که ۵۰ درصد پس از سبزشدن و استقرار گیاه (V0، زمانی که برگ‌های کوتیلدون به‌طور کامل باز) و ۵۰ درصد در انتهای رشد رویشی گیاه و شروع گل‌دهی (R1، ظهور اولین گل در گیاه) مصرف شدند (آدامز^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). آبیاری کرت‌های آزمایشی با تناوب ۳ تا ۴ روز یک بار از طریق نوار تیپ انجام شد. در طول دوره آزمایش، کنترل علف‌های هرز به روش وجین دستی انجام شد و یک بار نیز کنترل شیمیایی برای مبارزه با شته انجام گرفت.

۴.۳. صفات اندازه‌گیری و روش نمونه‌برداری

صفات موردبررسی شامل سطح برگ و سرعت فتوسنتز در مرحله ابتدای پرشدن دانه (R3، وقتی دانه‌های نارس در اولین غلاف روی گیاهان حداقل سه میلی‌متر قطر داشتند) (آدامز و همکاران، ۲۰۲۰)، میزان ماده خشک، عملکرد دانه و میزان تجمع نیتروژن در اندام هوایی در زمان برداشت بود. به‌منظور اندازه‌گیری سطح برگ در زمان پرشدن دانه، نمونه‌برداری تخریبی از ۵۰ سانتی‌متر طولی ردیف (پنج گیاه) انجام شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، سطح برگ گیاهان توسط دستگاه سطح‌برگ‌سنج مدل Delta-T ساخت کشور انگلستان انجام شد. سرعت فتوسنتز نیز با استفاده دستگاه فتوسنتز متر (مدل LI-COR 6400، ساخت کشور آمریکا) بین ساعت ۱۲ تا ۲ بعدازظهر روی برگ‌چه‌های آخرین برگ توسعه‌یافته در دو بوته در هر تیمار اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که به‌دلیل زمان‌بر بودن اندازه‌گیری تبادلات گازی با دستگاه فتوسنتز متر، اندازه‌گیری نرخ فتوسنتز طی سه روز متوالی انجام شد، به‌طوری‌که در هر روز تنها تیمارهای مربوط به یک بلوک مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین تنظیمات مربوط به شدت نور و غلظت دی‌اکسیدکربن در طول اندازه‌گیری‌ها ثابت نگه داشته شد. در برداشت نهایی، نیز دو متر طولی ردیف (معادل یک مترمربع) برای تعیین عملکرد دانه برداشت شد. نمونه‌های برداشت‌شده به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌وسیله آون (مدل Memmert ULE600، ساخت آلمان) خشک شدند. برای تعیین غلظت نیتروژن در اندام هوایی، تعداد سه بوته خشک‌شده پس از پودرشدن در آسیاب، با استفاده از ترکیب سولفوریک‌اسید و سالیسیک‌اسید به‌همراه آب‌اکسیژنه هضم شدند. سپس غلظت نیتروژن از طریق روش رنگ‌سنجی با استفاده از میزان جذب نور در طول موج ۶۶۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر تعیین گردید (تمینگهاف^۲ و هوبا، ۲۰۰۴). لازم به ذکر است که در مرحله پرشدن دانه و یک روز پس از آبیاری، پس از کنارزدن خاک اطراف بوته‌ها با استفاده از بیل در چندین تیمار سه بوته به‌همراه سیستم ریشه آن‌ها برداشت شد. سپس ریشه‌ها به‌آرامی با آب شسته شدند تا ذرات خاک چسبیده به آن‌ها جدا گردد. در اغلب بوته‌ها گره تثبیت نیتروژن روی ریشه‌ها تشکیل نشده بود و در اندک بوته‌هایی که گره تشکیل شده بود نیز پس از برش‌زنی آن‌ها، رنگ صورتی که نشانه فعالیت مؤثر باکتری رازوبیوم است (فرانکوف-لیندبرگ^۳ و داهلین^۴، ۲۰۱۳)، مشاهده نگردید. وجود جمعیت‌های بومی رازوبیوم در خاک می‌تواند منجر به تشکیل گره در گیاهان لگوم شود، هرچند این گره‌ها لزوماً از نظر

1. Adams
2. Temminghoff
3. Frankow-Lindberg
4. Dahlin

تثبیت نیتروژن فعال و مؤثر نیستند (رحمان و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به این نتایج، می‌توان انتظار داشت که عمده نیتروژن تجمع‌یافته در اندام هوایی گیاه گوار حاصل جذب نیتروژن از خاک بوده و سهم تثبیت نیتروژن حاصل از فعالیت باکتری ریزوبیوم ناچیز ارزیابی می‌شود.

۳.۵. شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن

شاخص‌های کارایی زراعی مصرف کود نیتروژن کاربردی (رابطه ۱)، کارایی بازیابی کود نیتروژن (رابطه ۲) و کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن (رابطه ۳) نیز از طریق روابط زیر محاسبه گردید (علی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{عملکرد دانه در تیمار کودی} - \text{عملکرد دانه در تیمار شاهد} = \text{راندمان زراعی کود نیتروژن مصرفی} \times \text{میزان نیتروژن مصرفی}$$

$$\text{رابطه ۲)} \quad \frac{\text{میزان نیتروژن گیاه در تیمار کودی} - \text{میزان نیتروژن گیاه در تیمار شاهد}}{\text{میزان نیتروژن مصرفی}} \times 100 = \text{راندمان بازیابی نیتروژن}$$

$$\text{رابطه ۳)} \quad \frac{\text{عملکرد دانه در تیمار کودی} - \text{عملکرد دانه در تیمار شاهد}}{\text{میزان نیتروژن گیاه در تیمار کودی} - \text{میزان نیتروژن گیاه در تیمار شاهد}} = \text{راندمان زراعی کود نیتروژن مصرفی}$$

در این روابط، میزان عملکرد دانه به کیلوگرم در هکتار، میزان مصرف نیتروژن و مقدار نیتروژن در اندام هوایی گیاه نیز به کیلوگرم در هکتار می‌باشند.

۳.۶. تجزیه آماری

به‌منظور تجزیه آماری، پس از آزمون نرمال بودن خطای آزمایشی داده‌ها، تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. میانگین داده‌ها با آزمون LSD^۲ و در سطح ۵ درصد مقایسه شدند.

۴. یافته‌های پژوهش و بحث

۴.۱. شاخص سطح برگ و شاخص سبزیگی برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نیتروژن مصرفی تأثیر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ و شاخص سبزیگی آن در مرحله پرشدن دانه گیاه گوار داشت. با این وجود تأثیر مصرف گوگرد و برهم‌کنش مصرف گوگرد و نیتروژن نیز بر هیچ‌یک از این دو صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج هم‌چنین نشان داد که مصرف کود نیتروژن نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش متوسط ۳۴ درصدی و ۱۱/۴ درصدی به‌ترتیب در شاخص سطح برگ و شاخص سبزیگی برگ شد (شکل ۲). از طرفی میزان افزایش شاخص سطح برگ در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به عدم مصرف آن به‌ترتیب معادل ۲۱/۸، ۳۶/۸ و ۴۳/۳ درصد بود. با این‌وجود مصرف بیش از ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن افزایش معنی‌داری بر شاخص سطح برگ نداشت. میزان افزایش شاخص سبزیگی برگ در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به عدم مصرف آن به‌ترتیب معادل ۴/۵، ۱۳/۸ و ۱۵/۸ درصد بود (شکل ۲). بیش‌ترین شاخص سبزیگی برگ معنی‌دار نیز مربوط به مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود.

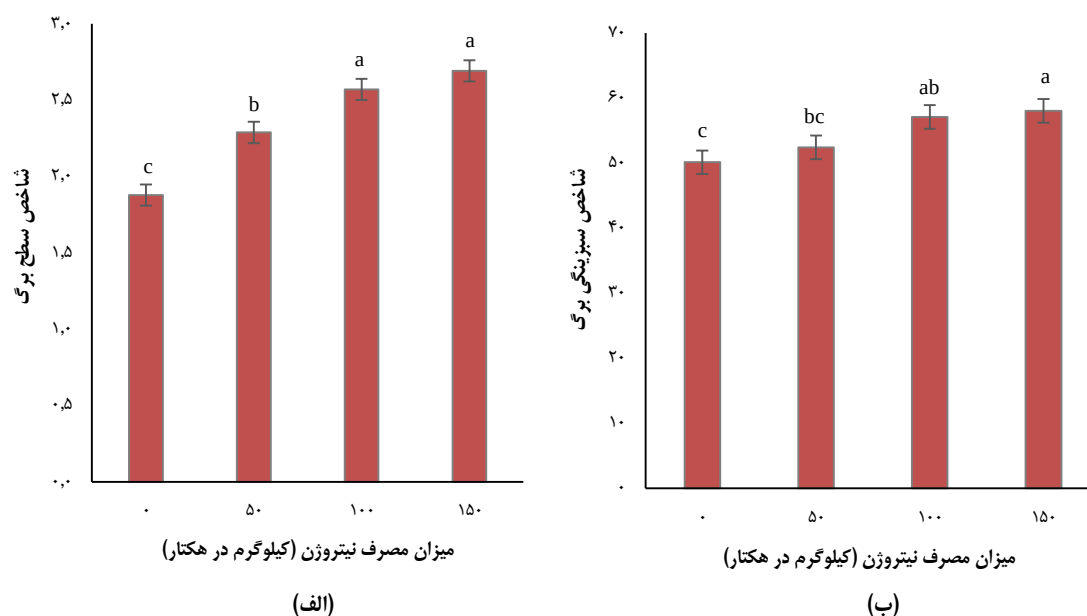
1. Ali

2. Least Significant Difference

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس شاخص سطح برگ، شاخص سبزیگی، سرعت فتوسنتز و نیتروژن تجمعی در اندام هوایی تحت تأثیر مقدار کود نیتروژن و گوگرد مصرفی

منابع تغییرات	درجه آزادی	شاخص سطح برگ	شاخص سبزیگی	سرعت فتوسنتز برگ	نیتروژن تجمعی در اندام هوایی
بلوک	۲	۰/۰۰۰۹ ^{ns}	۶/۵۵۴ ^{ns}	۲۲/۷۰۰۳ ^{**}	۲۲۶/۹۹۸ ^{ns}
گوگرد (S)	۱	۰/۰۵۰۸ ^{ns}	۱۴/۱۵۳ ^{ns}	۷۴/۵۴۱۳ ^{**}	۱۲۵/۰۳۱ ^{ns}
نیتروژن (N)	۳	۰/۷۸۳۹ ^{**}	۸۵/۳۳۲ ^{**}	۶۳/۳۵۷۷ ^{**}	۱۱۰۴۱/۶۷ ^{**}
گوگرد-نیتروژن	۳	۰/۰۳۲۶ ^{ns}	۵/۲۱۷ ^{ns}	۰/۶۵۹۰۸ ^{ns}	۱۸۶/۰۴۱ ^{ns}
خطا	۱۴	۰/۰۳۱۸۶	۵۹/۸۰۲	۱/۹۴۲۷۳	۱۳۶/۸۴
ضریب تغییرات (درصد)		۸/۸۷	۴/۶	۹/۷	۹/۳۵

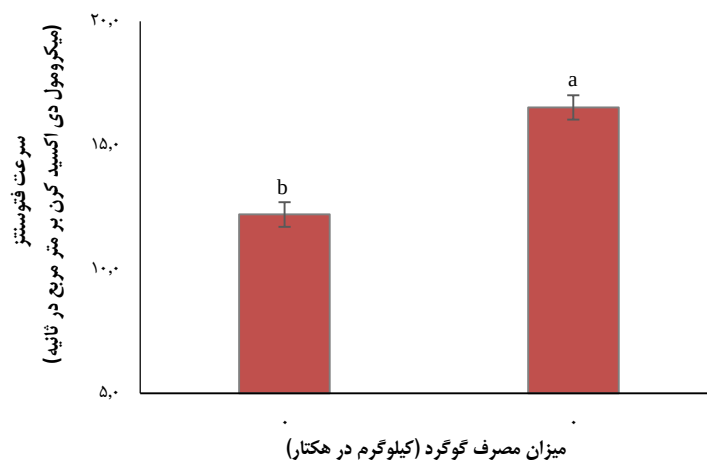
ns و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در ۱ درصد.



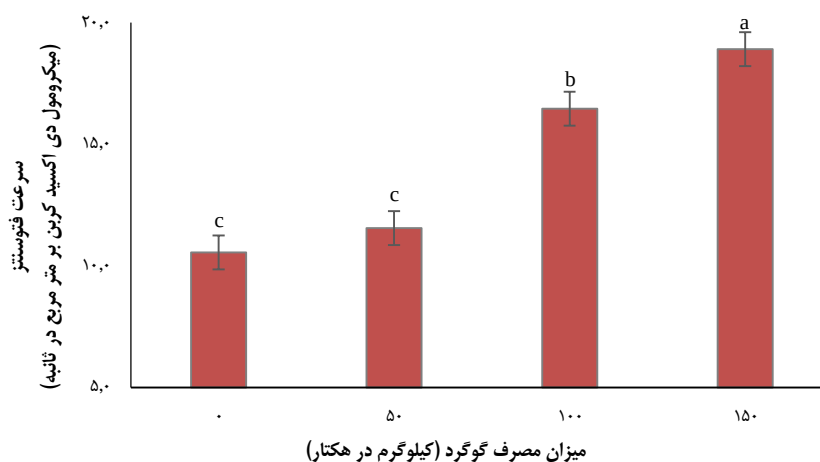
شکل ۲. پاسخ شاخص سطح برگ (الف) و شاخص سبزیگی برگ (ب) در مرحله پرشدن دانه به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطای نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.

۲.۴. سرعت فتوسنتز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نیتروژن و گوگرد مصرفی تأثیر معنی‌داری بر سرعت فتوسنتز برگ گیاه گوار در مرحله پرشدن دانه داشت، با این‌وجود برهم‌کنش این دو عامل معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که مصرف گوگرد نسبت به عدم مصرف، سرعت فتوسنتز برگ را ۲۶/۱۲ درصد افزایش داد (شکل ۳). نتایج همچنین نشان داد که مصرف کود نیتروژن نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش متوسط ۴۸/۱۷ درصدی در سرعت فتوسنتز برگ شد. از طرفی، میزان افزایش سرعت فتوسنتز برگ در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به عدم مصرف آن به ترتیب معادل ۹/۳۹، ۵۵/۹۸ و ۷۹/۱۴ درصد بود (شکل ۴).



شکل ۳. پاسخ سرعت فتوسنتز برگ در مرحله پرشدن دانه به میزان کود گوگرد مصرفی. نوار خطی نمایش داده‌شده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.



شکل ۴. پاسخ سرعت فتوسنتز برگ در مرحله پرشدن دانه به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطی نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.

۳.۴. میزان نیتروژن تجمعی در اندام هوایی و راندمان زراعی مصرف کود نیتروژن

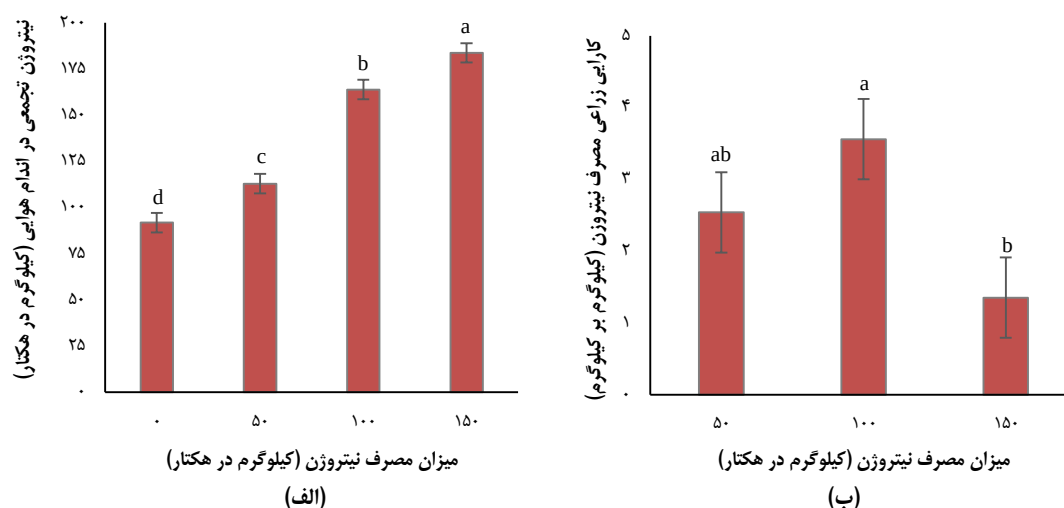
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نیتروژن مصرفی تأثیر معنی‌داری بر میزان تجمع نیتروژن در اندام‌های هوایی (کیلوگرم در هکتار) در انتهای فصل رشد و راندمان زراعی مصرف کود نیتروژن در گوار داشت، با این وجود مصرف کود گوگرد و برهم‌کنش نیتروژن و گوگرد مصرفی تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول ۳). مصرف نیتروژن نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش متوسط ۶۷/۲ درصدی نیتروژن تجمعی یافته در اندام هوایی آن شد. به علاوه میزان نیتروژن تجمعی یافته در اندام هوایی در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به عدم مصرف آن به ترتیب معادل ۲۲/۹، ۷۸/۴ و ۱۰۰/۱ درصد افزایش یافت (شکل ۵). به علاوه راندمان زراعی مصرف کود نیتروژن در سطح مصرف ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار حداکثر بود (۳/۵۶ کیلوگرم عملکرد دانه به ازای هر کیلوگرم کود نیتروژن). اگرچه این افزایش اختلاف معنی‌داری با راندمان زراعی مصرف نیتروژن (۲/۵۴ کیلوگرم عملکرد دانه به ازای هر کیلوگرم کود نیتروژن مصرفی) در تیمار ۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نداشت، اما نسبت به تیمار ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به طور معنی‌داری بیش تر بود.

جدول ۳. آنالیز واریانس نیتروژن تجمی در اندام هوایی، کارایی زراعی نیتروژن، کارایی بازایی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن تحت تأثیر مقدار کود نیتروژن و گوگرد مصرفی

منابع تغییرات	درجه آزادی	کارایی زراعی مصرف نیتروژن	کارایی بازایی نیتروژن	کارایی فیزیولوژیک نیتروژن	عملکرد دانه
بلوک	۲	۴/۷۴۵۰ ns	۱۰۶/۳۴۴ ns	۱۱۵/۰۰ ns	۲۹۰۲/۱۲۴۴ ns
گوگرد	۱	۱/۶۹۵۴۸ ns	۱۰۱۵/۷۹۲ ns	۶۳/۶۱۶ ns	۵۸۲۵/۵۳۱۱ ns
نیتروژن	۳ (۲)	۹/۹۷۷۷**	۱۷۰۷/۹۶۷*	۱۰۷۷/۱۶۵ *	۱۲۹۴۴۵/۶۳۸۵***
گوگرد*نیتروژن	۳ (۲)	۰/۹۰۹۲ ns	۲۷۸/۷۹۵۶ ns	۱۱۱/۶۲۶ ns	۸۳/۴۵۲۲ ns
خطا	۱۴ (۱۰)	۳/۰۵۳۵	۳۴۶/۵۰۳۲	۲۴۲/۷۸۵	۵۳۱۹/۳۸۹۴
ضریب تغییرات (درصد)		۲۴/۶	۳۰/۱۳	۲۶/۵۵	۱۵/۳

ns و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد.

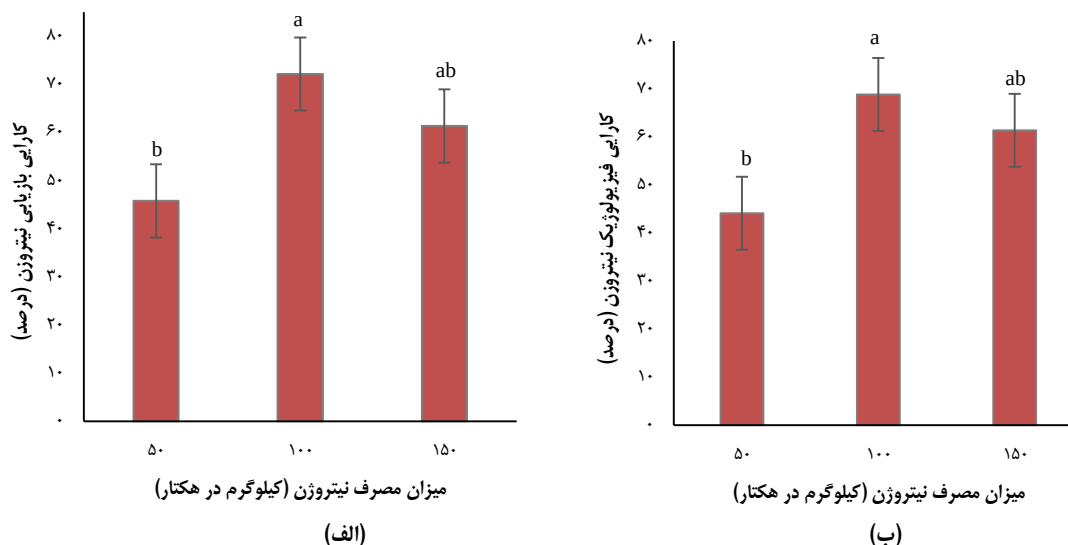
اعداد داخل پرانتز درجه آزادی در صفات کارایی زراعی نیتروژن، کارایی بازایی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن را نشان می‌دهد. این صفات نسبت به تیمار شاهد بدون کود محاسبه شدند، لذا سطح تیمار نیتروژن در این صفات، سه سطح بود.



شکل ۵. پاسخ میزان نیتروژن تجمع یافته در اندام هوایی گیاه گوار در زمان برداشت (الف) و کارایی زراعی نیتروژن مصرفی به میزان کود نیتروژن مصرفی (ب). نوار خطی نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.

۴.۴. راندمان بازایی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن

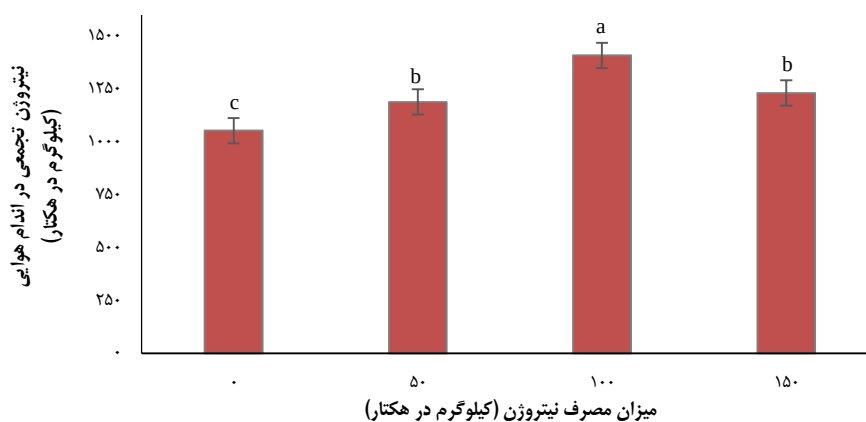
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان نیتروژن مصرفی تأثیر معنی‌داری بر راندمان بازایی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن در گوار داشت. با این وجود، مصرف کود گوگرد و برهم‌کنش نیتروژن و گوگرد مصرفی تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نیز نشان داد که مصرف گوگرد در مقایسه با عدم مصرف آن تأثیری معنی‌داری بر راندمان بازایی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن نداشت. نتایج مقایسه میانگین هم‌چنین نشان داد که هر دو صفت راندمان بازایی نیتروژن و راندمان فیزیولوژیک نیتروژن در سطح مصرف ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار حداکثر بودند که بیانگر بازایی ۷۲/۲ درصد کود نیتروژن مصرفی در اندام هوایی و کارایی فیزیولوژیک تولید ۶۸/۹ کیلوگرمی دانه به‌ازای هر واحد نیتروژن تجمع یافته در اندام هوایی گوار بود. اگرچه راندمان بازایی نیتروژن و راندمان فیزیولوژیک نیتروژن در این تیمار اختلاف معنی‌داری با تیمار ۵۰ کیلوگرم مصرف کود نیتروژن در هکتار داشتند، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار ۱۵۰ کیلوگرم مصرف کود نیتروژن نداشتند (شکل ۶).



شکل ۶. پاسخ پاسخ کارایی بازیابی نیتروژن (الف) و کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن (ب) گیاه گوار به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطای نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.

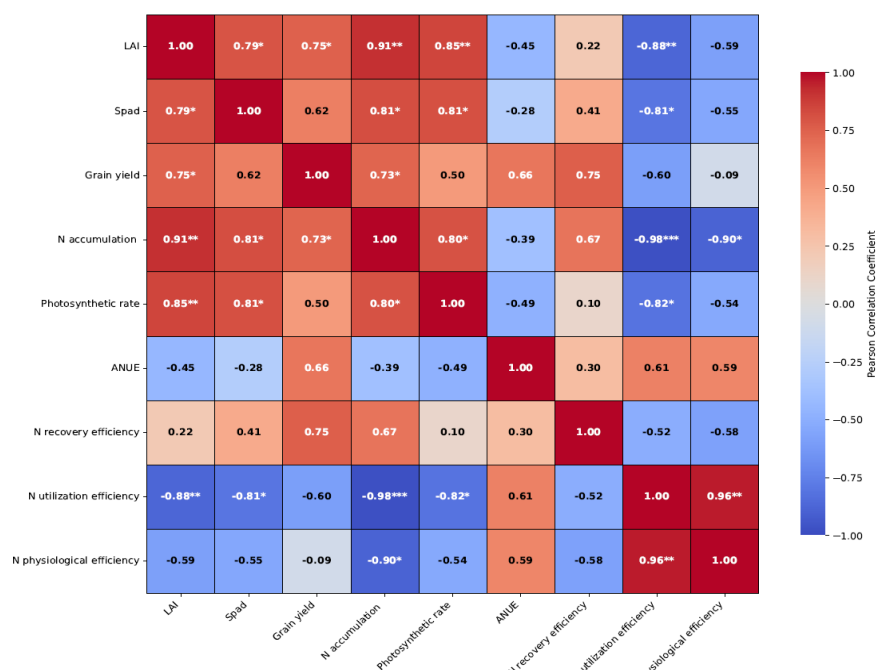
۵.۴. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف نیتروژن تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه گوار در واحد سطح داشت، درحالی‌که اثر گوگرد و برهم‌کنش نیتروژن × گوگرد معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نیز نشان داد که مصرف گوگرد (۱۲۰۳ کیلوگرم در هکتار)، در مقایسه با عدم مصرف (۱۲۳۵ کیلوگرم در هکتار)، تغییر معنی‌داری در عملکرد دانه ایجاد نکرد. در مقابل، کاربرد نیتروژن موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد، به‌طوری‌که مصرف نیتروژن به‌طور میانگین افزایش ۲۱/۲ درصدی عملکرد دانه را نسبت به تیمار بدون نیتروژن نشان داد. افزایش عملکرد دانه گوار در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به تیمار عدم مصرف کود نیتروژن به‌ترتیب ۱۲/۸، ۳۳/۸ و ۱۶/۹ درصد بود (شکل ۷). بیش‌ترین افزایش عملکرد در سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مشاهده شد، درحالی‌که افزایش بیش‌تر نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نه‌تنها موجب افزایش بیش‌تر عملکرد نشد، بلکه میزان پاسخ عملکردی را نیز کاهش داد.



شکل ۷. پاسخ عملکرد دانه گوار به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطای نمایش داده‌شده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.

نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که ضریب همبستگی بین عملکرد دانه و شاخص سطح برگ (۰/۷۵)، تجمع نیتروژن در اندام هوایی (۰/۷۳)، شاخص سبزیگی برگ (۰/۶۲) و سرعت فتوسنتز (۰/۵۰) قابل توجه بود، با این‌وجود این ضریب تنها در مورد شاخص سطح برگ و تجمع نیتروژن در اندام هوایی از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۸). عملکرد دانه هم‌چنین همبستگی بالایی با کارایی زراعی نیتروژن (۰/۷۵) کارایی بازیابی نیتروژن (۰/۶۶) داشت.



شکل ۸. نقشه ضرایب همبستگی بین صفات اندازه‌گیری‌شده در گیاه گوار

۶. بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که نیتروژن نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود شاخص سطح برگ، شاخص سبزیگی برگ، ظرفیت فتوسنتزی، جذب نیتروژن و در نهایت عملکرد دانه گوار داشت، درحالی‌که مصرف گوگرد در اغلب صفات موردبررسی تأثیر معنی‌داری نشان نداد. افزایش شاخص سطح برگ، شاخص سبزیگی برگ، سرعت فتوسنتز، تجمع نیتروژن در اندام هوایی و عملکرد دانه در پاسخ به مصرف نیتروژن با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد (کیانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۵؛ اپی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). نیتروژن یکی از عناصر کلیدی در ساخت کلروفیل، پروتئین‌های فتوسنتزی و آنزیم‌های دخیل در تثبیت و احیای کربن است و از این طریق ظرفیت تولید ماده خشک و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (تایز و همکاران، ۲۰۱۵). افزایش سطح برگ در پاسخ به مصرف نیتروژن می‌تواند موجب توسعه سطح جذب نور و افزایش دریافت تابش خورشیدی توسط کانوپی گیاه شود، درحالی‌که افزایش مقدار شاخص سبزیگی نشان‌دهنده افزایش محتوای کلروفیل و توان فتوسنتزی برگ‌هاست. بنابراین، بهبود این دو شاخص در اثر مصرف نیتروژن می‌تواند بیانگر افزایش ظرفیت تولید ماده خشک و در نهایت افزایش بالقوه عملکرد دانه باشد (تایز و همکاران، ۲۰۱۵). براساس

1. Qiang

2. Epie

یافته‌های تایز و همکاران (۲۰۱۵)، افزایش دسترسی به نیتروژن با اثرگذاری بر فاکتورهای غیرروشنه‌ای، زمینه‌ساز تسهیل سنتز پروتئین‌های ساختاری کلروپلاست و بهبود کاتالیز آنزیم‌های فتوسنتزی می‌شود؛ فرایندی که در نهایت به تجمع بیش‌تر کلروفیل و بهبود معنی‌دار شاخص سبزیگی می‌انجامد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که بهبود وضعیت نیتروژن موجب تحریک رشد برگ، افزایش سطح برگ، افزایش محتوای کلروفیل و در نتیجه بهبود جذب نور و تولید ماده خشک می‌شود (اپی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کیانگ و همکاران، ۲۰۲۵). از دیدگاه فیزیولوژیک، نیتروژن از طریق افزایش سنتز پروتئین‌های کلروپلاستی، بهبود فعالیت روبیسکو، افزایش ظرفیت انتقال الکترون و ارتقای کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، ظرفیت بیوشیمیایی فتوسنتز را افزایش می‌دهد (فلکساس^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ نارایان و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، افزایش نیتروژن موجب تأخیر در پیری برگ، حفظ فعالیت آنزیمی و افزایش پایداری سیستم فتوسنتزی در طول دوره پرشدن دانه نیز می‌شود (نارایان و همکاران، ۲۰۲۲). این موضوع به‌ویژه در شرایطی که هدف افزایش مدت فعالیت منبع برای پشتیبانی از رشد و عملکرد است، اهمیت بالایی دارد. بنابراین، افزایش معنی‌دار سرعت فتوسنتز و طول مدت فعالیت فتوسنتزی در سطوح بالاتر نیتروژن را می‌توان نتیجه مستقیم بهبود ساختار و عملکرد دستگاه فتوسنتزی دانست.

افزایش ظرفیت فتوسنتزی و تولید عملکرد در پاسخ به نیتروژن، نیاز گیاه به جذب بیش‌تر این عنصر را نیز افزایش داد. به همین دلیل، تجمع نیتروژن در اندام هوایی با افزایش مصرف نیتروژن به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. نتایج مطالعات انجام‌شده روی سایر لگوم‌ها نیز نشان داده است که مصرف نیتروژن معدنی، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد یا در شرایط محدودیت فعالیت ریزوبیوم، می‌تواند جذب و تجمع نیتروژن را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (کوردووا^۲ و همکاران، ۲۰۲۲؛ اپی و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، استفاده مناسب از کود نیتروژن در گیاهان لگوم از جمله گوار، به‌ویژه در مراحل با نیاز بالای نیتروژن، می‌تواند به‌عنوان راه‌کاری مؤثر برای دستیاب به رشد مطلوب و افزایش تولید گیاه در نظر گرفته شود. شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن نیز نشان دادند که پاسخ گیاه به نیتروژن تنها ناشی از افزایش مقدار جذب این عنصر نبوده، بلکه کارایی استفاده از نیتروژن جذب‌شده نیز اهمیت زیادی داشته است. بیش‌ترین راندمان بازبایی نیتروژن در سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مشاهده شد که بیانگر هماهنگی مناسب بین عرضه نیتروژن و ظرفیت جذب و مصرف گیاه بود. درحالی‌که در سطوح پایین‌تر نیتروژن (۵۰ کیلوگرم در هکتار)، محدودیت عرضه نیتروژن می‌تواند رشد ریشه و توسعه سطح برگ را کاهش داده و در نتیجه تقاضای گیاه برای جذب و انباشت نیتروژن را محدود کند که این امر به کاهش راندمان بازبایی منجر می‌شود (تایز و همکاران، ۲۰۱۵). در بسیاری از گیاهان زراعی، افزایش مصرف نیتروژن فراتر از نیاز واقعی گیاه نیز منجر به کاهش کارایی جذب و استفاده از نیتروژن می‌شود که این امر ممکن است به‌دلیل اشباع سیستم جذب ریشه، افزایش تلفات نیتروژن (آب‌شویی، تبخیر و دنیتریفیکاسیون) و محدودیت‌های فیزیولوژیک در مصرف نیتروژن در فرایندهای متابولیکی باشد (بهات^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). این موضوع با کاهش نسبی راندمان‌های مصرف نیتروژن در بالاترین و پایین‌ترین سطح کودی نیز همخوانی دارد.

پاسخ عملکرد دانه بازتابی از تغییرات ایجادشده در ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکردی گیاه است. نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که ضریب همبستگی بین عملکرد دانه و شاخص سطح برگ (۰/۷۵)، تجمع نیتروژن در اندام هوایی (۰/۷۳)، شاخص سبزیگی برگ (۰/۶۲) و سرعت فتوسنتز (۰/۵۰) قابل‌توجه بود، با این‌وجود این ضریب تنها در مورد شاخص سطح برگ و تجمع نیتروژن در اندام هوایی از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۸). عملکرد دانه هم‌چنین همبستگی بالایی با کارایی زراعی نیتروژن (۰/۷۵) و کارایی بازبایی نیتروژن (۰/۶۶) داشت. این نتایج بیانگر آن است که

افزایش عملکرد بیش از هر چیز به توسعه سطح فتوسنتزکننده، افزایش جذب نیتروژن و استفاده مؤثر از آن در فرایندهای متابولیکی وابسته بوده است. در سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، هماهنگی مطلوبی بین توسعه کانوبی، افزایش محتوای کلروفیل، بهبود فتوسنتز، جذب نیتروژن و تخصیص مواد فتوسنتزی به اندامهای زایشی برقرار شد که در نهایت بیشترین عملکرد دانه را به همراه داشت. در مقابل، افزایش نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اگرچه رشد رویشی را افزایش داد، اما به دلیل کاهش کارایی مصرف نیتروژن و احتمال افزایش تخصیص مواد به اندامهای رویشی (لمایر^۱ و همکاران، ۲۰۱۹)، منجر به افزایش بیشتر عملکرد نشد. در چنین شرایطی، بخشی از انرژی و مواد فتوسنتزی گیاه صرف حفظ رشد رویشی می شود و افزایش عملکرد دانه کمتر از مقدار موردانتظار خواهد بود. این موضوع نشان می دهد که دستیاب به حداکثر عملکرد در گوار تنها به افزایش جذب نیتروژن وابسته نیست، بلکه به کارایی استفاده از نیتروژن جذب شده و تعادل بین رشد رویشی و زایشی نیز بستگی دارد (آرخونتولیس^۲ و میگو، ۲۰۱۵؛ لمایر و همکاران، ۲۰۱۹). شایان ذکر است که براساس آنالیز خاک ابتدای فصل رشد (جدول ۱)، میزان نیتروژن نیتراتی موجود در خاک حدود ۶۵ کیلوگرم در هکتار بود. این موضوع نشان می دهد که مجموع نیاز به نیتروژن برای دستیاب به حداکثر عملکرد در گیاه گوار، تقریباً ۱۶۵ کیلوگرم در هکتار است.

در مقابل، مصرف گوگرد تأثیر معنی داری بر شاخص سطح برگ، شاخص سبزی، تجمع نیتروژن و شاخصهای کارایی مصرف نیتروژن نداشت. با این وجود مصرف گوگرد باعث بهبود سرعت فتوسنتز برگ شده بود. اگرچه گوگرد اثر معنی داری بر بیشتر صفات مورد مطالعه نشان نداد، اما از نظر فیزیولوژیک نمی توان نقش این عنصر را در متابولیسم گیاه نادیده گرفت. نیتروژن و گوگرد دارای ارتباط متابولیکی نزدیکی هستند و سنتز بسیاری از پروتئینها مستلزم تأمین همزمان هر دو عنصر است. در شرایط کمبود گوگرد، بخشی از نیتروژن جذب شده به صورت ترکیبات غیرپروتئینی در گیاه تجمع یافته و کارایی استفاده از نیتروژن نیز کاهش می یابد (مارش، ۲۰۱۲؛ بیکانا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). بسیاری از مطالعات نیز گزارش کرده اند که پاسخ گیاه به مصرف گوگرد بیشتر در شرایط کمبود این عنصر مشاهده می شود و در خاکهای دارای مقادیر کافی گوگرد، افزودن گوگرد اضافی الزاماً موجب بهبود رشد و عملکرد نمی شود (آلمیدا و همکاران، ۲۰۲۳؛ سوینی^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). برخی مطالعات روی سویا، نخود و عدس نیز نشان داده اند که تأثیر مصرف گوگرد بر راندمان مصرف نیتروژن به طور غیرمستقیم است و بیشتر از طریق بهبود فعالیت آنزیم نیتروژناز، افزایش تعداد و وزن گره های ریشه و در نتیجه افزایش تثبیت بیولوژیک نیتروژن در محیطهای با کمبود نیتروژن معدنی خاک حاصل می شود (دی ویتو^۵ و سادراس، ۲۰۱۴؛ بیکانا و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به این که غلظت گوگرد خاک مزرعه حدود ۱۸ میلی گرم در کیلوگرم بود، احتمالاً وضعیت گوگرد خاک نزدیک به محدوده کفایت قرار داشته و بنابراین محدودیتی از نظر تأمین گوگرد برای گیاه وجود نداشته است. آستانه بحرانی گوگرد برای غلاتی نظیر گندم در محدوده ۱۲ تا ۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است، اما گیاهان روغنی و تیره بقولات مانند گوار که از پتانسیل تثبیت زیستی نیتروژن برخوردارند، در مقایسه با غلات به مقادیر بالاتری از این عنصر برای دستیاب به رشد مطلوب نیازمندند (بیکانا و همکاران، ۲۰۱۸). برای نمونه، پژوهشهای صورت گرفته در برزیل، حد بحرانی گوگرد خاک را برای محصول سویا در بسترهای مختلف کشت، بین ۱۷ تا ۱۹/۳ میلی گرم بر کیلوگرم برآورد کرده اند (سفریدو^۶ و موریرا، ۲۰۱۵). از این رو، با عنایت به فقدان مطالعات اختصاصی

1. Lemaire
2. Archontoulis
3. Becana
4. Swify
5. Divito
6. Sfredo

درباره حد کفایت گوگرد برای گیاه گوار، نمی‌توان با قاطعیت غلظت موجود در خاک شنی لومی مزرعه را تنها دلیل عدم پاسخ به کود گوگرد قلمداد کرد. از سوی دیگر، از آنجاکه فرم غالب و قابل جذب این عنصر برای گیاهان به صورت یون سولفات (SO_4^{2-}) است، گوگرد عنصری برای ورود به چرخه جذب، مستلزم فرایندهای اکسیداسیون شیمیایی یا بیولوژیکی و تبدیل به سولفات است (ناریان^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، محتمل است که عدم واکنش معنادار گیاه گوار در این پژوهش، ممکن است ناشی از ناکافی بودن سطح گوگرد قابل جذب جهت تأمین نیاز واقعی گیاه باشد (فلوری دور و همکاران، ۲۰۲۳).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج نشان داد که کاربرد نیتروژن از طریق بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک و تغذیه‌ای گیاه، از جمله افزایش شاخص سطح برگ، شاخص سبزیگی برگ، سرعت فتوسنتز و تجمع نیتروژن در اندام هوایی، موجب افزایش عملکرد دانه گوار شد. با وجود این که بیش‌ترین تجمع نیتروژن در اندام هوایی در تیمار ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مشاهده شد، برتری تیمار ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از نظر عملکرد دانه و شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن نشان داد که افزایش مصرف نیتروژن فراتر از نیاز بهینه گیاه، لزوماً به افزایش عملکرد منجر نمی‌شود و حتی می‌تواند موجی کاهش کارایی استفاده از این عنصر شود. این نتایج بیانگر آن است که در شرایط وجود حدود ۶۵ کیلوگرم نیتروژن نیتراتی قابل دسترس در خاک، مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار توانسته است تعادل مناسبی میان تأمین نیاز غذایی گیاه، جذب نیتروژن و کارایی مصرف کود برقرار کرده و در نتیجه بیش‌ترین عملکرد دانه را فراهم سازد. عدم پاسخ معنی‌دار بیش‌تر صفات به مصرف گوگرد نیز احتمالاً نشان‌دهنده کفایت نسبی گوگرد قابل دسترس خاک و پایین بودن احتمال محدودیت این عنصر در شرایط آزمایش بوده است، هرچند افزایش سرعت فتوسنتز در مرحله پرشدن دانه نشان داد که گوگرد می‌تواند در برخی فرایندهای فیزیولوژیک گیاه نقش مؤثری داشته باشد. همچنین همبستگی مثبت عملکرد دانه با شاخص سطح برگ، تجمع نیتروژن، سبزیگی برگ و سرعت فتوسنتز نشان داد که حفظ ظرفیت فتوسنتزی و وضعیت تغذیه‌ای مناسب گیاه در طول فصل رشد، نقش کلیدی در افزایش تولید دانه گوار دارد. در مجموع، به کارگیری مدیریت بهینه مصرف نیتروژن نه تنها می‌تواند ضمن حفظ عملکرد مطلوب، کارایی مصرف کود را افزایش دهد، بلکه از تلفات نیتروژن و پیامدهای زیست محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنی نیز جلوگیری خواهد کرد.

۷. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های کارکنان محترم معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

بالالی، محمدرضا؛ مشیری، فرهاد و موسوی، سیدمجید (۱۴۰۲). مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه در ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

خیری‌استیار، حسین؛ میرشکاری، بهرام؛ فرح‌وش، فرهاد؛ خلیل‌وند بهروزیار، ابراهیم و تارینژاد، علیرضا (۱۳۹۷). اثر کاربرد تیوباسیلوس و گوگرد بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت شرایط کمبود آب. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۱، ۸۹۲-۸۸۳.

رستمی، فرزاد و اقبال‌قبادی، محمد (۱۴۰۰). اثر سطوح نیتروژن و گوگرد بنتونیتی بر رشد ریشه، صفات فیزیولوژیک و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.). *مجله فیزیولوژی گیاهی*، ۱۳، ۲۲-۵.

صابرعلی، سید فرهاد؛ یوسفی‌فرد، مرجان و سادات اسیلان، کمال (۱۳۹۹). اثر سطوح مختلف رژیم‌های آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در لوبیا قرمز (*Phaseolus vulgaris* L.). *مجله تحقیقات حیوانات ایران*، ۱۱، ۱۴۹-۱۳۷.

نامداری، امین؛ باغبانی‌آرانی، ابوالفضل و اداوی، ظهرا (۱۴۰۳). برهم‌کنش کاربرد توأم گوگرد و نیتروژن بر ویژگی‌های رشد و عملکرد دانه کلزا تحت شرایط دیم. *مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی*، ۱۴، ۷۴-۵۹.

نوروزی، سعید؛ اکبری، غلامعلی؛ اله‌دادی، ایرج؛ سلطانی، الیاس و نوروزیان، محمدعلی (۱۴۰۰). اثر کود نیتروژن و سویه‌های مختلف باکتری هم‌زیست بر صفات کمی و کیفی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. *علوم کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱، ۳۵۹-۳۳۹.

References

- Adams, C.B., Boote, K.J., Shrestha, R., MacMillan, J., Hinson, P.O., & Trostle, C. (2020). Growth stages and developmental patterns of guar. *Agronomy Journal*, 113, 114-128.
- Ahmed, M., Ahmad, S., Abbas, G., Hussain, S., & Hoogenboom, G. (2024). Guar-wheat system. In *Cropping Systems Modeling under Changing Climate* (pp. 411-430). Springer, Singapore.
- Ali, M.A., Ghazy, A.I., Alotaibi, K.D., Ibrahim, O.M., & Al-Doss, A.A. (2022). Nitrogen efficiency indexes association with nitrogen recovery, utilization, and use efficiency in spring barley at various nitrogen application rates. *Agronomy Journal*, 114, 2290-2309.
- Almeida, L.F.A., Correndo, A., Ross, J., Licht, M., Casteel, S., Singh, M., & Ciampitti, I.A. (2023). Soybean yield response to nitrogen and sulfur fertilization in the United States: Contribution of soil N and N fixation processes. *European Journal of Agronomy*, 145, 126791.
- Anas, M., Liao, F., Verma, K.K., Sarwar, M.A., Mahmood, A., Chen, Z.-L., & Li, Y. R. (2020). Fate of nitrogen in agriculture and environment: Agronomic, eco-physiological, and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. *Biological Research*, 53, 47-54.
- Archontoulis, S.V., & Miguez, F.E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107, 786-798.
- Ayneband, A., Asadi, S., & Rahnama, A. (2014). Nitrogen use efficiency assessment under intra- and inter-specific competitions stress. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 4(2), 9-21.
- Balali, M. R., Moshiri, F., & Mousavi, S. M. (2024). Integrated management of soil fertility and plant nutrition in Iran. Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. (In Persian).
- Becana, M., Wienkoop, S., & Matamoros, M. A. (2018). Sulfur transport and metabolism in legume root nodules. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1434.
- Bhatt, R., Kunal, Moulick, D., Bárek, V., Brestic, M., Gaber, A., Skalický, M., & Hossain, A. (2025). Sustainable strategies to limit nitrogen loss in agriculture through improving its use efficiency aiming to reduce environmental pollution. *Journal of Agriculture and Food Research*, 22, 101957.
- Córdova, S.C., Archontoulis, S.V., & Licht, M.A. (2020). Soybean profitability and yield component response to nitrogen fertilizer in Iowa. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3, e20092.
- Courbet, G., Gallardo, K., Vigani, G., Brunel-Muguet, S., Trouverie, J., Salon, C., & Ourry, A. (2019). Disentangling the complexity and diversity of crosstalk between sulfur and other mineral nutrients in cultivated plants. *Journal of Experimental Botany*, 70(16), 4183-4196.
- Divito, G.A., & Sadras, V.O. (2014). How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 156, 161-171.
- Epie, K. E., Bauer, P. J., Stone, K. C., & Locke, A. M. (2023). Nitrogen fertilizer effects on soybean physiology, yield components, seed yield and protein content in the Southeastern United States. *Journal of Plant Nutrition*, 46(3), 462-472.

- Fleuridor, L., Fulford, A., Lindsey, L.E., Lentz, E., Watters, H., Dorrance, A., Minyo, R., Richer, E., Chaganti, V., Subburayalu, S., & Culman, S.W. (2023). Ohio grain crop response to sulfur fertilization. *Agronomy Journal*, 115.
- Flexas, J., Ribas-Carbó, M., Diaz-Espejo, A., Galmés, J., & Medrano, H. (2008). Mesophyll conductance to CO₂: current knowledge and future prospects. *Plant Cell Environment*, 31(5), 602-21.
- Frankow-Lindberg, B.E., & Dahlin, A.S. (2014). N₂ fixation, N transfer, and yield in grassland communities including a deep-rooted legume or non-legume species. *Plant and Soil*, 370, 567-581.
- Gourav, Sankhyan, N.K., Kumar, P., Sharma, G.D., & Sharma, N. (2021). Critical limits of sulfur in relation to the growth and development of French bean and cauliflower in acidic soils of Northwestern Himalayas. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52, 2280-2288.
- Kheiri-Astiar, H., Mirshakari, B., Farahvash, F., Khalilvand Behrooziyar, A., & Tarinejad, A. (2018). The effect of Thiobacillus and sulfur application on yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water deficit conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11, 883-892. (In Persian).
- kumar, S., Seepaul, R., Small, I. M., George, S., O'Brien, G. K., Marois, J. J., & Wright, D. L. (2021). Interactive effects of nitrogen and sulfur nutrition on growth, development, and physiology of *Brassica carinata* A. Braun and *Brassica napus* L. *Sustainability*, 13(13), 7355.
- Lee, J., Heo, J., Lee, E.S., Kang, H., Warsadiharja, S.M., Kim, K., Chae, Y., Pervitasari, A.N., Priatama, R.A., Lee, Y.K., Kim, I.H., & Park, S.J. (2025). Molecular and phenotypic insights into sulfur's role in enhancing tomato plant growth, stress tolerance, and productivity. *Scientific Reports*, 15, 32773.
- Lemaire, G., Gastal, F., & Ciampitti, I. A. (2019). Allometric approach to crop nitrogen nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 27.
- Li, H., Zhang, Y., Wang, X., et al. (2021). Sulfur application enhances photosynthetic performance, chlorophyll content and stomatal conductance in crop plants under field conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1-10.
- Mahla, H.R., Sharma, R., Kumar, S., & Gaikwad, K. (2020). Independent segregation of qualitative traits and estimation of genetic parameters and gene action for some quantitative traits in guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L. Taub). *Indian Journal of Genetics*, 80, 186-193.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3th ed.). Academic Press, London. pp.73-158.
- Namdari, A., Baghbani-Arani, A., & Advi, Z. (2024). Interaction of Combined Application of the Sulfur and Nitrogen on the Growth Characteristics and Yield of Rapeseed Under Rainfed Conditions. *Journal of Crop Production and Processing*, 14(4), 59-74. (In Persian).
- Narayan, O.P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A.K. (2022). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 18, 2030082
- Norouzi, S., Akbari, G. A., Elahdadi, A., Soltani, A., & Norouzian, M. (2021). The Effect of Nitrogen Fertilizer and Different Strains of Symbiosis Bacterium on Quantitative and Qualitative Traits of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) under Various Water Regimes. *Agricultural Sciences and Sustainable Production*, 31, 339-359. (In Persian).
- Qiang, B., Chen, S., Fan, Z., Cao, L., Li, X., Fu, C., & Jin, X. (2025). Effects of nitrogen application levels on soybean photosynthetic performance and yield: Insights from canopy nitrogen allocation studies. *Field Crops Research*, 326, 109871.
- Rahman, A., Mancini, M., Nadon, C., Perez, I. A., Farsamin, W. F., Lampe, M. T., Le, T. H., Torres Martínez, L., Weisberg, A. J., Chang, J. H., & Sachs, J. L. (2023). Competitive interference among rhizobia reduces benefits to hosts. *Current Biology*, 33(14), 2988-3001.e4
- Rostami, F., & Eghbal-Ghobadi, M. (2021). Investigation the effect of bentonite sulfur and nitrogen levels on root growth and physiological characteristics and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Iranian Journal of Plant Physiology*, 13, 5-22. (In Persian).
- Saberali, S. F., Yousefifard, M., & Sadat Asilan, K. (2020). Effect of different level of irrigation regimes and nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency in kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*, 11, 137-149. (In Persian).
- Sfreda, G.J., & Moreira, A. (2015). Efficiency of sulfur application on soybean in two types of Oxisols in southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(14), 1802-1813.

- Shah Hossein, S., Parrey, Z. A., Islam, S., Tyagi, A., Ahmad, A., & Mohammad, F. (2022). Exogenously applied sulphur improves growth, photosynthetic efficiency, enzymatic activities, mineral nutrient contents, yield and quality of *Brassica juncea* L. *Sustainability*, 14(21), 14441.
- Swify, S., Avizienyte, D., Mazeika, R., & Braziene, Z. (2022). Comparative study effect of urea-sulfur fertilizers on nitrogen uptake and maize productivity. *Plants*, 11(22), 3020.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates.
- Temminghoff, E.E.J., & Houba, V.J.G. (2004). Plant analysis procedures (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers. pp.113-115.