



Growth and Yield Response of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) to Nitrogen Application Rate Under Sulfur and No-Sulfur Application

Sahar Kiani-Motlagh¹ | Seyed Farhad Saberali^{2✉} | Majid AghaAlikhani³

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

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 26 May 2024

Revised: 07 September 2024

Accepted: 13 September 2025

Extended Abstract

Introduction. Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) is well-suited for cultivation in tropical and subtropical regions with arid and semi-arid climates due to its high tolerance to drought and warm temperatures. Its significant industrial value and rising global demand have increased interest in its cultivation beyond traditional regions like India and Pakistan, including countries such as Iran. Following drought stress, nutrient deficiencies—particularly nitrogen—are major limiting factors for crop production, including guar. Nitrogen is an essential nutrient for plant growth, enhancing photosynthetic efficiency and playing critical roles in processes such as vegetative growth, leaf area expansion, and biomass accumulation. Under drought conditions and in soils with low populations of symbiotic rhizobia, nitrogen deficiency can severely limit guar production. Sulfur is another vital nutrient required for the synthesis of amino acids such as cystine, cysteine, and methionine, and is involved in the function of vitamins (e.g., biotin and thiamine), enzymes, lipids, and other essential plant components. Sulfur deficiency is particularly common in sandy soils with low organic matter.

Materials and Methods. This study was conducted in 2024 at the research farm of the Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, located 17 km west of Tehran (35°44'N, 51°9'E; 1275 m above sea level). During the guar growing season, the average temperature was 28.73°C, and total rainfall was 1.6 mm. The experiment followed a factorial arrangement in a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Treatments included two sulfur levels (0 and 100 kg ha⁻¹, from a bentonite sulfur source with 90% purity) and four nitrogen levels (0, 50, 100, and 150 kg ha⁻¹, applied as urea). Measured traits included biomass, leaf area, number of seeds per plant and pod, thousand-seed weight, harvest index, and seed yield per hectare. Leaf area and biomass were assessed during the vegetative stage through destructive sampling of 50 cm row lengths. Final yield components were measured by harvesting 1 m² plots at maturity.

Results and Discussion. Analysis of variance revealed that nitrogen application, unlike sulfur, had significant effects on leaf area index, dry matter accumulation, pod and seed numbers per unit area, grain yield, and harvest index. Nitrogen application increased grain yield by 21.2% compared to the control. Yield improvements at 50, 100, and 150 kg N ha⁻¹ were 12.8%, 33.8%, and 16.9%, respectively. Regression analysis indicated a significant quadratic response of grain yield to nitrogen application, explaining approximately 84% of the yield variation. The maximum increase in pod and seed numbers occurred at 100 kg ha⁻¹, while no significant improvement was observed at 150 kg N ha⁻¹, suggesting an optimal nitrogen level. Due to the strong influence of the number of grains formed per plant on grain weight, the increase in grain number in response to nitrogen application resulted in the allocation of dry matter among a larger number of grains, and therefore, changes in grain weight were not significant. Grain yield were attributed to enhanced leaf area index, biomass accumulation, and reproductive organ development. Previous studies support these findings, showing that nitrogen improves light interception, chlorophyll content, enzyme activity, and photosynthetic capacity. At 150 kg N ha⁻¹, despite increased biomass, grain yield declined compared to 100 kg N ha⁻¹, likely due to intra-plant competition and excessive vegetative growth at the expense of reproductive development. This was reflected in a reduced harvest index at the highest nitrogen level. The absence of significant yield or growth response to sulfur application may be attributed to adequate pre-existing soil sulfur levels (18 mg kg⁻¹), suggesting that sulfur was not limiting.

Conclusion. Optimizing nitrogen application, considering local soil and climatic conditions, is a viable strategy for enhancing nitrogen use efficiency, improving yield, and reducing the environmental impact of excessive nitrogen fertilization in guar cultivation.

Keywords:

Harvest index,
leaf area index,
plant nutrition,
regression analysis.

Cite this article: Kiani-Motlagh, S., Saberali, S.F., & AghaAlikhani, M. (2025). Growth and yield response of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) to nitrogen application rate under sulfur and no-sulfur application. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(4), 149-162. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.396020.655143.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

بررسی پاسخ رشد و عملکرد دانه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) به میزان نیتروژن

مصرفی در شرایط مصرف و عدم مصرف گوگرد

سحر کیانی-مطلق^۱ | سیدفرهاد صابری علی^۲ | مجید آقاعلیخانی^۳

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ کلیدواژه‌ها: تجزیه رگرسیون، تغذیه گیاهی، شاخص برداشت، شاخص سطح برگ.	گوار، گیاهی گرمادوست با مصارف صنعتی، دارویی و غذایی است که مقاومت بالایی آن به خشکی این گیاه را به گزینه مناسبی برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران تبدیل کرده است. به منظور بررسی پاسخ رشد و عملکرد گوار 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) از منبع کود اوره و دو سطح گوگرد (صفر و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع کود گوگرد بنتونیت‌دار در سه تکرار و در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نتایج نشان داد مصرف نیتروژن تأثیر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ، ماده خشک کل، تعداد غلاف در واحد سطح، تعداد دانه در واحد سطح، و عملکرد دانه داشت؛ درحالی‌که مصرف گوگرد و برهمکنش کود نیتروژن و گوگرد بر هیچ‌یک از صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود. تعداد دانه تولیدی در واحد سطح مهم‌ترین جزء عملکرد بود که با افزایش کود نیتروژن افزایش یافته و بهبود عملکرد در شرایط مصرف کود نیتروژن را فراهم کرد. پاسخ عملکرد دانه به میزان نیتروژن مصرفی از یک مدل درجه دوم پیروی می‌کرد. مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار باعث تحریک بیش از حد رشد رویشی و کاهش عملکرد دانه (۱۲۳۰ کیلوگرم در هکتار) و در نهایت شاخص برداشت (۱۲/۱۵ درصد) شد. به‌طور کلی، مصرف نیتروژن نقش اصلی در بهبود رشد و عملکرد گوار داشت و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به عنوان سطح بهینه برای تولید بیشینه در این گیاه قابل توصیه است.

استناد: کیانی-مطلق، س.، صابری علی، س.ف.، و آقاعلیخانی، م. (۱۴۰۴). بررسی پاسخ رشد و عملکرد دانه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) به میزان نیتروژن مصرفی در شرایط مصرف و عدم مصرف گوگرد. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۴)، ۱۴۹-۱۶۲.

DOI: 10.22059/ijfcs.2025.396020.655143



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) یا لوبیای خوشه‌ای گیاهی یک‌ساله و تابستانه از خانواده بقولات است (Mahla *et al.*, 2020; Garg & Gupta, 2023). این گیاه دارای رشد سریع و قابل کشت در مناطقی با بارندگی‌های کم و ناپایدار، نور آفتاب فراوان و رطوبت نسبی پایین است و نیاز کمی نیز به نهاده‌ها دارد (Meftahizadeh *et al.*, 2019; Avola *et al.*, 2020). این گیاه کم‌توقع به دلیل تحمل بالای خود نسبت به تنش خشکی و گرما گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید (Boghara *et al.*, 2016; Kotnala *et al.*, 2024; Aliverdi & Karami, 2024). گیاه گوار به‌عنوان یک منبع مهم پروتئین و فیبر در صنایع غذایی و دامپروری شناخته می‌شود. در شرایط کنونی که تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آب یکی از چالش‌های بزرگ در کشاورزی محسوب می‌شود، مطالعه گیاهانی که می‌توانند به‌خوبی در این شرایط رشد کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وجود صمغ گالاکتومانن (گوارگام)، این محصول را به یک محصول صنعتی مهم و با قابلیت تجاری بالا تبدیل کرده است (Boghara *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2024). ارزش بازار صمغ گوار در سال ۲۰۲۴ در حدود ۸۱۰ میلیون دلار ارزیابی شده است (Nandi, 2024). به دلیل ارزش صنعتی بالا و افزایش چشمگیر تقاضا در جهان، کشت این گیاه علاوه بر هند و پاکستان در کشورهای دیگر از جمله ایران نیز مورد توجه قرار گرفته است (Mahla *et al.*, 2020).

پس از تنش خشکی، کمبود عناصر غذایی از جمله موانع اصلی تولید محصولات کشاورزی است. مدیریت منابع غذایی مورد نیاز گیاهان از جمله عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر، پتاسیم، گوگرد، منیزیم و کلسیم از جمله مهم‌ترین مدیریت‌های زراعی در سیستم‌های کشاورزی است (Ning *et al.*, 2017). عنصر نیتروژن به عنوان یکی از عناصر ضروری مورد نیاز برای رشد گیاه (Leghari *et al.*, 2016 & Wang *et al.*, 2024) بهره‌وری فتوسنتزی را افزایش داده (Han *et al.*, 2024) و در فرآیندهای مختلفی مانند رشد، گسترش سطح برگ‌ها و تولید زیست‌توده دخیل است. همچنین این عنصر می‌تواند به بهبود رشد ریشه، افزایش حجم، مساحت، قطر، طول کل و اصلی ریشه و در نتیجه افزایش جذب عناصر غذایی و تولید زیست‌توده خشک کمک کند (Anas *et al.*, 2020). نیتروژن همچنین عنصر اصلی در ساختار پروتئین‌ها (Wang *et al.*, 2024; Sharma & Umesha, 2024)، اسیدهای نوکلئیک، کلروفیل، هورمون‌ها (Anas *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2024)، آمینواسیدها، ATP (Anas *et al.*, 2020)، فسفولیپیدها، ویتامین‌ها و آلکالوئیدها است و در تمام مراحل رشد و نمو گیاهان نقش حیاتی دارد (Wang *et al.*, 2024). گیاه گوار نیز برای رشد و عملکرد بهتر نیاز به نیتروژن دارد. گزارش شده است که بخش عمده‌ای از نیاز نیتروژنی گیاه از طریق ریزوبیوم‌های موجود در گره‌های ریشه قابل تامین است (Priyanka *et al.*, 2016). با این‌وجود در خاک‌هایی با جمعیت کافی از ریزوبیوم نیز گیاه جوان تا قبل از تشکیل گره معمولاً دچار کمبود نیتروژن می‌شود. در شرایط تنش خشکی و خاک‌هایی با جمعیت پایین ریزوبیوم همزیست، کمبود نیتروژن جزء محدودیت‌های کشت‌وکار این گیاه محسوب می‌شود. به علاوه تثبیت بیولوژیک نیتروژن توسط گیاهان بقولات نیازمند صرف انرژی است و در برخی از لگومینوزها گزارش شده است که تا حدود ۳۰ درصد از کل تولید گیاه را به خود اختصاص می‌دهد. این صرف انرژی می‌تواند منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاه شود. بنابراین، مدیریت مناسب کودی نیتروژن می‌تواند بهبود رشد و عملکرد در این گیاه را به همراه داشته باشد (Almeida *et al.*, 2023). بیشترین زیست‌توده و عملکرد دانه در گیاه لوبیا قرمز با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار به‌دست آمد (Saberli *et al.*, 2012). نتایج یک پژوهش نشان داد که مصرف کود نیتروژن، باعث افزایش کلروفیل برگ، ماده خشک، تعداد دانه در متر مربع و عملکرد دانه در گیاه گوار شد (Norouzi *et al.*, 2021)، همچنین مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص نسبت به مصرف ۵۰ کیلوگرم سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد.

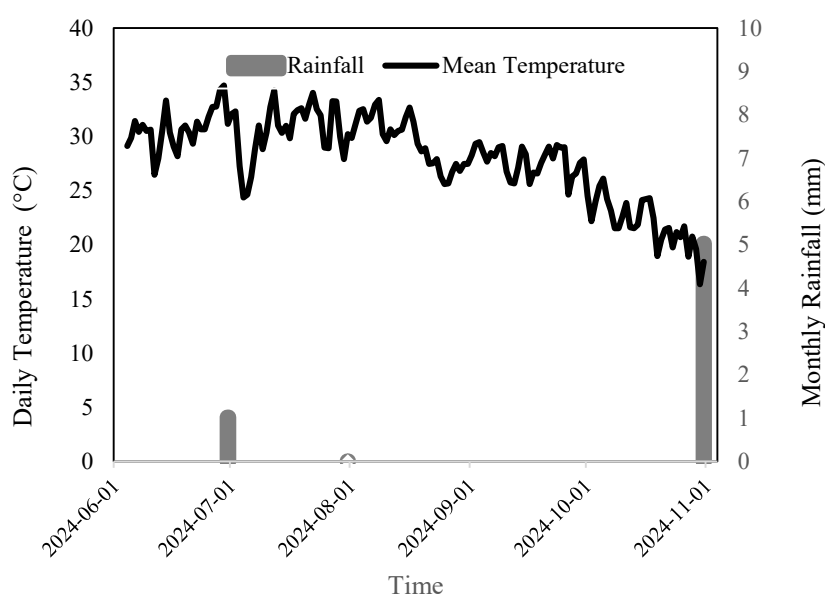
گوگرد نیز یکی دیگر از عناصر ضروری و پرمصرف برای گیاهان است (Narayan *et al.*, 2022) که در عملکردهای حیاتی گیاهان نقش دارد و در فرآیندهای متابولیک متعدد شرکت می‌کند. این عنصر برای سنتز آمینواسیدهای پروتئینی مانند سیستین، سیستئین و متیونین ضروری است و نقش ویژه‌ای در عملکرد ویتامین‌ها (بیوتین و تیامین)، آنزیم‌ها، لیپیدها و دیگر اجزای مهم گیاهی ایفا می‌کند (Kulczycki, 2021; Narayan *et al.*, 2022). گوگرد و ترکیبات حاوی گوگرد به عنوان مولکول‌های سیگنالینگ

در مدیریت تنش‌ها و فرآیندهای متابولیک و به عنوان مولکول واسطه در شبکه‌های سیگنالینگ پیچیده نقش دارند (Narayan *et al.*, 2022). به‌طور کلی، کمبود گوگرد در خاک‌های شنی و با ماده آلی کمتر رایج است (Sharma *et al.*, 2024). نتایج تحقیقات پیشین حاکی از آن است که این عنصر علاوه بر تامین نیاز گیاهان برای رشد و نمو می‌تواند باعث کاهش اسیدیته خاک در خاک‌های قلیایی مناطق خشک شده و جذب عناصر غذایی همچون فسفر و عناصر میکرو را افزایش دهد (Rostami & Eghbal Ghobadi, 2021). در صورت کمبود گوگرد و تغذیه نامناسب، کاهش عملکرد و کیفیت در محصولات مختلف به‌ویژه دانه‌های روغنی و حبوبات مشاهده شده است (Samuel & Dawson, 2023). بررسی تأثیر مصرف گوگرد بر رشد و عملکرد ارقام مختلف لوبیا نشان داد که مصرف گوگرد به میزان ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و ماده خشک تولیدی در این ارقام نداشت (Keiri-Estiar *et al.*, 2018). با این وجود مصرف گوگرد به همراه باکتری تیوباسیلوس سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد. در پژوهشی دیگر نشان داده شد که مصرف گوگرد باعث افزایش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گلرنگ نسبت به عدم مصرف آن شد، اگرچه اختلاف معنی‌داری بین سطوح مصرف ۲۵ و ۵۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار مشاهده نشد (Forooghi & Ebadi, 2012).

با توجه به افزایش تقاضای رو به رشد کشت گوار در جهان (Dadgar *et al.*, 2021)، کشت این گیاه در ایران می‌تواند به عنوان یک فراورده صنعتی، علوفه‌ای و دارویی با قابلیت صادرات و ارزآوری برای کشور مورد توجه قرار گیرد. به دلیل عدم اطلاعات کافی درباره کشت این گیاه در شرایط آب و هوایی ایران، تعیین نیاز عناصر غذایی در این گیاه از جمله اولویت‌های پژوهشی برای توسعه کشت‌وکار این گیاه محسوب می‌شود. بدین منظور پژوهش حاضر با هدف بررسی پاسخ رشدی گیاه گوار به میزان مصرف کود نیتروژن در شرایط مصرف و عدم مصرف کود گوگرد انجام شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، واقع در ۱۷ کیلومتری غرب تهران با 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. بر اساس آمار هواشناسی بلندمدت، میانگین بارندگی سالانه منطقه ۲۴۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۶ درجه سانتی‌گراد است. در طول فصل رشد گوار، میانگین دما ۲۸/۷۲۸ درجه سانتی‌گراد و مجموع بارندگی ۶/۱ میلی‌متر ثبت شد (شکل ۱).



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

از خاک محل اجرای آزمایش پیش از کاشت نمونه‌گیری انجام شد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمون خاک، بافت خاک مزرعه آزمایشی شنی‌لومی بود.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری.

Soil texture	pH	EC (dS.m ⁻¹)	Total N (%)	N-NO ₃ ⁻ (Kg ha ⁻¹)	S-So ₄ (mg.kg ⁻¹)	Available P (mg.kg ⁻¹)	Available K (mg.kg ⁻¹)	OC (%)
Sandy loam	8.8	1.47	0.051	64.68	18	12.95	192	0.33

آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل دو سطح گوگرد (صفر و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع گوگرد بنتونیت‌دار با ۹۰٪ گوگرد خالص) و چهار سطح نیتروژن (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود اوره) بودند. میزان کود گوگرد توصیه‌شده به فرم سولفات برای حبوبات بین ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Sharma & Umesha, 2024). از طرفی مصرف عنصر گوگرد به دلیل نیاز به تبدیل آن به فرم سولفات در خاک برای جذب و اثرگذاری بر رشد و عملکرد بایستی چند برابر میزان توصیه‌شده فرم سولفاتی باشد (Fleuridor *et al.*, 2023). بر این اساس میزان مصرف ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد به‌عنوان میزان بهینه جهت تأمین نیاز گوگردی در نظر گرفته شد. از طرفی، برای تولید هر تن دانه در حبوباتی همچون لوبیا توصیه شده است به ازای هر تن عملکرد میزان ۳۵ کیلوگرم نیتروژن مصرف شود (Fageria, 2010). بنابراین بیشینه نیاز گیاه گوار با پتانسیل عملکرد چهار تن در هکتار حدود ۱۵۰ کیلوگرم برآورد شد. تیمارهای کودی در نظر گرفته‌شده معادل صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد تأمین حداکثر نیاز نیتروژنی این گیاه بود. آماده‌سازی بستر کاشت شامل شخم عمیق با گاواهن برگردان‌دار در پاییز، دیسک برای خرد کردن کلوخه‌ها و افزودن ۱۵۰ کیلوگرم کود منوپتاسیم فسفات پیش از کاشت بود. پس از تسطیح زمین، بذرهای گوار در تاریخ ۱۵ خرداد ۱۴۰۳ به‌صورت خشکه-کاری در عمق سه تا چهار سانتی‌متری از سطح خاک کشت شدند. طول هر بلوک ۲۸ متر، عرض شش متر و فاصله بین بلوک‌ها از یکدیگر نیز ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. طول هر کرت آزمایشی شش متر، عرض آن دو متر و نیم و مساحت هر کرت آزمایشی ۱۵ مترمربع بود. تراکم کشت گوار ۲۰ بوته در مترمربع با فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر و فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر کرت نیز شامل پنج ردیف کاشت بود که ردیف‌های دو و چهار برای نمونه‌برداری در طول فصل رشد و ردیف وسط یعنی ردیف شماره سه به منظور تعیین عملکرد نهایی و اجزای عملکرد در نظر گرفته شد. کود گوگرد بنتونیت‌دار قبل از کشت و کود اوره در دو مرحله شامل ۵۰ درصد شش روز پس از سبز شدن و ۵۰ درصد در انتهای رشد رویشی گیاه و قبل از گل‌دهی مصرف شد. بعد از کشت آبیاری اولیه به‌منظور سبز شدن یکنواخت از طریق آبیاری نواری (تیپ) انجام شد و در ادامه فصل رشد، آبیاری براساس عملیات رایج با تناوب سه تا چهار روز یک مرتبه انجام شد. میزان آب مصرفی در طول دوره رشد این گیاه حدود ۳۸۲۰ متر مکعب و متوسط راندمان مصرف آب ۰/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. کنترل علف‌های هرز در طول دوره آزمایش با روش وجین دستی و یک مرتبه نیز کسنترل شیمیایی برای مبارزه با شته انجام شد.

صفات مورد بررسی شامل عملکرد زیست‌توده و سطح برگ در طول دوره رشد، تعداد دانه در هر بوته و غلاف، وزن هزار دانه، شاخص برداشت و عملکرد دانه در هکتار بود. لازم به ذکر است تعداد دانه در بوته (که حاصل تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف است)، از طریق تراکم بوته در سطح برداشت به تعداد دانه در واحد سطح تبدیل شد. به منظور اندازه‌گیری سطح برگ و عملکرد زیست‌توده در طول دوره رشد رویشی گیاه، نمونه‌برداری تخریبی در چهار نوبت (زمان رشد رویشی، دوره گل‌دهی، در زمان پر شدن دانه و مرحله پایدانی پر شدن دانه) از ردیف‌های دو و چهار در هر کرت در ۵۰ سانتی‌متر طولی ردیف (پنج گیاه) انجام شد. لازم به ذکر است که در مرحله پر شدن دانه نیز از تیمارهای مختلف سه بوته به همراه ریشه آنها برداشت، و مشخص شد در اغلب بوته‌ها گره تثبیت نیتروژن روی ریشه‌ها تشکیل نشده بود، و در گره‌های اندک تشکیل‌شده نیز بعد از برش‌زنی آنها رنگ قرمز یا صورتی که نشانه فعالیت موثر باکتری رازوبیوم است (Frankow-Lindberg & Dahlin, 2013)، مشاهده نشد. در برداشت نهایی

در مرحله رسیدن دانه مساحت یک متر مربع برای تعیین عملکرد دانه برداشت شد. اندازه‌گیری اجزای عملکرد نیز در نمونه‌ای از سطح برداشت‌شده مشتمل بر ۱۰ بوته انجام شد. به‌منظور تجزیه آماری، پس از انجام آزمون نرمال‌بودن، خطای آزمایشی داده‌ها، تجزیه واریانس و تجزیه رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. میانگین داده‌ها با آزمون LSD و در سطح پنج درصد مقایسه شدند. رسم نمودارها نیز با نرم‌افزار Excel انجام شد. به منظور ارزیابی روند پاسخ صفات اندازه‌گیری‌شده به مقدار کود نیتروژنی مصرفی آنالیز رگرسیون با استفاده از رویه Proc Reg انجام شد. به دلیل احتمال بیش‌برازش و برون‌یابی ضعیف در خارج از محیطی که مدل برازش یافته و ضرابی که تفسیر بیولوژیکی آنها دشوار است مدل‌های با درجه بالاتر از دو برای پاسخ به کود توصیه نمی‌شود (Dhakal & Lange, 2021). لذا در این مطالعه نیز پاسخ صفات به کود نیتروژن مصرفی با مدل خطی و درجه دوم، بررسی و برای انتخاب بهترین مدل نیز از سطح معنی‌داری و شاخص‌های آماری ضریب تبیین تعدیل‌شده (Adjusted-R²) و Bayesian Information Criterion برای انتخاب بهترین مدل استفاده شد (Archontoulis & Miguez, 2015).

۳. یافته‌های پژوهشی و بحث

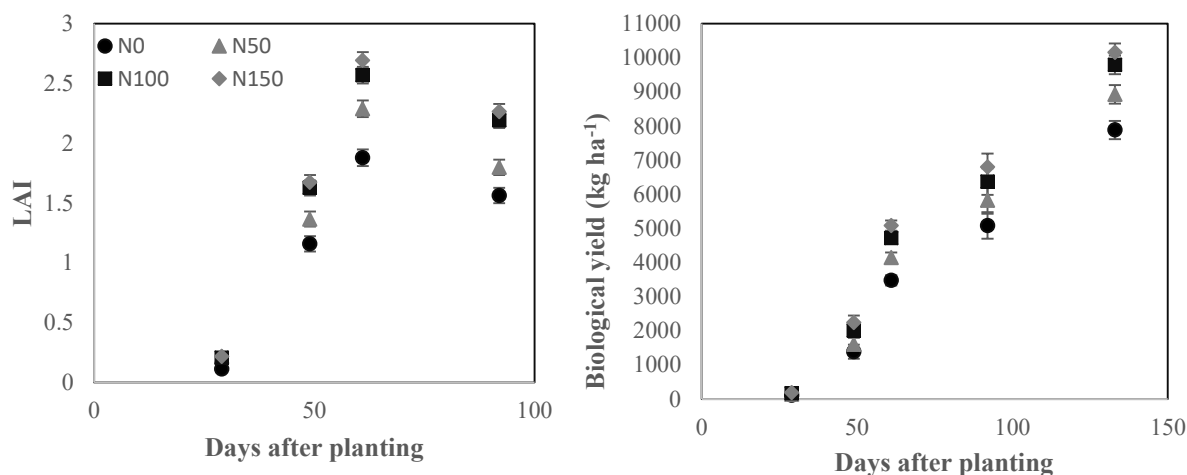
۳-۱. شاخص سطح برگ (LAI) بیشینه و عملکرد زیست‌توده

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف نیتروژن برخلاف مصرف گوگرد، تأثیر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ در مرحله پر شدن دانه و عملکرد زیست‌توده در پایان فصل رشد گیاه گوار داشت. برهمکنش مصرف گوگرد و نیتروژن نیز بر هیچ‌یک از این دو صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). مصرف گوگرد در مقایسه با عدم مصرف آن تفاوت معنی‌داری در میزان شاخص سطح برگ و عملکرد زیست‌توده ایجاد نکرد. نتایج روند شاخص سطح برگ همچنین نشان داد شاخص سطح برگ بجز در ۲۹ روز پس از کاشت، در سایر مراحل رشدی در شرایط مصرف کود نیتروژن به‌طور معنی‌داری در مقایسه با تیمار بدون کود بیشتر بود (شکل ۲). در بیشتر طول دوره رشد نیز، مصرف کود نیتروژن در سطوح ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار باعث استقرار بیشترین شاخص سطح برگ در گیاه گوار شد، اگرچه اختلاف معنی‌داری بین سطوح ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن مصرفی در هیچ‌یک از مراحل رشدی مشاهده نشد. میزان افزایش شاخص سطح برگ در مرحله پر شدن دانه 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 بود (شکل ۳). در بیشتر طول دوره رشد، مصرف کود نیتروژن نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش معنی‌دار تولید ماده خشک شد (شکل ۲). به‌طور مثال مصرف نیتروژن نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش ۲۲ درصدی در عملکرد زیست‌توده کل شد. میزان افزایش عملکرد زیست‌توده کل نیز در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به عدم مصرف آن به‌ترتیب معادل ۱۳/۲، ۲۴/۲ و ۲۸/۸ بود (شکل ۳). بیشترین عملکرد زیست‌توده کل معنی‌دار نیز مربوط به تیمار مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود، و میزان زیست‌توده تولیدشده در این تیمار اختلاف معنی‌داری با تیمار مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نداشت. نتایج آنالیز رگرسیون چندجمله‌ای نیز نشان داد که پاسخ خطی و درجه دوم به کود نیتروژن مصرفی در شاخص سطح برگ بیشینه و عملکرد زیست‌توده معنی‌دار بود؛ با این وجود پاسخ درجه دوم مدل بهتری برای توجیه تغییرات این دو صفت در پاسخ به تغییرات نیتروژن مصرفی بود (شکل ۳).

جدول ۲. آنالیز واریانس شاخص سطح برگ بیشینه، عملکرد زیست‌توده، تعداد غلاف و دانه در واحد سطح تحت تأثیر مقدار کود نیتروژن و گوگرد مصرفی.

S.O.V.	df	Mean of squares			
		Maximum LAI	Total biological yield	Number of pods	Number of seeds
Block	2	0.0009 ^{ns}	587292.9 ^{**}	204.76 ^{ns}	36866.67 ^{ns}
Sulfur (S)	1	0.0508 ^{ns}	33862.6 ^{ns}	5.08 ^{ns}	33750.0 ^{ns}
Nitrogen (N)	3	0.7839 ^{**}	6139476.6 ^{**}	9837.16 ^{**}	1135216.67 ^{**}
S×N	3	0.0326 ^{ns}	165121.0 ^{ns}	67.23 ^{ns}	22861.1 ^{ns}
Error	14	0.03286	70908.5	209.52	26790.48
C.V. (%)		8.87	12.99	15.57	13.18

^{**}، ^{ns} به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد. شاخص سطح برگ در مرحله پر شدن دانه، تعداد غلاف و دانه در واحد سطح گزارش شده است.



شکل ۲. پاسخ شاخص سطح برگ و عملکرد زیست توده در طول دوره رشد به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطی نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می باشد.

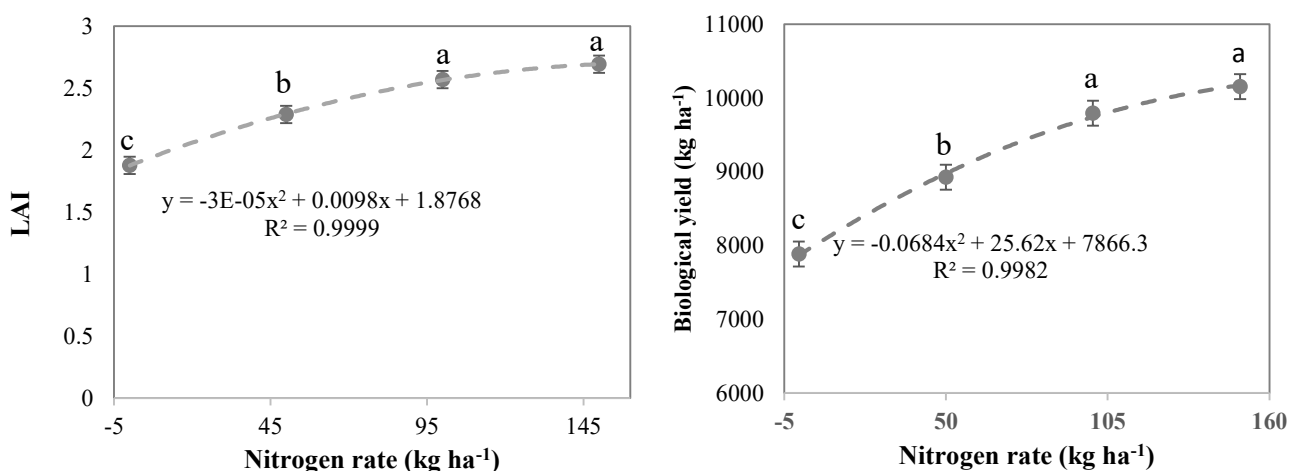
جدول ۳. آنالیز رگرسیون صفات اندازه گیری شده در گیاه گوار در پاسخ به میزان کود نیتروژن مصرفی.

Model	Mean of squares						
	Maximum LAI	Total biological yield	Number of pods	Number of seeds	100-seed weight	Harvest index	Seed yield
Linear trend	0.3712*	294725*	2880.0 ^{ns}	409934 ^{ns}	0.02767 ^{ns}	0.00003 ^{ns}	28441 ^{ns}
(Adjusted R ²)	(0.9207)	(0.9401)	(0.5178)	(0.5833)	(-0.115)	(-0.319)	(0.159)
(BIC)	(-18.28)	(44.09)	(26.10)	(45.10)	(-3.66)	(-36.37)	(39.22)
Quadratic trend	0.1959**	153216*	2112.2*	277802*	0.02305 ^{ns}	0.00008 ^{ns}	26503*
(Adjusted R ²)	(0.9996)	(0.9947)	(0.9859)	(0.9365)	(-0.716)	(-0.170)	(0.457)
(BIC)	(-40.91)	(33.01)	(10.59)	(36.19)	(-3.32)	(-38.23)	(36.089)

^{ns}, **, * به ترتیب نمایانگر غیرمعنی دار و معنی دار در سطح پنج و یک درصد هستند.

اعداد داخل پرانتز بیانگر ضریب تبیین تعدیل شده (Adjusted R²) و Bayesian information criterion (BIC) هستند.

شاخص سطح برگ در مرحله پر شدن دانه، تعداد غلاف و دانه در واحد سطح گزارش شده است.

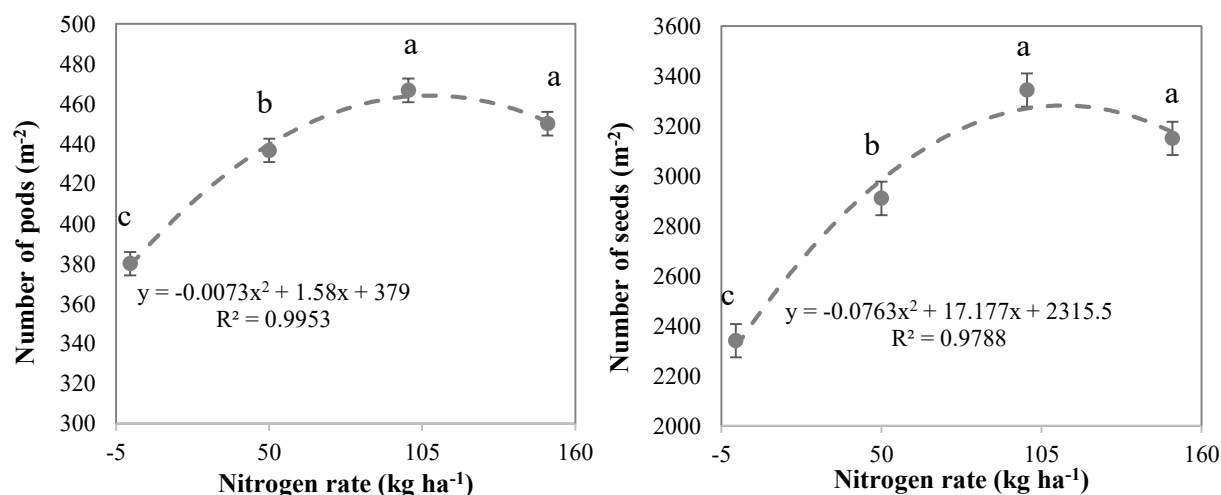


شکل ۳. پاسخ شاخص سطح برگ در مرحله پر شدن دانه و عملکرد زیست توده در انتهای فصل رشد به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطی نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می باشد.

یافته‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج مطالعات قبلی سازگار است که نیتروژن را به‌عنوان عنصری کلیدی در رشد رویشی، توسعه ساختار فتوسنتزی و افزایش شاخص سطح برگ (LAI) معرفی کرده‌اند (Taiz et al., 2015). مطالعات پیشین نشان داد که نیتروژن از طریق افزایش سنتز کلروفیل، تحریک فعالیت آنزیمی و توسعه سطح برگ توان جذب نور و کارایی فتوسنتزی را در گیاهان بهبود می‌بخشد (Qiang et al., 2025; Zhao et al., 2005). نیتروژن نقش حیاتی در ساخت پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک و فعالیت بافت‌های مریستمی، توسعه شاخص سطح برگ و بافت‌های فتوسنتزی دارد؛ به‌ویژه که این عنصر در ساختار کلروفیل و آنزیم‌های فتوسنتزی نیز مشارکت مستقیم دارد (Makino et al., 2003). افزایش تولید ماده خشک در پاسخ به مصرف نیتروژن می‌تواند ناشی از افزایش سطح برگ موثر در دریافت نور و همچنین افزایش راندمان مصرف نور باشد (Makino et al., 2003). Hatami et al. (2009) نیز در تحقیق خود روی سویا نشان دادند که نیتروژن معدنی باعث افزایش شاخص سطح برگ و تجمع زیست‌توده شد. همچنین در گیاه باقلا، Hemmati et al. (2021) گزارش کردند که کاربرد باکتری‌های همزیست تثبیت‌کننده نیتروژن موجب افزایش شاخص سطح برگ و وزن خشک شد که تأکیدی بر نقش نیتروژن در ارتقای رشد اولیه و توسعه پوشش فتوسنتزی است. در مقابل، در تحقیق حاضر اثر کود گوگرد بر شاخص سطح برگ و عملکرد زیست‌توده معنی‌دار نبود. به‌طور مشابه، Emam et al. (2009) در مطالعه روی گندم دریافتند که تأثیر گوگرد بر رشد و عملکرد تنها در شرایط کمبود مشهود است و نقش آن در مقایسه با نیتروژن محدودتر می‌باشد. غلظت بحرانی گوگرد در خاک‌های اسیدی برای لوبیای فرانسوی در ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Gourav et al., 2021). در یک مطالعه در بنگلادش، غلظت بحرانی گوگرد خاک برای گندم حدود ۱۵-۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روش‌های مختلف تخمین زده شده است (Yesmin et al., 2021). با توجه به اینکه میزان گوگرد در خاک مزرعه مورد مطالعه ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود می‌توان بیان کرد که ممکن است غلظت کافی گوگرد در خاک دلیل عدم پاسخ معنی‌دار گوار به گوگرد مصرفی باشد. با این وجود، گزارش شده است که گیاهان روغنی و حبوبات در مقایسه با غلات به گوگرد بیشتری برای رشد مطلوب نیاز دارند (Sharma et al., 2024).

۳-۲. تعداد غلاف و دانه در واحد سطح

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف نیتروژن تأثیر معنی‌داری بر تعداد غلاف و دانه در واحد سطح داشت و تأثیر گوگرد و برهمکنش گوگرد $\times$ نیتروژن معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نیز نشان داد که تعداد غلاف و دانه در واحد سطح در پاسخ به مصرف گوگرد تغییرات معنی‌داری نسبت به عدم مصرف آن نداشت؛ درحالی که افزایش ۱۸/۷ درصدی و ۳۴ درصدی به‌ترتیب در تعداد غلاف و دانه در واحد سطح در پاسخ به مصرف کود نیتروژن مشاهده شد. میزان افزایش تعداد غلاف در واحد سطح در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌ترتیب ۱۴/۹، ۲۲/۸، ۱۸/۴ بود. میزان افزایش تعداد دانه در واحد سطح نیز در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌ترتیب ۲۴/۳، ۴۲/۸، ۳۴/۶ بود (شکل ۴).



شکل ۴. پاسخ تعداد غلاف و دانه در واحد سطح به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطی نمایش‌دهنده نمایانگر خطای معیار میانگین می‌باشد.

نتایج تجزیه رگرسیون نیز نشان داد که پاسخ تعداد غلاف و تعداد دانه در واحد سطح به کود نیتروژن مصرفی از یک روند درجه دوم معنی‌دار پیروی می‌کرد (شکل ۴) و پاسخ خطی آنها معنی‌دار نبود (جدول ۳). این یافته با پژوهش‌هایی که بر نقش نیتروژن در تحریک فرآیندهای فیزیولوژیک و ساخت مواد پرورده کافی برای تشکیل گل‌آذین و باروری گل‌ها تأکید دارند، مطابقت دارد (Taiz *et al.*, 2015). نیتروژن با تأمین پروتئین‌های مورد نیاز برای تقسیم سلولی، سنتز آنزیم‌ها و توسعه اندام‌های زایشی، فرآیند گل‌دهی و تشکیل غلاف و دانه را بهبود می‌بخشد (Zhao *et al.*, 2005). مشاهده بیشترین افزایش تعداد غلاف و دانه در مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و عدم افزایش معنی‌دار در مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن، نشان‌دهنده وجود یک حد بهینه برای مصرف نیتروژن است. مصرف بیش از حد نیتروژن می‌تواند موجب رشد رویشی بیش از حد، رقابت منابع و در نهایت کاهش بازده زایشی شود (Lemaire *et al.*, 2008). مصرف بهینه نیتروژن در گندم می‌تواند تعداد دسانه در سنبله و عملکرد را افزایش دهد، اما مصرف بیش از حد آن منجر به رشد رویشی بیش از اندازه، افزایش رقابت درون گیاهی و در نهایت کاهش رشد زایشی می‌شود (Emam *et al.*, 2009). در مورد گوگرد، نتایج تحقیق حاضر بیانگر آن است که کاربرد گوگرد تأثیر قابل توجهی بر تشکیل غلاف یا افزایش دانه در واحد سطح نداشته است. با توجه به عدم پاسخ معنی‌دار تولید ماده خشک در شرایط مصرف گوگرد، عدم تولید غلاف و دانه بیشتر در شرایط مصرف گوگرد توجه‌پذیر بود. این موضوع ممکن است به این دلیل باشد که گوگرد بیشتر در تنظیم کیفیت بذر، سنتز پروتئین‌های خاص و مقاومت به تنش نقش دارد تا در تشکیل ساختارهای اولیه زایشی (Narayan *et al.*, 2022). همچنین به نظر می‌رسد با توجه به گزارش‌ها در مورد سطح بحرانی گوگرد در خاک، سطح گوگرد موجود در خاک نیاز اولیه آن برای تولید و تشکیل اندام‌های رویشی و زایشی را فراهم کرده بود (Yesmin *et al.*, 2021).

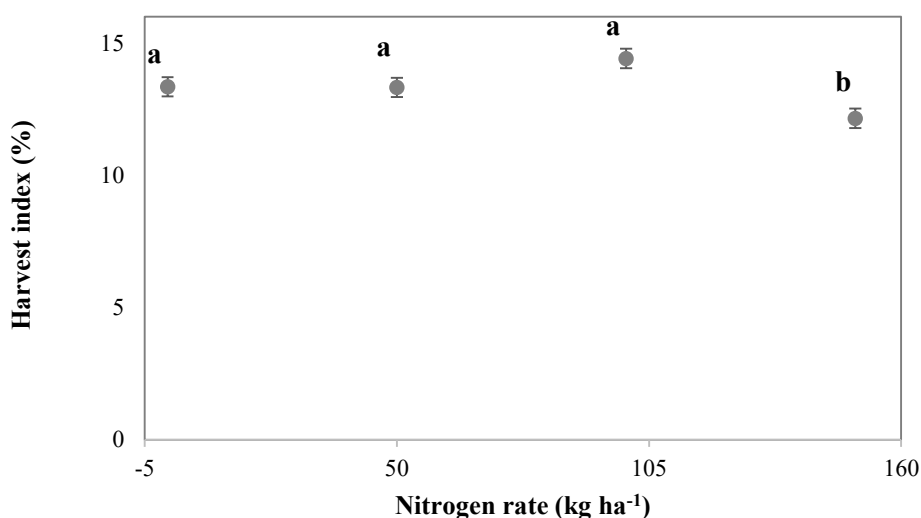
۳-۳. وزن ۱۰۰ دانه و شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر کود نیتروژن، گوگرد و برهمکنش آنها بر وزن هزار دانه گوار معنی‌دار نبود (جدول ۴). همچنین شاخص برداشت در گیاه گوار فقط تحت تأثیر کود نیتروژن بوده و پاسخ معنی‌داری به مصرف کود گوگرد و برهمکنش کود نیتروژن و گوگرد نداشت (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نیز نشان داد که تغییرات وزن صد دانه و شاخص برداشت در گوار در پاسخ به مصرف گوگرد نسبت به عدم مصرف آن معنی‌دار نبود. میزان کود نیتروژن مصرفی نیز تغییرات معنی‌داری در وزن صد دانه گیاه گوار ایجاد نکرد. با توجه به تأثیرپذیری شدید وزن دانه از تعداد دانه‌های تشکیل‌شده در هر بوته، افزایش تعداد دانه در پاسخ به مصرف نیتروژن موجب شده است که تخصیص ماده خشک در بین تعداد بیشتری دانه صورت گیرد و از این رو، تغییرات وزن دانه معنی‌دار نبود. عدم تغییرات معنی‌دار وزن دانه در گیاهان مختلف در پاسخ به مصرف نیتروژن در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Saberali *et al.*, 2012; Bhatt *et al.*, 2017). همچنین مطالعات نشان داده است که وزن دانه به‌طور معمول یک صفت ژنتیکی با دامنه واکنش پایین به تیمارهای تغذیه‌ای است (Zhao *et al.*, 2005). حتی در شرایط افزایش رشد رویشی ناشی از مصرف نیتروژن، چنانچه زمان پر شدن دانه و منابع فتوسنتزی محدود باشد، وزن دانه ممکن است بدون تغییر باقی مانده یا کاهش یابد (Taiz *et al.*, 2015). همچنین نتایج نشان داد که مصرف ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار سبب کاهش معنی‌دار شاخص برداشت نسبت به سایر سطوح کودی شد (شکل ۵). تحریک رشد رویشی و کاهش تخصیص ماده خشک به بخش عملکرد می‌تواند دلیل اصلی کاهش شاخص برداشت در سطوح بالای مصرف نیتروژن باشد (Bhatt *et al.*, 2017). گزارش شده است که در سطوح بالای نیتروژن، با افزایش وزن اندام‌های غیر اقتصادی مانند ساقه و برگ، نسبت عملکرد اقتصادی افزایش می‌یابد (Fageria *et al.*, 2008). نتایج آنالیز رگرسیون نشان داد که تغییرات وزن هزار دانه و شاخص برداشت در پاسخ به مصرف نیتروژن از روند خطی یا درجه دوم معنی‌داری تبعیت نکرد (جدول ۳). این موضوع تأکید می‌کند که این صفات تحت کنترل پیچیده‌تری از تعاملات ژنتیکی و محیطی قرار دارند (Taiz *et al.*, 2015).

جدول ۴. آنالیز واریانس وزن ۱۰۰ دانه، شاخص برداشت، عملکرد دانه در واحد سطح تحت تأثیر مقدار کود نیتروژن و گوگرد مصرفی.

S.O.V.	df	Mean of squares		
		100-seed weight	Harvest index	Seed yield
Block	2	0.322 ^{ns}	0.000354*	2902.1244 ^{ns}
Sulfur (S)	1	0.4139 ^{ns}	0.0000486 ^{ns}	5825.5311 ^{ns}
Nitrogen (N)	3	0.2156 ^{ns}	0.0005119**	129445.6385**
S×N	3	0.0719 ^{ns}	0.0000225 ^{ns}	683.4522 ^{ns}
Error	14	0.134	0.00008091	5319.3894
C.V. (%)		5.63	17.7	15.3

ns، **، *** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح پنج و یک درصد.



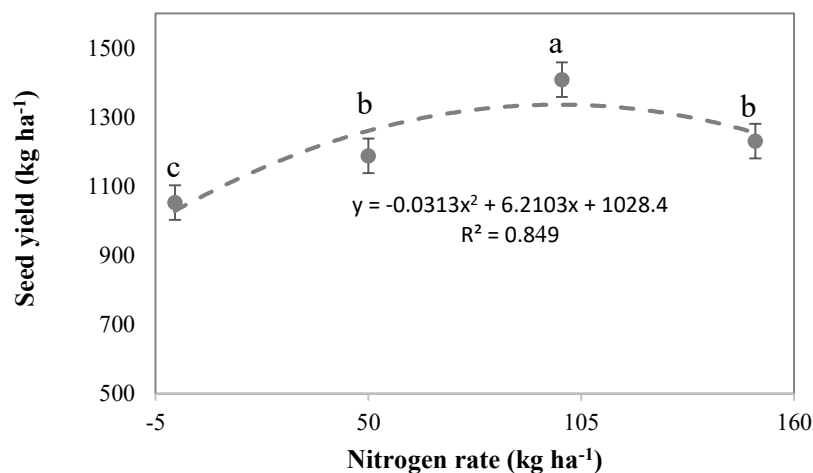
شکل ۵. پاسخ شاخص برداشت به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطی نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می باشد.

۳-۴. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف نیتروژن تأثیر معنی داری بر عملکرد دانه در هکتار داشت؛ ولی تأثیر گوگرد و برهمکنش گوگرد × نیتروژن معنی دار نبود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نیز نشان داد که عملکرد دانه در پاسخ به مصرف گوگرد تغییرات معنی داری نسبت به عدم مصرف آن نداشت. با این حال، عملکرد دانه افزایش ۲۱/۲ درصدی در پاسخ به مصرف کود نیتروژن (متوسط سطوح مصرف نیتروژن) نسبت به عدم مصرف آن نشان داد. میزان افزایش عملکرد دانه گوار نیز در پاسخ به مصرف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به ترتیب ۱۲/۸، ۳۳/۸، ۱۶/۹ درصد بود. نتایج تجزیه رگرسیون نیز نشان داد که پاسخ عملکرد دانه به کود نیتروژن مصرفی روند درجه دوم معنی دار داشت و این پاسخ حدود ۸۴ درصد از تغییرات این صفت در پاسخ به میزان مصرف نیتروژن را توجیه می کرد (شکل ۶). عدم پاسخ معنی دار رشد و عملکرد به مصرف گوگرد می تواند حاصل دو دلیل اصلی باشد: ۱- کفایت سطح گوگرد قابل دسترس در خاک و ۲- ناکافی بودن سطح گوگرد مصرفی. غلظت بحرانی گوگرد خاک برای گندم نیز در حدود ۱۵-۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم در روش های مختلف تخمین زده شده است (Yesmin *et al.*, 2021). با توجه به اینکه میزان گوگرد در خاک مزرعه مورد مطالعه ۱۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود، می توان بیان کرد که غلظت کافی گوگرد در خاک می تواند دلیل عدم پاسخ معنی دار گوار به گوگرد مصرفی باشد. غلظت بحرانی گوگرد خاک برای غلاتی همچون گندم در حدود ۱۵-۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. با این وجود، گیاهان روغنی و حبوباتی همچون گوار که دارای پتانسیل تثبیت زیستی نیتروژن هستند، در مقایسه با غلات به گوگرد بیشتری برای رشد مطلوب نیاز دارند (Sharma *et al.*, 2024). در مطالعه ای در برزیل نیز حد بحرانی گوگرد خاک برای سویا در خاک های مختلف بین ۱۷ تا ۱۹/۳

میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شد (Sfredo & Moreira, 2015). لذا باتوجه به عدم وجود مطالعه مشخص در مورد حد کفایت بحرانی گوگرد در خاک برای گیاه گوار، نمی توان به طور قطع کفایت سطح گوگرد در خاک شنی لومی مزرعه را دلیل عدم پاسخ به کود گوگرد مصرفی دانست. به علاوه مشخص شده است که سولفات های آلی ۳۰ تا ۷۰ درصد از کل گوگرد آلی خاک را تشکیل می دهند و حداقل بخشی از سولفات آلی از طریق فعالیت میکروبی برای گیاهان قابل جذب هستند. از طرفی، فرم اصلی قابل جذب گوگرد برای گیاهان اغلب به صورت سولفات (SO_4^{2-}) است، بنابراین عنصر گوگرد برای جذب نیاز به اکسیداسیون و تبدیل به سولفات از طریق واکنش های شیمیایی و یا فعالیت میکروبی دارد (Schoenau & Malhi, 2008; Sharma *et al.*, 2024). مقدار مصرف عنصر گوگرد در مزارع سویای آمریکا برای تسریع تبدیل گوگرد عنصری به سولفات ممکن است حتی به ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار نیز برسد (Fleuridor *et al.*, 2023). بنابراین ممکن است عدم پاسخ معنی دار گیاه گوار به مصرف گوگرد به دلیل ناکافی بودن سطح گوگرد مصرفی باشد.

از طرفی، افزایش معنی دار عملکرد دانه در پاسخ به کاربرد نیتروژن نشان دهنده نقش حیاتی این عنصر در بهینه سازی فرآیندهای رشد و عملکرد اقتصادی گیاه گوار است. افزایش سطح برگ در پاسخ به مصرف نیتروژن می تواند از جمله دلایل اصلی افزایش عملکرد دانه از طریق افزایش سطح نور دریافتی و میزان فتوسنتز سایه انداز گیاهی باشد. نیتروژن از طریق افزایش تعداد غلاف، تعداد دانه در واحد سطح، شاخص سطح برگ و بهبود سرعت فتوسنتز به عنوان مهم ترین عنصر غذایی در افزایش عملکرد دانه محسوب می شود (Taiz *et al.*, 2015; Fageria *et al.*, 2008). در سطوح بالای نیتروژن (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار)، علی رغم افزایش نسبی ماده خشک، عملکرد دانه نسبت به سطح ۱۰۰ کیلوگرم کاهش یافت. این موضوع می تواند به دلیل افزایش رقابت درون گیاهی برای منبع فتوسنتزی و تخصیص نامتوازن مواد به اندام های رویشی باشد (Lemaire *et al.*, 2008). افزایش رشد رویشی به هزینه کاهش عملکرد نیز با نتایج ما سازگاری داشت، به طوری که شاخص برداشت گیاه در سطح مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نسبت به مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش معنی دار نشان داد. لازم به ذکر است که میزان نیتروژن نیترات موجود در خاک مطابق آنالیز خاک ابتدای فصل رشد در حدود ۶۵ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۱) که بیانگر این است که مجموع نیاز به نیتروژن برای بیشینه تولید عملکرد در گیاه گوار در حدود ۱۶۵ کیلوگرم در هکتار است. نتایج آنالیز رگرسیون نشان داد که الگوی تغییرات عملکرد دانه در پاسخ به نیتروژن از روند درجه دوم تبعیت کرد و این مدل درجه دوم توانست حدود ۸۴ درصد از تغییرات عملکرد را توضیح دهد. پاسخ درجه دوم عملکرد دانه در پاسخ به مصرف کود نیتروژن پیش تر نیز گزارش شده بود (Archontoulis & Miguez, 2015). بنابراین، سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار می تواند به عنوان سطح بهینه برای دستیابی به حداکثر عملکرد دانه در شرایط حاضر توصیه شود؛ زیرا در این سطح، گیاه بدون ورود به فاز رشد رویشی بیش از حد، از حداکثر ظرفیت تولید زایشی خود بهره برداری می کند.



شکل ۶. پاسخ عملکرد دانه به میزان کود نیتروژن مصرفی. نوار خطای نمایش داده شده نمایانگر خطای معیار میانگین می باشد.

۴. نتیجه گیری

نتایج نشان داد که مصرف گوگرد و برهمکنش گوگرد $\times$ نیتروژن در این آزمایش اثر معنی داری بر صفات مورد بررسی نداشت که می تواند ناشی از سطح کافی گوگرد موجود در خاک باشد. نیتروژن نقش کلیدی در بهبود شاخص سطح برگ، افزایش ماده خشک، تعداد غلاف، تعداد دانه در واحد سطح و عملکرد دانه در گیاه گوار ایفا کرد. نتایج تجزیه رگرسیون نشان داد که پاسخ عملکرد گوار به میزان کود مصرفی از یک رابطه درجه دوم پیروی می کند. همچنین مصرف ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار به عنوان سطح بهینه جهت دستیابی به بیشینه رشد و عملکرد در این آزمایش بود. لازم به ذکر است که با توجه به فراهمی ۶۵ کیلوگرم نیتروژن نیتراتی از طریق خاک، نیاز نیتروژنی این گیاه برای تولید بیشینه عملکرد را می توان ۱۶۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بیان نمود. بنابراین، مصرف هدفمند نیتروژن با توجه به شرایط اقلیمی و خاک منطقه می تواند به عنوان راهبردی موثر برای بهبود راندمان مصرف کود نیتروژن مصرفی، اصلاح الگوی مصرف کود مصرفی و کاهش خسارت زیست محیطی ناشی از مصرف بی رویه کود نیتروژن مصرفی باشد. در ایسن مطالعه، اگرچه مصرف ۱۰۰ کیلوگرم عنصر گوگرد به تنهایی تأثیر معنی داری بر صفات رشدی و عملکردی نداشت؛ با این حال، توصیه می شود در پژوهش های آینده تأثیر سطوح مصرف بالاتر گوگرد در خاک هایی با میزان سولفات کمتر از ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم مورد مطالعه قرار گیرد.

۵. تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد. همچنین مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد.

۶. منابع

- 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. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0331-9_15.
- Aliverdi, A., & Karami, S. (2024). Effect of silicates and their dissolving bacteria on growth and yield of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.). *Plant Productions*, 47(4), 511-521. <https://10.22055/ppd.2024.47097.2176>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126791>.
- 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(1), 47. <https://doi.org/10.1186/s40659-020-00312-4>.
- Archontoulis, S.V., & Miguez, F.E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107, 786–798. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0506>.
- Avola, G., Riggi, E., Trostle, C., Sortino, O., & Gresta, F. (2020). Deficit irrigation on guar genotypes (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.): Effects on seed yield and water use efficiency. *Agronomy*, 10(6), 789. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060789>.
- Boghara, M.C., Dhaduk, H.L., Kumar, S., Parekh, M.J., Patel, N.J., & Sharma, R. (2016). Genetic divergence, path analysis and molecular diversity analysis in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L. Taub.). *Industrial Crops and Products*, 89, 468–477.
- Bhatt, M., Eskridge, K.M., Rose, D.J., Santra, D.K., Baenziger, P.S., & Regassa, T. (2017). Seeding rate, genotype, and topdressed nitrogen effects on yield and agronomic characteristics of winter wheat. *Crop Science*, 57(2), 951-963.
- Dadgar, M., Rastegar, S., & Piry, H. (2021). Effect of different irrigation intervals on some morphological characteristics of different genotypes of guar (*Cyamopsis tetragonoloba*). *Iranian Journal of Pulses Research*, 12(1), 156–170. <https://doi.org/10.22067/IJPR.V12i1.83229>. (In Persian).
- Dhakal, C., & Lange, K. (2021). Crop yield response functions in nutrient application: A review. *Agronomy Journal*, 113, 5222–5234. <https://doi.org/10.1002/agj2.20863>.

- Emam, Y., Salimi-Koochi, S., & Shokoofa, A. (2009). Effects of different levels of nitrogen fertilizer on grain yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum*) under irrigated and rainfed conditions. *Iranian Journal of Field Crop Research*, 7(1), 323–334. <https://sid.ir/paper/118878/fa>. (In Persian).
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., & Li, Y.C. (2008). The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty-first century. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 1121–1157. <https://doi.org/10.1080/01904160802116068>.
- Fageria, N.K. (2010). Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- 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(4). <https://doi.org/10.1002/agj2.21328>.
- Forooghi, L. & Ebadi, A. (2012) Effect of nitrogen and sulfur fertilizer application on yield, yield components, and some physiological traits of spring safflower. *Crop Production*, 5(2), 37–56. <https://doi.org/20.1001.1.2008739.1391.5.2.3.4>. (In Persian).
- Frankow-Lindberg, B.E., & Dahlin, A.S. (2013). N₂ fixation, N transfer, and yield in grassland communities including a deep-rooted legume or non-legume species. *Plant Soil*, 370(3), 567–581. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1650-z>.
- Garg, S.S., & Gupta, J. (2023). Guar gum-based nanoformulations: Implications for improving drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 229, 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.271>.
- 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(19), 2280–2288. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1921194>.
- Han, X., Xiao, X., Zhang, J., Shao, M., Jie, Y., & Xing, H. (2024). Effects of nitrogen fertilizer and planting density on growth, nutrient characteristics, and chlorophyll fluorescence in silage maize. *Agronomy*, 14, 1352. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071352>.
- Hatami, H., Ayneband, A., Azizi, M., & Dadkhah, A. (2009). Effect of nitrogen fertilizer on growth and yield of soybean cultivars in North Khorasan. *Crop Production Journal*, 2(2), 25–42. <https://sid.ir/paper/134930/fa> (In Persian).
- Hemmati, K., Vahdatpour, F., & Aroiee, H. (2021). Leaf area index, dry matter accumulation and allocation trends in *Vicia faba* L. affected by inoculation with *Rhizobium* and *Pseudomonas*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(4), 857–871. https://jast.modares.ac.ir/browse.php?a_id=36073&sid=23&slc_lang=en.
- Keiri-fEstiar, H., Mirshekari, B., Farahvash, F., Khalilvandeh Behruzyar, E., & Tarinezhad, 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 Science*, 11(4), 883–892. <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1217.1250>. (In Farsi).
- Kotnala, B., Panneerselvam, V., & Vijayakumar, A.K. (2024). Physicochemical, structural, and functional characterization of guar meal protein isolate (*Cyamopsis tetragonoloba*). *Heliyon*, 10(8), e24925. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24925>.
- Kulczycki, G. (2021). The effect of elemental sulfur fertilization on plant yields and soil properties. *Advances in Agronomy*, 167, 105–181. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.12.003>.
- Leghari, S.J., Wahocho, N.A., Laghari, G.M., Laghari, A.H., Bhabhan, G.M., & Talpur, K.H. (2016). Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9).
- Lemaire, G., Jeuffroy, M.H., & Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005>.
- 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(2), 186–193. <http://dx.doi.org/10.31742/IJGPB.80.2.9>.
- Nandi, P. 2024. *Guar Gum Market Research Report Information*, market research future from <https://www.marketresearchfuture.com/reports/guar-gum-market-7070>.
- Makino, A., Shimada, T., Takumi, S., Kaneko, K., Matsuoka, M., Shimamoto, K., Nakamura, K., Uchimiya, S., Kishimoto, M., & Mae, T. (2003). Differences between maize and rice in N-use efficiency for photosynthesis and protein allocation. *Plant and Cell Physiology*, 44(9), 952–956. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg113>.
- Meftahizadeh, H., Ghorbanpour, M., & Asareh, M.H. (2019). Comparison of morphological and phytochemical characteristics in guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) landraces and cultivars under different sowing dates in an arid environment. *Industrial Crops and Products*, 140, 111606. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111606>.

- Ning, C., Gao, P.D., Wang, B.Q., Lin, W.P., Jiang, N.H., & Cai, L.Z. (2017). Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1819–1831.
- 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(1), Article 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>.
- Norouzi, S., Akbari, G., Alahdadi, I., Soltani, E., & 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 Science and Sustainable Production*, 31(2), 339–359. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.1311>. (In Persian).
- Priyanka, K., Narayana, E., Venkateswarulu, B., & Lakshmi, G.V. (2016). Effect of nitrogen and phosphorus on growth and yield of clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taubert) in sandy loam soils of Andhra Pradesh. *Andhra Agricultural Journal*, 63(1), 50–53.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109871>.
- Rostami, F., & Eghbal Ghobadi, M. (2021). The effect of bentonite sulfur and nitrogen levels on root growth, physiological traits, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology Journal*, 13(2), 5–22. <https://sid.ir/paper/1032129/fa>. (In Persian).
- Saberali, S.F., Modarres-Sanavy, S.A. M., Bannayan, M., Baghestani, M.A., Rahimian Mashhadi, H., & Hoogenboom, G. (2012). Dry bean competitiveness with redroot pigweed as affected by growth habit and nitrogen rate. *Field Crops Research*, 135(8), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.06.016>.
- Samuel, S.T.P., & Dawson, J. (2023). Effect of sulphur and foliar application of thiourea on growth and yield of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(9), 3264–3268. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i92576>.
- Sfredo, 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). <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1056912>.
- Schoenau, J.J., & Malhi, S.S. (2008). Sulfur forms and cycling processes in soil and their relationship to sulfur fertility, Sulfur: A missing link between soils, crops, and nutrition. *Applied Statistics in Biology*, 50, 1–10.
- Sharma, J., & Umesha, C. (2024). Influence of nitrogen and sulphur levels on growth and yield attributes of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(6), 939–945. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i62546>.
- Sharma, R.K., Cox, M.S., Oglesby, C., & Dhillon, J.S. (2024). Revisiting the role of sulfur in crop production: A narrative review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 101013. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101013>.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Wang, Q., Li, S., Li, J., & Huang, D. (2024). The utilization and roles of nitrogen in plants. *Forests*, 15(7), 1191. <https://doi.org/10.3390/f15071191>.
- Yesmin, R., Hossain, M., Kibria, M.G., Jahiruddin, M., Solaiman, Z.M., Bokhtiar, S.M., Hossain, M.B., Satter, M.A., & Abedin, M.A. (2021). Evaluation of critical limit of sulphur in soils for wheat (*Triticum aestivum* L.) and mustard (*Brassica napus* L.). *Sustainability*, 13, 8325. <https://doi.org/10.3390/su13158325>.
- Zhao, D., Reddy, K.R., Kakani, V.G., & Reddy, V.R. (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy*, 22(4), 391–403. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.06.005>.