Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Evaluation of Yield, Forage Quality, and Activities of Catalase and Guaiacol Peroxidase Enzymes in Maize (*Zea Mays* L.) as Influenced by Nitrogen Form in Soilless Culture

Maryam Ghorbani[✉1] | **Shahram Kiani** [2] | **Sina Fallah** [3] | **Ali Moharrery**[4]

1. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: maryamghorbani@uoz.ac.ir.
2. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: shkiani2002@yahoo.com.
3. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: falah1357@yahoo.com.
4. Department of Animal Nutrition, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: moharrery@sku.ac.ir.

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 12, 2026

Revised: Aug. 10, 2026

Accepted: Aug. 31, 2026

Published online: Nov. 23, 2026

Keywords:
Catalase,
Crude protein,
Forage quality,
Neutral detergent fiber,
Single Cross 704

ABSTRACT

Improving the yield and quality of maize forage is of great importance in livestock nutrition. This study investigated the effects of different ammonium-to-nitrate ratios (0:100, 12.5:87.5, 25:75, 37.5:62.5, and 50:50) on the yield and forage quality of two maize cultivars (Single Cross 704 and 410) grown under soilless culture conditions. The results revealed significant interactions between ammonium-to-nitrate ratio and cultivar for most of the traits studied. The highest shoot nitrogen concentration was observed in cultivar 704 at the 37.5:62.5 ratio, showing a 72% increase compared to the control. The highest phosphorus concentration (2.3 times the control) was recorded in cultivar 704 at the 50:50 ratio, with no significant difference from cultivar 410 at the same ratio. The increasing trend of iron concentration continued up to the 25:75 ratio. The highest shoot dry weight (168.90 g plant^{-1}) was obtained at the 25:75 ratio, and the highest crude protein content (16.56%) and total chlorophyll (61% increase) were recorded in cultivar 704 at the 37.5:62.5 ratio. The highest activities of catalase and guaiacol peroxidase were observed at the 50:50 ratio. At the 37.5:62.5 ratio, neutral detergent fiber, crude fat, and ash content increased by 43.2%, 81%, and 33.3%, respectively, while water-soluble carbohydrates increased by 4.6 times compared to the control. Cultivar 704 outperformed cultivar 410 in most yield and quality traits. Overall, the 37.5:62.5 ammonium-to-nitrate ratio in combination with cultivar 704 appeared to provide the best balance between forage yield and quality in soilless culture systems.

Cite this article: Ghorbani, M., Kiani, Sh., Fallah, S., Moharrery, A., (2026) Evaluation of Yield, Forage Quality, and Activities of Catalase and Guaiacol Peroxidase Enzymes in Maize (Zea Mays L.) as Influenced by Nitrogen Form in Soilless Culture, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (9), 2207-2227. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418422.670173

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418422.670173

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rapid urbanization and economic growth have significantly intensified the shortage of agricultural land, threatening global food security. Given the heavy dependence of the agricultural sector on water resources and the effects of climate change, innovative solutions for sustainable crop production are essential. In this context, forage production through soilless cultivation has emerged as a promising and expanding strategy. Maize (*Zea mays* L.) is a suitable candidate for forage production in soilless systems due to its rapid growth, high biomass production, and low seed cost.

Nitrogen, as one of the essential macronutrients, plays a key role in enhancing both the quantity and quality of agricultural products. Plants can absorb nitrogen in two main forms: nitrate and ammonium, each having distinct effects on plant growth and development. Recent studies have demonstrated that simultaneous supply of both nitrogen forms results in better plant performance compared to the exclusive use of either form alone. The response of different maize genotypes to nitrogen form varies under hydroponic conditions. Moreover, changes in nitrogen nutrition can affect biochemical pathways and the activity of antioxidant enzymes in maize.

Despite the importance of nitrogen form on growth and yield, limited information is available regarding the effect of different ammonium-to-nitrate ratios on forage quality indices such as crude protein, fiber fractions, and antioxidant compounds in soilless systems. Most previous studies have focused on grain yield or biomass, with less attention paid to forage quality parameters. Since forage quality plays a direct role in livestock nutrition and animal health, it is essential to investigate the effect of nitrogen form on both yield and quality of forage.

Therefore, this study was conducted to investigate the effects of different ammonium-to-nitrate ratios on yield, nutrient concentrations, activities of catalase and guaiacol peroxidase enzymes, and forage quality indices, including crude protein, neutral detergent fiber, crude fat, total ash, water-soluble carbohydrates, nitrate concentration, and leaf-to-stem ratio, of two maize cultivars (Single Cross 704 and 410) grown under soilless culture conditions.

Method

The experiment was conducted as a soilless culture in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. The experiment was arranged as a factorial within a completely randomized block design with two factors: ammonium-to-nitrate ratio and maize cultivar, with four replications. The first factor comprised five ammonium-to-nitrate ratios (0:100, 12.5:87.5, 25:75, 37.5:62.5, and 50:50). The second factor consisted of two maize single-cross hybrids: Single Cross 704 (late-maturing) and Single Cross 410 (early-maturing). Each replicate consisted of one pot (one plant per pot), resulting in a total of 40 experimental units.

Plant Preparation and Growth Conditions

Maize seeds were surface-sterilized in 1% sodium hypochlorite solution for one hour and then sown in seedling trays containing a cocopeat and perlite mixture (2:1 v/v). Seedlings were irrigated daily with distilled water. After germination and emergence of the first two leaves, seedlings were transplanted into 10-liter plastic pots filled with perlite (0.5–5 mm).

Nutrient Solutions and Application

Distilled water was used to prepare the nutrient solutions. The Ruakura nutrient solution was prepared with five different ammonium-to-nitrate ratios. The pH of all nutrient solutions was adjusted to 6.0. Electrical conductivity of the solutions ranged from 2.38 to 3.10 dS m^{-1}. Pots were arranged at a density of 9 plants per square meter. Plants were initially irrigated with one-quarter strength nutrient solution, and full-strength solution was applied from the 4–5 leaf stage (21 days after transplanting) until harvest. The pH and electrical conductivity of the nutrient solution around the roots were measured every two weeks and adjusted as needed. At the end of each week, leaching was performed with distilled water to prevent salt accumulation in the growing medium. During the experiment, the average day and night temperatures were 25 and 21°C, relative humidity ranged from 40 to 53%, and light intensity varied between 32,000 and 71,300 lux.

Measurements

The experiment was conducted as a soilless culture in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. The experiment was arranged as a factorial within a completely randomized block design with two factors: ammonium-to-nitrate ratio and maize cultivar, with four replications. The first factor comprised five ammonium-to-nitrate ratios (0:100, 12.5:87.5, 25:75, 37.5:62.5,

and 50:50). The second factor consisted of two maize single-cross hybrids: Single Cross 704 (late-maturing) and Single Cross 410 (early-maturing). Each replicate consisted of one pot with one plant per pot, resulting in a total of 40 experimental units.

Maize seeds were surface-sterilized in 1% sodium hypochlorite solution for one hour and then sown in seedling trays containing a cocopeat and perlite mixture (2:1 v/v). Seedlings were irrigated daily with distilled water. After germination and emergence of the first two leaves, seedlings were transplanted into 10-liter plastic pots filled with perlite (0.5–5 mm). Plants were harvested 66 days after planting, at which time the 25:75 and 37.5:62.5 treatments had reached the kernel dough stage.

At the tasseling stage, the 11th and 12th leaves were sampled for measuring catalase and guaiacol peroxidase activities, as well as total chlorophyll content. At harvest, plants were separated into shoots (leaves + stems) and roots. Fresh and dry weights were recorded after drying samples at 70°C for 72 hours. Dried samples were ground for chemical analyses. Nitrogen concentration was determined using the Kjeldahl method. Phosphorus was measured using the yellow phosphovanadomolybdate method with a spectrophotometer, while potassium was determined using a flame photometer. Micronutrients including iron, manganese and zinc were measured using atomic absorption spectrophotometry. Insoluble fiber was determined according to the standard method of Van Soest. Crude protein was calculated by multiplying total nitrogen by 6.25. Also nitrate concentration was determined colorimetrically using the salicylic acid method.

Statistical Analysis

Prior to analysis, normality of data was checked using the Kolmogorov-Smirnov test. Data were then analyzed using SAS software (version 9.4), and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at the 5% probability level. Pearson correlation coefficients were calculated to examine relationships among measured traits.

Results

Macronutrient Concentrations

Shoot nitrogen concentration increased significantly with increasing ammonium proportion up to 37.5:62.5 in Single Cross 704 (31.33 g kg^{-1}) and up to 50:50 in Single Cross 410 (27.42 g kg^{-1}), showing 72% and 45% increases compared to the control, respectively. Phosphorus concentration also increased significantly with ammonium application, reaching the highest value (18.02 g kg^{-1}) in Single Cross 704 at the 50:50 ratio, which was 2.3 times higher than the control. In contrast, potassium concentration decreased with increasing ammonium proportion, with the lowest values recorded at the 50:50 ratio (20.46 g kg^{-1}).

Micronutrient Concentrations

Iron, zinc, and manganese concentrations in shoots increased with ammonium application up to the 25:75 and 37.5:62.5 ratios. The highest shoot iron concentration was observed in Single Cross 704 at the 25:75 ratio, while zinc and manganese concentrations were highest at the 37.5:62.5 ratio in both cultivars.

Total Chlorophyll Content

The highest total chlorophyll content was recorded in Single Cross 704 at the 37.5:62.5 ratio (61% increase compared to control). In Single Cross 410, the highest chlorophyll content was observed at the 25:75 ratio, showing a 61.1% increase compared to the nitrate-only treatment.

Shoot Dry Weight

Shoot dry weight significantly increased with ammonium application up to the 25:75 and 37.5:62.5 ratios. The highest shoot dry weight was recorded in Single Cross 704 at the 25:75 ratio (168.90 g $plant^{-1}$). However, at the 50:50 ratio, shoot dry weight decreased in both cultivars, indicating ammonium toxicity.

Catalase and Guaiacol Peroxidase Activities

Catalase and guaiacol peroxidase activities increased with increasing ammonium proportion, reaching maximum values at the 50:50 ratio. This increase indicates the onset of ammonium toxicity and oxidative stress, which explains the reduction in shoot and root dry weights at this treatment.

Forage Quality Indices

The highest crude protein content (16.56%) was obtained in cultivar 704 at the 37.5:62.5 ratio. The lowest forage nitrate concentration in both cultivars was observed at the 50:50 ratio, which significantly differed from other treatments. In cultivar 704, the 50:50 ratio reduced nitrate concentration by 70.3%, 50.5%, 41.2%, and 21.9% compared to the 0:100, 12.5:87.5, 25:75, and 37.5:62.5 ratios, respectively. At the 37.5:62.5 ratio, neutral detergent fiber, crude fat, and ash content increased by 43.2%, 81%, and 33.3%, respectively, while water-soluble carbohydrates increased by 4.6 times compared to the control. Cultivar 704 outperformed cultivar 410 in most yield and quality traits.

Conclusions

The results of this study demonstrated that partial substitution of nitrate with ammonium in the nutrient solution up to the 37.5:62.5 ratio significantly improved both yield and forage quality of maize in soilless culture. At this ratio, nitrogen and phosphorus concentrations, shoot dry weight, total chlorophyll content, crude protein, leaf-to-stem ratio, crude fat, and total ash content increased significantly, while nitrate concentration decreased to safe levels for livestock feeding. The positive effects of ammonium supplementation on nitrogen uptake can be attributed to the passive absorption mechanism of ammonium, which requires less energy compared to nitrate. This energy saving allows plants to allocate more resources to the uptake of other essential nutrients, including phosphorus and micronutrients. The leaf-to-stem dry weight ratio, a key indicator of forage palatability, was significantly improved at the 37.5:62.5 ratio, as stems contain more lignified tissues with lower digestibility compared to leaves. The increase in crude protein content at this ratio was also remarkable, and the strong positive correlations observed between shoot nitrogen concentration and crude protein content confirmed the direct role of nitrogen nutrition in enhancing protein synthesis. The reduction in nitrate concentration at the 37.5:62.5 ratio is another important finding, as high nitrate accumulation in forage can pose health risks to livestock. Based on established guidelines, the nitrate levels recorded at this ratio fall within safe ranges for livestock feeding. In terms of fiber fractions, the increases in neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent lignin (ADL) at the 25:75 and 37.5:62.5 ratios were primarily associated with increased stem dry weight and advanced phenological development. However, the lower fiber content at the 0:100 and 50:50 ratios should not be interpreted as improved forage quality, as it was the result of incomplete plant development rather than superior nutritional characteristics. The 50:50 ratio, despite showing acceptable performance in some indices, was associated with significant increases in shoot ammonium concentration, electrolyte leakage, and catalase and guaiacol peroxidase activities. These changes, along with reduced shoot dry weight, clearly indicated ammonium toxicity and oxidative stress. The late-maturing cultivar Single Cross 704 showed better response to combined ammonium and nitrate nutrition compared to the early-maturing cultivar 410 and was superior in most yield and quality traits, suggesting that cultivar selection is an important factor in optimizing forage production under soilless conditions. Overall, the 37.5:62.5 ammonium-to-nitrate ratio in combination with cultivar 704 appeared to provide the best balance between forage yield and quality in soilless culture systems. Further studies are needed to evaluate the effects of different ammonium-to-nitrate ratios on other forage crops under various environmental conditions, as well as to investigate the molecular mechanisms underlying ammonium tolerance in different maize cultivars.

Funding

This research was financially and spiritually supported by the Vice-Chancellor for Research of Shahrekord University. The financial support was provided by Shahrekord University, Faculty of Agriculture, through a research grant for the first author's dissertation and also for other authors.

Authorship contribution

Maryam Ghorbani (Former Ph.D. Student, First Author): Sample preparation, conducting experiments, data collection, calculations, statistical analysis, interpretation of results, and preparation of the original draft.

Shahram Kiani (Associate Professor, Supervisor, Second Author): Research design, supervision of the research process, review and verification of results, revision, and finalization of the manuscript.

Ali Moharrery (Professor, Advisor, Third Author): Participation in research design, supervision, manuscript review, and editing.

Sina Falah (Professor, Advisor, Fourth Author): Participation in research design, supervision, manuscript review, and editing.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No artificial intelligence tools were used in the article writing process.

Data availability statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Vice-Chancellor for Research of Shahrekord University and the Faculty of Agriculture for their financial support and cooperation in conducting this research. The authors also thank the anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions in improving the manuscript.

Ethical considerations

The authors have observed all ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them. This study did not involve human participants or animals and complied with the principles of scientific research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بررسی عملکرد، کیفیت علوفه و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در ذرت (*Zea mays* L.) تحت تأثیر شکل نیتروژن در کشت بدون خاک

مریم قربانی [۱]✉ | شهرام کیانی [۲] | سینا فلاح [۳] | علی محرری [۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: maryamghorbani@uoz.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: shkiani2002@yahoo.com
۳. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: falah1357@yahoo.com
۴. گروه تغذیه دام، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: moharrery@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
الیاف نامحلول در شوینده خنثی،
پروتئین خام،
سینگل کراس ۷۰۴،
کاتالاز،
کیفیت علوفه.

چکیده

افزایش عملکرد و بهبود کیفیت علوفه ذرت از اهمیت زیادی در تغذیه دام برخوردار است. این پژوهش تأثیر نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات (صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰) را بر عملکرد و کیفیت علوفه دو رقم ذرت (سینگل کراس ۷۰۴ و ۴۱۰) در کشت بدون خاک بررسی کرده است. نتایج حاکی از برهمکنش معنی‌دار بین نسبت آمونیوم به نیترات و رقم بر اکثر صفات مورد بررسی بود. بیشترین غلظت نیتروژن شاخساره در رقم ۷۰۴ و نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ مشاهده شد که ۷۲ درصد افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد نشان داد. همچنین بیشترین غلظت فسفر (۳/۲ برابر شاهد) در رقم ۷۰۴ و نسبت ۵۰ به ۵۰ (بدون تفاوت معنی‌دار با رقم ۴۱۰) مشاهده شد. روند افزایش در غلظت آهن تا نسبت ۲۵ به ۷۵ ادامه داشت. بیشترین وزن خشک شاخساره (۱۶۸/۹۰ گرم در بوته) در نسبت ۲۵ به ۷۵ و بیشترین پروتئین خام (۱۶/۵۶ درصد) در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ رقم ۷۰۴ حاصل شد. بیشترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در نسبت ۵۰ به ۵۰ مشاهده شد. در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی، چربی و خاکستر به ترتیب ۴۳/۲٪، ۸۱ ٪ و ۳۳/۳٪ در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌دار و کربوهیدرات‌های محلول ۴/۶ برابر شاهد بود. به نظر می‌رسد نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات و رقم سینگل کراس ۷۰۴ بهترین تعادل را بین عملکرد و کیفیت علوفه در کشت بدون خاک فراهم می‌کند.

استناد: قربانی؛ مریم، کیانی؛ شهرام، فلاح؛ سینا، محرری؛ علی،(۱۴۰۵) بررسی عملکرد، کیفیت علوفه و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در ذرت (*Zea mays* L.) تحت تأثیر شکل نیتروژن در کشت بدون خاک ، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۹)، ۲۲۲۷-۲۲۰۷.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418422.670173
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418422.670173

مقدمه

توسعه سریع شهرنشینی و رشد اقتصادی، کمبود زمین‌های کشاورزی را به طور قابل توجهی تشدید کرده و امنیت غذایی جهانی را به خطر انداخته است (Cao & Wang, 2025). با توجه به وابستگی شدید بخش کشاورزی به منابع آب و اثرات تغییرات اقلیمی، ارائه راهکارهای نوآورانه برای تولید پایدار محصولات کشاورزی یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. در این میان، تولید علوفه با روش کشت بدون خاک، یکی از راهکارهای مهم و رو به گسترش محسوب می‌شود. ذرت (Zea mays L.) به‌دلیل رشد سریع، تولید زیست‌توده بالا و هزینه کم بذر، گزینه‌ای مناسب برای تولید علوفه در این سیستم است (Naik et al., 2012). نیتروژن به عنوان یکی از عناصر غذایی پرمصرف، نقش کلیدی در افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارد. گیاهان نیتروژن را به دو شکل نیترات و آمونیوم جذب می‌کنند که هر کدام تأثیرات متفاوتی بر رشد و نمو گیاه دارند. پژوهش‌های اخیر نشان داده است که تغذیه هم‌زمان گیاهان با هر دو شکل نیتروژن، عملکرد بهتری نسبت به کاربرد تنها یکی از آنها دارد. پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف ذرت به شکل نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن در شرایط هیدروپونیک متفاوت است (Garnett et al., 2015). در مطالعه‌ای بر روی ذرت در شرایط هیدروپونیک مشخص گردید که تغییرات در تغذیه نیتروژنی می‌تواند بر مسیرهای بیوشیمیایی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تأثیر بگذارد (Esim et al., 2024). با وجود اهمیت شکل نیتروژن بر رشد و عملکرد، اطلاعات محدودی در مورد تأثیر نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات بر کیفیت علوفه ذرت در سیستم کشت بدون خاک وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر عملکرد دانه یا زیست‌توده متمرکز بوده‌اند و به شاخص‌های کیفی علوفه مانند پروتئین خام، الیاف نامحلول و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی کمتر پرداخته شده است. از آنجایی که کیفیت علوفه نقش مستقیمی در تغذیه دام و سلامت دستگاه گوارش آن دارد، بررسی اثر شکل نیتروژن بر کمیت و کیفیت علوفه ضروری است. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات بر عملکرد، غلظت عناصر غذایی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و شاخص‌های کیفی علوفه دو رقم ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴ و ۴۱۰) در شرایط کشت بدون خاک انجام شد.

پیشینه تحقیق

اکثر گیاهان قادرند از آمونیوم یا نیترات به تنهایی و یا مخلوطی از هر دو شکل استفاده کنند. ظرفیت زیاد گیاهان در تجمع نیترات در برگ‌هایشان و اثر سوء نیترات بر سلامتی انسان و حیوانات سبب شده که آمونیوم بتواند در تأمین بخشی از نیتروژن گیاه نقش بسزایی داشته باشد (Santamaría et al., 1998; Bruning-Fann & Kaneene, 1993; Gangolli et al., 1994). در همین راستا، (Gurung, 2024)در مطالعه‌ای جامع بر روی ۱۶ ژنوتیپ گیاهی مختلف در کشت بدون خاک نشان داد که پاسخ گیاهان به شکل نیتروژن و نسبت آمونیوم به نیترات، وابسته به ژنوتیپ و محیط کشت است و بهینه‌سازی این نسبت می‌تواند کارایی مصرف نیتروژن را بهبود بخشد. بررسی اثر شکل‌های مختلف نیتروژن و تراکم کاشت بر رشد و عملکرد ذرت در کشت بدون خاک نشان داد که کاربرد نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم، زیست‌توده ذرت را در مقایسه با کاربرد هر یک از دو شکل نیتروژن به تنهایی، به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. این افزایش در تراکم‌های کم و زیاد کاشت به‌ترتیب ۴۰ و ۸۱ درصد بود که به افزایش تولید آدنوزین‌تری‌فسفات و در نتیجه فتوسنتز بیشتر نسبت داده شده است (Peng et al., 2018). بررسی نسبت‌های مختلف نیترات به آمونیوم بر جذب نیتروژن در گیاه چچم (Lolium perenne L.) نشان داد که بیشترین جذب نیتروژن در تیمارهای ۷۵ به ۲۵ و ۵۰ به ۵۰ نیترات به آمونیوم حاصل شد، در حالی‌که کاربرد هر یک از دو شکل نیتروژن به‌تنهایی (۱۰۰ درصد نیترات یا ۱۰۰ درصد آمونیوم) منجر به حداقل جذب نیتروژن گردید (Cao et al., 2011). بنابراین در تأمین نیتروژن گیاه باید از هر دو شکل نیتروژن استفاده کرد که البته نسبت بین دو شکل برای هر گیاه متفاوت است. همچنین غلظت‌های زیاد آمونیوم سبب ایجاد سمیت، بروز تنش و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان می‌شود. همچنین شکل نیتروژن مصرفی می‌تواند بر نوع و میزان ترکیبات آلی و معدنی در گیاه و کیفیت علوفه اثرگذار باشد. در همین راستا نتایج مطالعه‌ای بر روی گل ژربرا در کشت بدون خاک نشان داد که افزایش سهم آمونیوم تا ۶۰ درصد نیتروژن مصرفی، میزان سلولز، همی‌سلولز و لیگنین ساقه گل‌دهنده را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. در مقابل، کاربرد نسبت ۲۰ به ۸۰ آمونیوم به نیترات در مقایسه با تغذیه کاملاً نیتراتی، باعث افزایش معنی‌دار تمامی این شاخص‌ها شد (خلج، ۱۳۹۵). اگرچه تأثیر شکل نیتروژن بر رشد و عملکرد برخی گیاهان بررسی شده است، اما اطلاعات اندکی در مورد اثر نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات بر شاخص‌های کیفی علوفه ذرت (پروتئین خام، الیاف نامحلول در شوینده خنثی، غلظت نیترات، میزان چربی، خاکستر و...) در سیستم کشت بدون خاک وجود دارد. همچنین، پاسخ ارقام مختلف ذرت به

این نسبت‌ها و اثر متقابل آنها بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول‌پراکسیداز و غلظت عناصر غذایی به‌خوبی بررسی نشده است. بنابراین، انجام پژوهش حاضر برای پر کردن این خلأ تحقیقاتی ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه دانشگاه شهرکرد به صورت کشت بدون خاک و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل شامل پنج نسبت آمونیوم به نیترات (صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰) و دو رقم ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴ دیررس و ۴۱۰ زودرس) در چهار تکرار (هر تکرار شامل یک واحد آزمایشی یا یک گلدان و در مجموع ۴۰ واحد آزمایشی) اجرا شد. بذور ذرت پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک ساعت، در سینی حاوی کوکوپیت و پرلیت (۲ به ۱) کشت شده و پس از ظهور دو برگ، نشاها به گلدان‌های ۱۰ لیتری حاوی پرلیت منتقل شدند (هر گلدان یک بوته). محلول‌های غذایی رواکورا (Smith et al., 1983) با پنج نسبت آمونیوم به نیترات (جدول ۱) با استفاده از آب مقطر تهیه و pH آنها روی ۶ تنظیم شد. گلدان‌ها با تراکم ۹ بوته در مترمربع (۹۰ هزار بوته در هکتار) چیده شدند. پس از انتقال نشاها، ابتدا از محلول یک‌چهارم قدرت و از مرحله ۴-۵ برگی (پس از ۲۱ روز) از محلول کامل استفاده شد. محلول‌دهی روزانه به‌صورت دستی و با کسر آبشویی ۵ تا ۲۰ درصد انجام شد. در پایان هر هفته، عمل آبشویی (شستشوی بستر) با آب مقطر انجام می‌گردید تا از تجمع نمک‌ها در بستر کشت جلوگیری شود. میانگین دمای روز و شب به‌ترتیب ۲۵ و ۲۱ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۴۰-۵۳ درصد و نور ۳۲۰۰۰-۷۱۳۰۰ لوکس بود. همچنین pH و هدایت الکتریکی محلول غذایی اطراف ریشه‌ها به صورت هر دو هفته یکبار اندازه‌گیری می‌شدند.

جدول ۱. غلظت عناصر غذایی پرمصرف، کم‌مصرف، سدیم و قابلیت هدایت الکتریکی در محلول غذایی رواکورا با نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات

نسبت آمونیوم به نیترات	نیتروژن کل	نیتروژن- نیترات	نیتروژن- آمونیوم	فسفر	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	گوگرد	قابلیت هدایت الکتریکی
	(میلی‌مول بر لیتر)								(دسی‌زیمنس بر متر)
صفر به ۱۰۰	۱۸/۸۵	۱۸/۸۵	۰	۱/۲۹	۹/۸۶	۴/۷۱	۲	۱/۸۷	۲/۳۸
۱۲/۵ به ۸۷/۵	۱۸/۸۵	۱۶/۴۹	۲/۳۶	۱/۲۹	۹/۸۶	۴/۷۱	۲	۴/۱۳	۲/۳۹
۲۵ به ۷۵	۱۸/۸۵	۱۴/۱۴	۴/۷۱	۱/۲۹	۹/۸۶	۴/۷۱	۲	۶/۴۹	۲/۶۰
۳۷/۵ به ۶۲/۵	۱۸/۸۵	۱۱/۷۸	۷/۰۷	۱/۲۹	۹/۸۶	۴/۷۱	۲	۸/۸۴	۲/۸۲
۵۰ به ۵۰	۱۸/۸۵	۹/۴۲	۹/۴۲	۱/۲۹	۹/۸۶	۴/۷۱	۲	۱۱/۲۰	۳/۱
	آهن	منگنز	روی	مس	مولیبدن	بور	سدیم	کلر	
	(میکرومول بر لیتر)								
	۱۰۷/۴	۹/۱	۳/۸	۰/۶	۰/۱	۴۶/۳	۶۵۰	۲۵۰	

منظور از نسبت آمونیوم به نیترات، درصد آمونیوم به درصد نیترات در محلول غذایی است.

در پایان مرحله ظهور گل آذین نر، نمونه‌برداری از برگ یازدهم و دوازدهم برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها انجام شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز (Hatamzadeh et al., 2014) از طریق تجزیه آب اکسیژنه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Cintra Model 101)، در طول موج ۲۴۰ نانومتر در زمان یک دقیقه انجام پذیرفت. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (Ferreira et al., 2010) ۴۹۵ میکرولیتر از مخلوط بافر آب‌اکسیژنه (۲۲۵ میلی‌مولار) و بافر گایاکول (۴۵ میلی‌مولار) با ۱۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی ترکیب و تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر طی یک دقیقه با استفاده از اسپکتوفتومتر (Cintra Model 101) قرائت شد. فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز براساس وزن تازه بافت گیاهی محاسبه و گزارش شد. بـرای محاسبه میزان کلروفیل کل برگ (Lichtenthaler, 1987) پس از عصاره‌گیری برگ (نمونه‌برداری از جوان‌ترین برگ و ۵ روز قبل از برداشت) با استون ۸۰ درصد، جذب محلول (A) با دسـتگاه اسـپکتروفتومتر در طـول موج‌هـای ۶۴۶/۸، ۶۶۳/۲ و ۴۷۰ نانومتر قرائت شد. سپس غلظـت رنگیزه‌ها از روابط ۱، ۲ و ۳ محاسبه شد:

رابطه ۱) کلروفیل a =۱۲/۲۵ (A ۶۶۳/۲) −۲/۷۹ (A۶۴۶/۸)

رابطه ۲) کلروفیل b =۲۱/۲۱ (A ۶۴۶/۸) − ۵/۱ (A۶۶۳/۲)

رابطه ۳) [کلروفیل b + کلروفیل a] = کلروفیل کل

درصد نشت یونی توسط روش پوایا و لئوپولد (Poovaiah & Leopold, 1973) و در برگهای جوان نسبتاً توسعه‌یافته (برگ دوازدهم) با استفاده از اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی محلول در دو مرحله و یک هفته قبل از برداشت انجام شد. پس از نمونه‌برداری، در پایان مرحله ظهور گل آذین نر گیاهان برداشت شدند و سپس قسمت‌های ریشه و شاخساره (برگ + ساقه) تفکیک و وزن تازه نمونه‌ها توسط ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها توسط آب معمولی و آب مقطر شسته و به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند تا خشک شوند. سپس وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به دنبال آن نمونه‌ها برای اندازه‌گیری‌های شیمیایی با استفاده از آسیاب برقی پودر شدند. غلظت عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف در شاخساره (برگ + ساقه) مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. غلظت نیتروژن موجود در نمونه‌ها پس از تهیه عصاره از روش خاکسترگیری تر با استفاده از روش کلدال (Jones, 2001) اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر در عصاره تهیه شده از روش خاکسترگیری خشک و ترکیب با اسید کلریدریک با روش فسفو وانادات مولیبدات زرد و با دستگاه اسپکتروفتومتر (Cintra Model 101) و پتاسیم با دستگاه فلیم‌فتومتر (Corning Model 410) اندازه‌گیری شد (Jones, 2001). برای اندازه‌گیری عناصر کم‌مصرف، نمونه‌های گیاهی ابتدا با روش هضم خشک آماده‌سازی و سپس در اسید کلریدریک حل شدند. غلظت عناصر آهن، روی، منگنز و مس در عصاره‌های حاصل با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید. به‌منظور اطمینان از دقت نتایج، از نمونه‌های شاهد و تکرارهای آزمایشگاهی استفاده شد .(Kabata-Pendias and Pendias., 2001) برای اندازه‌گیری نیترات پس از تهیه عصاره گیاهی، ۰/۲ میلی‌لیتر از عصاره با ۰/۸ میلی‌لیتر اسید سالیسیلیک ۵ درصد ترکیب و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای اتاق قرار داده شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۲ نرمال به نمونه‌ها اضافه شد تا pH به بالای ۱۲ برسد. پس از یک ساعت، شدت رنگ زرد حاصله با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر قرائت گردید (Cataldo et al., 1975). برای تعیین الیاف نامحلول در شوینده خنثی (Neutral Detergent Fiber, NDF) و میزان خاکستر کل از روش استاندارد استفاده گردید (Van Soest et al., 1991) همچنین پس از اندازه‌گیری نیتروژن کل با روش کلدال از رابطه زیر میزان پروتئین خام محاسبه شد (Soe Htet et al., 2021).

رابطه ۴) ۶/۲۵ × درصد نیتروژن = میزان پروتئین خام

چربی موجود در نمونه‌ها، با دستگاه سوکسله توسط حلالی آلی استون استخراج شد (Anonymous, 1990). برای اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول، ۱۰۰ میلی‌گرم از پودر خشک گیاهی با ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد در حمام آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه عصاره‌گیری شد. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره با آب مقطر به حجم ۲ میلی‌لیتر رسانده شد و به آن یک میلی‌لیتر فنل ۵ درصد و ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه گردید. پس از ۱۰ دقیقه، نمونه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه ورتکس و سپس ۲۰ دقیقه در دمای اتاق قرار داده شدند. جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۹۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت گردید (Albalasmeh et al., 2013). برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگروف اسمیرونوف (Kolmogorov-Smirnov) و تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و همچنین ضرایب همبستگی پیرسون به منظور بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی بین صفات اندازه‌گیری‌شده با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد.

یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی نسبت آمونیوم به نیترات بر تمام صفات مورد بررسی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی رقم ذرت نیز بر تمام صفات به‌جز آهن (که غیرمعنی‌دار بود) در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات و رقم ذرت بر غلظت آمونیوم و پتاسیم غیرمعنی‌دار، بر نیتروژن کل در سطح احتمال پنج درصد و بر مابقی صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان داد که اثر اصلی نسبت آمونیوم به نیترات بر تمام صفات مورد بررسی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی رقم ذرت بر وزن خشک شاخساره، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز و خاکستر کل (در سطح ۱ درصد) و بر نشت الکترولیت، نسبت وزن خشک برگ به ساقه و پروتئین خام در سطح ۵ درصد، اما بر الیاف نامحلول در شوینده خنثی و چربی خام تأثیر معنی‌داری نداشت. از طرف دیگر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات و رقم بر پروتئین خام و نشت الکترولیت در سطح احتمال ۱ درصد، وزن خشک شاخساره و نسبت وزن خشک برگ به ساقه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود، در حالیکه بر مابقی صفات تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۳).

جدول۲. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی و نوع رقم بر غلظت عناصر و کلروفیل کل در علوفه ذرت.

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیتروژن کل	نیترات	آمونیوم	فسفر	پتاسیم	آهن	منگنز	روی	کلروفیل کل
بلوک	۳	۲/۶۲^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۲^{ns}	۰/۵۵^{ns}	۲/۷۷^{ns}	۱۰۲/۱۸^{ns}	۲۲/۰۶^{ns}	۶/۵۸^{ns}	۰/۱۸^{ns}
نسبت آمونیوم به نیترات	۴	۱۸۷/۲۹**	۱۰/۴۱**	۰/۰۵**	۱۹۵/۷۳**	۱۱۸/۱۱**	۸۳۲۴/۷۰**	۵۲۷۱/۸۲**	۲۳۳۹/۰۵**	۹۰/۴۷**
رقم ذرت	۱	۳۱/۲۲**	۱/۵۷**	۰/۰۰۸**	۱۲/۶۰**	۲۵/۷۶**	۶۱/۷۵^{ns}	۱۰۲۴/۱۴**	۴۵۳/۶۰**	۸/۰۶**
نسبت آمونیوم به نیترات × رقم ذرت	۴	۱۰/۴۶*	۰/۳۵**	۰/۰۰۰۴^{ns}	۴/۶۲**	۱/۸۷^{ns}	۹۲۴/۷۰**	۱۷۹/۸۰**	۱۶۱/۰۷**	۰/۷۵**
خطا	۲۷	۲/۸۵	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۷	۱/۲۳	۵۴/۲۲	۱۴/۲۷	۴/۷۸	۰/۱۶
ضریب تغییرات (درصد)	---	۷/۱۸	۵/۸۳	۵/۸	۶/۵۷	۴/۳۵	۹/۳۷	۵/۱۱	۵/۱۹	۴/۶۵

** ، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطوح ۱٪ ، ۵٪ و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی و نوع رقم بر وزن خشک شاخساره، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز و شاخص‌های کیفی علوفه ذرت.

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک شاخساره	فعالیت آنزیم کاتالاز	فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز	نشت الکترولیت	نسبت وزن خشک برگ به ساقه	پروتئین خام	الیاف نامحلول در شوینده خنثی	چربی خام	خاکستر کل	کربوهیدرات های محلول در آب
بلوک	۳	۲۰/۹۲^{ns}	۰/۰۰^{ns}	۰/۰۰^{ns}	۱/۳۱^{ns}	۰/۰۰۰۱^{ns}	۱/۱۲^{ns}	۰/۸۷^{ns}	۰/۰۸^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۱^{ns}
نسبت آمونیوم به نیترات	۴	۵۶۰۸/۰۷**	۰/۳۶**	۵/۱۲**	۱۳۹۵/۷۱**	۰/۰۰۵**	۸۸/۵۶**	۴۷۹/۸۴**	۱۲/۴۳**	۱۱/۳۴**	۶۱/۲۶**
رقم ذرت	۱	۸۵۶/۷۳**	۰/۰۱**	۰/۲۱**	۲۸/۳۹*	۰/۰۰۸*	۶/۴۲*	۹/۲۲^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۳۸**	۰/۴۶**
نسبت آمونیوم به نیترات × رقم ذرت	۴	۲۲۴/۴۰*	۰/۰۰^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۱۷۰/۹۳**	۰/۰۰۳*	۴/۵۱**	۰/۲۴^{ns}	۰/۰۴^{ns}	۰/۰۸^{ns}	۰/۰۱^{ns}
خطا	۲۷	۵۷/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۱	۴/۶۱	۰/۰۰۱	۱/۰۹	۲/۵۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	---	۵/۷۵	۷/۸۹	۴/۵۴	۶/۶۷	۸/۳۶	۹/۰۱	۴/۱۶	۶/۱۴	۴/۴۰	۴/۹۶

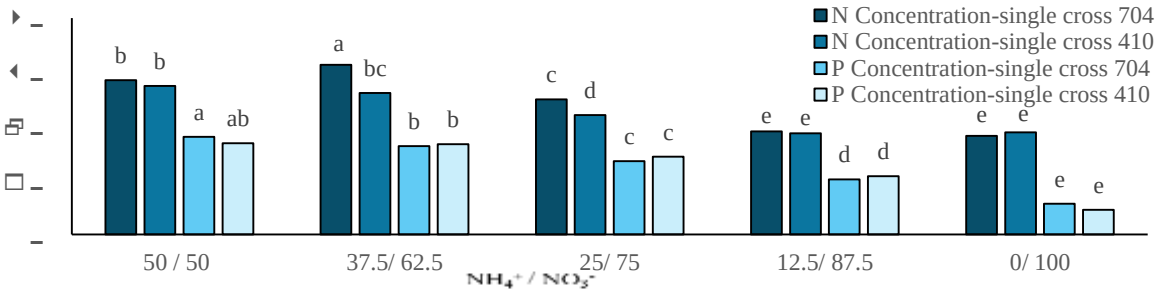
** ، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطوح ۱٪ ، ۵٪ و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

غلظت عناصر در شاخساره دو رقم ذرت

نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن است که غلظت نیتروژن کل شاخساره با جایگزینی آمونیوم به جای نیترات، نسبت به تیمار شاهد (نسبت صفر به صد آمونیوم به نیترات) افزایش معنی‌دار نشان داد (شکل ۱). در رقم دیررس سینگل‌کراس ۷۰۴، بیشترین غلظت نیتروژن کل شاخساره در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که حدود ۷۲ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. در نسبت ۵۰ به۵۰، غلظت نیتروژن ۹ درصد کاهش معنی‌دار نسبت به سطح ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات نشان داد. اما در رقم زودرس سینگل‌کراس ۴۱۰ غلظت نیتروژن شاخساره تا نسبت ۵۰ به۵۰ افزایش یافت که حدود ۴۵ درصد افزایش معنی‌دار نسبت به تیمار شاهد داشت (شکل ۱).

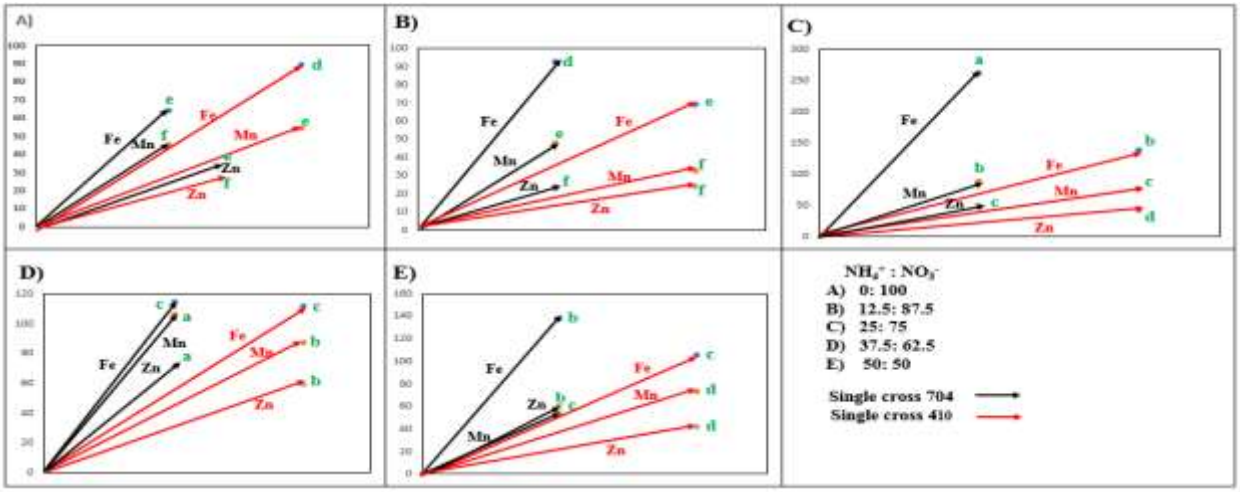
همچنین نتایج ارائه شده در شکل ۱ گویای آن است که جایگزینی آمونیوم به جای نیترات در تمامی نسبت‌های آمونیوم به نیترات افزایش معنی‌دار غلظت فسفر شاخساره را در هر دو رقم ذرت نسبت به تیمار شاهد به دنبال داشت. در قیاس بین دو رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ بیشترین غلظت فسفر شاخساره در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات (عدم اختلاف معنی‌دار با نسبت مذکور در رقم ۴۱۰) حاصل شد که ۳/۲ برابر غلظت فسفر نسبت به تیمار شاهد بود (شکل ۱). همچنین نتایج منتج شده از پژوهش حاضر حاکی از آن بود که غلظت پتاسیم شاخساره با افزایش سهم آمونیوم تا نسبت ۱۲/۵ به ۸۷/۵ غلظت پتاسیم به حداکثر مقدار (۳۰/۳۴ گرم بر کیلوگرم) رسید اما با افزایش بیشتر نسبت آمونیوم، غلظت پتاسیم به تدریج کاهش معنی‌دار یافت و در نسبت‌های ۲۵ به ۷۵، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و۵۰ به۵۰ به ترتیب به ۲۵/۱۷، ۲۳/۵۱ و ۲۰/۴۶ گرم بر کیلوگرم رسید. نتایج همچنین نشان داد که در بین دو رقم ذرت بیشترین غلظت آهن شاخساره در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ مشاهده شد که به ترتیب ۴، ۳، ۲ و ۲/۲ برابر غلظت آهن شاخساره در نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵ ، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰ در

همان رقم بود (شکل ۲). در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ غلظت آهن شاخساره با افزایش غلظت آمونیوم در محلول غذایی افزایش معنی‌دار نشان داد و بیشترین غلظت آهن شاخساره در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد. افزایش آمونیوم تا ۳۷/۵ درصد در محلول غذایی سبب ثبت بیشترین غلظت روی شاخساره در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ شد. غلظت روی شاخساره در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و در نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۶۱/۵، ۶۰/۵۰، ۴۳/۱ و ۱۱/۵ درصد کاهش در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ نشان داد. غلظت روی شاخساره در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ در تمامی نسبت‌های آمونیوم به نیترات (به جز نسبت ۱۲/۵ به ۸/۵) در قیاس با محلول غذایی فاقد آمونیوم افزایش معنی‌دار نشان داد و بیشترین غلظت در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات حاصل شد (شکل ۲).

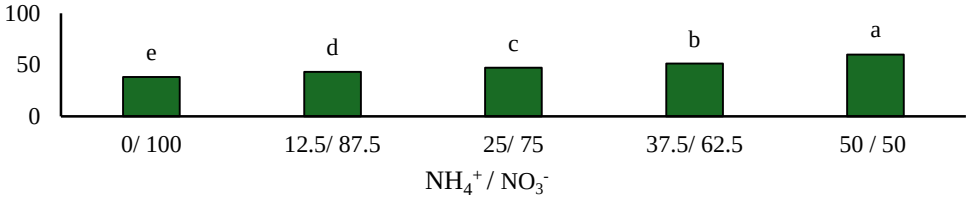


شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم بر غلظت عناصر نیتروژن کل و فسفر (گرم بر کیلوگرم) شاخساره دو رقم ذرت. میانگین‌هایی که با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

روند افزایش در غلظت منگنز شاخساره در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ تا ۳۷/۵ درصد جایگزینی آمونیوم به جای نیترات ادامه داشت و سپس روند نزولی را دنبال کرد. در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ غلظت منگنز شاخساره ۲/۳ برابر گیاهان تغذیه شده با نسبت صفر به صد آمونیوم به نیترات بود. در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ در نسبت‌های ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۷۶/۸ و ۷۹/۵ درصد افزایش معنی‌دار در غلظت منگنز شاخساره نسبت به تغذیه با محلول غذایی فاقد آمونیوم ثبت شد (شکل ۲). شایان ذکر است که نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی غلظت نیتروژن آمونیومی به طور معنی‌داری افزایش یافت بطوریکه در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در قیاس با سطح شاهد ۵۷/۸ درصد افزایش معنی‌دار یافت (شکل ۳).



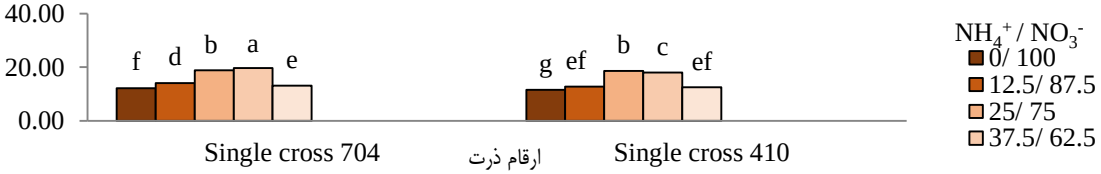
شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم بر غلظت عناصر کم‌مصرف (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شاخساره دو رقم ذرت. میانگین‌هایی که در هر عنصر با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر نسبت آمونیوم به نیترات بر غلظت آمونیوم (گرم بر کیلوگرم) شاخساره دو رقم ذرت. میانگین‌هایی که با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

غلظت کلروفیل کل

در مقایسه دو رقم، در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات بیشترین غلظت کلروفیل کل مشاهده شد که در قیاس با نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۶۱، ۳۹/۵، ۴/۵ و ۴۹/۸ درصد افزایش معنی‌دار در همان رقم به ثبت رسید (شکل ۴).

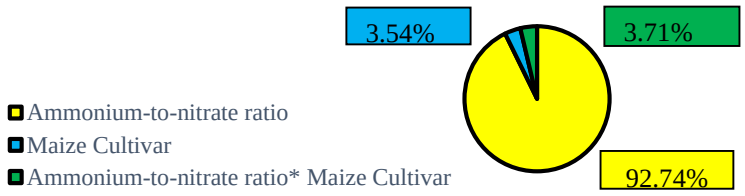


شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم بر غلظت کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم وزن تازه) در برگ دو رقم ذرت میانگین‌هایی که با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ نیز بیشترین غلظت کلروفیل کل در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که در قیاس با محلول غذایی فاقد آمونیوم ۶۱/۱ درصد افزایش نشان داد. در بین دو رقم کمترین غلظت کلروفیل کل هم در نسبت صفر به ۱۰۰ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ به ثبت رسید (شکل ۴).

وزن خشک شاخساره

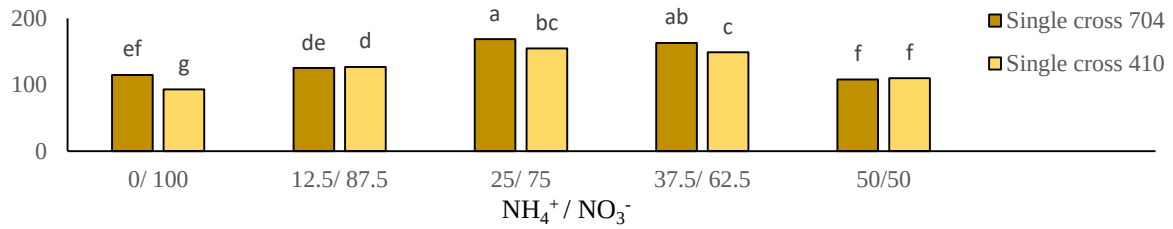
نتایج نشان داد که به ترتیب ۹۲/۷۴، ۳/۵۴ و ۳/۷۱ درصد از تغییرات وزن خشک شاخساره به ترتیب متأثر از نسبت آمونیوم به نیترات، رقم ذرت و برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم ذرت بود (شکل ۵).



شکل ۵. سهم هر یک از منابع تغییرات نسبت آمونیوم به نیترات، رقم و برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات و رقم بر وزن خشک شاخساره ذرت

نتایج نشان داد که جایگزینی آمونیوم به جای بخشی از نیترات در محلول غذایی سبب افزایش معنی‌دار در وزن خشک شاخساره در هر دو رقم گردید تا آنجائیکه در قیاس دو رقم ذرت با یکدیگر در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات بیشترین وزن خشک (۱۶۸/۹۰ گرم در بوته معادل ۱۵۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) شاخساره در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ به ثبت رسید که البته با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ همان رقم تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۶). در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ وزن خشک شاخساره در نسبت ۲۵ به ۷۵ در قیاس با نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵ و ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۴۷، ۳۴/۸ و ۵۶/۵ درصد افزایش نشان داد. در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ وزن خشک شاخساره در نسبت ۲۵ به ۷۵ (با

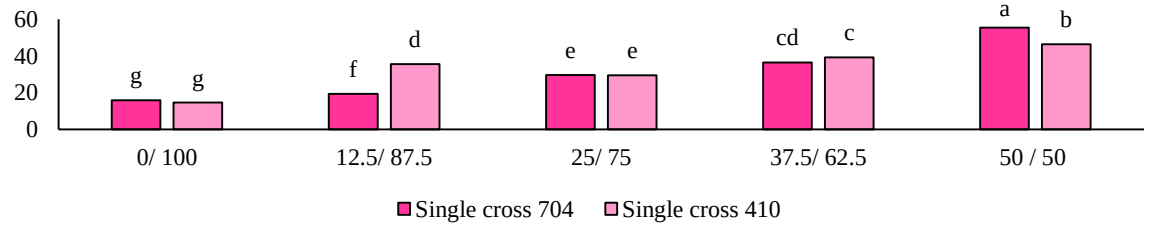
بیشترین وزن خشک شاخساره و عدم تفاوت معنی‌دار با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵) در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم ۶۵/۹ درصد افزایش معنی‌دار را به ثبت رساند (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم بر وزن خشک شاخساره (گرم بر بوته) شاخساره دو رقم ذرت. میانگین‌هایی که با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

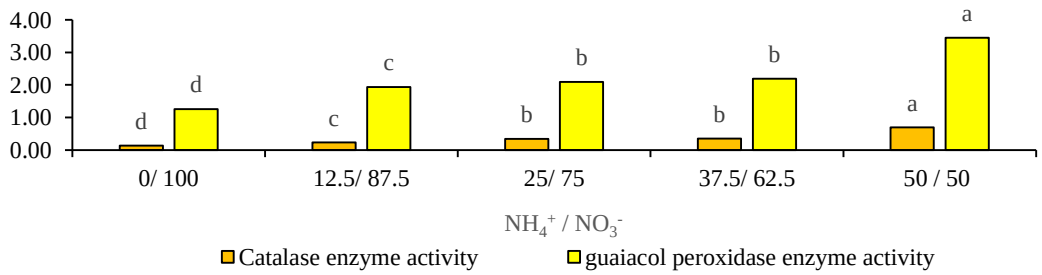
نشت الکترولیت و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول‌پراکسیداز

در هر دو رقم ذرت نشت الکترولیت‌ها با افزایش میزان آمونیوم در محلول غذایی روند صعودی را نشان داد. به‌طوری‌که در هر دو رقم ذرت در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات نشت الکترولیت‌ها به بیشترین میزان خود رسید. در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴، نشت الکترولیت‌ها در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به‌ترتیب ۳/۵، ۲/۹، ۱/۸ و ۱/۵ برابر نشت الکترولیت‌ها در گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی با نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات بود. در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ نیز، نشت الکترولیت‌ها در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۳/۲، ۱/۳، ۱/۶ و ۱/۲ برابر نشت الکترولیت‌ها در گیاهان تغذیه شده با نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات بود (شکل ۷).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم بر نشت الکترولیت‌ها در شاخساره دو رقم ذرت.

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی روند صعودی نشان دادند و در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به بیشترین مقدار خود رسیدند (شکل ۸). تنش وارد شده در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات نشانه‌ی بروز سمیت آمونیوم است که می‌تواند کاهش وزن خشک شاخساره در هر دو رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ را در این نسبت توجیه کند.



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر اصلی نسبت آمونیوم به نیترات بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز (واحد بر گرم وزن تازه) در ذرت. میانگین‌هایی که با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

شاخص‌های کیفیت علوفه

نسبت وزن خشک برگ به ساقه

نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن است که در مقایسه دو رقم ذرت، بیشترین میزان نسبت وزن خشک برگ به ساقه در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ بدست آمد که در مقایسه با کمترین میزان شاخص مذکور که در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ و در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ مشاهده شد ۴۳/۷ درصد افزایش نشان داد. گیاهان تغذیه شده با مابقی نسبت‌های آمونیوم به نیترات اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴).

پروتئین خام علوفه (CP)

در مقایسه دو رقم ذرت بیشترین درصد پروتئین خام علوفه در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ حاصل شد که به ترتیب ۲/۳، ۱/۹، ۱/۳ و ۱/۱ برابر پروتئین خام علوفه در گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات بود (جدول ۴). در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ بیشترین درصد پروتئین خام در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی با نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که به ترتیب ۱/۷، ۱/۷، ۱/۳ و ۱/۱ برابر گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات بود (جدول ۴).

غلظت نیترات علوفه (NO_3^-)

با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی در هر دو رقم ذرت غلظت نیترات بطور معنی‌داری نزول کرد. بطوریکه در هر رقم ذرت کمترین غلظت نیترات علوفه در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای مابقی نسبت‌های آمونیوم به نیترات داشتند. در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ غلظت نیترات به‌ترتیب ۷۰/۳، ۵۰/۵، ۴۱/۲ و ۲۱/۹ درصد کاهش در غلظت نیترات علوفه در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های صفر به۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد (جدول ۴). در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ غلظت نیترات به‌ترتیب ۶۵/۵، ۵۹/۵، ۴۲/۵ و ۱۴ درصد کاهش در غلظت نیترات علوفه در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های صفر به۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات نشان داد (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات با رقم و اثر اصلی نسبت آمونیوم به نیترات بر شاخصهای کیفیت علوفه

رقم ذرت	نسبت آمونیوم به نیترات	نسبت وزن خشک برگ به ساقه	CP %	NO_3^- (g kg^{-1} DW)	نسبت آمونیوم به نیترات	NDF	ADL	CF	Ash	WSC
						%				
سینگل-کراس ۷۰۴	صفر به ۱۰۰	۰/۳۹ ^{b}	۷/۳۱ ^{e}	۱۶/۲۵ ^{a}	صفر به ۱۰۰	۳۱/۹۰ ^{c}	۱/۴۸ ^{d}	۲/۳۱ ^{d}	۴/۶۹ ^{d}	۱/۳۴ ^{d}
	۱۲/۵ به ۸۷/۵	۰/۳۹ ^{b}	۸/۷۰ ^{e}	۱۰/۷۵ ^{c}	۱۲/۵ به ۸۷/۵	۳۳/۸۳ ^{b}	۳ ^{c}	۳/۰۵ ^{c}	۵/۷۰ ^{c}	۲/۷۳ ^{c}
	۲۵ به ۷۵	۰/۳۹ ^{b}	۱۲/۳۹ ^{cd}	۸/۴۵ ^{d}	۲۵ به ۷۵	۴۷/۲۳ ^{a}	۷/۶۵ ^{a}	۵/۰۹ ^{a}	۷/۵۱ ^{a}	۷/۲۶ ^{a}
	۳۷/۵ به ۶۲/۵	۰/۴۶ ^{a}	۱۶/۵۶ ^{a}	۶/۲۰ ^{e}	۳۷/۵ به ۶۲/۵	۴۵/۶۸ ^{a}	۷/۵۰ ^{b}	۴/۱۸ ^{b}	۶/۲۵ ^{b}	۶/۲۳ ^{b}
	۵۰ به ۵۰	۰/۳۹ ^{b}	۱۴/۹۴ ^{b}	۵/۵۱ ^{ef}	۵۰ به ۵۰	۳۱/۵۸ ^{c}	۱/۲۶ ^{e}	۲/۱۹ ^{d}	۴/۴۵ ^{d}	۱/۴۴ ^{d}
سینگل-کراس ۴۱۰	صفر به ۱۰۰	۰/۳۹ ^{b}	۸/۳۶ ^{e}	۱۲/۶۵ ^{b}						
	۱۲/۵ به ۸۷/۵	۰/۳۹ ^{b}	۸/۵۸ ^{e}	۹/۹۴ ^{c}						
	۲۵ به ۷۵	۰/۳۲ ^{c}	۱۱/۰۱ ^{d}	۷/۷۳ ^{d}						
	۳۷/۵ به ۶۲/۵	۰/۳۹ ^{b}	۱۳/۵۸ ^{bc}	۶/۲۲ ^{e}						
	۵۰ به ۵۰	۰/۳۹ ^{b}	۱۴/۳۶ ^{b}	۴/۹۵ ^{f}						

میانگین‌هایی که با حروف مشابه نشان داده شده‌اند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF) و میزان لیگنین (ADL)

نتایج نشان داد بیشترین میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به

نیترات مشاهده شد که با میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات اختلاف معنی‌داری نداشت. در گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات به‌ترتیب ۴۸/۱ و ۴۳/۲ درصد افزایش الیاف نامحلول در شوینده خنثی در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم مشاهده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد کاربرد آمونیوم در محلول غذایی به میزان ۱۲/۵ تا ۳۷/۵ درصد کل نیتروژن کاربردی منجر به افزایش معنی‌دار میزان لیگنین علوفه در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم شد. بیشترین میزان لیگنین در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که با میزان لیگنین گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ اختلاف معنی‌دار داشت (جدول ۴).

چربی خام (CF)، خاکستر کل (Ash) و کربوهیدرات‌های محلول در آب (WSC)

نتایج حاکی از آن است کاربرد آمونیوم در محلول غذایی به میزان ۱۲/۵ تا ۳۷/۵ درصد کل نیتروژن کاربردی منجر به افزایش معنی‌دار میزان چربی خام علوفه (شاخساره) در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم شد. تا آنجائی‌که بیشترین میزان چربی خام در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که به‌ترتیب ۲/۲، ۱/۷، ۱/۲ و ۲/۳ برابر میزان چربی خام گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات بود (جدول۴). همچنین نتایج نشان داد کاربرد آمونیوم در محلول غذایی به میزان ۱۲/۵ تا ۳۷/۵ درصد کل نیتروژن کاربردی منجر به افزایش معنی‌دار میزان خاکستر کل شاخساره در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم شد. بیشترین میزان خاکستر کل (۷/۵۱ درصد) در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات حاصل شد که در قیاس با گیاهان تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت‌های صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۳۷/۵ به ۸۷/۵ و ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۶۰/۱، ۳۱/۷، ۲۰/۲ و ۶۸/۸ درصد افزایش نشان داد (جدول۴). شایان ذکر است که میزان خاکستر کل در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ در قیاس با رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ سه و نیم درصد افزایش معنی‌دار نشان داد. بیشترین میزان کربوهیدرات‌های محلول در آب در تیمار ۲۵ به ۷۵ مشاهده شد که ۵/۴ برابر تیمار شاهد (صفر به ۱۰۰) بود. کاربرد ۵۰ درصد آمونیوم (نسبت ۵۰ به۵۰) باعث کاهش ۸۰/۲ درصدی کربوهیدرات‌های محلول نسبت به تیمار ۲۵ به ۷۵ گردید (جدول ۴).

بحث

افزایش جذب نیتروژن شاخساره با افزایش سهم آمونیوم و جایگزینی با نیترات در محلول غذایی (شکل۱)، را می‌توان به ماهیت غیرفعال جذب آمونیوم نسبت داد؛ برخلاف نیترات که جذب آن نیازمند صرف انرژی است، آمونیوم به‌صورت غیرفعال جذب می‌شود (Homas & Sodek, 2005) و این صرفه‌جویی در انرژی، امکان جذب بیشتر سایر یون‌ها را برای گیاه فراهم می‌کند (Marschner, 2012). پژوهشگران افزایش غلظت نیتروژن در برگ گل رز را با افزایش آمونیوم محلول غذایی، به سرعت بالاتر جذب آمونیوم و انرژی کمتر (Rothstein & Cregg, 2005)مورد نیاز برای آن نسبت داده‌اند (بنی‌جمالی و بیات، ۱۳۹۲). از سوی دیگر، افزایش معنی‌دار غلظت فسفر در شاخساره دو رقم ذرت با افزایش سهم آمونیوم، ناشی از رابطه هم‌افزایی بین این دو عنصر است (Marschner, 2012) که به حفظ تعادل بارهای الکتریکی در سلول‌های گیاهی کمک می‌کند. در مقابل، پتاسیم روندی عکس نشان داد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش آمونیوم، جذب پتاسیم کاهش یافت. این پدیده به رقابت این دو یون به دلیل اندازه مشابه یون‌های هیدراته‌شده آنها برای اتصال به مکان‌های جذب یکسان روی ریشه باز می‌گردد (Marschner, 2012). با افزایش سهم آمونیوم تا ۲۵ درصد در محلول غذایی، غلظت آهن شاخساره در هر دو رقم ذرت افزایش یافت (شکل ۲). گزارش شده است که آمونیوم می‌تواند جذب و انتقال آهن را در گیاه افزایش دهد، بنابراین استفاده از آمونیوم به عنوان یک راهکار عملی برای کاهش کمبود آهن در گیاهان گلخانه‌ای پیشنهاد شده است (Ruan et al., 2007). هرچند عناصر پرمصرف و کم‌مصرف هر دو به شکل کاتیون هستند، اما با افزایش آمونیوم در محلول غذایی از دو الگوی جذب متفاوت پیروی می‌کنند. تأمین بخشی از نیتروژن به‌صورت آمونیوم، pH ریشه را کاهش داده و جذب عناصر کم‌مصرف را تسهیل می‌کند (Assimakopoulou., 2006). این یافته با نتایج (Ansari et al., 2019) در ریحان (کیانی و همکاران.، ۱۳۸۸) در گل رز و (Clark et al., 2003) در گل آزالیا همخوانی دارد، که همگی افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) را با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی تأیید کرده‌اند. این نتایج با یافته‌های (Roosta et al., 2025) نیز همسو است؛ آنها با اعمال سه تیمار نیتروژنی (نیترات، آمونیوم و نیترات آمونیوم) بر گیاه شیرین‌بیان در سیستم هیدروپونیک نشان دادند که تغذیه با نسبت متعادل آمونیوم و نیترات، در

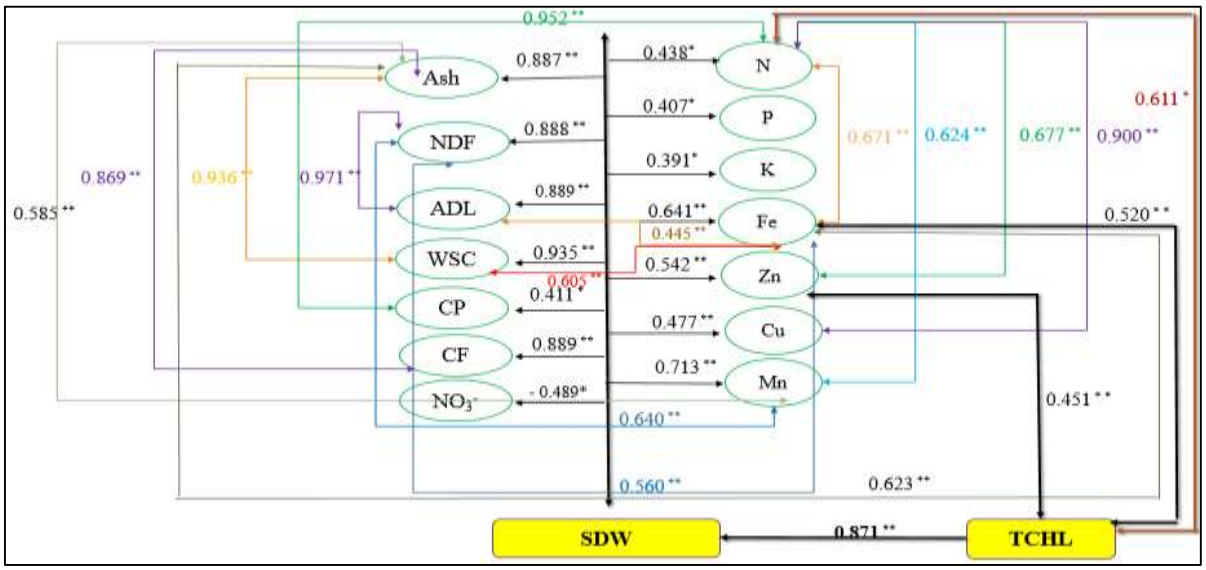
مقایسه با کاربرد تنها یکی از این دو شکل، به طور معنی‌داری غلظت عناصر کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) را افزایش داد. با استناد به شکل ۱ که در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات غلظت نیتروژن شاخساره بیشترین مقدار بود در نتیجه می‌تواند حداکثر بودن کلروفیل کل در این نسبت و رقم را توجیه کند. همچنین وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت کلروفیل کل و غلظت نیتروژن شاخساره ($r = p < 0.01, 0.61$) موید این امر است (شکل۹). در مطالعه‌ای بر روی گشنیز (cv. *Punjab Sugandh*) در کشت بدون خاک، بیشترین غلظت کلروفیل کل در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که با تیمار شاهد (صفر به ۱۰۰) تفاوت معنی‌داری نداشت (Kumari et al, 2021). نتایج پژوهش‌های (Kopsell et al., 2007) بر روی کلم‌پیچ و (Barickman & Kopsell, 2016) بر روی چغندر سوئیسی نشان دادند که بیشترین غلظت کلروفیل کل و کارتنوئید در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که در راستای پژوهش حاضر است. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت کلروفیل کل و غلظت آهن شاخساره ($r =0.52, p < 0.01$) (شکل۹)، تأیید می‌کند که آهن موثر در کلروفیل سازی است. از طرف دیگر غلظت آهن در نسبت‌های ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و نسبت ۲۵ به ۷۵ در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ به ترتیب بیشتر از مابقی نسبت‌ها بود (شکل ۲) و بنابراین دور از انتظار نیست که غلظت کلروفیل کل نیز در این نسبت‌ها بیشتر از سایر نسبت‌ها باشد. کمبود آهن منجر به کاهش سنتز کلروفیل، محتوای کلروفیل و غلظت آن در برگ‌های گیاهان می‌شود (Zhang et al., 2019).

همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وزن خشک شاخساره و سایر عناصر غذایی و به ویژه غلظت کلروفیل کل ($r = 0.871$ ،$p < ۰/۰۱$) مشاهده شد (شکل۹). از آنجایی غلظت کلروفیل کل به ترتیب در نسبت‌های ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۲۵ به ۷۵ رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و در نسبت‌های ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ افزایش معنی‌دار در مقایسه با سایر نسبت‌ها داشت (شکل ۳)، بنابراین بدیهی است که افزایش در وزن خشک شاخساره را به دنبال خواهد داشت. دلیل کاهش وزن گیاه با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی مصرف بیش از اندازه کربوهیدرات‌ها در گیاه است که به جای مصرف در جهت رشد گیاه در مسیر سمیت‌زدایی آمونیوم مصرف می‌شود (Britto, & Kronzucker., 2013). همچنین در غلظت‌های زیاد آمونیوم نشانه‌های سمیت آشکار می‌شود. این علائم در شرایطی که همان میزان نیتروژن به صورت نیترات یا مخلوطی از آمونیوم و نیترات تأمین شود، مشاهده نمی‌شود. این حالت که به سندروم NH_4^+ معروف است، با نشانه‌هایی همچون زرد شدن برگها، کاهش نرخ فتوسنتز، کاهش عملکرد کلی گیاه، کاهش نسبت شاخساره به ریشه، کاهش سطح کاتیونها، اسیدی شدن منطقه اطراف ریشه و تغییراتی در ترکیب متابولیت‌هایی مانند آمینواسیدها و اسیدهای آلی همراه است. علت اصلی سمیت آمونیوم احتمالاً تجمع بیش از حد آمونیوم آزاد در سیتوزول و مشکلات ناشی از تلاش‌های سلول برای خلاص شدن از شر آن است (Marino and Moran., 2019). در پژوهش حاضر هم افزایش معنی‌دار غلظت آمونیوم در شاخساره با افزایش نسبت آمونیوم به نیترات مشاهده شد (شکل ۳). بسیاری از تنش‌های محیطی سبب اختلال در کارکرد غشاهای سلولی می‌شود که در نتیجه آن نشت الکترولیت‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین اندازه‌گیری شاخص نشت الکترولیت‌ها (عکس پایداری غشا سلولی) میزان خسارت تنش‌های محیطی بر کارکرد مطلوب غشاهای سلولی را نشان می‌دهد (Concellon et al., 2007). در پژوهش حاضر یک همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت آمونیوم محلول غذایی با نشت الکترولیت‌ها ($r = 0.87$ ،$p < 0.01$) مشاهده شد که نشان می‌دهد با افزایش آمونیوم در محلول غذایی نشت الکترولیت‌ها در هر دو رقم ذرت افزایش یافت. در واقع گیاهان برای مقابله با این تنش، آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز را افزایش داده‌اند و براساس نتایج این پژوهش، استفاده از نسبت‌های بالای آمونیوم (۵۰ درصد) نه‌تنها باعث افزایش نشت الکترولیت‌ها و بروز علائم تنش اکسیداتیو شد، بلکه عملکرد گیاه نیز به طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۶). محققان گزارش کردند که مصرف آمونیوم در برگ و ریشه گندم به طور معنی‌داری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت از قبیل کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز را نسبت به مصرف نیترات افزایش داد (Polesskaya et al., 2004) که در راستای نتایج حاصله از این پژوهش بود. همچنین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ به ترتیب ۵/۸ و ۶/۶ نسبت به رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ افزایش معنی‌دار داشت که نشان می‌دهد بروز تنش در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ بیشتر از رقم سینگل کراس ۷۰۴ بوده است. در مطالعه‌ای مشخص گردید که در تغذیه گیاه چشم گاوی خزنده (*Wedelia trilobata*) فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به ویژه پراکسیداز و کاتالاز، هنگامی بیشترین افزایش را نشان داد که نسبت آمونیوم به نیترات ۲ به ۱ بود (Huang et al., 2022).

به موازات میزان عملکرد (کمیت) علوفه، کیفیت آن هم دارای اهمیت است. نسبت وزن تازه و خشک برگ به ساقه یکی از شاخص‌های مهم در تعیین خوش‌خوراکی علوفه است که هر چه این نسبت بیشتر باشد علوفه از کیفیت بهتری برخوردار است و برای تغذیه دامها مطلوب‌تر است. دلیل این امر هم این است که در ساقه بافت‌های نگهدارنده مانند اسکلرانشیم وجود دارد که اغلب از ترکیباتی مانند

سلولز، همی‌سلولز و لیگنین تشکیل شده‌اند که قابلیت هضم آن توسط دامها کم است بنابراین هر چقدر وزن ساقه نسبت به برگ بیشتر باشد به همان نسبت از کیفیت علوفه کاسته می‌شود (انصاری و همکاران،. ۱۳۹۸). در این پژوهش یک همبستگی مثبت و معنی‌داری بین نسبت وزن خشک برگ به ساقه با وزن خشک برگ ($r = 0.47 , p < 0.01$) وجود داشت که حاکی از تأثیر مثبت وزن خشک برگ بر افزایش نسبت وزن خشک برگ به ساقه است. از آنجایی که بیشترین وزن خشک برگ در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات بدست آمد بالتبع آن بیشترین نسبت وزن خشک برگ به ساقه هم در همین نسبت آمونیوم به نیترات مشاهده شد (جدول۴).

همچنین بیشترین میزان پروتئین در تیمارهای با بالاترین غلظت نیتروژن شاخساره مشاهده شد؛ به‌طوری‌که در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴، تیمار ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و در رقم ۴۱۰، تیمار ۵۰ به ۵۰ بیشترین درصد پروتئین خام را به خود اختصاص دادند (شکل ۱ و جدول۴). وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پروتئین خام و نیتروژن شاخساره ($r = 0.95, p < 0.01$) (شکل ۹) و همچنین بین پروتئین خام و غلظت آمونیوم محلول غذایی ($r = 0.96, p < 0.01$) نشان‌دهنده نقش مؤثر تغذیه آمونیومی در افزایش پروتئین علوفه است. در مطالعه‌ای بر روی فلفل، بیشترین میزان پروتئین را در تیمار ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات گزارش کردند و آن را به افزایش غلظت نیتروژن کل در بافت‌های گیاه نسبت دادند. افزایش پروتئین خام علوفه، قابلیت هضم آن را برای دام بهبود می‌بخشد (Zhang et al, 2019).



شکل ۹. همبستگی بین وزن خشک شاخساره (SDW) و غلظت کلروفیل کل (TCHL)، عناصر پرمصرف، کم‌مصرف و شاخصهای کیفی علوفه: پروتئین خام (CP)، الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF)، میزان لیگنین (ADL)، خاکستر (Ash)، چربی خام (CF) ، غلظت نیترات (NO_3^-) و کربوهیدرات‌های محلول در آب (WSC)

کاهش غلظت نیترات شاخساره به دلیل کاهش نیترات محلول غذایی و جایگزینی آن با آمونیوم است که با همبستگی مثبت و معنی‌دار بین نیترات شاخساره و درصد نیترات محلول غذایی ($r = 0.98, p < 0.01$) تأیید شد. براساس توصیه Block (2020) غلظت نیترات شاخساره در هر دو رقم ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ در تیمار ۲۵ به ۷۵ چون در بازه ۶۶۴۵–۸۸۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار می‌گیرد بنابراین برای مصرف تا ۵۰ درصد ماده خشک جیره همه دامها مناسب است، در حالی که غلظت نیترات شاخساره در هر دو رقم ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ در تیمارهای ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰ چون در بازه ۴۴۳۰–۶۶۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار می‌گیرد برای دام‌های غیرباردار و تا ۵۰ درصد ماده خشک جیره دام‌های باردار قابل استفاده هستند. اگرچه این دو تیمار از نظر طبقه‌بندی نیترات وضعیت یکسانی دارند، اما به دلیل اینکه وزن خشک شاخساره به‌طور معنی‌داری در تیمار ۳۷/۵ به ۶۲/۵ در قیاس با نسبت ۵۰ به ۵۰ (شکل ۶)، بیشتر بود، بنابراین این نسبت برای دستیابی به عملکرد بالاتر در کنار کیفیت مطلوب علوفه، توصیه می‌گردد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد رشد گیاهان در تیمارهای صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ کمتر از سایر تیمارها بود. گیاهان در تیمارهای ۲۵ به ۷۵و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ در زمان برداشت به مرحله خمیری شدن دانه رسیدند، در حالی که تیمارهای صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ در مرحله عدم ظهور کامل دانه بودند که نشان‌دهنده تأخیر فنولوژیکی ناشی از سمیت آمونیوم در نسبت ۵۰ به ۵۰ است. با پیشرفت رشد و افزایش سن گیاه، درصد الیاف نامحلول

در شوینده خنثی (NDF) افزایش می‌یابد که عمدتاً به دلیل تجمع لیگنین و الیاف در ساقه است. بیشترین میزان NDF در تیمارهای ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ مشاهده شد که با افزایش وزن خشک ساقه همبستگی مثبت داشت ($r = 0.82, p < 0.05$). از آنجایی که کاهش NDFقابلیت هضم علوفه را افزایش می‌دهد، تأخیر در رشد در تیمارهای صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ منجر به کاهش NDF علوفه شد که با یافته‌های (Arzani et al., 2004) و (Chrisdiana et al., 2018) همخوانی دارد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین لیگنین علوفه و وزن خشک ساقه مشاهده شد($r = 0.92, p < 0.01$).

کاربرد آمونیوم به میزان ۲۵ تا ۳۷/۵ درصد کل نیتروژن محلول غذایی، وزن خشک ساقه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و بیشترین وزن خشک ساقه در هر دو رقم ذرت در تیمار ۲۵ به ۷۵ ثبت شد. از آنجایی که ساقه‌ها نسبت به برگ‌ها دارای بافت‌های خشبی‌تر و لیگنین بیشتری هستند، افزایش لیگنین در تیمارهای ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ ناشی از افزایش وزن خشک ساقه بود. در مقابل، تیمارهای صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ به‌ترتیب با ۸۰/۶ و ۸۳/۵ درصد کاهش لیگنین نسبت به تیمار ۲۵ به ۷۵ (جدول ۴) نشان دادند که به دلیل کاهش وزن خشک ساقه، کمترین میزان لیگنین را داشتند. بنابراین، کاهش الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF) و لیگنین در تیمارهای صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ به دلیل پایین بودن وزن خشک ساقه و عدم توسعه کامل گیاه بود و نشان‌دهنده بهبود کیفیت علوفه نیست. این کاهش در نتیجه رشد ناقص گیاه و تأخیر فنولوژیکی حاصل شده است، بنابراین نمی‌تواند به عنوان معیاری برای کیفیت بالاتر علوفه در نظر گرفته شود. در پژوهش حاضر همبستگی‌های مثبت و معنی‌داری بین میزان چربی خام علوفه و جذب نیتروژن برگ ($p < ۰/۰۱$، ۰/۷۳ = r) و جذب نیتروژن ساقه ($p < ۰/۰۱$، ۰/۶۲ = r) وجود داشت که موید نقش نیتروژن بر میزان چربی خام گیاهی است. در این میان کاهش معنی‌دار چربی خام علوفه در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با نسبت‌های ۱۲/۵، ۸۷/۵، ۲۵ به ۵۰ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات را می‌توان به تجمع آمونیوم جذب و ساخت نشده در برگ و ساقه ذرت و اثر منفی آن بر فرایندهای گیاهی از جمله فتوسنتز (Marschner, 2012) نسبت داد (جدول۴). البته نزدیکی گیاهان تولید شده در نسبت‌های آمونیوم به نیترات ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ به مرحله بلوغ نیز در افزایش میزان چربی خام آنها بی‌اثر نیست. نتیجه مطالعه‌ای نشان داد افزایش در سن برداشت علوفه ذرت، افزایش در چربی خام را به‌دنبال داشت که البته این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود. (Indriani et al., 2021). همچنین در پژوهش حاضر همبستگی‌های مثبت و معنی‌داری بین میزان خاکستر علوفه و جذب عناصر پرمصرف و کم مصرف مشاهده شد که موید نقش عناصر غذایی شاخساره بر افزایش خاکستر کل آن است. پژوهشگران گزارش کردند که حداکثر خاکستر علوفه باید ۸/۵ درصد باشد که نتایج این پژوهش منطبق بر گزارش ذکر شده است (McDonald et al., 1995). همچنین افزایش کربوهیدرات‌های محلول در تیمارهای ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ احتمالاً ناشی از افزایش کلروفیل و بهبود فتوسنتز بوده است. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین کربوهیدرات‌های محلول با کلروفیل a ($r = 0.96$)، کلروفیل b ($r = 0.91$)، کلروفیل کل ($r = 0.97$) و کاروتنوئید ($r = 0.98$) در سطح ۱ درصد، مؤید این ارتباط است. از دلایل کاهش میزان کربوهیدراتهای محلول در آب در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات فرآیند آسیمیلاسیون آمونیوم است. تغذیه آمونیومی با مصرف اسکلت‌های کربنی در فرآیند آسیمیلاسیون منجر به کاهش ذخایر کربوهیدرات‌ها در گیاه می‌گردد (Marschner, 2012).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که جایگزینی بخشی از نیترات با آمونیوم در محلول غذایی تا نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵، عملکرد و کیفیت علوفه ذرت را در شرایط کشت بدون خاک به طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد. در این نسبت، غلظت نیتروژن و فسفر شاخساره، وزن خشک شاخساره، محتوای کلروفیل کل، پروتئین خام، نسبت برگ به ساقه، چربی خام و خاکستر کل افزایش معنی‌داری یافت، در حالی‌که غلظت نیترات علوفه به سطح مطلوبی برای تغذیه دام کاهش پیدا کرد. اگرچه نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات نیز در برخی شاخص‌ها عملکرد قابل قبولی داشت، اما افزایش معنادار غلظت آمونیوم شاخساره، نشت الکترولیت‌ها و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در این نسبت، همراه با کاهش وزن خشک شاخساره، نشان‌دهنده بروز سمیت آمونیوم و تنش اکسیداتیو بود. رقم دیررس سینگل‌کراس ۷۰۴ در مقایسه با رقم زودرس ۴۱۰، واکنش بهتری به تغذیه تلفیقی آمونیوم و نیترات نشان داد و از نظر اکثر شاخص‌های عملکردی و کیفی برتر بود. به نظر می‌رسد نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات و رقم سینگل کراس ۷۰۴ بهترین تعادل را بین عملکرد و کیفیت علوفه در کشت بدون خاک فراهم می‌کند. با توجه به محدودیت‌های این پژوهش (انجام آزمایش در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای، بررسی تنها دو رقم ذرت و اندازه‌گیری تعداد محدودی از

شاخص‌های فیزیولوژیک و کیفی)، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، تأثیر نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات بر دیگر گیاهان علوفه‌ای و در شرایط مختلف محیطی (نظیر تنش‌های شوری و خشکی) مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، انجام پژوهش‌های تکمیلی در زمینه بررسی بیان ژن‌های مرتبط با جذب و انتقال نیتروژن (مانند ناقل‌های آمونیوم و نیترات)، اندازه‌گیری سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و شاخص‌های تنش اکسیداتیو (مانند مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن) و انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور تأیید قابلیت تعمیم نتایج به شرایط واقعی تولید، می‌تواند به درک بهتر مکانیسم‌های تحمل به آمونیوم و توسعه ارقام متحمل‌تر کمک نماید.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانهٔ رساله دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانهٔ برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

مریم قربانی: دانشجو، تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

شهرام کیانی: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

علی محرری : استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

سینا فلاح : استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرآیند نگارش استفاده نکرده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهرکرد و دانشکده کشاورزی به خاطر حمایت مالی و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

انصاری، افسانه؛ حسنی، عباس؛ دولتی، بهنام و سفیدکن، فاطمه (۱۳۹۸). تأثیر منبع نیتروژن بر ویژگی‌های رشدی، میزان کلروفیل و غلظت برخی عناصر غذایی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در سیستم کشت بدون خاک. *پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۲۶(۱)، ۱۸۵-۱۹۸.

بنی‌جمالی، سیدمحمد و بیات، حسین (۱۳۹۲). تأثیر مقادیر مختلف آمونیوم و کلسیم بر وضعیت تغذیه‌ای، عملکرد و کیفیت گل رز (*Rosa hybrida* L.) در سیستم هیدروپونیک. *روابط خاک و گیاه*، ۴(۱)، ۲۹-۳۸.

خلج، محمدعلی (۱۳۹۵). اثر شکل نیتروژن بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی، رشد، عملکرد و کیفیت گل ژربرا. رساله دکتری تخصصی علوم و مهندسی خاک. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران.

کیانی، شهرام؛ ملکوتی، محمدجعفر؛ طباطبایی، سیدجلال و کافی، مصطفی (۱۳۸۸). اثر نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات و سطوح کلسیم بر رشد،

غلظت عناصر غذایی و کیفیت گل رز. *پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)*، ۲۳(۱)، ۲۳-۳۳.

REFERENCES

Albalasmeh AA, Berhe AA, & Ghezzehei TA. (2013). A new method for rapid determination of carbohydrate and total carbon concentrations using UV spectrophotometry. Carbohydrate Polymers, 97, 253-261.

Anonymous (AOAC). (1990). Official Methods of Analysis. Method No 930.05. 15th Edition. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

Ansari A, Hasani A, Dowlati B, & Sefidkon F. (2019). Effect of nitrogen source on growth characteristics, chlorophyll content, and concentration of some nutrients in basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless culture conditions. *Journal of Crop Production Research*, 26, 185-198. (In Persian).

Arzani H, Zohdi M, Fish E, Zahedi Amiri GH, Nikkhah A, & Wester D. (2004). Phenological effects on forage quality of five grass species. *Journal of Range Management*, 57, 624-629.

Assimakopoulou A. (2006). Effect of iron supply and nitrogen form on growth, nutritional status and ferric reducing activity of spinach in nutrient solution culture. *Scientia Horticulturae*, 110, 21-29.

Banijamal SM, & Bayat H. (2014). Effect of different ammonium and calcium different dosages on nutritional status, Rosa hybrida L. performance and quality in hydroponic system. *Journal of Greenhouse Cultivation Science and Technology*, 4(1), 29-38. (In Persian).

Barickman TC, & Kopsell DA. (2016). Nitrogen form and ratio impact Swiss chard (Beta vulgaris) shoot tissue carotenoid and chlorophyll concentrations. *Scientia Horticulturae*, 204, 99-105.

Block J. (2020). Nitrate poisoning of livestock. NDSU Extension – Hettinger Research Extension Center.

Britto DT, & Kronzucker HJ. (2013). Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of Botany*, 112, 957-963.

Bruning-Fann C, & Kaneene JB. (1993). The effect of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on animal health. *Veterinary Human Toxicology*, 35(3), 237-253.

Cao C, & Wang J. (2025). The impact of urban expansion on food production: A bibliometric study of development, hotspots, and future prospects. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1550373. doi: 10.3389/fsufs.2025.1550373

Cao H, Ge Y, Liu D, Cao Q, Chang SX, Chang J, Song X, & Lin X. (2011). Nitrate/ammonium ratio affect ryegrass growth and nitrogen accumulation in a hydroponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 34, 206–216.

Chrisdiana R. (2018). Quality and quantity of sorghum hydroponic fodder from different varieties and harvest time. *IOP Conference Series: Environmental Science*, 119, 012014.

Clark MB, Mills HA, Robacker CD, & Latimer JG. (2003). Influence of nitrate: Ammonium ratios on growth and elemental concentration in two azalea cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 29, 1523-1541.

Concellon A, Anon MC, & Chaves, AR. (2007). Effect of low temperature storage on physical and physiological characteristics of eggplant fruit (*Solanum melongena* L.). *LWT - Food Science and Technology*, 40, 389-396.

Cataldo DA, Haroon M, Schrader LE, & Youngs VL. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6, 71-80.

Esim N, Karaman A, & Atıcı Ö. (2024). Nitric oxide alleviates mercury toxicity by changing physiological and biochemical pathways in maize (Zea mays L.) seedlings. *Acta Botanica Croatica*, 83(1), 60–68. doi: 10.37427/botcro-2024-008

Ferreira LC, Cataneo AC, Remaeh LMR, Corniani N, Fátima Fumis T, Souza YA, Scavroni J, & Soares BJA. (2010). Nitric oxide reduces oxidative stress generated by lactofen in soybean plants. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 97, 47-54.

Gangolli SD, Van Den Brandt PA, Feron VJ, Jan-Zowesky C, Koeman JH, Speijers GJA, Spiegelhalder B, Walker R, & Winshnok JS. (1994). Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds. *European Journal of Pharmacology*, 292(1), 1-38.

Garnett T, Plett D, Conn V, Conn S, Rabie H, Rafalski JA, Dhugga K, Tester MA, & Kaiser BN. (2015). Variation for N uptake system in maize: Genotypic response to N supply. *Frontiers in Plant Science*, 6, 936. doi: 10.3389/fpls.2015.00936

Gurung S. (2024). Decoding the impact of nitrogen forms on plant growth in soilless culture. Doctoral dissertation, Tennessee State University, USA.

Hatamzadeh A, Molaahmad Nalousi MA, Ghasemnezhad M, & Biglouei MH. (2014). The potential of nitric oxide for reducing oxidative damage induced by drought stress in two turfgrass species, creeping bentgrass and tall fescue. *Grass and Forage Science*, 78, 1365-2494.

Homas AL, & Sodek L. (2005). Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(3), 291-297.

Huang Y, Shen Y, Abbas G, Wang Y, Du J, Du Z, Hussain S, Javed F, & Alamri S. (2022). Effects of different nitrogen forms and competitive treatments on the growth and antioxidant system of Wedelia trilobata and Wedelia chinensis under high nitrogen concentrations. *Frontiers in Plant Science*, 13, 851099.

Indriani NP, Yuwariah Y, & Ruswandi D. (2021). The genotype and crop age effect on nutritive value of corn forage. *Indian Journal of Agricultural Research*, 55(3), 374-378.

Jones JB Jr. (2001). Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Kabata-Pendias A, & Pendias H. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Khalaj, M. A. (2016). Effect of nitrogen form on physiological characteristics, growth, yield, and quality of Gerbera flowers. Doctoral dissertation in Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. (In Persian).

Kiani Sh, Malakooti MJ, Tabatabai SJ, & Kafi M. (2009). Effect of different ammonium to nitrate ratios and calcium levels on growth, nutrient element concentrations, and quality of rose flowers. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 23(1), 23-33. (In Persian).

Kopsell DA, Kopsell DE, Lefsrud MG, & Curran-Celentano J. (2007). Carotenoid pigments in kale are influenced by nitrogen concentrations and form. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 900-907.

Kumari R, Bedi S, Dhatt AS, & Sethi VP. (2021). Effect of proportion of NO3- and NH4+ in nutrient solution and growing seasons on yield and quality in coriander. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23, 891-902.

Lichtenthaler HK. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382.

Marino D, & Moran JF. (2019). Can ammonium stress be positive for plant performance? *Frontiers in Plant Science*, 10, 1103. doi: 10.3389/fpls.2019.01103

Marschner P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.

McDonald P, Edwards RA, & Morgan CA. (1995). *Animal Nutrition*. Wiley and Sons, USA. 122 p.

Naik PK, Dhuri RB, Swain BK, & Singh NP. (2012). Nutrient changes with the growth of hydroponics fodder maize. *Indian Journal of Animal Nutrition*, 29(2), 161-163.

Peng W, Zhang-kui W, Xi-chao S, Xiao-huan MU, Huan C, Fan-jun C, Lixing Y, & Guo-hua MI. (2018). Interaction effect of nitrogen form and planting density on plant growth and nutrient uptake in maize seedlings. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(5), 1120-1129.

Poovaiah BW, & Leopold AC. (1973). Deferral of leaf senescence with calcium. *Plant Physiology*, 52, 236-239.

Roosta HR, Estaji A, Khadivi A, & Shams M. (2025). Balanced ammonium–nitrate nutrition enhances photosynthetic efficiency, micronutrient homeostasis, and antioxidant networks via ROS signaling in Glycyrrhiza glabra across soil and soilless systems. *Scientific Reports*, 15(1), Article 25404.

Rothstein D, & Cregg BM. (2005). Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of Fraser fir (Abies fraseri). *Forest Ecology and Management*, 219(1), 69–80.

Ruan J, Gerendas J, Hardter R, & Sattelmacheri B. (2007). Effect of nitrogen form and root-zone pH on growth and nitrogen uptake of tea (Camellia sinensis) plants. *Annals of Botany*, 99, 301-310.

Santamaría P, Elia A, Papa G, & Serio F. (1998). Nitrate and ammonium nutrition in chicory and rocket salad plants. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 1779-1789.

Smith GS, Johnston CM, & Cornforth IS. (1983). Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture. *New Phytologist*, 94(4), 537–548.

Soe Htet MN, Hai J-B, Bo PT, Gong X-W, Liu C-J, Dang K, Tian L-X, Soomro RN, Aung KL, & Feng B-L. (2021). Evaluation of nutritive values through comparison of forage yield and silage quality of mono-cropped and intercropped maize-soybean harvested at two maturity stages. *Agriculture*, 11, 452.

Van Soest PJ, Robertson JB, & Lewis BA. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74, 3583-3597.

Zhang J, Lv J, Dawuda MM, Xie J, Yu J, Li J, Zhang X, Tang C, Wang C, & Gan Y. (2019). Appropriate ammonium-nitrate ratio improves nutrient accumulation and fruit quality in pepper (Capsicum annuum L.). *Agronomy*, 9, 3-21.