

ارزیابی مدیریت تغذیه بر عملکرد دانه و برخی صفات بیوشیمیایی کتان روغنی در شرایط قطع آبیاری

فاطمه یوسف پور^۱ | اصغر رحیمی^۲ | حسین دشتی^۳ | علی اکبر محمدی میریک^۴ و سید احمد حسینی^۴

۱. دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، گروه ژنتیک و تولید گیاهی دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران fatemeu3@stu.vru.ac.ir orcid /0009-0006-6531-3253

۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه ژنتیک و تولید گیاهی دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران rahimia@vru.ac.ir orcid /0000-0002-1060-804X

۳. استاد، گروه ژنتیک تولید گیاهی دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران dashti@vru.ac.ir orcid /0000-0002-3594-4955

۴. دانشیار، گروه ژنتیک تولید گیاهی دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران aa.mohammadi@vru.ac.ir orcid /0000-0003-3261-3138_ a.hosseini@vru.ac.ir, orcid /0000-0002-5463-9315

چکیده

مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک، راهکاری حیاتی برای پایداری تولید کتان روغنی در مناطق خشک است. به منظور بررسی اثر منابع تغذیه‌ای مختلف بر شاخص‌های بیوشیمیایی و عملکرد کتان در شرایط تنش خشکی، پژوهشی به صورت اسپیلت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ اجرا شد. عامل اصلی دو رژیم آبیاری (آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی) و عامل فرعی هفت تیمار تغذیه‌ای (شاهد، آلی (کود گاوی، ۳۰ تن در هکتار)، شیمیایی (نیترژن ۱۰۰، فسفر ۴۰ و پتاسیم ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار)، زیستی (باکتری *Pseudomonas spp*)، آلی-شیمیایی (۳۰ تن کود گاو + ۷۰٪ شیمیایی)، آلی-زیستی (۳۰ تن آلی + زیستی) و شیمیایی-زیستی (۱۰۰٪ شیمیایی + زیستی) بود. نتایج نشان داد تنش خشکی میانگین عملکرد دانه را از ۲۰۰۰ به ۱۳۹۵ کیلوگرم در هکتار کاهش داد. با این حال، تیمارهای تلفیقی به‌ویژه آلی-شیمیایی و شیمیایی-زیستی با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانت گیاه، اثرات منفی تنش را تعدیل کردند. در شرایط آبیاری معمول، تیمار آلی-شیمیایی منجر به جهش چشمگیر ماده خشک (۲۸۷٪)، پرولین (۱۱۲٪) و شاخص برداشت (۵۲٪) نسبت به شاهد شد. در مجموع، به‌کارگیری سیستم‌های تغذیه‌ای تلفیقی (آلی-شیمیایی و شیمیایی-زیستی) به‌عنوان مؤثرترین استراتژی زراعی برای بهبود عملکرد کمی و کیفی کتان در شرایط محدودیت آبی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری کاتالاز، کتان روغنی، تغذیه تلفیقی، شاخص برداشت، کودهای زیستی.

Evaluation of Nutrient Management on Seed Yield and Some Biochemical Traits of Oilseed Flax under Water-Deficit Condition

Fatemeh Yousefpour¹ | Asghar Rahimi^{2*} | Hossein Dashti³ | Ali Akbar Mohammadi Mirik⁴ and Seyed Ahmad Hosseini⁴

1. PhD Student in Agrotechnology, Department of Genetics and Plant Production, Vali-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran fatemeu3@stu.vru.ac.ir orcid /0009-0006-6531-3253

2*. Professor, Department of Genetics and Plant Production, Vali-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran rahimia@vru.ac.ir orcid /0000-0002-1060-804X

3. Professor, Department of Plant Production Genetics, Vali-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran dashti@vru.ac.ir orcid /0000-0002-3594-4955

4. Associate Professor, Department of Plant Production Genetics, Vali-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran aa.mohammadi@vru.ac.ir orcid /0000-0003-3261-3138 & a.hosseini@vru.ac.ir orcid /0000-0002-5463-9315

Abstract

Introduction

Drought stress is a primary constraint on crop productivity in arid and semi-arid regions globally. Optimizing nutrient management and irrigation strategies can significantly bolster crop resilience against such environmental pressures. This study aimed to evaluate the biochemical, physiological, and agronomic responses of flax (*Linum usitatissimum* L.) to organic, chemical, and bio-fertilizers under drought stress conditions.

Material and Methods

The experiment was conducted at the Agricultural Research Farm of Vali-e-Asr University of Rafsanjan during the 2020–2021 growing season, using a split-plot arrangement based on a randomized complete block design with three replications. The main plots comprised two irrigation regimes: normal irrigation and irrigation cessation at the flowering stage (drought stress). The sub-plots included seven fertilization treatments: (1) control; (2) farmyard manure; (3) a slow release biofertilizer containing 10910×10^9 cells of *Pseudomonas* spp. per gram; (4) chemical fertilizer consisting of 100 kg ha^{-1} of pure nitrogen (as urea), 40 kg ha^{-1} of pure phosphorus (as Monopotassium phosphate), and 100 kg ha^{-1} of pure potassium (as Potassium sulfate); and (5–7) three integrated treatments combining chemical–biofertilizer, manure–biofertilizer, and organic–chemical applications. In the integrated treatments, the application rates of manure and biofertilizer remained identical to the single treatments, whereas the chemical fertilizer dosage in the organic–chemical treatment was reduced to 70% of the basal rate. Land preparation involved plowing, leveling, and application of the assigned fertilization treatments prior to sowing. Drought stress was imposed by withholding irrigation at the flowering stage. Measured traits included shoot dry weight, soluble sugar content, antioxidant enzyme activities (CAT and SOD), proline accumulation, grain yield, and harvest index.

Results and Discussion

ANOVA revealed significant effects of fertilization, irrigation, and their interaction on most traits ($P < 0.01$). Integrated treatments specifically the Organic–Chemical and Chemical–Biofertilizer combinations demonstrated superior performance. Under drought stress, the Organic–Chemical treatment increased catalase (CAT) activity by up to 70% and maximized superoxide dismutase (SOD) activity (~50 units). This suggests a robust activation of the antioxidant defense system, protecting photosynthetic pigments and membrane integrity against ROS-induced oxidative damage. Proline accumulation, a key adaptive response under drought stress, was markedly affected by integrated nutrient management. Under normal irrigation, proline levels ranged from 1 to $3 \mu\text{mol g}^{-1}$ fresh weight, while drought stress induced an increase to 6–8 $\mu\text{mol g}^{-1}$. The maximum value ($8.33 \mu\text{mol g}^{-1}$) was observed in the organic–chemical treatment, likely associated with activation of the glutamate pathway, upregulation of P5CS and P5CR genes, and partial suppression of ProDH under ABA signaling. This pathway is crucial for osmotic adjustment, cellular protection, and maintenance of photosynthetic efficiency during water deficit conditions. For shoot growth, the organic–chemical and chemical–biofertilizer treatments produced the highest dry biomass. Under normal irrigation, shoot dry weight in the organic–chemical treatment reached 2.81 g, and although reduced under drought stress, these treatments still maintained superior dry matter accumulation compared with other fertilizer types. Grain yield was directly affected by irrigation level and fertilization regime. Under normal irrigation, yield reached 1904 kg ha^{-1} , whereas drought stress reduced it to 1395 kg ha^{-1} . The organic–chemical treatment produced the highest grain yield (2000 kg ha^{-1}), followed by the chemical–biofertilizer treatment. Under drought stress, grain yield per unit area and shoot dry weight were significantly reduced. The decline in shoot biomass indicates a source limitation, which restricts the overall availability of assimilates during the grain-filling period. In contrast to the expected osmotic adjustment response, total soluble sugar content also decreased significantly under stress conditions. This reduction suggests a severe impairment of carbon metabolism. It is therefore hypothesized that dysfunction in sucrose transport to reproductive sinks further intensified the source limitation, ultimately leading to the pronounced reduction in grain yield. The Harvest Index reflected the efficiency of assimilate partitioning. The Organic–Chemical treatment demonstrated the highest HI under both normal (46.14%) and drought (29.74%) conditions. This indicates that integrated nutrient management not only supports vegetative growth but importantly enhances the source-sink translocation efficiency. By improving soil physicochemical properties and stimulating rhizosphere microbial activity, these treatments reduced flower/capsule abortion and ensured better grain filling even under water-limited conditions.

Conclusion. In conclusion, this study underscores the pivotal role of integrated nutrient management in bolstering the resilience of oil flax against drought stress. The combined application of fertilizers, particularly the Organic–Chemical (allowing a 30% reduction in chemical inputs) and Chemical–Bio regimes, orchestrated a simultaneous improvement in agronomic performance and physio-biochemical defense mechanisms (including antioxidant enzyme activity, soluble sugars, and proline accumulation). These enhancements reflect a holistic activation of plant adaptive pathways, effectively mitigating oxidative stress and stabilizing metabolic processes under water deficit. Although organic amendments may entail higher initial costs, their contribution to soil moisture retention and yield stability justifies this approach economically. Ultimately, these findings offer a viable roadmap for sustainable crop production in arid and semi-arid regions, demonstrating that optimizing nutrient synergy not only ensures ecological sustainability but also reduces economic risks for farmers, reconciling the trade-off between water scarcity and yield potential.

مقدمه

کتان یا بزرک (*Linum usitatissimum* L.) یکی از گیاهان مهم صنعتی و دارویی است که در سراسر جهان به منظور تولید الیاف و روغن کشت می‌شود. (Klein *et al.*, 2016). سطح زیر کشت آن در جهان به دلیل تقاضا و ارزش اقتصادی بالا به طور فزاینده‌ای در حال گسترش است. در سال ۲۰۲۲ سطح زیر کشت کتان روغنی در جهان حدود ۴/۵ میلیون هکتار و میزان تولید آن ۶۵/۳ میلیون تن بوده است (FAO, 2022). در ایران نیز به تازگی کشت این گیاه مورد توجه قرار گرفته و بر اساس آمارنامه کشاورزی در سال ۱۴۰۰، سطح زیر کشت کتان در کشور ۱۰۱ هکتار و میزان تولید آن ۱۳۱ تن بوده است کشورهای عمده تولیدکننده شامل کانادا، چین، ایالات متحده، ایتالیایی و هند هستند که کانادا نزدیک به ۸۰٪ تجارت جهانی بذر کتان را به خود اختصاص داده است (Yang *et al.*, 2021).

تنش‌های زیستی و غیرزیستی تهدیدی بر تولیدات کشاورزی هستند. شور و سدیمی شدن خاک‌ها، فرسایش و تخریب اراضی، خشکسالی و گرمایش جهانی، بیماری‌ها و عوامل بیماریزا از جمله تنش‌های تهدیدکننده تولید به شمار می‌روند. آمارها نشان می‌دهد که ۱۳ درصد از اراضی آسیا و اقیانوسیه به دلیل مواجهه با شوری، سدیمی شدن و خشکسالی تخریب شده‌اند یا عوامل بیماری‌زای قارچی که به تنهایی حدود دو سوم کل بیماری‌های گیاهی را شامل می‌شود، می‌تواند میزان تولیدات کشاورزی را تا ۳۰ درصد کاهش دهد (Goswami *et al.*, 2016). کشور ایران روی یک کمر بند بسیار خشک واقع شده که در آن بارندگی بسیار کم و محدود بوده بنابراین بیشتر بخش‌های آن خشک و نیمه خشک هستند (Eskandarinejad *et al.*, 2015). سازش گیاهان به تنش خشکی نتیجه تغییر بسیاری از مکانیزم‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی است که منجر به تغییراتی در سرعت رشد گیاه، هدایت روزنه‌ای، سرعت فرآیند فتوسنتز و فعالیت‌های آنزیمی می‌شود. توانایی گیاهان برای سازش به تنش‌های محیطی بستگی به نوع، شدت و مدت تنش و همچنین گونه گیاهی و مرحله وقوع تنش دارد (Yordanov & Tsoev, 2000). در شرایط تنش خشکی، گیاهان با کاهش هدایت روزنه‌ای، جذب و تثبیت CO₂ را محدود می‌کنند. این محدودیت با برهم زدن تعادل واکنش‌های فتوسنتزی، منجر به تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و بروز تنش اکسیداتیو می‌شود (Ali *et al.*, 2019). عناصر معدنی عوامل بسیار مهمی برای رشد و تمایز در تمام مراحل زندگی گیاه هستند. تنش خشکی بر جذب مواد معدنی مانند نیتروژن، فسفر، سیلیکون، کلسیم و منیزیم تأثیر می‌گذارد که ممکن است منجر به کاهش رشد و نمو شود (Martínez-Viveros *et al.*, 2010). عناصر معدنی علاوه بر تأمین مواد ساختاری و انرژی‌زا، مسیرهای سازگاری گیاه را فعال می‌کنند. به طور خاص، پتاسیم در تنظیم اسمزی و کنترل روزنه‌ها و کلسیم با تثبیت غشاها و مشارکت در سیگنال دهی استرس، پایداری فیزیولوژیکی گیاه را حفظ می‌کنند (Marschner, 2012). مدیریت بهینه کودها، به ویژه ترکیباتی که جذب و انتقال عناصر حیاتی را تسهیل می‌کنند، می‌تواند با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمولیت‌ها، مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی را بهبود دهد (Ashraf & Foolad, 2007). این رویکرد ضمن حفظ پتانسیل آبی سلول‌ها، کارایی مصرف آب و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه را ارتقا داده و موجب دستیابی به عملکرد بهینه می‌شود.

پیشینه پژوهش

مطالعات متعدد گزارش کرده‌اند که خشکی بر دسترسی مواد مغذی در خاک تأثیر می‌گذارد، جذب و انتقال عناصر غذایی را کاهش می‌دهد، غلظت آنها را در بافت گیاه کاهش می‌دهد و در نهایت باعث اختلال در رشد گیاه می‌شود (Ibrahim *et al.*, 2011). با افزایش شدت تنش خشکی، میزان پرولین در گیاه بزرک به طور قابل توجهی افزایش یافت و در برخی موارد چندین برابر بیش از گیاهان تحت آبیاری مناسب تجمع یافت (Basu *et al.*, 2016). خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل مقادیر بالای CaCO₃، pH قلیایی و کمبود ماده آلی، معمولاً با کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی، تثبیت فسفر و محدودیت جدی در حرکت ریزمغذی‌ها همراه هستند؛ شرایطی که در نهایت

کارایی جذب عناصر غذایی را کاهش می‌دهد. (Alloway, 2009) در نظام‌های کشاورزی مرسوم برای افزایش میزان تولید محصولات کشاورزی در واحد سطح، کودهای شیمیایی مصرف می‌شود. کاربرد کود شیمیایی نیتروژن سبب افزایش عملکرد دانه و روغن در گیاه لوبیا روغنی شد و نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳۷ و ۲۱ درصد بهبود نشان داد؛ به طوری که کاربرد ۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار به عنوان تیمار برتر تشخیص داده شد. (Dordas, 2010) علاوه بر مصرف کودهای شیمیایی، استفاده از منابع کود آلی در خاک‌های خشک به عنوان رویکردی مؤثر برای افزایش حاصلخیزی، بهبود دسترسی عناصر غذایی و پایداری تولید گیاه توصیه شده است. (Aria et al., 2010). استفاده از کودهای آلی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و ارتقای کارایی جذب عناصر غذایی، می‌تواند نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی ایفا کند. شواهد علمی نشان می‌دهد که کودهای آلی از طریق تحریک تجمع اسمولیت‌ها و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه، تحمل آن را در برابر تنش‌های محیطی به ویژه خشکی افزایش می‌دهند (Ashraf & Foolad, 2007; Aria et al., 2010). در این میان کاربرد کودهای آلی و زیستی در تلفیق با کودهای شیمیایی یکی از روش‌های مدیریتی مناسب محسوب می‌شود. بررسی‌ها نشان داده‌اند که منابع زیستی یا ارگانیک مانند کود آلی مخلوط با کود شیمیایی می‌تواند به حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصول منجر شود، زیرا این نظام اکثر نیازهای غذایی گیاه را تامین کرده و کارایی جذب مواد غذایی توسط گیاه را افزایش می‌دهد (Parmar et al., 1998). استفاده هم‌زمان از کودهای آلی، زیستی و شیمیایی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، موجب بهبود ساختار ریشه، افزایش دسترسی عناصر غذایی و ارتقای رشد گیاه می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد کودهای آلی از طریق افزایش جذب عناصر، منجر به بهبود رشد رویشی، از جمله وزن خشک، ارتفاع بوته و سطح برگ در کتان روغنی می‌گردد. (Kumar et al., 2021) در یک آزمایش که روی سه رقم کتان روغنی و سه سطح نیتروژن (شاهد، ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار) انجام شد، نتایج نشان داد با افزایش سطح نیتروژن، تعداد دانه در کپسول، تعداد کپسول در مترمربع، عملکرد دانه و وزن دانه در بوته به طور معنی‌داری افزایش یافت. اختلافات معنی‌دار در برخی اجزای عملکرد نظیر ارتفاع بوته، تعداد پنجه و تعداد غلاف نیز در پاسخ به کاربرد سطوح مختلف نیتروژن و فسفر مشاهده شد. بررسی وضعیت تغذیه‌ای خاک‌های تحت کشت کتان نیز نشان می‌دهد که pH بالا، کمبود نیتروژن قابل استفاده و فسفر قابل جذب، عملکرد گیاه را محدود می‌کند و بنابراین کاربرد فسفر نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد دارد (Delesa & Choferie, 2016). در مطالعه‌ای دیگر گزارش گردید که افزایش سطوح کودهای معدنی نیتروژن و فسفر باعث افزایش معنی‌دار در اکثر صفات مورفولوژیکی و عملکردی کتان روغنی شد؛ با این حال، این افزایش شامل تعداد دانه در کپسول و درصد روغن دانه نمی‌شد. همچنین، گیاهانی که از بذره‌های رشد کرده در خاک تلقیح شده با کودهای بیولوژیک به دست آمدند، بهبود قابل توجهی در تمامی صفات رشد و عملکرد نسبت به شاهد نشان دادند و کارایی تغذیه‌ای و رشد گیاه را تقویت کردند (El-Nagdy et al., 2010). ریزوباکتری‌های تقویت‌کننده رشد گیاه موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، طول ریشه و تولید ماده خشک در طیف وسیعی از محصولات زراعی از جمله سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، ذرت و گندم شده‌اند (Bhattacharyya and Jha, 2012). باکتری *Pseudomonas putida* از طریق افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود حفظ و نگهداری آب در ناحیه ریشه، موجب افزایش فسفر قابل جذب، زیست‌توده گیاهی و میزان پروتئین محلول برگ در گیاه شنبلله می‌شود. به نظر می‌رسد افزایش کارایی جذب فسفر و سایر عناصر غذایی و همچنین بهبود بهره‌وری مصرف آب، ناشی از توسعه ریشه‌های انبوه و شبکه‌مانند در مجاورت ریشه و بهره‌برداری گسترده‌تر از بستر رشد باشد که نهایتاً منجر به افزایش زیست‌توده گیاه می‌گردد (Irakhsah et al., 2015). در مطالعه تأثیر کاربرد کودهای دامی و زیستی بر عملکرد بیوماس، عملکرد دانه و اسانس گیاه دارویی گشنیز، بیشترین عملکرد بیوماس (۱۰۹۴۶/۱ کیلوگرم در هکتار) با کاربرد ۲۰ تن کود دامی و بیشترین عملکرد دانه و عملکرد اسانس با مصرف ۱۵ تن کود دامی حاصل شد (Darzi et al., 2010). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تلقیح گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) با ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) از جمله سویه‌های جنس *Pseudomonas* sp.

و گونه *Bacillus lentus*، از طریق ارتقای فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، بهبود کارایی فتوسنتز و افزایش جذب عناصر غذایی، منجر به تعدیل اثرات منفی تنش‌های محیطی می‌گردد (Golpayegani & Gholami Tilebeni, 2011). یافته‌ها حاکی از آن است که تنش کم‌آبی منجر به کاهش جذب عناصر غذایی، وزن هزار دانه، درصد روغن و در نهایت عملکرد دانه کلزا می‌گردد. اگرچه مصرف بالای کودهای نیتروژن‌دار می‌تواند درصد روغن را کاهش دهد، اما نتایج نشان داد که تلقیح با PGPR، به‌ویژه در تیمارهای تلفیقی، از طریق بهبود جذب عناصر و تعدیل اثرات تنش، موجب افزایش عملکرد کمی، بهبود کیفیت روغن و ارتقای پتانسیل تولید بیودیزل گردید (Nasrollahzadeh et al., 2023). کتان به عنوان گیاهی چندمنظوره، علاوه بر تولید الیاف و علوفه، به دلیل دارا بودن روغن غنی از آلفا-لینولنیک اسید، جایگاه ویژه‌ای در الگوهای کشت پایدار دارد. با این حال، اطلاعات اندکی در خصوص پاسخ فیزیولوژیک این گیاه به مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک در شرایط کمبود آب در دسترس است. لذا پژوهش حاضر با هدف ارزیابی برهم‌کنش منابع کودی متنوع (آلی، زیستی و شیمیایی) و رژیم‌های مختلف آبیاری (نرمال و قطع آبیاری) طراحی شد تا راهکارهایی عملی جهت توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک ارائه نماید.

روش شناسی پژوهش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان واقع در استان کرمان طی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. آزمایش به‌صورت اسپلیت‌پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید، عامل اصلی شامل دو رژیم آبیاری یعنی آبیاری معمول و قطع کامل آبیاری از زمان رسیدن ۵۰ درصد بوته‌ها به مرحله گلدهی تا برداشت بود. عامل فرعی شامل هفت تیمار تغذیه‌ای یعنی شاهد (بدون کود)، کود دامی به میزان ۳۰ تن در هکتار از کود گاو، کود زیستی آهسته‌رهش جمعیت ۱۰ به توان ۹ سلول از باکتری *Pseudomonas spp*، در هر گرم، گروه تولیدی ماتیلدا (طبق توصیه کودی شرکت سازنده ۲ کیلوگرم در هکتار همراه با آب آبیاری)، تیمار کود شیمیایی بر اساس نتایج آزمون خاک شامل مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص (N) از منبع اوره، ۴۰ کیلوگرم در هکتار اکسید فسفر (P_2O_5) از منبع مونوپتاسیم فسفات و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اکسید پتاسیم (K_2O) بود. جهت اعمال دقیق تیمار کودی، ابتدا سهم پتاسیم تأمین شده توسط کود مونوپتاسیم فسفات محاسبه و از نیاز کل پتاسیم کسر گردید؛ سپس مابقی نیاز پتاسیمی گیاه تا رسیدن به حد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، از منبع سولفات پتاسیم (K_2SO_4) تأمین شد. همچنین تلفیق‌های دوگانه شامل کود زیستی + کود شیمیایی، کود دامی + کود زیستی و کود شیمیایی + کود دامی بود. در تیمارهای تلفیقی، مقدار مصرف کود آلی و زیستی مشابه تیمارهای منفرد و مقدار کود شیمیایی در تیمار آلی-شیمیایی به ۷۰ درصد مقدار پایه کاهش داده شد. هر کرت آزمایشی با ابعاد یک متر مربع شامل چهار ردیف کاشت با فاصله ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پس از انجام شخم و تسطیح زمین، بذر ژنوتیپ منتخب KO37 از توده بومی کردستان در تاریخ ۸ آبان ۱۳۹۹ به‌صورت دستی کشت گردید و تراکم بوته‌ها در نهایت معادل ۶۰۰ بوته در متر مربع تنظیم شد. به‌منظور تعیین وضعیت حاصلخیزی خاک و تنظیم برنامه کوددهی، نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام و گزارش گردید (جدول ۱). کود دامی پیش از کاشت و به‌صورت اختلاط با خاک تا عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر مصرف شد و کودهای فسفر و پتاسیم نیز پیش از کاشت به‌عنوان کود پایه اعمال گردیدند. نیتروژن در دو نوبت پایه (۲/۳ کود) در زمان کاشت و سرک (۱/۳ کود) در آغاز ساقه‌دهی مصرف شد و کود زیستی حاوی *Pseudomonas spp* بر اساس دستورالعمل در مرحله ساقه‌دهی همراه با آبیاری به خاک افزوده شد. تیمارهای آبی و تنش از زمان کاشت تا گلدهی (حدود ۱۱۲ روز بعد از کاشت)، به‌طور هم‌زمان و بر اساس نیاز آبی گیاه، آبیاری شدند. بعد از این مرحله و تا زمان برداشت، گیاهان آبی با فاصله ۷ روز یک‌بار آبیاری شدند، در حالیکه گیاهان تنش دیده، هیچ آبی دریافت نکردند. صفات مورد ارزیابی شامل وزن خشک اندام هوایی، قندهای محلول کل، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز، محتوای پرولین برگ، عملکرد دانه در واحد سطح و شاخص برداشت بود. نمونه‌برداری (از برگ ۱۰ بوته تصادفی) جهت اندازه‌گیری

صفات فیزیولوژیک، ۹ روز بعد از گلدهی (آخرین آبیاری گیاهان تنش) و به طور همزمان در شرایط آبی و تنش انجام شد. در زمان نمونه برداری، گیاهان تنش دیده، دارای برگ‌های پژمرده بودند. بعد از نمونه برداری، آنها فریز شده و در دمای منفی ۸۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا از تجزیه و تغییرات بیوشیمیایی جلوگیری شود. (Ali et al., 2019). اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی در مرحله رسیدگی کامل فیزیولوژیک (پایان فصل رشد) انجام گرفت. بدین منظور، ۱۵ بوته از هر کرت به طور تصادفی کف بر شدند؛ سپس نمونه‌ها در پاکت‌های کاغذی قرار گرفته و به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و در نهایت با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شدند. به منظور تعیین عملکرد، برداشت کامل گیاه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک (۱۸۵ روز بعد از کاشت) انجام و عملکرد بر حسب کیلوگرم در هکتار دانه گزارش گردید و نشانه‌های ظاهری تنش خشکی از جمله ریزبرگی و کاهش رشد عمومی بوته نیز در زمان برداشت مشاهده گردید. به منظور تعیین شاخص برداشت، پس از برداشت کل کرت، و عمل جداسازی دانه‌های کتان مربوط به هر کرت به مدت ۴ روز در زیر نور آفتاب قرار گرفتند و سپس توزین شدند تا وزن دانه خشک بر حسب کیلوگرم در هکتار حاصل شود. شاخص برداشت (برحسب درصد) با استفاده از رابطه ۱ بدست آمد.

رابطه ۱

$$Hi = GY/DM \times 100$$

که در آن، H_i شاخص برداشت، GY مقدار محصول دانه (عملکرد اقتصادی) (Kg/ha) و DM محصول زیستی شامل کل ماده خشک تولید شده، می‌باشد. برای اندازه‌گیری پرولین، ۰.۵ گرم از بافت تازه برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد همگن و صاف شد. سپس ۲ میلی‌لیتر از عصاره با ۲ میلی‌لیتر معرف ناین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال مخلوط گردید. نمونه‌ها یک ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و بلافاصله در حمام یخ سرد شدند. سپس ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد و لوله‌ها ورتکس (Vortex) شدند تا کروموفور جذب تولوئن شود. در نهایت جذب فاز رویی در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد (Bates et al., 1973). سنجش قندهای محلول کل با روش فنل سولفوریک اسید با روش (Dubois et al., 1956) انجام شد. بدین منظور، ۰.۱ گرم از نمونه خشک برگ با ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد استخراج گردید. به ۱ میلی‌لیتر از عصاره روغنی، ۱ میلی‌لیتر فنل ۵ درصد و ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ (۹۸ درصد) اضافه شد. پس از ۴۵ دقیقه نگهداری در دمای محیط، جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۹۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، عصاره‌گیری با استفاده از ۲ میلی‌لیتر از ترکیب تریس و Polyvinylpyrrolidone و ۰.۵ گرم نمونه گیاهی انجام شد (Sairam et al., 2002) سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز براساس روش Beauchamp و Fridovich (1971) انجام شد و به این منظور، مخلوط واکنش شامل بافر فسفات (pH 7.8)، متیونین، EDTA، NBT، ریوفلاوین و عصاره آنزیمی، پس از ۱۵ دقیقه قرارگیری در نور، جذب آن در ۵۶۰ نانومتر قرائت شد. و واحد آن براساس واحد بر میلی گرم پروتئین بیان گردید. فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) از طریق اندازه‌گیری کاهش جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر ناشی از تجزیه هیدروژن پراکسید تعیین شد. برای این منظور، مقدار ۰.۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی به ۲ میلی‌لیتر محلول هیدروژن پراکسید ۱۰ میلی‌مولار افزوده شد و کاهش جذب محلول طی ۳۰ ثانیه در طول موج ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. (Aebi, 1984) تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) محاسبه گردید. برای ترسیم نمودارهای مربوطه نیز از نرم افزار EXCEL استفاده شد.

جدول ۱. نتایج آنالیز فیزیوشیمیایی خاک مزرعه در عمق ۰-۳۰ سانتیمتر

مواد آلی O.M	فسفر P	پتاسیم K	نیترژن N	هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH	بافت خاک Soil texturer
%	mg.kg-1	mg.kg-1	%	dS.m-1	-	
۰/۲۸	۱۰/۷	۲۵۰	۰/۰۹۷	۳/۳۶	۸/۲	لوم شنی

یافته‌های پژوهش

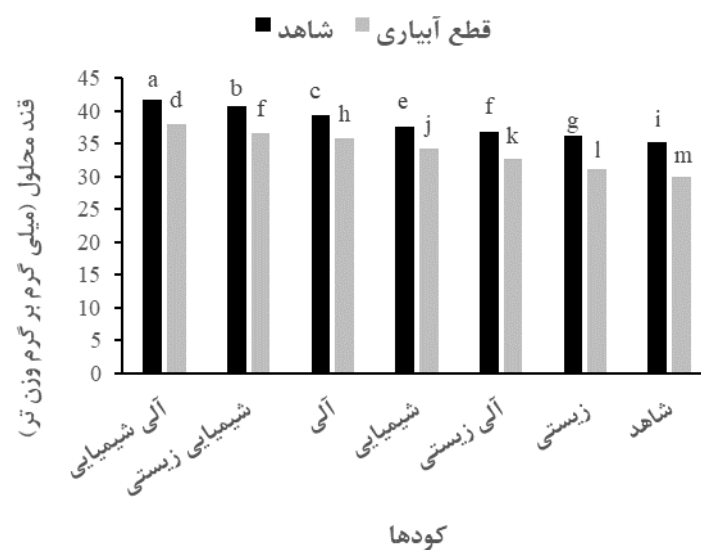
جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات قندهای محلول کل، آنزیم کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، محتوای پرولین برگ، وزن خشک اندام هوایی، عملکرد دانه در واحد سطح و شاخص برداشت در کتان روغنی تحت تیمارهای کودهای آلی، شیمیایی و زیستی و تنش خشکی

منابع تغییر	درجه آزادی	قندهای محلول کل	آنزیم کاتالاز	سوپراکسید دیسموتاز	محتوای پرولین برگ	وزن خشک اندام هوایی	عملکرد دانه در واحد سطح	شاخص برداشت
بلوک	۲	۰/۰۵۴	۰/۰۱۷	۰/۹۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۹۱۴۰	۰/۰۴۰
آبیاری	۱	۱۸۳**	۱۱۴۶**	۴۲۱۹**	۳۰۳**	۱۹/۷۹**	۳۳۶۱۵۱۴**	۱۷۹۳**
خطا a	۲	۰/۰۳۲	۰/۰۰۴	۰/۷۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۷۸۷۰	۰/۰۰۲
کود	۶	۴۳/۳۹**	۲۵/۲۱**	۷۵/۴۷**	۲/۲۶**	۲/۲۵**	۳۳۲۵۰۸**	۱۳۱**
آبیاری* کود	۶	۰/۸۲**	۱/۷۹**	۲/۷۲*	۰/۲۵**	۰/۵۴**	۶۱۸۸ ^{NS}	۱۱/۸۹**
خطا b	۲۴	۰/۰۵۷	۰/۰۰۳	۰/۸۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	۵۵۶۰	۰/۰۰۴۶
ضریب تغییرات		۰/۱۶۶	۰/۰۷۹	۲/۶۷	۳/۴۰	۱۷/۳۰	۴/۵۳	۰/۶۸

NS و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱٪ و عدم معنی‌داری می‌باشد.

قندهای محلول کل

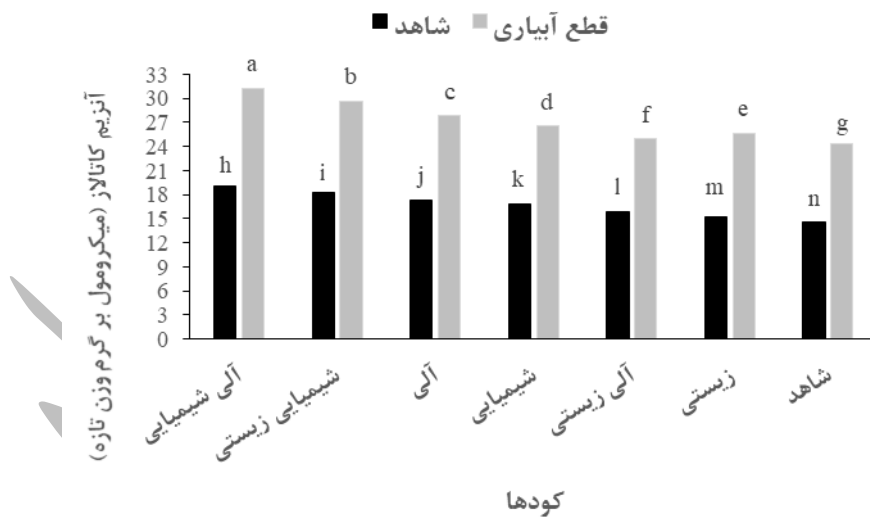
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که برهمکنش رژیم آبیاری و نوع کود بر میزان قندهای محلول کل در کتان در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود. مقایسات میانگین صفت قندهای محلول کل نشان داد که در شرایط آبیاری معمول، بیشترین مقدار قندهای محلول کل در تیمار کود آلی - شیمیایی مشاهده شد (۴۱/۷۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، که نسبت به تیمار شاهد (۳۵/۱۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) افزایش معنی‌داری داشت. در شرایط تنش خشکی (قطع آبیاری)، میزان قندهای محلول کل در همه تیمارها کاهش یافت؛ با این حال، تیمارهای آلی - شیمیایی (۳۸/۰۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و شیمیایی - زیستی (۳۹/۶۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مقادیر بالاتری نسبت به سایر تیمارها نشان دادند (شکل ۱). این نتایج نشان می‌دهد که احتمالاً در شرایط تنش شدید، نرخ مصرف کربوهیدرات‌ها جهت تنفس سلولی و تأمین انرژی مکانیسم‌های دفاعی، از نرخ تولید آن‌ها فراتر رفته است و مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی می‌تواند اثر منفی تنش خشکی بر قندهای محلول کل را کاهش دهد.



شکل ۱. مقایسه میانگین برهم کنش تیمارهای کودی و رژیم‌های آبیاری برای مقدار قندهای محلول کل کتان. میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معناداری تحت تأثیر برهم‌کنش رژیم آبیاری و نوع کوددهی قرار گرفت (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۲) نشان داد که قطع آبیاری در مرحله گلدهی موجب افزایش چشمگیر فعالیت کاتالاز در کلیه تیمارهای کودی شد؛ در شرایط آبیاری معمول، دامنه فعالیت کاتالاز بین ۱۴/۵۰ تا ۲۰ میکرومول بر گرم بر وزن تر بود و اختلاف میان تیمارها گرچه محدود، اما معنی‌دار بود؛ بیشترین مقدار در تیمار آلی - شیمیایی مشاهده شد. در شرایط قطع آبیاری، فعالیت کاتالاز به محدوده ۲۴ تا ۳۲ میکرومول بر گرم بر وزن تر افزایش یافت؛ به‌طوری‌که تیمار آلی - شیمیایی با میانگین ۳۱/۲۹ میکرومول بر گرم بر وزن تر بیشترین میزان را نشان داد و پس از آن به‌ترتیب تیمارهای شیمیایی - زیستی (۲۹/۶۵)، آلی (۲۷/۸۶)، شیمیایی (۲۶/۵۸)، زیستی (۲۵/۷۱) و آلی - زیستی (۲۴/۹۸) قرار گرفتند؛ تیمار شاهد پایین‌ترین مقدار (۲۴/۳۸) میکرومول بر گرم بر وزن تر) را به خود اختصاص داد. این الگو بیانگر آن است که مصرف تلفیقی کودهای آلی - شیمیایی نه‌تنها در شرایط آبیاری معمول بیشترین فعالیت را داشت، بلکه در تنش خشکی نیز توانست فاصله معنی‌داری با سایر تیمارها حفظ کند؛ درحالی‌که، تیمار کودی شاهد (بدون مصرف کود) و کود آلی - زیستی، کمترین ظرفیت افزایش فعالیت کاتالاز را در برابر تنش نشان دادند که می‌تواند ناشی از رقابت میکروبی یا تغییر در فراهمی عناصر در ترکیب ماده آلی با باکتری‌ها در شرایط خاص این آزمایش باشد.



شکل ۲. مقایسه میانگین برهم کنش تیمارهای کودی و رژیم‌های آبیاری برای فعالیت آنزیم کاتالاز در کتان. میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فاکتورهای اصلی تیمار کود، رژیم آبیاری و برهم‌کنش آن‌ها بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بودند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که قطع آبیاری در مرحله گلدهی موجب افزایش قابل توجه فعالیت این آنزیم در تمام تیمارهای کودی شد. در شرایط آبیاری معمول، فعالیت SOD در دامنه ۲۰ تا ۳۰ واحد بر میلی‌گرم پروتئین قرار داشت، تیمار آلی - شیمیایی با ۲۹/۵۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین بالاترین مقدار و تیمار شاهد با ۲۰/۵۹ واحد بر میلی‌گرم پروتئین پایین‌ترین مقدار را ثبت کردند. تیمارهای شیمیایی - زیستی (۲۷/۵۱)، آلی (۲۵/۶۷)، شیمیایی (۲۵/۶۴) و آلی - زیستی (۲۳/۴۴) نیز نسبت به شاهد برتری

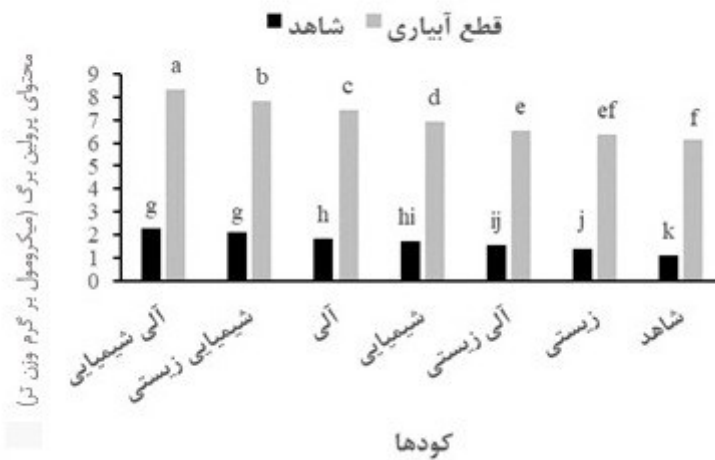
معنی‌دار داشتند. در شرایط قطع آبیاری، دامنه فعالیت آنزیم به ۳۷ تا ۵۰ واحد بر میلی گرم پروتئین افزایش یافت، که معادل رشدی حدود ۶۰ تا ۹۰٪ نسبت به شرایط معمول بود. بیشترین فعالیت به تیمارهای آلی - شیمیایی و شیمیایی - زیستی (حدود ۵۰ واحد بر میلی گرم پروتئین) تعلق داشت که در یک گروه آماری قرار گرفتند. تیمارهای آلی و شیمیایی با حدود ۴۵ واحد بر میلی گرم پروتئین و تیمار آلی - زیستی با ۴۴/۳۳ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. تیمار زیستی با ۴۱/۹۴ واحد بر میلی گرم پروتئین و شاهد ۳۷/۷۸ واحد بر میلی گرم پروتئین کمترین فعالیت را نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که، تیمار آلی - شیمیایی نه تنها در شرایط آبیاری معمول بالاترین فعالیت را نشان داد، بلکه در شرایط تنش خشکی نیز برتری خود را حفظ کرد (شکل ۳).



شکل ۳. مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای کودی و رژیم‌های آبیاری برای فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در کتان. میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

محتوای پرولین برگ

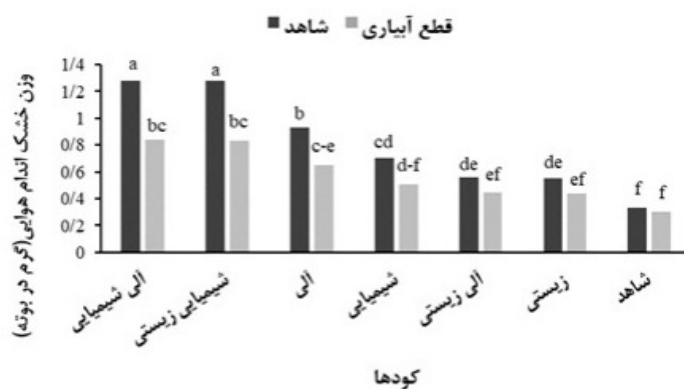
تجزیه داده‌ها نشان داد که مقدار محتوای پرولین برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی رژیم آبیاری و نوع کود و همچنین برهم‌کنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۲). براساس مقایسه میانگین‌ها، در شرایط آبیاری معمول، دامنه تغییرات محتوای پرولین برگ بین ۱ تا ۳ میکرومول بر گرم وزن تر قرار داشت؛ در این شرایط تیمارهای آلی - شیمیایی (۲/۲۹) و شیمیایی - زیستی (۲/۱۱) در گروه آماری بالاتر از سایر تیمارها قرار گرفتند، در حالی که تیمار شاهد با ۱/۰۸ میکرومول بر گرم وزن تر در پایین‌ترین گروه قرار گرفت. قطع آبیاری در مرحله گلدهی الگوی تجمع محتوای پرولین برگ را به‌طور قابل توجهی تغییر داد. به‌طوری که دامنه مقادیر به حدود ۶ تا ۸ میکرومول بر گرم وزن تر رسید؛ تیمار کودی آلی - شیمیایی با ۸/۳۳ میکرومول بر گرم وزن تر بیشترین میزان را نشان داد (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای کودی و رژیم‌های آبیاری برای مقدار محتوای پروتئین برگ در کتان. میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

وزن خشک اندام هوایی

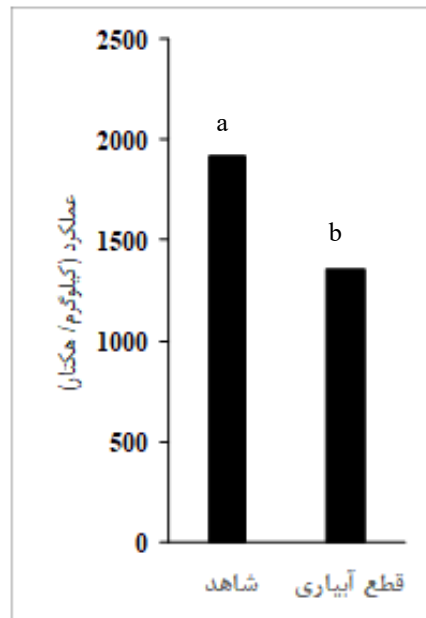
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای کودی، رژیم آبیاری و برهم‌کنش آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی کتان روغنی، در سطح احتمال ۱٪ ($p < 0.01$) معنی‌دار بود. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت بالای عملکرد ماده خشک گیاه به نوع تغذیه و مدیریت آبیاری در طول دوره رشد است. نتایج مقایسات میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین میانگین وزن خشک بوته کتان مربوط به تیمار تلفیق کود آلی - شیمیایی و شیمیایی - زیستی بود؛ در شرایط آبیاری معمول، تیمار آلی - شیمیایی با میانگین $1/28$ گرم در بوته بالاترین وزن خشک را داشت (شکل ۵). این تیمار از نظر آماری با تیمار شیمیایی - زیستی در همین شرایط تفاوت معنی‌داری نشان نداد. در مقابل، کمترین وزن خشک در تیمار شاهد (بدون کاربرد کود) با میانگین $0/33$ گرم در بوته مشاهده شد. در شرایط تنش (قطع آبیاری در مرحله گلدهی)، کاهش معنی‌داری در وزن خشک مشاهده شد. تیمارهای کودی شیمیایی - زیستی و آلی - شیمیایی در شرایط تنش ناشی از قطع آبیاری، بیشترین مقدار وزن خشک را نشان دادند (میانگین $0/83$ گرم در بوته). این تیمارها در مقایسه با سایر تیمارها همچنان قادر به حفظ سطح بالایی از ماده خشک بودند.



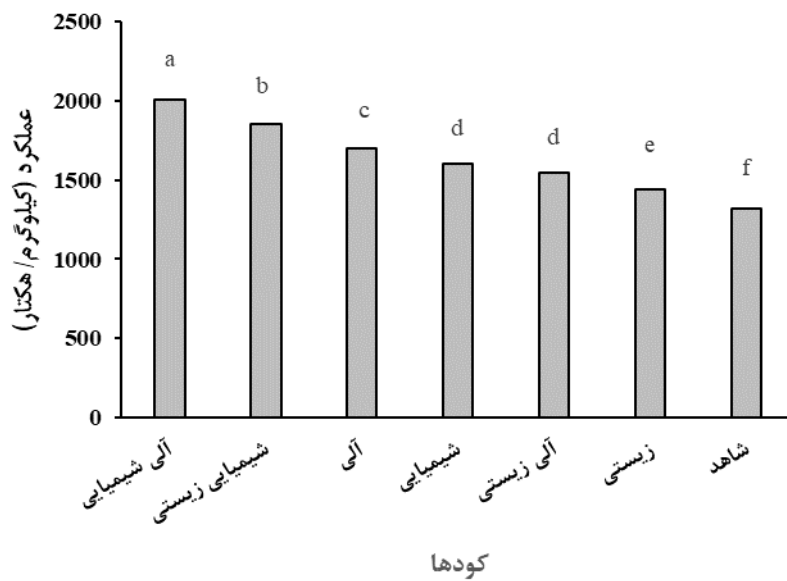
شکل ۵- مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای کودی و رژیم‌های آبیاری برای مقدار وزن خشک اندام هوایی در کتان
میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

عملکرد دانه در واحد سطح

براساس نتایج جدول ۲، اثرات اصلی کوددهی و رژیم آبیاری بر میزان عملکرد دانه در واحد سطح کتان روغنی در سطح ۱٪ معنی‌دار بود اما برهم‌کنش این دو عامل از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. عدم معنی‌داری اثر متقابل نشان می‌دهد که پاسخ عملکرد دانه به کوددهی در شرایط مختلف آبیاری نسبتاً ثابت بوده و اثر کود مستقل از وضعیت آبیاری است. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط آبیاری معمول، عملکرد دانه در واحد سطح به ۱۹۰۴ کیلوگرم در هکتار رسید که به طور قابل توجهی بیشتر از عملکرد به دست آمده تحت تنش خشکی (۱۳۹۵ کیلوگرم در هکتار) بود (شکل ۶). در بین تیمارهای کودی، تیمار آلی - شیمیایی بالاترین عملکرد دانه در واحد سطح (۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) را نشان داد و پس از آن تیمارهای شیمیایی - زیستی (۱۹۰۰ کیلوگرم در هکتار) و آلی (۱۸۵۰ کیلوگرم در هکتار) قرار گرفتند. کمترین عملکرد دانه در واحد سطح (۱۳۵۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار شاهد ثبت شد (شکل ۷).



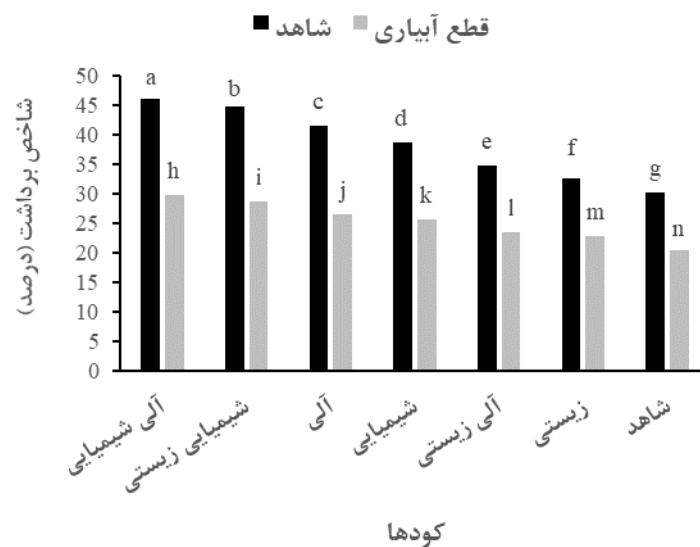
شکل ۶- مقایسه میانگین نحوه آبیاری برای مقدار عملکرد دانه در واحد سطح در کتان
میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.



شکل ۷- مقایسه میانگین تیمارهای کودی بر عملکرد دانه در واحد سطح در کتان میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

شاخص برداشت

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی رژیم آبیاری، تیمار کوددهی و برهمکنش آنها بر شاخص برداشت در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط آبیاری معمول، شاخص برداشت از حدود ۳۰٪ در تیمار شاهد تا حدود ۴۷٪ در تیمار آلی - شیمیایی تغییر کرد؛ رتبه‌بندی تیمارها به ترتیب آلی - شیمیایی (۴۶/۱۴)، شیمیایی - زیستی (۴۴/۶۸)، آلی (۴۱/۴۳)، شیمیایی (۳۸/۶۶)، آلی - زیستی (۳۴/۸۲)، زیستی (۳۲/۶۰) و شاهد (۳۰/۲۶) بود. با اعمال قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی، شاخص برداشت به صورت چشمگیری کاهش یافت و به محدوده تقریباً ۲۰ تا ۳۰ درصد رسید؛ در این شرایط تیمار آلی - شیمیایی بیشترین شاخص برداشت (۲۹/۷۴٪) و تیمار شاهد کمترین مقدار (۲۰/۶۲٪) را نشان داد (شکل ۸).



شکل ۸. مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای کودی و رژیم‌های آبیاری برای مقدار شاخص برداشت در کتان. میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی با ایجاد محدودیت‌های روزنه‌ای و غیرروزنه‌ای، فرآیندهای فیزیولوژیک کتان روغنی را مختل کرده و منجر به افت معنی‌دار عملکرد دانه می‌شود. این کاهش عملکرد، عمدتاً ناشی از بسته شدن روزنه‌ها برای جلوگیری از اتلاف آب است که به تبع آن ورود دی‌اکسید کربن محدود شده و ظرفیت فتوسنتز خالص کاهش می‌یابد (Abogadallah, 2011). کاهش قندهای محلول کل در برگ‌های تحت تنش متاثر از کاهش ظرفیت فتوسنتزی به دلیل محدود شدن ورود CO_2 به واسطه بسته شدن روزنه‌ها و کاهش چرخه کالوین است که سبب افزایش تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در کلروپلاست و پراکسی‌زوم می‌شود و در صورتی که سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی نتواند خنثی‌سازی این ترکیبات را انجام دهد، پراکسیداسیون لیپیدها و تخریب ساختار غشا رخ خواهد داد (Afzal *et al.*, 2021). در این پژوهش، در تیمارهای تلفیقی، به‌ویژه تلفیق آلی-شیمیایی و شیمیایی-زیستی، افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز مشاهده گردید. کود شیمیایی NPK با تأمین عناصر پرمصرف، موجب سنتز کلروفیل و افزایش ظرفیت انتقال الکترون می‌گردد و به دنبال آن افزایش فتوسنتز و تولید کربوهیدرات‌های محلول موجب تأمین انرژی لازم برای ساخت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی خواهد شد (Jin *et al.*, 2022). همچنین کود آلی با بهبود مشخصات فیزیکی و بیولوژیک خاک، موجب افزایش ظرفیت نگهداشت آب و فعالیت میکروبی خاک می‌گردد. کودهای زیستی، به‌ویژه سویه‌های *Pseudomonas spp.*، با تولید هورمون‌های محرک رشد و متابولیت‌های کاهش‌دهنده اثرات شوری، موجب افزایش کارایی جذب عناصر غذایی شده و تجمع اسمولایت‌هایی مانند پرولین را تحریک می‌کنند (Bhat *et al.*, 2024). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمارهای کودی علی‌رغم تعدیل تنش خشکی، به دسترسی بهتر گیاه به عناصر غذایی (به‌ویژه نیتروژن) جهت سنتز پروتئین‌های آنزیمی نسبت داده می‌شود. در واقع، گیاهان شاهد به دلیل فقر غذایی، حتی در مواجهه با تنش شدید، سوبسترا و انرژی لازم برای تولید آنزیم کافی را نداشتند. بنابراین، فعالیت بالاتر کاتالاز در تیمارهای کودی نشان‌دهنده یک مکانیسم دفاعی کارآمدتر و توانایی بالاتر گیاه برای جابجایی رادیکال‌های آزاد (ROS) است (Abid *et al.*, 2016). در گیاه کدو، استفاده از کودهای زیستی تحت تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوکاتایون ردوکتاز و گواپاکول پراکسیداز و کاهش آسیب اکسیداتیو می‌شود؛ و در نهایت، بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه در تیمارهای تلفیقی به حفظ عملکرد دانه منجر شد (Najafi *et al.*, 2021). در واقع، ترکیب کود آلی (بهبود تهویه و رطوبت خاک) و زیستی (توسعه سطح تماس ریشه) در کنار کود شیمیایی، باعث شد تا گیاه بتواند سطح سبز و تداوم فتوسنتز را مدت طولانی‌تری حفظ کند. این امر انتقال مواد فتوسنتزی به دانه را در مرحله پر شدن دانه تضمین می‌کند و از افت شدید عملکرد جلوگیری نمود (Singh *et al.*, 2016). تنش خشکی در انتهای فصل رشد، از طریق کوتاه کردن دوره پر شدن دانه، افزایش سقط گل‌ها و کاهش فتوسنتز جاری، موجب کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و شاخص برداشت می‌شود (Pirasteh *et al.*, 2014). از سوی دیگر، افزایش عملکرد در تیمارهای تلفیقی (آلی-شیمیایی) با نتایج (Khorramdel *et al.*, 2010) همخوانی دارد؛ نامبرندگان در پژوهش روی گیاهان دارویی بیان کردند که سیستم‌های تغذیه تلفیقی به دلیل آزادسازی تدریجی عناصر و بهبود ساختمان خاک، شرایط مطلوب‌تری برای توسعه ریشه و جذب آب فراهم کرده و در نهایت عملکرد کمی و کیفی گیاه را در مقایسه با سیستم‌های تک‌کودی بهبود می‌بخشند. بنابراین، الگوی تغذیه تلفیقی با ایجاد تعادل در جذب آب و عناصر غذایی، راهکاری پایدار برای افزایش تاب‌آوری کتان روغنی در شرایط کم‌آبی محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدیریت تلفیقی تغذیه، راهکاری کارآمد و ضروری برای تعدیل اثرات مخرب تنش خشکی در کتان روغنی است. تیمارهای ترکیبی، به‌ویژه آلی-شیمیایی و شیمیایی-زیستی، از طریق مکانیسم‌های

هم‌افزایی، پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه را با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمزی (تجهیز پرولین و قندهای محلول) بهبود بخشیدند. دستاورد کلیدی این پژوهش، امکان جایگزینی ۳۰ درصد از کودهای شیمیایی در الگوی تغذیه تلفیقی بدون افت معنی‌دار عملکرد بود. اگرچه کاربرد کودهای آلی ممکن است هزینه اولیه نهاده‌ها را اندکی افزایش دهد، اما با توجه به نقش حیاتی آن‌ها در حفظ رطوبت خاک و پایداری عملکرد در شرایط تنش، این رویکرد توجیه اقتصادی و آگرونومیک دارد. بنابراین، به نظر می‌رسد به‌کارگیری سیستم‌های تغذیه تلفیقی، ضمن دارا بودن پتانسیل حفظ پایداری اکولوژیک، می‌تواند با کمک به ثبات نسبی تولید در شرایط کم‌آبی، ریسک اقتصادی کشاورزان را تقلیل دهد. از این‌رو، این شیوه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد (یا دستورالعمل زراعی مناسب) جهت کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Y., Cui, Y., Zahoor, R., Jiang, D., & Dai, T. (2016). Nitrogen nutrition improves the potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) to alleviate the oxidative stress under drought conditions. *Frontiers in Plant Science*, 7, 981. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00981>
- Abogadallah, G. M. (2011). Differential regulation of photorespiratory gene expression by moderate and severe salt and drought stress in relation to oxidative stress. *Plant Science*, 180(3), 540–547. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.12.004>
- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121–126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
- Afzal, S., Chaudhary, N. & Singh, N. K. (2021). Role of soluble sugars in metabolism and sensing under abiotic stress. In: T. Aftab & K. R. Hakeem (Eds.). *Plant growth regulators* (pp. 305–334). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61153-8_14
- Ali, M. A., Yusof, H. M. & Hakiman, M. (2019). A comprehensive review on the determination of enzymatic and nonenzymatic antioxidant activities in plants. *Food Science & Nutrition*, 7(3), 742–756. <https://doi.org/10.1002/fsn3.974>
- Ali, M., Gul, A., Hasan, H., Gul, S., Fareed, A., Nadeem, M., Siddique, R., Jan, S. U. & Jamil, M. (2020). Cellular mechanisms of drought tolerance in wheat. In: M. Öztürk & A. Gul (Eds), *Climate change and food security with emphasis on wheat* .(pp. 155–167) Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819527-7.00009-1>
- Alloway, B. J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5), 537–548. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>
- Aria, M. M., Lakzian, A., Haghnia, G. H., Berenji, A. R., Besharati, H., & Fotovat, A. (2010). Effect of *Thiobacillus*, sulfur, and vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. *Bioresource Technology*, 101(2), 551–554. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.093>
- Ashraf, M. & Foolad, M. R. (2007). *Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance*. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A. & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5, 1554. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7678.1>
- Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Beauchamp, C. & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1), 276–287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Bhattacharyya, P. N. & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Bhat, E. A., Wani, A. H., Mohiddin, F. A., Mir, R. A. & Mohi-Ud-Din, S. (2024). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their role in alleviating salinity stress in plants: A review. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 30(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01333-x>
- Darzi, M. T., Hadi, M. R. & Rejali, F. (2010). Effects of cattle manure and biofertilizer application on yield, essential oil and morphological traits of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 26(1), 86–98. (In Farsi).

- Delesa, A. & Choferie, A. (2016). Response of linseed (*Linum usitatissimum* L.) to fertilizer application and weeds control in South-Eastern Highlands of Ethiopia. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 7(5), 44–54
- Dordas, C. (2010). Nitrogen nutrition and mineral accumulation in cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Agronomy Journal*, 102(1), 230–241. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0151>
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- El-Nagdy, G. A., Nassar, D. M., El-Kady, E. A. & El-Yamanee, G. S. (2010). Response of flax plant (*Linum usitatissimum* L.) to treatments with mineral and bio-fertilizers from nitrogen and phosphorus. *Journal of American Science*, 6(10), 207–217.
- Eskandarinejad, A. A., Zafarzadeh, R., Paydar, M. & Khezri, M. (2015). Quantifying water quality in northeastern of Golestan Province reservoirs in terms of heavy metals (chromium and lead) and fecal coliforms. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 5(5), 314–318.
- FAO. (2022). FAOSTAT statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Goswami, D., Thakker, J. N. & Dhandhukia, P. C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), Article 1127500. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500>
- Golpayegani, A. & Gholami Tilebeni, H. (2011). Effect of plant growth–promoting rhizobacteria (PGPR) on physiological characteristics and mineral nutrient uptake of basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought stress. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(15), 3262–3267.
- Ibrahim, M. H. & Jaafar, H. Z. E. (2011). Photosynthetic capacity, photochemical efficiency and chlorophyll content of three varieties of *Labisia pumila* Benth. exposed to open field and greenhouse growing conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(6), 2179–2185. <https://doi.org/10.1007/s11738-011-0757-1>
- Iranchah, B., Saeedizadeh, A. & Razmjoo, J. (2015). Effect of *Pseudomonas putida* on nutrient uptake, water-use efficiency, and growth of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Journal of Soil and Water Research*, 46(2), 251–260. (In Farsi)
- Irigoyen, J. J., Einerich, D. W. & Sánchez-Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84(1), 55–60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
- Jin, N., Jin, L., Wang, S., Li, J., Liu, F., Liu, Z., Luo, S., Wu, Y., Lyu, J. & Yu, J. (2022). Reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer affects the soil microbial community and yield and quality of lettuce. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 863325. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.863325>
- Khorrandel, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Ghorbani, R. (2010). Effect of biofertilizers on physicochemical properties of soil and quantitative and qualitative yield of *Nigella sativa* L. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(4), 668–676. <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i4.7720>. (In Farsi)
- Klein, J., Zikeli, S., Claupein, W. & Gruber, S. (2016). Linseed (*Linum usitatissimum*) as an oil crop in organic farming: Abiotic impacts on seed ingredients and yield. *Organic Agriculture*, 7, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s13165-016-0146-6>
- Kumar, S., Thakur, P., Kumar, A., Kumar, M. & Kumar, N. (2021). Effect of organic manures and biofertilizers on growth and yield of linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(2), 145–148. <https://doi.org/10.22271/phyto.2021.v10.i2b.13572>
- Li, S., Zhang, Q., Liu, J., Xu, Y. & Wang, G. (2023). Effects of drought stress on mineral uptake, accumulation, and distribution in Chinese fir organs. *Plants*, 12(11), Article 2140. <https://doi.org/10.3390/plants12112140>
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Martínez-Viveros, O., Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Gajardo, G. & Mora, M. L. (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293–319. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100006>
- Nasrollahzadeh, S., Naseri, R. & Emami, H. (2023). Combined application of PGPR and fertilizers improves nutrient uptake, seed yield, oil quality, and biodiesel production of canola under water deficit conditions. *Industrial Crops and Products*, 200, 116850. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116850>
- Najafi, S., Nazari Nasi, H., Tuncturk, R., Tuncturk, M., Sayyed, R. Z. & Amirnia, R. (2021). Biofertilizer application enhances drought stress tolerance and alters the antioxidant enzymes in medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Horticulturae*, 7(12), 588. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120588>

- Parmar, D. K., Sharma, P. K. & Sharma, T. R. (1998). Integrated nutrient supply system for 'DPP 68' vegetable pea (*Pisum sativum* var. *arvense*) in dry temperate zone of Himachal Pradesh. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 68(2), 84–86.
- Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., & Ashraf, M. (2014). Salicylic acid-induced photosynthetic protection and grain yield improvement in wheat and maize under drought stress. *Annals of Applied Biology*, 165(3), 427-438. <https://doi.org/10.1111/aab.12148>. (In Farsi).
- Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term water deficit stress: Traits associated with antioxidant enzymes and osmolyte concentration. *Plant Growth Regulation*, 37(1), 79-87. <https://doi.org/10.1023/A:1020516129213>
- Singh, B., Singh, Y. & Sharma, R. (2016). Integrated nutrient management for improving photosynthetic efficiency and drought tolerance in flaxseed. *Journal of Plant Nutrition*, 41(10), 1247-1259.
- Yang, M., Deng, S., Xu, M., Zhang, Y., Liu, Y. & Chen, S. (2021). Flaxseed and its derivatives: A review of nutritional, functional, and industrial applications. *Journal of Oleo Science*, 70(9), 1221–1235. <https://doi.org/10.5650/jos.ess21033>
- Yordanov, I., Velikova, V. & Tsonev, T. (2000). Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. *Photosynthetica*, 38(2), 171–186. <https://doi.org/10.1023/A:1007201411474>

پایزن فایلس اسٹنڈ