

اثر نسبت‌های جایگزینی و منابع مختلف کود فسفره بر عملکرد و جذب عناصر در کشت مخلوط زنیان (*Trachyspermum ammi* L.) و عدس‌الملک (*Securigera securidaca* L.)

راضیه کرمی^۱ | علیرضا یدوی^۲ | محسن موحدی‌دهنوی^۳ | امین صالحی^۴

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: yadavi@yu.ac.ir
۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: movahhedi1354@yu.ac.ir
۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: aminsalehi@yu.ac.ir

چکیده

در راستای دستیابی به کشاورزی پایدار و کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، بهره‌گیری از روش‌هایی مانند کشت مخلوط و استفاده از کودهای زیستی ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور، پژوهشی جهت ارزیابی اثر نسبت‌های جایگزینی و منابع مختلف کود فسفره بر عملکرد و جذب عناصر غذایی در کشت مخلوط زنیان و عدس‌الملک طی دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در شهرستان ممسنی از توابع استان فارس انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل اول مدیریت تغذیه فسفری شامل کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی (سوپر فسفات تریپل)، ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی + باکتری‌های حل‌کننده فسفات، ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی + مایکوریزا، ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی + باکتری‌های حل‌کننده فسفات + مایکوریزا و شاهد و عامل دوم الگوهای مختلف کشت مخلوط شامل ۱:۱، ۱:۲ و ۲:۱ زنیان-عدس‌الملک و کشت خالص دو گیاه بود. نتایج نشان داد که تیمار تلفیقی قارچ میکوریزا و باکتری‌های حل‌کننده فسفات به‌طور معنی‌داری محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی را در هر دو گیاه افزایش داد. بیشترین نیتروژن در زنیان (۳/۱۲ درصد) و فسفر در عدس‌الملک (۰/۷ درصد) در الگوی کشت ۱ زنیان: ۲ عدس‌الملک تحت تیمار کود تلفیقی مشاهده شد. اگرچه عملکرد دانه در کشت خالص بیشتر بود، اما کشت مخلوط همراه با کودهای زیستی با بهبود جذب عناصر، کاهش مصرف کودهای شیمیایی و ایجاد تعادل اکولوژیک، به‌عنوان راهبردی مؤثر در تولید پایدار گیاهان دارویی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: باکتری حل‌کننده فسفات، فسفر، کشت مخلوط، گیاهان دارویی، میکوریزا

The Effect of Different Replacement Ratios and Phosphorus Fertilizer Sources on Yield and Nutrient Uptake in the Intercropping of Ajowan (*Trachyspermum ammi* L.) and Coronilla (*Securigera securidaca* L.)

Razieh Karami ¹  | Alireza Yadavi ²  | Mohsen Movahedi-Dehnavi ³  | Amin Salehi ⁴ 

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.
2. Corresponding author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: yadavi@yu.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: movahhedi1354@yu.ac.ir
4. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: aminsalehi@yu.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction: Conventional agricultural systems' reliance on chemical inputs has led to environmental degradation, necessitating a shift towards sustainable practices like intercropping and biofertilizers. Intercropping, the simultaneous cultivation of two or more species, enhances resource use efficiency, productivity, and ecological resilience through complementary ecological niches and optimized canopy architecture. Concurrently, biofertilizers, such as phosphate-solubilizing bacteria (PSB) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), improve nutrient availability and plant growth while reducing chemical fertilizer dependency. This synergy is particularly crucial for medicinal plants, where quality and sustainable production are paramount. This study investigates the combined effects of different intercropping patterns and phosphorus sources on the yield and nutrient uptake of two medicinal plants: Ajowan (*Trachyspermum ammi* L.), an aromatic plant from the Apiaceae family, and Coronilla (*Securigera securidaca* L.), a less-known legume from the Fabaceae family with traditional medicinal uses.

2. Materials and Methods: A two-year field experiment (2021-2022 and 2022-2023) was conducted in Mamasani County, Fars Province, Iran. The study employed a factorial arrangement within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The experimental factors were: Phosphorus Fertilizer Management (5 levels): P: 100 kg ha⁻¹ Triple Superphosphate (TSP), B: 50 kg ha⁻¹ TSP + Phosphate-Solubilizing Bacteria (PSB), M: 50 kg ha⁻¹ TSP + Mycorrhizal Fungi (AMF), MB: 50 kg ha⁻¹ TSP + PSB + AMF, P0: Control (No P fertilizer or inoculation) and Intercropping Patterns (5 levels): A₁S₁: 1 row Ajowan + 1 row Coronilla, A₁S₂: 1 row Ajowan + 2 rows Coronilla, A₂S₁: 2 rows Ajowan + 1 row Coronilla, A₀: Sole cropping of Ajowan and S₀: Sole cropping of Coronilla. Seeds were inoculated with respective biofertilizers before planting. At flowering stage, aerial plant parts were sampled to measure the concentration of Nitrogen (N), Phosphorus (P), Potassium (K), and Zinc (Zn). Seed yield was measured at final harvest. Data analysis was performed using combined analysis over two years with SAS software, and means were compared using LSD test at the 5% significance level.

3. Results and Discussion: The combined application of biofertilizers (MB treatment) consistently and significantly enhanced the nutrient content in both plant species. The highest N content in Ajowan (3.12%) and Coronilla (4.84%) was recorded in the A₁S₂ intercropping pattern under the MB treatment. Intercropping, particularly A₁S₂, improved N uptake in Ajowan compared to its sole crop, likely due to biological N fixation by Coronilla and facilitated transfer. The lowest N content was observed in the control treatment (P0) and the A₂S₁ pattern for Coronilla, where shading by Ajowan likely impaired nodulation and N fixation. The MB treatment resulted in the highest P content in both plants. The synergistic effect between PSB and AMF was evident, where PSB solubilizes P and AMF hyphae enhance its uptake and transport. The A₁S₁ and A₁S₂ patterns were most effective for P uptake in Ajowan and Coronilla, respectively. Similar to N and P, the MB treatment significantly increased K and Zn concentrations. The A₁S₂ intercropping pattern also showed superior performance for Zn uptake in both species, attributed to the secretion of different organic compounds in the intercropped rhizosphere that enhance Zn availability. The A₂S₁ pattern consistently resulted in the lowest nutrient content for Coronilla due to intense competition for light. In contrast to nutrient uptake, sole cropping (A₀ and S₀) resulted in the highest seed yield for both Ajowan and Coronilla. The highest yields were obtained with the full chemical P (P) and the combined biofertilizer (MB) treatments, which were statistically on par. The lowest yields were recorded in the control (P0) treatment. The reduction in yield under intercropping, especially in the A₁S₂ and A₂S₁ patterns, is attributed to interspecific competition, particularly for light. The taller and more vigorous growth of Ajowan likely shaded the Coronilla plants, reducing their photosynthetic capacity and subsequent yield. The replacement of plant density in intercropping also naturally leads to a lower density of each species per unit area compared to their sole crops.

4. Conclusion: This research demonstrates a critical distinction between nutritional quality and quantitative yield. While sole cropping maximizes seed yield, the integration of intercropping (specifically the A₁S₂ pattern) with combined biofertilizers (MB) optimizes nutritional value by significantly enhancing the concentration of essential nutrients (N, P, K, Zn) in the aerial parts of both medicinal plants. The synergistic relationship between PSB and AMF was a key driver in improving nutrient solubilization and uptake, allowing for a 50% reduction in chemical P fertilizer application without compromising nutritional quality. Therefore, for the sustainable production of medicinal plants where the concentration of active compounds (often linked to nutrient status) is a primary goal, the A₁S₂ intercropping pattern combined with the integrated MB fertilizer treatment (50 kg ha⁻¹ TSP + PSB + AMF) is highly recommended. This strategy successfully aligns with the principles of sustainable agriculture by enhancing nutrient use efficiency, reducing chemical inputs, and fostering ecological balance. For farmers prioritizing maximum seed yield, sole cropping with integrated or full P fertilization remains the best option, though this comes with a higher environmental cost.

Keywords: Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Intercropping, Medicinal Plants, Nutrient Uptake, Phosphate-Solubilizing Bacteria, Sustainable Agriculture.

۱. مقدمه

در سامانه‌های کشاورزی متداول، کشاورزان به‌طور معمول از ورودی‌های شیمیایی مانند کودها و سموم دفع آفات برای افزایش تولید در واحد سطح استفاده می‌کنند، اما در عین حال، این مواد در بلند مدت اثرات منفی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند، تنوع و غنای جامعه میکروبی خاک را کاهش داده و باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند (Li *et al.*, 2023). امروزه، کودهای دوست‌دار محیط‌زیست، مانند کودهای زیستی و آلی، به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای افزایش کمیت و کیفیت محصول و کاهش استفاده از کودهای شیمیایی مطرح هستند (Faridvand *et al.*, 2022). کودهای زیستی حاوی قارچ‌ها و باکتری‌های مفید حل‌کننده مواد مغذی هستند که مواد مغذی را از ترکیبات معدنی و آلی پیچیده آزاد کرده و با اسیدی کردن خاک و/یا ترشح آنزیم‌ها آن‌ها را برای گیاهان در دسترس قرار می‌دهند (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021). استفاده از کودهای زیستی، مانند باکتری‌های ریزوباکتریایی افزایش دهنده رشد گیاه (PSB)^۱ و قارچ میکوریزا (AMF)^۲ باعث کاهش مصرف کودهای شیمیایی و افزایش تولید پایدار می‌شود.

کشت مخلوط شامل کشت همزمان دو یا چند محصول در یک مکان و یا در یک زمان می‌باشد به نحوی که بر یکدیگر برهمکنش داشته باشند (Martin-Guay *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022) هدف از کشت مخلوط در سیستم‌های زراعی بهینه‌سازی استفاده از فضا، زمان و منابع فیزیکی، مهار خسارت آفات و بیماری‌ها (Banik *et al.*, 2006) از طریق تسهیل و تکمیل آشیان اکولوژیک در ریزوسفر محصولات همراه و معماری بهینه کانوپی (Weisany *et al.*, 2021)، افزایش عملکرد و تاب‌آوری بوم نظام‌های کشاورزی در برابر تنش‌ها و نوسانات محیطی می‌باشد (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2020). نظر به اهمیت تولید گیاهان دارویی در سلامت جامعه و تولید آن بر مبنای اصول کشاورزی پایدار، امروزه مطالعات مختلفی در خصوص تولید آنها در شرایط مخلوط انجام گرفته است (Roohi *et al.*, 2020; Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021). زنیان یکی از گیاهان دارویی معطر متعلق به خانواده *Apiaceae* است که به واسطه داشتن اسانس فراوان در دانه در صنایع داروسازی، بهداشتی و یا به صورت ادویه‌ای کاربرد دارد (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021). کاربرد گیاه لگوم در کشت مخلوط می‌تواند ضمن افزایش کارایی تثبیت زیستی، رویکردی پایدار برای برطرف کردن نیازهای نیتروژن گیاه زراعی باشد (Du *et al.*, 2019). عدس‌الملک یا عدس تلخ، متعلق به خانواده بقولات (*Fabaceae*)، گیاه دارویی کمتر شناخته شده است که در غرب آسیا، اروپا و آفریقا و در ایران به‌خصوص در استان‌های آذربایجان شرقی، خوزستان و فارس پراکنش دارد. از بذره‌های عدس‌الملک در طب سنتی ایران و مصر برای درمان بیماری‌های مختلف از جمله دیابت، فشار خون، چربی خون، عفونت‌های انگلی و بیماری صرع استفاده شده است (Ghorbani, 2013). نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد که غلظت مواد مغذی در کشت مخلوط همراه با تقیح قارچ میکوریزا آربوسکولار و کود زیستی باکتریایی بالاتر از کشت خالص بدون کاربرد کود زیستی بود (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار عناصر غیرمتحرک را حل کرده و با بهبود جذب ریشه، آزادسازی اسیدهای آلی، و اسیدی کردن محیط ریزوسفر و خواص بیوشیمیایی خاک، آن‌ها را برای گیاه میزبان قابل استفاده می‌کنند (Wahbi *et al.*, 2016). کودهای زیستی علاوه بر در دسترس قرار دادن نیتروژن و فسفر مورد نیاز گیاه، از طریق افزایش رشد رویشی گیاه و به دنبال آن توسعه ریشه باعث بهبود جذب و افزایش فراهمی پتاسیم و سایر عناصر ریز مغذی می‌شود (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021). نتایج گزارشی داد که الگوهای کشت مخلوط لوبیا سبز و مرزنجوش غلظت‌های N، P و K بالاتری نسبت به کشت خالص هر یک از این گونه‌ها داشتند (Mohammadzadeh *et al.*, 2022). در تحقیقی گزارش شد که الگوی کشت بر عملکرد دانه و عملکرد زیستی شویدر در کشت مخلوط با لوبیا تأثیر معنی‌داری دارد. در این تحقیق بیشترین عملکرد دانه و عملکرد

¹ - Phosphorus solubilizing bacteria

² - Arbuscular mycorrhizal fungi

زیستی از کشت خالص به دست آمد (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2014). با توجه به سابقه کشت و کار گیاهان دارویی مانند عدس الملک و زنیان در شهرستان ممسنی، اهمیت دارویی و نقش آن‌ها در سلامت انسان همچنین کاهش خطرات استفاده از کودهای شیمیایی، به منظور بررسی اثر تیمارهای کود زیستی فسفره (مانند باکتری‌های انحلال فسفر و قارچ مایکوریزا) و نسبت‌های مختلف جایگزینی بر عملکرد، جذب عناصر و محتوای عناصر دو گیاه دارویی زنیان و عدس الملک، این پژوهش در منطقه فهلیان شهرستان ممسنی از توابع استان فارس اجرا گردید.

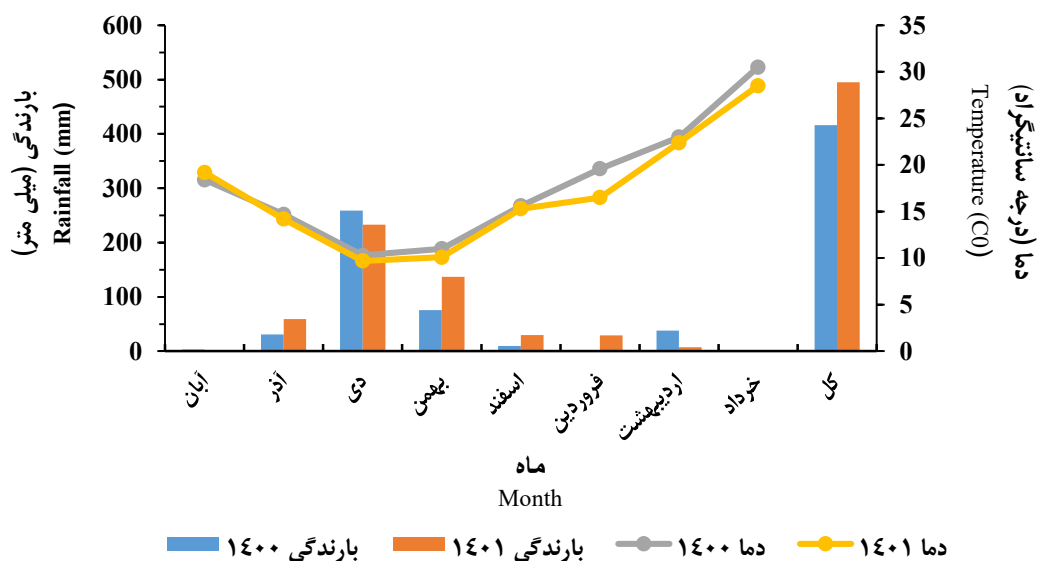
۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به صورت آزمایش مزرعه‌ای در طول دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در منطقه فهلیان شهرستان ممسنی از توابع استان فارس (عرض جغرافیایی ۳۰°۱۱' شمالی، طول جغرافیایی ۵۱°۳۱' شرقی و ارتفاع ۹۲۰ متر از سطح دریا) اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل پنج سطح مدیریت تغذیه فسفری شامل: مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل (P)، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل همراه با باکتری‌های حل‌کننده فسفات (B)، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل همراه با قارچ مایکوریزا (M)، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل همراه با باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ مایکوریزا (MB) و شاهد (بدون مصرف کود فسفری و تلقیح میکروبی) (P₀) و پنج الگوی کشت مخلوط شامل: یک ردیف زنیان + یک ردیف عدس الملک (A₁S₁)، یک ردیف زنیان + دو ردیف عدس الملک (A₁S₂)، دو ردیف زنیان + یک ردیف عدس الملک (A₂S₁)، کشت خالص زنیان (A₀) و عدس الملک (S₀) بود. پیش از اجرای آزمایش، نمونه مرکب از خاک (عمق ۳۰-۰ سانتیمتری) انجام و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک تعیین گردید (جدول ۱). همچنین خصوصیات اقلیمی منطقه مورد آزمایش در دو سال متوالی در شکل شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physicochemical properties of the soil at the experimental site

EC (ms)	PH	Zn (ppm)	N (%)	K (mg.kg ⁻¹)	P (mg.kg ⁻¹)	Organic Carbon (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture soil	Year
1.0	7.86	0.28	0.07	240	11.23	0.9	20	58	22	Silty loam	2021
1.0	7.22	0.21	0.08	230	11.88	1.02	18	62	20	Silty loam	2022



شکل ۱- اطلاعات دوساله متوسط درجه حرارت و میزان بارندگی منطقه آزمایش

بذرهای زنیان از شرکت پاکان بذر اصفهان، عدس الملک از توده بومی شهرستان خفر استان فارس، قارچ میکوریزا از شرکت ارگانیک همدان و سوسپانسیون باکتریایی در آزمایشگاه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج (با تعداد 10^9 باکتری زنده و فعال در هر گرم کود زیستی) تهیه شد. در تیمار باکتریایی بذور زنیان و عدس الملک یک ساعت قبل از کشت بر اساس دستورالعمل تلقیح شدند. همچنین برای اطمینان از فرآیند تثبیت نیتروژن توسط گیاه عدس الملک بذور قبل از کاشت، با باکتری *Rhizobium leguminosarum* (تهیه شده از مؤسسه خاک و آب کشور) تلقیح شدند. قارچ میکوریزای مورد استفاده *Funneliformis mosseae* و باکتری حل کننده فسفات ترکیب دو باکتری *Pseudomonas fluorescens* و *P. putida* بود. برای تلقیح زنیان و عدس الملک با قارچ میکوریزا، قبل از کاشت از خاکی که حاوی هیفهای قارچ میکوریزا، بقایای ریشه و اسپور (حدود ۱۰۰۰ اسپور در هر ۱۰ گرم خاک) بود در داخل خطوط کاشت و زیر بذور به میزان ۳۰ گرم برای هر ردیف کاشت قرار داده شد. هر کرت آزمایشی با ابعاد 4×2 متر و شامل ۵ خط کاشت با فاصله ۴۰ سانتی متر بین ردیفها در نظر گرفته شد. فاصله ی بوتهها روی ردیف برای زنیان ۷ و برای عدس الملک ۲۵ سانتی متر و عمق کاشت به ترتیب ۲ و ۴ سانتی متر تنظیم گردید. به منظور جلوگیری از اثرات حاشیه‌ای، فاصله ی بین کرتها ۵۰ سانتی متر و بین بلوکها ۲ متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت به صورت دستی و در تاریخ یکم آذرماه انجام گرفت. عملیات تنک و وجین علفهای هرز به صورت دستی و آبیاری به صورت جوی و پشته‌ای انجام پذیرفت. میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در مرحله ۴-۵ برگ برای هر دو گیاه و میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار صرفاً برای گیاه زنیان در مرحله ابتدای ساقه‌روی استفاده شد. برداشت نهایی در اواسط خردادماه با حذف اثرات حاشیه‌ای و به منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه صورت گرفت. جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر در اندام هوایی، در زمان گل‌دهی بوته‌ها، ۱۰ بوته برای زنیان و ۲ بوته برای عدس الملک در هر کرت به طور تصادفی انتخاب و از سطح زمین کف بر شدند. محتوای عناصر غذایی در اندام هوایی شامل نیتروژن به روش Novozamsky *et al.*, (1974) با دستگاه اسپکتروفتومتر، فسفر به روش Emami, (1996) با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل XD 7500 ساخت کمپانی آکوالیتیک آلمان)، پتاسیم با روش Peterson *et al.*, (2002) با دستگاه فلیمفتومتر (مدل Fp20 ساخت کمپانی سیک ایتالیا) و روی به روش Emami, (1996) با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، آزمون نرمال بودن داده‌ها و یکنواختی تجربه

واریانس‌ها در دو سال آزمایش انجام شد. با توجه به نتایج آزمون بارتلت، تجزیه و تحلیل نتایج به روش تجزیه مرکب با استفاده از نرم افزار SAS و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث:

۳-۱. محتوای نیتروژن زنیان

اثرات سال در سطح احتمال خطای پنج درصد، کشت مخلوط، منبع کود فسفره، برهمکنش سال در کشت مخلوط، برهمکنش سال در منبع کود فسفره و برهمکنش سال در کشت مخلوط و منبع کود فسفره بر محتوای نیتروژن اندام هوایی زنیان در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین حاصل از برهمکنش سال در کشت مخلوط و کود فسفره نشان داد که در سال اول بیشترین محتوای نیتروژن اندام هوایی (۲/۸۸ درصد) از الگوی کشت مخلوط A_1S_2 و در سطح کودی MB به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سامانه مذکور در M و الگوی A_1S_1 در سطح کودی MB نداشت. کمترین محتوا (۱/۴۳ درصد) نیز مربوط به کشت خالص زنیان (A_0) در سطح کودی P_0 بود (جدول ۴). این نتایج نشان از افزایش ۵۰ درصدی محتوای نیتروژن اندام هوایی در تیمار کودی تلفیقی (MB) نسبت به تیمار کودی شاهد می‌باشد. مشابه با این شرایط در سال دوم نیز، بیشترین محتوای نیتروژن اندام هوایی زنیان (۳/۱۲ درصد) از کشت مخلوط A_1S_2 و در سطح کودی MB به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با الگوی A_1S_1 در همین سطح کودی نداشت. کمترین محتوا نیز از کشت مخلوط A_1S_2 و در تیمار کودی P_0 به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سایر الگوهای کشت (A_2S_1 ، A_1S_1 ، A_0) در این سطح کودی نداشت (جدول ۴). بررسی دقیق‌تر نتایج نشان داد که بیشترین محتوای نیتروژن اندام هوایی در زنیان از تیمارهای کشت مخلوط و کمترین محتوای آن از کشت خالص زنیان به دست آمد. نقش میکوریزا در افزایش نیتروژن گیاهان با تحریک بیان آنزیم نیترات رداکتاز (افزایش جذب نیتروژن به فرم نیترات یا آمونیوم توسط میسلیوم‌های خارجی قارچ با مصرف نیترات توسط آنزیم نیترات رداکتاز) و افزایش سطوح آنزیم دیکینازگلوکان (جهت جلوگیری از رشد پاتوژن‌های گیاهی) به‌خوبی مشخص شده است (Varma *et al.*, 2018). تفاوت‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی بین اجزای کشت مخلوط، توانایی آن‌ها در استفاده از منابع محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این عقیده وجود دارد که علت افزایش عملکرد در کشت مخلوط بقولات با غیر بقولات، متفاوت بودن تغذیه آن‌ها از نیتروژن است. بدین ترتیب که بقولات بخش بیشتری از نیتروژن خود را از جو و غیر بقولات از نیتروژن موجود در خاک تغذیه می‌کنند و در نتیجه رقابت دو گونه از لحاظ نیتروژن کاهش می‌یابد (Du *et al.*, 2019). بالاتر بودن جذب نیتروژن در کشت مخلوط را می‌توان احتمالاً چنین توجیه کرد که زنیان از نیتروژن معدنی خاک استفاده کرده همچنین قرار گرفتن گیاهان خانواده لگوم (عدس‌الملک) که به‌طور زیستی تثبیت‌کننده نیتروژن هستند، در کنار زنیان، می‌توانند، نیتروژن بیشتری برای زنیان در دسترس قرار دهند. محققان نیز در بررسی تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری انحلال فسفر بر محتوای نیتروژن در کشت مخلوط ذرت و ماش، از افزایش محتوای نیتروژن اندام هوایی ذرت در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص آن گزارش دادند (Mousavi *et al.*, 2022) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

۳-۲. محتوای نیتروژن عدس‌الملک

اثرات سال، کشت مخلوط، منبع کود فسفره و برهمکنش سال در منبع کود فسفره بر محتوای نیتروژن اندام هوایی عدس‌الملک در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که در سال اول بیشترین میزان نیتروژن اندام هوایی عدس‌الملک با میانگین ۴/۸۴ درصد از تیمار ترکیبی MB به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با B نداشت. کمترین محتوا نیز مربوط به تیمار کودی P_0 با میانگین ۳/۰۵ درصد بود. در سال دوم بیشترین محتوای نیتروژن اندام هوایی عدس‌الملک مربوط به تیمار کودی M بود که تفاوت معنی‌داری با تیمار MB نداشت و کمترین

مقدار (۳/۳۱ درصد) مربوط به تیمار کودی P_0 بود (جدول ۳). باتوجه به معنی‌داری اثر سطوح سامانه‌های کشت بر محتوای نیتروژن اندام هوایی عدس‌الملک، نتایج نشان داد که بیشترین محتوا (۴/۵۹ درصد) از کشت S_0 و کمترین آن (۳/۸۳ درصد) از سامانه A_2S_1 به دست آمد (جدول ۵). پژوهشگران بیان کردند با توجه به اینکه تشکیل گره ریزوبیوم نیاز شدیدی به فسفر دارد، فایده مهم آرباسکولار میکوریزا برای همزیستی ریزوبیوم فراهم کردن فسفر است. علاوه بر فسفر عناصری مانند کلسیم، مولیبدن مس و روی که به وسیله آرباسکولار میکوریزا جذب می‌گردند، در تشکیل و فعالیت گره مؤثر می‌باشند از این رو تلقیح با آرباسکولار موجب افزایش تعداد گره در لوبیا خواهد شد (Friesen et al., 2011). Shome et al. (2023) نیز در پژوهش خود نشان دادند که تأمین فسفر قابل جذب در خاک به وسیله باکتری‌های انحلال فسفر باعث افزایش تعداد گره ریشه در سویا شد.

غیر قابل استناد

جدول ۲. میانگین مربعات تجزیه واریانس تیمارهای کشت مخلوط و کود فسفره برای محتوای عناصر ماکرو، میکرو زنیان و عدس الملک

Table 2. Analysis of variance mean squares for the effects of intercropping and phosphorus fertilizer for macro and micronutrient content in Ajowan and Coronilla

S.O.V	df	N of Ajowan	N of Coronilla	P of Ajowan	P of Coronilla	K of Ajowan	K of Coronilla	Zn of Ajowan	Zn of Coronilla
Year (A)	1	0.55 *	0.04 **	0.092 *	0.01 *	30398726.12 **	2882407.93 **	15.40 ns	1548.00 *
Replication (Year)	4	0.02	0.09	0.01	0.01	251216.36	166482.38	111.84	155.63
Cropping System (B)	3	1.40 **	3.15 **	0.003 **	0.17 **	2393228.56 **	5342866.02 **	624.25 **	2477.27 **
Phosphorus Fertilizer (C)	4	2.09 **	8.43 **	0.18 **	0.11 **	4434926.26 **	7209278.27 **	5923.22 **	3480.97 **
B × C	12	0.02 ns	0.07 ns	0.01 *	0.006 **	95056.18 ns	167844.20 **	21.12 ns	149.25 **
A × B	3	0.02 **	0.02 ns	0.002 ns	0.008 *	91224.44 ns	998220.47 ns	49.36 ns	79.87 ns
A × C	4	0.05 **	1.00 **	0.03 **	0.007 *	797289.40 **	1273206.57 **	139.01 **	144.57 *
A × B × C	12	0.04 **	0.08 ns	0.03 ns	0.005 *	94866.10 ns	109602.55 ns	18.80 ns	21.85 ns
Error	76	0.02	0.10	0.007	0.002	157588.72	86686.66	35.17	48.63
C.V		6.19	7.65	15.76	9.31	8.53	5.54	9.56	12.08

ns, *, **: به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

**ns, *, : Non-significant, significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively.

جدول ۳. مقایسه میانگین برهمکنش سال در کود فسفره برای محتوای عناصر اندام هوایی زنیان و عدس الملک

Table 3. Comparison of means for the year × phosphorus fertilizer interaction on shoot nutrient content in Ajowan and Coronilla

Phosphorus Fertilizer	N of Ajowan (%)		P of Ajowan (%)		K of Ajowan (mg.kg ⁻¹)		Zn of Coronilla (mg.kg ⁻¹)		Zn of Ajowan (mg.kg ⁻¹)		K of Coronilla (mg.kg ⁻¹)	
	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2
	P ₀	3.05 d	3.31 c	0.50 c	0.47 d	3779.7 b	4562.6 c	4352.7 d	4632.5 d	44.16 e	39.33 c	42.25 d
B	4.65 ab	4.29 b	0.53 b	0.52 c	4351.6 a	4906.5 c	5749.0 b	5144.4 bc	70.58 b	73.41 ab	57.50 b	69.41 b
M	4.16 c	4.66 a	0.56 b	0.63 b	4048.0 b	5323.4 b	4989.2 c	5069.1 c	66.50 c	68.41 b	51.75 c	61.50 c
MB	4.84 a	4.44 ab	0.61 a	0.72 a	4602.3 a	6059.7 a	6091.6 a	5556.7 a	76.50 a	78.58 a	70.25 a	77.75 a
P	4.55 b	4.33 b	0.55 b	0.71 a	3958.7 b	4562.6 c	6147.6 a	5377.7 ab	50.58 d	74.16 b	41.25 c	56.50 c

در هر ستون و هر تیمار میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی داری با استفاده از رویه LSD ندارند

In each column and for each treatment, means sharing at least one common letter are not significantly different based on LSD procedure.

جدول ۴. مقایسه میانگین برهمکنش سال، کشت مخلوط و کود فسفره برای محتوای عناصر زنیان و عدس الملک

Table 4. Mean comparison of the year × intercropping × phosphorus fertilizer interaction for nutrient content in Ajowan and Coronilla

Phosphorus Fertilizer	Cropping Systems	N of Ajowan (%)		P of Coronilla (%)		P of Ajowan (%)	K of Coronilla (mg.kg ⁻¹)	Zn of Coronilla (mg.kg ⁻¹)
		Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2			
P ₀	A ₀	1.43 i	1.99 ij	-	-	0.39 f	-	-
	S ₀	-	-	0.49 fghi	0.46 fg	-	4778.0 de	43.0 fg
	A ₁ S ₁	1.94 g	2.19 ghi	0.40 ij	0.41 g	0.46 cdef	4564.0 e	44.0 f
	A ₁ S ₂	2.12 fg	2.09 hij	0.47 ghij	0.43 g	0.46 cdef	4572.6 e	45.0 f
	A ₂ S ₁	1.68 h	1.85 j	0.40 ij	0.35 h	0.42 ef	4055.9 f	35.00 g
B	A ₀	2.28 def	2.27 fgh	-	-	0.45 def	-	-
	S ₀	-	-	0.63 abc	0.64 abc	-	5940.5 b	70.5 b
	A ₁ S ₁	2.58 bc	2.45 defg	0.54 defg	0.59 cd	0.44 def	5233.9 c	63.0 bc
	A ₁ S ₂	2.59 bc	2.71 bcd	0.61 abcd	0.62 bc	0.52 abcde	5787.4 b	70.8 a
	A ₂ S ₁	2.14 fg	2.30 fgh	0.44 hij	0.44 fg	0.47 cdef	4825.0 de	49.5 ef
M	A ₀	2.21 f	2.50 def	-	-	0.53 abcde	-	-
	S ₀	-	-	0.59 bcde	0.63 bc	-	5296.8 c	61.0 c
	A ₁ S ₁	2.65 bc	2.79 bc	0.49 fghi	0.59 cd	0.51 bcdef	5053.5 cd	56.5 cde
	A ₁ S ₂	2.88 a	2.64 cde	0.52 efgh	0.62 cd	0.57 abcd	5229.3 c	63.5 bc
	A ₂ S ₁	2.43 cde	2.39 efg	0.44 hij	0.50 ef	0.47 cdef	4537.1 e	45.5 f
MB	A ₀	2.24 ef	2.42 efg	-	-	0.46 cdef	-	-
	S ₀	-	-	0.66 abc	0.71 a	-	5995.0 ab	82.50 a
	A ₁ S ₁	2.74 ab	2.95 ab	0.57 cdef	0.69 ab	0.53 abcde	5892.7 b	80.50 a
	A ₁ S ₂	2.88 a	3.12 a	0.70 a	0.64 abc	0.58 abc	6118.3 ab	84.00 a
	A ₂ S ₁	2.49 cd	2.64 cde	0.46 ghij	0.40 gh	0.50 bcdef	5290.6 c	49.00 ef
P	A ₀	2.14 fg	2.29 fgh	-	-	0.61 ab	-	-
	S ₀	-	-	0.67 ab	0.64 abc	-	6310.0 a	57.00 cde
	A ₁ S ₁	2.45 cde	2.81 bc	0.53 defgh	0.59 cd	0.65 a	5851.9 b	51.00 def
	A ₁ S ₂	2.61 bc	2.62 cde	0.63 abc	0.59 cd	0.53 abcde	6019.0 ab	59.00 cd
	A ₂ S ₁	2.32 def	2.49 def	0.39 j	0.55 de	0.50 bcdef	4869.2 de	43.50 f

در هر ستون و هر تیمار میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری با استفاده از رویه LSD ندارند.

In each column and for each treatment, means sharing at least one common letter are not significantly different based on LSD procedure

P₀ = شاهد، B = کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + باکتری، M = کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + مایکوریزا، MB = کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + مایکوریزا، A₀ = زنیان خالص، S₀ = عدس الملک خالص، A₁S₁ = یک ردیف زنیان یک ردیف عدس الملک، A₁S₂ = یک ردیف زنیان دو ردیف عدس الملک، A₂S₁ = دو ردیف عدس الملک یک ردیف زنیان

P₀ = Control, B = Application of 50 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer + bacteria, M = Application of 50 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer + mycorrhiza, MB = Application of 50 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer + bacteria + mycorrhiza, P = Application of 100 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer, A₀ = Pure ajowan, S₀ = Pure Coronilla, A₁S₁ = One row of ajowan + one row of Coronilla, A₁S₂ = One row of ajowan + two rows of Coronilla, A₂S₁ = Two rows of ajowan + one row of Coronilla

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر سامانه‌های کشت برای محتوای عناصر اندام هوایی زنبان و عدس‌الملک

Table 5. Mean comparison of cropping systems for shoot nutrient content in Ajowan and Coronilla

Cropping Systems	N of Coronilla (%)	K of Ajowan (mg.kg ⁻¹)	Zn of Ajowan (mg.kg ⁻¹)
A ₀	-	4850.8 a	57.44 c
S ₀	4.59 a	-	-
A ₁ S ₁	4.13 c	4654.0 a	63.86 b
A ₁ S ₂	4.35 b	4849.0 a	67.53 a
A ₂ S ₁	3.83 d	4250.8 b	59.26 c

در هر ستون و هر تیمار میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری با استفاده از رویه LSD ندارند.

In each column and for each treatment, means sharing at least one common letter are not significantly different based on LSD procedure

A₀ = زنبان خالص، S₀ = عدس‌الملک خالص، A₁S₁ = یک ردیف زنبان یک ردیف عدس‌الملک، A₁S₂ = یک ردیف زنبان دو ردیف عدس-

الملک، A₂S₁ = دو ردیف عدس‌الملک یک ردیف زنبان

A₀ = Pure ajowan, S₀ = Pure Coronilla, A₁S₁ = One row of ajowan + one row of Coronilla, A₁S₂ = One row of ajowan + two rows of Coronilla, A₂S₁ = Two rows of ajowan + one row of Coronilla

در همین راستا Janati *et al.* (2021) در پژوهش خود گزارش دادند که باکتری انحلال فسفر با افزایش تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی باعث افزایش رشد ریشه و در نتیجه تعداد محل‌های تلقیح در لوبیا شدند که به موجب آن وضعیت نیتروژن لوبیا بهبود پیدا کرد. بیان شده است که تخصیص کربن به گره‌ها به شدت به دسترسی نور و کربن وابسته است (Friesen *et al.*, 2011). آن‌ها با بررسی تنظیم فرآیند تثبیت نیتروژن در لگوم‌ها گزارش دادند که گره‌زایی و نگهداری گره‌ها فرآیند پرهزینه است و نیاز به کربن بالایی دارید. عدم دریافت نور کافی، فتوسنتز را کاهش داده و قند کمتری به سمت ریشه فرستاده می‌شود، لذا گیاه از طریق خود تنظیمی، سرمایه‌گذاری در گره‌زایی را کاهش می‌دهد. این شرایط در کشت مخلوط A₂S₁ می‌باشد. نتایج گواه آن است که با افزایش تعداد ردیف‌های کشت زنبان (A₂S₁) به علت سایه‌اندازی زنبان بر بوته عدس‌الملک به دلیل ارتفاع بیشتر زنبان از عدس‌الملک (داده‌ها نشان داده نشده است) از پتانسیل گیاه در تخصیص مواد غذایی جهت گره‌زایی بیشتر کاسته شده و این نقش مهمی در کاهش محتوای نیتروژن عدس‌الملک در این سامانه‌های کشت خواهد داشت. Cadoux *et al.* (2015) با بررسی کشت مخلوط کلزا با لگوم‌های زمستانه نشان داد که با افزایش تعداد ردیف‌های کلزا، محتوای نیتروژن در گیاهان لگوم کاهش پیدا کرد. آن‌ها این کاهش را به دلیل افزایش فشار رقابتی کلزا دانستند.

۳-۳. محتوای فسفر زنبان

اثر سال و برهمکنش کشت مخلوط و منبع کود فسفره در سطح احتمال پنج درصد و اثر کشت مخلوط، منبع کود فسفره و برهمکنش سال در منبع کود فسفره در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای فسفر اندام هوایی زنبان معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره بر این صفت نشان داد، که بیشترین محتوای فسفر به ترتیب در سال اول (۰/۶۱ درصد) و دوم (۰/۷۱ درصد) از تیمار تلفیقی MB به دست آمد که در سال دوم تفاوت معنی‌داری با تیمار کودی P₀ نداشت و کمترین محتوای فسفر در هر دو سال (۰/۵۰ درصد در سال اول) و (۰/۴۷ درصد در سال دوم) از تیمار کودی P₀ به دست آمد. (جدول ۳). با توجه معنی‌دار شدن برهمکنش کشت مخلوط و کود فسفره، نتایج نشان داد که بیشترین محتوای فسفر اندام هوایی زنبان (۰/۶۵ درصد) از کشت مخلوط A₁S₁ و در تیمار کودی P به دست آمد با سامانه A₀، A₁S₂ از همین تیمار کودی و سامانه‌های A₁S₁ و A₁S₂ از تیمار کودی MB در یک گروه آماری قرار گرفت. کمترین محتوای فسفر (۰/۳۹ درصد) از A₀ و در تیمار کودی P₀ به دست آمد. بررسی جزئی‌تر نتایج نشان داد که در سطوح کودی مورد آزمایش بیشترین محتوای فسفر اندام هوایی مربوط به کشت مخلوط و کمترین محتوا نیز در بیشتر تیمارهای کودی مربوط به A₀ بود (جدول

۴). روند افزایشی محتوای فسفر اندام هوایی زنیان در تیمار تلقیقی MB نسبت به کاربرد هر کدام از آنها به صورت مجزا و هم‌ترازی میانگین این تیمار با P، گواه اثر هم‌افزایی بین قارچ و باکتری در فراهم سازی فسفر قابل جذب برای گیاه زنیان می‌باشد (Etesami *et al.*, 2021). PSB ممکن است برای هیف‌ها فسفر معدنی (Pi) فراهم کند و به کربن آزاد شده از سوی AMF وابسته باشد. نتایج پژوهش‌گران نشان می‌دهند که سطوح هیف‌های AMF توسط PSB کلونیزه می‌شود و ترشحات هیف‌ها به عنوان منبع کربن استفاده می‌شوند به عبارت دیگر، AMF می‌تواند PSB را جذب کرده و به آنها کمک کنند تا با آزادسازی ترشحات هیفی و فراهم کردن منبع کربن، استفاده از فسفر آلی را بهبود بخشند (Zamani *et al.*, 2019). سپس PSB می‌تواند سطوح هیف‌های AMF را کلونیزه کند، این امر فعالیت فسفاتازهایی که توسط PSB ترشح می‌شود را افزایش داده و معدنی‌سازی فسفر آلی را تحریک می‌کند. همچنین در بررسی برهمکنش کشت مخلوط مخلوط و کود فسفره و برتری کشت مخلوط A_1S_2 نسبت به سایر سامانه‌های کشت مخلوط را می‌توان چنین تفسیر کرد که حضور دو ردیف عدس‌الملک (با جمعیت بالای باکتری‌های ریزوبیوم) در تیمارهای حاوی باکتری و ساخت اسیدهای معدنی (اسید کربنیک و اسید سولفوریک)، اسیدهای آلی (اکزالیک، سیتریک و لاکتیک) و تولید آنزیم‌های فسفاتاز و در نتیجه انحلال فسفات‌های آلی و معدنی از مهم‌ترین دلایل افزایش غلظت فسفر قابل جذب در محیط ریشه خواهد بود. هم‌زیستی میکوریزایی نیز از طریق جذب مناسب فسفر و انتقال آن به گیاه زنیان موجب بهبود غلظت فسفر در گیاه می‌شود (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021).

۴-۳. محتوای فسفر عدس‌الملک

تجزیه واریانس نشان داد که اثر سال، برهمکنش سال در کشت مخلوط، برهمکنش سال در منبع کود فسفره و برهمکنش سال در کشت مخلوط در منبع کود فسفره در سطح احتمال پنج درصد و اثر کشت مخلوط، منبع کود فسفره و برهمکنش کشت مخلوط در منبع کود فسفره، در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه سال، کشت مخلوط و کود فسفره نشان داد در سال اول بیشترین محتوای فسفر اندام هوایی عدس‌الملک (۰/۷۰ درصد) از کشت مخلوط یک A_1S_2 در تیمار کودی MB به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با S_0 در همین تیمار کودی، S_0 و کشت مخلوط A_1S_2 در تیمار کودی P و کشت S_0 و کشت مخلوط A_1S_2 در تیمار کودی B نداشت. کمترین محتوای فسفر اندام هوایی عدس‌الملک نیز در سال اول نیز (۰/۳۹ درصد) مربوط به کشت مخلوط A_2S_1 و در تیمار کودی P_0 بود که تفاوت معنی‌داری با محتوای فسفر در همین کشت مخلوط و در تیمار کودی P نداشت. تیمار کودی تلقیقی MB نسبت به شاهد ۷۹/۴ درصد افزایش نشان داد. مقایسه میانگین سال دوم نیز نشان داد که بیشترین محتوای فسفر (۰/۷۱ درصد) از S_0 که تفاوت معنی‌داری با الگوهای A_1S_2 ، A_1S_1 از همین تیمار کودی و کشت S_0 در تیمار کودی P و S_0 از تیمار کودی B نداشت و کمترین محتوای فسفر (۰/۳۵ درصد) از الگوی A_2S_1 و در تیمار کودی P_0 بود (جدول ۴). بررسی وضعیت محتوای فسفر در اندام هوایی گیاه عدس‌الملک نشان داد که محتوای فسفر در اندام هوایی کشت خالص عدس‌الملک و تیمارهای کشت مخلوط A_1S_2 بیشترین محتوا را به خود اختصاص دادند. در تیمارهای کشت مخلوط (بر اساس اصل مساعدت) گیاه لگوم (عدس‌الملک) شرایط را برای رشد و جذب بیشتر فسفر توسط زنیان آماده نموده است و میکوریزا به عنوان پل ارتباطی نقش مهمی در انتقال فسفر بین دو گیاه دارد (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2020). کمترین مقدار فسفر اندام هوایی نیز از تیمار کشت A_2S_1 به دست آمد. در این شرایط به جای پدیده مساعدت گیاه عدس‌الملک در رقابت شدید با بوته‌های زنیان قرار گرفته و سایه‌اندازی شدید بوته‌های زنیان بر روی آن باعث شده که گیاه تمام انرژی خود را برای جذب نور جهت افزایش ارتفاع به کار ببرد. Roustaei, Fallah & (2015) در بررسی کشت مخلوط شنبلیله و سیاه‌دانه نشان داد که بیشترین جذب فسفر در الگوی شنبلیله-سیاه‌دانه (۱-۲) تحت تغذیه کود تلقیقی به دست آمد که با کشت خالص شنبلیله تفاوت معنی‌داری نداشت.

۳-۵. محتوای پتاسیم زنیان

اثر سال، کشت مخلوط، منبع کود فسفره، برهمکنش سال در منبع کود فسفره در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای پتاسیم اندام هوایی زنیان معنی دار شد، (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره بر این صفت در گیاه زنیان نشان داد که در هر دو سال بیشترین محتوای پتاسیم اندام هوایی زنیان از تیمار کودی MB بدست آمد که در سال اول با تیمار کودی B در یک گروه آماری قرار گرفت و کمترین محتوای پتاسیم در هر دو سال مربوط به تیمار کودی P₀ بود. (جدول ۳). با توجه به معنی داری اثر اصلی کشت مخلوط بر محتوای پتاسیم اندام هوایی زنیان نتایج نشان داد که بیشترین محتوا با میانگین ۴۸۵۰/۸ میلی گرم بر کیلوگرم مربوط به A₀ بود که تفاوت معنی داری با تیمارهای کشت مخلوط A₁S₁ و A₁S₂ نداشت و کمترین محتوای پتاسیم نیز مربوط به کشت مخلوط A₂S₁ با میانگین ۴۲۵۰/۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۵). به نظر می رسد که افزایش پتاسیم در ارتباط با کاربرد ترکیبی کود MB می تواند ناشی از توانایی باکتری در افزایش پتاسیم قابل استفاده از خاک شده و هم چنین بهبود هم زیستی میکوریزایی که موجب گسترش و نفوذ مطلوب هیف های خارجی قارچ به منافذ باریک خاک شده و باعث می شود حجم خاک قابل دسترس گیاه افزایش یابد، باشد (Aye et al., 2021). Zamani et al. (2018) در بررسی سطوح مختلف کاربرد میکوریزا و باکتری های افزایش دهنده رشد گیاه بر روی محتوای عناصر رازبانه بیان کردند که بیشترین میزان جذب پتاسیم در تیمار توأم میکوریز و باکتری سودوموناس به دست آمد. آنها همچنین از افزایش کلونیزاسیون ریشه در گیاهان میکوریزایی نسبت به گیاهان غیر میکوریزایی و در پی آن افزایش جذب پتاسیم گزارش دادند.

۳-۶. محتوای پتاسیم عدس الملک

اثر سال، کشت مخلوط، منبع کود فسفره، برهمکنش کشت مخلوط در منبع کود فسفره و برهمکنش سال در منبع کود فسفره بر محتوای پتاسیم اندام هوایی عدس الملک در سطح احتمال خطای یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که در سال اول بیشترین محتوای پتاسیم با میانگین ۴۱۶۴/۶ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار کودی P به دست آمد که تفاوت معنی داری با تیمار کودی تلفیقی MB نداشت. در سال دوم نیز بیشترین محتوای پتاسیم با میانگین ۵۵۵۶/۷ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار کودی MB بود که تفاوت معنی داری با تیمار کودی P نداشت. کمترین میزان پتاسیم در هر دو سال نیز مربوط به تیمار کودی P₀ به ترتیب با میانگین ۴۶۳۲/۵ و ۴۳۵۲/۷ میلی گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۳). در بررسی مقایسه میانگین برهمکنش کشت مخلوط و کود فسفره بر محتوای پتاسیم در عدس الملک نتایج نشان داد که بیشترین محتوا از کشت خالص آن و در تیمار کودی P به دست آمد که تفاوت معنی داری با کشت مخلوط A₁S₂ در همین تیمار کودی، همچنین الگوهای کشت S₀ و A₁S₂ در تیمار کود تلفیقی MB نداشت. کمترین محتوای پتاسیم نیز مربوط به کشت مخلوط A₂S₁ در تیمار کودی P₀ بود (جدول ۴). Salahi et al. (2022) گزارش دادند که تلقیح با میکوریزا باعث افزایش جذب پتاسیم در دانه و برگ در تیمار حاوی میکوریزا و در نسبت کشت مخلوط ۱:۱ کتان روغنی و شنبلیله شد. زنیان با شاخ و برگ بیشتر و ارتفاع بلندتر در کشت مخلوط A₂S₁، گیاه عدس الملک را تحت رقابت شدیدی برای دریافت نور قرار داده است لذا در چنین شرایطی برقراری رابطه هم زیستی برای گیاه عدس الملک یک هزینه اضافه خواهد بود (Kamaei et al., 2019).

۳-۷. محتوای روی زنیان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کشت مخلوط، منبع کود فسفره و برهمکنش سال در منبع کود فسفره در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین حاصل از برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که بیشترین محتوای

روی به ترتیب در سال اول و دوم با میانگین‌های ۷۶/۵ و ۷۸/۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار تلفیقی قارچ و باکتری (MB) به دست آمد که در سال دوم تفاوت معنی‌داری با تیمار B نداشت. کمترین محتوای روی با میانگین‌های ۴۴/۱۶ و ۳۹/۳۳ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار P₀ به دست آمد. بیشترین محتوای روی در تیمار تلفیقی (باکتری + قارچ) نسبت به تیمار شاهد، در سال اول ۷۳ و در سال دوم ۹۹ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). همچنین با توجه به معنی‌داری اثر اصلی کشت مخلوط، نتایج نشان دادند که بیشترین محتوای روی با میانگین ۶۷/۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم از کشت مخلوط A₁S₂ به دست آمد و کمترین محتوای روی (۵۷/۴۳ میلی گرم بر کیلوگرم) مربوط به A₀ بود که تفاوت معنی‌داری با الگوی کشت A₂S₁ نداشت. نتایج نشان داد که کشت مخلوط A₁S₂ نسبت به کشت خالص ۱۸ درصد افزایش نشان داد (جدول ۵). (Shojaeian Kishi et al., 2021) گزارش دادند که بیشترین محتوای روی در کتان روغنی در شرایط مصرف توأم فسفات بارور ۲ و میکوریزا به دست آمد. این محققان بیان کردند که میکوریزا به وسیله هیف‌های برون ریشه‌ای و باکتری‌های محرک رشد با تولید هورمون اکسین و تحریک رشد ریشه و ریشه‌های مویی باعث گسترش منطقه جذب گیاه در خاک و افزایش مواد غذایی می‌شوند. همچنین دقت در محتوای روی در تیمارهای مختلف کودی نشان می‌دهد در سطوح بالای مصرف کود فسفاته محتوای روی نسبت به تیمارهای کاربرد کود زیستی کاهش نشان می‌دهد که شاید این امر ناشی از روابط روی و فسفر در خاک باشد. همسو با یافته‌های حاضر، Zheng et al. (2022) نیز گزارش کردند که کاربرد توأم کشت مخلوط و تلقیح میکروبی به طور هم‌افزایی جذب روی در گیاهان را افزایش می‌دهد. آن‌ها نیز کاهش جذب روی در سطوح بالای فسفر را ناشی از برهم‌کنش‌های آنتاگونیستی بین فسفر و روی در خاک و گیاه دانستند. این پژوهشگران سازوکار افزایش جذب را به توسعه سامانه ریشه و تولید سیدروفور توسط میکروارگانیسم‌ها نسبت دادند.

۷-۳. محتوای روی عدس‌الملک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، کشت مخلوط، منبع کود فسفره، برهمکنش کشت مخلوط در منبع کود فسفره در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش سال در منبع کود فسفره، در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که در روندی مشابه در سال اول و دوم، تیمار MB با میانگین‌های ۷۰/۲۵ و ۷۷/۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین محتوای روی را به خود اختصاص دادند. کمترین محتوا از تیمار کودی P₀ به ترتیب با میانگین ۴۲/۲۵ و ۴۱/۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم در سال اول و دوم بود (جدول ۳). با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش کشت مخلوط در کود فسفره، مقایسه میانگین این برهمکنش نشان داد، که بیشترین محتوای روی اندام هوایی عدس‌الملک از سامانه A₁S₂ و در تیمار کودی MB (۸۴/۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بود که تفاوت معنی‌داری با الگوهای کشت A₁S₁ و S₀ نداشت. کمترین محتوای روی (۳۵/۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) مربوط به سامانه A₂S₁ و در تیمار کودی P₀ بود (جدول ۴). بررسی دقیق‌تر نتایج نشان داد که در هر سطح از مصرف کود فسفره کشت مخلوط (A₁S₂) بیشترین محتوای روی اندام هوایی را به خود اختصاص داد. Ebbisa, (2022) در پژوهش خود بیان نمود که در کشت مخلوط گیاهان مختلف ترکیبات آلی متفاوتی ترشح می‌کنند (اسیدهای آلی، فنول‌ها و لیگاندها) که می‌تواند روی را به شکل قابل جذب تبدیل کند. بیان شده است که گیاه برای انتقال قندها و کربوهیدرات‌ها به قارچ (به عنوان هزینه همزیستی) به انرژی (ATP) نیاز دارد که تولید آن وابسته به فسفر است. با تأمین بهتر فسفر توسط مشارکت میکروبی، گیاه انرژی کافی برای حمایت از قارچ را دارد و قارچ می‌تواند به طور مؤثرتری عنصر روی را جذب کند (Zhang et al., 2018).

۳-۹. عملکرد دانه زنیان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، کشت مخلوط و منبع کود فسفره در سطح احتمال یک درصد، برهمکنش سال در کشت مخلوط و برهمکنش سال در منبع کود فسفره در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد دانه زنیان معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در سال اول (۵۴۵/۸ کیلوگرم در هکتار)

و در سال دوم (۵۱۷ کیلوگرم در هکتار) از تیمار P به دست آمد که تفاوت معنی داری با تیمار MB نداشت و کمترین میزان عملکرد دانه در سال اول (۳۴۴ کیلوگرم در هکتار) و در سال دوم (۳۹۵/۲ کیلوگرم در هکتار) از تیمار P₀ به دست آمد (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سال در کشت مخلوط مخلوط نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در سال اول و دوم به ترتیب (۶۲۱/۲ کیلوگرم در هکتار) و (۷۰۴/۹ کیلوگرم در هکتار) از سامانه A₀ به دست آمد و کمترین میزان عملکرد دانه در سال اول و دوم به ترتیب (۴۱۹/۹ کیلوگرم در هکتار) و (۳۲۲/۱ کیلوگرم در هکتار) مربوط به سامانه A₁S₂ بود (جدول ۸). افزایش مصرف کود فسفره به واسطه افزایش قدرت رویشی و زایشی گیاه، باعث افزایش عملکرد دانه در گیاه می شود. با توجه به اینکه فسفر نقش مهمی در فعالیتهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان دارد، کودهای زیستی با قابلیت حل شدن فسفات-های غیر قابل حل توسط ریز جانداران از طریق تولید اسیدهای آلی و سیدروفور در افزایش جذب عناصر غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد دانه مؤثر می باشد (Etesami et al., 2021). افزایش محتوای عناصر مهمی چون نیتروژن، فسفر و روی نقش مهمی در افزایش رشد رویش، افزایش کارایی فتوسنتزی و بهبود رشد گیاهان خواهد داشت که این فرآیند در تیمارهای تلفیقی به وضوح قابل مشاهده بود. بسیاری از محققین (Kumar et al., 2009; Adesemoye et al., 2008) به نقش مثبت ریزوباکتری های محرک رشد گیاه، بر عملکرد محصولات زراعی مختلف اشاره کرده اند و آن را به ترشح هورمون های گیاهی، تولید و آزادسازی انواع اسیدهای آلی در خاک، تثبیت نیتروژن و در نهایت، برهمکنش مثبت بین آنها و سایر ریز موجودات خاک نسبت داده اند. این ریزوباکتری ها از طریق تولید موادی مانند ایندول استیک اسید باعث افزایش رشد گیاه می شوند و در مراحل اولیه رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می دهند، در نتیجه حجم بیشتری از خاک را اشغال می کند، سطح جذب را افزایش می دهد و با تأثیر مثبتی که بر فتوسنتز به دلیل دوام سطح برگ گیاه در اثر تولید مواد پرورده بیشتر ایجاد می کند (Kumar et al., 2009) منجر به افزایش عملکرد دانه و زیستی در گیاه خواهد شد. Musapour et al. (2022) در بررسی کشت مخلوط زنبان و اسفرزه نشان دادند که بیشترین عملکرد زنبان از کشت خالص زنبان به دست آمد. آنها دلیل افزایش در کشت خالص را عدم رقابت بین گونه ای دانستند.

جدول ۶. تجزیه واریانس کشت مخلوط و کود فسفره بر عملکرد دانه زنبان و عدس الملک

Table 6. Analysis of variance of intercropping and phosphorus fertilizer on grain yield of Ajowan and Coronilla

S.O.V	df	Seed yield of Ajowan	Seed yield of Coronilla
Year (A)	1	232.63**	382.27**
Replication (Year)	4	17.81	8.40
Cropping System (B)	3	6996.32**	2364.90**
Phosphorus Fertilizer (C)	4	1175.23**	544.47**
B × C	12	46.46 ns	70.47**
A × B	3	118.38*	25.27**
A × C	4	108.92*	8.62*
A × B × C	12	23.30 ns	4.31 ns
Error	76	34.14	2.94
CV		12.83	10.81

ns, *, **: به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

**ns, *, : Non-significant, significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively.

جدول ۷. مقایسه میانگین برهمکنش سال در کود فسفره بر عملکرد دانه زنیان و عدس‌الملک

Table 7. Mean comparison of the year × phosphorus fertilizer interaction on grain yield of Ajowan and Coronilla

Phosphorus Fertilizer	Grain yield of Ajowan (kg.h ⁻¹)		Grain yield of Coronilla (kg.h ⁻¹)	
	Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2
P ₀	344.0 c	395.3 c	344.0 c	395.3 c
B	359.5 c	449.0 b	359.5 c	449.0 b
M	459.5 b	472.2 b	459.9 b	472.2 b
MB	493.9 ab	516.7 a	493.9 ab	516.7 a
P	545.8 a	517.0 a	545.8 a	517.0 a

در هر ستون و هر تیمار میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری با استفاده از رویه LSD ندارند
In each column and for each treatment, means sharing at least one common letter are not significantly different based on LSD procedure

P₀ = شاهد، B = کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + باکتری، M = کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + مایکوریزا، MB = کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + مایکوریزا، P = مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره

P₀ = Control, B = Application of 50 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer + bacteria, M = Application of 50 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer + mycorrhiza, MB = Application of 50 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer + bacteria + mycorrhiza, P = Application of 100 kg ha⁻¹ phosphorus fertilizer

جدول ۸. مقایسه میانگین برهمکنش سال در کشت مخلوط بر عملکرد دانه زنیان و عدس‌الملک

Table 8. Mean comparison of the year × cropping system interaction on grain yield of Ajowan and Coronilla

Cropping Systems	Seed yield of Ajowan (kg.h ⁻¹)		Seed yield of Coronilla (kg.h ⁻¹)	
	Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2
A ₀	621.2 a	704.9 a	-	-
S ₀	-	-	250.4 a	302.1 a
A ₁ S ₁	446.1 b	426.6 b	91.8 c	112.6 c
A ₁ S ₂	275.3 c	322.1 c	151.1 b	202.6 b
A ₂ S ₁	419.9 b	426.6 b	69.9 d	88.8 d

در هر ستون و هر تیمار میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری با استفاده از رویه LSD ندارند
In each column and for each treatment, means sharing at least one common letter are not significantly different based on LSD procedure

A₀ = زنیان خالص، S₀ = عدس‌الملک خالص، A₁S₁ = یک ردیف زنیان یک ردیف عدس‌الملک، A₁S₂ = یک ردیف زنیان دو ردیف عدس‌الملک، A₂S₁ = دو ردیف عدس‌الملک یک ردیف زنیان

A₀ = Pure ajowan, S₀ = Pure Coronilla, A₁S₁ = One row of ajowan + one row of Coronilla, A₁S₂ = One row of ajowan + two rows of Coronilla, A₂S₁ = Two rows of ajowan + one row of Coronilla

۳-۱۰. عملکرد دانه عدس‌الملک

اثرات سال، تیمارهای کشت مخلوط و منبع کود فسفره، برهمکنش کشت مخلوط و منبع کود فسفره، برهمکنش سال در کشت مخلوط و برهمکنش سال در منبع کود فسفره در سطح احتمال خطای یک درصد، بر عملکرد دانه عدس‌الملک معنی‌دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در سال اول (۲۰۱/۲) کیلوگرم در هکتار) و در سال دوم، (۲۱۷/۳) کیلوگرم در هکتار) از تیمار P به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار MB نداشت و کمترین میزان عملکرد دانه در سال اول (۷۲/۵) کیلوگرم در هکتار) و در سال دوم (۱۰۸/۵) کیلوگرم در هکتار) از تیمار P₀ به دست آمد

(جدول ۷)، مقایسه میانگین برهمکنش سال در کشت مخلوط نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در سال اول و دوم به ترتیب با میانگین ۲۵۰/۴ و ۳۰۲/۱ کیلوگرم در هکتار از سامانه S_0 به دست آمد. کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب در سال‌های اول و دوم با میانگین‌های ۶۹/۹ و ۸۸/۸ گرم در مربع از تیمار P_0 به دست آمد (جدول ۷). بررسی مقایسه میانگین برهمکنش سال در کشت مخلوط نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در سال اول و دوم به ترتیب با میانگین ۲۵۰/۴ و ۳۰۲/۱ کیلوگرم در هکتار از سامانه S_0 به دست آمد. کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب در سال‌های اول و دوم با میانگین‌های ۶۹/۹ و ۸۸/۸ کیلوگرم در هکتار از سامانه A_2S_1 به دست آمد (جدول ۸). در کشت خالص عدس‌الملک نیز به دلیل عدم وجود رقابت بین گونه‌ای، بوته‌های عدس‌الملک برای آشیان‌های اکولوژی یکسان رقابت نکرده و تمامی منابع موجود در اختیار عدس‌الملک قرار گرفته است که این موضوع می‌تواند یکی از عوامل افزایش عملکرد این گیاه در کشت خالص باشد. از طرفی پایین بودن عملکرد عدس‌الملک در تیمارهای کشت مخلوط را می‌توان به افزایش رقابت بین گونه‌ای زنیان با عدس‌الملک و کاهش فضای زیستی عدس‌الملک نسبت داد (با توجه به ارتفاع و شاخ و برگ بیشتر زنیان) که سبب کاهش جذب نور و کاهش رشد و فتوسنتز در عدس‌الملک شده و به دنبال آن عملکرد آن را کاهش داده است. *Salahi et al.* (2022) در بررسی اثر سامانه‌های کشت بر عملکرد دانه نشان داد که بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به کشت خالص شنبلیله و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار یک ردیف شنبلیله: دو ردیف کتان روغنی بوده است که با هم اختلاف معنی‌داری را نشان دادند که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. با مطالعه‌ی روند رشد شاهدانه و کتجد در کشت مخلوط، مشاهده شد که تجمع ماده‌ی خشک در مقایسه با کشت خالص به دلیل رقابت بر سر جذب منابع و عمدتاً نور، به میزان زیادی کاهش یافت (*Koocheki, et al., 2010*). با توجه به این که در کشت مخلوط جایگزینی در نسبت‌های مخلوط از یک گیاه کاسته و گیاه دیگر جایگزین می‌شود تراکم گیاه اصلی (در اینجا زنیان) در واحد سطح کم شده و عملکرد دانه آن نسبت به کشت خالص کاهش پیدا می‌کند و بیشتر بودن عملکرد دانه در کشت خالص دور از انتظار نیست.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که استفاده از کودهای زیستی (باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ میکوریزا) در ترکیب با کشت مخلوط، اثرات مثبت و هم‌افزایی قابل‌توجهی بر بهبود جذب عناصر غذایی در گیاهان دارویی زنیان و عدس‌الملک دارد. تیمار تلفیقی (۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره + باکتری + قارچ) به‌طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی در اندام هوایی هر دو گیاه شد که نشان‌دهنده نقش مؤثر این میکروارگانیسم‌ها در تسهیل جذب عناصر و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه است. همچنین الگوی کشت مخلوط A_1S_2 (۱ ردیف زنیان + ۲ ردیف عدس‌الملک) به عنوان بهترین الگو از نظر بهبود محتوای عناصر غذایی شناسایی شد. اگرچه عملکرد دانه در کشت خالص هر دو گیاه بیشتر بود، اما کشت مخلوط با کاهش رقابت بین‌گونه‌ای و بهینه‌سازی استفاده از منابع، به ویژه در شرایط استفاده از کودهای زیستی، به عنوان یک سامانه پایدار و سازگار با محیط‌زیست قابل‌توصیه است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش گواهی آن است که تلفیق کشت مخلوط با کاربرد کودهای زیستی می‌تواند به کاهش مصرف کودهای شیمیایی و کاهش آلودگی محیط زیست کمک کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه یاسوج به جهت حمایت مادی از این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌نمایند که هیچگونه تعارض منافی در رابطه با نشر این مقاله وجود ندارد.

فهرست منابع

- Adesemoye, A.O., Torbert, H. & Klopper, J.W. (2008). Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR and AMF in an integrated nutrient management system. *Canadian Journal of Microbiology*, 54, 876-886. DOI: [10.1139/W08-081](https://doi.org/10.1139/W08-081).
- Aye, P.P., Pinjai, P. & Tawornprukek, S. (2021). Effect of Phosphorus Solubilizing Bacteria on Soil Available Phosphorus and Growth and Yield of Sugarcane. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(12), 10754. DOI: [10.48048/wjst.2021.10754](https://doi.org/10.48048/wjst.2021.10754)
- Banik, P., Midya, A., Sarkar, B.K. & Ghose, S.S. (2006). Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: Advantages and weed smothering. *European Journal of Agronomy*, 24(4), 325-332. DOI: [10.1016/j.eja.2005.10.006](https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.006)
- Cadoux, S., Sauzet, G., Valantin-Morison, M., Pontet, C., Champolivier, L., Robert, C., Lieven, J., Flénet, F., Mangenot, O., Fauvin, P. & Landé, N. (2015). Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL*, 22(3), 1-11. DOI: [10.1051/ocl/2015006](https://doi.org/10.1051/ocl/2015006)
- Du, Q., Zhou, L., Chen, P., Liu, X., Song, C., Yang, F., Wang, X., Liu, W., Sun, X., Du, J., Liu, J., Shu, K., Yang, W. & Yong, T. (2019). Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input. *The Crop Journal*, 8(1), 140-152 DOI: [10.1016/j.cj.2019.06.004](https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.06.004)
- Ebbisa, A. (2022). Application of Crop Modeling in Multi-Cropping Systems for Maximize Production and Build Resilient Ecosystem Services. In: Resource Management in Agroecosystems. *IntechOpen*, pp. 1-20. DOI: [10.5772/intechopen.102350](https://doi.org/10.5772/intechopen.102350)
- Emami, A. (1996). Analytical methods for plant analyses. Soil and Water Research Institute, Technical Report No. 1, 128p. (In Persian).
- Etesami, H., Jeong, B.R. & Glick, B.R. (2021). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699618. DOI: [10.3389/fpls.2021.699618](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618)
- Faridvand, S., Rezaei-Chiyaneh, E., Battaglia, M. L., Gitari, H. I., Raza, M. A. & Siddique, K. H. M. (2022). Application of bio and chemical fertilizers improves yield, and essential oil quantity and quality of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) intercropped with mung bean (*Vigna radiata* L.). *Food and Energy Security*, e319. DOI: [10.1002/fes3.319](https://doi.org/10.1002/fes3.319)
- Friesen, M. L., Porter, S.S., Stark, S. C., Wettberg, E., Sachs, J.L. & Martinez-Romero, E. (2011). Legumes Modulate Allocation to Rhizobial Nitrogen Fixation in Response to Factorial Light and Nitrogen Manipulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 108(24), 9893-9898. DOI: [10.1073/pnas.1108688108](https://doi.org/10.1073/pnas.1108688108)
- Ghorbani, A. (2013). Best herbs for managing diabetes: a review of clinical studies. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 49(3), 413-422. DOI: [10.1590/S1984-82502013000300002](https://doi.org/10.1590/S1984-82502013000300002)
- Janati, M., Benmrid, B., Elhaisoufi, W., Zeroual, Y., Nasielski, J. & Bargaz, A. (2021). Will Phosphate Bio-Solubilization Stimulate Biological Nitrogen Fixation in Grain Legumes? *Frontiers in Agronomy*, 3, 637196. DOI: [10.3389/fagro.2021.637196](https://doi.org/10.3389/fagro.2021.637196)
- Kamaei, R., Faramarzi, F., Parsa, M. & Jahan, M. (2019). The effects of biological, chemical, and organic fertilizers application on root growth features and grain yield of Sorghum. *Journal of Plant Nutrition*, 43(8), 1124-1138. DOI: [10.1080/01904167.2019.1701024](https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1701024)
- Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Khorramdel, S., Anvarkhah, S., Sabet Teimouri, M. & Sanjani, S. (2010). Evaluation of growth indices of hemp (*Cannabis sativa* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.) in intercropping with replacement and additive series. *Journal of Agroecology*, 2(1), 30-40. (In Persian with English Summary).
- Kumar, S., Pandey, P. & Maheshwari, D.K. (2009). Reduction in dose of chemical fertilizers and growth enhancement of sesame (*Sesamum indicum* L.) with application of rhizospheric competent *Pseudomonas aeruginosa* LES4. *European Journal of Soil Biology*, 45, 334-340. DOI: [10.1016/j.ejsobi.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.04.001)
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., Song, Z., & Zhao, B. (2023). Long-term chemical fertilizer application disrupts soil microbial community and decreases soil organic carbon: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 105767. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105767>

- Martin-Guay, M.O., Paquette, A., Dupras, J. & Rivest, D. (2018). The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Science of the Total Environment*, 615, 767-772. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.09.265](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.265)
- Mohammadzadeh, V., Rezaei-Chiyaneh, E., Mahdavia, H., Rahimi, A., Gheshlaghi, M., Battaglia, M. L. & Harrison, M. T. (2022). Effect of intercropping and bio-fertilizer application on the nutrient uptake and productivity of mung bean and marjoram. *Land*, 11(10), 1825 .DOI: [10.3390/land11101825](https://doi.org/10.3390/land11101825)
- Mousavi, S.S., Rejali, F., Daei, G., & Ardakani, M.R. (2022). Co-inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi: An effective approach for improving nitrogen and phosphorus acquisition in intercropping of maize and mung bean. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(4), 453-465. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100392>
- Musapour, H., Ghanbari, A. & Asgharipour, M. R. (2022). Effect of different intercropping ratios on the quantity and quality of essential oil in *Carum copticum* and *Plantago ovata*. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 33(4), 1-19.
- Novozamsky, I., Van Eck, R., Van Schouwenburg, C. H. & Walinga, I. (1974). Total nitrogen determination in plant material by means of the indophenol blue method. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 22(1), 3-5.
- Peterson, J.R., Flanagan, J. & Shmac, K. T. (2002). PAM application method and electrolyte source effects on plot-scale runoff and erosion. *Transactions of the ASAE*, 45(6), 1859-1867. DOI: [10.13031/2013.11409](https://doi.org/10.13031/2013.11409)
- Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Amani Machiani, M., Javanmard, A., Maggi, F. & Morshedloo, M.R. (2020). Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. *Scientia Horticulturae*, 261, 108951. DOI: [10.1016/j.scienta.2019.108951](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108951)
- Rezaei-Chiyaneh, E., Mahdavia, H., Battaglia, M. L., Thomason, W.E. & Caruso, G. (2021). Intercropping and fertilizer type impact seed productivity and secondary metabolites of dragon's head and fenugreek. *Scientia Horticulturae*, 287, 110277. DOI: [10.1016/j.scienta.2021.110277](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110277)
- Rezaei-Chiyaneh, E., Valizadegan, A., Tajbakhsh, M., Dabbagh Mohammadi Nassab, A. & Rimaz, V. (2014). Investigation of performance and diversity of insects in different intercropping patterns of bean and dill. *Journal of Agricultural Improvement*, 16(2), 353-368.
- Roohi, M., Arif, M., Yasmeen, T., Riaz, M., Rizwan, M., Shahzad, S., Ali, S. & Bragazza, L. (2020). Effects of cropping system and fertilization regime on soil phosphorous are mediated by rhizosphere-microbial processes in a semi-arid agroecosystem. *Journal of Environmental Management*, 271, 111033. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.111033](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111033)
- Roustaei, M. & Fallah, S. (2015). Investigation of canopy characteristics and essential oil yield in the intercropping of fenugreek and black cumin under the application of organic and chemical fertilizers. *Journal of Agricultural Knowledge and Production*, 25(4), 2-23.
- Salahi, T., Yadavi, A., Salehi, A., Balouchi, H. & Hamidian, M. (2022). Comparison of mycorrhizal fungal species in improving nutrient uptake and land equivalent ratio in the intercropping of oil flax and fenugreek. *Journal of Plant Ecophysiology*, 14(50), 87-100.
- Shojaeian Kishi, F., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A. & Hamidian, M. (2021). Improvement of physiological characteristics and nutrient uptake of linseed (*Linum usitatissimum*) with biofertilizers application under irrigation withholding at different growth stages. *Journal of Plant Process and Function*, 10(44), 265-282.
- Shome, S., Bhowmik, A. & Bhowmik, S. (2023). Rhizobium and Phosphate Solubilizing Bacteria Influence the Soil Nutrient Availability, Growth, Yield, and Quality of Soybean. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(19), 513-525. DOI: [10.9734/ijpss/2023/v35i193682](https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193682)
- Varma, A., Prasad, R. & Tuteja, N. (2018). *Mycorrhiza: Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration*. Springer International Publishing, 533p. DOI: [10.1007/978-3-319-68867-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-7)
- Wahbi, S., Maghraoui, T., Hafidi, M., Sanguin, H., Oufdou, K., Prin, Y., Duponnois, R. & Galiana, A. (2016). Enhanced transfer of biologically fixed N from faba bean to intercropped wheat through mycorrhizal symbiosis. *Applied Soil Ecology*, 107, 91-98. DOI: [10.1016/j.apsoil.2016.05.008](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.008)

- Weisany, W., Tahir, N.A.R. & Schenk, P.M. (2021). Coriander/soybean intercropping and mycorrhizae application lead to overyielding and changes in essential oil profiles. *European Journal of Agronomy*, 126, 126283. DOI: [10.1016/j.eja.2021.126283](https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126283)
- Yang, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, H., Zhu, Q., Yan, B., Fei, J., Rong, X., Peng, J. & Luo, G. (2022). Intercropping regulation of soil phosphorus composition and microbially-driven dynamics facilitates maize phosphorus uptake and productivity improvement. *Field Crops Research*, 287, 108666. DOI: [10.1016/j.fcr.2022.108666](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108666)
- Zamani, F., Amirnia, R., Rezaei-Chiyaneh, E. & Rahimi, A. (2018). The effect of bacterial biofertilizers and mycorrhizal fungi on seed yield and essential oil chemical compounds of three fennel populations. *Journal of Agricultural Improvement*, 20(4), 831-848. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2018.259818.2045>
- Zhang, L., Shi, N., Fan, J., Wang, F., George, T.S. & Feng, G. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi stimulate organic phosphate mobilization associated with changing bacterial community structure under phosphorus-deficient conditions. *Environmental Microbiology*, 20(7), 2639-2651. DOI: [10.1111/1462-2920.14289](https://doi.org/10.1111/1462-2920.14289)
- Zheng, B., Chen, Y., Li, S., Li, Y., Miao, B., Zhang, C. & Sun, Z. (2022). Intercropping and microbial inoculation synergistically enhance the phytoremediation of cadmium and zinc in contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 826, 154136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154136>