



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 Karami¹ | Alireza Yadavi² | Mohsen Movahhedi Dehnavi³ | Amin Salehi⁴

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

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: November 04, 2025

Revised: November 30, 2025

Accepted: December 13, 2025

Extended Abstract

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 reduce 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.

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 (N₀ 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.

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.

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:

Intercropping,
medicinal plants,
mycorrhizal fungi,
phosphate-solubilizing
bacteria,
sustainable agriculture.

Cite this article: Karami, R., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., & Salehi, A. (2026). 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.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 57(2), 1-16. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.405412.655166.





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

اطلاعات مقاله

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 شد. عامل اول مدیریت تغذیه فسفری شامل کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی (سوپرفسفات‌تریپل)، 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.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

کلیدواژه‌ها:

باکتری حل‌کننده فسفات،
قارچ میکوریزا،
کشاورزی پایدار،
کشت مخلوط،
گیاهان دارویی.

استناد: کرمی، ر.، یدوی، ع.، موحدی‌دهنوی، م.، و صالحی، ا. (۱۴۰۵). 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.). *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۷(۲)، ۱-۱۶. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.405412.655166



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 بلندمدت 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 افزایش‌دهنده رشد گیاه (PSB) و قارچ میکوریزا (AMF) 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 (Yang *et al.*, 2022; Martin-Guay *et al.*, 2018) 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 بوم‌نظام‌های 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 شده است (Roohi *et al.*, 2020; Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021). زنبان یکی از گیاهان دارویی معطر متعلق به خانواده Apiaceae است که به واسطه داشتن اسانس فراوان در دانه در صنایع داروسازی، بهداشتی و یا به‌صورت 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 بذرهای عدس‌الملک در طب سنتی ایران و مصر برای درمان بیمارهای مختلف از جمله دیابت، فشار خون، چربی خون، عفونت‌های انگلی و بیماری صرع استفاده می‌شود (Ghorbani, 2013). نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد که غلظت مواد مغذی در کشت مخلوط همراه با تلقیح 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 علاوه‌بر 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 نشان داد که الگوهای کشت مخلوط لوبیا سبز و مرزنجوش غلظت‌های P، N 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

1. Phosphorus solubilizing bacteria
2. Arbuscular mycorrhizal fungi

عملکرد دانه و عملکرد 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 میکوریزا) 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 شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به صورت آزمایش مزرعه‌ای در طول دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ 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 شد. تیمارهای آزمایش شامل پنج سطح مدیریت تغذیه فسفر شامل مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل (P)، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل همراه با باکتری‌های حل‌کننده فسفات (B)، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل همراه با قارچ میکوریزا (M)، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل همراه با باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ میکوریزا (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 صفر تا ۳۰ سانتیمتر) انجام و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک تعیین شد (جدول ۱). همچنین خصوصیات اقلیمی منطقه مورد آزمایش در دو سال متوالی در شکل شماره ۱ ارائه شده است.

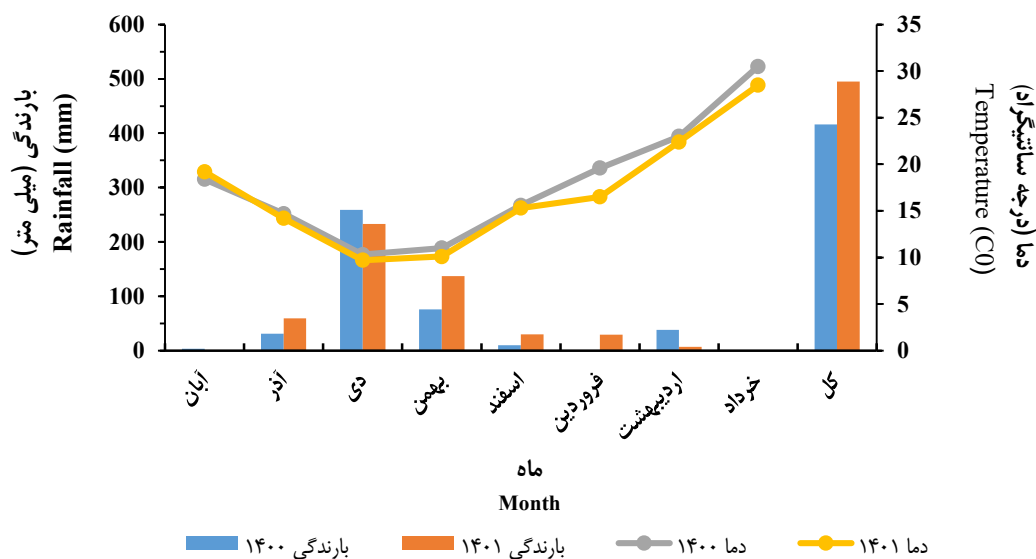
جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش.

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

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

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 ۱۰^۹ 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 حل‌کننده فسفات ترکیب دو باکتری *Pseudomonas fluorescens* و *P. putida* بودند. 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 ۴ × ۲ متر و شامل پنج خط کاشت با فاصله ۴۰ سانتی‌متر بین ردیف‌ها در نظر گرفته شد.

فاصله‌ی بوته‌ها روی ردیف برای زنیان ۷ و برای عدس‌الملک ۲۵ سانتی‌متر و عمق کاشت به ترتیب ۲ و ۴ سانتی‌متر تنظیم شد. به منظور جلوگیری از اثرات حاشیه‌ای، فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر و بین بلوک‌ها ۲ متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت به صورت دستی و در تاریخ یکم آذرماه انجام شد.



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

Figure 1. Two-year average temperature and rainfall data for the experimental area.

عملیات تنک و وجین علف‌های هرز به صورت دستی و آبیاری به صورت جوی و پشته‌ای انجام شد. میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در مرحله ۴-۵ برگی 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 انجام شد. جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر در اندام هوایی، در زمان گل‌دهی بوته‌ها، ۱۰ بوته برای زنیان و ۲ بوته برای عدس‌الملک در هر کرت به طور تصادفی انتخاب و از سطح زمین کف‌بر 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) و 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 نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها 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 ($2/88$ درصد) از الگوی کشت مخلوط A_1S_2 و در سطح کودی MB به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سامانه مذکور در M و الگوی A_1S_1 در سطح کودی MB نداشت. کمترین محتوا ($1/43$ درصد) نیز مربوط به کشت خالص زنیان (A_0) در سطح کودی P_0 بود (جدول ۴). این نتایج نشان از افزایش 50 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 ($3/12$ درصد) از کشت مخلوط A_1S_2 و در سطح کودی MB به‌دست 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 به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سایر الگوهای کشت (A_0 ، A_1S_1 ، A_2S_1) 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 به‌دست آمد. نقش میکوریزا در افزایش نیتروژن گیاهان با تحریک بیان آنزیم نیترات‌رداکتاز (افزایش جذب نیتروژن به فرم نیترات یا آمونیوم توسط میسلیوم‌های خارجی قارچ با مصرف نیترات توسط آنزیم نیترات‌رداکتاز) و افزایش سطوح آنزیم دی‌کیناز گلوکان (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 تحت‌تأثیر 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 است؛ همچنین قرار گرفتن گیاهان خانواده لگوم (عدس‌الملک) که به‌طور زیستی تثبیت‌کننده نیتروژن هستند، در کنار زنیان می‌تواند 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 $4/84$ درصد از تیمار ترکیبی MB به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با B نداشت. کمترین محتوا نیز مربوط به تیمار کودی P_0 با میانگین $3/05$ 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 ($3/31$ 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 ($4/59$ درصد) از کشت S_0 و کمترین آن ($3/83$ درصد) از سامانه A_2S_1 به‌دست 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 به‌وسیله آرباسکولار میکوریزا جذب می‌شوند، 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 به‌وسیله باکتری‌های انحلال فسفر باعث افزایش تعداد گره ریشه در سویا شد.

جدول ۲. میانگین مربعات تجزیه واریانس برای محتوای عناصر ماکرو، میکرو زنبان و عدس‌الملک.

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 معنی‌دار، معنی‌دار 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 زنبان و عدس‌الملک.

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)	
	Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2	Yeae 1	Year 2	Yeae 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 ^c	39.33 ^c	42.25 ^d	41.25 ^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 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.

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)
		Year 1	Year 2	Year 1	Year 2			
P ₀	A ₀	1.43 ⁱ	1.99 ^{ij}	-	-	0.39 ^f	-	-
	S ₀	-	-	0.49 ^{gghi}	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 ^{cf}	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 ^{cf}	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 + باکتری + مایکوریزا، P= مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره، 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 5. مقایسه میانگین اثر سامانه‌های کشت برای محتوای عناصر اندام هوایی زنیان 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= 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.

در همین راستا Janati *et al.* (2021) در پژوهش خود گزارش کردند 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 فرآیندی پرهزینه است و نیاز به کربن بالایی دارد. عدم دریافت نور کافی، فتوسنتز را کاهش داده و قند کمتری به سمت ریشه فرستاده می‌شود، لذا گیاه از طریق خودتنظیمی، سرمایه‌گذاری در گره‌زایی را کاهش می‌دهد؛ این شرایط در کشت مخلوط A₂S₁ می‌باشد. نتایج گواه آن است که با افزایش تعداد ردیف‌های کشت زنیان (A₂S₁) به علت سایه‌اندازی زنیان بر بوته عدس‌الملک به دلیل ارتفاع بیشتر زنیان از عدس-الملک (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 زنیان

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 زنیان 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 سال دوم (۰/۷۱ درصد) از تیمار تلفیقی MB به دست آمد که در سال دوم تفاوت معنی‌داری با تیمار کودی P 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 به معنی‌دار شدن برهمکنش کشت مخلوط و کود فسفره، نتایج نشان داد که بیشترین محتوای فسفر اندام هوایی زنیان (۰/۶۵ درصد) از کشت مخلوط A₁S₁ و در تیمار کودی P به دست آمد و 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 تلفیقی 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 فراهم‌سازی 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 و کود فسفره و برتری کشت مخلوط A_1S_2 نسبت به سایر سامانه‌های کشت مخلوط، می‌توان اینچنین تفسیر کرد که حضور دو ردیف عدس‌الملک (با جمعیت بالای باکتری‌های ریزوبیوم) در تیمارهای حاوی باکتری و ساخت اسیدهای معدنی (اسیدکربنیک و اسیدسولفوریک)، اسیدهای آلی (اگزالیک، 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 زینان موجب بهبود غلظت فسفر در گیاه می‌شود (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2021).

۳-۴. 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 ($0/70$ درصد) از کشت مخلوط یک A_1S_2 در تیمار کودی MB به‌دست 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 ($0/39$ 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 تلفیقی MB نسبت به شاهد $79/4$ درصد افزایش نشان داد. مقایسه میانگین سال دوم نیز نشان داد که بیشترین محتوای فسفر ($0/71$ درصد) از S_0 که تفاوت معنی‌داری با الگوهای A_1S_1 ، A_1S_2 از همین تیمار کودی و کشت S_0 در تیمار کودی P و S_0 از تیمار کودی B نداشت به‌دست آمد. کمترین محتوای فسفر ($0/35$ درصد) از الگوی A_2S_1 و در تیمار کودی P_0 مشاهده شد (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 زینان 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 به‌دست آمد. در این شرایط به جای پدیده مساعدت، گیاه عدس‌الملک در رقابت شدید با بوته‌های زینان قرار گرفته و سایه‌اندازی شدید بوته‌های زینان 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 شنبلیه و سیاه‌دانه نشان داد که بیشترین جذب فسفر در الگوی شنبلیه- سیاه‌دانه ($1-2$) تحت تغذیه کود تلفیقی به‌دست آمد که با کشت خالص شنبلیه تفاوت معنی‌داری نداشت.

۳-۵. محتوای پتاسیم زینان

اثر سال، کشت مخلوط، منبع کود فسفره، برهمکنش سال در منبع کود فسفره، برهمکنش سال در کشت مخلوط بر محتوای پتاسیم اندام هوایی زینان معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره بر این صفت در گیاه زینان نشان داد که در هر دو سال بیشترین محتوای پتاسیم اندام هوایی زینان از تیمار کودی MB به‌دست 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 P_0 بود (جدول ۳). با توجه به معنی‌داری اثر اصلی کشت مخلوط بر محتوای پتاسیم اندام هوایی زینان نتایج نشان داد که بیشترین محتوا با میانگین $4850/8$ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به A_0 بود که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای کشت مخلوط A_1S_2 و A_1S_1 نداشت و کمترین محتوای پتاسیم نیز مربوط به کشت مخلوط A_2S_1 با میانگین $4250/8$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۵). به نظر می‌رسد که افزایش پتاسیم در ارتباط با کاربرد ترکیبی کود MB می‌تواند ناشی از توانایی باکتری در افزایش پتاسیم قابل استفاده از خاک و همچنین بهبود همزیستی میکوریزایی باشد که موجب گسترش و نفوذ مطلوب هیف‌های خارجی قارچ به منافذ باریک خاک و افزایش حجم خاک

قابل دسترس گیاه شود (Aye et al., 2021). Zamani et al. (2018) در بررسی سطوح مختلف کاربرد میکوریزا و باکتری‌های افزایش دهنده رشد گیاه روی محتوای عناصر رازیانه بیان کردند که بیشترین میزان جذب پتاسیم در تیمار توأم میکوریزا 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 عدس‌الملک

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 عدس‌الملک در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سال در منبع کود فسفره نشان داد که در سال اول بیشترین محتوای پتاسیم با میانگین $4164/6$ میلی‌گرم بر کیلوگرم از تیمار کودی P به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار کودی تلفیقی MB نداشت. در سال دوم نیز بیشترین محتوای پتاسیم با میانگین $5556/7$ میلی‌گرم بر کیلوگرم از تیمار کودی MB بود که تفاوت معنی‌داری با تیمار کودی P نداشت. کمترین میزان پتاسیم در هر دو سال نیز مربوط به تیمار کودی P_0 به ترتیب با میانگین‌های $4632/5$ و $4352/7$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بودند (جدول ۳). در بررسی مقایسه میانگین برهمکنش کشت مخلوط و کود فسفره بر محتوای پتاسیم در عدس‌الملک نتایج نشان داد که بیشترین محتوا از کشت خالص آن و در تیمار کودی P به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کشت مخلوط A_1S_2 در همین تیمار کودی، همچنین الگوهای کشت S_0 و A_1S_2 در تیمار کود تلفیقی MB نداشت. کمترین محتوای پتاسیم نیز مربوط به کشت مخلوط A_2S_1 در تیمار کودی P_0 بود (جدول ۴). Salahi et al. (2022) گزارش کردند 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 شنبليله شد. زنبان با شاخ و برگ بیشتر و ارتفاع بلندتر در کشت مخلوط A_2S_1 ، گیاه عدس‌الملک را تحت رقابت شدیدی برای دریافت نور قرار داده است؛ لذا در چنین شرایطی برقراری رابطه همزیستی برای گیاه عدس‌الملک یک هزینه اضافه خواهد بود (Kamaei et al., 2019).

۳-۷. محتوای روی زنبان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کشت مخلوط، منبع کود فسفره و برهمکنش سال در منبع کود فسفره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار 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 $76/5$ و $78/58$ میلی‌گرم 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 $44/16$ و $39/33$ میلی‌گرم بر کیلوگرم از تیمار P_0 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 $67/53$ میلی‌گرم بر کیلوگرم از کشت مخلوط A_1S_2 به دست آمد و کمترین محتوای روی ($57/43$ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مربوط به A_0 بود که تفاوت معنی‌داری با الگوی کشت A_2S_1 نداشت. نتایج نشان داد که کشت مخلوط A_1S_2 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 برون‌ریشه‌ای و باکتری‌های محرک رشد با تولید هورمون اکسین و تحریک رشد ریشه و ریشه‌های موئی باعث گسترش منطقه جذب گیاه در خاک و افزایش مواد غذایی می‌شوند. همچنین دقت در محتوای روی در تیمارهای مختلف کودی نشان می‌دهد که در سطوح بالای مصرف کود فسفات 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.

۳-۸. محتوای روی عدس الملک

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 معنی دار 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 میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین محتوای روی را به خود اختصاص دادند. کمترین محتوا از تیمار کودی P_0 به ترتیب با میانگین ۴۲/۲۵ و ۴۱/۲۵ میلی‌گرم 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 عدس الملک از سامانه A_1S_2 و در تیمار کودی MB (۸۴/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود که تفاوت معنی‌داری با الگوهای کشت A_1S_1 و S_0 نداشت. کمترین محتوای روی (۳۵/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مربوط به سامانه A_2S_1 و در تیمار کودی P_0 بود (جدول ۴). بررسی دقیق‌تر نتایج نشان داد که در هر سطح از مصرف کود فسفره کشت مخلوط (A_1S_2) 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 به‌طور مؤثرتری عنصر روی را جذب کند (Zhang et al., 2018).

۳-۹. عملکرد دانه زنبان

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 زنبان 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 معنی‌داری 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 P_0 به دست آمد (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سال در کشت 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 A_0 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 A_1S_2 بود (جدول ۸).

افزایش مصرف کود فسفره به واسطه افزایش قدرت رویشی و زایشی گیاه، باعث افزایش عملکرد دانه در گیاه می‌شود. با توجه به اینکه فسفر نقش مهمی در فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان دارد، کودهای زیستی با قابلیت حل شدن فسفات‌های غیر قابل حل توسط ریزجانداران از طریق تولید اسیدهای آلی و سیدروفور در افزایش جذب عناصر غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد دانه مؤثر می‌باشند (Etesami et al., 2021). افزایش محتوای عناصر مهمی چون نیتروژن، فسفر و روی نقش مهمی در افزایش رشد رویشی، افزایش کارایی فتوسنتزی و بهبود رشد گیاهان خواهد داشت که این فرآیند در تیمارهای تلفیقی به وضوح قابل مشاهده بود. بسیاری از محققان (Kumar et al., 2009; Adesemoye et al., 2008) به نقش مثبت ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، بر عملکرد محصولات زراعی مختلف اشاره کرده‌اند و آن را به ترشح هورمون‌های گیاهی، تولید و آزادسازی انواع اسیدهای آلی در خاک، تثبیت نیتروژن و در نهایت، برهمکنش مثبت بین آنها و سایر ریزموجودات خاک نسبت داده‌اند. این ریزوباکتری‌ها از طریق تولید موادی مانند ایندول‌استیک‌اسید باعث افزایش رشد گیاه می‌شوند و در مراحل اولیه رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، در نتیجه حجم بیشتری از خاک را اشغال می‌کنند، سطح جذب را افزایش می‌دهند و با تأثیر مثبتی که بر فتوسنتز به دلیل دوام سطح برگ گیاه در اثر تولید مواد پرورده بیشتر ایجاد می‌کنند (Kumar et al., 2009) منجر به افزایش عملکرد دانه و زیستی در گیاه خواهند 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 گونه‌ای دانستند.

جدول ۶. تجزیه واریانس کشت مخلوط و کود فسفره بر عملکرد دانه زنیان و عدس‌الملک.

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 معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.
^{ns}, *, **: Non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

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).

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

Phosphorus Fertilizer	Grain yield of ajowan (kg ha ⁻¹)		Grain yield of coronilla (kg ha ⁻¹)	
	Year 1	Year 2	Year 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 + باکتری + 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.

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 S₀ به دست آمد. کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب در سال‌های اول و دوم با میانگین‌های ۶۹/۹ و ۸۸/۸ گرم در مترمربع از تیمار P₀ 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 S₀ 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 A₂S₁ 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 شنبليله و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار یک ردیف شنبليله: دو ردیف کتان روغنی بوده است که با هم اختلاف معنی‌داری را نشان دادند که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. با مطالعه روند رشد شاهدانه و کنجد در کشت مخلوط، مشاهده شد که تجمع ماده 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 اینکه 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.

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

Table 8. Mean comparison of the year \times cropping system interaction on grain yield of ajowan and coronilla.

Cropping Systems	Seed yield of ajowan (kg ha ⁻¹)		Seed yield of coronilla (kg ha ⁻¹)	
	Year 1	Year 2	Year 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.

۴. 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 A₁S₂ (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 بین گونه‌ای و بهینه‌سازی استفاده از منابع، به‌ویژه 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.

۵. تشکر و قدردانی

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

۶. تعارض منافع

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

۷. منابع

- Adesemoye, A.O., Torbert, H., & Kloepper, 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.
- 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.
- 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.
- 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.`
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 radiate* L.). *Food and Energy Security*, e319. DOI: e319. DOI: 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.
- 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.
- Janati, M., Benmrud, B., Elhaissofi, 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.
- 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.
- 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).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Varma, A., Prasad, R., & Tuteja, N. (2018). *Mycorrhiza: Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration*. Springer International Publishing, 533p. DOI: 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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>.