Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 17, No. 1, 2025, p. 15-35

Evaluation of the Performance and Growth Indices of Green Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and Black Cumin (*Nigella sativa* L.) in a Replacement Intercropping System

Mahna sadat Ghotb Sharif[1], Gorban Ali Asadi[2]* and Mohammad Javad Mostafavi[1]

1 and 2- PhD student and Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding author's Email: asadi@um.ac.ir)

Received: 18-05-2024
Revised: 11-01-2025
Accepted: 27-01-2025
Available Online: 21-05-2025

How to cite this article:
Ghotb Sharif, M.S., Asadi, G. A., & Mostafavi, M.J. (2025). Evaluation of the performance and growth indices of green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and black cumin (*Nigella sativa*) in a replacement intercropping system. *Journal of Agroecology*, *17(1)*, 15-35. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22067/agry.2025.86304.1185

Introduction

Due to rapid population growth and the reduction of arable land, the most effective way to increase crop yields is by boosting production per unit area. So far, many studies have shown the positive effect of intercropping on LAI (Leaf area index), TDM (Total dry matter) ($g.m^{-2}$), CGR (Crop growth rate) ($g.m^{-2}.day^{-1}$), RGR (Relative growth rate) ($g.g^{-1}.d^{-1}$), and NAR (Assimilation rate) ($g.m^{-2}_{Leaf}.day^{-1}$) growth indices, and so on. Therefore, this study aimed to evaluate and compare the yield and growth indices of green bean and black seed in sole culture and replacement intercropping ratios.

Materials and Methods

The experiment was conducted based on RCBD design during the growing season 2018-19. Treatments included replacement intercropping ratios including 25% green bean + 75% black seed (P1N3), 50% green bean + 50% black seed (P2N2), 75% green bean + 25% black seed (P3N1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N). Irrigation was done once a week, and sampling was performed once every 10 days. The effect of different replacement intercropping ratios on growth indices during the growth period was investigated. The curve function was fitted using Slide Write ver 2.0 software, and Excel 2016 was used to draw figures.

Results and Discussion

The results showed that the treatments affected the growth indices of green bean and black seed. The highest LAI of bean and the black seed (3.53 and 0.5) were observed in the sole culture of these crops. The lowest LAI of green bean (1.14) and black seed (0.2) were obtained in P2N2 and P3N1 treatments. The sole cultures had the highest TDM for green bean (973.34 $g.m^{-2}$) and black seed (339.55 $g.m^{-2}$). The lowest TDM of green bean and black seed were observed in P1N3 (164.25 $g.m^{-2}$) and P3N1 (91.18 $g.m^{-2}$) treatments, respectively. The highest crop growth rate (CGR) of green bean (10.83 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) and black seed (25.71 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) were recorded in their respective sole cropping systems at 73 and 82 days after planting. P3N1 and P2N2 treatments had the highest

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/agry.2025.86304.1185

RGR of green bean (0.1 $g.g^{-1}$ d^{-1}) and black seed (0.13 $g.g^{-1}.d^{-1}$), respectively. The highest NAR of green bean (14.95 $g.m^{-2}.d^{-1}$) and black seed (48.24 $g.m^{-2}.d^{-1}$) were recorded at 72 days after planting in P2N2 and 63 days after the planting in sole culture of black seed, respectively. The highest yields of green bean and black seed were obtained in P3N1 and P2N2 treatments, respectively, which did not differ significantly from their sole culture. The land equivalent ratio (LER) for the P1N3 treatment was close to one, while the LER values for the P2N2 and P3N1 treatments were greater than one. This suggests that the P2N2 and P3N1 treatments utilized arable land more effectively and ecologically compared to the P1N3 treatment. The findings can be considered as a reason for improving crop yields due to improving ecological efficiency in the intercropping.

Conclusion

The results revealed that the intercropping of black seed with green bean improved the growth of this medicinal plant. In both crops, the Leaf area index, total dry matter, and crop growth rate in sole culture were higher than in other treatments due to their higher plant density; however, the relative growth rate and assimilation rate were also improved in the intercropping treatments. Thus, the intercropping of green bean and black seed would be beneficial from the perspective of ecological management. In general, the replacement of half of the black seed planting density with green bean can be considered beneficial in terms of productivity in crop production.

Keywords: Assimilation Rate, Crop growth rate, Growth physiological indices, Medicinal plant

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤، ص ۳۵-۱۵

بررسی عملکرد و شاخص‌های رشد لوبیاسبز (*Phaseolus vulgaris* L.) و سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در سیستم کشت مخلوط جایگزینی

مهناسادات قطب شریف[۱]، قربانعلی اسدی[۲]* و محمدجواد مصطفوی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

چکیده

کشت مخلوط گیاه دارویی سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) با حبوبات به‌سبب اختلاف مورفولوژیک و تثبیت بیولوژیکی آن‌ها می‌تواند گامی در جهت پایداری در کشاورزی باشد. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی و مقایسه عملکرد محصول و شاخص‌های‌رشدی لوبیاسبز (*Phaseolus vulgaris* L.) و سیاه‌دانه در کشت‌های‌خالص و نسبت‌های مخلوط جایگزینی بود. بدین منظور، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. تیمارها شامل کشت مخلوط جایگزینی با نسبت: ۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های‌خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N) بود. سطح برگ نمونه‌ها به‌روش وزنی و با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج (به‌صورت تخریبی) و ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی انجام شد. بیشترین شاخص سطح برگ از کشت خالص لوبیاسبز و سیاهدانه به‌ترتیب ۳/۵۳ و ۰/۵به دست آمد و کمترین میزان آن در لوبیاسبز مربوط به تیمار کشت مخلوط P_2N_2 (۱/۱۴) و در سیاهدانه نیز کمترین مقدار مربوط به تیمار P_3N_1 (۰/۲) بود. همچنین تجمع ماده خشک در کشت خالص لوبیاسبز ۹۷۳/۳۴ گرم در مترمربع و در کشت خالص سیاه‌دانه ۳۳۹/۵۵ گرم در مترمربع و کمترین تجمع ماده خشک لوبیاسبز در تیمار P_1N_3 (۱۶۴/۲۵ گرم در مترمربع) و در سیاه‌دانه در تیمار P_3N_1 (۹۱/۱۸ گرم در مترمربع) حاصل شد. بیشترین میزان رشد لوبیاسبز و سیاه‌دانه در کشت خالص آن‌ها به‌ترتیب ۱۰/۸۳و ۲۵/۷۱ گرم در مترمربع در روز بود که ۷۳ و ۸۲ روز پس از ظهور بود. بالاترین عملکرد محصول لوبیاسبز و سیاه‌دانه به‌ترتیب در تیمارهای P_3N_1 و P_2N_2 به دست آمد. مقدار نسبت برابری زمین برای تیمارهای P_2N_2 و P_3N_1 بالاتر از یک بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش، تیمار P_2N_2 نسبت به سایر تیمارها از نظر اقتصادی و اکولوژیک سودمندتر بود.

واژه‌های کلیدی: سرعت آسیمیلاسیون، سرعت رشد محصول، شاخص‌های فیزیولوژیک رشد، گیاه دارویی

مقدمه

عدم رعایت اصول اکولوژیک در تولید محصولات زراعی و نگرش های تک‌بعدی با تأکید بر جنبه‌های اقتصادی در کشاورزی سبب تخریب منابع محیطی و کاهش کارآیی منابع شده است (Koocheki et al., 2019). سیستم‌های کشاورزی فشرده موجب بروز برخی اثرات جانبی نظیر فرسایش شدید خاک، آلودگی‌های نگران‌کننده زیست محیطی، هجوم آفات و علف‌های هرز و مقاومت آنان به سموم کشاورزی شده و هم‌چنین کاهش تنوع گیاهان در سیستم‌های کشاورزی را سبب شده است (Koocheki et al., 2010b). بنابراین متخصصان ارتقاء مجدد تنوع زیستی در سیستم‌های زراعی با بهره‌گیری از کشت مخلوط را جهت رفع برخی از این مشکلات پیشنهاد می‌کنند (Koocheki et al., 2019).

کشت مخلوط به‌صورت کشت دو یا بیش از دو گیاه با هم در یک قطعه زمین تعریف می‌شود (Hong et al., 2019). هدف اصلی از

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: asadi@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/agry.2025.86304.1185

کشت مخلوط، افزایش تولید در واحد مساحت زمین و افزایش کارآیی منابع قابل دسترس گیاهان از طریق ارتقاء بهره‌وری اکولوژیکی منابع است (Verret et al., 2020Lal et al., 2019 ;). در واقع، کشت مخلوط به‌دلیل فراهم نمودن شرایط برای استفاده کارآمدتر از منابع و کاهش تداخل علف‌های هرز، حشرات و آفات اغلب می‌تواند بازده بیشتری نسبت به تک کشتی اجزای خود داشته باشد (Echarte et al., 2011). آنالیز رشد گیاه، ابزاری است که به‌طور گسترده در زمینه های مختلف از جمله اصلاح نباتات، فیزیولوژی و بوم‌شناسی کاربرد دارد. شاخص‌های رشد نشان‌دهنده استفاده گیاه و اندام‌های مختلف آن از منابع موجود می‌باشد (Bagheri et al., 2012) و در تعیین چگونگی رشد و عملکرد از اهمیت به‌سزایی برخوردارند (Baygi et al., 2017). با توجه به استفاده کارآمدتر از منابع، گزارش‌های بسیاری بیانگر برتری شاخص‌های رشد گیاهان در شرایط کشت مخلوط نسبت به تک کشتی در دسترس است. در بررسی کشت مخلوط کنجد (*Sesamum indicum*) و شاهدانه (*Cannabis sativa*) بیش‌ترین مقدار سرعت رشد محصول، شاخص سطح برگ و تجمع ماده خشک شاهدانه در تیمار۵۰:۵۰ کنجد و شاهدانه گزارش شده است (Koocheki et al., 2010a). پورامیر و همکاران (Pouramir et al., 2010) نیز در بررسی کشت مخلوط کنجد و نخود (*Cicer arietinum* L.) اعلام کردند که شاخص سطح برگ و تجمع ماده خشک در تک کشتی نسبت به تیمارهای کشت مخلوط در سطح پایین‌تری قرار دارند. رضوانی مقدم و همکاران (Rezvani Moghaddam et al., 2009) کشت مخلوط ماش (*Vigna radiata*) و سیاه‌دانه را مفید می‌دانند و در توضیح این امر چنین بیان کردند که با توجه به حساسیت گیاه مورد مطالعه به‌ویژه سیاه‌دانه به علف‌های هرز، کاهش تعداد گونه و زیست‌توده علف‌های هرز در این کشت مخلوط و افزایش پتانسیل استفاده از نهاده‌های داخلی به‌دلیل اشغال کمتر نیچ‌های اکولوژیک مشترک علف‌های هرز و گونه‌های مخلوط می‌تواند شرایط رشدی را به‌نفع گونه‌های مخلوط تغییر دهد. افزایش تجمع ماده خشک، سرعت رشد و شاخص سطح برگ سویا در کشت مخلوط نسبت به تک کشتی در کشت مخلوط سویا (*Glycine max*)، ریحان رویشی و گاوزبان اروپایی دلیلی بر سودمندی کشت مخلوط است (Bagheri et al., 2012). البته در کنار برتری شاخص های رشدی در کشت مخلوط، به‌دلیل افزایش رقابت درون‌گونه‌ای و بین‌گونه‌ای بین اجزای آن گزارش‌های گوناگونی نیز از کاهش این شاخص‌ها نسبت به تک کشتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش تجمع ماده خشک، شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول در مخلوط زیره سبز و موسیر نسبت به تک کشتی آن‌ها اشاره نمود (Meshkani et al., 2019). هم‌چنین کاهش تجمع ماده خشک و شاخص سطح برگ در مخلوط سیاه‌دانه، همیشه‌بهار و گاوزبان اروپایی نسبت به تک کشتی آن‌ها گزارش شده است (Naghipoor Dehkordi et al., 2016). کاهش تجمع ماده خشک در مخلوط نخود فرنگی (*Pisum sativum*) و برخی از غلات نسبت به تک کشتی آن‌ها بیان شده است (Lithourgidis et al., 2011).

در واقع، کشت مخلوط زمانی موفقیت‌آمیز است که مجموع رقابت بین‌گونه‌ای برای کسب منابع از مجموع رقابت دورن‌گونه‌ای کمتر باشد (Khorramdel et al., 2016). گیاهان در سیستم مخلوط را می‌توان طوری انتخاب کرد که یک گونه مستقیماً از تغییرات محیطی، که توسط گونه‌های دیگر در کشت مخلوط به وجود می‌آید، سود ببرد (Abdollahpour et al., 2020). بنابراین، اگر اجزای تشکیل‌دهنده کشت مخلوط در نحوه استفاده از منابع محیطی متفاوت عمل کنند، از این منابع به‌طور مؤثرتری استفاده خواهد شد و در نتیجه، عملکرد افزایش می‌یابد (Khorramdel et al., 2016). بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در مورد سامانه‌های کشت مخلوط، تأییدی بر این ادعا است. فنگ و همکاران (Feng et al., 2020) در بررسی کشت مخلوط ذرت (*Zea mays*) و سویا بیان داشتند که بهره‌گیری از کشت مخلوط موجب بهبود عملکرد هر دو گیاه نسبت به کشت خالص آن‌ها شد. در آزمایشی دیگر به‌منظور ارزیابی کشت مخلوط جایگزینی و افزایشی زنیان (*Carum copticum* L.) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) بر عملکرد و اجزای آن مشخص شد که به‌دلیل کاهش رقابت بین‌گونه‌ای به درون‌گونه‌ای از طریق استفاده از عوامل بهینه محیطی کشت مخلوط موجب بهبود عملکرد هر دو گونه شد (Khorramdel et al., 2016). در بررسی عملکرد گیاه دارویی سیاه‌دانه در کشت مخلوط با نخود و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) نشان دادند که کشت سیاه‌دانه به‌صورت مخلوط با دو گیاه نخود و لوبیا سبب افزایش عملکرد این گیاه می‌شود (Koocheki et al., 2014b). در آزمایشی دیگر، ارزیابی‌های رشد و عملکرد لوبیا در کشت مخلوط ردیفی با برخی از گونه‌های دارویی (رازیانه (*Foeniculum vulgare*)، سیاه‌دانه، ریحان (*Ocimum basilicum*)، گل همیشه‌بهار (*Calendula officinalis*) و شوید

(*Anethum graveolens*)) نشان داد که تیمارهای کشت مخلوط تأثیر معنی‌داری روی رشد و عملکرد روی هر پنج گونه دارویی داشت (Valizadeh, 2017).

یکی از مرسوم‌ترین انواع کشت مخلوط، کشت گیاهان سایر تیره ها با گیاهان تیره بقولات می‌باشد (Verret et al., 2020). کاشت گونه‌های تثبیت‌کننده نیتروژن نیز در تولید گیاهان دارویی امری ضروری به نظر می‌رسد (Abdollahpour et al., 2020) و لازمه تولید این گیاهان، حذف نهاده‌های شیمیایی در مزرعه است (Khorramdel et al., 2016)؛ زیرا گیاهان دارویی معمولاً گیاهان مرتعی هستند و بسیاری از آن‌ها کمتر مورد توجه اصلاح‌گران گیاهی قرار گرفته‌اند، بنابراین عملکرد این گیاهان در مزرعه در پاسخ به نهاده های معمول کشاورزی کمتر افزایش می‌یابد (Naghipoor Dehkordi, 2015). هم‌چنین کشت مخلوط بقولات با گیاهان دارویی به‌دلیل همزیستی با باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن نقش مؤثری در افزایش حاصلخیزی خاک دارد (Alizadeh et al., 2013) و در جهت افزایش کمیت و کیفیت گیاهان دارویی حائز اهمیت است (Mohammadi & Rezaei-Chiyaneh, 2019). سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) گیاه دارویی یک‌ساله با دوره رشد کوتاه است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌روید (Rezvani Moghaddam & Seyyedi, 2015) که علی‌رغم نقش قابل توجه این گیاه در درمان بیماری‌ها و صنایع غذایی و دارویی، تحقیقات به‌زراعی کافی برای این گیاه انجام نپذیرفته است (Amirmoradi & Rezvani Moghaddam, 2011).

بنابراین با توجه به اهمیت حبوبات در بوم‌نظام‌های فشرده کشت مخلوط و نیاز به تکمیل و بسط دانسته‌ها در خصوص نحوه و میزان تأثیر کشت مخلوط این گیاهان با گیاهان دارویی، هدف از انجام این آزمایش، ارزیابی میزان تغییرات شاخص‌های رشدی گیاهان لوبیاسبز و سیاه‌دانه در کشت مخلوط جایگزینی در شرایط آب‌وهوایی مشهد بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد انجام شد. آزمایش بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل نسبت‌های کشت مخلوط جایگزینی لوبیاسبز و سیاه‌دانه شامل: ۱) ۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۲) ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۳) ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، ۴) کشت خالص لوبیاسبز (P) و ۵) کشت خالص سیاه‌دانه (N) بود.

زمین مورد استفاده، در سال قبل از اجرای این آزمایش تحت کاشت ذرت بود. به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک پیش از انجام آزمایش نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک انجام گردید که نتایج آنالیز آن در جدول ۱ ذکر شده است. پیش از اجرای آزمایش به‌منظور کم کردن فشار علف‌های هرز در مزرعه، بستر کاذب با استفاده از دیسک و آبیاری زمین در فروردین ۹۸ انجام شده بود و نابودسازی علف‌های هرز رشدیافته نیز با زدن مجدد دیسک انجام شد. آماده‌سازی زمین در ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۸ با انجام شخم برگردان‌دار و دو دیسک عمودبرهم انجام شده و پس از آن، تسطیح زمین با استفاده از لولر انجام شد. با استفاده از فاروئر نیز جوی و پشته‌هایی با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر ایجاد شد و سپس کرت‌بندی انجام شد. مساحت هر کرت آزمایشی هشت مترمربع و فاصله کرت‌های مجاور از یکدیگر یک متر تعیین شد. در هر کرت، هشت ردیف برای کاشت در نظر گرفته شد. همچنین، فاصله بین کرت‌ها نیز با کاشت گیاهان کرت‌های مجاور پر شد تا تمامی ردیف‌های کاشت جهت نمونه‌برداری‌های بعدی قابل استفاده باشند. بذر لوبیاسبز رقم سانری و بذر خالص سیاه‌دانه توده محلی تهیه شد. تراکم کاشت برای تیمار کشت خالص گیاه لوبیاسبز (P) ۲۵ بوته در مترمربع (Koocheki et al., 2014a) و سیاه‌دانه (N) ۸۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. تیمارهای مخلوط نیز با رعایت تراکم نسبت به کشت خالص کاشته شدند. در سیستم کشت مخلوط جایگزینی، بخشی از تراکم گیاه اصلی با تراکم گیاه دوم جایگزین می‌شود. این روش برای ایجاد تعادل بین دو گونه مختلف و بررسی تعاملات رقابتی یا تسهیلی آن‌ها استفاده شد. تراکم پایه برای هر گونه در حالت کشت خالص تعیین شد. نسبت‌های مختلف جایگزینی برای ترکیب دو گونه تعریف شدند. کرت‌ها با مساحت مشخص (هشت مترمربع) طراحی شدند. گیاهان به‌صورت منظم و در فواصل مشخص از یکدیگر کاشته شدند تا تراکم نهایی هر تیمار حفظ شود.

آبیاری مزرعه به‌صورت سطحی (جوی و پشته) انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و دومین آبیاری به‌منظور اطمینان از جوانه‌زنی و استقرار مناسب گیاهچه‌ها سه روز بعد از کاشت انجام شد

و پس از آن، آبیاری مزرعه آزمایشی با توجه به نیاز آبی گیاه و معمولاً با دوره‌های هفت روزه انجام شد. وجین دستی علف‌های هرز به‌صورت مستمر و تا بسته شدن تاج‌پوشش ادامه یافت. به‌منظور بررسی آزمایش در شرایط کم‌نهاده، در زمان آماده‌سازی زمین و در طول فصل رشد گیاهان از هیچ‌گونه نهاده شیمیایی همچون سم و کود استفاده نشد و در طول فصل رشد نیز گیاهان با بیماری یا آفتی روبه‌رو نشدند.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Some physicochemical properties of the soil of experimental field

بافت Texture	اسیدیته pH	شوری Salinity ($dS.m^{-1}$)	نیتروژن کل Total N (%)	فسفر قابل جذب Available P (%)	پتاسیم قابل جذب Available K (%)
Clay loam لوم رسی	7.52	1.86	2.66	0.523	2.34

با توجه به هدف آزمایش، نمونه‌برداری در طول فصل رشد برای ثبت روند شاخص‌های رشدی از هر دو گیاه مورد بررسی، ۵۶ روز پس از کاشت[۱] آغاز شده و با فاصله زمانی هر ۱۰روز یک بار انجام شد. در این آزمایش، با توجه به طول دوره رشد متفاوت دو گونه مخلوط، پنج نوبت نمونه‌برداری برای گیاه سیاه‌دانه (تا ۹۶ روز پس از کاشت) و شش نوبت نمونه‌برداری برای گیاه لوبیاسبز (پنج نمونه‌برداری تا ۹۶ روز پس از کاشت و نمونه‌گیری ششم و پایانی ۱۳۳ روز پس از کاشت) انجام پذیرفت.

نمونه‌ها شامل اندام هوایی گیاهان بودند. گیاهان به‌صورت تصادفی از خطوطی انتخاب شدند که هر دو گونه (سیاه‌دانه و لوبیاسبز) به‌طور مساوی رشد یافته بودند. سطح برگ هر گونه به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری شد و سپس با توجه به نسبت ترکیب کشت محاسبه و به واحد مترمربع تعمیم داده شد. برای اندازه‌گیری شاخص‌های رشد، سه گیاه از هر کرت با داس از سطح خاک بریده شدند، سپس درون پاکت‌های کاغذی جداگانه‌ای دارای برچسب مشخص قرار گرفتند و برای تحلیل‌های بیشتر به آزمایشگاه منتقل شدند. سطح برگ نمونه‌ها با روش وزنی و استفاده از دستگاه Leaf Area Meter (Licor LI-3100) و ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. داده‌های سطح برگ با توجه به تراکم هر محصول برای محاسبه شاخص سطح برگ (LAI) استفاده شدند.

پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس وزن‌کشی شدند. داده‌های به‌دست‌آمده برای محاسبه تجمع ماده خشک (TDM) استفاده شد. میانگین داده‌های هر تیمار از سه بلوک محاسبه شد. برای تحلیل شاخص‌های رشد گیاهی، از روش کلاسیک (Valizadeh, 2017) و همچنین مدل‌های تابعی استفاده شد. در روش تابعی، توابع مناسب به داده‌ها برازش داده شدند تا مقادیر روزانه هر شاخص برای تمام روزهای بین اولین تا آخرین نمونه‌برداری محاسبه شود (Ghotbe Sharif et al., 2021).

شاخص‌های رشد مورد مطالعه شامل: سرعت رشد محصول (CGR)، سرعت آسیمیلاسیون خالص (NAR)، سرعت رشد نسبی (RGR)بودند. این شاخص‌ها برای هر دو گیاه (سیاه‌دانه و لوبیاسبز) محاسبه شدند و در ادامه، جزئیات این توابع معرفی و توضیح داده می‌شوند.

تغییرات روزانه شاخص سطح برگ هر تیمار با برازش تابع لجستیکی (چهار پارامتری) به داده‌های اندازه‌گیری‌شده برآورده شد (Yusuf et al., 1999):

$$LAI = \frac{a + b.4(exp(-(t-c)/d))}{(1 + exp(-(t-c)/d))^2} \quad (۱)$$

که در آن، LAI: شاخص سطح برگ، a و d: ضریب معادله، b: بیشینه شاخص سطح برگ و c: زمان عطف رشد نمایی منحنی و t: تعداد روز پس از سبز شدن می‌باشد.

مقدار روزانه تجمع ماده خشک نیز با برازش معادله ۲ بر داده‌های مربوطه محاسبه گردید (Yusuf et al., 1999).

$$TDM = \frac{a}{1 + b.exp(-ct)} \quad (۲)$$

۱- «روز پس از کاشت» به‌عنوان یک شاخص زمانی معادل مراحل رشد و نمو گیاه در شرایط آزمایش در نظر گرفته شده است.

که در آن، TDM: ماده خشک تجمع‌یافته در هر روز، a: بیشینه ماده خشک تولیدشده، c: میانگین سرعت رشد نسبی، b: ضریب معادله و t: تعداد روز پس از سبز شدن گیاه می‌باشد. مشتق اول معادله ۲ سرعت رشد محصول (CGR) را برحسب ($g.m^{-2}.d^{-1}$) به دست می دهد (معادله ۳) بنابراین ضرایب معادله برای هر دو معادله یکسان خواهد بود (Yusuf et al., 1999):

$$CGR = \frac{d\ TDM}{dt} = \frac{a.b.c.exp(-ct)}{(1+b.exp(-ct))^2} \quad (۳)$$

و سرعت رشد نسبی (RGR) نیز از مشتق دوم معادله ۲ برحسب (گرم بر گرم در روز) به دست می‌آید (معادله ۴) و ضرایب آن برابر با ضرایب معادله ۲ است (Yusuf et al., 1999):

$$RGR = \frac{d_2\ TDM}{dt} = \frac{b.c.exp(-ct)}{1+b.exp(-ct)} \quad (۴)$$

با معلوم بودن مقادیر CGR و LAI، سرعت فتوسنتز خالص (NAR، گرم بر مترمربع برگ در روز) نیز از معادله ۵ محاسبه خواهد شد (Yusuf et al., 1999).

$$NAR = \frac{CGR}{LAI} \quad (۵)$$

محاسبه CGR و RGR در هر نوبت از نمونه‌برداری براساس معادله ۶ و NAR از معادله ۷ برای اطمینان از صحت شاخص‌های رشد به‌دست‌آمده از روش تابعی به دست آمد (Heidari & Mohammadi, 2015):

$$CGR = RGR * DM \quad (۶)$$

$$CGR = LAI * NAR \quad (۷)$$

پس از زرد شدن بوته‌ها در پایان فصل رشد (سیاه‌دانه ۲۷ مرداد ماه، لوبیاسبز طی سه چین ۶ و ۲۴ شهریور ماه و ۱۵ مهرماه)، اندازه گیری عملکرد نهایی با حذف اثرات حاشیه‌ای در تاریخ‌های ذکرشده از نیمی از کرت‌ها به ابعاد ۱/۵ × ۲ مترمربع که در طول دوره رشد دست‌نخورده باقی ماندند، انجام شد. غلاف‌های تازه (تر) عملکرد اقتصادی لوبیاسبز است. عملکرد اقتصادی این محصول براساس وزن غلاف‌های تر محاسبه شد.

برای ارزیابی کارآیی و سودمندی کشت مخلوط از معیار نسبت برابری زمین (LER; Land Equivalent Ratio) استفاده شد (Allahdadi et al., 2013).

نسبت برابری زمین (LER) از معادله ۸ به دست آمد:

$$LER = \left(\frac{Y_{ab}}{Y_{aa}} + \frac{Y_{ba}}{Y_{bb}}\right) = LER_a + LER_b \quad (۸)$$

که در آن، Y_{ab}: عملکرد گونه a در کشت مخلوط، Y_{aa}: عملکرد گونه a در کشت خاص، Y_{ba}: عملکرد گونه b در کشت مخلوط و Y_{bb}: عملکرد گونه b در کشت خالص است.

در تیمارهای کشت خالص، هر گونه (سیاه‌دانه و لوبیاسبز) به‌صورت جداگانه در کرت‌هایی با اندازه مشخص کشت شد. عملکرد هر گونه در زمان برداشت نهایی از تمام پلات‌های کشت خالص اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد. عملکرد هر گونه در کشت مخلوط به‌صورت جداگانه ثبت شد (عملکرد سیاه‌دانه و لوبیاسبز به‌طور مجزا اندازه‌گیری شد). برای این منظور، از برداشت تفکیکی گیاهان دو گونه در هر کرت استفاده شد.

برازش توابع (معادله‌ها) و رسم شکل‌ها به‌ترتیب با استفاده از نرم افزارهای Slide Write ver 2.0 و MS Excel 2016 انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS ver.9.2 و میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

استفاده از شاخص‌های رشدی یکی از روش‌های ارزیابی بهره‌وری سیستم‌های کشت مخلوط است (Ranjbar, 2012). تجزیه و تحلیل رشد، تکنیکی است که به‌وسیله آن می‌توان آنچه را که در طول دوره رشد برای گیاه رخ می‌دهد، شناسایی کرد. تنها اندازه‌گیری دو عامل سطح برگ و وزن خشک در فواصل مکرر، لازمه تجزیه و تحلیل رشد است (Yusuf et al., 1999).

الف) شاخص سطح برگ (LAI): حاصل برازش تابع ۱ به داده‌های آزمایشی در جدول ۲ آمده است.

بیشترین مقدار ضریب b که نشان‌دهنده حداکثر مقدار شاخص برگ بوده برای هر دو گیاه، در کشت خالص بیشینه مقدار خود را داشت (برای لوبیاسبز ۲/۶۲ و برای سیاه‌دانه ۰/۳۹؛ جدول ۲). حداقل مقدار این ضریب نیز برخلاف انتظار، برای لوبیاسبز نه در تیمار دارای کمترین تراکم این گیاه (۲۵ درصد لوبیا : ۷۵ درصد سیاه‌دانه) بلکه در تیمار ۵۰ درصد لوبیاسبز : ۵۰ درصد سیاه‌دانه با مقدار ۰/۷ بود که برخلاف تراکم ۵۰ درصدی نسبت به تیمار کشت خالص، در حدود ۲۶ درصد تیمار کشت خالص بود. در خصوص سیاه‌دانه نیز ضرایب ۰/۳۹، ۰/۲۱، ۰/۱۹ و ۰/۱۸ به تیمارهای کشت خالص و تیمارهای تراکم ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد سیاه‌دانه تعلق داشت (جدول ۲).

جدول ۲- ضرایب تابع و تابع منحنی برازش‌یافته به داده‌های شاخص سطح برگ (LAI) تیمارهای مختلف برای لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

Table 2- Equation and the coefficients of curve fitted to the LAI data of different treatments of green bean (P) and black seed (N)

$$LAI = \frac{a + b.4(exp(-(t-c)/d))}{(1 + exp(-(t-c)/d))^2}$$

گیاه Plant	تیمار Treatment	a	b	c	d
لوبیاسبز Green bean (P):	P_1N_3	0.274638	0.892895	89.449287	5.316526
	P_2N_2	0.438944	0.706645	89.082449	4.152332
	P_3N_1	0.852799	2.014248	89.557143	4.831859
	Sole P	0.905574	2.62755	90.268788	8.141548
سیاه‌دانه Black seed (N):	P_1N_3	0.048418	0.216574	79.180437	-5.682078
	P_2N_2	0.045719	0.196518	77.587779	-5.817879
	P_3N_1	0.017364	0.184912	78.167294	-6.656804
	Sole P	0.105975	0.395002	78.374384	-4.531308

به‌طور کلی، کشت خالص شرایط بهینه‌تری برای رشد سطح برگ و تجمع منابع گیاهان فراهم می‌کند، درحالی‌که کشت مخلوط به‌دلیل رقابت منابع، کاهش عملکرد برگ را به همراه دارد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که شاخص سطح برگ (LAI)[1] در کشت خالص بیشینه مقدار خود را دارد. برای مثال، در تحقیقی روی سیستم‌های کشت گندم و لوبیا، مشخص شد که شاخص سطح برگ در کشت خالص گندم به‌دلیل نبود رقابت بر سر نور و مواد غذایی بالاتر بود (Tavoletti & Merletti, 2022). در کشت مخلوط، رقابت بین گیاهان برای جذب منابع محیطی باعث کاهش عملکرد گیاهان می شود. مطالعه‌ای روی گندم و لوبیا نشان داد که در کشت مخلوط، شاخص سطح برگ کاهش می‌یابد، زیرا منابع محیطی به‌طور غیرمتوازن بین گونه‌ها توزیع می‌شود (Eskandari & Ghanbari, 2010).

هم‌چنین، با بررسی ضریب c (جدول ۲) به نظر می‌رسد که زمان عطف رشد نمایی منحنی سطح برگ لوبیاسبز و سیاه‌دانه به‌طور میانگین به‌ترتیب پس از ۸۹/۶ و ۷۸/۳ روز پس از کاشت بوده است. تفاوت هر دو گیاه در تیمارهای مختلف در زمان رسیدن به بیشینه سطح برگ، کمتر از یک روز بود که با توجه به اختلاف ناچیز سطح برگ اضافه‌شده به هر گیاه در هر تیمار در طی این حدود کمتر از یک روز می‌توان آن را اختلافی اندک به‌حساب آورده و از آن اغماض کرد. باید توجه داشت که مطالعه دقیق اختلاف موجود در تیمارها نیازمند بررسی روند تغییرات شاخص سطح برگ در طی فصل رشد است که در ادامه انجام می‌شود.

در این آزمایش، شاخص سطح برگ هر دو گیاه لوبیاسبز و سیاه‌دانه تحت تأثیر نسبت‌های کشت مخلوط جایگزینی قرار گرفتند، سطح برگ در اوایل دوره رشد به‌طور نمایی افزایش یافته و پس از مدتی کاهش پیدا کرد، تا اینکه سرعت افزایش این شاخص پس از گل‌دهی هر دو گیاه به صفر رسید و در نتیجه، شاخص سطح برگ گیاهان ثابت شد و پس از مدت کوتاهی از گل‌دهی، روندی کاهشی تا پایان دوره رشد گیاه مشاهده شد (شکل ۱). یافته‌های تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که همبستگی بالایی بین شاخص سطح برگ و عملکرد گیاه زراعی وجود دارد (Naghipoor Dehkordi et al., 2016; Ghotbe Sharif et al., 2021). شاخص سطح برگ نشان‌دهنده میزان سطح برگ‌های گیاه در واحد سطح زمین است و به‌طور مستقیم با توانایی گیاه در دریافت نور خورشید و انجام فرآیند فتوسنتز ارتباط دارد. هرچه شاخص سطح برگ بیشتر باشد، سطح بیشتری از نور جذب می‌شود و فتوسنتز بهینه‌تری رخ می‌دهد، که این امر منجر به تولید بیشتر ماده خشک (TDM)[2] و در نهایت، افزایش عملکرد محصول می‌شود. بنابر این گیاهانی که شاخص سطح برگ بالاتری دارند، به‌دلیل جذب نور بیشتر و فتوسنتز مؤثرتر، معمولاً عملکرد بیشتری از نظر تولید زیست‌توده و محصول نهایی نشان می‌دهند. این رابطه به‌ویژه در شرایطی که سایر منابع (مانند آب و

1- Leaf area index

2- Total dray matter

مواد مغذی) به اندازه کافی در دسترس باشند، برجسته‌تر است. در این آزمایش، میزان سطح برگ لوبیاسبز در تیمارهای مختلف با تراکم این گیاه در آن تیمارها برابر نبود. بر این اساس، در گیاه لوبیاسبز بیشترین شاخص سطح برگ (۳/۵۳) در تیمار P و کمترین آن (۱/۱۴) در تیمار P_2N_2 و (۱/۱۶) P_1N_3 ثبت شد (شکل 1A). سطح برگ معیاری برای ارزیابی میزان توانایی گیاه در فتوسنتز و رشد است. در این پژوهش مشاهده می‌شود که شاخص سطح برگ (مقدار برگ در واحد سطح) در دو تیمار (P_1N_3 و P_2N_2) تفاوت معنی‌داری نداشته است. این تیمارها شامل ترکیب‌های مختلف تراکم سیاه‌دانه و لوبیاسبز بوده‌اند. با اینکه تعداد گیاهان در این تیمارها متفاوت بوده (نسبت ۲:۲ و ۱:۱ بین این دو گونه)، امّا شاخص سطح برگ یکسان باقی مانده است. این نتیجه نشان می‌دهد که تراکم گیاهان لزوماً به‌صورت خطی بر شاخص سطح برگ اثر نمی‌گذارد. سیاه‌دانه در مقایسه با لوبیاسبز توانسته است که در شرایط رقابتی (به‌ویژه زمانی‌که تراکم‌ها برابر بوده‌اند یا سیاه‌دانه بیشتر بوده است) غالب شود. این یعنی سیاه‌دانه بهتر از لوبیاسبز از منابع مثل نور، آب یا مواد غذایی استفاده کرده است و در نتیجه، اثر رقابتی بیشتری داشته است. به‌طور کلی، این نتیجه نشان می‌دهد که در کشت مخلوط، سیاه‌دانه نسبت به لوبیاسبز برتری رقابتی دارد و می‌تواند به‌طور بالقوه رشد لوبیاسبز را محدود کند، حتی اگر تراکم هر دو گیاه برابر باشد. از طرفی نسبت یک به چهار تراکم‌های کاشت در تیمارهای P_1N_3 و P (تراکم ۰/۲۵ برابر) منجر به تشکیل شاخص سطح برگ بیش‌تر با نسبت بیش‌تر (شاخص سطح برگ ۰/۴ برابر) شده است. از این نتیجه می‌توان این‌گونه دریافت که کشت مخلوط بهبود توسعه سطح برگ لوبیاسبز را در این تیمار به‌دنبال داشته است، امّا صرفاً با در نظر گرفتن این اطلاعات محدود نمی‌توان در خصوص جنبه‌های دیگر رشد با عملکرد این گیاه اظهار نظر نمود و البته شواهد تقویت این احتمال در ادامه مورد توجه قرار خواهد گرفت.

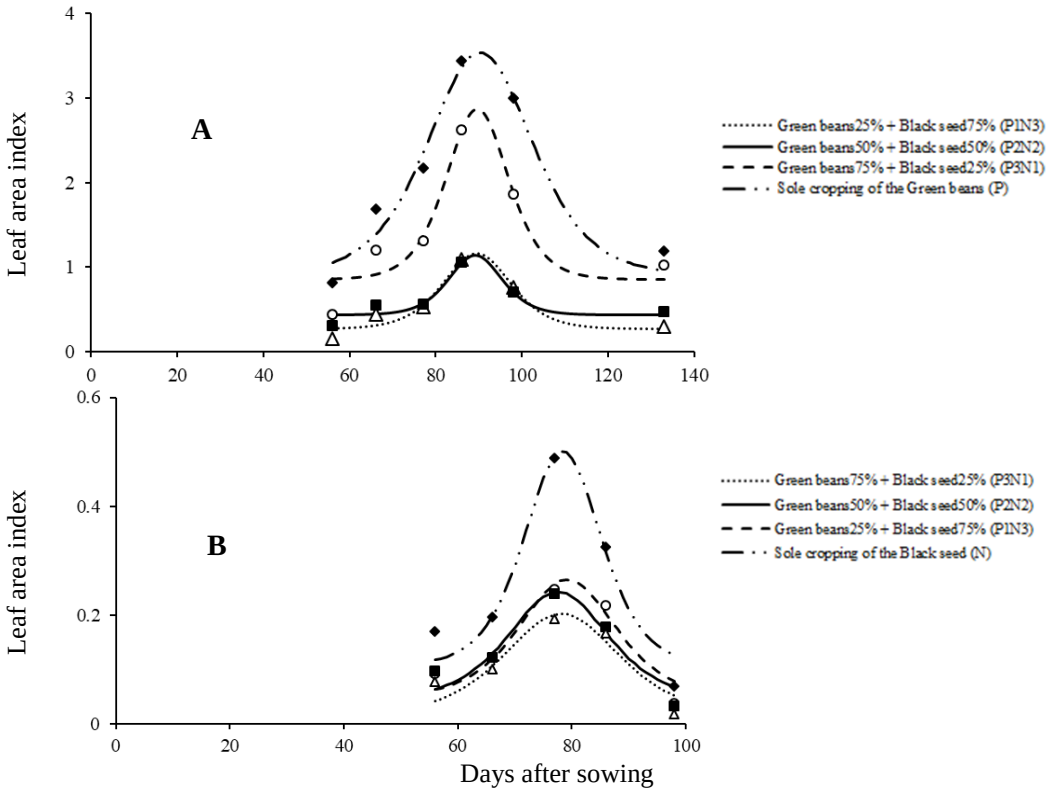
بیشترین شاخص سطح برگ سیاه‌دانه در بین تیمارهای مختلف کاشت سیاه‌دانه نیز در تیمار N (۰/۵) و کمترین آن (۰/۲) در تیمار P_3N_1 مشاهده شد. هم‌چنین شاخص سطح برگ تیمارهای P_2N_2 و P_1N_3 روندی همسان با یکدیگر و اعداد نزدیک (اعداد در قله به‌ترتیب برابر با ۰/۲۴ و ۰/۲۶) به هم را داشتند که نشان می‌دهد، شاخص سطح برگ این گیاه در تیمارهایی که لوبیاسبز حداقل مقدار شاخص سطح برگ را داشته، افزایش پیدا کرده است و ازاین‌رو سیاه‌دانه با وجود شاخص سطح برگ کمتر، به لوبیاسبز غالبیت پیدا کرده است (شکل 2B) بنابر این جنبه رقابت این دو گیاه را می‌توان منبعی به‌غیر از نور (مثل آب یا فضای مورد نیاز برای توسعه اندام‌های هوایی) (Valizadeh, 2017) در نظر گرفت.

شاخص سطح برگ لوبیاسبز بین ۸۸ تا ۹۲ روز پس از کاشت و سیاه‌دانه بین ۷۸ تا ۸۰ روز پس از کاشت به حداکثر مقدار خود رسید، بنابر این لوبیاسبز در زمانی به بیشترین میزان پوشش تاج‌پوشش خود رسیده است که تاج‌پوشش سیاه‌دانه رو به کاهش بوده است (شکل ۱). بر این اساس، با توجه به تأثیر بیشتر رشد و توسعه سیاه‌دانه نسبت به لوبیاسبز در تیمارهای با نسبت کاشت (و تراکم) مساوی و بیشتر سیاه‌دانه نسبت به لوبیاسبز، عدم هم‌زمانی اوج توسعه تاج‌پوشش دو گیاه می‌توانست فشار رقابتی بر لوبیاسبز را کاهش دهد. به‌طور کلی، پس از عبور از میزان تراکم مشخص، شاخص سطح برگ تک گیاه کاهش می‌یابد و این کاهش در گیاهان مغلوب در رقابت به‌طور محسوس قابل مشاهده است، امّا در مجموع، سطح برگ گیاهان در واحد سطح افزایش می‌یابد (Naghipoor Dehkordi et al., 2016). باقری و همکاران (Bagheri et al., 2012) کشت مخلوط سویا و ریحان با نسبت سه به یک را برای تولید سویا توصیه کردند. این محققان بیان کردند که به‌دلیل افزایش شاخص سطح برگ و هم‌چنین سایر شاخص‌های رشدی سویا در کشت مخلوط با ریحان، این الگوی کشت برای تولید محصول سویا موفق‌تر از کشت خالص محصول است. در پژوهشی دیگر نیز یافته مشابهی در خصوص گیاه کنجد در کشت مخلوط این گیاه با نخود به دست آمد (Pouramir et al., 2010).

ب) تجمع ماده خشک (TDM): تابع و ضرایب به‌دست‌آمده حاصل از برازش معادله ۲ در جدول ۳ آمده است.

روند تجمع ماده خشک و بیشینه آن (ضریب a) برای تیماهای مختلف در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هم‌چنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از برازش معادله ۲ به داده‌ها، میانگین سرعت رشد نسبی، میانگین سرعت رشد نسبی (ضریب c) در کل دوره رشد گیاهان، برای لوبیا به‌طور میانگین ۰/۱ گرم بر گرم در روز بود. این مقدار برای سیاه‌دانه ۰/۱۲ گرم بر گرم در روز بود (جدول ۳) که ۲۱ درصد بیشتر از گیاه لوبیاسبز بود. RGR بالا در اغلب مواقع می‌تواند مزیت خوبی برای رشد گیاه باشد (Hallberg, 2019)، اگرچه در این آزمایش، سیاه‌دانه سطح برگ کمتر و وزن خشک کمتری نسبت به

لوبیاسبز داشته است، امّا به‌دلیل میانگین RGR بـالاتر گونـه رقـابتی قوی‌تری (Hallberg, 2019) در کشت مخلوط با لوبیاسبز بوده اسـت و تأییدکننده یافته پیشین در خصوص قدرت رقابت بهتـر سـیاه‌دانه در مقایسه با لوبیاسبز است. تشریح روند سرعت رشـد نسـبی در ادامـه و زیربخش مربوطه انجام خواهد شد.



شکل ۱- تأثیر نسبت‌های مختلف جایگزینی در کشت مخلوط بر روند شاخص سطح برگ (LAI) لوبیاسبز (A) و سیاه‌دانه (B) در تیمارهای مختلف

Fig. 1- Effect of different replacement ratios of intercropping on the trend of leaf area index (LAI) in green bean (A) and black seed (B) in different treatments

۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

جدول ۳- ضرایب تابع و تابع منحنی برازش‌یافته به داده‌های تجمع ماده خشک (TDM) تیمارهای مختلف برای لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

Table 3- Equation and the coefficients of curve fitted to the TDM data of different treatments of green bean (P) and black seed (N) plants

$$TDM = \frac{a}{1 + b.exp(-ct)}$$

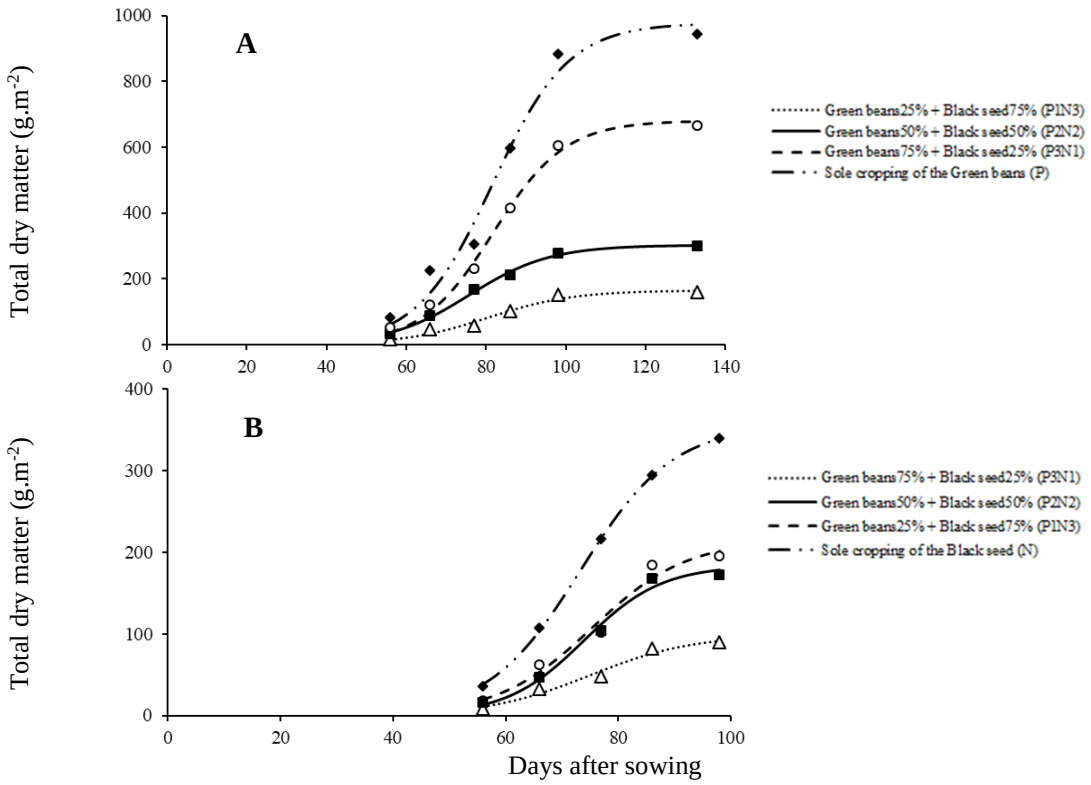
گیاه Plant	تیمار Treatment	a	b	c
لوبیا سبز Green bean (P):	P_1N_3	165.43421	1933.3992	0.093998
	P_2N_2	302.65612	1775.1712	0.098827
	P_3N_1	679.81241	8483.3083	0.110693
	Sole P	977.68998	5356.6022	0.105244
سیاه‌دانه Black seed (N):	P_1N_3	215.54811	8192.4641	0.119551
	P_2N_2	183.4919	45330.175	0.145048
	P_3N_1	98.441969	3838.8096	0.110039
	Sole P	356.2841	7452.4497	0.121704

در اوایل دوره رشد، سرعت تجمع ماده خشک کم بود، امّا همراه با رشد پوشش تاج‌پوشش گیاهان، شیب منحنی میزان تجمع ماده خشک در هر دو گیاه بیشتر شده و سپس ثابت شد (شکل ۲). پیری و زرد شدن برگ‌ها و سایه‌اندازی آن‌ها روی یکدیگر، انتقال مجدد کربوهیدرات‌های ذخیره‌ای به اندام‌های زایشی و ریزش برگ‌ها، افزایش بافت‌های غیرساختمانی و کاهش نسبت تنفس رشد به تنفس نگهداری را می‌توان از دلایل کاهش شیب تجمع ماده خشک در گیاه مورد مطالعه دانست (Mostafavi, 2014).

با توجه به روند تغییرات میزان ماده خشک لوبیاسبز در تیمارهای مختلف کشت مخلوط ردیفی با سیاه‌دانه، لوبیاسبز ۱۳۳ روز پس از کاشت، در تیمار P با ۹۷۳/۳۴ گرم در مترمربع بیشترین میزان تجمع ماده خشک و در تیمار P_1N_3 ۱۶۴/۲۵ گرم در مترمربع کمترین مقدار این شاخص را دارا بود (شکل ۲A). بیشترین میزان تجمع ماده خشک پس از ۹۸ روز پس از کاشت برای سیاه‌دانه نیز در تیمار N با ۳۳۹/۵۵ گرم در مترمربع مشاهده شد. در این زمان، کم‌ترین میزان تجمع ماده خشک مربوط به تیمار P_1N_3 با ۹۱/۱۸ گرم در مترمربع بود. در دو تیمار P_1N_3 و P_2N_2 با وجود اختلاف در تراکم، تفاوت کمتری از نظر سطح برگ داشتند که می‌تواند به‌دلیل تحریک بیشتر ایجاد شاخه‌های جانبی گیاه در تیمارهای با تراکم پایین‌تر باشد (شکل 2B). هم‌چنین با توجه به شکل ۲ همان‌گونه که انتظار می‌رفت، حداکثر تجمع ماده خشک در طول دوره رشد مربوط به تیمارهایی بود که حداکثر سطح برگ را داشتند (Mostafavi et al., 2018). افزایش رقابت برون گونه‌ای در گیاه سیاه‌دانه سبب بهبود تجمع نسبی ماده خشک گردید که دلیل آن می‌تواند افزایش استفاده از نور و موادغذایی باشد. همچنین تثبیت نیتروژن توسط لوبیاسبز می‌تواند به بهبود عناصر غذایی موجود در خاک کمک نماید (Naghipoor Dehkordi, 2015). تجمع ماده خشک، نشانگر فتوسنتز خالص گیاه و شاخصی برای برآورد عملکرد گیاه زراعی است. ماده فتوسنتزی تولیدشده در گیاه می‌تواند توسط گیاه برای مقاصد رشد یا نگهداری مصرف شده یا در اندام‌های ذخیره‌ای تجمع یابد. افزایش سطح برگ، توان فتوسنتزی و تولید ماده خشک را افزایش می‌دهد که این امر می‌تواند منجر به افزایش عملکرد گیاه شود (Valizadeh, 2017). در مطالعه‌ای، رشد گیاهان در کشت مخلوط جایگزینی رازیانه، کنجد و لوبیا مورد ارزیابی قرار گرفت. در مطالعه مذکور، میزان وزن خشک در تیمارهای خالص تمامی گونه‌ها به‌دلیل تراکم بیش‌تر در مقایسه با تیمارهای کشت مخلوط بیشتر بود (Ranjbar, 2012). در پژوهشی دیگر روی کشت مخلوط لوبیا و زنیان، بیشترین وزن خشک در تیمار لوبیا خالص گزارش گردید (Khorramdel et al., 2016). در کشت مخلوط دو گیاه دارویی زیره سبز و موسیر بر روند شاخص‌های رشدی نشان داده شد که تجمع ماده خشک در کشت خالص نسبت به نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشتر بوده است (Meshkani et al., 2019).

ج) سرعت رشد محصول[1] (CGR): سرعت رشد محصول را می‌توان بامعناترین واژه تجزیه و تحلیل دانست که بیانگر میزان تجمع ماده خشک در گیاهان در واحد زمانی مشخص در واحد سطح زمین است. نتایج بیانگر روند سهمی نمودار سرعت رشد محصول در طول دوره رشد در تمام تیمارها بود، به‌طوری که ابتدا افزایشی است و تقریباً در موقع حداکثر شاخص سطح برگ یعنی در اوایل گل‌دهی به اوج می‌رسد و سپس نزولی می‌شود (شکل ۳). در واقع، بیش‌تر بودن میزان تنفس نسبت به فتوسنتز جاری در مراحل انتهایی رشد موجب کاهش بیشتر سرعت رشد محصول می‌شود و تابش دریافتی به‌سمت نقطه جبران نوری میل می‌کند (شکل ۳) (Mostafavi et al., 2018). بیشترین میزان این شاخص برای لوبیاسبز در تیمار P (۲۵/۷۱ گرم در مترمربع در روز) و پایین‌ترین آن در تیمار P_1N_3 (۳/۸۸گرم در مترمربع در روز) مشاهده شد (شکل ۳A). در کشت خالص سیاه‌دانه، حداکثر میزان سرعت رشد محصول (۱۰/۸۳ گرم در مترمربع در روز) پس از ۷۳ روز از کاشت به دست آمد و حداقل میزان این شاخص (۲/۷۰ گرم در مترمربع در روز) نیز ۷۵ روز پس از کاشت در تیمار P_3N_1 ثبت شد. کاربرد کشت مخلوط جایگزینی، سرعت رشد سیاه‌دانه را در طول دوره رشد بهبود بخشید که رشد محصول در دو تیمار P_1N_3 و P_2N_2 تقریباً برابر بود (شکل ۳B). مقدار بالاتر شاخص رشد در تیمار P برای لوبیاسبز نشان‌دهنده بهینه بودن شرایط برای این گیاه است، امّا در کشت مخلوط، بهبود یکنواختی سرعت رشد سیاه‌دانه نشان می‌دهد که این نوع کشت می‌تواند پایداری بیشتری در تولید ایجاد کند، حتی اگر حداکثر رشد کمتر باشد.

1- Crop growth rate



شکل ۲- تأثیر نسبت‌های مختلف جایگزینی در کشت مخلوط بر روند تجمع ماده خشک (TDM) لوبیاسبز (A) و سیاه‌دانه (B) در تیمارهای مختلف

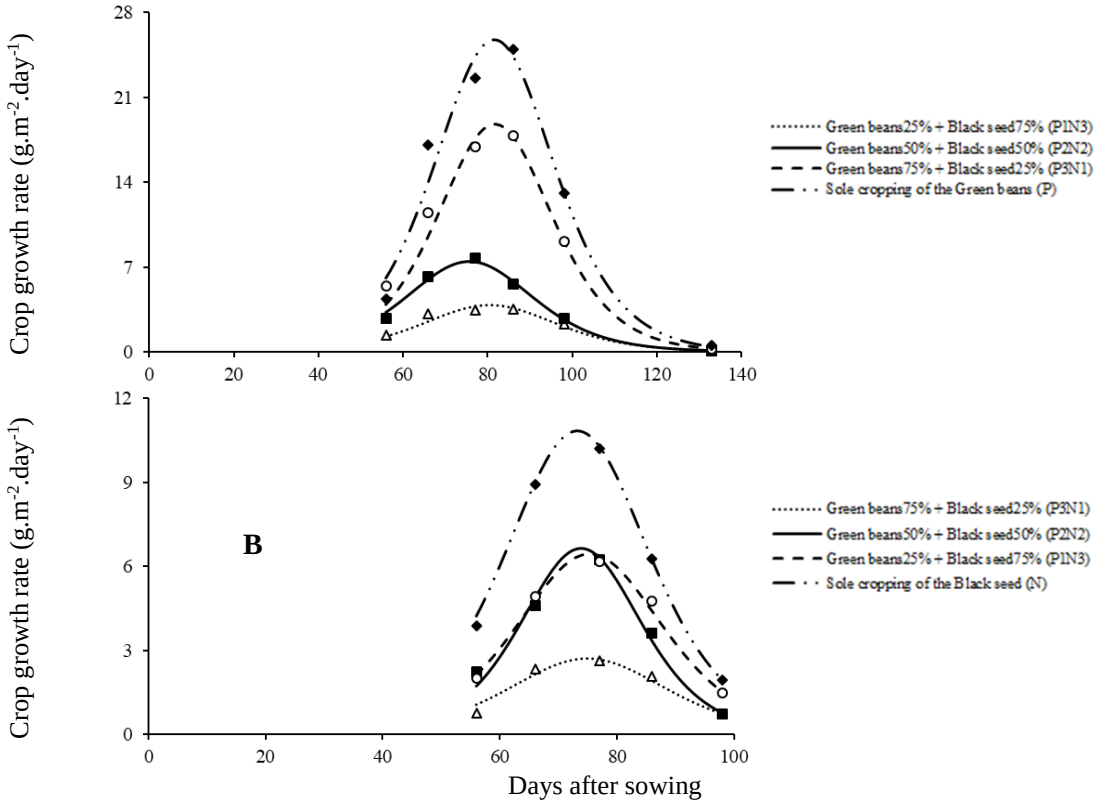
Fig. 2- Effect of different replacement ratios of intercropping on the trend of total dry matter (TDM) in green bean (A) and black seed (B) in different treatments

۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

تیمارهای کشت مخلوط نسبت به کشت خالص لوبیاسبز زودتر به نقطه اوج سرعت رشد گیاه در طول دوره رشد رسیدند (شکل ۳A)، شاید بتوان کاهش رقابت درون‌گونه‌ای در کشت مخلوط را دلیل این نتیجه دانست. در گیاه سیاه‌دانه نیز در تیمار P_2N_2افزایش نه درصدی سرعت رشد محصول نسبت به تیمار خالص مشاهده شد. یافته را می‌توان برتری کشت مخلوط نسبت به تک کشتی به‌دلیل کاهش رقابت بر سر منابع مشترک در شرایط کم‌نهاده به حساب آورد. سرعت رشد محصول بیشتر نتیجه سطح برگ بالا و شدت فتوسنتز بالای برگ‌ها می‌باشد (Oozooni Doji et al., 2008). در آزمایشی، اثر کشت مخلوط بر خصوصیات رشدی سیاه‌دانه، همیشه‌بهار و گاوزبان اروپایی بررسی شد، نتایج نشان دادند که کشت مخلوط به‌طور معنی‌داری سرعت رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Naghipoor Dehkordi et al., 2016).

د) سرعت رشد نسبی (RGR): در ابتدای فصل رشد، تیمار P_3N_1 با میزان ۰/۱۰۴گرم بر گرم در روز بیشترین و در تیمار P_1N_3 با میزان ۰/۰۸۵ گرم بر گرم در روز، کمترین سرعت رشد نسبی را داشت (شکل ۴A). برای گیاه سیاه‌دانه بیشترین سرعت رشد نسبی متعلق به تیمار P_2N_2 (۰/۱۳۵ گرم بر گرم در روز) و کمترین میزان این شاخص به تیمار P_3N_1 (۰/۰۹۷ گرم بر گرم در روز) مربوط بود (شکل ۴B). اختلاف بین تیمارها از نظر مقدار سرعت رشد نسبی در ابتدای دوره رشد نسبت به انتهای دوره رشد بیشتر بود، امّا این اختلاف تا پایان فصل کاهش پیدا کرد (شکل ۴).



شکل ۳- تأثیر نسبت‌های مختلف جایگزینی در کشت مخلوط بر روند سرعت رشد محصول (CGR) لوبیاسبز (A) و سیاه‌دانه (B) در تیمارهای مختلف

Fig. 3- Effect of different replacement ratios of intercropping on the trend of crop growth rate (CGR) in green bean (A) and black seed (B) in different treatments

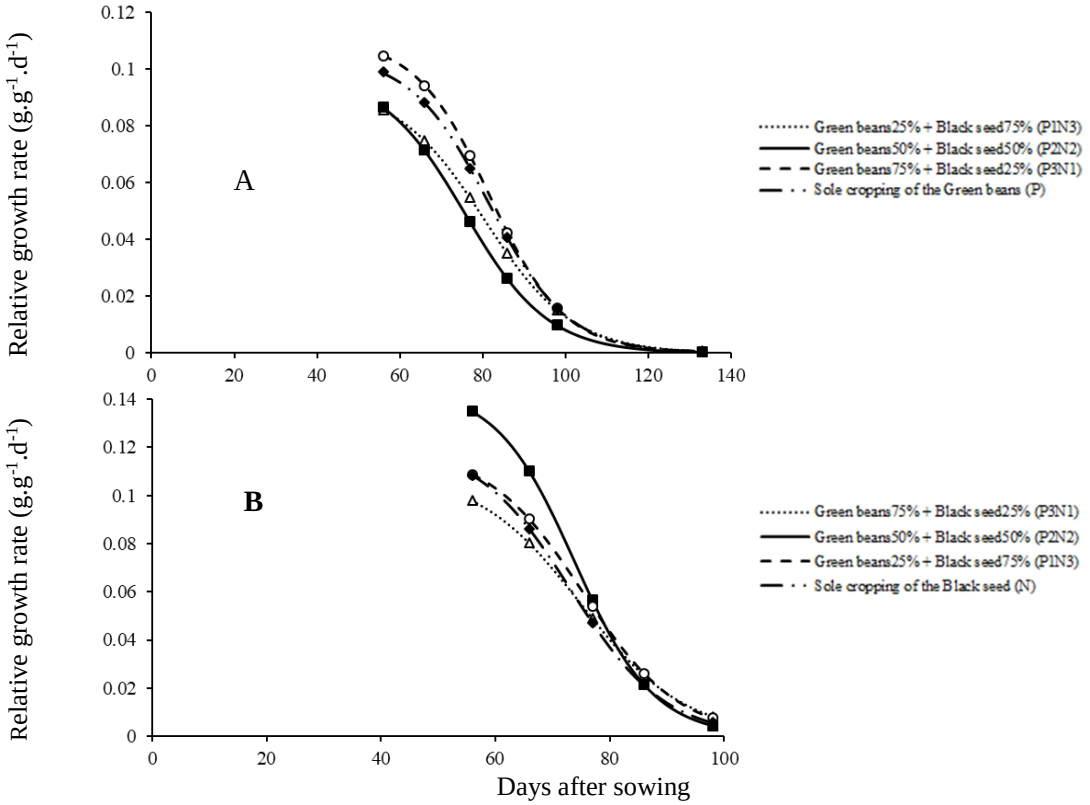
۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز+ ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

منحنی‌ها نمایانگر مقادیر روزانه شاخص سرعت رشد محصول براساس مقادیر برازش‌یافته (روش تابعی) و نقاط روی شکل نیز شاخص براساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده (روش کلاسیک) هستند.

25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

The curves indicate daily values of crop growth rate (CGR) and the points are calculated values of the index based on observed data.

دلیل این امر را می‌توان به‌دلیل کاهش ظرفیت فتوسنتزی و افزایش بافت‌های ساختمانی گیاه دانست که با گذشت زمان و نزدیک شدن به انتهای فصل رشد در گیاه اتفاق می‌افتد (Meshkani et al., 2019). به طور کلی، تیمارهای کشت مخلوط موجب بهبود روند سرعت رشد نسبی شدند، امّا سرعت رشد نسبی به‌تنهایی بیانگر تجزیه و تحلیل شرایط رشد گیاهان نیست، چنانچه دو گیاه دارای وزن اولیه متفاوت باشند، امّا نسبت افزایش برابر در طول یک دوره داشته باشند، دارای سرعت رشد نسبی یکسانی خواهند بود (Naghipoor Dehkordi et al., 2016). در واقع، در ابتدای فصل رشد، تمام وزن گیاه در تولید ماده فتوسنتزی نقش دارد. با پیر شدن برگ‌ها، وزن بافت‌های مرده که دیگر در تولید نقشی ندارند، افزایش می‌یابد که در پایان پیرشدن بافت‌ها سبب کاهش مقدار سرعت رشد نسبی گیاه می‌شود. کاهش سرعت رشد نسبی در طول دوره رشد با افزایش بافت‌های تنفسی نسبت به فتوسنتزی، سایه‌اندازی گیاهان و پیر شدن آن‌ها طی فصل رشد منجر به سرعت رشد نسبی همراه می باشد، که علت آن افزایش وزن خشک گیاه است، زیرا سرعت رشد نسبی، افزایش ماده خشک را نسبت به وزن گیاه نشان می‌دهد (Nurbakhsh et al., 2013).



شکل ٤- تأثیر نسبت‌های مختلف جایگزینی در کشت مخلوط بر روند سرعت رشدنسبی (RGR) لوبیاسبز (A) و سیاه‌دانه (B) در تیمارهای مختلف

Fig. 4- Effect of different replacement ratios of intercropping on the trend of relative growth rate (RGR) in green bean (A) and black seed (B) in different treatments

۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

منحنی‌ها نمایانگر مقادیر روزانه شاخص سرعت رشد نسبی محصول براساس مقادیر برازش‌یافته (روش تابعی) و نقاط روی شکل نیز شاخص براساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده (روش کلاسیک) هستند.

25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

The curves indicates daily values of relative growth rate (RGR) and the points are calculated values of the index based on observed data.

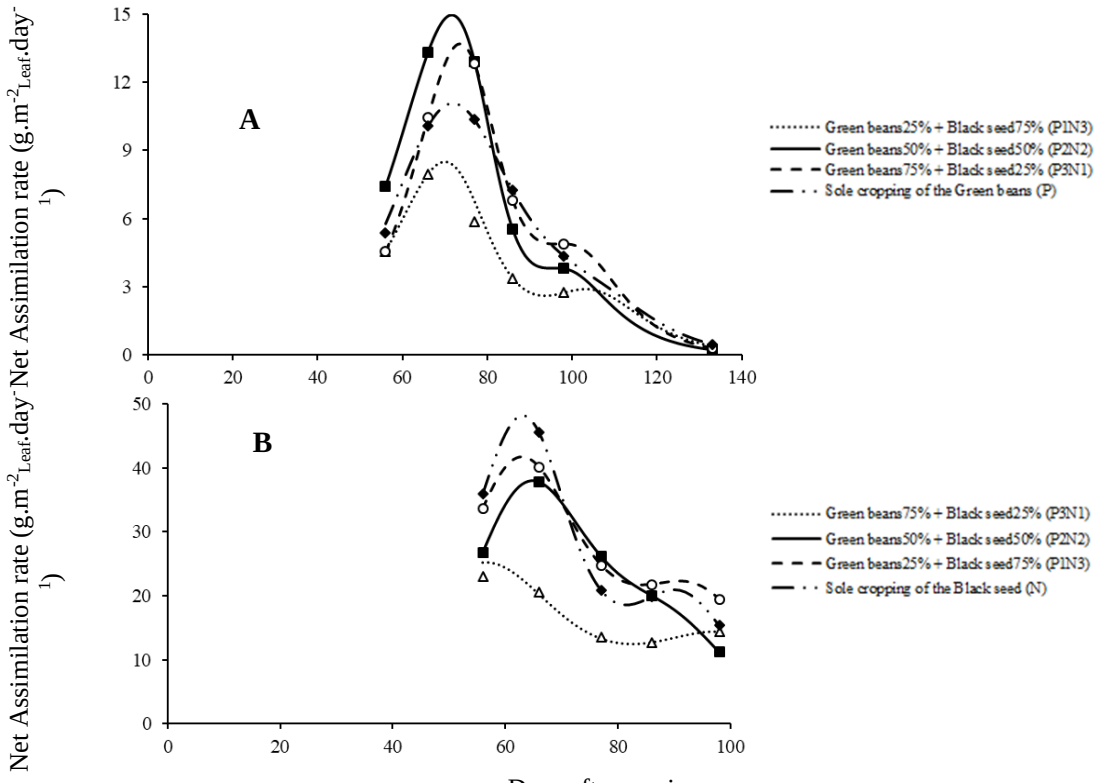
ه) سرعت آسیمیلاسیون خالص (NAR): میزان آسیمیلاسیون خالص عبارت است از سرعت تجمع ماده خشک در واحد سطح برگ در زمان معین که معمولاً به‌صورت گرم در مترمربع (سطح برگ) در روز بیان می‌شود. این شاخص معیاری از کارآیی فتوسنتزی برگ‌ها در جامعه گیاهی است که با استفاده از آن می‌توان جوامع گیاهی مختلف را با هم مقایسه کرد (Koocheki & Sarmadniya, 2011). در گیاه لوبیاسبز حداکثر سرعت آسیمیلاسیون خالص در P_2N_2به‌میزان ۱۴/۹۵ گرم بر مترمربع در روز و حداقل میزان این شاخص در P_1N_3 به‌میزان ۸/۴۹گرم بر مترمربع در روز بود (شکل ۵A). سرعت آسیمیلاسیون خالص سیاه‌دانه در تیمار N بیشترین (۴۸/۲۴ گرم بر مترمربع در روز) و در تیمار P_3N_1کمترین (۲۵/۲۴گرم بر مترمربع در روز) میزان خود را داشت (شکل ۵B). در ابتدای فصل رشد که گیاهان هنوز رشد کمی دارند و هیچ سایه‌اندازی روی برگ‌ها وجود ندارد، بنابراین برگ‌ها کاملاً در معرض مستقیم نور خورشید قرار دارند و سرعت آسیمیلاسیون خالص در بیشترین سطح خود است. با افزایش شاخص سطح برگ و سایه‌اندازی، مقدار سرعت آسیمیلاسیون خالص کاهش می‌یابد (شکل ۵) (Ghotbe Sharif et al., 2021). سرعت بالای آسیمیلاسیون خالص در تیمارهای خاص مانند P_2N_2 برای لوبیاسبز و Nبرای سیاه‌دانه نشان‌دهنده بهینه بودن شرایط فتوسنتزی است. کاهش این سرعت در مراحل بعدی رشد به‌دلیل افزایش سطح برگ و

سایه‌اندازی طبیعی است، امّا انتخاب تیمارهای مناسب می‌تواند کارآیی فتوسنتز را در مراحل کلیدی رشد به حداکثر برساند.

عملکرد محصول

عملکرد اقتصادی دو گونه مخلوط شامل مجموع وزن غلاف‌های تازه برداشت‌شده لوبیاسبز در طی فصل رشد و وزن دانه‌های رسیده و خشک سیاه‌دانه است که در تیمارهای مختلف کشت مخلوط جایگزینی و هم‌چنین کشت خالص آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. با اثر تیمارها بر عملکرد هر دو محصول لوبیاسبز و سیاه‌دانه، تفاوت‌های معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد مشاهده شد (جدول ۴).

حداقل عملکرد لوبیاسبز (۱۲۸۶۵ کیلوگرم در هکتار) در نسبت ۲۵ درصد این گونه (تیمار P_1N_3) به دست آمد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت. با افزایش نسبت این گونه (لوبیاسبز) در کشت مخلوط با سیاه‌دانه، عملکرد افزایش پیدا کرد. بنابراین بیشترین عملکرد لوبیاسبز در تیمارهای مخلوط، در کشت مخلوط جایگزینی با نسبت ۷۵ درصد این گیاه با سیاه‌دانه (۵۳۷۸۹ کیلوگرم در هکتار؛ تیمار P_3N_1) به دست آمد که با تیمار کشت خالص این گیاه (نسبت ۱۰۰ درصد کاشت) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۶A).



شکل ۵- تأثیر نسبت‌های مختلف جایگزینی در کشت مخلوط بر روند سرعت آسیمیلاسیون خالص (NAR) لوبیاسبز (A) و سیاه‌دانه (B) در تیمارهای مختلف

Fig. 5- Effect of different replacement ratios of intercropping on the trend of Net Assimilation Rate (NAR) in Green bean (A) and black seed (B) in different treatments

۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز+ ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

منحنی‌ها نمایانگر مقادیر روزانه شاخص سرعت آسیمیلاسیون خالص محصول براساس مقادیر برازش‌یافته (روش تابعی) و نقاط روی شکل نیز شاخص براساس مقادیر اندازه‌گیری شده (روش کلاسیک) هستند.

25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

The curves indicates daily values of Net Assimilation Rate (NAR) and the points are calculated values of the index based on observed data.

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد اقتصادی لوبیاسبز و سیاه‌دانه در کشت خالص و کشت مخلوط جایگزینی

Table 4- ANOVA of economic yield of green bean and black seed in sole crops and replacement intercropping

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares	
		عملکرد لوبیا سبز The yield of green bean	عملکرد سیاه‌دانه The yield of black seed
بلوک Block	2	42832014^{ns}	4814.71^{ns}
تیمار Treatment	3	1375937232**	187423.78**
خطا Error	6	27325430	4098.28
ضریب تغییرات CV (%)		13	8.8

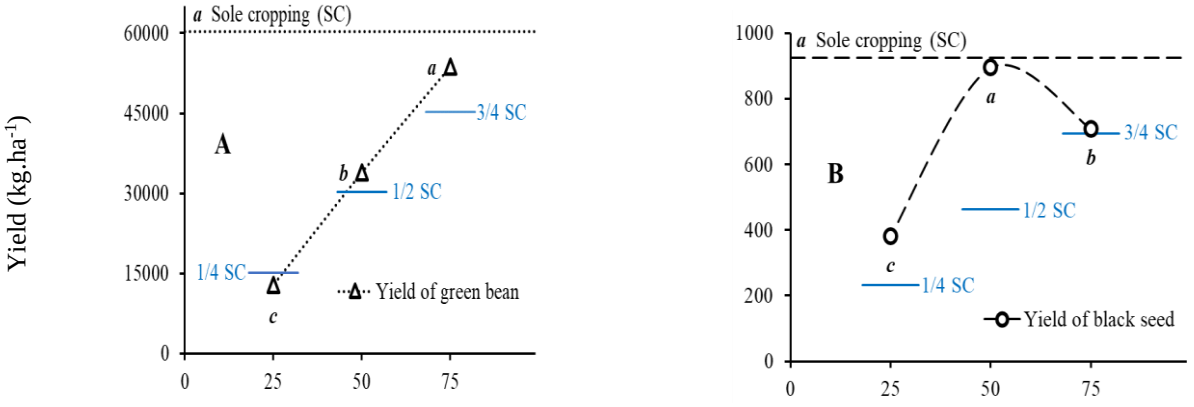
ns و **: به‌ترتیب به‌معنای غیرمعنی‌دار و معنی‌دار سطح احتمال یک درصد است.

ns and **: mean not significant and significant at probability level of one percent.

نتایج نشان می‌دهد که نسبت بالاتر لوبیاسبز در کشت مخلوط می‌تواند عملکرد این گیاه را بهبود بخشد و به سطحی نزدیک به کشت خالص برساند. این موضوع نشان‌دهنده توانایی کشت مخلوط برای بهره‌وری بالا با حفظ تنوع گونه‌ای است، به‌شرطی که نسبت گونه‌ها بهینه تنظیم شود. یافته اخیر می‌تواند شاهدی بر ظهور اثرات متقابل سازنده در کشت مخلوط لوبیاسبز با سیاه‌دانه و هم‌چنین کاهش رقابت درون‌گروهی بوته‌های لوبیاسبز باشد که توانسته است با وجود کاهش تراکم ۲۵ درصدی تیمار P_3N_1، عملکرد مشابهی با عملکرد کشت خالص این گونه به دست دهد. در بررسی کشت مخلوط سیاه‌دانه و نخود، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (نخود و سیاه‌دانه) تفاوت معنی‌داری با کشت خالص نخود نشان ندادند (Gholinezhad & Rezaei- Chiyaneh, 2014).

همانند روندی که برای عملکرد لوبیاسبز در کشت مخلوط مشاهده شد، افزایش نسبت کاشت سیاه‌دانه از ۲۵ درصد (P_3N_1) به ۵۰ درصد (P_2N_2)، عملکرد محصول افزایش معنی‌داری پیدا کرده و از ۳۸۱/۲ به ۸۹۵/۱ کیلوگرم در هکتار رسید، امّا برخلاف لوبیاسبز، با افزایش نسبت کاشت سیاه‌دانه به ۷۵ درصد (P_1N_3) عملکرد کاهش یافته و به ۷۰۷/۸ کیلوگرم در هکتار رسید که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت. بنابر این برخلاف لوبیاسبز، بالاترین مقدار عملکرد در تیمارهای کشت مخلوط در سیاه‌دانه، نه در تیمار کاشت نسبت ۷۵ درصد سیاه‌دانه، بلکه در تیمار کاشت ۵۰ درصد این گونه به دست آمد (شکل 6B). با مقایسه عملکرد به‌دست‌آمده از هر تیمار مخلوط با معادلِ نسبتی از عملکرد خالص هر گیاه می‌توان به‌خوبی دریافت که این دو عملکرد که در واقع به‌ترتیب عملکردهای مشاهده‌شده و مورد انتظار هر تیمار مخلوط هستند، بر یکدیگر منطبق نبوده و اختلافاتی داشته‌اند (شکل ۶). به غیر از عملکرد لوبیاسبز در تیمار P_1N_3 که عملکرد به‌دست‌آمده کمتر از عملکرد مورد انتظار بوده است، در تیمارهای مخلوط هر دو گونه مخلوط، عملکرد به‌دست‌آمده از مقادیر مورد انتظار عملکرد آن تیمار بیشتر بود. بیشترین اختلاف بین عملکرد به‌دست‌آمده و مورد انتظار برای سیاه‌دانه در تیمارهای مخلوط مشاهده شده که برای تیمارهای P_1N_3، P_2N_2 و P_3N_1 به‌ترتیب ۱/۹۹+، ۴۸/۳+ و ۳۹/۳+ درصد بود. این اختلاف دو عملکرد برای تیمارهای مخلوط لوبیاسبز نیز برای تیمارهای مذکور به‌ترتیب ۱۷/۲-، ۱۱/۱+ و ۱۵/۸+ درصد بود (داده‌ها نمایش داده نشده‌اند). کاهش عملکرد مشاهده‌شده لوبیاسبز در تیمار P_1N_3 نسبت به مقدار مورد انتظار را می‌توان به رقابت شدیدتر سیاه‌دانه در این تیمار نسبت داد. این امر به‌دلیل میانگین نرخ رشد نسبی بالاتر (RGR) سیاه‌دانه نسبت به لوبیاسبز و همچنین نسبت سه‌برابری کاشت سیاه‌دانه به لوبیاسبز در این تیمار بود که موجب محدودیت منابع در دسترس برای لوبیاسبز شد.

در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهند که در کشت مخلوط، تعیین نسبت بهینه کاشت برای هر گونه نقشی کلیدی در به حداکثر رساندن عملکرد دارد. عملکرد بهتر سیاه‌دانه در تیمارهای ۵۰ درصد و بالاتر بودن عملکرد مشاهده‌شده نسبت به مورد انتظار در اکثر تیمارها، اهمیت تعادل در رقابت و استفاده کارآمد از منابع را برجسته می‌کند.



شکل ٦- روند تغییرات عملکرد لوبیاسبز (A) و سیاه‌دانه (B) در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جایگزینی در مقایسه با کشت خالص آن‌ها (خط افقی بالای هر شکل)

Fig. 6- The yield changes of green bean (A) and black seed (B) in different ratios of replacement intercropping in comparison of their sole crop (upper horizontal line)

(خطوط آبی رنگ مجاور هر نقطه، عملکرد مورد انتظار است که حاصل‌ضرب نسبت کاشت گیاه هر تیمار نسبت به کشت خالص آن گیاه × عملکرد خالص آن گونه است؛ حروف مشابه روی هر شکل نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است LSD %5)

۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

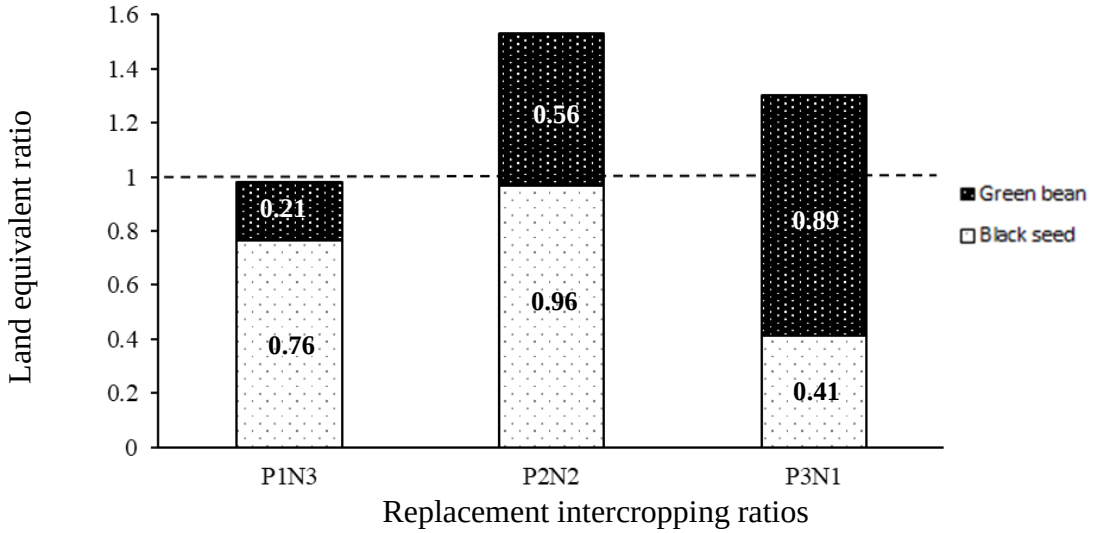
(The blue lines adjacent to each point are the expected yields which are the product of the planting ratio of each intercropping to the sole cropping × yield of the sole cropping; Same letters on each figure indicates insignificant difference, LSD %5) $P_2N_2$25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

افزایش قابل توجه عملکرد به‌دست‌آمده سیاه‌دانه از مقدار مورد انتظار در تیمار P_2N_2می‌تواند به این دلیل باشد که مجموعه‌ای از عوامل افزاینده ظهوریافته در این تیمار کشت مخلوط که می‌تواند شامل کاهش فشار رقابت درون‌گونه‌ای سیاه‌دانه برای دستیابی به منابع باشد، افزایش عملکرد محصول سیاه‌دانه را در پی داشته است. از طرفی، با مقایسه عملکرد محصول در تیمار P_2N_2با روندهای مربوط به شاخص‌های رشد، ظاهراً هم‌خوانی کلی بین رشد و عملکرد محصول دیده نمی‌شود. در توضیح این یافته، می‌توان گفت که اگرچه رشد، روند کلی تولید محصول را نشان می‌دهد، امّا این تولید به تولید ماده خشک گیاه مربوط می‌شود، امّا سیاه‌دانه که گیاهی با محصول دانه رسیده (خشک) به‌عنوان عملکرد اقتصادی محصول می‌باشد، تشکیل این عملکرد علاوه‌بر ماده خشکی که گیاه در طی فصل رشد خود تولید نموده است، به عوامل گوناگون و متعددی هم‌چون اتفاقات دوران گل‌دهی (تغییرات گرده‌افشانی همانند دوره‌های تنش)، اثرات کشت مخلوط بر تغییر واحدهای مولد دانه (هم‌چون تحریک گل‌انگیزی و میزان ریزش گل‌ها، تغییر غلظت مواد مغذی در پیکره گیاه و تأثیر آن بر تولید محصول، تغییرات رقابت و پس از آن تغییرات میزان گل‌دهی محصول)، تغییرات شاخص برداشت محصول و مواردی از این دست بستگی دارد. ازاین‌رو رشد را به‌تنهایی نمی‌توان معیاری قطعی برای برآورد یا پیش‌بینی عملکرد محصول به شمار آورد (Undie et Amirmoradi & Rezvani Moghaddam, 2011 ; al., 2012).

نسبت برابری زمین

بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر LER به‌ترتیب از نسبت P_2N_2 (۱/۵۲) و P_1N_3 (۰/۹۷) حاصل شد (شکل ۷). به‌علاوه در میان الگوهای مختلف کشت مخلوط جایگزینی لوبیاسبز و سیاه‌دانه، نسبت برابری زمین در تیمارهای P_2N_2و P_3N_1 بزرگ‌تر از یک بود که این امر نشان می‌دهد که در کشت مخلوط، سود مثبت وجود دارد و تسهیل بین‌گونه‌ای بیش از رقابت بین‌گونه‌ای بوده است. همان‌گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، نسبت برابری زمین جزئی سیاه‌دانه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جایگزینی بالاتر از نسبت برابری

زمین جزئی لوبیاسبز بود. مقادیر LER بالاتر از یک در تیمارهای P_2N_2 و P_3N_1 نشان‌دهنده سودمندی کشت مخلوط و برتری آن نسبت به کشت خالص است. همچنین، برتری نسبی LER جزئی سیاه‌دانه نسبت به لوبیاسبز نشان می‌دهد که سیاه‌دانه در سیستم کشت مخلوط بهره‌وری بیشتری دارد و احتمالاً از تسهیل بین‌گونه‌ای بیشتر بهره می‌برد. بدین ترتیب، چنین استنباط می‌شود که در الگوهای کشت مخلوط، سیاه‌دانه تأثیر بیشتری از همراهی لوبیاسبز پذیرفته که این امر باعث بهبود بیشتر نسبت برابری زمین جزئی آن در مقایسه با لوبیاسبز شده است. محققان در کشت مخلوط لوبیا و ریحان نشان دادند که تمامی تیمارهای کشت مخلوط بر کشت خالص برتری داشت، به‌طوری‌که بالاترین نسبت برابری زمین را ۱/۲۲ گزارش کردند که برابر ۲۲ درصد افزایش سودمندی نسبت به تک کشتی بود (Alizadeh et al., 2009). هم‌چنین محققان دیگر نیز در کشت مخلوط کنجد و کتان (Koocheki et al., 2020)، سیاه‌دانه و ریحان در الگوهای مختلف کشت مخلوط با لوبیا (Rezaei-Chiyaneh, 2016)، کشت مخلوط سیاه‌دانه با نخود به نتایج مشابهی دست یافتند (Gholinezhad & Rezaei- Chiyaneh, 2014).



شکل ۷- اثر الگوهای مختلف کشت مخلوط جایگزینی لوبیاسبز و سیاه‌دانه و کشت خالص بر نسبت برابری زمین (LER) براساس عملکرد اقتصادی

Fig. 7- The effect replacement intercropping patterns of green bean and black seed on the land equivalent ratio (LER) based on their economic yield

۲۵ درصد لوبیاسبز + ۷۵ درصد سیاه‌دانه (P_1N_3)، ۵۰ درصد لوبیاسبز + ۵۰ درصد سیاه‌دانه (P_2N_2)، ۷۵ درصد لوبیاسبز + ۲۵ درصد سیاه‌دانه (P_3N_1)، کشت‌های خالص لوبیاسبز (P) و سیاه‌دانه (N)

25% green bean + 75% black seed (P_1N_3), 50% green bean + 50% black seed (P_2N_2), 75% green bean + 25% black seed (P_3N_1), and sole culture of green bean (P) and black seed (N)

نتیجه‌گیری

اثر نسبت‌های کشت مخلوط دو گیاه لوبیاسبز و سیاه‌دانه بر روند شاخص‌های رشدی در تیمارهای مختلف آزمایش نشان داد در هر دو گیاه شاخص سطح برگ، تجمع ماده خشک و سرعت رشد محصول در کشت خالص به‌دلیل بیش‌تر بودن تراکم آن‌ها از سایر تیمارها بیشتر بوده است، ولی سرعت رشد نسبی کمتری نسبت به تیمارهای مخلوط داشت.

نتایج نشان داد که بیشترین ماده خشک تجمعی در بین تیمارهای مختلف در ۱۳۳ روز پس از کاشت به کشت خالص لوبیاسبز با ۹۷۳/۳۴ گرم بر مترمربع و کمترین میزان تجمع ماده خشک به تیمار P_3N_1 سیاه‌دانه با ۹۱/۱۸ گرم بر مترمربع ۹۸ روز پس از کاشت اختصاص یافت. هم‌چنین بیشترین شاخص سطح برگ در تیمار کشت خالص لوبیاسبز و کمترین میزان این شاخص در تیمار P3N1 سیاه‌دانه مشاهده شد. در بین تیمارها، بیشترین سرعت رشد محصول ۲۵/۷۱ گرم در مترمربع در روز در کشت خالص لوبیاسبز و کمترین مقدار آن

از تیمار P_3N_1 سیاه‌دانه به دست آمد. بیشترین سرعت رشد نسبی ۰/۱۳ گرم بر گرم در روز از تیمار P_2N_2 سیاه‌دانه و بیشترین میزان تولید آسیمیلاسیون خالص (۴۸/۲۴ گرم در مترمربع (سطح برگ) در روز) از تیمار خالص سیاه‌دانه به دست آمد، بنابر این به‌طور کلی بررسی‌ها نشان داد که کشت مخلوط سیاه‌دانه با لوبیا سبب بهبود رشد این گیاه دارویی شد.

بررسی عملکرد محصول لوبیاسبز و سیاه‌دانه در تیمارهای کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص این گیاهان نشان داد که در تیمار P_2N_2 با وجود جایگزینی نیمی از تراکم سیاه‌دانه با لوبیاسبز، عملکرد سیاه‌دانه با کشت خالص این گونه اختلاف معنی‌داری نداشت، ازاین‌رو چنانچه هدف اصلی از کشت مخلوط تولید سیاه‌دانه باشد، می‌توان از این ترکیب برای دستیابی به بهترین نتیجه در کنار تولید لوبیاسبز بهره گرفت، امّا چنانچه ارجحیت با تولید لوبیاسبز باشد، ترکیب تیماری P_3N_1 را تیمار بهینه‌تری می‌توان در نظر گرفت و نسبت برابری زمین در این الگوها بیش از یک به دست آمد. البته برآورد کارآیی اقتصادی این ترکیب‌های تیماری با توجه به قیمت بازاری این محصولات و هزینه‌های تولید شامل هزینه‌های کارگری نیز می‌تواند مبنای انتخاب بهترین ترکیب تیماری برای کشت لوبیاسبز و سیاه‌دانه قرار گیرد.

References

1. Abdollahpour, K., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Khorramdel, S. (2020). Effect of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) and black seed (*Nigella sativa* L.) additive intercropping on yield and yield components. *Journal of Field Crops Research*, *18*(1), 31-47. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/GSC.V18I1.71335
2. Alizadeh, Y., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2009). Yield, yield components and potential weed control of intercropping bean (*Phaseolus vulgaris*) with sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Field Crops Research*, *7*(2), 541-553. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20081472.1388.7.2.21.1
3. Alizadeh, Y., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Pooramir, F. (2013). Evaluation of radiation absorption and radiation use efficiency of intercropping of sweet basil and bean. *Journal of Field Crops Research*, *11*(1), 54-63. https://doi.org/10.22067/GSC.V11I1.24063
4. Allahdadi, M., Shakiba, M.R., Dabbagh Mohammadi Nasab, A., & Amini, R. (2013). Evaluation of yield and advantages of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) and calendula (*Calendula officinalis* L.) intercropping systems. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *23*(3), 47-58. (in Persian with English abstract).
5. Amirmoradi, S., & Rezvani Moghaddam, P. (2011). Effect of plant density and time of nitrogen application on morphological, phenological characteristics, yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Horticultural Science*, 25(3), 251-260. https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V1390I0.11310
6. Bagheri, M., Zaefarian, F., Akbarpour, V., Asadi, G., & Bicharanlou, B. (2012). Assessment of growth indices of soybean, vegetative sweet basil and borage in intercropping different ratios. *Journal of Plant Production*, 19(3), 1-26. (in Persian with English abstract).
7. Baygi, Z., Saifzadeh, S., Shirani Rad, A. H., Valadabadi, S. A., & Jafarinejad, A. (2017). Effects of planting date on growth indices and yield and yield components of some wheat cultivars in Neshabur. *Journal of Applied Research in Field Crops*, 30(2), 1-18. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/AJ.2018.109088.1113
8. Echarte, L., Della Maggiora, A., Cerrudo, D., Gonzalez, V.H., Abbate, P., Cerrudo, A., Sadras, V.O., & Calvino, P. (2011). Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean. *Journal of Field Crop Research*, 121, 423-429. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.011
9. Eskandari, H., & Ghanbari, A. (2010). Environmental resource consumption in wheat (Triticum aestivum) and bean (Vicia faba) intercropping: Comparison of nutrient uptake and light interception. *Journal of Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-napoca*, 2(100-103).
10. Feng, L., Ali Raza, M., Shi, J., Ansarb, M., Titriku, J., Meraj, T., Shah, G., Ahmed, Z., Saleem, A., Liu, W., Wang, X., Yong, T., Yuan, S., Feng, Y., & Yang, W. (2020). Delayed maize leaf senescence increases the land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system. *Journal of Agronomy*, 118: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126092
11. Gholinezhad, E., & Rezaei- Chiyaneh, E. (2014). Evaluation of grain yield and quality of black cumin (*Nigella sativa* L.) in intercropping with chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Iranian Crop Sciences*, *16*(3), 236-249.

(in Persian with English abstract).
12. Ghotbe sharif., M., Asadi., G.H., & Mostafavi., M.J. (2021). Evaluation of Growth Indices Advantages in Intercropping of Green Bean and Basil. *Journal of Crop production, 14*(1): 123-144. https://doi.org/10.22069/EJCP.2021.18660.2387
13. Hallberg, L. (2019). Effects of nitrogen quality and quantity on weed-crop competition: a greenhouse experiment with *Avena sativa* and *Avena fatua*. Second cycle, A2E. Uppsala: SLU, Dept. of Crop Production Ecology (Scientific report).
14. Heidari, H., & Mohammadi, H. (2015). Crop Physiology, Third ed. Dibagaran Cultural and Artistic Institute of Tehran., Teran, Iran. (in Persian).
15. Hong, Y., Berentsen, P., Heerink, N., Shi, M., & Werf, W. (2019). The future of intercropping under growing resource scarcity and declining grain prices - A model analysis based on a case study in Northwest China. *Journal of Agricultural Systems, 176*, 102661. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102661
16. Khorramdel, S., Siyahmargooi, A., & Mahmoodi., G. (2016). Effect of replacement and additive intercropping series of ajowan with bean on yield and yield components. *Journal of Crop Production*, 9(1), 1-24. https://doi.org/10.22069/EJCP.2016.2954
17. Koocheki, A., & Sarmadniya, G.H. (2011). Crop Physiology. Jahad Daneshgahi Mashhad Press, Mashhad, Iran. (in Persian)
18. Koocheki, A., Fallahpour, F., & Aminghafouri, A. (2020). Determining the best width of strip in row intercropping of sesame and flax and its effect on yield, yield components and weed density. *Journal of Agroecology, 11*(4), 1483-1496. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAG.V11I4.29585
19. Koocheki, A., Khorramdel, S., Fallahpour, F., & Melati, F. (2014a). Evaluation of radiation absorption and use efficiency in row intercropping of Wheat (*Triticum aestivum* L.) and Canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Field Crops Research*, *11*(4), 533-542. https://doi.org/10.22067/GSC.V11I4.32080
20. Koocheki, A., Nasiri Mahalati, M., Khoramdel, S., Anvarkhah, S., Sabet Teimouri, M., & Sanjani, S. (2010a). 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*, 27-36. https://doi.org/10.22067/JAG.V2I1.7594
21. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Borumand Rezazadeh, Z., Jahani, m., & Jafari, L. (2014b). Yield responses of Black Cumin (*Nigella sativa* L.) to intercropping with Chickpea (*Cicer arietinum* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Field Crops Research*, *12*(1), 1-8. https://doi.org/10.22067/GSC.V12I1.36624
22. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Jafari, L., Khorramdel, S., & Gholizadegan., A. (2019). Evaluation of old and new wheat varieties for their compatibility with canola in additive series of intercropping. *Journal of Applied Research in Field Crops, 32*(2), 130-155. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/aj.2019.121409.1278
23. Koocheki, A., Nassiri mahallati, M., Feizi, H., Amirmoradi, S., & Mondani. (2010b). Effect of strip intercropping of maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on yield and land equivalent ratio in weedy and weed free conditions. *Journal of Agroecology, 2*(2), 225-235. https://doi.org/10.22067/JAG.V2I2.7627
24. Lal, B., Rana, K., Rana, D., Shivay, Y., Sharma, D., Meena, B., & Gautam, G. (2019). Biomass, yield, quality and moisture use of Brassica carinata as influenced by intercropping with chickpea under semiarid tropics. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 18*, 61-71. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.001
25. Lithourgidis, A. S., Vlachostergios, D. N., Dordas, C. A., & Damalas, C. A. (2011). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. *Journal of Agronomy, 34*, 287-294. https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.007
26. Meshkani, J., Kafi, M., Khorramdel, S., & Moallem Benhangi, F. (2019). Effect of intercropping rates of cumin (*Cuminum cyminum* L.) and Persian shallot (*Allium altissimum* Regel.) on their growth indices. *Journal of Agroecology, 11*(2), 543-560. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAG.V11I2.67513
27. Mohammadi, H. & Rezaei-Chiyaneh, E. (2019). Effect of vermicompost application on seed yield and quality in fababean (*Vicia faba* L.) and fennel (*Foeniculum vulgare* L.) intercropping. *Journal of Iranian Crop Sciences, 21*(2), 139-154. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/abj.21.2.139
28. Mostafavi, M. (2014). The effect of chemical and biological fertilizers on quantitative and qualitative yield of

sesame (*Sesamum indicum* L.) in Mashhad climate. condition. MS.c. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract).

29. Mostafavi, M., Nassiri Mahallati, M., & Koocheki, A. (2018). Growth and phenology analysis of Sesame (*Sesamum indicum* L.) under biological and chemical nutritional sources. *Journal of Field Crops Research*, *16*(1), 15-34. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/GSC.V16I1.49991
30. Naghipoor Dehkordi, P. (2015). Evaluation of yield, yield components and radiation use efficiency in intercropping of three medicinal plants of Black Seed, Borage and Marigold. condition. MS.c. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
31. Naghipoor Dehkordi, P., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Khorramdel, S. (2016). Evaluation of growth indices for Black Seed, Marigold and Borage as medicinal plants at intercropping in replacement series. *Journal of Agroecology*, *6*(2), 179-199. (in Persian with English abstract).
32. Nurbakhsh, F., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2013). Effects of planting pattern and seed ratio on growth indices of intercropped sesame (*Sesamum indicum* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agroecology*, *3*(1), 111-123. (in Persian with English abstract).
33. Oozooni Doji, A., Esfahani, M., Samee Zadeh Lahiji, H., & Rabiee, M. (2008). The effect of planting pattern and plant density on the growth and radiation use efficiency of two cultivars of without petals and with petals rapeseed. *Journal of Field Crop Science*, *9*(4), 382-400. (in Persian with English abstract).
34. Pouramir, F., Nassiri Mahallati, M ., Koocheki, A., & Ghorbani, R. (2010). Assessment of Sesame and Chickpea Yield and Yield Components in the Replacement Series Intercropping. *Journal of Field Crops Research*, *8*(5), 747-757. https://doi.org/10.22067/GSC.V8I5.8016
35. Ranjbar, F. (2012). Assessment of growth indices and yield of intercropped fennel (*Foeniculum vulgare*), sesame (*Sesamum indicum*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) condition. MS.c. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
36. Rezaei-Chiyaneh, E. (2016). Evaluation of quantitative and qualitative traits of Black Cumin (*Nigella sativa* L.), and Basil (*Ocimum basilicum* L.) in different intercropping patterns with Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agroecology*, *8*(2), 263-280. https://doi.org/10.22067/JAG.V8I2.47354
37. Rezvani-Moghadam, P., Raoofi, M., Rashed Mohassel, M., & Moradi, R. (2009). Evaluation of sowing patterns and weed control on mung bean (*Vigna radiate* L.Wilczek) - black cumin (*Nigella sativa* L.) intercropping system. *Journal of Agroecology*, *1*(1), 65-79.
38. Rezvani-Moghaddam, P., & Seyyedi, S. (2015). Effects of organic, chemical and biological fertilizers on crude protein, oil yields and fatty acids of Black Seed (*Nigella sativa* L.). *Journal of Horticultural Science*, *29*(1), 119-126. https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V0I0.28253
39. Tavoletti, S., & Merletti, A. (2022). A comprehensive approach to evaluate durum wheat–faba bean mixed crop performance. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.733116
40. Undie, U., Uwah, D.F., & Attoe, E.E. (2012). Effect of intercropping and crop arrangement on yield and productivity of late season Maize/soybean mixtures in the humid environment of South Southern Nigeria. *Journal of Agricultural Science*, *4*(4), 37-50. https://doi.org/10.5539/jas.v4n4p37
41. Valizadeh, S. (2017). Evaluation of agronomic criteria of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping with some medicinal plants. condition. MS.c. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
42. Verret, V., Pelzer, E., Bedoussac, L., & Jeuffroy, M. (2020). Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design: The case of annual mixtures including a legume crop. *Journal of Agronomy*, *115*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126018
43. Yusuf, R. I., Siemens, J. C., & Bullock, D. G. (1999). Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. *Agronomy Journal*, *91*: 928-933. https://doi.org/10.2134/agronj1999.916928x