



Effect of Competition on Morphological, Physiological, and Productivity Characteristics in Soybean (*Glycine max* (L) Merrill) and Millet (*Panicum miliaceum* L.) Intercropping

Meisam Namdari¹, Rahmat Abbasi^{2*}, Hemmatolah Pirdashti² and Faezeh Zaefarian²

Received: 24-07-2021
Revised: 11-10-2021
Accepted: 06-11-2021
Available Online: 06-11-2021

How to cite this article:

Namdari, M., Abbasi, R., Pirdashti, H., & Zaefarian, F. (2023). Effect of competition on morphological, physiological, and productivity characteristics in soybean (*Glycine max* (L) Merrill) and millet (*Panicum miliaceum* L.) intercropping. *Journal of Agroecology*, 15(2), 337-357.
DOI: [10.22067/agry.2021.71312.1056](https://doi.org/10.22067/agry.2021.71312.1056)

Introduction

Intercropping cultivation is an excellent method to increase agricultural productivity per unit area based on environmental mechanisms. In this planting system, it is necessary to select crops with different capabilities in uptake resources and establish a complementary relationship. However, legumes in intercropping cultivation can be used as an alternative and sustainable way to increase efficiency. Besides, studying the interactions in the above and belowground parts is necessary to achieve the mentioned goals. Therefore, this study aimed to investigate inter-specific interactions in millet and soybean intercropping cultures.

Material and Methods

A field experiment was conducted for two years (2018-19) at the research farm of Sari agricultural science and natural resources university, Iran (33°, 36' N, 53°, 03' E with 43 m altitude). The experimental design was a randomized complete block with four replications. The experimental treatment was 75% Soybean + 25% Niger, 50% Soybean + 50% Niger, and 25% Soybean+75%Niger based on the replacement method and monoculture. This study investigated the agronomic traits, LAI, TDW, nitrogen derived from the atmosphere, and total microbial activity in the soil in different planting ratios.

Result and Discussion

The results showed that soybean monoculture had the highest plant height during different stages of growth. Furthermore, with the increase in the share of planting soybean in intercropping cultivation, the shoot height of the millet also increased. Also, unlike the millet, the soybean succeeded in producing more leaf area indexes among different mixed cultivation ratios than monoculture. The leaf area index of millet showed a significant decrease as the proportion of soybean plantings increased. However, despite this decrease, the total dry matter of soybean exhibited a higher percentage increase at various growth stages compared to the decrease in millet yield. As a result, after 60 days of planting, millet and soybean intercropping cultivation demonstrated positive complementarity regarding competition impact. Additionally, intercropping cultivation showed a higher percentage of nitrogen derived from the atmosphere compared to soybean monoculture. During the study period, the planting ratio of 75%

1- Ph.D. Student of Agronomy, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.

2- Assistant Professor, Professor and Associate Professor, Department of Agronomy, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.

(*- Corresponding author's Email: r.abasi@sanru.ac.ir)

millet and 25% soybean exhibited the highest increase in nitrogen fixation (Ndfa), with average values of 93.84% and 83.85% at 90 days after planting, respectively. Increasing the number of millet sowing rows in the intercropping patterns played a crucial role in intensifying competition with soybeans during the early growth stages and had an impact on the biological activity of soybeans. Moreover, the microbial activity in the soil (at a depth of 0-30 cm) was higher in the different intercropping ratios compared to monocultures of soybean and millet. In addition, soybean and millet monoculture had the highest and lowest grain yields. Among the different intercropping ratios, the 75:25 in 1398 with an average of 4639.77 kg. ha⁻¹ had the highest grain yield. Besides, the planting ratio of 25:75 and 50:50, with an average of 1.23 and 1.02, respectively, had an LER higher than one. With increasing the share of soybean planting in intercropping, the competitiveness of the plant increases, and the competition ratio of millet was higher than the unit only in the planting ratio of 25:75 (millet-soybean). Therefore, the competitiveness of millet in mixed cultivation is significantly reduced by reducing the share of planting row. Finally, increasing productivity in the 25:75 combinations reduced soybean's competitive dominance, increasing millet grain yield in comparison to expected values and improving total microbial activity.

Conclusion

Due to the limited growth period, millet competition played an essential role in increasing total microbial activity and the percentage of nitrogen derived from the atmosphere at a 25:75 planting ratio before the initial reproductive growth. In addition, 25:75 and 50:50 planting ratios reduce soybeans' competitive dominance, resulting in enhanced productivity. Finally, selecting complementary plants based on physiological, and morphological characteristics, and competitiveness in intercropping cultivation can be effective in the above and belowground interactions.

Keywords: Biological nitrogen fixation, Competition, LAI, Total soil microbial activity

مقاله پژوهشی

جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۳۵۷-۳۳۷

اثر رقابت بر خصوصیات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بهره‌وری در کشت مخلوط سویا

(*Panicum miliaceum* L.) و ارزن (*Glycine max* (L) Merrill)

میثم نامداری^۱، رحمت عباسی^{۲*}، همت‌الله پیردشتی^۲ و فائزه زعفریان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

چکیده

تفاوت در خصوصیات فیزیولوژیکی و زراعی گیاهان نقش مهمی در ارتباط بین گونه‌ای دارد. لذا به منظور ارزیابی رقابت و تعاملات بین گونه‌ای ارزن (*Panicum miliaceum* L.) و سویا (*Glycine max* (L) Merrill) در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به صورت جایگزینی آزمایشی در دو سال زراعی (۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷) و به صورت طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل نسبت‌های کاشت ۱۰۰:۱۰۰، ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ و ۱۰۰:۰ (به ترتیب ارزن - سویا) بود. نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی و فعالیت کل میکروبی خاک ارزن و سویا داشت. نتایج نشان داد، کشت خالص سویا در طی مراحل مختلف رشد دارای بیشترین ارتفاع بوته بود. با افزایش سهم کاشت سویا در کشت مخلوط ارتفاع ساقه ارزن افزایش یافت. سویا بر خلاف گیاه ارزن در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، موفق به تولید شاخص سطح برگ بیشتری در مقایسه با کشت خالص شد. درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی و میزان فعالیت کل میکروبی خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) نیز در کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص بود. نسبت کاشت ۲۵:۷۵ و ۵۰:۵۰ به ترتیب با میانگین ۱/۲۳ و ۱/۰۲ دارای نسبت برابری زمین بالاتر از یک بودند و افزایش بهره‌وری در تولید محصول در الگوی کشت مخلوط ۲۵:۷۵ مربوط به کاهش تسلط رقابتی گیاه سویا، ایجاد رابطه مکملی و افزایش عملکرد دانه ارزن بود.

واژه‌های کلیدی: تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، شاخص سطح برگ، فعالیت کل میکروبی خاک، نسبت برابری زمین

مقدمه

(Khammar et al., 2020; Zhang et al., 2014; Wang et al., 2014)

علاقه به کشت مخلوط در کشاورزی پایدار در حال افزایش و تعداد تحقیقات علمی (Zhang et al., 2014; Wang et al., 2014) در این خصوص به شدت افزایش یافته است. زیرا کشت مخلوط می‌تواند عملکرد پتانسیل و قابل دسترس گیاه را از طریق ایجاد رابطه مکملی بین گونه‌ها و افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن تحت تأثیر قرار دهد (Stomph et al., 2020). بیشتر تحقیقات در این زمینه معطوف به عملکرد و اجزای عملکرد گیاه بوده و فرآیندهای درون گیاهی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که مزیت و برتری کشت مخلوط به درک فیزیولوژی گونه‌ها در طی رشد، سازگاری، ساختار ریشه، کانوپی و در مجموع، اثرات متقابل در دو بخش بالایی و زیرزمینی

۱- دانشجوی دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲- به ترتیب استادیار، استاد و دانشیار گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

*- نویسنده مسئول: (Email: r.abasi@sanru.ac.ir)

DOI: 10.22067/agry.2021.71312.1056

بستگی دارد (Crews et al., 2016; Oluwaseyi et al., 2019). در این خصوص، بر اساس نتایج بررسی کشت مخلوط گیاهان لگوم با ارزن انگشتی (*Eleusine coracana*) مشخص گردید، تعداد و وزن تر گره و فعالیت آنزیم نیتروژناز گیاه سویا (*Glycine max* (L)) و نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) در کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص بود. علاوه بر آن، تثبیت بیولوژیکی نیتروژن و کارایی افزایش حاصلخیزی خاک در گیاهان لگوم به میزان زیادی تحت تأثیر تغییرات فنولوژی، الگوی کاشت و عوامل محیطی است و در نتیجه، ترکیب گیاهان کاشته شده در سیستم کشاورزی می‌تواند موجب افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری تولید در کشورهای در حال توسعه شود (Maikhuri et al., 2016). در همین زمینه، برخی از محققان با مطالعه اثرات متقابل بین‌گونه‌ای ریشه در کشت مخلوط ذرت (*Zea mays* L.)-بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.) نشان دادند که مقدار نیتروژن کل و نیتروژن قابل دسترس در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص، افزایش و منابع کربن مانند کربوهیدرات‌ها و آمین‌ها با کاهش مصرف کود نیتروژن در کشت مخلوط افزایش یافت (Khan et al., 2014). همچنین، سایر پژوهشگران نیز بیان داشتند، کشت مخلوط لوبیا و ذرت ضمن افزایش ۳۱ درصدی عملکرد، سبب افزایش تعداد و وزن خشک گره تثبیت‌کننده نیتروژن و وزن خشک ساقه لوبیا در مقایسه با کشت خالص شد و کاربرد نیتروژن معدنی اثر زیان‌باری بر فرآیند تشکیل گره دارد (Cardoso et al., 2007). در همین راستا و بر اساس نتایج مطالعات، میزان عملکرد دانه نخود فرنگی و ذرت (*Zea mays* L.) و قابلیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن در سیستم کشت مخلوط به دلیل هماهنگی در رقابت بین‌گونه‌ای به ترتیب ۳۷، ۲۹ و ۳۴ درصد در مقایسه با کشت خالص افزایش یافت (Hu et al., 2016). علاوه بر آن، نتایج بررسی نسبت‌های کشت مخلوط نخودفرنگی-جو (*Hordeum vulgare* L.) در اراضی ارگانیک اروپای مرکزی نشان داد در هر سه فصل کاشت، نیتروژن بخش بالایی گیاه نخودفرنگی حاصل از تثبیت بیولوژیکی در کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص بود و کشت مخلوط به‌طور میانگین ۳۰-۴۰ درصد کارایی بیشتری در استفاده از نیتروژن در مقایسه با کشت خالص هر یک از گیاهان مذکور داشت (Haugaard-Nielsen et al., 2009). همچنین، بر اساس گزارشات به‌دست آمده، کشت مخلوط می‌تواند فعالیت کل آنزیمی خاک را در عمق‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری

تحت تأثیر قرار داده و در مقایسه با کشت خالص مقدار آن را افزایش دهد (Nyawade et al., 2019). در این زمینه، سایر محققان نیز افزایش ۱۶/۵ درصدی فعالیت کل میکروبی خاک در کشت مخلوط را نسبت به کشت خالص گیاه ارزن گزارش کردند (Diakhate et al., 2016). در ادامه، برخی از پژوهشگران نیز بهبود جذب عناصر غذایی، میزان تابش فعال فتوسنتزی جذب شده و افزایش نسبت برابری زمین در کشت مخلوط گیاه ارزن با گیاهان لگوم مانند سویا، بادام‌زمینی و لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) را گزارش کردند (Ganbari et al., 2010; Ahmadvand & Hajinia, 2016; Khommar et al., 2020) بر طبق آمار ارائه شده در سال ۱۳۹۷ توسط وزارت جهاد کشاورزی، ۵۹ درصد از سطح زیر کشت سویا به‌صورت دیم در ایران متعلق به استان مازندران (۳۱۶۸ هکتار) است و متوسط عملکرد سویا در این استان در کشت دیم و آبی به ترتیب ۴۱/۹۲ و ۷/۶ درصد بیشتر از میانگین تولید کل کشور می‌باشد (Ahmadi et al., 2018). علاوه بر آن، سویا در بین دانه‌های روغنی دارای بیشترین سطح زیر کشت ارگانیک در جهان است (Willer & Lernoud, 2017) و دارای بالاترین قابلیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن در بین گیاهان لگوم دانه‌ای می‌باشد (Hangria & Mendes, 2015). مطالب مذکور نشان‌دهنده اهمیت این گیاه زراعی از نظر تولید، قابلیت تثبیت نیتروژن و بهبود حاصلخیزی خاک در سیستم کشاورزی پایدار است. همچنین گیاه ارزن (*Panicum miliaceum* L.) نیز به‌عنوان یکی از گیاهان زراعی چهار کربنه، زودرس، مناسب برای کاشت در خاک‌های فقیر و کم‌بازده می‌باشد (Mehrani et al., 2013) که با توجه به مسیر فتوسنتزی و خصوصیات فیزیولوژیکی می‌تواند به‌عنوان گیاه همراه گزینه مناسبی در کشت مخلوط محسوب شود. وجود تعاملات بین‌گونه‌ای در بخش بالایی و زیرزمینی کشت مخلوط اکنون به‌عنوان یک موضوع کلیدی مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات در این زمینه به افزایش شناخت و دانش در مدیریت سیستم‌های کشت مخلوط نیازمند است. لذا هدف از این پژوهش بررسی رقابت و ارتباط بین‌گونه‌ای گیاه سویا و ارزن در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به‌صورت جایگزینی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در طی دو سال زراعی (۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۷-۹۸) در

باکتری رازینوبیوم ژاپونیکوم (با تراکم سلولی 2×10^7) تلقیح گردید. تعداد خطوط کاشت در هر کرت ۱۲، فاصله بین خطوط ۳۵ سانتی متر، طول خطوط چهار متر و تراکم نهایی برای هر دو گیاه به طور ثابت ۲۸ بوته در مترمربع بود. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش از عمق ۰-۳۰ سانتی متری پیش از کاشت تعیین و بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل آزمون خاک (جدول ۱) در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ به میزان ۹۰ کیلوگرم فسفر و ۶۶ کیلوگرم پتاس و در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ به میزان ۳۳ کیلوگرم فسفر از به ترتیب از منابع سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم تأمین گردید. آبیاری گیاهان به صورت قطره-ای و همچنین عملیات وجین به صورت دستی در چهار مرحله و با فاصله زمانی ۱۴ روز اجرا گردید. عملیات برداشت برای گیاه ارزن و سویا به ترتیب در تاریخ ۲۲ مرداد و ۵ آبان ماه با رعایت اثرات حاشیه (نیم متر از دو طرف هر کرت) با دست و به وسیله قیچی باغبانی از چهار ردیف میانی به تفکیک گیاه مورد نظر و نسبت کاشت انجام شد.

مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با عرض جغرافیایی 33° ، 36° شمالی و طول جغرافیایی 53° ، 3° شرقی و ارتفاع ۴۳ متر از سطح دریا به صورت طرح بلوک های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. گیاه ارزن رقم پیشاهنگ و سویا رقم ساری (J.K.695) در نسبت های کاشت ۲۵:۷۵ (۱:۳)، ۵۰:۵۰ (۲:۲) و ۷۵:۲۵ (۳:۱) به همراه کشت خالص گیاه سویا ۱۰۰:۰ (۴:۰) و ارزن ۰:۱۰۰ (۰:۴) به روش جایگزینی قرار گرفتند. چهار ردیف از هر کرت به عنوان مبنا در تعیین نسبت های مختلف در نظر گرفته شد و اعداد داخل پرانتز به ترتیب نشان دهنده تعداد ردیف کاشت گیاه ارزن- سویا است. بطور مثال، در نسبت کاشت ۵۰:۵۰ دو ردیف به صورت متناوب از هر یک از گیاهان مورد مطالعه کشت شد. پس از تهیه بذور گیاهان سویا و ارزن به ترتیب از مرکز تحقیقات شرکت توسعه کشت دانه های روغنی شهرستان ساری و مؤسسه تحقیقات اصلاح نهال و بذر شهرستان کرج، عملیات کاشت در تاریخ ۱۵ اردیبهشت به صورت هیرم کاری و به طریقه دستی انجام شد. بذور سویا پیش از کاشت با

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک محل آزمایش

Table 1- Result of soil analysis of experimental field

سال Year	عمق نمونه- برداری Depth (cm)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت Texture	ماده آلی OM (%)	نیترژن N (%)	فسفر P_2O_5 $mg.kg^{-1}$	پتاسیم K_2O $mg.kg^{-1}$	هدایت الکتریکی $EC \times 10^{-3}$ ($dS.m^{-1}$)	شاخص واکنش pH
2018	0-30	28	39	33	لوم رسی	1.21	0.06	1.3	95	0.51	8.04
2019	0-30	26	40	34	Clay loam	1.83	0.09	4	163	0.61	7.74

گردید. پس از ثبت خصوصیات مورفولوژیکی، به کمک نرم افزار Digimizer (v.5.4) سطح برگ گیاه اندازه گیری و جهت تعیین ماده خشک اندام های مختلف نمونه گیاهان برداشت شده در آون الکتریکی تهویه دار با درجه حرارت $70^{\circ}C$ و به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت. شاخص سطح برگ از معادله ۱ تعیین شد (Hunt, 1990).

$$LAI = \frac{LA_2 + LA_1}{2} \times \frac{1}{G_A} \quad (1) \text{ معادله}$$

که در آن، LA_1 : سطح برگ در نمونه برداری $n-1$ ، LA_2 : سطح

برگ در نمونه برداری n و G_A : سطح زمین می باشد.

جهت محاسبه درصد نیترژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا از تکنیک استخراج اورتید از آوند چوب (Unkovich et al., 2008) استفاده شد. این عملیات در طی شش مرحله از زمان ۴۵ روز

نمونه برداری خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی از ۴۵ روز پس از کاشت و با فاصله زمانی ۱۵ روز در مراحل مختلف رشد گیاه سویا (Fehr et al., 1971) شامل انتهای رشد رویشی (V_{12})، آغاز گل دهی (R_1)، پایان گل دهی (R_2)، آغاز غلاف دهی (R_3)، پایان غلاف دهی (R_4) و آغاز دانه بندی (R_5) و در گیاه ارزن (Ventura et al., 2020) شامل پنجه دهی (BBCH:20)، ظهور خوشه (BBCH:51)، گل دهی (BBCH:69)، آغاز رسیدگی (BBCH:80) و رسیدگی (BBCH:89) انجام شد. جهت ارزیابی شاخص سطح برگ نیز ۴۵ روز پس از کاشت نمونه برداری از تیمارهای کشت خالص و مخلوط (با فاصله زمانی ۱۵ روز) به صورت تخریبی انجام شد. بدین ترتیب در هر دوره، از تیمار کشت خالص تعداد سه بوته و از تیمار کشت مخلوط شش بوته انتخاب و با رعایت اثر حاشیه ای برداشت

درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی می‌باشد.

برای اندازه‌گیری میزان کل فعالیت میکروبی خاک نیز طی دو مرحله (۶۰ روز پس از کاشت و رسیدگی) نمونه خاک به کمک لوله حفاری دستی^۲ از عمق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شد. بدین ترتیب که از چهار ردیف میانی در کرت‌های آزمایش (که به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد) شش نمونه‌برداری با فاصله ۲۰ سانتی‌متر انجام و نمونه‌ها از الک نمره ۱۸ (یک میلی‌متری) عبور داده شد. پس از آن، میزان فعالیت کل آنزیمی به‌روش آدام و دانکن (Adam & Duncan, 2001) با استفاده از فلورسئین دی‌استات (Fluorescein diacetate) اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، دو گرم از نمونه خاک تهیه شده با ۱۵ میلی‌لیتر محلول بافر فسفات ۶۰ میلی-مولار مخلوط و مقدار ۰/۲ میلی‌لیتر محلول فلورسئین دی‌استات (1000 μg.ml⁻¹) برای شروع واکنش به آن اضافه شد. همچنین محلول بلانک بدون اضافه کردن فلورسئین دی‌استات تهیه شد. به هر یک از نمونه‌ها پس از قرار گرفتن روی شیکر با دور ۱۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه، ۱۵ میلی‌لیتر محلول حجمی (۲:۱) متانول/کلروفرم اضافه گردید و به مدت سه دقیقه درون سانتریفیوژ^۳ با دور ۲۰۰۰ قرار گرفت. پس از عبور نمونه‌ها از کاغذ صافی نمره دو، تراکم بصری به کمک دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. سپس میزان فعالیت آنزیمی خاک بر اساس میکروگرم فلورسئین در هر گرم خاک در ساعت به کمک ترسیم منحنی کالیبراسیون (y=0.0109x+0.0426, R²=0.94) تعیین شد.

برای محاسبه نسبت برابری زمین (Mead & Willey, 1980)، شاخص رقابت (McGilchrist, 1965) و شاخص ته‌اجم (Willey & Rao, 1980) به ترتیب از معادله‌های زیر استفاده شد.

$$LER = (LER_a + LER_b)$$

$$LER_a = \left(\frac{Y_{ia}}{Y_{ma}} \right) \quad LER_b = \left(\frac{Y_{ib}}{Y_{mb}} \right)$$

معادله (۷)

$$RCC_a = \frac{Y_{ia}Z_{ib}}{(Y_{ma}-Y_{ia})Z_{ia}} \quad RCC_b = \frac{Y_{ib}Z_{ia}}{(Y_{mb}-Y_{ib})Z_{ib}} \quad RCC = RCC_a \times RCC_b$$

$$A_a = \left(\frac{Y_{ia}}{Y_{ma}Z_{ia}} \right) - \left(\frac{Y_{ib}}{Y_{mb}Z_{ib}} \right) \quad \text{معادله (۸)}$$

که در آن‌ها، به ترتیب Y_{ia} و Y_{ib} : عملکرد گیاه a و b در کشت مخلوط، Y_{ma} و Y_{mb} : عملکرد گیاه a و b در کشت خالص، Z_{ia} و Z_{ib} :

پس از کاشت با فاصله زمانی هر ۱۵ روز یک‌بار انجام شد. به‌طور خلاصه جهت انجام عملیات مذکور، ابتدا با استفاده از قیچی باغبانی ساقه‌های با قطر بیشتر از سه میلی‌متر، نزدیک به سطح زمین قطع و بلافاصله ساقه جدا شده به درون لوله‌های لاستیکی سیلیکون یا لاتکس با قطر داخلی کوچک‌تر از ساقه وارد و با استفاده از یک اتصال‌دهنده با اندازه مناسب روی یک سوزن سرنگ دو طرفه قرار گرفت. سپس سوزن از طریق پیستون لاستیکی به لوله آزمایش پنج میلی‌لیتری که از طریق یک اتصال سوزن سرنگ و یک خط پلاستیکی لوله انعطاف‌پذیر به یک پمپ خلاء متصل است، وارد و سپس خلاء (۶۰-۷۰ کیلو پاسکال) اعمال و نمونه‌های شیره آوند چوب استخراج شد. سنجش میزان اورئید با دستگاه اسپکتوفتومتر^۱ با طول موج ۵۲۵ نانومتر به کمک ترسیم منحنی استاندارد آلانتوئین (Yong & Conway, 1942)، آمینو-نیتروژن با معرف نین‌هیدرین با در طول موج ۵۷۰ نانومتر و به کمک ترسیم منحنی استاندارد اسپاراژین/گلوتامین (y=1.2222x+0.0010, R²=0.99) با روش اصلاح شده هیریدج (Herridge, 1984) و در نهایت، نیترات نیز در طول موج ۴۱۰ نانومتر و به کمک ترسیم منحنی استاندارد نیترات پتاسیم (y=0.0576x+0.0368, R²=0.99) از منبع کاتالدو و همکاران (Cataldo et al., 1975) تعیین گردید. سپس مقدار اورئید، آمینو و نیترات از معادله ۲، فراوانی اورئید (Ru-N) از معادله ۳ و نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در مراحل مختلف با کالیبراسیون میزان فراوانی نسبی اورئید در مراحل مختلف رشد با مقادیر ایزوتوپ نیتروژن ۱۵ از طریق معادله ۴ تعیین شد (Unkovich et al., 2008)

$$\text{معادله (۲)} \quad S_a c = S_t c \times (O.D_s / O.D.s) \times$$

معادله (۳)

$$\text{معادله (۴)} \quad Ru-N (\%) = [4 \times \text{ureide} / (4 \times \text{ureide} + \text{nitrate} + \text{amino-N})] \times 100$$

(تا مرحله گل‌دهی) $Ru-N(\%) = 0.64 N_{dfa} + 7.7$

(پس از گل‌دهی) $Ru-N(\%) = 0.64 N_{dfa} + 15.9$

که در آن‌ها، $S_a.c$: غلظت نمونه، $S_t.c$: غلظت استاندارد،

$O.D$: تراکم بصری نمونه، $O.D.S_t$: تراکم بصری استاندارد، D_i :

غلظت محلول رقیق شده، $Ru-N$: فراوانی نسبی اورئید و N_{dfa} :

2- Auger

3- Universal, 4000 rpm

1- Hanon, i3 UV-VIS

اختصاص ماده خشک به ساقه گیاه ارزن داشت. به طور کلی، سازگاری گیاهان در شرایط سایه از طریق اختصاص کربن حاصل از فتوسنتز به طولیل شدن ساقه و مصرف مواد فتوسنتزی برای توسعه برگ و ریشه انجام می‌شود (Yang et al., 2018). افزایش ارتفاع غلات در کشت مخلوط با گیاهان لگوم توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Bedoussac & Justec, 2011; Monti et al., 2016)

نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ گیاه ارزن و سویا داشت (جدول ۴ و ۵). نتایج نشان داد، شاخص سطح برگ گیاه سویا (رقم ساری) تا مرحله ۱۰۵ روز پس از کاشت در هر دو سال زراعی افزایش یافت. در این مرحله، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) و ۵۰:۵۰ به ترتیب با میانگین ۶/۰۹، ۶/۱۸ در سال ۱۳۹۷ دارای بیشترین شاخص سطح برگ بودند. همچنین نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن - سویا) و کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) نیز از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴). این روند در سال ۱۳۹۸ نیز مشاهده شد و میزان شاخص سطح برگ در نسبت‌های کاشت مذکور در مقایسه با کشت خالص به میزان ۴۵/۳۳ و ۴۰/۸۸ درصد افزایش یافت. هر چند از لحاظ آماری این تفاوت معنی‌دار نبود. در این خصوص، نتایج برخی از مطالعات نشان داد، شاخص سطح برگ مطلوب برای دستیابی به عملکرد پتانسیل را در ارقام رشد محدود و نامحدود سویا به ترتیب ۶/۵ و ۶ می‌باشد (Tagliapietra et al., 2018). در مجموع، با کاهش تعداد ردیف کاشت گیاه سویا در نسبت‌های مختلف، شاخص سطح برگ گیاه افزایش یافت و این موضوع می‌تواند به علت در اختیار داشتن فضای مناسب و افزایش تعداد شاخه‌های فرعی باشد. به طور کلی، رابطه مستقیمی میان شاخص سطح برگ سویا و فاصله ردیف کاشت وجود دارد و این موضوع به دلیل قابلیت جبرانی گیاه مذکور در الگوهای کاشت می‌باشد (Cox & Cherney, 2011). در خصوص گیاه ارزن نیز شاخص سطح برگ تا مرحله ۷۵ روز پس از کاشت (گل‌دهی) افزایش و پس از آن کاهش یافت. در این مرحله، در سال ۱۳۹۷ بیشترین شاخص سطح برگ متعلق به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ بود. هر چند از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) و کشت خالص ارزن (۰:۱۰۰) نداشت (جدول ۵). همچنین در این مرحله و در سال ۱۳۹۸ شاخص سطح برگ گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف کاشت فاقد تفاوت معنی‌دار با یکدیگر بودند. اما در مرحله ۶۰ روز پس از کاشت (ظهور خوشه) در سال‌های مورد مطالعه کشت خالص گیاه

سهم گیاه a و b در کشت مخلوط، Z_{mb} و Z_{ma} : نیز سهم گیاه a و b در کشت خالص است.

حالات مختلف تأثیر رقابت در کشت مخلوط به روش جایگزینی با استفاده از مدل هیل و شیماموتو (Hill & Shimamoto, 1973) و با محاسبه مقدار پیش‌بینی شده (Loreau et al., 2001) صفات مورد مطالعه تعیین شد.

$$\text{Expected yield} = \frac{Y_m}{Z_i} \quad (9)$$

در نهایت، جهت تجزیه آماری داده‌ها، شامل آزمون یکنواختی واریانس‌ها، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار سیستم آنالیز آماری (۹/۱) SAS استفاده شد. مقایسات میانگین داده‌ها با آزمون کم‌ترین تفاوت معنی‌دار (Least Significant Difference Test) در سطح پنج درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel و Sigma Plot انجام شد.

نتایج و بحث

نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر میانگین ارتفاع ساقه گیاه سویا و ارزن در طی دوره رشد داشتند (جدول ۲). در گیاه سویا افزایش ارتفاع ساقه تا مرحله آغاز گل‌دهی (۶۰ روز پس از کاشت) به سرعت افزایش یافته و پس از مرحله مذکور روند صعودی افزایش ارتفاع متوقف گردید. کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) و نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) در طی مراحل مختلف رشد دارای بیشترین و کمترین میانگین ارتفاع ساقه سویا بودند. در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن - سویا) دارای بالاترین میزان ارتفاع ساقه سویا در سال‌های مورد مطالعه بود. در مجموع، با کاهش تعداد ردیف کاشت گیاه سویا در نسبت‌های مختلف، میزان ارتفاع ساقه گیاه مذکور کاهش می‌یابد (جدول ۲). این نتایج در خصوص گیاه ارزن صادق نبود و با کاهش سهم کاشت گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف کاشت، میزان ارتفاع ساقه به شدت افزایش یافت (جدول ۳). به نحوی که نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن - سویا) و کشت خالص ارزن (۰:۱۰۰) در طی مراحل مختلف رشد به ترتیب بیشترین و کمترین میانگین ارتفاع ساقه را به خود اختصاص دادند. همچنین افزایش ارتفاع ساقه گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف از مرحله ۶۰ روز پس از کاشت به خصوص در سال ۱۳۹۸ افزایش و این روند تا مراحل پایانی رشد ادامه یافت (جدول ۳). وجود تاج‌پوشش گیاه سویا به خصوص در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن - سویا) نقش مهمی در

ارزن (۱۰۰:۰) و نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین میانگین شاخص سطح برگ بودند. این نتایج در خصوص مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (آغاز رسیدگی) نیز صادق بود (جدول ۵). کاهش شاخص سطح برگ ارزن در کشت مخلوط توسط برخی دیگر از محققان نیز گزارش شده است (Jahan et al., 2013; Ahmadvand & Hajinia, 2016; Bitew et al., 2019). در مجموع، در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط و با افزایش سهم کاشت گیاه سویا، شاخص سطح برگ گیاه ارزن به‌شدت کاهش می‌یابد. به نحوی که در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت شاخص سطح برگ در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) در سال‌های مورد مطالعه به‌ترتیب ۲۶/۰۸ و ۲۵ درصد نسبت به کشت خالص گیاه ارزن (۱۰۰:۰) کمتر بود. این موضوع می‌تواند به‌دلیل قدرت رقابت و شاخص سطح برگ بیشتر گیاه سویا در الگوی کشت مخلوط و ساز و کار فیزیولوژیکی گیاه ارزن از طریق تخصیص بیشتر ماده خشک به اندام‌های زایشی باشد. به‌طور کلی، تغییرات در شاخص سطح برگ گیاه زراعی در کشت مخلوط توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Ren et al., 2016; Darapuneni et al., 2018; Wang et al., 2020). همچنین بررسی تأثیر رقابت گیاه ارزن و سویا در نسبت‌های مختلف کاشت بر عملکرد ماده خشک کل در هکتار نشان داد، در مراحل اولیه رشد مقدار وزن خشک کل دو گیاه مورد مطالعه در نسبت‌های مختلف کاشت کمتر از مقادیر مورد انتظار بود (شکل ۱). این روند تا مرحله ۶۰ روز پس از کاشت همزمان با آغاز گل‌دهی در گیاه ارزن و سویا ادامه داشت. پس از این مرحله، میزان ماده خشک کل گیاه سویا در تمامی نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشتر از مقادیر مورد انتظار بود. هر چند این نتایج در خصوص گیاه ارزن صادق نبود و مقدار ماده خشک کل در گیاه مذکور کمتر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود (شکل ۱). همچنین با نزدیک شدن به مراحل انتهایی رشد در گیاه سویا و ارزن مجموع ماده خشک کل در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشتر از مقادیر مورد انتظار شد. این موضوع می‌تواند مربوط به کاهش مقدار شاخص سطح برگ گیاه ارزن با افزایش سهم کاشت گیاه سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط باشد. به نظر می‌رسد تاج‌پوشش گسترده گیاه سویا باعث کاهش کارایی استفاده از منابع به‌خصوص نور در گیاه ارزن شده است. با توجه به افزایش ارتفاع گیاه ارزن در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) می‌توان کاهش شدید ۷۳/۳۸ و ۵۵/۱۵ درصدی وزن خشک

کل گیاه ارزن را در مرحله ۱۰۵ روز پس از کاشت نسبت به مقادیر قابل پیش‌بینی به تاج‌پوشش و تسلط رقابتی گیاه سویا در الگوی کشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) نسبت داد. این نتایج در خصوص مرحله ۹۰ روز پس از کاشت در سال‌های مورد مطالعه نیز مشاهده شد (شکل ۱). به‌طور کلی، تولید ماده خشک در گیاه وابسته به فتوسنتز جاری تاج‌پوشش است و کاهش دریافت نور و افزایش سایه‌دهی می‌تواند میزان فتوسنتز و در نتیجه، رشد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Yang et al., 2018). در نهایت، از آنجا که درصد افزایش ماده خشک کل گیاه سویا در مراحل مختلف رشد بیشتر از میزان کاهش عملکرد گیاه ارزن بوده و همچنین مجموع عملکرد ماده خشک کل در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز بیش از مقادیر پیش‌بینی شده است، بنابراین تأثیر رقابت در کشت مخلوط دو گیاه ارزن و سویا از نوع مکملی مثبت می‌باشد. کاهش مقدار ماده خشک کل گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط می‌تواند مربوط به کاهش میزان نور دریافتی به‌ویژه در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) و در نتیجه، کاهش میزان فتوسنتز جاری گیاه باشد. ایجاد رابطه مکملی مثبت در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط طی دوره رشد و پس از مرحله ۶۰ روز پس از کاشت نمایان شد. به نظر می‌رسد، بسته شدن تاج‌پوشش، افزایش میزان مواد فتوسنتزی و اختصاص آن به اندام‌های زایشی گیاه نقش مهمی در ایجاد رابطه مکملی مثبت در الگوی کشت مخلوط داشته است. در این بین، نقش گیاه سویا از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار بود. به نحوی که میزان افزایش ماده خشک گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن- سویا) و در مراحل ۹۰ و ۱۰۵ روز پس از کاشت به‌ترتیب ۳۲/۷۱، ۱۲/۵۱ درصد در سال ۱۳۹۷ و ۳۶/۶۲، ۵۰/۵۶ درصد در سال ۱۳۹۸ نسبت به مقادیر قابل پیش‌بینی افزایش یافت.

نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در مراحل مختلف رشد داشتند (شکل ۲). بیشترین میزان نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در طی دوره رشد و در سال‌های مورد مطالعه مربوط به مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (آغاز غلاف‌دهی) بود. در این مرحله نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) و کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) در هر دو سال زراعی به‌ترتیب با میانگین ۹۳/۸۴، ۸۳/۸۵ و ۷۰/۲۹، ۶۹/۶۵ درصد دارای بیشترین و کمترین مقدار نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی بودند (شکل ۲). همچنین نسبت کاشت ۵۰:۵۰ نیز از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با نسبت

جدول ۲- مقایسه میانگین مربعات ارتفاع ساقه سویا در نسبت‌های مختلف کاشت
 Table 2- Mean of squares comparison of soybean shoot height (cm) in different planting ratios

نسبت‌های کاشت (ارزن - سویا) Planting ratios (soybean-millet)	روز پس از کاشت سال ۱۳۹۷ Day after planting in 2018					روز پس از کاشت سال ۱۳۹۸ Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
100 : 0	36.01±3.6	47.20±5.9	57.55±2.4	65.51±1.3	65.22±3.1	27.25±2.6	53.15±2.2	63.75±1.8	70.01±3.5	64.75±2.2
75 : 25	33.20±2.9	45.75±6.8	50.77±6.6	54.75±2.6	64.50±4.1	30.50±0.9	50.71±8.5	49.77±2.9	70.05±6.4	60.01±4.3
50 : 50	29.24±1.9	42.71±6.2	43.50±4.6	47.75±4.9	51.51±3.1	26.25±1.1	41.22±1.5	51.71±1.2	57.25±5.9	49.75±4.5
25 : 75	26.51±2.1	36.25±5.8	37.75±3.8	50.01±2.8	48.75±6.9	26.50±2.5	33.75±1.9	43.01±5.8	47.70±9.8	46.01±4.9
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	4.76 **	9.51 ns	7.24 **	5.36 **	6.65 **	3.02 *	7.59 **	5.27 **	12.11 **	5.26 **
ضریب تغییرات C.V (%)	9.54	13.83	9.55	6.14	7.23	6.85	10.57	6.32	12.34	6.26

ns, * and **: are not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively and values are means±standard deviation (\bar{X} ±SD).
 ns و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و اعداد پس از میانگین نشان‌دهنده انحراف استاندارد است.

جدول ۳- مقایسه میانگین مربعات ارتفاع ساقه ارزن در نسبت‌های مختلف کاشت

نسبت‌های کاشت (ارزن - سویا) Planting ratios (soybean-millet)	روز پس از کاشت سال ۱۳۹۷					روز پس از کاشت سال ۱۳۹۸				
	Day after planting in 2018					Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
0 : 100	8.14±1.3	14.23±1.7	35.25±3.3	62.75±1.9	66.25±3.3	9.01±0.8	15.01±2.1	41.25±5.7	62.01±5.4	66.75±5.4
25 : 75	8.03±0.3	14.25±2.6	39.01±1.8	69.50±1.9	65.22±4.5	9.20±0.9	21.01±4.1	44.50±1.3	67.05±7.1	67.70±6.2
50 : 50	6.65±1.1	17.01±1.6	43.77±4.9	78.22±2.5	68.71±6.2	7.25±1.7	26.25±3.3	61.75±4.3	78.25±4.3	73.75±4.9
75 : 25	8.13±0.6	16.25±2.6	58.01±3.9	80.50±5.9	90.75±6.5	8.75±1.5	32.50±4.2	64.01±2.9	75.70±3.6	92.22±7.4
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	1.47 ^{ns}	3.91 ^{ns}	5.26 ^{**}	4.91 ^{**}	7.37 ^{**}	2.07 ^{ns}	5.69 ^{**}	5.70 ^{**}	7.82 ^{**}	9.95 ^{**}
ضریب تغییرات CV (%)	11.88	15.82	7.48	4.22	6.33	15.11	15.02	6.73	6.90	8.28

ns, * and **: are not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively and values are means±standard deviation (\bar{X} ±SD).

جدول ۴- مقایسه میانگین مربعات شاخص سطح برگ سویا در نسبت‌های مختلف کاشت
Table 4- Mean of squares comparison of soybean leaf area index (LAI) in different planting ratios

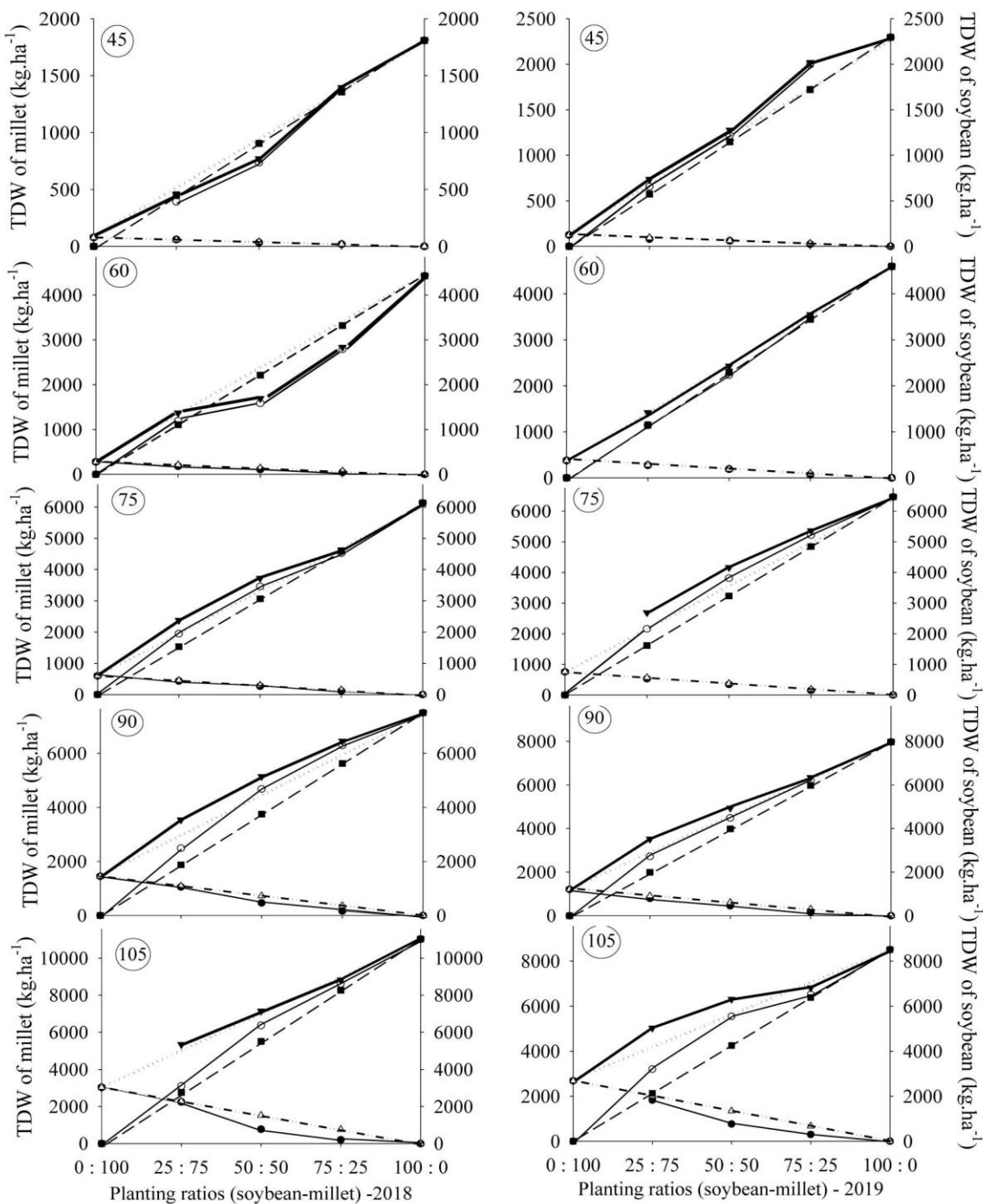
نسبت‌های کاشت (ارزن- سویا) Planting ratios (soybean-millet)	روز پس از کاشت سال ۱۳۹۷ Day after planting in 2018					روز پس از کاشت سال ۱۳۹۸ Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
	100 : 0	0.97±0.1	2.15±0.1	2.11±0.1	2.64±0.3	5.29±0.7	0.78±0.1	2.41±0.2	2.69±0.2	3.48±0.2
75 : 25	1.09±0.1	1.85±0.2	2.15±0.1	2.60±0.3	5.43±0.8	1.02±0.1	2.34±0.3	3.47±0.2	3.47±0.3	4.02±0.5
50 : 50	0.91±0.2	1.71±0.2	2.73±0.2	3.25±0.8	6.18±0.9	0.88±0.1	2.34±0.2	3.23±0.2	3.65±0.6	6.34±0.6
25 : 75	1.07±0.1	2.47±0.2	3.01±0.1	3.43±0.2	6.09±0.6	1.02±0.1	2.46±0.3	3.96±0.5	5.38±0.5	6.54±0.2
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	4.76 ^{ns}	0.28 ^{**}	0.28 ^{**}	0.72 ^{ns}	1.15 ^{ns}	0.14 ^{**}	0.44 ^{ns}	0.77 ^{**}	0.76 ^{**}	0.84 ^{**}
ضریب تغییرات CV (%)	15.36	8.55	6.90	15.27	12.52	9.34	11.54	12.11	8.96	11.44

ns, * and **: are not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively and values are means±standard deviation ($\bar{X}\pm SD$).
* و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و اعداد پس از میانگین نشان‌دهنده انحراف استاندارد است.

جدول ۵- مقایسه میانگین مربعات شاخص سطح برگ ارزن در نسبت‌های مختلف کاشت
 Table 5- Mean of squares comparison of millet leaf area index (LAI) in different planting ratios

نسبت‌های کاشت (ارزن - سویا) Planting ratios (soybean-millet)	روز پس از کاشت سال ۱۳۹۷ Day after planting in 2018					روز پس از کاشت سال ۱۳۹۸ Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
	0 : 100	0.18±0.01	0.45±0.1	1.08±0.6	0.69±0.6	0.12±1.1	0.34±0.1	0.70±0.2	1.25±0.3	0.68±0.9
25 : 75	0.19±0.02	0.39±0.1	1.11±0.5	0.75±0.4	0.14±1.3	0.27±0.1	0.62±0.1	1.03±0.1	0.65±0.4	0.18±0.8
50 : 50	0.15±0.03	0.34±0.2	1.21±0.2	0.53±0.6	0.12±1.4	0.29±0.1	0.70±0.1	1.12±0.4	0.61±0.3	0.12±0.7
75 : 25	0.18±0.03	0.25±0.1	0.97±0.4	0.51±0.2	0.16±0.5	0.22±0.1	0.48±0.1	1.07±0.3	0.51±0.6	0.12±0.7
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	0.03 ns	0.09 **	0.15*	0.16*	0.01 **	0.06 ns	0.09 **	0.15 ns	0.09 *	1.81 **
ضریب تغییرات C.V (%)	12.23	15.81	8.70	15.81	5.52	15.28	9.53	8.91	10.14	7.54

ns, * and **: are not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively and values are means±standard deviation (\bar{X} ±SD).



شکل ۱- تأثیر رقابت دو گیاه ارزن و سویا بر مقدار وزن خشک کل بوته در نسبت‌های مختلف کاشت و در سال‌های مورد مطالعه

Fig. 1- The effect of millet and soybean crop competition on total dry weight in different planting ratios (soybean-millet) and the studied years

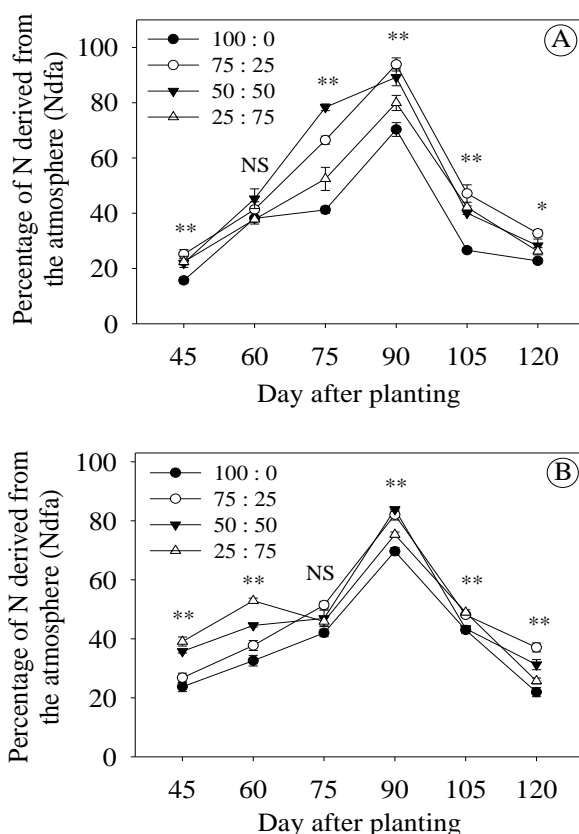
● وزن خشک کل بوته ارزن، ○ وزن خشک کل بوته سویا، ▼ مجموع وزن خشک کل دو گیاه در کشت مخلوط، △ مقدار قابل پیش‌بینی گیاه ارزن، ■ مقدار قابل پیش‌بینی گیاه سویا و اعداد داخل دایره در تصاویر مربوط به تعداد روز پس از کاشت می‌باشد

● Actual total dry weight of millet, ○ Actual total dry weight of soybean, ▼ Total actual yields of millet and soybean in intercropping, △ Expected total dry weight in millet, ■ Expected total dry weight in soybean, and the numbers inside the circle in the pictures are related to the day after planting.

حتی در کمترین سطح نیز از توانایی بالایی برخوردار است و در اختیار داشتن فضای بیشتر باعث افزایش رقابت در کشت مخلوط با سویا می‌شود (Layek et al., 2014). بنابراین، به نظر می‌رسد در مراحل اولیه رشد، تخلیه سریع‌تر عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن توسط غلات (Jiao et al., 2017) نقش مهمی در افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) دارد. علاوه بر آن، کاهش قدرت منبع و انتقال مواد فتوسنتزی نیز می‌تواند باعث کاهش وزن خشک و نرخ تثبیت بیولوژیکی در گیاه سویا شود (Luca & Hungria, 2014).

اما در مراحل ابتدایی رشد (۴۵ روز پس از کاشت) و پیش از آغاز گل‌دهی گیاه سویا، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) دارای فعالیت تثبیت بیولوژیکی بالاتری بود. این روند در مرحله ۶۰ روز پس از کاشت و در سال ۱۳۹۸ نیز مشاهده شد.

با توجه به محدودیت طول دوره رشد گیاه ارزن به نظر می‌رسد با افزایش سهم کاشت گیاه مذکور در کشت مخلوط و عدم مشارکت آن به دلیل آغاز رسیدگی به‌خصوص در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت، میزان فعالیت تثبیت بیولوژیکی در گیاه سویا در مقایسه با سایر نسبت‌های کشت مخلوط کاهش یافت. نتایج مطالعه برخی از پژوهشگران نشان داد گیاه ارزن مرواریدی در استفاده مؤثر از نیتروژن



شکل ۲- میانگین درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی سویا در طی دوره رشد و در نسبت‌های مختلف کاشت (ارزن - سویا)

Fig. 2- The average percentage of N derived from the atmosphere in soybean during the growing season and at different planting ratios (soybean-millet)

خطوط عمودی بر روی نقاط نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE)، حروف A و B به‌ترتیب نشان‌دهنده سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

خطوط عمودی بر روی نقاط و حروف A و B نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE) و سال‌های مطالعه ۲۰۱۸-۲۰۱۹ است. ns، *، ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

Vertical bars on the points and the letters A, and B represent the standard error (SE) and studied years 2018-2019

ns, *, and, **: are not significant, Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

نسبت‌های مختلف کشتمخلوط از نظر میزان فعالیت کل میکروبی خاک تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۶). یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش مقدار فعالیت کل میکروبی خاک در مرحله رسیدگی گیاه سویا می‌تواند مربوط به طول دوره رشد کمتر گیاه ارزن و همچنین افزایش سن گیاه سویا باشد. از آنجا که میزان فعالیت کل میکروبی در منطقه ریزوسفر بیشتر از سایر نقاط می‌باشد (Dotaniya et al., 2019)، بنابراین فعالیت مذکور می‌تواند تحت تأثیر میزان کربن اختصاص یافته به ترشحات ریشه قرار گیرد. این در حالی است که گیاه، میزان اختصاص کربن حاصل از مواد فتوسنتزی را در مراحل مختلف رشد مدیریت می‌نماید به نحوی که در مراحل انتهایی رشد مسیر اختصاص کربن را به سمت بخش بالایی مانند ساقه‌ها تغییر می‌دهد (Pausch & Kuzyakov, 2018; Oluwaseyi et al., 2019). در مجموع، چنین استنباط می‌شود که افزایش تنوع، باعث بهبود زیست‌توده میکروبی شده و از نرخ بالاتر فعالیت آنزیمی پشتیبانی می‌کند (King, 2014). هر چند فعالیت میکروبی خاک در چرخه کربن ممکن است به‌طور مستقیم مواد غذایی را برای رشد گیاه فراهم نکند، اما برای تکثیر میکروارگانیسم‌های خاک که باعث تقویت رشد گیاه می‌شوند، کاملاً ضروری است. بنابراین، به نظر می‌رسد تنوع بیشتر و تمایل به رقابت باعث ایجاد پویایی در زیست‌توده میکروبی و افزایش فعالیت کل آنزیمی خاک در اواسط رشد گیاه و در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط شده است. افزایش فعالیت کل میکروبی خاک در کشت مخلوط توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Li et al., 2013; Diakhate et al., 2016; Nyawade et al., 2019).

با توجه به افزایش معنی‌دار عملکرد ماده خشک در نسبت‌های کشت مخلوط، افزایش درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در مقایسه با تیمار کشت خالص (۱۰۰:۰) می‌تواند مربوط به نتایج مذکور و افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه سویا باشد. در مجموع، افزایش توانایی تثبیت بیولوژیکی گیاهان لگوم در کشت مخلوط با گیاهان زراعی چهار کربنه توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Zhang et al., 2014; Hu et al., 2016). علاوه بر مطالب مذکور نسبت‌های مختلف کاشت در سال‌های مورد مطالعه اثر معنی‌داری بر فعالیت میکروبی خاک (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری) داشتند (جدول ۶). میزان فعالیت میکروبی خاک در مرحله ۶۰ روز پس از کاشت در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص گیاه سویا (۰ : ۱۰۰) و ارزن (۱۰۰ : ۰) بود. بیشترین میزان فعالیت متعلق به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) در سال ۱۳۹۸ به ترتیب با میانگین ۴۵/۷۹ و ۴۴/۰۸ بود که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. هر چند میزان فعالیت میکروبی خاک در سال ۱۳۹۷ نیز در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) بیشتر از سایر نسبت‌های کشت مخلوط بود و نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) از لحاظ آماری فاقد تفاوت معنی‌دار بودند (جدول ۶). بررسی فعالیت میکروبی خاک در مرحله رسیدگی نیز نشان داد نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) در سال ۱۳۹۷ و ۵۰:۵۰ در سال ۱۳۹۸ به ترتیب با میانگین ۳۸/۸۸، ۲۲/۳۹ دارای بیشترین و کمترین میزان فعالیت کل میکروبی خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری بودند. هر چند از لحاظ آماری در سال ۱۳۹۸

جدول ۶- مقایسه میانگین مربعات فعالیت کل میکروبی خاک (۳۰-۰ cm) در نسبت‌های مختلف کاشت

Table 6- Mean of squares comparison of total microbial activity in different planting ratios

نسبت‌های کاشت (ارزن-سویا) Planting ratios (soybean-millet)	۶۰ روز پس از کاشت 60 days after planting		مرحله برداشت Harvest stage	
	2018	2019	2018	2019
	0 : 100	30.50 ± 1.3	34.38 ± 1.6	26.43 ± 0.6
25 : 75	37.44 ± 1.4	44.08 ± 1.2	38.88 ± 1.8	23.90 ± 1.4
50 : 50	34.43 ± 0.4	45.79 ± 0.9	32.95 ± 1.1	22.39 ± 0.8
75 : 25	34.84 ± 1.3	42.21 ± 2.8	34.82 ± 1.6	21.32 ± 1.4
100 : 0	29.78 ± 1.4	29.84 ± 0.6	31.32 ± 0.7	25.32 ± 0.4
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	2.34 **		1.61 **	
ضریب تغییرات CV (%)	4.21		3.88	

ns, * و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و اعداد پس از میانگین نشان‌دهنده انحراف استاندارد است. ns, * and **: are not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively and values are means ± standard deviation ($\bar{X} \pm SD$).

جدول ۷- مقایسه میانگین مربعات عملکرد دانه در نسبت‌های مختلف کاشت
Table 7- Mean comparisons of seed yield in different planting ratios

نسبت‌های کاشت (ارزن- سویا) Planting ratios (soybean-millet)	عملکرد دانه ارزن Millet seed yield (kg.ha ⁻¹)			عملکرد دانه سویا Soybean seed yield (kg.ha ⁻¹)			مجموع عملکرد دانه Total seed yield (kg.ha ⁻¹)	
	2018	2019	مجموع Total	2018	2019	مجموع Total	2018	2019
0 : 100	1379.1±78.3	1168.1±77.7	1273.6±133.9	-	-	-	1379.1±78.3	1168.1±77.8
25 : 75	1067.2±110.3	834.7±141.5	950.9±170.9	2088.2±72.6	2411.4±109.9	2249.8±107.9	3155.4±81.8	3246.1±79.1
50 : 50	332.0±104.2	289.7±85.3	310.8±91.1	3504.9±370.9	3732.6±271.3	3618.8±215.9	3836.9±236.1	4022.7±193.8
75 : 25	45.2±28.9	91.9±16.2	68.5±33.1	3761.5±549.1	4639.8±181.4	4200.6±323.9	3806.7±411.7	4731.7±392.8
100 : 0	-	-	-	4394.4±456.3	4963.9±103.6	4679.2±431.9	4394.4±456.3	4963.9±103.6
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	141.55 *		100.09 **	618.32 **	294.17 **	321.75 **	467.87 *	
ضریب تغییرات C.V (%)	14.63		14.63	11.24	4.56	8.31	9.23	

ns, * و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و اعداد پس از میانگین نشان‌دهنده انحراف استاندارد است.
ns, * and **: are not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively, and values are means±standard deviation ($\bar{X}\pm SD$).

جدول ۸- شاخص‌های کشت مخلوط گیاه ارزن و سویا در سال‌های مورد مطالعه
Table 8- Intercropping index of millet and soybean in the studied years

شاخص کشت مخلوط Intercropping index	گیاه زراعی Crop	نسبت‌های کاشت (ارزن- سویا) Planting ratios (soybean-millet)		
		25 : 75	50 : 50	75 : 25
شاخص برابری زمین Land equivalent ratio	ارزن Millet	0.75±0.12	0.25±0.06	0.05±0.01
	سویا Soybean	0.48±0.02	0.77±0.04	0.90±0.07
	مجموع Total	1.23±0.14	1.02±0.10	0.95±0.06
نسبت رقابت Competitive ratio	ارزن Millet	1.56±0.21	0.31±0.07	0.18±0.06
	سویا Soybean	1.96±0.28	3.34±0.86	5.93±2.15
غالبیت Aggressivity	ارزن Millet	- 0.23±0.03	- 0.26±0.02	- 0.24±0.03
	سویا Soybean	0.23±0.03	0.26±0.02	0.24±0.03

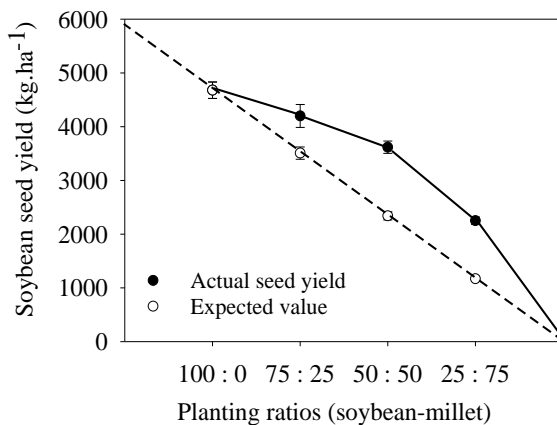
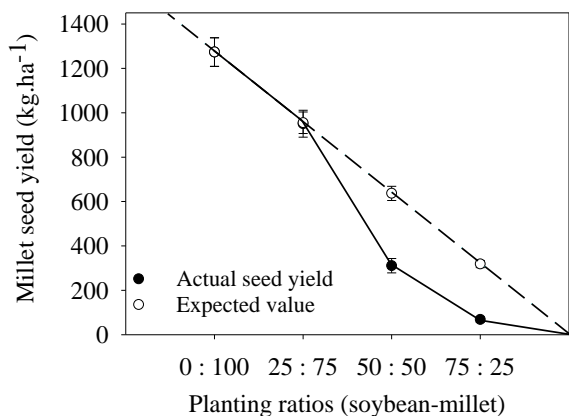
اعداد پس از میانگین نشان‌دهنده انحراف استاندارد است.
The values are means±standard deviation ($\bar{X}\pm SD$).

خالص سویا (۱۰۰:۰) و ارزن (۰:۱۰۰) دارای بیشترین و کمترین عملکرد دانه بودند. در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز

در نهایت، نسبت‌های مختلف کاشت در سال‌های مورد مطالعه اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه داشتند (جدول ۷). به نحوی که کشت

ترتیب با میانگین ۱/۲۳ و ۱/۰۲ دارای نسبت برابری زمین بالاتر از یک بودند (جدول ۸) و این موضوع نشان‌دهنده برتری نسبت کاشت مذکور بر کشت خالص گیاهان مورد مطالعه است. نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) نیز با نسبت برابری زمین ۰/۹۵ فاقد سودمندی لازم در مقایسه با کشت خالص گیاه ارزن (۰:۱۰۰) و سویا (۱۰۰:۰) بودند. علاوه بر آن، بررسی شاخص نسبت رقابت نیز نشان داد با افزایش سهم کاشت گیاه سویا در کشت مخلوط قدرت رقابت گیاه سویا افزایش یافت و نسبت رقابت گیاه ارزن تنها در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن- سویا) بیشتر از واحد بود. بنابراین، توان رقابتی گیاه ارزن در کشت مخلوط با کاهش سهم ردیف کاشت به شدت کاهش یافت. همچنین نتایج مربوط به شاخص رقابت نیز نشان داد، گیاه سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط گیاه غالب بوده و دارای تسلط رقابتی بر گیاه ارزن می‌باشد. این موضوع نقش مهمی در افزایش کارایی استفاده از منابع توسط گیاه سویا در الگوی کشت مخلوط و افزایش میزان ماده خشک در مقایسه با مقادیر قابل انتظار دارد. در نهایت، یکی از مهم‌ترین دلایل برتری نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن- سویا) و افزایش بهره‌وری در تولید محصول، می‌تواند ایجاد رابطه مکملی مثبت، افزایش تولید ماده خشک و فعالیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن در سیستم کشت مخلوط باشد.

نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) در سال ۱۳۹۸ با میانگین ۴۷۳۱/۶۶ کیلوگرم دارای بیشترین میزان عملکرد دانه در هکتار بود. نسبت کاشت ۵۰:۵۰ در سال‌های مورد مطالعه نیز از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن- سویا) در سال ۱۳۹۷ نداشت (شکل ۳). به‌طور کلی، با کاهش ردیف کاشت گیاه سویا در نسبت‌های مختلف، مقدار عملکرد دانه در مقایسه با مقادیر مورد انتظار افزایش یافت. اما این نتایج در خصوص گیاه ارزن صادق نبود و با کاهش ردیف کاشت گیاه در کشت مخلوط میزان عملکرد دانه در مقایسه با مقادیر مورد انتظار به دلیل کاهش توان رقابتی گیاه ارزن کاهش یافت (شکل ۴). افزایش میزان عملکرد گیاه سویا در نسبت‌های مختلف کاشت نیز می‌تواند به‌علت بهبود فعالیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، افزایش سطح برگ و میزان ماده خشک در گیاه سویا باشد. در این زمینه و بر اساس نتایج تحقیقات پژوهشگران، ارقام پرمحصول گیاه سویا در کشت مخلوط می‌توانند از طریق حفظ ساختار زایشی در مرحله آغاز تشکیل دانه (R_5) عملکرد خود را افزایش دهند (Wang et al., 2020). لذا افزایش شاخص سطح برگ در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن- سویا) در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت می‌تواند نقش مهمی در افزایش میزان عملکرد دانه در مقایسه با مقادیر قابل انتظار داشته باشد. علاوه بر آن، در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن- سویا) و ۵۰:۵۰ به



شکل ۳- میانگین عملکرد دانه گیاه ارزن و سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط
 Fig. 3- The average seed yield of millet and soybean in different planting ratios

خطوط عمودی بر روی ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE) می‌باشد.
 vertical bars on the points represent the standard error (SE)

نتایج این پژوهش نشان داد، ارتفاع ساقه سویا و ارزن تحت تأثیر نسبت‌های مختلف کاشت قرار گرفت. به نحوی که با افزایش سهم

نتیجه‌گیری

۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن - سویا) و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز جاری گیاه باشد. علاوه بر نتایج مذکور، میزان نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز بیشتر از کشت خالص گیاه سویا (۱۰۰:۰) بود. افزایش تعداد ردیف کاشت گیاه ارزن در الگوی کشت مخلوط می‌تواند نقش مهمی در ایجاد رقابت بیشتر با گیاه سویا در مراحل ابتدایی رشد و تأثیر بر قابلیت تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا داشته باشد. علاوه بر آن، افزایش فعالیت کل میکروبی خاک در کشت مخلوط در مراحل مختلف رشد نسبت به کشت خالص نیز می‌تواند نشان‌دهنده اختصاص بیشتر مواد فتوسنتزی به ترشحات ریشه در بخش زیرزمینی باشد. لذا تنوع بیشتر و تمایل به رقابت باعث ایجاد پویایی و افزایش فعالیت کل میکروبی در زیست‌توده خاک شده است. همچنین عملکرد دانه سویا در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) به ترتیب ۵۴/۶۷ و ۹۲/۳۲ درصد در مقایسه با مقادیر قابل پیش‌بینی افزایش یافت. علاوه بر نتایج مذکور، در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) ۵۰:۵۰ به ترتیب با میانگین ۱/۲۳ و ۱/۰۲ دارای نسبت برابری زمین بالاتر از یک بودند و با بررسی شاخص غالبیت نیز مشخص گردید سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط گونه غالب است. در نهایت، افزایش بهره‌وری در عملکرد دانه در الگوی کشت مخلوط ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) می‌تواند مربوط به تسلط رقابتی سویا و همچنین درصد نور دریافتی توسط تاج‌پوشش، افزایش میزان نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی، فعالیت کل میکروبی خاک، ایجاد رابطه مکملی و افزایش میزان ماده خشک سویا نسبت به مقادیر قابل انتظار باشد.

کاشت سویا در کشت مخلوط ارتفاع ساقه گیاه ارزن افزایش یافت. اما روند تغییرات ارتفاع سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بر خلاف ارزن بود و با کاهش تعداد ردیف کاشت سویا، ارتفاع ساقه در مقایسه با کشت خالص (۱۰۰:۰) کاهش یافت. به نظر می‌رسد، رابطه مستقیم تعداد ردیف کاشت گیاه سویا و درصد نور دریافت شده توسط تاج‌پوشش کشت مخلوط نقش مهمی در افزایش ارتفاع ساقه ارزن در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن - سویا) و کاهش ارتفاع ساقه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) در مقایسه با کشت خالص هر یک از گیاهان مورد مطالعه داشت. علاوه بر نتایج مذکور، گیاه سویا بر خلاف گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط موفق به تولید شاخص سطح برگ بیشتری در مقایسه با کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) شد و نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن - سویا) دارای بیشترین میزان شاخص سطح برگ بودند. کاهش شاخص سطح برگ ارزن نیز می‌تواند به دلیل قدرت رقابت و شاخص سطح برگ بیشتر سویا در الگوی کشت مخلوط و سازوکار فیزیولوژیکی گیاه ارزن از طریق تخصیص بیشتر ماده خشک به اندام‌های زایشی باشد. علاوه بر آن، از آنجا که درصد افزایش ماده خشک کل سویا در مراحل مختلف رشد بیشتر از میزان کاهش عملکرد ارزن بوده و همچنین مجموع عملکرد ماده خشک کل در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده است، بنابراین، تأثیر رقابت در کشت مخلوط دو گیاه ارزن و سویا از نوع مکملی مثبت می‌باشد. لذا کاهش مقدار ماده خشک کل گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط می‌تواند مربوط به کاهش میزان نور دریافتی به‌ویژه در نسبت‌های کاشت

References

- Adam, G., & Duncan, H.(2001). Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 943-951. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3)
- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H.R., Hatami, F., Abd Shah, H., & Kazemeian, A.(2018). Agricultural statistics of the crop year 2016-2017. Ministry of Jihad Agriculture, Tehran, Iran. (In Persian)
- Ahmadvand, G., & Hajinia, S.(2016). Ecological aspects study of replacement intercropping patterns of soybean (*Glycine max* L.) and millet (*Panicum miliaceum* L.). *Agroecology Journal*, 7(4), 485-498. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v7i4.43744>
- Bedoussac, L., & Justec, E.(2011). A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops. *Field Crop Research*, 124, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.025>
- Bitew, Y., Alemayehu, G., Adego, E., Assefa, A., & Moral, M.T.(2019). Boosting land use efficiency, profitability, and productivity of finger millet by intercropping with grain legumes. *Cogent Food and Agriculture*, 5(1), 1-22. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1702826>
- Cardoso, E.J.B.N., Nogueira, M.A., & Ferraz, S.M.G.(2007). Biological N₂ fixation and mineral N in common

- bean – maize intercropping or sole cropping in southeastern Brazil. *Experimental Agriculture*, 43, 319-330. <https://doi.org/10.1017/S0014479707005029>
7. Cataldo, D.A., Haroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L.(1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6, 71–80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
 8. Cox, W.J., & Cherney, J.H.(2011). Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. *Agronomy Journal*, 103(1), 123-129. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0316>
 9. Crews, T.E., Blesh, J., Culman, S.W., Hayes, R.C., Jensen, E.S., Mark, M.C., Peoples, M.B., & Schipanski, M.E.(2016). Going where no grains have gone before: From early to mid-succession. *Agriculture, Ecosystem and environment*, 223, 223-238. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.012>
 10. Darapuneni, M.K., Angadi, S.V., & Umesh, M.R.(2018). Canopy development of annual legumes and forage sorghum intercrops and its relation to dry matter accumulation. *Agronomy Journal*, 110(3), 939-949. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0301>
 11. Diakhate, S., Gueye, M., Chevallier, T., Diallo, N.H., Assigbetse, K., Abadie, J., Diouf, M., Masse, D., Sembene, M., Ndour, Y.B., Dick, R.P., & Lardy, L.C.(2016). Soil microbial functional capacity and diversity in a millet-shrub intercropping system of semi-arid Senegal. *Journal of Arid Environments*, 129, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.01.010>
 12. Dotaniya, M.L., K. Aparna, C.K. Dotaniya, M. Singh and K.L. Regar. 2019. Role of soil enzymes in sustainable crop production. In, *Enzymes in food biotechnology, production, applications, and future prospects*, Ed. M. Kuddus, 569-589. Academic Press. Amsterdam, Netherlands.
 13. Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., & Pennington, J.S.(1971). Stage of development descriptions for soybean, *Glycine max* L. *Crop Science*, 11(6), 929-931. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>
 14. Ganbari, A., Nasiripour, M., & Tavassoli, A.(2010). Evaluation of ecophysiological characteristics of intercropping of millet (*Panicum miliaceum* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Agroecology Journal*, 2(4), 556-564. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jag.v2i4.8784>
 15. Giles, C.D., Brown, L.K., Adu, M.O., Mezeli, M.M., Sandral, G.A., Simpson, R.J., Wendler, R., Shand, C.A., Menezes, D., Darch, T., Stutter, M.I., Lumsdon, D.G., Zhang, H., & George, T.S.(2017). Response-based selection of barley cultivars and legume species for complementarity: Root morphology and exudation in relation to nutrient source. *Plant and Soil*, 255, 12-28. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.002>
 16. Hangria, M., & Mendes, I.C.(2015). Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis. In F.J. de Bruijn (Eds). *Biological Nitrogen Fixation*, Volume 2, First Edition. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. p. 1009-1023.
 17. Hauggaard-Nielsen, H., Gooding, M., Ambus, P., Corre-Hellou, G., Crozat, Y., Dahlmann, C., Dibet, A., Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., & Jensen, E.S.(2009). Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition, and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crop Research*, 113, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.009>
 18. Herridge, D.F.(1984). Effects of nitrate and plant development on the abundance of nitrogenous solutes in root-bleeding and vacuum extracted exudates of soybean. *Crop Science*, 25, 173-179. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400010041x>
 19. Hill, J., & Shimamoto, Y.(1973). A method of analyzing competition with special reference to herbage plants. *Journal of Agricultural Science*, 81, 77-88. <https://doi.org/10.1017/S0021859600058342>
 20. Hu, F., Gan, Y., Chai, Q., Feng, F., Zhao, C., Yu, A., Mu, Y., & Zhang, Y.(2016). Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize-pea strip intercropping. *Field Crops Research*, 198, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.022>
 21. Hunt, R.(1990). Basic growth analysis, plant growth analysis for beginners. British Library Cataloguing in Publication, Salisbury, England p. 118.
 22. Jahan, M., Nassiri Mahallati, M., Amiri, M.B., & Ehyayi, H.R.(2013). Radiation absorption and use efficiency of sesame as affected by biofertilizers inoculation in a low input cropping system. *Industrial Crops and Products*, 43, 606-611. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.012>
 23. Jiao, Y., Wang, E., Chen, W., & Smith, D.L.(2017). Complex interactions in legume/cereal intercropping system:

- Role of root exudates in root-to-root communication. *BioRxiv* 097584: 1-6. <https://doi.org/10.1101/097584>
24. Khammar, Z., Dahmardeh, M., Khammari, I., & Mossavi, S.M.(2020). The evaluation of resource efficiency and soil fertility indices in pearl millet (*Panicum miliaceum* L.) and peanut (*Arachis hypogaea* L.) intercropping. *Agroecology Journal*, 11(4), 1511-1525. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v11i4.76827>
 25. Khan, M.A., Chen, Q. Li, W., Zhang, L. Wu, Li, Z., & Lin, W.(2014). Effect of interspecific root interaction on soil nutrition, enzymatic activity, and rhizosphere biology in maize-peanut intercropping system. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 51(2), 395-406. <https://doi.org/10.1111/plb.13157>
 26. King, A.(2014). Multifunctional agriculture: root and nitrogen dynamics in two alternative systems. Graduate Ph.D. Dissertations, Faculty of Ecology and Evolutionary Biology, Iowa State University, United State.
 27. Kuz'yakov, Y., & Xu, X.(2013). Competition between roots and microorganisms for nitrogen: Mechanisms and ecological relevance. *New Phytologist*, 198, 656-669. <https://doi.org/10.1111/nph.12235>
 28. Layek, J., Shivakumar, B.G., Rana, D.S., Munda, S., Lakshman, K., Das, A., & Ramkrushna, G.I.(2014). Soybean–cereal intercropping systems as influenced by nitrogen nutrition. *Agronomy Journal*, 106(6), 1933-1946. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0521>
 29. Li, X., Mu, Y., & Cheng, Y.(2013). Effects of intercropping sugarcane and soybean on growth, rhizosphere soil microbes, nitrogen and phosphorus availability. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 1113-1119. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1148-y>
 30. Loreau, M., & Hector, A.(2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412, 72–76. <https://doi.org/10.1038/35083573>
 31. Luca, M.J.D., & Hungria, M.(2014). Plant densities and modulation of symbiotic nitrogen fixation in soybean. *Scientia Agricola*, 71(3), 181-187. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000300002>
 32. Maikhuri, R.K., Dangwal, D., & Negi, V.S.(2016). Evaluation of symbiotic nitrogen fixing ability of legume crops in Central Himalaya, India. *Rhizosphere*, 1, 26-28. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2016.001>
 33. McGilchrist, C.A.(1965). Analysis of competition experiments. *Biometrics*, 21, 975–985. <https://doi.org/10.2307/2528258>
 34. Mead, R., & Willey, R.W.(1980). The concept of a land equivalent ratio and advantages in yields for intercropping. *Experimental Agriculture*, 16, 217–228. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>
 35. Mehriani, A., Mosavat, S.A., Shoushi, A.A., Tabatabaei, S.A., Ghasemi, A., Shoushi, A., Tabatabaei, S., Ghasemi, A., Abbasi, M.R., & Zamanian, M.(2013). Bastan the first cultivar of foxtail millet for emergency feed production. *Research Achievement for Field and Horticulture Crops*, 2(2), 119-128. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22092/rafhc.2013.100137>
 36. Monti, M., Pellicano, A., Santonoceto, C., & Pristeri, A.(2016). Yield components and nitrogen use in cereal-pea intercrops in Mediterranean. *Field Crop Research*, 196, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.017>
 37. Nyawade, S.O., Karanja, N.N., Gachene, C.K.K., Gitari, H.I., Geldermann, E.S., & Parker, M.L.(2019). Short-term dynamics of soil organic matter fractions and microbial activity in smallholder potato-legume intercropping systems. *Applied Soil Ecology*, 142, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.015>
 38. Oluwaseyi, S.O., Ayangbenro, A.S., Glick, B.R., & Babalola, O.(2019). Plant health: Feedback effect of root exudates-rhizobiome interactions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 1155-1166. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9556-6>
 39. Pausch, J., & Kuz'yakov, Y.(2018). Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global Change Biology*, 24(1), 1–12. <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>
 40. Ren, Y., Liu, J., Wang, Z., & Zhang, S.(2016). Planting density and sowing proportions of maize–soybean intercrops affected competitive interactions and water-use efficiencies on the Loess Plateau, China. *European Journal of Agronomy*, 72, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.10.001>
 41. Stomph, T., Dordas, C., Baranger, A., de Rijk, J., Dong, B., Evers, J., Gu, C., Li, L., Simon, J., Jensen, E.S., Wang, Q., Wang, Y., Wang, Z., Xu, H., Zhang, C., Zhang, L., Zhang, W., Bedoussac, L., & Werf, W.V.(2020). Designing intercrops for high yield, yield stability, and efficient use of resources: Are there principles? *Advances in Agronomy*. In D.L. Sparks (Ed), *Advances in Agronomy*. Academic Press, London. p. 1-50.
 42. Tagliapietra, E.L., Streck, N.A., Marques, T.S., Richter, G.L., Silva, M.R., Cera, J.C., Guedes, J.V., & Zanon, A.J.(2018). Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. *Agronomy*

- Journal*, 110(3), 932-938. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0523>
43. Unkovich, M., Herridge, D.F., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, B., Giller, K., Alves, B., & Chalk, P.(2008). Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. Australian Center for International Agricultural Research (ACIAR). p. 136-258.
 44. Ventura, F., Vignudelli, M., Poggi, G.M., Negri, L., & Dinelli, G.(2020). Phenological stages of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) encoded in BBCH scale. *International Journal of Biometeorology*, 64, 1167-1181. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01891-3>
 45. Wang, X., Wu, X., Ding, G., Yang, F., Yong, T., Wang, X., & Yang, W.(2020). Analysis of grain yield differences among soybean cultivars under maize–Soybean intercropping. *Agronomy*, 10(110), 1-17. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010110>
 46. Willer, H., & Lernoud, J.(2017). The world of organic agriculture statistics and emerging trends. Research Institute of Organic Agriculture FiBL and IFOAM-Organic International. Frick and Bonn, Germany. p. 340.
 47. Willey, R.W., & Rao, M.R.(1980). A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture*, 16, 117-125. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010802>
 48. Yang, F., Fan, Y., Wu, X., Cheng, Y., Liu, Q., Feng, L., Chen, J., Wang, Z., Wang, X., & Yong, T.(2018). Auxin-to-gibberellin ratio as a signal for light intensity and quality in regulating soybean growth and matter partitioning. *Frontiers Plant Science*, 9(56), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00056>
 49. Young, E.G., & Conway, C.F.(1942). On the estimation of allantoin by the Rimini-Schryver reaction. *Journal of Biological Chemistry*, 142, 839–853. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)45082-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)45082-X)
 50. Zhang, N.N., Sun, Y.M., Wang, E.T., Yang, J.S., Yuan, H.L., & Scow, K.M.(2014). Effects of intercropping and rhizobial inoculation on the ammoniaoxidizing microorganisms in rhizospheres of maize and faba bean plants. *Applied Soil Ecology*, 85, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.008>