



Investigation of Aboveground Interspecific Interaction in the Intercropping Culture of Soybean (*Glycine max* (L) Merrill) and Niger (*Guizotia abyssinica* Cass)

Meisam Namdari¹, Rahmat Abbasi^{2*}, Hematollah Pirdashti³, and Faeze Zaefarian²

Received: 30-05-2021
Revised: 02-11-2021
Accepted: 16-11-2021
Available Online: 16-11-2021

How to cite this article:

Namdari, M., Abbasi, R., Pirdashti, H., & Zaefarian, F. (2023). Investigation of aboveground interspecific interaction in the intercropping culture of soybean (*Glycine max* (L) Merrill) and niger (*Guizotia abyssinica* Cass). *Journal of Agroecology*, 15(2), 239-261
DOI: [10.22067/agry.2021.70705.1047](https://doi.org/10.22067/agry.2021.70705.1047)

Introduction

Today, increasing sustainability in agriculture is essential to meet future food needs. In this regard, the intercropping culture has been considered as a viable and environmentally friendly approach to sustainable agriculture. Further, the investigation of complementary species relationships in annual cropping systems could be addressed to achieve sustainability and development. In order to fully understand the inter-specific interactions between crops, it is crucial to know how to react to neighboring species. The selection of species with different spatial structures in the intercropping culture pattern can be helpful in this regard. The differences in crop canopy in intercropping cultivation increase the efficiency of using water, light, and nutrients, as well as facilitating inter-species competition. Therefore, this study investigated the competition between soybean and Niger seed on yield and yield components, radiation efficiency, and yield advantage in the intercropping cultivation system.

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 experiment was done based on a randomized complete block with four replications. The experimental treatment was 75% soybean + 25% Niger, 50% soybean + 50% Niger, 25% soybean+75% Niger based on the replacement method and soybean monoculture (100:0) and Niger monoculture (0:100). For example, a 25:75 combination included around three rows consisting of sowing a soybean and one row of Niger, along with vice versa in the 75:25 combinations. The 50:50 combinations also included planting two rows of each studied crop. The seed was sown directly on the 5th of May with a density of 28 plants per square meter. This study was investigated agronomic traits, radiation use efficiency, and the impact of competition on intercropping using Hill and Shimamoto models.

Results and Discussion

Based on the results, different planting ratios significantly affected plant height, dry weight, radiation use efficiency, yield, and yield components of both crops. The highest shoot heights of soybean and Niger, with an average of 76.3 and 189.7 cm, were related to a planting ratio of 75:25, respectively. Also, the number of pods per soybean plant and the number of capitule per plant of Niger in intercropping cultivation increased compared

1- Ph.D. Student, Department of Agronomy, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.
2- Assistant Professor and Associate Professor, Department of Agronomy, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, respectively.
3- Professor, Department of Genetic & Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
(*- Corresponding author's Email: r.abasi@sanru.ac.ir)

to monoculture. The reduction in the share of soybean and Niger sowing rows in different intercropping ratios increased the crop yield components. Also, both crops' shoot' dry weight increased in different planting ratios compared to the expected values. The highest percentage of dry shoot weight in soybean and Niger was related to 25:75 and 75:25 planting ratios, respectively. Besides, during different stages of growth, the radiation use efficiency of Niger in planting ratio was 50:50 and 25:75 higher than soybean. Also, the radiation use efficiency in intercropping cultivation was more elevated than in monoculture. Due to the growing trend in its amount compared to the expected values, the effect of competition on radiation use efficiency during different growth stages was the type of mutual cooperation. According to the results, soybean (100:0) and Niger monoculture (0:100) had the highest and lowest grain yield, with an average of 4965.7 and 462.4 kg. ha⁻¹, respectively. Among the different intercropping, the combination 75:25 with an average of 4173.73 kg. ha⁻¹ had the highest grain yield. Finally, the average land equivalent ratio in all different intercropping ratios was more than one, and the planting ratio 50:50 had the highest average yield (LER = 1.28).

Conclusion

Increasing resource utilization efficiency and establishing a mutual co-operation relationship is essential in improving the usefulness of Soybean and Niger intercropping cultivation compared to monoculture. Furthermore, the selection of Niger in intercropping systems can be beneficial due to their morphological features and facilitation of competition.

Keywords: Agronomic traits, LER, Mutual co-operation, Radiation use efficiency

مقاله پژوهشی

جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۲۶۱-۲۳۹

بررسی تعاملات بین گونه‌ای بخش بالایی در کشت مخلوط گیاه سویا (*Glycine max* (L) Merrill) و دان‌سیاه (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass)

میثم نامداری^۱، رحمت عباسی^{۲*}، همت الله پیردشتی^۳ و فائزه زعفریان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

چکیده

انتخاب گونه و الگوی کشت مناسب نقش مهمی در تعیین نوع رقابت و بهره‌وری در سیستم کشت مخلوط دارد، لذا به منظور بررسی رقابت سویا (*Glycine max* (L.) Merrill) و دان‌سیاه (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass) در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بر خصوصیات زراعی و کارایی مصرف نور، آزمایشی در دو سال زراعی (۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷) و به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل نسبت‌های کاشت ۱:۱۰۰، ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ و ۱۰۰:۰ (به ترتیب دان‌سیاه-سویا) به روش جایگزینی بودند. صفات مورد مطالعه شامل ارتفاع بوته، کارایی مصرف نور، عملکرد و اجزای عملکرد سویا و دان‌سیاه بود. نتایج نشان داد، بیشترین ارتفاع بوته سویا و دان‌سیاه به ترتیب با میانگین ۷۶/۳ و ۱۸۹/۷ سانتی‌متر مربوط به نسبت کاشت ۷۵:۲۵ بود. همچنین تعداد غلاف در بوته سویا و تعداد کاپیتول در بوته دان‌سیاه در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص افزایش یافت. به طور کلی، تأثیر رقابت بر کارایی مصرف نور در طی مراحل مختلف رشد از نوع همیاری دو جانبه بود. همچنین کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) و دان‌سیاه (۰:۱۰۰) به ترتیب با ۴۹۶۵/۲۴ و ۴۶۲/۳۹ کیلوگرم در هکتار بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه را در اختیار داشتند. بیشترین میانگین بهره‌وری در کشت مخلوط ($LER=1/28$) نیز از نسبت کاشت ۵۰:۵۰ حاصل شد. در نهایت، افزایش کارایی استفاده از منابع و ایجاد رابطه همیاری دوجانبه نقش مهمی در افزایش سودمندی کشت مخلوط سویا و دان‌سیاه در مقایسه با کشت خالص دارد و انتخاب نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه-سویا) گزینه مناسبی برای دستیابی به هدف مذکور می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات زراعی، کارایی مصرف نور، نسبت برابری زمین، همیاری دو جانبه

مقدمه

افزایش پایداری در کشاورزی برای رفع نیاز غذایی در آینده و

کاهش ردپای زیست محیطی کشاورزی ضروری است. در این میان کشت مخلوط یک استراتژی مناسب برای افزایش بهره‌وری کشاورزی در واحد سطح است، زیرا برای جذب منابع مبتنی بر ساز و کارهای زیست محیطی می‌باشد (Yu et al., 2015). انتخاب گیاهان زراعی با قابلیت متفاوت از نظر استفاده از منابع برای ایجاد رابطه مکملی در سیستم کشت مخلوط ضروری به نظر می‌رسد و برای دستیابی به آن توجه به نوع گیاه، تراکم و الگوی کاشت بسیار مهم است (Stomph et al., 2020). در این بین، استفاده از گیاهان فراموش شده که دارای پتانسیل سازگاری و قدرت رقابت بالاتری می‌باشند، می‌تواند به عنوان

- ۱- دانشجوی دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
- ۲- به ترتیب استادیار و دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
- ۳- استاد، پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

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

DOI: 10.22067/agry.2021.70705.1047

گیاه همراه، نقش مهمی در ایجاد روابط متقابل در کشت مخلوط داشته باشد. از جمله گیاهان مذکور می‌توان به دان‌سیاه (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass) اشاره کرد که نسبت به سایر دانه‌های روغنی آسیب‌پذیری کمتری به تنش‌های زنده و غیر زنده دارد. این گیاه زراعی در شرایط حاصلخیزی کم خاک، تنش خشکی و مدیریت معقول گیاه زراعی قادر به تولید عملکرد مطلوب است. علاوه بر آن، از پتانسیل خوبی برای حفظ خاک و احیای اراضی برخوردار بوده و قابلیت استفاده به‌عنوان کود بیولوژیک را نیز دارد. این بدان معنی است که گیاهان زراعی در تناوب پس از دان‌سیاه، همیشه از رشد مناسبی برخوردارند (Ranganatha et al., 2016). علاوه بر مطالب مذکور، کاربرد گیاه لگوم در کشت مخلوط نیز می‌تواند ضمن قابلیت تثبیت بیولوژیک رویکردی پایدار برای کاهش کاربرد نهاده‌های خارج از مزرعه باشد (Machado, 2009) و منجر به ثبات بیشتر عملکرد در محیط‌های محدودکننده و در سیستم‌های کم‌نهاده شود (Jamont et al., 2013). در بین گیاهان دانه‌روغنی نیز، سویا (*Glycine max* (L) Merrill) با در اختیار داشتن بیشترین سطح زیرکشت اراضی ارگانیک در سطح جهان از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Willer & Lernoud, 2017) و همچنین به‌دلیل وجود سازوکار جبرانی قدرتمند، قابلیت تحمل اثر سایه‌دهی و سازگاری، قابلیت افزایش عملکرد را در سیستم کشت مخلوط دارد (Luca & Hungria, 2014; Corassa et al., 2018; Khalid et al., 2018). استفاده از گیاه لگوم در کشت مخلوط می‌تواند باعث افزایش کارایی استفاده از نور و در نتیجه، افزایش راندمان تولید شود (Chimonyo et al., 2018, Stomph et al., 2020). برخی پژوهشگران ایجاد رابطه مکملی پویا و افزایش ۱۰ درصدی کارایی مصرف نور را در کشت مخلوط بر پایه گیاه لگوم و تحت شرایط کمبود نیتروژن گزارش کردند (Bedoussac & Justec, 2010). در همین راستا، بررسی نسبت‌های مختلف کشت مخلوط سویا و ذرت (*Zea mays* L.) نشان داد در مرحله گل‌دهی گیاه سویا، میزان تشعشع فعال فتوسنتزی و کسری از نور دریافت شده در نسبت کاشت ۱:۱ در مقایسه با نسبت کاشت ۲:۲ کاهش یافت و این موضوع باعث کاهش راندمان مصرف نور در نسبت کاشت مذکور شد (Liu et al., 2017). به‌طور کلی، کشت مخلوط می‌تواند بهره‌وری در هر واحد تابش خورشید را از طریق نفوذ بیشتر و یا حفظ میزان بالاتر کارایی استفاده از نور افزایش دهد (Wang et al., 2015; Alizadeh et

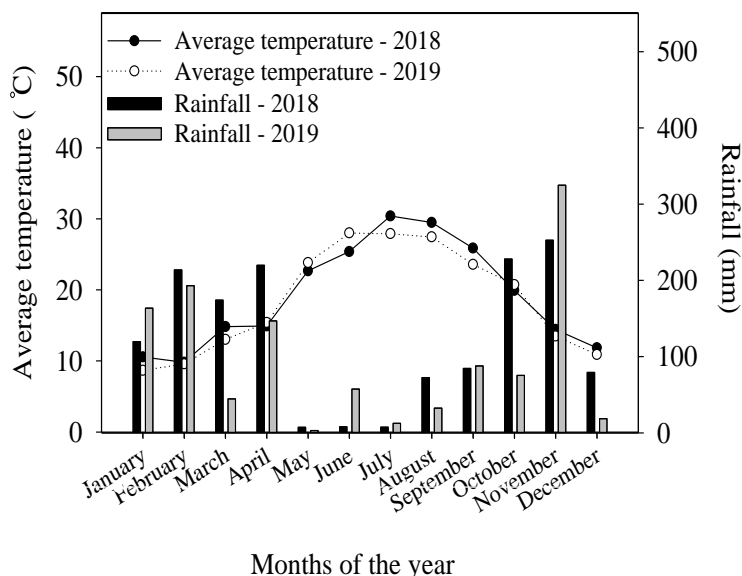
al., 2010). برخی دیگر از محققان به افزایش بهره‌وری و عملکرد در کشت مخلوط اشاره کرده و بیان داشتند الگوی کاشت ۱:۱ عدس (*Lens culinaris* L.) - زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) (Rezaie Chiyaneh et al., 2013) و ۲:۲ لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) - گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) (Koocheki et al., 2012) دارای بیشترین نسبت برابری زمین و ضریب نسبی تراکم بودند. همچنین تأثیر الگوی کاشت در افزایش رابطه مکملی، میزان ماده خشک و نسبت برابری زمین در کشت مخلوط سویا- ذرت نیز مشاهده شده است (Ren et al., 2018). در همین راستا، برخی از پژوهشگران دریافته‌اند، با تغییر الگوی کشت از مخلوط ردیفی به مخلوط نواری، بهره‌وری در سیستم کشت مخلوط به‌دلیل کاهش اثرات تسهیل و تکمیل‌کنندگی دو گونه کاهش می‌یابد (Rezaie Chiyaneh et al., 2013). سایر مطالعات نیز افزایش ۲۰ درصدی کارایی استفاده از منابع را در نسبت کاشت ۵۰:۵۰ نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) در مقایسه با کشت خالص نشان داد (Haugaard-Nielsen & Jensen, 2001). اثر معنی‌دار نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بر افزایش وزن خشک کل، تعداد و توزیع غلاف و همچنین عملکرد دانه گیاه سویا در برخی دیگر از مطالعات نیز گزارش شده است (Namdari et al., 2010; Zaefarian et al., 2014). به‌طور کلی، یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده بیشتر سویا از منابع طبیعی مانند نور و مواد غذایی در الگوی کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص، برتری در قدرت رقابت با گیاه همراه است (Yang et al., 2013). در نهایت، انتخاب گیاهان زراعی متفاوت از منظر فنولوژی و ساختار رشد روشی از طریق تعاملات بین‌گونه‌ای می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری در الگوی کشت مخلوط شود. لذا، هدف از این مطالعه بررسی تعاملات در بخش بالایی گیاه سویا و دان‌سیاه بر کارایی استفاده از منابع و تأثیر رقابت بر روابط مکملی دو گیاه مذکور در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط و در سیستم کشاورزی کم‌نهاده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در طی دو سال زراعی (۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۷-۹۸) در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با عرض جغرافیایی ۳۳°، ۳۶° شمالی و طول جغرافیایی ۵۳°، ۰۳° شرقی

اردیبهشت به‌صورت هیبرم‌کاری و به‌طریقه دستی انجام شد. بذور سویا پیش از کاشت با باکتری *Bradyrhizobium japonicum* (با تراکم سلولی 2×10^7 CFU.ml⁻¹) تلقیح گردید. تعداد خطوط کاشت در هر کرت ۱۲، فاصله بین خطوط ۳۵ سانتی‌متر، طول خطوط چهار متر و تراکم نهایی برای هر دو گیاه به‌طور ثابت ۲۸ بوته در مترمربع بود (Carciochi et al., 2019; Kasle et al., 2020). قبل از کاشت، کود مورد نیاز با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل آزمون خاک (جدول ۱) در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ به‌میزان ۹۰ کیلوگرم فسفر و ۶۶ کیلوگرم پتاس و در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ به‌میزان ۳۳ کیلوگرم فسفر به‌ترتیب از منبع سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم تأمین شد. آبیاری گیاهان به‌صورت قطره‌ای به‌کمک دستگاه تانسیمتر در پتانسیل ماتریک ۰/۴- بار و عملیات وجین به‌صورت دستی در چهار مرحله و با فاصله زمانی ۱۴ روز انجام شد.

و ارتفاع ۴۳ متر از سطح دریا انجام شد. تغییرات میانگین درجه‌حرارت و بارندگی ماهانه محل انجام آزمایش در سال‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در پنج تیمار و چهار تکرار انجام و تیمارهای آزمایش شامل نسبت‌های مختلف کاشت به‌روش جایگزینی بر اساس درصد شامل ۰:۱۰۰، ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ و ۱۰۰:۰ (به‌ترتیب دان‌سیاه-سویا) بودند. ترکیب‌های ۰:۱۰۰ و ۱۰۰:۰ به‌ترتیب کشت خالص گیاه دان‌سیاه و سویا را تشکیل دادند. در ترکیب‌های ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ نیز به‌ترتیب سه ردیف گیاه دان‌سیاه- یک ردیف سویا و یک ردیف گیاه دان‌سیاه- سه ردیف سویا منظور شد. ترکیب ۵۰:۵۰ نیز شامل کشت متوالی دو ردیف از گیاه دان‌سیاه و سویا بود. بذر سویا رقم ساری (J.K. 695، پاکوتاه و از گروه رسیدگی ۵) از مرکز تحقیقات شرکت توسعه کشت دانه‌های روغنی شهرستان ساری و بذر گیاه دان‌سیاه از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه گردید. عملیات کاشت در تاریخ ۱۵



شکل ۱- مقدار بارندگی و میانگین دمای ماهانه شهر ساری در دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

Fig. 1- Monthly rainfall and mean air temperature during the two growing seasons at the Sari, 2018-2019

شد. همچنین جهت تعیین وزن خشک نهایی ساقه نیز، ابتدا پس از جداسازی اندام‌های زایشی از ساقه و قرار دادن آن‌ها به‌صورت جداگانه در پاکت‌های مخصوص، نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آون الکتریکی تهویه‌دار با درجه‌حرارت ۷۰ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس بلافاصله پس از خروج از آون، با ترازوی دیجیتال با دقت یک-هزارم توزین و وزن خشک نهایی هر نمونه ثبت شد.

عملیات برداشت در تاریخ پنجم آبان ماه و پس از حذف ردیف‌های طرفین و ۰/۵ متر از دو طرف هر کرت به‌عنوان اثرات حاشیه، با دست و به‌وسیله قیچی باغبانی از چهار ردیف میانی و سطحی معادل ۴/۲ مترمربع انجام شد. هم‌زمان با عملیات برداشت تعداد پنج بوته از هر یک از گیاهان مورد مطالعه به‌طور تصادفی انتخاب و برای تعیین اجزای عملکرد و اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیکی گیاه برداشت

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 O.M. (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P ₂ O ₅ (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم (K ₂ O) (mg.kg ⁻¹)	هدایت الکتریکی EC×10 ⁻³ (dS.m ⁻¹)	اسیدیته 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

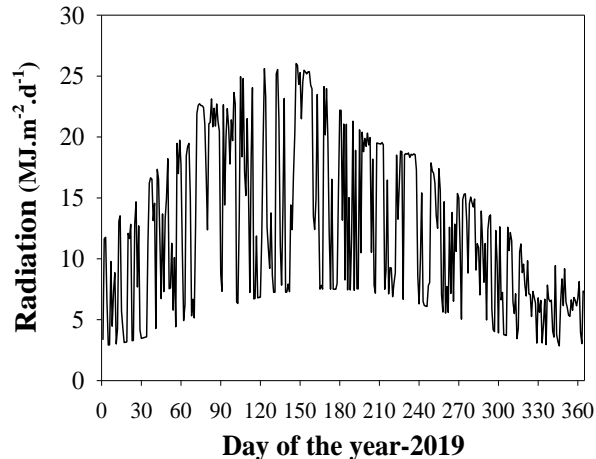
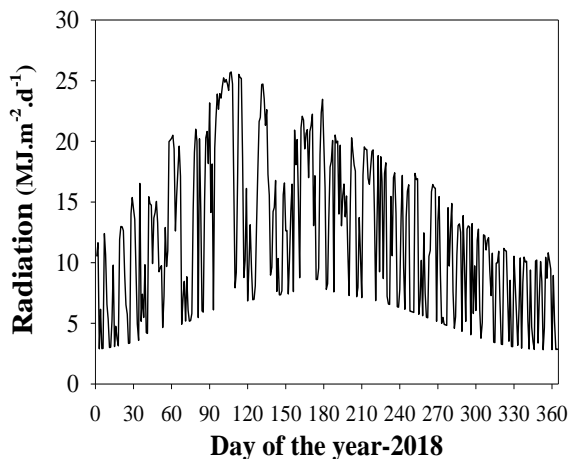
آزمایش) اندازه‌گیری و از طریق معادله آنگستروم (معادله ۱) تصحیح گردید (Ambas & Baltas, 2014).

$$\frac{R_s}{R_a} = a_s + b_s \frac{n}{N} \quad (۱) \text{ معادله}$$

که در آن، R_s : میزان شدت تابش روزانه با توجه به ساعات آفتابی، R_a : تابش روزانه خارج از جو، N و n : به ترتیب حداکثر ساعات آفتابی ممکن و واقعی در دوره زمانی و a_s و b_s : ضرایب آنگستروم می‌باشند. این ضرایب برای شهرستان ساری به ترتیب معادل ۰/۱۸ و ۰/۵۵ در نظر گرفته شد (Janbazghobadi, 2018). میزان شدت تابش روزانه در سال‌های مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

جهت اندازه‌گیری کسری از نور دریافت شده توسط تاج‌پوشش گیاهان در نسبت‌های مختلف کاشت از دستگاه تشعشع‌سنج (LX 1108 light meter, LT Lutron) استفاده شد. بدین منظور جهت ثبت میزان نور عبور یافته در تیمارهای مورد مطالعه با رعایت اثر حاشیه، به فاصله هر ۱۵ سانتی‌متر یک قرائت به کمک سنسور در سطح بالا و پایین تاج‌پوشش در روزهای آفتابی و در ظهر خورشیدی (ساعت ۱۲:۰۰ الی ۱۴:۰۰) طی پنج مرحله از ۴۵ روز پس از کاشت و با فاصله زمانی ۱۵ روز انجام و ثبت شد.

میزان تشعشع روزانه خورشیدی برای عرض جغرافیایی شهرستان ساری بر اساس تعداد ساعات آفتابی اخذ شده از ایستگاه مرکزی هواشناسی شهرستان ساری (واقع در پنج کیلومتری محل انجام



شکل ۲- روند فصلی برآورد روزانه تشعشع خورشیدی در شهرستان ساری و در سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸
Fig. 1- Seasonal trends in estimated daily global radiation at Sari city, in 2018 and 2019

گیاهان در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز از طریق مدل پیشنهادی وانگ و همکاران (Wang et al., 2015) و به کمک معادله‌های زیر طی شش مرحله از ۴۵ روز پس از کاشت و با فاصله زمانی ۱۵ روز محاسبه گردید.

همچنین تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) از حاصل ضرب میزان شدت تابش روزانه در ضریب ۰/۵۰ به دست آمد (Zhang et al., 2008; Liu et al., 2017).

۱ Photosynthetically Active Radiation

$$F_{im} = f_m \left[\left(\frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \times \exp \left(-k_m \frac{hm-hs}{f_m} \times Lm \right) \right] + f_m \left[\left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \times \exp \left(-k_m \frac{hm-hs}{f_m} \times Lm \right) \right] + f_m f_s \left[\left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \times \exp \left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm \right) \right] \quad (2)$$

$$F_{ib} = f_s \left[\left(\frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) + f_s \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \exp \left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm \right) \right] + f_m f_s \left[\left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \times \left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm \right) \right] \quad (3)$$

$$F_1 = f_m \left(\frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hm-hs}{f_m} \times Lm \right) \right) \right] \quad (4)$$

$$F_2 = f_m \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm \right) \right] \right\} \quad (5)$$

$$F_3 = f_s \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm \right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$F_4 = \left(\frac{\sqrt{hs^2 + Wm^2} - hs}{Wm} \times \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \left[\frac{1 - \exp \left(-k_m \frac{hs}{f_m} \times Lm \right)}{f_m} \right] \quad (7)$$

$$F_5 = F_{im} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) - K_s L_s \right) \right] \right\} \frac{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right)}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) + K_s L_s} \quad (8)$$

$$F_6 = F_{im} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Wm^2} - (hm-hs)}{Wm} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) - K_s L_s \right) \right] \right\} \frac{K_s L_s}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) + K_s L_s} \quad (9)$$

$$F_7 = F_{ib} \left(\frac{\sqrt{hs^2 + Ws^2} - hs}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{-k_s L_s}{f_s} \right) \right] \quad (10)$$

$$F_8 = F_{ib} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) - K_s L_s \right) \right] \right\} \frac{K_s L_s}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) + K_s L_s} \quad (11)$$

$$F_9 = F_{ib} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) - K_s L_s \right) \right] \right\} \frac{K_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right)}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) + K_s L_s} \quad (12)$$

$$F_{a(m)} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + \quad (13)$$

$$F_{b(s)} = F_6 + F_7 + \quad (14)$$

$$F_{PAR} = F_a + \quad (15)$$

۰/۶۸ منظور گردید. سطح برگ نیز در طی دوره رشد و از مرحله ۴۵ روز پس از کاشت با فاصله زمانی ۱۵ روز طی شش مرحله به کمک نرم‌افزار Digimizer (v.5.4) و پس از انجام کالیبراسیون ثبت و مقادیر شاخص سطح برگ روزانه در تیمارهای مختلف از طریق برازش رابطه ۱۷ برآورد شد.

$$K = \frac{-\ln \left(\frac{I_t}{I_0} \right)}{LAI} \quad (16)$$

$$LAI = a + b \times 4 \times \frac{e^{\left(-\frac{x-c}{d} \right)}}{\left(1 + e^{\left(-\frac{x-c}{d} \right)} \right)^2} \quad (17)$$

که در این معادله‌ها، m و s: به ترتیب گیاه بلندتر و کوتاه‌تر، hm و hs: ارتفاع گیاه، Lm و Ls: شاخص سطح برگ گیاه، Wm و Ws: عرض نوار کاشت، Km و Ks: ضریب خاموشی گیاه، fm و fs: نسبت مساحت نوار کاشت گیاهان و Fa(m) و Fb(s): کسری از تشعشع فعال فتوسنتزی دریافت شده است.

ضریب خاموشی نور از طریق برازش رابطه ۱۶ که برگرفته از مدل بیر-لامبرت می‌باشد (Lunagaria & Shekh, 2006) در کشت خالص گیاهان محاسبه و برای گیاه دان‌سیاه ۰/۷۳ و سویا

مرکب داده‌ها از نرم‌افزار سیستم آنالیز آماری (۹/۱) SAS استفاده شد. آزمون بارتلت برای بررسی همگنی واریانس خطاهای آزمایشی انجام شد و فرض صفر مبنی بر عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین واریانس خطاها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسات میانگین داده‌ها با آزمون کم‌ترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel و Sigma Plot انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته: بر اساس نتایج حاصل از تجزیه مرکب، اثر نسبت-های کاشت و اثر متقابل نسبت‌های مختلف کاشت در سال بر ارتفاع نهایی بوته سویا و دان‌سیاه معنی‌دار بود و اثر سال فقط بر ارتفاع ساقه گیاه دان‌سیاه معنی‌دار بود (جدول ۲). بر این اساس، ارتفاع بوته دان-سیاه در سال دوم با میانگین ۱۷۶/۰۶ سانتی‌متر بیشتر از سال اول بود (جدول ۳). افزایش ۱۵/۴۰ درصدی ارتفاع بوته دان‌سیاه در سال دوم می‌تواند مربوط به افزایش میزان بارندگی در زمان استقرار گیاهچه و کاهش میانگین درجه‌حرارت ماهانه در مراحل انتهایی رشد رویشی دان‌سیاه در مقایسه با سال اول باشد. همچنین در بین نسبت‌های مختلف کاشت، بیشترین ارتفاع بوته سویا متعلق به نسبت ۷۵:۲۵ (به-ترتیب دان‌سیاه-سویا) در سال ۱۳۹۷ و کشت خالص (۱۰۰:۰) در سال ۱۳۹۸ بود. نسبت کاشت ۷۵:۲۵ نیز در سال‌های مورد مطالعه کمترین ارتفاع بوته را در اختیار داشت. اما در خصوص گیاه دان‌سیاه، بیشترین و کمترین مقدار ارتفاع نهایی بوته به ترتیب متعلق به نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (به‌ترتیب دان‌سیاه-سویا) در سال ۱۳۹۸ و کشت خالص (۱۰۰:۰) در سال ۱۳۹۷ بود (جدول ۳). هر چند ارتفاع بوته دان‌سیاه در کشت خالص (۱۰۰:۰) در سال‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشت. نتایج نشان داد، کاهش سهم ردیف‌های کاشت سویا و دان‌سیاه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به ترتیب باعث افزایش ارتفاع نهایی بوته سویا و کاهش آن در گیاه دان‌سیاه شد. به نحوی که ارتفاع بوته سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ در سال دوم ۲۳/۹۲ درصد کمتر از کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) در سال اول بود. در مقابل، ارتفاع بوته دان‌سیاه در کشت خالص (۱۰۰:۰) در سال اول ۲۳/۲۵ درصد کمتر از نسبت کاشت ۷۵:۲۵ در سال دوم بود. افزایش ارتفاع گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (به‌ترتیب دان‌سیاه-سویا) می‌تواند مربوط به ارتفاع بیشتر گیاه دان‌سیاه در مقایسه با گیاه سویا باشد. همچنین به نظر می‌رسد، قدرت رقابت گیاه سویا در نسبت کاشت

که در این معادله‌ها، K: ضریب خاموشی نور، I_0 و I_t : به ترتیب میزان نور دریافت شده در پایین و بالای تاج‌پوشش، LAI: شاخص سطح برگ، a: عرض از مبدأ، b: حداکثر شاخص سطح برگ، c: زمان رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ، d: نقطه عطف منحنی و x: زمان بر حسب روزهای پس از سبز شدن است.

در نهایت، تشعشع جذب شده در هر مرحله از حاصل‌ضرب نور ورودی شبیه‌سازی شده در درصد نور جذب شده به دست آمد و مقدار کل تشعشع جذب شده به صورت تجمعی از طریق حاصل‌ضرب نور ورودی شبیه‌سازی شده در انتگرال کسر تشعشع فعال فتوسنتزی جذب شده نسبت به زمان محاسبه گردید. کارایی مصرف نور از رابطه ۱۸ محاسبه گردید (Tsubo & Walker, 2002).

$$RUE = \frac{ADM}{\sum I_{PAR} F} \quad (18)$$

که در آن، ADM: مقدار کل ماده خشک گیاه (گرم در مترمربع)، I_{PAR} : مقدار تشعشع فعال فتوسنتزی روزانه (مگاژول بر مترمربع) و F: میزان کسری از نور دریافت شده توسط گیاه در طی مراحل مختلف رشد می‌باشد.

برای محاسبه نسبت برابری زمین (Mead & Willey, 1980) و

ضریب نسبی تراکم (De Wit, 1960) به ترتیب از معادله‌های زیر استفاده شد.

$$LER = LER_a + LER_b \quad (19)$$

$$LER_a = \left(\frac{Y_{ia}}{Y_{ma}} \right) \quad LER_b = \left(\frac{Y_{ib}}{Y_{mb}} \right) \quad (20)$$

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

که در این معادله‌ها، Y_{ia} و Y_{ib} : به ترتیب 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} : سهم گیاه a و b در کشت مخلوط و Z_{ma} و Z_{mb} : 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.

$$\text{Expected yield} = \frac{Y_m}{z_i} \quad (21)$$

در نهایت، جهت تجزیه آماری داده‌ها، مقایسه میانگین‌ها و تجزیه

علاوه بر آن، الگوی فضایی متفاوت نیز می‌تواند اثر مستقیمی بر نور محیط و رشد گیاه سویا در سیستم کشت مخلوط داشته باشد (Machado; 2009; Yang et al., 2013). بنابراین، به نظر می‌رسد افزایش تعداد غلاف در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) می‌تواند مربوط به افزایش توان فتوسنتزی و ایجاد الگوی مناسب جهت توسعه کانوپی در کشت مخلوط باشد.

تعداد کاپیتول در بوته دان‌سیاه: بر اساس نتایج تجزیه مرکب اثر سال و اثر نسبت‌های مختلف کاشت بر تعداد کاپیتول در بوته دان‌سیاه معنی‌دار بود (جدول ۲). تعداد کاپیتول در بوته دان‌سیاه در سال دوم با میانگین ۸۶/۴۳ بیشتر از سال اول بود (جدول ۳). همچنین نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) و ۵۰:۵۰ نیز به ترتیب با میانگین ۸۷/۹۵ و ۸۷/۵۱ دارای بیشترین تعداد کاپیتول در بوته بودند و در مقابل، کشت خالص دان‌سیاه (۰:۱۰۰) نیز با میانگین ۵۷/۶۵ کاپیتول کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند. افزایش تعداد کاپیتول در بوته با کاهش تعداد ردیف‌های کاشت یک مکانیسم خودتنظیمی در دان‌سیاه است. این خصوصیت بارز در گیاه مذکور که مشابه رفتار مورفولوژیکی سویا می‌باشد، کمک شایانی به برقراری ارتباط و ایجاد رقابت مطلوب از طریق تولید سطح تاج‌پوشش مناسب در سیستم کشت مخلوط کرده است.

وزن خشک نهایی ساقه: بر اساس نتایج تجزیه مرکب نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر وزن خشک نهایی ساقه سویا و دان‌سیاه داشتند و اثر سال فقط بر مقدار وزن خشک نهایی ساقه سویا معنی‌دار بود (جدول ۲). به نحوی که در گیاه سویا، سال دوم آزمایش با میانگین وزن خشک ۳۳۵۸/۲۳ کیلوگرم در هکتار نسبت به سال اول از برتری معنی‌داری برخوردار بود (جدول ۳). از آنجا که دوره نوری طولانی‌تر پس از گل‌دهی می‌تواند با افزایش تابش خورشیدی تجمع‌یافته بر میزان ماده خشک و عملکرد دانه سویا مؤثر باشد (Nico et al., 2019)، لذا به نظر می‌رسد افزایش میانگین درجه‌حرارت روزانه از اواخر تیرماه (July) در سال اول باعث کاهش میزان ماده خشک تجمع یافته شده است. همچنین در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) و نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) به ترتیب با میانگین ۴۴۳۳/۲۳ و ۱۴۰۶/۷۹ کیلوگرم در هکتار دارای بیشترین و کمترین وزن خشک نهایی ساقه بودند.

مذکور به‌خصوص در مراحل اولیه رشد می‌تواند نقش مهمی در افزایش ارتفاع گیاه دان‌سیاه داشته باشد. برخی پژوهشگران افزایش ارتفاع میان‌گره ساقه سویا در کشت مخلوط را به کاهش دریافت تشعشع فعال فتوسنتزی نسبت دادند (Liu et al., 2017). علاوه بر آن، رابطه مکملی پویا بین گونه‌ها در شرایط کمبود نیتروژن، می‌تواند منجر به افزایش کارایی استفاده از نور و ارتفاع گیاهان در سیستم کشت مخلوط شود (Bedoussac & Justec, 2010). بنابراین، کاهش ارتفاع بوته گیاه دان‌سیاه و سویا به‌ترتیب در کشت خالص (۰:۱۰۰) و نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) می‌تواند مربوط به نتایج مذکور باشد. افزایش ارتفاع گیاه لگوم در کشت خالص در مقایسه با کشت مخلوط توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Lithourgidis & Dordas, 2010; Monti et al., 2016).

تعداد غلاف در بوته سویا: نتایج تجزیه مرکب نشان داد، اثر سال و اثر نسبت‌های مختلف کاشت بر تعداد غلاف در بوته گیاه سویا معنی‌دار بود (جدول ۲). تعداد غلاف در بوته سویا در سال دوم با میانگین ۹۰/۷۰ بیشتر از سال اول بود (جدول ۳). این موضوع می‌تواند مربوط به اثر منفی افزایش درجه حرارت بر تعداد شاخه‌های فرعی و اندام‌زایشی گیاه (Skurdlik & Koscielniak, 1996) باشد. در این رابطه، نتایج برخی مطالعات نشان داد، میانگین درجه حرارت بهینه در مرحله گل‌دهی سویا ۲۷-۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Onat et al., 2017; Alsajri et al., 2019). همچنین نتایج نشان داد، در بین نسبت‌های مختلف کاشت، بیشترین و کمترین تعداد غلاف در بوته سویا به ترتیب مربوط به نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان-سیاه- سویا) با میانگین ۱۱۷/۲۴ غلاف و کشت خالص سویا (۰:۱۰۰) با میانگین ۵۹/۶۱ غلاف در بوته بودند (جدول ۳). با کاهش تعداد ردیف کاشت سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به‌دلیل در اختیار داشتن فضای کافی برای توسعه شاخ و برگ، بر تعداد غلاف در بوته افزوده شد. در این بین، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) و ۵۰:۵۰ در تولید غلاف در بوته موفق‌تر بودند. این برتری در مقایسه با کشت خالص (۱۰۰:۰) به ترتیب ۳۹/۵۴ و ۱۹/۷۸ درصد بود. به‌طور کلی، وجود مکانیسم جبرانی در گیاه سویا که با نسبت نور قرمز به قرمز دور کانوپی در طول مراحل اولیه رشد فعال می‌شود، از طریق تنظیم دقیق سازوکارهای منبع- مخزن تخصیص ماده خشک به اندام‌های زایشی را افزایش و در نتیجه، منجر به تولید غلاف بیشتر در گیاه می‌شود (Luca & Hungria, 2014; Corassa et al., 2018).

جدول ۲- تجزیه واریانس خصوصیات زراعی گیاه سویا و دان‌سویه در نسبت‌های مختلف کاشت
Table 2- Analysis of variance for Soybean and Niger crop agronomic characteristics in different planting ratios

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	دان‌سویه Niger				سویا Soybean			
		ارتفاع بوته Plant height	تعداد کاپیتول در بوته No. of capitules. plant ⁻¹	وزن خشک ساقه Dried weight of shoot	عملکرد دانه Seed yield	ارتفاع بوته Plant height	تعداد غلاف در بوته No. of pods. Plant ⁻¹	وزن خشک ساقه Dried weight of shoot	عملکرد دانه Seed yield
سال Year (Y)	1	4419 **	4547 **	284786 ns	156812 **	17.85 ns	2020 *	5154814 **	6627351 **
تکرار Replication	6	47.90	140.21	984113	6837	35.68	189.87	303018	294844
نسبت‌های کاشت Planting ratios (P)	3	1958 **	1935 **	75875591 **	137765 **	597.11 **	5028.1 **	13385736 **	9715841 **
سال × نسبت‌های کاشت Y × P	3	741.26 **	141.01 ns	1763681 ns	4226 ns	64.25 **	112.51 ns	3077679 ns	109697 ns
خطا Error	18	101.73	170.18	1182293	2993	12.34	83.18	195959	162259

ns: غیر معنی‌دار

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: Not significant

* and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین خصوصیات زراعی گیاه سویا و دان‌سیاه در نسبت‌های مختلف کاشت
Table 3- Mean comparison for soybean and niger crop agronomic characteristics in different planting ratios

نسبت‌های کاشت (دان‌سیاه- سویا) Planting ratios (soybean- niger)	دان‌سیاه Niger					سویا Soybean						
	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد کاپیتول در بوته No. capitules. plant ⁻¹	وزن خشک ساقه Dried weight of shoot (kg. ha ⁻¹)	عملکرد دانه Seed yield (kg. ha ⁻¹)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد غلاف در بوته No. pod. plant ⁻¹	وزن خشک ساقه Dried weight of shoot (kg. ha ⁻¹)	عملکرد دانه Seed yield (kg. ha ⁻¹)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد غلاف در بوته No. pod. plant ⁻¹	وزن خشک ساقه Dried weight of shoot (kg. ha ⁻¹)	عملکرد دانه Seed yield (kg. ha ⁻¹)
100 : 0	-	-	-	-	-	59.6±8.6	4433±857.1	4965±760.59	-	-	-	-
75 : 25	173.1±8.6	87.9±22.2	3523±773.7	151.13±48.5	70.5±1.6	70.1±11.9	3459±716.7	4021±593.83	70.4±2.1	76.3±1.5	3459±716.7	4021±593.83
50 : 50	148.1±7.1	87.5±13.4	6099±1118.8	272.76±87.7	64.1±6.4	84.0±14.3	2527±545.3	3432±734.48	64.1±6.4	56.2±3.6	2527±545.3	3432±734.48
25 : 75	143.3±10.5	64.9±18.1	8795±1441.4	352.57±97.1	54.9±2.2	117.2±16.9	1406±293.6	2333±439.47	54.9±2.2	53.6±7.5	1406±293.6	2333±439.47
0 : 100	145.6±9.5	57.6±16.4	10544±867.4	462.39±125.5	-	-	-	-	-	-	-	-
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	14.98	13.70	1142	53.09	5.21	9.58	465.01	423.14	5.21	9.58	465.01	423.14
سال Year												
2018	152.55	62.59	7335.20	239.71	65.03	74.81	2555.51	3233.06	65.03	74.81	2555.51	3233.06
2019	176.06	86.43	7146.52	379.72	63.54	90.71	3358.23	4143.24	63.54	90.71	3358.23	4143.24
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	5.98	10.24	858.21	62.47	5.16	11.92	476.22	469.75	5.16	11.92	476.22	469.75

مقادیر میانگین ± انحراف استاندارد

Mean values plus/minus standard deviation ($\bar{x} \pm SD$)

فضای کافی و سرعت بیشتر برای توسعه شاخه‌های فرعی، سهم بیشتری از میزان نور دریافتی در تاج‌پوشش داشت. این موضوع نقش مهمی در کاهش ارتفاع ساقه گیاه سویا در نسبت کاشت مذکور دارد. به‌طور کلی، کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی و همچنین نسبت نور قرمز به قرمز دور، باعث افزایش ارتفاع ساقه سویا می‌شود (Yang et al., 2018; Feng et al., 2019). در نهایت، پس از مرحله ۱۰۵ روز پس از کاشت نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) در دریافت میزان نور موفق‌تر بودند. هر چند در سال ۱۳۹۸ میزان نور دریافتی در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در مراحل ۱۰۵ و ۱۲۰ روز پس از کاشت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (شکل ۴). اما ساز و کار مربوط میزان دریافت نور در گیاه دان‌سیاه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط متفاوت از گیاه سویا بود و با کاهش تعداد ردیف‌های کاشت، میزان کسری از نور دریافت شده گیاه دان‌سیاه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط کاهش یافت (تصویر ۳). به نحوی که در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشترین و کمترین میزان کسری از نور دریافت شده به‌ترتیب متعلق به نسبت کاشت ۷۵:۲۵ و ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) بود.

کارایی مصرف نور: نسبت‌های مختلف کشت مخلوط اثر معنی‌داری بر کارایی مصرف نور گیاه سویا و دان‌سیاه داشتند (جدول ۴ و ۵). با کاهش تعداد ردیف کاشت گیاه سویا در الگوی کشت مخلوط، کارایی مصرف نور کاهش یافت. هر چند کارایی مصرف نور در مراحل ۹۰ و ۱۲۰ روز پس از کاشت به‌ترتیب در سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) بیشتر از کشت خالص سویا بود. علاوه بر آن، کارایی مصرف نور در نسبت کاشت ۵۰:۵۰ نیز در مراحل مذکور معادل کشت خالص گیاه سویا بود (شکل ۵). اما در گیاه دان‌سیاه کارایی مصرف نور در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) و ۵۰:۵۰ در مقایسه با کشت خالص افزایش یافت. به نظر می‌رسد توسعه تاج‌پوشش گیاه در نسبت‌های کاشت مذکور نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف نور گیاهان مورد مطالعه دارد. همچنین تأثیر رقابت در کشت مخلوط نشان داد کارایی مصرف نور گیاه سویا در مراحل مختلف رشد در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) بیشتر از گیاه دان‌سیاه است (شکل ۵).

این نتایج در خصوص گیاه دان‌سیاه نیز صادق بود. اما بر اساس نتایج به‌دست آمده، با کاهش تعداد ردیف‌های کاشت سویا در کشت مخلوط مقدار وزن خشک ساقه در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی‌شده افزایش یافت. بدین ترتیب مقدار وزن خشک نهایی ساقه سویا در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) به‌ترتیب ۲۶/۹۳، ۱۴/۰۳ و ۴/۰۶ درصد بیشتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده بود (شکل ۳). وزن خشک نهایی ساقه دان‌سیاه نیز از نتایج به‌دست آمده در خصوص گیاه سویا تبعیت کرده و کاهش ردیف‌های کشت دان-سیاه در کشت مخلوط با افزایش وزن خشک نهایی ساقه همراه بود. این مقدار به‌ترتیب در نسبت‌های مذکور ۱۱/۲۲، ۱۵/۶۹ و ۳۳/۶۶ درصد بیشتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده بود (شکل ۳). نکته حائز اهمیت در این بخش، افزایش بیشتر وزن خشک کل ساقه سویا و دان‌سیاه به‌ترتیب در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) نسبت به مقادیر قابل انتظار بود. به عبارت دیگر، با وجود کاهش تعداد ردیف کاشت هر یک از گیاهان در الگوی کشت مخلوط، مقدار وزن خشک نهایی ساقه نسبت به مقادیر قابل پیش‌بینی افزایش یافت. در این بین گیاه دان‌سیاه با افزایش ارتفاع ساقه باعث کاهش تسلط رقابتی سویا در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) شد. افزایش وزن خشک گیاهان در سیستم کشت مخلوط با گیاه لگوم توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Lithourgidis et al., 2011; Jamont et al., 2013; Weisany et al., 2016; Thapa et al., 2018).

میزان نور دریافت شده: نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی-

داری بر کسری از نور دریافتی گیاهان مورد مطالعه در نسبت‌های مختلف کاشت داشتند (شکل ۴). نتایج نشان داد، در مورد گیاه سویا تا قبل از بسته شدن تاج‌پوشش، نسبت کاشت ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان کسری از نور دریافت شده در سیستم کشت مخلوط بودند (شکل ۴). هر چند از لحاظ آماری نسبت‌های مختلف کاشت در مراحل ابتدایی سال ۱۳۹۷ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. اما در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت در هر دو سال زراعی نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) دارای بیشترین میزان کسری از نور دریافتی بود (شکل ۴). گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) به‌دلیل در اختیار داشتن

جدول ۴- تجزیه واریانس کارایی مصرف نور گیاه سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط با دان‌سیاه، ۱۳۹۸-۱۳۹۷
 Table 4- Analysis of variance for radiation use efficiency (RUE) of soybean in different intercropping ratios with niger, 2018-2019

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	روز پس از کاشت Day after planting, 2018					روز پس از کاشت Day after planting, 2019						
		45	60	75	90	105	120	45	60	75	90	105	120
بلوک Block	3	0.06	0.02	0.002	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	0.04	0.001
تیمار Treatment	3	1.44**	10.03**	0.63**	0.46**	0.50**	0.47**	0.80**	0.35**	0.91**	0.82**	0.47**	0.39**
خطا Error	9	0.02	0.01	0.002	0.03	0.003	0.01	0.04	0.01	0.01	0.02	0.03	0.005
مجموع Total	15	0.31	0.22	0.13	0.12	0.10	0.10	0.19	0.08	0.19	0.18	0.12	0.08
ضریب تغییرات CV (%)	-	13.25	11.54	5.15	15.40	5.73	8.81	11.14	13.85	11.48	14.79	17.69	8.43

ns: غیر معنی‌دار

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: not significant

* and **: significant at 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۵- تجزیه واریانس کارایی مصرف نور گیاه دان سپاه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط با سویا
 Table 5- Analysis of variance for radiation use efficiency (RUE) of niger in different intercropping ratios with soybean

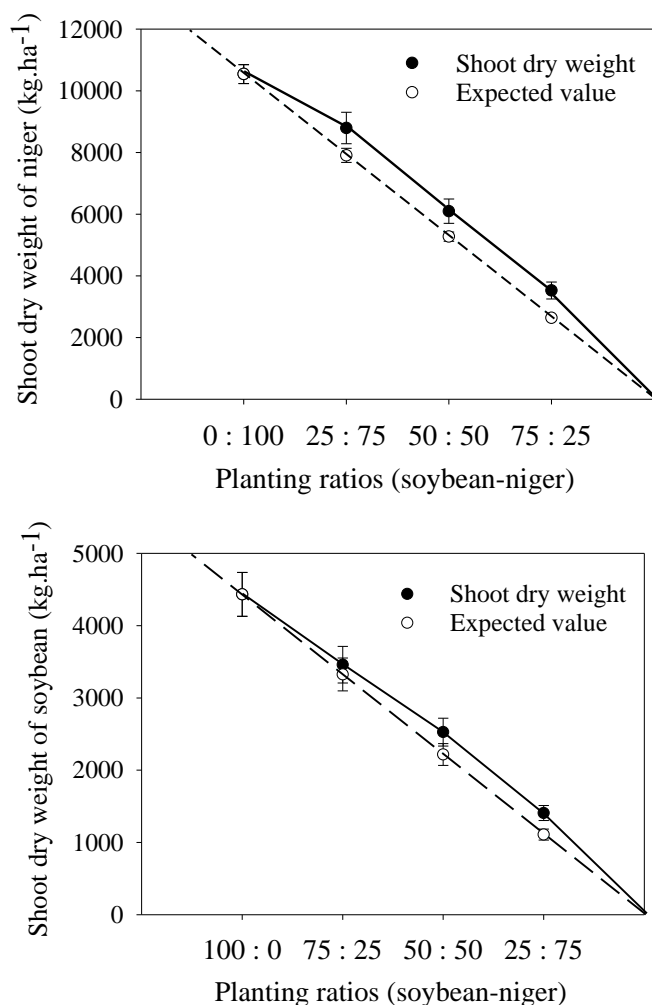
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	روز پس از کاشت Day after planting, 2018					روز پس از کاشت Day after planting, 2019						
		45	60	75	90	105	120	45	60	75	90	105	120
بلوک Block	3	0.02	0.02	0.002	0.01	0.001	0.006	0.01	0.01	0.01	0.001	0.06	0.02
تیمار Treatment	3	1.19**	0.45**	0.74**	0.37**	0.31**	0.34**	0.25**	0.39**	0.72**	0.94**	0.45**	0.81**
خطا Error	9	0.01	0.02	0.01	0.01	0.002	0.005	0.02	0.05	0.02	0.01	0.03	0.04
مجموع Total	15	0.25	0.11	0.15	0.08	0.06	0.07	0.06	0.11	0.16	0.19	0.12	0.18
ضریب تغییرات CV (%)	-	10.92	12.75	9.06	7.71	3.77	6.67	18.64	20.97	16.77	11.76	14.88	13.88

ns: غیر معنی‌دار

* و **: بدترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: not significant

* and **: significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۳- میانگین وزن خشک نهایی ساقه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط (به ترتیب دان سیاه- سویا) و در سال‌های مورد مطالعه
 Fig. 3- The average final shoot dry weight in different planting ratios of intercrop (niger-soybean respectively) and the studied years

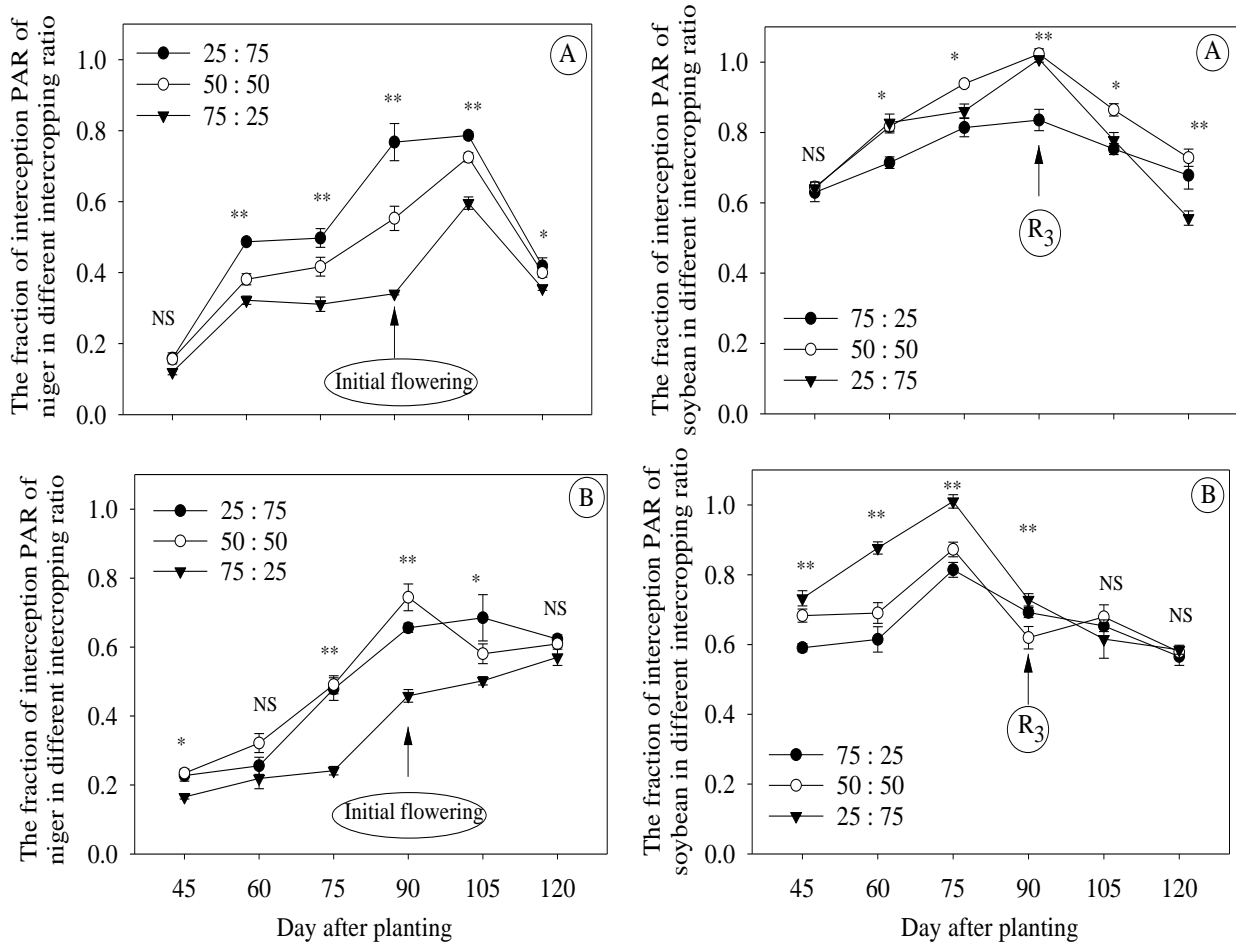
خطوط عمودی بر روی نقاط نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE) می‌باشد
 vertical bars on the points are standard error (SE)

یافت. به عبارت دیگر، گیاه سویا نیز وارد فضای رقابت با گیاه دان سیاه شده و این امر باعث ایجاد رابطه رقابتی از نوع همیاری دو جانبه شد. رابطه همیاری دو جانبه گیاه دان سیاه و سویا در کارایی مصرف نور تا مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت نیز ادامه داشت و مقدار کارایی مصرف نور در گیاه دان سیاه و سویا بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده بود (شکل ۵). این موضوع نقش مهمی در افزایش برآیند کارایی مصرف نور گیاهان مورد مطالعه در الگوی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص هر یک از گیاهان داشت. در این بین، بیشترین مقدار کارایی مصرف نور گیاه سویا و دان سیاه در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت مربوط به

در مقابل گیاه دان سیاه در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (دان سیاه-سویا) کارایی مصرف نور بیشتری در مراحل مختلف رشد نسبت به گیاه سویا دارد. بنظر می‌رسد گیاه دان سیاه با در اختیار داشتن فضای مناسب، ارتفاع بیشتر و پراکندگی شاخه‌های فرعی بسیار سریعتر وارد فضای رقابتی شده و این موضوع سبب افزایش میزان کارایی مصرف نور گیاه مذکور نسبت به مقادیر قابل انتظار در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط شده است. اما در گیاه سویا پس مرحله ۷۵ روز پس از کاشت با توسعه سریع‌تر تاج‌پوشش میزان کارایی مصرف نور نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده افزایش بیشتری

بالایی و پایینی کانوپی وابسته به فضا و زمان است و زمان آغاز و پایان آن فرآیندی بسیار پیچیده است (Machado, 2009)، ولی به نظر می‌رسد، کارایی بالاتر در استفاده از نور و افزایش سرعت رشد گیاهان مورد مطالعه در کشت مخلوط با ایجاد رابطه همیاری دو جانبه تقویت شده است. افزایش راندمان مصرف نور در کشت مخلوط با گیاهان لگوم توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Gou et al., 2017; Liu et al., 2017; Chimonyo et al., 2018 همچنین نتایج برخی مطالعات ایجاد رابطه همیاری دو جانبه را در سیستم کشت مخلوط نشان می‌دهد (Arshad et al., Kim et al., 2018). (2020).

نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ با میانگین ۲/۰۸ و ۲/۴۴ مگاژول در مترمربع در روز به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ بود. نکته حائز اهمیت ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه دان‌سیاه در کشت مخلوط است که به گیاه اجازه رقابت و استفاده بیشتر از عوامل محیطی را در کشت مخلوط می‌دهد. مقایسه میزان افزایش کارایی مصرف نور گیاه دان‌سیاه و سویا نسبت به مقادیر قابل انتظار نشان داد، سهم گیاه دان‌سیاه در طی مراحل مختلف رشد بیشتر از گیاه سویا می‌باشد. این موضوع نقش مهمی در افزایش مقدار وزن خشک نهایی ساقه گیاه دان‌سیاه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط داشت. هر چند رقابت گیاهان برای کسب عوامل محیطی مانند نور در بخش‌های



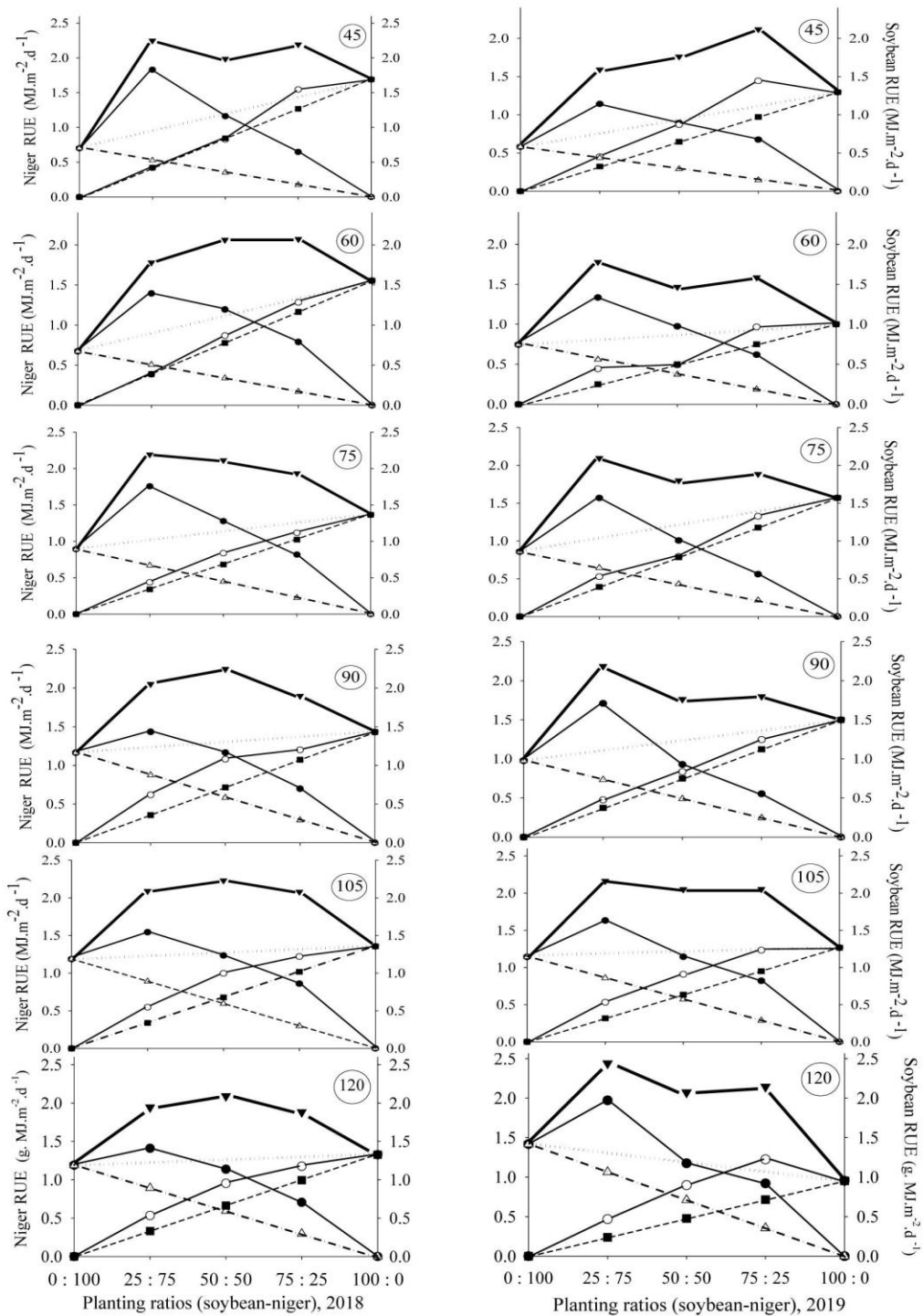
شکل ۴- میانگین کسری از نور دریافتی توسط گیاه دان‌سیاه و سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط (به ترتیب دان‌سیاه- سویا) و در سال‌های مورد مطالعه

Fig. 4- The average fraction of PAR interception by niger and soybean in different intercropping ratio (soybean-niger respectively) and the studied years

خطوط عمودی بر روی نقاط و حروف A, B به ترتیب نشان‌دهنده خطای استاندارد و سال ۱۳۹۷، ۱۳۹۸

ns, *, ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد

Vertical bars on the points and the letters A, B represent the standard error (SE) and studied years, 2018-2019
ns, * and **: not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively)



شکل ۵- تأثیر رقابت دو گیاه دان‌سیاه و سویا بر کارایی مصرف نور گیاه در نسبت‌های مختلف کاشت و در سال‌های مورد مطالعه
 Fig. 5- The effect of niger and soybean crop competition on radiation use efficiency (RUE) in different intercropping ratios and the studied years

● کارایی مصرف نور گیاه دان‌سیاه، ○ کارایی مصرف نور گیاه سویا، ▼ مجموع کارایی مصرف نور دو گیاه در کشت مخلوط، Δ مقدار پیش‌بینی شده گیاه دان‌سیاه، ■ دار پیش‌بینی شده گیاه سویا و اعداد داخل دایره در تصاویر مربوط به تعداد روز پس از کاشت می‌باشد)

● Actual radiation use efficiency of niger in intercropping, ○ Actual radiation use efficiency of soybean in intercropping, ▼ Total actual yields of niger and Soybean in intercropping, Δ Expected of radiation use efficiency in niger, ■ Expected of radiation use efficiency in soybean and the numbers inside the circle in the pictures are related to the day after planting.

عملکرد دانه: علاوه بر مطالب مذکور نتایج تجزیه مرکب نشان داد، اثر سال و اثر نسبت‌های مختلف کاشت بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۲). بر این اساس، عملکرد دانه سویا و دان‌سیاه در سال دوم بیشتر از سال اول بود (جدول ۳). همانطور که اشاره شد افزایش میزان ماده خشک، تعداد غلاف و تعداد کاپیتول در بوته در سال دوم یکی از دلایل افزایش عملکرد دانه گیاهان مذکور در مقایسه با سال اول بود. در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز، کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) و دان‌سیاه (۰:۱۰۰) به ترتیب با میانگین ۴۹۶۵/۲۴ و ۴۶۲/۳۹ کیلوگرم در هکتار دارای بیشترین و کمترین عملکرد دانه بودند (جدول ۶). افزایش ۳۰/۷۴ درصدی عملکرد دانه گیاه دان‌سیاه در مقایسه با عملکرد مورد انتظار نقش مهمی در افزایش میزان عملکرد دانه در نسبت کاشت مذکور داشت. در مورد گیاه سویا نیز بیشترین سهم افزایش عملکرد دانه (۸۷/۹۵+) در مقایسه با مقدار قابل پیش‌بینی مربوط به نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه-سویا) بود. اما در مجموع، به دلیل افزایش ناچیز (۱/۶۶+) عملکرد واقعی گیاه دان-سیاه در مقایسه با مقدار مورد انتظار، میزان عملکرد کل در سطح هکتار در مقایسه با نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه-سویا) و ۵۰:۵۰ کاهش یافت. نتایج نشان داد، هر دو گیاه مورد مطالعه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط موفق به تولید میزان عملکرد بیشتری در مقایسه با مقدار قابل انتظار شدند. در این بین، بیشترین مقدار افزایش میزان عملکرد در مقایسه با مقادیر قابل پیش‌بینی با کاهش سهم کشت هر یک از گیاهان مورد مطالعه در الگوی کشت مخلوط حاصل شد. همانطور که اشاره شد گیاه دان‌سیاه و سویا به-ترتیب در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه-سویا) دارای بیشترین میزان افزایش عملکرد بودند. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود رابطه همیاری دوجانبه در طول دوره رشد در سیستم کشت مخلوط باشد. به طور کلی، الگوی مناسب کاشت با ایجاد حداکثر تراکم

سایه‌دهی ۳۰-۲۰ درصد می‌تواند باعث دستیابی به عملکرد مطلوب در گیاه سویا شود (Khalid et al., 2018).

در نهایت، تمامی نسبت‌های کاشت، دارای شاخص نسبت برابری زمین بالاتر از یک هستند (جدول ۷) و این نشان‌دهنده برتری کشت مخلوط بر کشت خالص گیاهان مورد مطالعه است. بر طبق نتایج به دست آمده در دو سال مورد مطالعه نسبت کاشت ۵۰:۵۰ در مقایسه با سایر نسبت‌های کاشت دارای بیشترین نسبت برابری زمین (۱/۲۸) بود. نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه-سویا) نیز به ترتیب با نسبت برابری زمین ۱/۲۳ و ۱/۱۴ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. علاوه بر مطالب مذکور، نسبت برابری جزئی دان‌سیاه در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ بیشتر از نسبت کاشت ۷۵:۲۵ بود. این موضوع می‌تواند به دلیل رقابت بیشتر دان‌سیاه با گیاه سویا در نسبت کشت ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه-سویا) باشد که باعث افزایش ارتفاع نهایی ساقه دان‌سیاه شده است. به طور کلی، یکی از دلایل مهم برتری نسبت کاشت ۵۰:۵۰ در سیستم کشت مخلوط می‌تواند افزایش کارایی استفاده از نور در طی دوره رشد باشد، این موضوع مقدمات افزایش وزن خشک ساقه گیاه سویا (۱۴/۰۳ درصد) و دان‌سیاه (۱۵/۶۹ درصد)، افزایش تعداد غلاف و کاپیتول را در دو گیاه مورد مطالعه فراهم کرده است. همچنین ضریب نسبی تراکم نیز در بین نسبت‌های مختلف کاشت بیشتر از واحد بود (جدول ۷). در بین نسبت‌های مختلف کاشت بیشترین ضریب نسبی تراکم متعلق به نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه-سویا) و ۵۰:۵۰ بود. این موضوع نشان‌دهنده استفاده کارآمد از منابع محیطی در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط است. افزایش شاخص بهره‌وری در کشت مخلوط گیاهان لگوم با غیر لگوم توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Zhang et al., 2011; Lithourgidis et al., 2011; Vlachostergios et al., 2015).

جدول ۶- مقایسه میانگین عملکرد دانه سویا و دان‌سیاه در نسبت‌های مختلف کاشت
Table 6- Mean comparison for soybean and niger seed yield in different planting ratios

نسبت‌های کاشت (دان سیاه- سویا) Planting ratios (soybean-niger)	دان سیاه Niger			سویا Soybean		
	عملکرد واقعی Actual yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد مورد انتظار Expected yield (kg.ha ⁻¹)	افزایش یا کاهش عملکرد واقعی نسبت به مورد انتظار Actual yield : expected yield	عملکرد واقعی Actual yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد مورد انتظار Expected yield (kg.ha ⁻¹)	افزایش یا کاهش عملکرد واقعی نسبت به مورد انتظار Actual yield : expected yield
100 : 0	-	-	-	4965±760.59	-	-
75 : 25	151.13±48.51	115.59±31.39	+ 30.74	4021±593.83	3723±570.44	+ 7.99
50 : 50	272.76±87.77	231.19±65.79	+ 17.97	3432±734.48	2482±380.29	+ 38.26
25 : 75	352.57±97.05	346.79±94.19	+ 1.66	2333±439.47	1241±190.14	+ 87.95
0 : 100	462.39±125.59	-	-	-	-	-
حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (0.05)	53.09	25.68	-	423.14	159.52	-

مقادیر میانگین ± انحراف استاندارد

Mean values plus/minus standard deviation (X̄±SD)

جدول ۷- اثر نسبت‌های مختلف کاشت بر کارایی کشت مخلوط دان‌سیاه- سویا
 Table 7- Effect of planting ratios on intercropping efficiency of soybean-niger

شاخص کشت مخلوط Intercropping index	گیاه زراعی Crop	نسبت‌های کاشت (دان‌سیاه- سویا) Planting ratios (soybean-niger)		
		75 : 25	50 : 50	25 : 75
		نسبت برابری زمین LER	سویا Soybean	0.81
مجموع Total	دان‌سیاه Niger	0.33	0.59	0.76
	مجموع Total	1.14	1.28	1.23
	ضریب نسبی تراکم RCC	سویا Soybean	1.86	2.29
مجموع Total	دان‌سیاه Niger	1.48	1.47	1.18
	مجموع Total	2.75	3.36	3.19

نتیجه‌گیری

موضوع می‌تواند مربوط به ساز و کار رقابتی متفاوت گیاه دان‌سیاه با گیاه سویا باشد. به نظر می‌رسد، عدم قابلیت افزایش شاخه‌های فرعی در گیاه دان‌سیاه نقش قابل توجهی در کاهش مقدار نور دریافت شده در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) داشته است. هر چند ارتفاع بیشتر و توزیع شاخه‌های فرعی گیاه در فضای بالای تاج‌پوشش نقش مهمی در افزایش میزان کارایی مصرف نور در گیاه دان‌سیاه در مقایسه با مقادیر قابل پیش‌بینی در سال‌های مورد مطالعه داشت. اما در مورد گیاه سویا پس از مرحله ۷۵ روز پس از کاشت (پایان گل‌دهی) و بسته‌شدن کانوبی کارایی مصرف نور در گیاه افزایش یافت و این موضوع سبب ایجاد رابطه همیاری دو جانبه در مراحل پایانی رشد در استفاده از منابع محیطی شد. یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش وزن خشک گیاه سویا و دان‌سیاه به‌ترتیب در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) به‌مقدار ۲۶/۹۳ و ۳۳/۶۶ درصد مربوط به‌میزان جذب نور توسط تاج‌پوشش و افزایش رابطه مکملی در کارایی استفاده از عوامل محیطی به‌ویژه نور دریافت شده توسط الگوی کشت مخلوط می‌باشد. در نهایت، بیشترین افزایش شاخص نسبت برابری زمین با میانگین ۱/۲۸ و ۱/۲۳ به‌ترتیب متعلق به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) بود. این موضوع به‌دلیل افزایش قابل توجه عملکرد دانه گیاه سویا با کاهش سهم کاشت آن در کشت مخلوط بود. هر چند افزایش کارایی مصرف نور در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) نقش مهمی در افزایش میزان عملکرد کل محصول در کشت مخلوط نداشت، اما باعث افزایش سهم گیاه

نتایج این مطالعه نشان داد، نسبت‌های مختلف کشت مخلوط اثر معنی‌داری بر خصوصیات زراعی گیاه دان‌سیاه و سویا داشتند. بر این اساس، کاهش تعداد ردیف کاشت گیاه سویا در نسبت‌های کشت مخلوط باعث کاهش ارتفاع نهایی ساقه و افزایش تعداد غلاف در بوته به‌دلیل در اختیار داشتن فضای کافی برای توسعه شاخ و برگ گیاه شد، در مقابل کاهش ردیف کاشت گیاه دان‌سیاه نیز در کشت مخلوط ضمن افزایش ارتفاع گیاه تأثیر مثبت و معنی‌داری بر تعداد کاپیتول در بوته گیاه مذکور داشت. بنابراین، افزایش تعداد کاپیتول در بوته با کاهش تعداد ردیف‌های کاشت یک ساز و کار خودتنظیمی در گیاه دان‌سیاه است و این موضوع به برقراری ارتباط در رقابت بین‌گونه‌ای کمک قابل توجهی نموده است. بر اساس نتایج حاصل از میزان نور دریافت شده در کانوبی کشت مخلوط در سال‌های مورد مطالعه مشخص گردید، در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت در هر دو سال زراعی نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) و ۵۰:۵۰ دارای بیشترین میزان کسری از نور دریافتی بود. گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان-سیاه- سویا) به‌دلیل در اختیار داشتن فضای کافی و سرعت بیشتر برای توسعه شاخه‌های فرعی، سهم بیشتری از میزان نور عبور یافته به داخل فضای تاج‌پوشش داشت و در نتیجه، این موضوع نقش مهمی در کاهش ارتفاع ساقه گیاه سویا در نسبت کاشت مذکور داشته است. در مورد گیاه دان‌سیاه با کاهش سهم کاشت در الگوی کشت مخلوط مقدار نور دریافت شده توسط گیاه مذکور کاهش یافت. این

مهمی در افزایش کارایی استفاده از منابع از طریق ایجاد روابط مکملی داشته باشد و در نتیجه، به تولید پایدار در الگوی کشت مخلوط تحت سیستم کشاورزی کم نهاده کمک نماید. لذا کاربرد نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) می‌تواند گزینه مناسبی برای افزایش بهره‌وری در کشت مخلوط باشد.

دان‌سیاه از عملکرد کل در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (دان‌سیاه- سویا) در مقایسه با سایر نسبت‌های کشت مخلوط شد. به نحوی که این مقدار در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (دان‌سیاه- سویا) به- ترتیب ۱۳/۱۳، ۷/۳۳ و ۶/۵۴ درصد بود. در نهایت، انتخاب مناسب گیاهان همراه در کشت مخلوط با قابلیت توان رقابتی می‌تواند نقش

References

1. Alizadeh, Y., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M.(2010). Evaluation of radiation use efficiency of intercropping of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and herb sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agroecology*, 2(1), 94-104. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v2i1.7605>
2. Alsajri, F.A., Singh, B., Wijewardana, C., Trenton Irby, J., Gao, W., & Reddy, R.(2019). Evaluating soybean cultivars for low and high temperature tolerance during the seedling growth stage. *Agronomy*, 9(13), 1-20. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010013>
3. Ambas, V., & Baltas, E.(2014). Spectral analysis of hourly solar radiation. *Environmental Process*, 1, 251-263. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0023-9>
4. Arshad, M., Nawaz, R., Ahmad, S., Shad, G., Faiz, F., Ahmed, N., Irchad, M., & Ranamukhaarachchi, S.L.(2020). Growth, yield and nutritional performance of sweet sorghum and legumes in sole and intercropping influenced by type of legume, nitrogen level and air quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(1), 533-543. <https://doi.org/10.15244/pjoes/104461>
5. Bedoussac, L., & Justec, E.(2010). Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant and Soil*, 330, 37-54. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0303-8>
6. 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>
7. Carciocchi, W.D., Schwalbert, R., Andrade, F.H., Corassa, G.M., Carter, P., Gasper, A.P., Schmidt, J., & Ciampitti, A. (2019). Soybean seed yield response to plant density by yield environment in North America. *Agronomy Journal*, 111(4), 1-10. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635>
8. Chimonyo, V.G.P., Modi, A.T., & Mabhaudhi, T.(2018). Sorghum radiation use efficiency and biomass partitioning in intercrop systems. *South African Journal of Botany*, 118, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.009>
9. Corassa, G.M., Amado, T.J.C., Strieder, M.L., Schwalbert, R., Pires, J.L.F., Carter, P.R., Ciampitti, & I.A.(2018). Optimum soybean seeding rates by yield environment in southern brazil. *Agronomy Journal*, 110(6), 1-9. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0239>
10. De Wit, C.T.(1960). On competition. *Verslag Landbouw-Kundige Onderzoek*, 66, 1–28.
11. Feng, L., Muhammad, A.R., Li, Z., Chen, Y., Khalid, M.H.B., Du, J., Liu, W., Wu, X., Song, C., Yu, L., Zhang, Z., Yuan, S., Yang, W., & Yang, F.(2019). The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01952>
12. Gou, F., Van Ittersum, M.K., Simon, E., Leffelaar, P.A., Putten, P.E.L., Zhang, L., & Werf, W.(2017). Intercropping wheat and maize increases total radiation interception and wheat RUE but lowers maize RUE. *European Journal of Agronomy*, 84, 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.014>
13. Hauggaard-Nielsen, H., & Jensen, E.S.(2001). Evaluation pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability. *Field Crop Research*, 72, 185-196. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00176-9)
14. Hill, J., & Shimamoto, Y.(1973). A methods of analyzing competition with special reference to herbage plants. *Journal of Agricultural Science*, 81, 77-88. <https://doi.org/10.1017/S0021859600058342>

15. Jamont, M., Guillaume, P., & Fustec, J.(2013). Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: Does N transfer matter? *Plant and Soil*, 371(1-3), 651-653. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1712-2>
16. Janbazghobadi, G.(2018). Calibration and validation of the estimate of the radiation rates of the sun and its zoning of meteorological station data of Mazandaran province. *Geography*, 8(1), 237-249. (In Persian with English Summary) DOR: 20.1001.1.22286462.1396.8.1.13.6
17. Kasle, S.V., Gaikeard, S.R., Bhusari, S.A., & Kalegore, N.K.(2020). Studies on growth, yield and quality of niger (*Guizotia abyssinica* Cass) as influenced by graded levels of fertilizer and plant density. *The Pharma Innovation Journal*, 9(11), 314-316.
18. Khalid, M.H.B., Reza, M.A., Yu, H.Q., Sum, F.A., Zhang, Y.Y., Lu, F.Z., Iqbal, N., Khan, I., Fu, F.L., & Li, W.C.(2018). Effect of shade treatments on morphology, photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybeans (*Glycine max* L. merr.). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 2551-2569. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_2551256
19. Kim, J., Song, Y., Kim, D.W., Fiaz, M., & Kwon, C.H.(2018). Evaluating different inter row distances between corn and soybean for optimum growth, production and nutritive value of intercropped forages. *Journal of Animal Science and Technology*, 60(1), 1-6. <https://doi.org/10.1186/s40781-017-0158-0>. eCollection 2018
20. Koocheki, A., Shabahang, J., Khorramdel, S., & Ghafouri, A.(2012). Row intercropping of borage (*Borago officinalis* L.) with bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on possible evaluating of the best strip width and assessing of ecological characteristics. *Journal of Agroecology*, 4(1), 1-11. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v4i1.14951>
21. Lithourgidis, A.S., Vlachostergios, D.N., Dordas, C.A., & Damalas, C.A.(2011). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea–cereal intercropping system Greece. *European Journal of Agronomy*, 34, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.007>
22. Liu, X., Rahman, T., Song, C., Su, B., Yang, F., Yong, T., Wu, Y., Zhang, C., & Yang, W.(2017). Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. *Field Crop Research*, 200, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.003>
23. 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>
24. Loreau, M., & Hector, A.(2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412, 72–76. <https://doi.org/10.1038/35083573>
25. Lunagaria, M.M., & Shekh, A.M.(2006). Radiation interception, light extinction coefficient and leaf area index of wheat (*Triticum aestivum* L.) crop as influenced by row orientation and row spacing. *Agricultural Sciences*, 2(2), 43-54. <https://doi.org/10.4038/jas.v2i2.8130>
26. Machado, S.(2009). Does intercropping have a role in modern agriculture? *Soil and Water Conservation Society*, 64(2), 55-57. <https://doi.org/10.2489/jswc.64.2.55A>
27. 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>
28. Monti, M., Pellicano A., Santonoceto, C., Preiti, G., & Pristeri, A.(2016). Yield components and nitrogen use in cereal-pea intercrops in Mediterranean. *Field Crop Research*, 196, 379-388. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.07.017
29. Namdari, M., Behdani, M.A., & Arab, G.(2010). Evaluation of physiological and morphological characteristics and yield of soybean (*Glycine max* L.) cultivars under different intercropping planting ratios. *Journal of Agroecology*, 2(2), 313-322. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v2i2.7638>
30. Nico, M., Miralles, D.J., & Kantolic, A.G.(2019). Natural post-flowering photoperiod and photoperiod sensitivity: Roles in yield determining processes in soybean. *Field Crop Research*, 231, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.019>
31. Onat, B., Bakal, H., Gulluoglu, L., & Arioglu, H.(2017). The effects of heigh temperature at the growing period on yield and yield components of soybean varieties. *Turkish Journal of Field Crops*, 22(2), 178-186. <https://doi.org/10.17557/tjfc.356210>
32. Ranganatha, A.R.G., Panday, A.K., Bisen, R., Jain, S., & Sharma, S.(2016). Niger. In S.K. Gupta (Eds). *Breeding Oilseed Crops for Sustainable Production, opportunities and constraints*. Academic Press, London, p. 169-199.
33. 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>
34. Rezaie Chiyaneh, E., Tajbakhsh, M., Valizadegan, O., & Bannaei Asl, F.(2013). Evaluation of different intercropping patterns of cumin (*Cuminum cyminum* L.) and lentil (*Lens cultivars* L.) in double crop. *Journal of Agroecology*, 5(4), 452-461. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v5i4.33009>
 35. Skrudlik, G., & Koscielniak, J.(1996). Effects of low temperature treatment at seedling stage on soybean growth, development and final yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 176(2), 111-117. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1996.tb00453.x>
 36. 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 (Eds), *Advances in Agronomy*. Academic Press, London. p. 1-50.
 37. Thapa, R., Poffenberger, H., Tully, K.L., Ackroyd, V.J., Kramer, M., & Mirsky, B.(2018). Biomass production and nitrogen accumulation by Hairy Vetch–Cereal Rye mixtures: A meta-analysis. *Agronomy Journal*, 110(4), 1197-1208. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0544>
 38. Tsubo, M., & Walker, S.(2002). A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110, 203–215. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00287-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00287-8)
 39. Vlachostergios, D.N., Dordas, C.A., & Lithourgidis, A.S.(2015). Forage yield, protein concentration and interspecific competition in red pea-cereal intercrops. *Experimental Agriculture*, 51(4), 635-650. <https://doi.org/10.1017/S0014479714000519>
 40. Wang, Z., Zhao, X., Wu, P., He, J., Chen, X., Gao, Y., & Cao, X.(2015). Radiation interception and utilization by wheat/maize strip intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.004>
 41. Weisany, W., Salmasi, S., Raei, Y., & Shorabi, Y.(2016). Can arbuscular mycorrhizal fungi improve competitive ability of dill + common bean intercrops against weeds? *European Journal of Agronomy*, 75, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.006>
 42. 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.
 43. 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>
 44. Yang, W., Li, Z., Wang, J., Wu, P., & Zhang, Y.(2013). Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected interspecific competition and nitrogen application. *Field Crop Research*, 146, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.008>
 45. Yu, Y., Stomph, T.J. Makowski, D., & Werf, W.V.(2015). Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. *Field Crop Research*, 184, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.010>
 46. Zaefarian, F., & Bagheri Shirvan, M.(2014). Effect of intercropping different ratios on yield of soybean, sweet basil and borage. *Journal of Crop Improvement*, 16(1), 197-214. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22059/jci.2014.51952>
 47. Zhang, G., Yang, Z., & Dong, S.(2011). Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system. *Field Crops Research*, 124, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.006>
 48. Zhang, L.Z., Werf, W.V., Bastiaans, L., Zhang, S., Li, B., & Spiertz, J.H.J.(2008). Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *Field Crops Research*, 107(1), 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.12.014>