



Evaluation of Light Use Efficiency and Nitrogen Derived from the Atmosphere in intercropped of Soybean and Sesame

Rahmat Abbasi¹ | Meisam Namdari²

1. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: r.abasi@sanru.ac.ir
2. Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.namdari.stu@sanru.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 31 May 2021

Received in revised form:

29 January 2022

Accepted: 19 February 2022

Published online:

17 December 2022

Keywords:

Growth stage,
land equivalent ratio,
planting ratio,
replacement method.

ABSTRACT

A field experiment has been carried out to study the competition between soybean and sesame in different planting ratios of intercropping based on replacement method. It is based on a randomized complete block design with four replications at Sari Agricultural Science and Natural Resources University during 2019. The planting ratios are 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, and 100:0 (Soybean: Sesame respectively), using replacement method. Results show that intercropping has had a significant effect on the percentage of N derived from the atmosphere and light use efficiency. Among the different planting ratios, the maximum amount of biological nitrogen fixation is related to the 90-days after planting, and the 75:25 and 25:75 planting ratios have had the highest (75.95%) and lowest activity rates (42.67%), respectively. In addition, the highest light use efficiency in intercropping is related to the 120-days after planting. At this stage, the light use efficiency in 75:25 and 50:50 ratios are 2.03 and 1.92 g.MJ⁻¹, respectively. The highest land equivalent ratio is 50:50, with an average of 1.12. Finally, increasing the light use efficiency in planting ratios of 75:25 and 50:50 prove to be essential in increasing soybean's biological nitrogen fixation and increasing the efficiency of intercropping cultivation.

Cite this article: Abbasi, R., & Namdari, M. (2022). Evaluation of Light Use Efficiency and Nitrogen Derived from the Atmosphere in intercropped of Soybean and Sesame. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1019-1033.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.324885.2560>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.324885.2560>

Publisher: University of Tehran Press.

بررسی کارایی مصرف نور و نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در کشت مخلوط سویا و کنجد

رحمت عباسی^۱ | میثم نامداری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: r.abasi@sanru.ac.ir

۲. گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: m.namdari.stu@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	به‌منظور مطالعه رقابت گیاه سویا و کنجد در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به‌روش جایگزینی، آزمایشی به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل نسبت‌های کاشت ۱:۱۰۰، ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ و ۱۰۰:۰ (به‌ترتیب کنجد-سویا) بودند. نتایج نشان داد نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی و کارایی مصرف نور دارد. در بین نسبت‌های مختلف کاشت بیش‌ترین مقدار تثبیت بیولوژیکی نیتروژن مربوط به مرحله ۹۰ روز پس از کاشت بود و نسبت کاشت ۷۵:۲۵ و ۲۵:۷۵ به‌ترتیب با میانگین ۷۵/۵۹ و ۴۲/۶۷ درصد دارای بیش‌ترین و کم‌ترین میزان فعالیت بودند. علاوه بر مطالب مذکور بیش‌ترین برآیند کارایی مصرف نور در کشت مخلوط مربوط به مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت بود. در این مرحله برآیند کارایی مصرف نور در نسبت‌های کاشت ۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰ به‌ترتیب ۲/۰۳ و ۱/۹۲ گرم بر مگاژول در روز بود. بیش‌ترین نسبت برابری زمین نیز متعلق به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ (کنجد-سویا) با میانگین ۱/۱۲ بود. در نهایت افزایش کارایی مصرف نور در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰ نقش مهمی در افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا و بهبود کارایی کشت مخلوط داشت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶	
کلیدواژه‌ها: روش جایگزینی، مرحله رشد، نسبت برابری زمین، نسبت کاشت.	

استناد: عباسی، ر و نامداری، م (۱۴۰۱). بررسی کارایی مصرف نور و نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در کشت مخلوط سویا و کنجد. به‌زرای کشاورزی،

۲۴ (۴)، ۱۰۱۹-۱۰۳۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.324885.2560>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

بیشتر پژوهش‌ها در زمینه کشت مخلوط در گذشته مربوط به عملکرد و اجزای عملکرد گیاه بوده و فرایندهای 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، تاج پوشش و در مجموع اثرات متقابل در دو بخش بالایی و زیرزمینی بستگی دارد (Machado, 2009). از آنجاکه اثرات متقابل و کارایی بخش زیرزمینی در ارتباط با موجودات زنده متأثر از سیستم‌های کشت و شرایط محیطی رشد می‌باشد، لذا کاربرد گیاه لگوم در کشت مخلوط می‌تواند ضمن افزایش کارایی تثبیت نیتروژن، رویکردی پایدار برای برطرف کردن نیازهای نیتروژن گیاه زراعی باشد (Stomph *et al.*, 2020).

در این رابطه برخی از پژوهش‌گران بیان داشتند کشت مخلوط گیاهان به صورت ردیفی به علت کاهش رقابت درون گونه‌ای و استفاده بیش‌تر از عوامل محیطی ضمن بهبود عملکرد، سبب افزایش کارایی گره‌های تثبیت‌کننده نیتروژن می‌شود (Stomph *et al.*, 2020). نتایج سایر تحقیقات در این زمینه نیز نشان داد میزان عملکرد دانه و قابلیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن در سیستم کشت مخلوط خودفرنگی با ذرت در مقایسه با کشت خالص به دلیل هماهنگی در رقابت بین گونه‌ای افزایش یافت (Hu *et al.*, 2016). هم‌چنین نتایج مطالعه بلندمدت در خصوص کشت مخلوط بر پایه گیاه لگوم نیز افزایش ۱۱ درصدی میزان نیتروژن آلی، تثبیت بیولوژیکی نیتروژن و مقدار کربن آلی خاک را نشان داد (Cong *et al.*, 2014). برخی دیگر از مطالعات در این زمینه نیز به افزایش کارایی استفاده از نیتروژن در سیستم کشت مخلوط در مقایسه با تک کشتی اشاره کرده است (Akbari *et al.*, 2019).

علاوه بر مطالب مذکور کارایی مصرف نور نیز می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل ترکیب بیوشیمیایی بذرها در طول دوره پرشدن دانه‌ها، انتقال مجدد نیتروژن (پس از گلدهی)، ژنوتیپ گیاه، شرایط محیطی، مدیریت زراعی، مرحله رشد گیاه و عوامل اقلیمی مؤثر بر ظرفیت فتوسنتزی قرار گیرد (Soltani & Hoogenboom, 2007; Parsa *et al.*, 2008). بسیاری از پژوهش‌گران یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش شاخص سودمندی در کشت مخلوط را افزایش کارایی استفاده از منابع به‌ویژه نور خورشید می‌دانند. نتایج برخی مطالعات در این زمینه نشان داد کشت مخلوط سویا-ذرت با کارایی مصرف نور ۳/۲۶ گرم بر مگازول بیش‌ترین مقدار کارایی را در مقایسه با کشت خالص دارد (Raza *et al.*, 2019). این نتایج توسط سایر پژوهش‌گران نیز در کشت مخلوط ماش با ارزن (Gong *et al.*, 2020) و هم‌چنین لوبیا با ذرت (Fatemi devin *et al.*, 2021) گزارش شد. در ادامه برخی دیگر از پژوهش‌گران نیز بیان داشتند بازدهی مصرف نور در کشت مخلوط ردیفی به‌طور متوسط ۲۵ درصد بیش‌تر از کشت مخلوط درهم است و در این بین نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (کنجد- نخود) به‌روش کشت ردیفی دارای بیش‌ترین میزان کارایی مصرف نور با میانگین ۱/۱۴ و ۱/۸۹ گرم بر مگازول بود (Hosseinpanahi *et al.*, 2011).

در نهایت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن توسط جزء لگوم می‌تواند تحت تأثیر گیاه همراه در کشت مخلوط قرار گیرد و این موضوع با افزایش کارایی مصرف نور در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط تقویت می‌شود. لذا هدف از این پژوهش بررسی رقابت گیاه سویا و کنجد در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به‌صورت جایگزینی و تأثیر آن بر درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی، کارایی مصرف نور و برخی ویژگی‌های زراعی گیاهان مذکور تحت شرایط آب‌وهوایی شهرستان ساری بود.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با عرض جغرافیایی

۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و سه دقیقه شرقی و ارتفاع ۴۳ متر از سطح دریا انجام شد. بافت خاک مزرعه لومی رسی با اسیدیته ۷/۷۴، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک ۰/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر، درصد ماده آلی ۱/۸۳، مقدار فسفر و پتاسیم ۴ و ۱۶۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. آزمایش به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در پنج تیمار و چهار تکرار انجام و تیمارهای آزمایش شامل نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ به‌روش جایگزینی و کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) و کشت خالص کنجد (۰:۱۰۰) بود. در ترکیب‌های ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ به‌ترتیب سه ردیف گیاه کنجد و یک ردیف سویا، یک ردیف گیاه کنجد و سه ردیف سویا منظور شد. ترکیب ۵۰:۵۰ نیز به‌ترتیب شامل کشت متوالی دو ردیف از گیاه کنجد و سویا بود. بذر سویا رقم ساری (J.K.695) از مرکز تحقیقات شرکت توسعه کشت دانه‌های روغنی شهرستان ساری و بذر گیاه کنجد رقم ناز چندشاخه از مؤسسه تحقیقات اصلاح نهال و بذر شهرستان کرج تهیه شد. عملیات کاشت در تاریخ ۱۵ اردیبهشت‌ماه به‌صورت هیرم‌کاری و به‌طریقه دستی انجام شد. بذور سویا پیش از کاشت با باکتری *راینوبیوم ژاپونیکوم* (با تراکم سلولی 2×10^7) تلقیح شد. 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 در نظر گرفته شد. قبل از کاشت کود موردنیاز با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل آزمون خاک به میزان ۳۳ کیلوگرم فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل تامین شد. آبیاری گیاهان به‌صورت قطره‌ای و عملیات وجین به‌صورت دستی در چهار مرحله و با فاصله زمانی ۱۴ روز انجام شد. عملیات برداشت برای گیاه کنجد و سویا به‌ترتیب در تاریخ ۱۲ مهرماه و ۵ آبان‌ماه با رعایت اثرات حاشیه (۰/۵ متر از دو طرف هر کرت) با دست و به‌وسیله قیچی باغبانی از چهار ردیف میانی به تفکیک گیاه موردنظر و نسبت کاشت صورت گرفت. هم‌زمان با عملیات برداشت تعداد ۵ بوته از هر یک از گیاهان مورد مطالعه به‌طور تصادفی انتخاب و برای تعیین ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه برداشت شد.

جهت محاسبه درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا از تکنیک استخراج اورئید از آوند چوب (Unkovich *et al.*, 2008) استفاده شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از قیچی باغبانی ساقه‌های با قطر بیش‌تر از سه میلی‌متر، نزدیک به سطح زمین قطع و ساقه جدا شده بلافاصله به درون لوله‌های لاستیکی سیلیکون یا لاتکس وارد و با استفاده از یک اتصال‌دهنده بر 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 دوطرفه و یک لوله پلاستیکی انعطاف‌پذیر به پمپ خلأ متصل است، وارد و ایجاد خلأ به میزان ۶۰ کیلوپاسکال اعمال شد. در نهایت نمونه‌های شیره آوند چوب جمع‌آوری و برای ذخیره‌سازی طولانی مدت در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد فریز شدند. عملیات مذکور در طی شش مرحله از زمان ۴۵ روز پس از کاشت با فاصله زمانی هر ۱۵ روز یک‌بار انجام شد. سنجش میزان اورئید به‌کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (Hanon, i3 UV-VIS, China) و با ترسیم منحنی استاندارد آلانتوئین ($y=7.3215x+0.0725$, $R^2=0.99$) در طول موج ۵۲۵ نانومتر (Young & Conway, 1942)، آمینو- نیتروژن با معرف نین‌هیدرین و به‌کمک ترسیم منحنی استاندارد اسپاراژین/گلوتامین ($y=1.2222x+0.0010$, $R^2=0.99$) در طول موج ۵۷۰ نانومتر (Herridge, 1984) و در نهایت نیترات نیز با ترسیم منحنی استاندارد نیترات‌پتاسیم ($y=0.0576x+0.0368$, $R^2=0.99$) در طول موج ۴۱۰ نانومتر (Cataldo *et al.*, 1975) اندازه‌گیری شد. سپس مقدار اورئید، آمینو و نیترات از رابطه (۱)، فراوانی اورئید از رابطه (۲) 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 رابطه (۳) تعیین شد (Unkovich *et al.*, 2008).

$$\text{Sac} = \text{St c.} \times (\text{O.D s/ O.D.s}) \times \text{D}_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

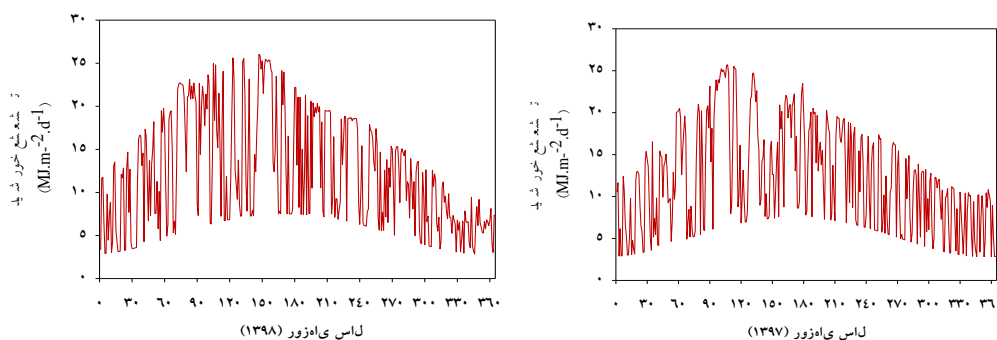
$$\text{Ru-N (\%)} = [4 \times \text{ureide} / (4 \times \text{ureide} + \text{nitrate} + \text{amino-N})] \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{Ru-N (\%)} = 0.64 \text{ Ndfa} + 7.7 \quad (\text{گلدهی}) \quad \text{Ru-N (\%)} = 0.64 \text{ Ndfa} + 15.9 \quad (\text{پس از گلدهی}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در روابط فوق Sa.C. غلظت نمونه، St.C. غلظت استاندارد، O.D.Sa تراکم بصری نمونه، O.D.St تراکم بصری استاندارد، Di غلظت محلول رقیق شده، Ru-N فراوانی نسبی اورئید و Ndfa درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی. همچنین جهت اندازه گیری کسری از نور دریافت شده توسط تاج پوشش گیاهان در نسبت های مختلف کاشت از دستگاه تشعشع سنج (LX 1108, Taiwan) استفاده شد. بدین منظور جهت ثبت میزان نور عبور یافته در تیمارهای مورد مطالعه با رعایت اثر حاشیه، به فاصله هر ۱۵ سانتی متر یک قرائت به کمک حس گر در بالا و پایین تاج پوشش 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 براساس تعداد ساعات آفتابی اخذ شده از ایستگاه مرکزی هواشناسی شهرستان ساری (واقع در ۵ کیلومتری محل انجام آزمایش) اندازه گیری و از طریق معادله آنگستروم (رابطه ۴) تصحیح شد (Ambas & Baltas, 2014).

$$\frac{R_s}{Ra} = a_s + b_s \frac{n}{N} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه R_s میزان شدت تابش روزانه با توجه به ساعات های 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 می باشند. این ضرایب برای شهرستان ساری به ترتیب معادل ۰/۱۸ و ۰/۵۵ در نظر گرفته شد (Janbazghobadi, 2018). میزان شدت تابش روزانه در سال های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) از حاصل ضرب میزان شدت تابش روزانه در ضریب ۰/۵۰ به دست آمد (Zhang et al., 2008). میزان نور جذب شده توسط هر یک از گیاهان در نسبت های مختلف کشت مخلوط نیز به کمک روابط زیر طی شش مرحله از ۴۵ روز پس از کاشت و با فاصله زمانی ۱۵ روز محاسبه شد (Wang et al., 2015).



شکل ۱. روند فصلی برآورد روزانه تشعشع خورشیدی در شهرستان ساری، استان مازندران

$$F1 = f_m \left(\frac{\sqrt{(h_m - h_s)^2 + W_m^2} - (h_m - h_s)}{W_m} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{h_m - h_s}{f_m} \times L_m \right) \right) \right] \quad \text{رابطه ۵}$$

$$F2 = f_m \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(h_m - h_s)^2 + W_m^2} - (h_m - h_s)}{W_m} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \frac{h_m - h_s}{h_m} \times L_m \right) \right] \right\} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$F3 = f_s \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(h_m - h_s)^2 + W_s^2} - (h_m - h_s)}{W_s} \right) \left[1 - \exp \left(k_m \frac{h_m - h_s}{h_m} \times L_m \right) \right] \right\} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$F4 = \left(\frac{\sqrt{h_s^2 + W_m^2} - h_s}{W_m} \times \frac{\sqrt{(h_m - h_s)^2 + W_m^2} - (h_m - h_s)}{W_m} \right) \left[\frac{1 - \exp \left(-k_m \frac{h_s}{h_m} \times L_m \right)}{f_m} \right] \quad \text{رابطه ۸}$$

$$F5 = f_{im} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(h_m - h_s)^2 + W_m^2} - (h_m - h_s)}{W_m} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{h_s}{h_m} \times L_m \right) - K_s L_s \right) \right] \frac{k_m \left(\frac{h_s}{h_m} \times L_m \right)}{k_m \left(\frac{h_s}{h_m} \times L_m \right) + K_s L_s} \right\} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$F6 = \text{Fim}\left\{\left(1 - \frac{\sqrt{(h_m-h_s)^2+Wm^2-(h_m-h_s)}}{Wm}\right)\left[1 - \exp\left(-k_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right) - K_s L_s\right)\right]\frac{K_s L_s}{k_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right)+K_s L_s}\right\} \quad (۱۰) \text{ رابطه}$$

$$F7 = \text{Fib}\left(\frac{\sqrt{h_s^2+W_s^2-h_s}}{W_s}\right)\left[1 - \exp\left(\frac{-k_s L_s}{f_s}\right)\right] \quad (۱۱) \text{ رابطه}$$

$$F8 = \text{Fib}\left\{\left(1 - \frac{\sqrt{(h_m-h_s)^2+W_s^2-(h_m-h_s)}}{W_s}\right)\left[1 - \exp\left(-k_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right) - K_s L_s\right)\right]\frac{K_s L_s}{k_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right)+K_s L_s}\right\} \quad (۱۲) \text{ رابطه}$$

$$F9 = \text{Fib}\left\{\left(1 - \frac{\sqrt{(h_m-h_s)^2+W_s^2-(h_m-h_s)}}{W_s}\right)\left[1 - \exp\left(-k_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right) - K_s L_s\right)\right]\frac{K_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right)}{k_m\left(\frac{h_s}{h_m} \times Lm\right)+K_s L_s}\right\} \quad (۱۳) \text{ رابطه}$$

$$F_{a(m)}=F1+F2+F3+F4+F5+F9 \quad (۱۴) \text{ رابطه}$$

$$F_{b(s)}=F6+F7+F8 \quad (۱۵) \text{ رابطه}$$

$$F_{PAR} = Fa+Fb \quad (۱۶) \text{ رابطه}$$

در این روابط m و s به ترتیب گیاه بلندتر و کوتاه‌تر، h_m و h_s به ترتیب ارتفاع گیاه، L_m و L_s شاخص سطح برگ گیاه، W_m و W_s عرض نوار کاشت، K_m و K_s ضریب خاموشی گیاه، f_m و f_s نسبت مساحت نوار کاشت گیاهان، $F_{a(m)}$ و $F_{b(s)}$ کسری از تشعشع فعال فتوسنتزی دریافت شده است.

ضریب خاموشی نور از طریق برازش رابطه (۱۷) که برگرفته از مدل بیر- لامبرت می‌باشد (Lunagaria & Shekh, 2006) در کشت خالص گیاهان مورد مطالعه محاسبه و برای گیاه کنجد ۰/۶۴ و سویا ۰/۶۸ منظور شد. سطح برگ نیز به کمک نرم‌افزار Digimizer (5.4) و پس از انجام کالیبراسیون ثبت و مقادیر شاخص سطح برگ روزانه در تیمارهای مختلف از طریق برازش رابطه (۱۸) برآورد شد (Gardner et al., 1985).

$$K = \frac{-\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)}{LAI} \quad (۱۷) \text{ رابطه}$$

$$LAI = a + b \times 4 \times \frac{e^{\left(-\frac{x-c}{d}\right)}}{\left(1+e^{\left(-\frac{x-c}{d}\right)}\right)^2} \quad (۱۸) \text{ رابطه}$$

در این روابط K ضریب خاموشی نور، I_0 و I_t به ترتیب میزان نور دریافت‌شده در پایین و بالای تاج‌پوشش، LAI شاخص سطح برگ، L_{AI} سطح برگ در نمونه‌برداری $n-1$ ، L_{A2} سطح برگ در نمونه‌برداری n ، G_A سطح زمین، a عرض از مبدأ، b حداکثر شاخص سطح برگ، c زمان رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ و d نقطه عطف منحنی، x ، زمان برحسب روزهای پس از سبزشدن است.

در نهایت تشعشع جذب‌شده در هر مرحله از حاصلضرب نور ورودی شبیه‌سازی‌شده در درصد نور جذب‌شده به دست آمد و مقدار کل تشعشع جذب‌شده به صورت تجمعی از طریق حاصلضرب نور ورودی شبیه‌سازی‌شده در انتگرال کسر تشعشع فعال فتوسنتزی جذب‌شده نسبت به زمان محاسبه شد. کارایی مصرف نور از رابطه (۱۹) محاسبه شد (Tsubo & Walker, 2002).

$$LUE = \frac{ADM}{\sum I_{PAR} F} \quad (۱۹) \text{ رابطه}$$

در این رابطه ADM مقدار کل ماده خشک گیاه (گرم در مترمربع)، I_{PAR} مقدار تشعشع فعال فتوسنتزی روزانه (مگاژول بر مترمربع)، F میزان کسری از نور دریافت‌شده توسط گیاه در طی مراحل مختلف رشد می‌باشد.

محاسبه نسبت برابری زمین (Mead & Willey, 1980) و نسبت رقابت (Willey & Rao, 1980) از طریق روابط زیر اندازه‌گیری شد.

$$LER_a = \left(\frac{Y_{i_a}}{Y_{m_a}}\right) \quad LER_b = \left(\frac{Y_{i_b}}{Y_{m_b}}\right) \quad LER = (LER_a + LER_b) \quad (۲۰) \text{ رابطه}$$

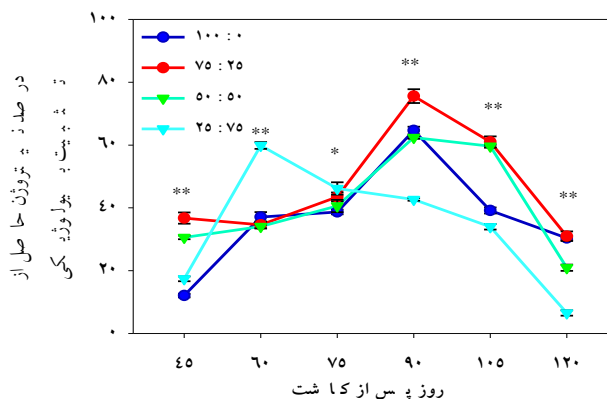
$$CR_a = \left(\frac{LER_a}{LER_b}\right) \left(\frac{Z_{i_b}}{Z_{i_a}}\right) \quad CR_b = \left(\frac{LER_b}{LER_a}\right) \left(\frac{Z_{i_a}}{Z_{i_b}}\right) \quad (۲۱) \text{ رابطه}$$

در روابط فوق به ترتیب Y_{ib} و Y_{ia} عملکرد گیاه a و b در کشت مخلوط، Y_{mb} و Y_{ma} عملکرد گیاه a و b در کشت خالص، Z_{ib} و Z_{ia} سهم گیاه a و b در کشت مخلوط می‌باشد. در نهایت جهت تجزیه آماری داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار سیستم آنالیز آماری SAS (9.1) استفاده شد. مقایسات میانگین داده‌ها با آزمون کم‌ترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح پنج درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel (2019) و Sigma Plot (14) انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی

نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در طی مراحل مختلف رشد داشتند (شکل ۲). در بین نسبت‌های مختلف کاشت بیش‌ترین مقدار تثبیت بیولوژیکی نیتروژن مربوط به مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (آغاز غلاف‌دهی) بود. در این مرحله نسبت کاشت ۷۵:۲۵ و ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) به ترتیب با میانگین ۷۵/۵۹ و ۴۲/۶۷ درصد دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی بودند. هرچند این روند در خصوص نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) صادق نبود و بیش‌ترین درصد نیتروژن حاصل از فعالیت تثبیت بیولوژیکی در نسبت کاشت مذکور متعلق به مرحله ۷۵ روز پس از کاشت بود. در این مرحله فعالیت تثبیت بیولوژیکی تمامی نسبت‌های مختلف کشت مخلوط از کشت خالص گیاه سویا (۰:۱۰۰) بیش‌تر بود و مقدار این افزایش در نسبت‌های ۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) به ترتیب ۱۲/۳۶، ۴/۸۹ و ۱۹/۳۷ درصد بود (شکل ۲). پس از این مرحله میزان فعالیت تثبیت بیولوژیکی در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) تا مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت به شدت کاهش یافت (شکل ۲). افزایش سایه‌اندازی گیاه کنجد به ویژه در مراحل پایایی رشد نقش مهمی در کاهش فعالیت تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) داشت. به‌طور کلی افزایش نسبت نور قرمز به قرمز دور در مرحله آغاز دانه‌بندی گیاه سویا (R_5) اهمیت بیش‌تری در مقایسه با مراحل ابتدایی رشد دارد و این موضوع باعث تحریک فتوسنتز و افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن در گیاه سویا می‌شود (Luca & Hungria, 2014). لذا به‌نظر می‌رسد نفوذ بیش‌تر نور در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) تا مرحله ۷۵ روز پس از کاشت (پایان گلدهی) نقش مهمی در برتری میزان تثبیت بیولوژیکی سویا در مقایسه با سایر نسبت‌های مورد مطالعه داشت. اما پس از مرحله مذکور افزایش ارتفاع گیاه کنجد در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) ضمن کاهش نسبت نور قرمز به قرمز دور مانع افزایش میزان تثبیت بیولوژیکی سویا در کشت مخلوط شد. به نحوی که مقدار تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) و در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (آغاز غلاف‌دهی) به ترتیب ۱۹/۷۴، ۳۲/۹۲ و ۲۱/۹۹ درصد کم‌تر از نسبت کاشت ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و کشت خالص سویا (۰:۱۰۰) بود. علاوه بر مطالب مذکور ترشح برخی ترکیبات ثانویه (مانند فنل) در بخش زیرزمینی می‌تواند باعث کاهش قابلیت تثبیت بیولوژیکی گیاه لگوم شود (Trezza *et al.*, 2016). از آنجاکه افزایش تولید فنل و قابلیت دگرآسیبی گیاه کنجد در کشت مخلوط نیز توسط برخی از پژوهش‌گران گزارش شده است (Verma *et al.*, 2021). بنابراین تقویت قابلیت دگرآسیبی گیاه کنجد با افزایش سهم کاشت آن در کشت مخلوط نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل کاهش نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیک سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) باشد. در مجموع برخی از پژوهش‌گران به افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی گیاه لگوم در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط اشاره کردند (Hu *et al.*, 2016; Stomph *et al.*, 2020) هرچند نتایج برخی دیگر از مطالعات نیز نشان‌دهنده کاهش قابلیت تثبیت بیولوژیک گیاه لگوم در کشت مخلوط است (Namatsheve *et al.*, 2021).



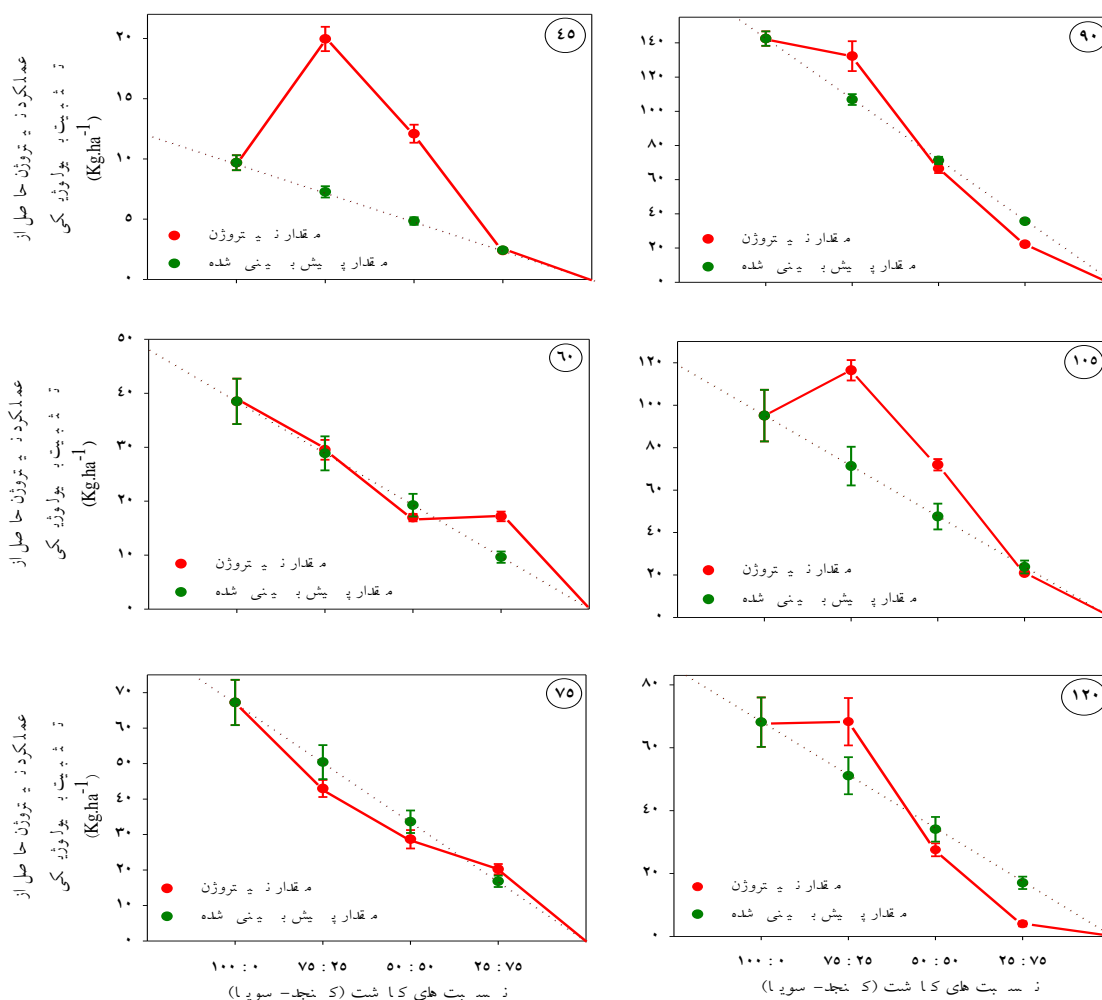
شکل ۲. میانگین درصد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط (کنجد-سویا). خطوط عمودی بر روی نقاط نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE)، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

۲.۳. عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی

نتایج عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی نیز نشان داد بیش‌ترین افزایش عملکرد نیتروژن در بخش بالایی در مرحله ۴۵ روز پس از کاشت متعلق به نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) بود. اما در مرحله ۶۰ و ۷۵ روز پس از کاشت، نسبت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) دارای بیش‌ترین مقدار عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در هکتار بود (شکل ۳). در این مراحل درصد افزایش عملکرد نیتروژن حاصل از فرایند تثبیت بیولوژیکی در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) در مقایسه با مقادیر قابل انتظار به ترتیب ۷۸/۴۰ و ۲۰/۳۲ درصد بود. این در حالی است که عملکرد نیتروژن حاصل از فرایند مذکور در سایر نسبت‌های مختلف کشت مخلوط کمتر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود.

این روند در مرحله ۹۰ و ۱۰۵ روز پس از کاشت تغییر کرد و مقدار عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در نسبت‌های ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ در مقایسه با نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) بیش‌تر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود (شکل ۳). به نحوی که مقدار افزایش صفت مذکور در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰ (کنجد-سویا) در مراحل ۱۰۵ روز پس از کاشت به ترتیب ۶۳/۲۸، ۵۱/۲۹ درصد بیش‌تر و در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) ۱۲/۰۱ درصد کمتر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود. به‌طور کلی مقدار نیتروژن گیاه و تخصیص آن در فرایند فتوسنتزی به عوامل محیطی از جمله نیتروژن قابل دسترس، نور و غلظت دی‌اکسیدکربن وابسته است، در نتیجه عنصر نیتروژن نقش بسیار مهمی در تعیین ظرفیت فتوسنتزی برعهده دارد (Kumar et al., 2002). لذا به‌نظر می‌رسد افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی در نسبت‌های کاشت ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ نقش مهمی در افزایش عملکرد نیتروژن گیاه در هکتار از طریق بهبود کارایی فتوسنتز دارد. به‌طور کلی تا مرحله ۷۵ روز پس از کاشت مقدار تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) در مقایسه با مقادیر قابل پیش‌بینی افزایش و در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ کاهش یافت. این موضوع می‌تواند به‌دلیل افزایش رقابت بین‌گونه‌ای کنجد و سویا در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد و سویا) باشد. به‌نظر می‌رسد افزایش نفوذ نور به درون تاج‌پوشش و غالبیت بیش‌تر سویا در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) به‌ویژه در مراحل ۹۰ و ۱۰۵ روز پس از کاشت نقش مهمی در بهبود ظرفیت فتوسنتزی و افزایش عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی داشت. در مقابل کاهش نفوذ نور به درون تاج‌پوشش در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) نیز باعث کاهش ۷۶/۵۷ درصدی عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت نسبت به مقدار قابل پیش‌بینی شد. در نهایت با افزایش سن گیاه و به‌دلیل وجود سازوکار جبرانی و مقررات

خودتنظیمی بین منبع و مخزن میزان اختصاص کربن به اندام‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد (Hungria *et al.*, 2006; Oluwaseyi *et al.*, 2019) و این موضوع باعث کاهش فعالیت تثبیت بیولوژیکی سویا در مراحل انتهایی رشد زایشی در نسبت‌های مختلف کاشت شد. علاوه بر آن، از آنجاکه گیاه کنجد به دلیل قابلیت دگرآسیبی بالا گزینه مناسبی برای تولید علف‌کش‌های زیستی محسوب می‌شود (Imtiyaz *et al.*, 2017; Verma *et al.*, 2021). لذا به نظر می‌رسد این موضوع نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل کاهش فعالیت تثبیت بیولوژیکی سویا در بخش زیرزمینی در نسبت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) باشد. به طور کلی بهبود فتوسنتز و تولید ماده خشک بیشتر در گیاه باعث افزایش اختصاص آن به ترشحات ریشه می‌شود (Oluwaseyi *et al.*, 2019). بنابراین اثر دگرآسیبی می‌تواند با افزایش سهم کاشت کنجد (۲۵:۷۵) به‌ویژه در مراحل آغاز غلاف‌دهی و دانه‌بندی گیاه سویا (به ترتیب ۹۰ و ۱۲۰ روز پس از کاشت) افزایش یابد و باعث کاهش عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی سویا شود.



شکل ۳. میانگین عملکرد نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی سویا در طی دوره رشد و در نسبت‌های مختلف کاشت با گیاه کنجد. خطوط عمودی بر روی نقاط نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE) و اعداد داخل دایره مربوط به تعداد روز پس از کاشت می‌باشد.

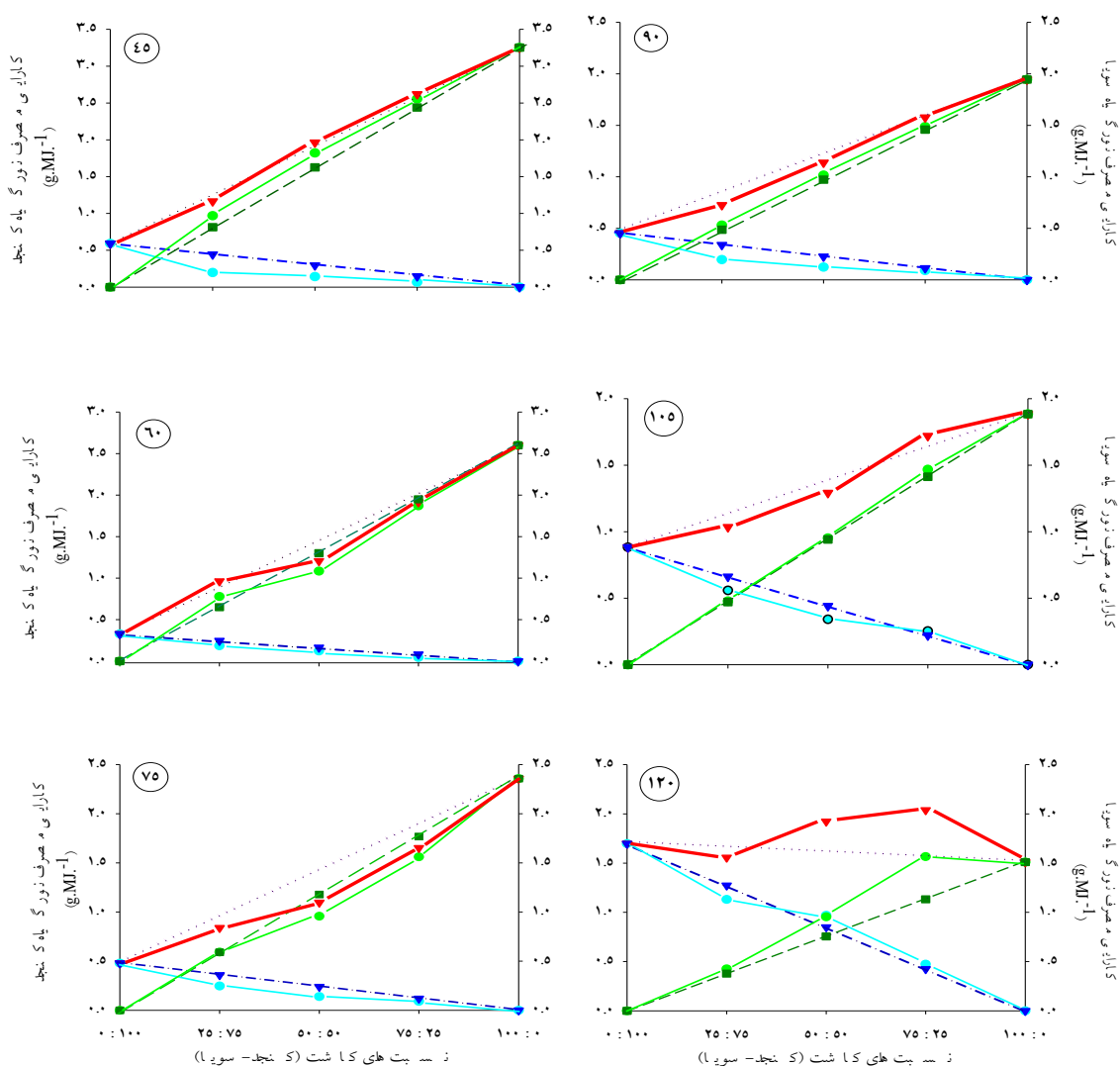
۳.۳. کارایی مصرف نور

بررسی تأثیر رقابت دو گیاه کنجد و سویا بر کارایی مصرف نور در نسبت‌های مختلف کاشت نشان نیز نشان داد گیاه سویا در مقایسه با گیاه کنجد کارایی مصرف نور بیش‌تری در مراحل مختلف رشد نسبت به مقادیر قابل پیش‌بینی دارد (شکل ۴). به نحوی که بیش‌ترین مقدار افزایش متعلق به مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت بود. در این مرحله افزایش کارایی مصرف نور گیاه سویا در نسبت‌های ۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) در مقایسه با مقادیر قابل پیش‌بینی به‌ترتیب ۳۸/۱۹، ۲۶/۲۸ و ۱۲/۶۱ درصد بود. در مقابل گیاه کنجد تنها در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت مقدار کارایی مصرف نور بیش‌تری در مقایسه با مقادیر قابل‌انتظار داشت. بیش‌ترین مقدار افزایش متعلق به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت بود. برآیند کارایی مصرف نور گیاه کنجد و سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز نشان داد برخلاف مراحل ابتدایی افزایش بیش‌تر کارایی مصرف نور گیاه سویا در نسبت‌های ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ در مقایسه با گیاه کنجد باعث افزایش کارایی مصرف نور گیاهان مورد مطالعه در الگوی کشت مخلوط شد. نتایج نشان داد در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت برآیند کارایی مصرف نور در نسبت‌های ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ به‌ترتیب ۲/۰۳ و ۱/۹۲ بود (شکل ۴). با توجه به نتایج مراحل ۹۰ و ۱۲۰ روز پس از کاشت و افزایش کارایی مصرف نور، رقابت گیاه سویا و کنجد در نسبت‌های کشت مخلوط ۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰ نوع همیاری دوجانبه است. افزایش ۱۴/۱۴ و ۱۱/۳۸ درصدی کارایی مصرف نور گیاه کنجد به‌ترتیب در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) نقش مهمی در ایجاد رابطه مذکور داشت (شکل ۴). از آنجاکه تولید ماده خشک در گیاه وابسته به فتوسنتز جاری تاج‌پوشش است و کاهش دریافت نور و افزایش سایه‌دهی به‌ویژه در مراحل آغاز دانه‌بندی در گیاه سویا می‌تواند میزان فتوسنتز و در نتیجه رشد گیاه را به شدت تحت‌تأثیر قرار دهد (Luca & Hungria, 2014). لذا به‌نظر می‌رسد نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ با توسعه شاخص سطح برگ در کانوپی کشت مخلوط ضمن بهبود کارایی مصرف نور، ظرفیت فتوسنتزی و قابلیت تثبیت بیولوژیکی نیتروژن را افزایش دادند. به‌طور کلی، کشت مخلوط می‌تواند جذب نور بیش‌تری در مقایسه با کشت خالص داشته باشد و این امر به‌دلیل ایجاد رابطه مکملی فضایی و ساختار متفاوت گونه‌ها برای جذب نور است. در نهایت ایجاد رابطه مکملی در جذب نور به فاصله ردیف کاشت و الگوی کشت مخلوط بستگی دارد (Stomph et al., 2020).

۳.۴. عملکرد دانه

نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه گیاه کنجد و سویا داشتند (جدول ۱). نتایج نشان داد با کاهش ردیف کاشت گیاه کنجد در کشت مخلوط، سهم مشارکت گیاه به‌شدت کاهش می‌یابد. میزان کاهش عملکرد در نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده به‌ترتیب ۲/۰۱، ۲۶/۸۶ و ۵۶/۶۵ درصد بود (جدول ۱). در خصوص گیاه سویا کاهش ردیف کاشت در نسبت‌های ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ به‌ترتیب باعث افزایش ۲۰/۶۴ و ۵۰/۱۴ درصد عملکرد در مقایسه با مقادیر قابل‌انتظار شد. اما این نتایج در خصوص نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) صادق نبود و افزایش میزان رقابت در الگوی کشت مذکور باعث کاهش بیش‌تر عملکرد گیاه سویا در مقایسه با سایر نسبت‌های کشت مخلوط شد. همان‌طور که اشاره شد افزایش سهم کاشت و ارتفاع گیاه کنجد نقش مهمی در کاهش کارایی مصرف نور، ظرفیت فتوسنتزی و قابلیت تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) داشت. به‌طور کلی، ارتفاع بیش‌تر و اثر سایه‌اندازی توسط گیاه همراه در کشت مخلوط می‌تواند سبب کاهش رشد و فعالیت بیولوژیکی تثبیت نیتروژن گیاه لگوم شود، با این حال این امر همواره ثابت نیست و برخی از گیاهان زراعی لگوم حتی اگر در سایه قرار گیرند، می‌توانند به تثبیت بیولوژیکی نیتروژن ادامه داده و مشارکت

معنی داری در اقتصاد نیتروژن در سیستم کشت مخلوط داشته باشند (Vlachostergios *et al.*, 2015). بنابراین به نظر می‌رسد گیاه سویا در نسبت‌های کاشت ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ به دلیل تراکم کم‌تر گیاه کنجد در الگوی کاشت در تولید نیتروژن حاصل از تثبیت بیولوژیکی موفق‌تر عمل کرده است. در همین رابطه برخی از پژوهش‌گران بیان داشتند انتخاب الگوی مناسب در کشت مخلوط با ایجاد حداکثر تراکم سایه‌دهی به میزان ۲۰ الی ۳۰ درصد نقش مهمی در دستیابی به عملکرد مطلوب دانه گیاه سویا خواهد داشت (Khalid *et al.*, 2018). بنابراین همان‌طور که اشاره شد افزایش کارایی استفاده از منابع توسط گیاه سویا در نسبت‌های کاشت مذکور و افزایش عملکرد دانه در مقایسه با مقادیر قابل‌انتظار نقش مهمی در بهبود عملکرد دانه داشت.



شکل ۴. تأثیر رقابت دو گیاه کنجد و سویا بر کارایی مصرف نور گیاه در نسبت‌های مختلف کاشت.

● کارایی مصرف نور بوته کنجد، ● کارایی مصرف نور بوته سویا، ▼ مجموع کارایی مصرف نور دو گیاه، ▲ مقدار پیش‌بینی شده گیاه کنجد، مقدار پیش‌بینی شده گیاه سویا و اعداد داخل دایره مربوط به تعداد روز پس از کاشت می‌باشد.

هم‌چنین تمامی نسبت‌های مختلف کشت مخلوط دارای نسبت برابری زمین بالاتر از یک بودند و این موضوع نشان‌دهنده برتری کشت مخلوط بر کشت خالص گیاهان مورد مطالعه است (جدول ۲). بیش‌ترین نسبت برابری زمین متعلق به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) به‌ترتیب با میانگین ۱/۱۲ و ۱/۰۳ بود. به‌طور کلی عملکرد جزئی کنجد فقط در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) بیش‌تر از عملکرد جزئی سویا بود. در مقابل عملکرد جزئی سویا در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ به‌ترتیب با میانگین ۰/۷۶ و ۰/۹۲ بیش‌تر از عملکرد جزئی کنجد بود (جدول ۲). هم‌چنین با افزایش سهم کاشت کنجد در نسبت کشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) عملکرد جزئی سویا (۰/۲۸) کاهش یافت. این نتایج در خصوص گیاه سویا نیز صادق بود اما با افزایش سهم کاشت سویا در نسبت کشت ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) عملکرد نسبی کنجد به میزان بیش‌تری کاهش یافت (۰/۱۱). علاوه بر آن بررسی نسبت رقابت در کشت مخلوط نیز نشان داد با افزایش سهم کاشت گیاه سویا در کشت مخلوط قدرت رقابت گیاه در کشت مخلوط افزایش می‌یابد این در حالی است که نسبت رقابت گیاه کنجد تنها در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) بیش‌تر از واحد بود (جدول ۲). بنابراین توان رقابتی گیاه کنجد در کشت مخلوط با افزایش سهم ردیف کاشت به‌شدت افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش توان فتوسنتزی و قابلیت تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) باشد. با توجه به نتایج مذکور گیاه سویا رقم ساری از همراهی در کشت مخلوط با کنجد رقم ناز در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ تأثیر بیش‌تری پذیرفته است.

جدول ۱. میانگین عملکرد دانه گیاه کنجد و سویا در نسبت‌های مختلف کاشت

نسبت‌های کاشت (کنجد-سویا)	مقدار عملکرد دانه گیاه کنجد و سویا (kg ha ⁻¹)				نسبت‌های کاشت (کنجد-سویا)
	سویا		کنجد		
	مشاهده شده	مورد انتظار	مشاهده شده	مورد انتظار	
۱۰۰:۰	۴۱۸۲/۵۷ ± ۵۴۵/۲۹	۴۱۸۲/۵۷ ± ۵۴۵/۲۹	-	-	۱۰۰:۰
۷۵:۲۵	۳۱۳۶/۹۲ ± ۴۰۸/۹۷	۳۷۸۴/۵۶ ± ۲۱۱/۰۲	-۵۶/۶۵	۵۳۹/۰۲ ± ۴۲/۴۲	۲۳۲/۶۶ ± ۳۹/۱۰
۵۰:۵۰	۲۰۹۱/۲۸ ± ۲۷۲/۶۴	۳۱۳۹/۹۵ ± ۲۱۵/۳۵	-۲۶/۸۶	۱۰۷۸/۰۳ ± ۸۴/۸۷	۷۸۸/۴۴ ± ۱۱۴/۷۴
۲۵:۷۵	۱۰۴۵/۶۴ ± ۱۳۶/۳۲	۱۱۴۷/۸۶ ± ۱۰۹/۵۱	-۲/۰۱	۱۶۱۷/۰۵ ± ۱۲۷/۳۱	۱۵۸۴/۷۱ ± ۱۲۹/۴۴
۰:۱۰۰	-	-	-	۲۱۵۶/۰۷ ± ۱۶۹/۷۴	۲۱۵۶/۰۷ ± ۱۶۹/۷۴
حداقل اختلاف معنی‌دار	۲۸۱/۵۲ **	۵۲۹/۷۹ **		۸۷/۶۳ **	۱۷۷/۱۶ **
ضریب تغییرات (%)	۶/۷۳	۱۰/۸۱		۴/۰۶	۹/۳۰

* و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد.

در هر ستون اختلاف میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، معنی‌دار نیست و اعداد پس از میانگین نشان‌دهنده انحراف استاندارد است ($\bar{x} \pm SD$).

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی نسبت‌های مختلف کشت مخلوط کنجد و سویا

شاخص	گیاه زراعی	نسبت‌های کاشت (کنجد-سویا)		
		۷۵:۲۵	۵۰:۵۰	۲۵:۷۵
شاخص برابری زمین	کنجد	۰/۱۱	۰/۳۶	۰/۷۳
	سویا	۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۲۸
	مجموع	۱/۰۳	۱/۱۲	۱/۰۱
نسبت رقابت	کنجد	۰/۳۵	۰/۴۹	۲/۷۲
	سویا	۲/۸۵	۲/۱۴	۱/۱۴

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد کشت مخلوط گیاه سویا و کنجد می‌تواند باعث افزایش قابلیت تثبیت بیولوژیکی سویا از طریق افزایش بازدهی مصرف نور به‌ویژه در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) شود. این در حالی است که در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط افزایش سایه‌اندازی گیاه کنجد در مراحل پایانی رشد نقش مهمی در کاهش فعالیت تثبیت بیولوژیکی گیاه سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (کنجد-سویا) داشت. در مجموع افزایش ۱۲ درصدی بهره‌وری عملکرد در نسبت کاشت ۵۰:۵۰ می‌تواند به‌دلیل ایجاد تعامل و افزایش بهره‌برداری از عوامل محیطی در الگوی کشت مخلوط باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده کارایی مصرف نور گیاه کنجد در مرحله ۱۲۰ روز پس از کاشت در نسبت‌های ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (کنجد و سویا) به‌ترتیب ۱۴/۱۴ و ۱۱/۳۸ درصد بیش‌تر از مقادیر موردانتظار بود و این موضوع نقش مهمی در ایجاد رابطه همیاری دوجانبه در کشت مخلوط با گیاه سویا داشت. در نهایت ایجاد رابطه مذکور در نسبت‌های کاشت ۷۵:۲۵ (کنجد-سویا) و ۵۰:۵۰ ضمن تنظیم دقیق سازوکارهای منبع-مخزن باعث بهبود کارایی استفاده از منابع به‌ویژه در مراحل آغاز دانه‌بندی و قابلیت تثبیت بیولوژیک نیتروژن در کشت مخلوط شد. با توجه به نتایج این مطالعه جهت افزایش بهره‌وری در میزان عملکرد، بهبود قابلیت تثبیت بیولوژیکی و کارایی مصرف نور در کشت مخلوط، نسبت کاشت سویا (رقم ساری) نباید کم‌تر از کنجد (رقم ناز) باشد و نسبت کاشت ۵۰:۵۰ می‌تواند بهترین گزینه برای دستیابی به اهداف مذکور باشد.

۵. تشکر و قدردانی

از راهنمایی جناب آقای دکتر میر احمد موسوی شلمانی در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورد استفاده

- Akbari, F., Dahmardeh, M., Morshdi, A., Ghanbari, A., & Khoramdel, S. (2019). Effects of Tillage System and Plant Residue on Nitrogen Uptake and Use Efficiency in Corn and Bean Intercropping Systems. *Journal of Crops Improvement*, 20(4), 785-799. (in Persian) <https://doi.org/10.22059/JCI.2018.259464.2043>
- 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>
- 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>
- Cong, W.F., Hoffland, E., Li, L., Six, J., Haosun, J., Bao, X., Zhang, F., & Werf, W. (2014). Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Global Change Biology*, 21(4), 1715-1726. <https://doi.org/10.1111/gcb.12738>
- Fatemi devin, R., Bager Hoseini, S.M., Mogadam, H., & Motasharezadeh, B. (2021). Evaluation of light consumption efficiency in a mixture of maize and beans cultivation under the influence of biologic and organic fertilizers. *Journal of Crops Improvement*, Articles in press. (in Persian) <https://doi.org/10.22059/JCI.2021.308259.2452>
- Gardner, F.P., Pearce, R.B., & Mitchell, R.L. (1985). *Physiology of crop plants*. USA, Iowa State University Press.

- Gong, X., Ferdinand, U., Dang, K., Li, J., Chen, G., Luo, Y., Yang, P., & Feng, B. (2020). Boosting proso millet yield by altering canopy light distribution in proso millet/mung bean intercropping systems. *The Crop Journal*, 8(2), 365-377. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.09.009>
- 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>
- Hosseinpanahi, F., Pouramir, F., Kochehi, A., Nassiri, M., & Ghrbani, R. (2011). Evaluation of radiation absorption and use efficiency in replacement series intercropping of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.). *Agroecology Journal*. 3(1), 106-120. (in Persian)
- 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 Crop Research*, 198, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.022>
- Imtiyaz, H., Singh, N.B., Singh, A., & Singh, H. (2017). Allelopathic potential of sesame plant leachate against *Cyperus rotundus* L. *Annals of Agrarian Science*, 15, 141-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2016.10.003>
- 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)
- Khalid, M.H.B., Reza, M.A., Yu, H.Q., Sum, F.A., Zhang, Y.Y., Iqbal, N., 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. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_25512569
- Kumar, P.A., Parry, M.A.J., Mitchell, R.A.C., Ahmad, A., & Abrol, Y.P. (2002). Photosynthesis and nitrogen use efficiency. In C.H. Foyer & G. Noctor (Eds.), *Photosynthetic nitrogen assimilation and associated carbon and respiratory metabolism* (1th ed., Vol. 12, pp. 23-34). Dordrecht, NL: Kluwar Academic Publishers.
- Luca, M.J.D., & Hungria, M. (2014). Plant densities and modulation of symbiotic nitrogen fixation in soybean. *Scientia Agricola*, 71(3), 181-187. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162014000300002>
- 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.
- Machado, S. (2009). Does intercropping have a role in modern agriculture? *Soil and Water Conservation*, 64(2), 55-57.
- 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>
- Namatsheve, T., Chikowo, R., Corbeels, M., Mouquet, M., Verniere, C.I., & Cardinal, R. (2021). Maize-cowpea intercropping as an ecological intensification option for low input systems in sub-humid Zimbabwe: Productivity, biological N₂-fixation and grain mineral content. *Field Crops Research*, 263(1), 35-24. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108052>
- 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>

- Parsa, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Ghaemi, A. (2008). Seasonal variation of radiation interception and radiation use efficiency in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Field Crops Research*, 5(2), 229–238. (in Persian)
- Raza, M.A., Feng, L., Werf, W.V., Ren Cai, G., Khalid, M.H., Iqbal, N., Hassan, M., Meraj, T.A., Naeem, M., Khan, I., Rehman, S., Ansar, M., Ahmad, M., Yang, F., & Yang, W. (2019). Narrow- wide- row planting pattern increases the radiation use efficiency and seed yield of intercrop species in relay- intercropping system. *Food and Energy Security*, 8(3), 1-12. <https://doi.org/10.1002/fes3.170>
- Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.06.003>
- 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? In: D.L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (1st Ed., 160, 1-50). London, UK. Academic Press.
- Trezzi, M.M., Vidal, R.A., Balbinot, A.A., Bittencourt, H.V.H., & Filho, A.P.S. (2016). Allelopathy: driving mechanisms governing its activity in agriculture. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 53-60. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1159342>
- 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)
- 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. Canberra, AU: ACIAR Press.
- Verma, P., Blaise, D., Sheeba, J.A., & Manikandan, A. (2021). Allelopathic potential and allelochemicals in different intercrops for weed management in rainfed cotton. *Current Science*, 120(6), 1035-1039. <https://doi.org/10.18520/cs%2Fv120%2Fi6%2F1035-1039>
- 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>
- 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>
- 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>
- Young, E.G., & Conway, C.F. (1942). On the estimation of allantoin by the Rimini-Schryver reaction. *Journal of Biological Chemistry*, 142, 839-853.
- 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>