

Study of radiation use efficiency and seed yield in millet and soybean intercropped under low nitrogen conditions

Meisam Namdari¹, Rahmat Abbasi^{2*}, Hemmatolaah Pirdashti³, Faezeh Zaefarian⁴
1,2,3,4. Department of Agronomy, Sari Agricultural sciences and Natural Resources University (SANRU), Iran.
(Received: November 16, 2021- Accepted: December 28, 2021)

ABSTRACT

To evaluate the competition of millet (*Panicum miliaceum* L.) and soybean (*Glycine max* (L) Merrill) in the intercropping system, a field experiment in two years (2018-19) was conducted in a randomized complete block design with four replications at the Sari Agricultural Science and Natural Resources university. The planting ratios were 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, and 100:0 (Soybean: Millet, respectively). The results showed that the radiation use efficiency (RUE) was higher in different intercropping ratios than the millet monoculture (0:100). In different intercropping ratios, the RUE of millet decreased significantly with increasing the share of soybean. So that in the 105 days after planting, the RUE of millet in 75:25 was 47.74 and 29.41 percent less than the expected values in studied years, respectively. Also, the planting ratio of 25:75 in the 90 days after planting had the highest chlorophyll a/b ratio in soybean and millet. The 25:75 had the most elevated land equivalent ratio index (1.23), and the millet actual yield loss (AYL) was only positive (2.01) in the 25:75. Therefore, increasing the RUE in intercropping culture and improving millet grain yield as the dominant species played an important role in increasing productivity in the planting ratio of 25:75.

Keywords: Actual yield loss, chlorophyll, dominant species, LER, planting ratio.

بررسی کارایی مصرف نور و بهره‌وری عملکرد در کشت مخلوط ارزن و سویا تحت شرایط کمبود

نیترژن

میثم نامداری^۱، رحمت عباسی^{۲*}، همت‌اله پیردشتی^۳، فائزه زعفریان^۴

۱ و ۲ و ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکترا، استادیار، استاد، دانشیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۷)

چکیده

به منظور بررسی تعاملات بین گیاهی ارزن (*Panicum miliaceum* L.) و سویا (*Glycine max* (L) Merrill) در کشت مخلوط، آزمایشی طی دو سال زراعی (۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸) و به صورت طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل نسبت‌های کشت ۰:۱۰۰، ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ و ۱۰۰:۰ (به ترتیب ارزن-سویا) بودند. نتایج نشان داد کارایی مصرف نور در کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص ارزن بود و با افزایش سهم کشت سویا در کشت مخلوط کارایی مصرف نور ارزن به شدت کاهش یافت. به نحوی که در مرحله ۱۰۵ روز پس از کاشت کارایی مصرف نور ارزن در نسبت ۷۵:۲۵ به ترتیب ۴۷/۷۴ و ۲۹/۴۱ درصد کمتر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود. همچنین بیشترین نسبت کلروفیل a/b در گیاه ارزن و سویا متعلق به نسبت ۲۵:۷۵ در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت بودند. بیشترین میزان شاخص برابری زمین (۱/۲۳) متعلق به نسبت ۲۵:۷۵ بود. شاخص افت عملکرد واقعی ارزن نیز فقط در نسبت ۲۵:۷۵ مثبت (۲/۰۱) بود؛ لذا افزایش کارایی مصرف نور در کشت مخلوط و بهبود عملکرد دانه ارزن به عنوان گونه غالب نقش مهمی در افزایش ۲۳ درصدی عملکرد دانه در نسبت ۲۵:۷۵ داشت.

واژه‌های کلیدی: شاخص افت عملکرد واقعی، کلروفیل، گونه غالب، نسبت برابری زمین، نسبت کشت.

مقدمه

برای غذا در شرایط محدودیت اراضی زراعی به کمک روش‌های کشاورزی سازگار با محیط زیست است؛ لذا تقویت وضعیت پایداری در سیستم‌های کشاورزی یکی

یکی از چالش‌های پیش روی جهان برای جمعیت در حال رشد، مطابقت تولید با شیب افزایش سریع تقاضا

* Corresponding author E-mail: r.abasi@sanru.ac.ir

انجام‌شده در کشت مخلوط لوبیا و ارزن بیشترین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی مربوط به تیمار کشت خالص لوبیا و ارزن (به ترتیب با میانگین ۵۴۵/۵۸ و ۲۵۱۵/۶۰ کیلوگرم در هکتار) بود و نسبت کشت ۲۵:۷۵ (لوبیا-ارزن) بیشترین شاخص برابری زمین را با میانگین ۱/۶۹ در اختیار داشت (Ehsanifar *et al.*, 2015). سایر پژوهشگران نیز افزایش نسبت برابری زمین (۱/۵۰) و نسبت رقابت (۴/۱۴) را در کشت مخلوط ارزن با گیاه سویا گزارش کردند (Layek *et al.*, 2014). نتایج برخی مطالعات نیز نشان داد میزان کلروفیل برگ سویا در کشت مخلوط و در تیمار محدودیت کود نیتروژن افزایش یافت (Zhang *et al.*, 2013). در ادامه سایر محققان نیز بیان داشتند نسبت کلروفیل a/b در کشت مخلوط سویا-ذرت با بهبود نفوذ نور به درون تاج‌پوشش، افزایش می‌یابد (Yao *et al.*, 2017). به‌طور کلی کشت مخلوط گیاه بقولات و غیر بقولات به‌صورت جایگزینی می‌تواند از طریق ایجاد رابطه مکملی باعث افزایش عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های سودمندی در کشت مخلوط شود (Namdari & Mahmoodi, 2013). لذا با توجه به اهمیت کشت مخلوط به‌عنوان یک عملیات زراعی سازگار با محیط زیست و همچنین لزوم انتخاب گیاهان زراعی با قابلیت متفاوت در جذب منابع محیطی از قبیل نور خورشید در این سیستم کشت، این پژوهش باهدف تعیین اثرات نسبت‌های مختلف کشت مخلوط به‌صورت جایگزینی بر کارایی استفاده از نور و نوع رابطه رقابتی گیاه سویا و ارزن تحت شرایط آب و هوایی شهرستان ساری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در طی دو سال زراعی (۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷) در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم

از راه‌های مقابله با این چالش است (Stomph *et al.*, 2020). در این بین استفاده از سیستم کشت مخلوط می‌تواند به تقویت پایداری در سیستم‌های تحت کشاورزی مدرن کمک شایانی کند (Neamatollahi *et al.*, 2013). در این سیستم کشت، انتخاب گیاهان زراعی با قابلیت متفاوت در جذب منابع در طول زمان و مکان برای کاهش رقابت و ایجاد رابطه مکملی امری ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کشت مخلوط گیاهان سه‌کربنه مانند گیاهان لگوم و برخی غلات چهارکربنه می‌تواند از طریق ایجاد رابطه مکملی باعث افزایش بهره‌وری در تولید دانه شود (Stomph *et al.*, 2020). به‌طور کلی در بین گیاهان با مسیر فتوسنتزی سه‌کربنه، سویا بخش مهمی از رژیم‌های غذایی انسان‌ها و حیوانات اهلی را به خود اختصاص داده است (Hangria & Mendes, 2015). ارزن نیز یک گیاه زراعی چهارکربنه‌ی زودرس و مناسب برای کشت در خاک‌های فقیر و کم‌بازده است (Mehrani *et al.*, 2013). بنابراین ارزیابی اثرات گیاه مکمل با خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی متفاوت در کشت مخلوط با گیاه لگوم می‌تواند به انتخاب گیاه مطلوب در این زمینه کمک شایانی کند. در این خصوص نتایج بررسی کشت مخلوط لوبیا-ارزن نشان داد نسبت‌های مختلف کشت اثر معنی‌داری بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه ارزن داشت و نسبت کاشت ۲:۱ دارای بالاترین شاخص نسبت برابری زمین (۱/۸۴) بود (Bitew *et al.*, 2019). برخی دیگر از پژوهشگران نیز ضمن مطالعه کشت مخلوط ماش و ارزن بیان داشتند کشت مخلوط ضمن کاهش رقابت بین گونه‌ای باعث افزایش ۲۳/۴ درصدی میزان تشعشع فعال فتوسنتزی عبور یافته از قسمت بالای کانوپی و کارایی مصرف نور در مقایسه با کشت خالص ارزن شد (Gong *et al.*, 2020). در ادامه و بر اساس مطالعات

هیرم کاری و به طریقه دستی انجام شد. بذور سویا پیش از کشت با باکتری رایزوبیوم ژاپونیکوم (با تراکم سلولی 2×10^7) تلقیح شد. باتوجه به نتایج آزمایش خاک (جدول ۱)، پیش از عملیات کشت مقدار کود توصیه شده در محدوده مورد نیاز گیاه سویا و ارزن با تخمین متوسط عملکرد دانه گیاهان مورد مطالعه و نوع آزمایش عناصر غذایی (به طور مثال فسفر روش اولسن) از طریق روابط و ضرایب موجود در راهنمای توصیه کاربرد کود شیمیایی (Gerwing & Gelderman, 2019) محاسبه و تامین شد. بدین ترتیب در سال زراعی اول میزان ۹۰ کیلوگرم فسفر و ۶۶ کیلوگرم پتاس و در سال زراعی دوم میزان ۳۳ کیلوگرم فسفر به ترتیب از منابع سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم استفاده شد. قابل ذکر است آزمایش در سال زراعی دوم نیز در زمین کشت شده در سال اول انجام شد. در این پژوهش از کود نیتروژن دار به دلیل ایجاد اثر منفی بر فرآیند قابلیت تثبیت بیولوژیک سویا استفاده نشد. آبیاری گیاهان به صورت قطره ای و با اندازه گیری پتانسیل ماتریک توسط تانسومتر در ۴/ - بار و عملیات وجین به صورت دستی در چهار مرحله و پس از ظهور گیاهچه با فاصله زمانی ۱۴ روز انجام شد.

کشاورزی و منابع طبیعی ساری با عرض جغرافیایی 36° ، $33'$ شمالی و طول جغرافیایی 53° ، $3'$ شرقی و ارتفاع ۴۳ متر از سطح دریا در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با پنج تیمار و چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل نسبت های مختلف کشت به روش جایگزینی بر اساس درصد شامل ۱۰۰:۰، ۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵ و ۰:۱۰۰ (به ترتیب ارزن-سویا) بودند. ترکیب های ۱۰۰:۰ و ۰:۱۰۰ به ترتیب کشت خالص گیاه ارزن و سویا را تشکیل دادند. در ترکیب های ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ به ترتیب سه ردیف گیاه ارزن و یک ردیف سویا، یک ردیف گیاه ارزن و سه ردیف سویا منظور شد. ترکیب ۵۰:۵۰ نیز به ترتیب شامل کشت متوالی دو ردیف از گیاه ارزن و سویا بود. تعداد خطوط کشت در هر کرت ۱۲، فاصله بین خطوط ۳۵ سانتیمتر، طول خطوط چهار متر و تراکم نهایی برای هر دو گیاه به طور ثابت ۲۸ بوته در متر مربع بود (Mehrani, 2011; Carciochi *et al.*, 2019). بذر سویا رقم ساری (JK.695) از مرکز تحقیقات شرکت توسعه کشت دانه های روغنی شهرستان ساری و بذر گیاه ارزن رقم پیشاهنگ (اولین رقم اصلاح شده ارزن معمولی) از موسسه تحقیقات اصلاح نهال و بذر شهرستان کرج تهیه شد. عملیات کشت در تاریخ ۱۵ اردیبهشت به صورت

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش
Table 1. Physical and chemical properties of soil in the experiment site

سال Year	عمق نمونه - برداری Depth (cm)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت Texture	ماده آلی (OM) (%)	نیتروژن (N) (%)	فسفر (P ₂ O ₅) mg.kg ⁻¹	پتاسیم (K ₂ O) mg.kg ⁻¹	هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹) EC×10 ⁻³	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

عبور یافته در تیمارهای مورد مطالعه با رعایت اثر حاشیه، به فاصله هر ۱۵ سانتیمتر در عرض ردیف کاشت، یک قرائت به کمک سنسور در بالا و پایین تاج-پوشش (سطح زمین) در روزهای آفتابی و در ظهر

به منظور اندازه گیری کسری از نور دریافت شده توسط تاج پوشش گیاهان در نسبت های مختلف کشت از دستگاه تشعشع سنج (LX 1108 light meter, LT Lutron) استفاده شد. بدین منظور جهت ثبت میزان نور

$$\frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \times \exp\left(-k_m \frac{hm-hs}{f_m} \times Lm\right) + f_m f_s \left[\left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Ws^2-(hm-hs)}}{Ws} \right) \times \exp\left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm\right) \right] \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

$$Fib = f_s \left[\left(\frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Ws^2-(hm-hs)}}{Ws} \right) + f_s \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Ws^2-(hm-hs)}}{Ws} \right) \exp\left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm\right) \right] + f_m f_s \left[\left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \right) \times \exp\left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm\right) \right] \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

$$F1 = f_m \left(\frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \right) \left[1 - \exp\left(-k_m \left(\frac{hm-hs}{f_m} \times Lm \right) \right) \right] \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

$$F2 = f_m \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \right) \left[1 - \exp\left(-k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm\right) \right] \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

$$F3 = f_s \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Ws^2-(hm-hs)}}{Ws} \right) \left[1 - \exp\left(k_m \frac{hm-hs}{hm} \times Lm\right) \right] \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

$$F4 = \left(\frac{\sqrt{hs^2+Wm^2-hs}}{Wm} \times \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \right) \left[\frac{1 - \exp\left(-k_m \frac{hs}{hm} \times Lm\right)}{f_m} \right] \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$

$$F5 = Fim \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \right) \left[1 - \exp\left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) - \frac{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right)}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) + K_s L_s} \right) \right] \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۸)}$$

$$F6 = Fim \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2+Wm^2-(hm-hs)}}{Wm} \right) \left[1 - \exp\left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) - \frac{K_s L_s}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times Lm \right) + K_s L_s} \right) \right] \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۹)}$$

خورشیدی (ساعت ۱۲:۰۰ الی ۱۴:۰۰) انجام شد. بدین ترتیب در پایین تاج پوشش در هر یک از کرت‌های مورد مطالعه تعداد ۶۳ رکورد نور (۳×۲۱) ثبت شد. عملیات مذکور طی پنج مرحله از ۴۵ روز پس از کشت و با فاصله زمانی ۱۵ روز انجام شد. همچنین عملیات برداشت نیز برای گیاه ارزن و سویا به ترتیب در تاریخ ۲۲ مرداد و ۵ آبان‌ماه با رعایت اثرات حاشیه (۰/۵) متر از بالا و پایین هر کرت) با دست و به‌وسیله قیچی باغبانی از چهار ردیف میانی و سطحی معادل ۴/۲ متر مربع به تفکیک گیاه مورد نظر و نسبت کشت انجام شد. میزان تشعشع روزانه خورشیدی برای عرض جغرافیایی شهرستان ساری بر اساس تعداد ساعات آفتابی اخذشده از ایستگاه مرکزی هواشناسی شهرستان ساری (واقع در ۵ کیلومتری محل انجام آزمایش) اندازه‌گیری و از طریق معادله آنگستروم (رابطه‌ی ۱) تصحیح شد (Ambas & Baltas, 2014).

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

در این رابطه R_s میزان شدت تابش روزانه باتوجه‌به 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). همچنین تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) از حاصل ضرب میزان شدت تابش روزانه در ضریب ۰/۵۰ به دست آمد (Liu et al., 2017). میزان نور جذب‌شده توسط هر یک از گیاهان در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نیز از طریق مدل پیشنهادی (Wang et al., 2015) و به‌کمک روابط زیر طی شش مرحله از ۴۵ روز پس از کشت و با فاصله زمانی ۱۵ روز محاسبه شد.

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

$$K = \frac{-\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)}{LAI} \quad \text{رابطه‌ی (۱۶)}$$

$$LAI = a + b \times 4 \times \frac{e^{\left(-\frac{x-c}{d}\right)}}{\left(1+e^{\left(-\frac{x-c}{d}\right)}\right)^2} \quad \text{رابطه‌ی (۱۷)}$$

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

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

$$RUE = \frac{TDM}{\sum I_{PAR}F} \quad \text{رابطه‌ی (۱۸)}$$

در این رابطه TDM مقدار کل ماده خشک گیاه (گرم در متر مربع)، I_{PAR} مقدار تشعشع فعال فتوسنتزی روزانه (مگاژول بر متر مربع)، F میزان کسری از نور دریافت شده توسط گیاه در طی مراحل مختلف رشد است.

همچنین به منظور تعیین نسبت کلروفیل a/b ، میزان کلروفیل a و b در طی دوره رشد بر اساس روش استخراج با اتانول (اتیل الکل) ۹۵ درصد و اندازه گیری طیف نور جذبی محلول حاصل با دستگاه اسپکتروفتومتر (Hanon, i3 UV-VIS) در طول موج ۶۶۵ و ۶۴۹ از طریق روابط زیر محاسبه شد (Lichtenthaler, 1987).

$$Ch\ a = (13.36 A_{665} - 5.19 A_{649}) \quad \text{رابطه‌ی (۱۹)}$$

$$Ch\ b = (27.43 A_{649} - 8.12 A_{665}) \quad \text{رابطه‌ی (۲۰)}$$

$$F7 = \text{Fib} \left(\frac{\sqrt{hs^2 + Ws^2} - hs}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{-k_s L_s}{f_s} \right) \right] \quad \text{رابطه‌ی (۱۰)}$$

$$F8 = \text{Fib} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times L_m \right) - \frac{K_s L_s}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times L_m \right) + K_s L_s} \right) \right] \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۱۱)}$$

$$F9 = \text{Fib} \left\{ \left(1 - \frac{\sqrt{(hm-hs)^2 + Ws^2} - (hm-hs)}{Ws} \right) \left[1 - \exp \left(-k_m \left(\frac{hs}{hm} \times L_m \right) - \frac{K_m \left(\frac{hs}{hm} \times L_m \right)}{k_m \left(\frac{hs}{hm} \times L_m \right) + K_s L_s} \right) \right] \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۱۲)}$$

$$F_{a(m)} = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F9 \quad \text{رابطه‌ی (۱۳)}$$

$$F_{b(s)} = F6 + F7 + F8 \quad \text{رابطه‌ی (۱۴)}$$

$$F_{PAR} = F_a + F_b \quad \text{رابطه‌ی (۱۵)}$$

در این روابط m و s به ترتیب گیاه بلندتر و کوتاه تر، 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 کشت، K_m و K_s ضریب خاموشی گیاه، f_m و f_s نسبت مساحت نوار کشت گیاهان، $F_{a(m)}$ و $F_{b(s)}$ کسری از تشعشع فعال فتوسنتزی دریافت شده است.

ضریب خاموشی نور از طریق برازش رابطه ۱۶ که برگرفته از مدل بیر - لامبرت است (Lunagaria & Shekh, 2006) در کشت خالص گیاهان محاسبه و برای گیاه ارزن ۰/۵۴ و سویا ۰/۶۸ منظور شد. سطح برگ نیز در طی دوره رشد و از ۴۵ روز پس از کشت با فاصله زمانی ۱۵ روز طی شش مرحله به کمک نرم افزار 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.

جهت تجزیه آماری داده‌ها، مقایسه میانگین‌ها و تجزیه 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. مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح پنج درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel (۲۰۱۹) و (۱۴) Sigma Plot انجام شد.

نتایج و بحث

نسبت‌های مختلف کشت اثر معنی‌داری بر کارایی مصرف نور داشتند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین میزان کارایی مصرف نور در طی مراحل مختلف رشد مربوط به نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) و کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) بود و با کاهش تعداد ردیف کشت سویا در نسبت‌های مختلف کشت، درصد کارایی استفاده از نور کاهش یافت (جدول ۲). در مقابل، کشت خالص ارزن (۰:۱۰۰) نیز در طی مراحل مختلف رشد کمترین میزان کارایی مصرف نور را در اختیار داشت (جدول ۲). علاوه بر آن کارایی مصرف نور در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص ارزن (۰:۱۰۰) بود. اما نتایج بررسی تاثیر رقابت بر کارایی مصرف نور ارزن و سویا در کشت مخلوط به کمک مدل هیل و شیماموتو (Hill & Shimamoto, 1973) نشان داد، کارایی مصرف نور در کشت مخلوط بیشتر از مقادیر قابل انتظار بود (شکل ۱). براین‌اساس گیاه سویا در مراحل مختلف رشد کارایی مصرف نور بیشتری در مقایسه با مقادیر قابل انتظار داشت. به‌نحوی که در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (آغاز غلاف‌دهی) کارایی مصرف نور سویا در سال

نمونه‌برداری از تیمارهای کشت خالص و مخلوط از ۴۵ روز پس از کاشت با فاصله زمانی ۱۵ روز در گیاه سویا در مراحل انتهایی رشد رویشی (V_{12})، آغاز گلدهی (R_1)، پایان گلدهی (R_2)، آغاز غلاف‌دهی (R_3) و پایان غلاف‌دهی (R_4) و در گیاه ارزن پنجه‌دهی (BBCH:20)، ظهور خوشه (BBCH:51)، گلدهی (BBCH:69)، آغاز رسیدگی (BBCH:80)، رسیدگی (BBCH:89) انجام شد (Fehr *et al.*, 1971; Ventura *et al.*, 2020).

در نهایت برای محاسبه نسبت برابری زمین (Mead & Willey, 1980)، ضریب نسبی تراکم (De Wit, 1964) و افت عملکرد واقعی (Banik *et al.*, 2000) نیز به ترتیب از روابط زیر استفاده شد.

$$\text{LER} = (\text{LER}_a + \text{LER}_b) \quad \text{رابطه‌ی (۲۱)} \quad \text{LER}_a = \left(\frac{Y_{ia}}{Y_{ma}} \right) \quad \text{LER}_b = \left(\frac{Y_{ib}}{Y_{mb}} \right)$$

$$\text{RCC}_a = \frac{Y_{ia}Z_{ib}}{(Y_{ma}-Y_{ia})Z_{ia}} \quad \text{RCC}_b = \frac{Y_{ib}Z_{ia}}{(Y_{mb}-Y_{ib})Z_{ib}} \quad \text{رابطه‌ی (۲۲)} \quad \text{RCC} = \text{RCC}_a \times \text{RCC}_b$$

$$\text{AYL} = \text{AYL}_a + \text{AYL}_b \quad \text{AYL}_a = \left\{ \left[\frac{\left(\frac{Y_{ia}}{Z_{ia}} \right)}{\left(\frac{Y_{ma}}{Z_{ma}} \right)} \right] - 1 \right\} \quad \text{رابطه‌ی (۲۳)} \quad \text{AYL}_b = \left\{ \left[\frac{\left(\frac{Y_{ib}}{Z_{ib}} \right)}{\left(\frac{Y_{mb}}{Z_{mb}} \right)} \right] - 1 \right\}$$

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

حالات مختلف تاثیر رقابت در کشت مخلوط به روش جایگزینی با استفاده از مدل هیل و شیماموتو (Hill & Shimamoto, 1973) و با محاسبه مقدار پیش-بینی شده صفات مورد مطالعه تعیین شد.

$$\text{Expected yield} = \frac{Y_m}{Z_i} \quad \text{رابطه‌ی (۲۴)}$$

ارزن نسبت به مقادیر قابل انتظار به شدت کاهش یافت. با توجه به مطالب مذکور از آنجایی که افزایش کارایی مصرف نور سویا در کشت مخلوط بیش از کاهش آن در گیاه ارزن است، تاثیر رقابت بر کارایی مصرف نور گیاه ارزن و سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بر اساس مدل مورد مطالعه از نوع مکملی مثبت است (شکل ۱). در مجموع کشت مخلوط کارایی استفاده از نور بالاتری در مقایسه با کشت خالص دارد و این امر به دلیل قرار گرفتن گونه‌ها با ساختار فضایی و طول دوره رشد متفاوت است (Bedoussac & Justec, 2011). نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر نسبت کلروفیل a/b سویا در مراحل ۴۵ و ۹۰ روز پس از کاشت در سال‌های مورد مطالعه داشت (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیشترین نسبت کلروفیل a/b سویا مربوط به نسبت کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) در مراحل بود. کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) و نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) نیز کمترین مقدار کلروفیل a/b را در اختیار داشتند. هر چند در سال دوم مقدار کلروفیل a/b سویا در کشت خالص (۱۰۰:۰) تفاوت معنی‌داری با نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) نداشت (جدول ۳). علاوه بر مطالب مذکور نسبت‌های مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر نسبت کلروفیل ارنز در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت در سال اول و مرحله ۶۰ و ۹۰ روز پس از کاشت در سال دوم داشتند (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (BBCH: 80) آغاز رسیدگی) بیشترین و کمترین نسبت کلروفیل a/b ارزن متعلق به نسبت‌های کاشت ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) به ترتیب با میانگین ۰/۴۷ و ۰/۳۵ در سال اول بودند (جدول ۴).

۱۳۹۷ در نسبت‌های کشت ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) به ترتیب ۵۰/۷۷، ۵۱/۳۹ و ۳۲/۰۲ درصد و در سال ۱۳۹۸ نیز ۵۹/۷۶، ۳۶/۴۰ و ۲۳/۲۱ درصد در مقایسه با مقادیر قابل پیش‌بینی افزایش یافت (شکل ۱). در این بین با افزایش تعداد ردیف کشت سویا در کشت مخلوط، کارایی مصرف نور گیاه ارزن در طی مراحل مختلف رشد نسبت به مقادیر قابل انتظار به دلیل تسلط رقابتی و تاج‌پوشش سویا کاهش یافت (شکل ۱). به‌طور مثال در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت (BBCH: 80) آغاز رسیدگی) کارایی مصرف نور ارزن در نسبت کشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) در دو سال مورد مطالعه به-ترتیب ۵۴/۳۳ و ۲۸/۲۵ درصد در مقایسه با مقادیر قابل انتظار کاهش یافت (شکل ۱). به‌عبارت دیگر از آنجایی-که کارایی مصرف نور سویا بر خلاف ارزن در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بیشتر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود، لذا افزایش کارایی مصرف نور در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص ارزن (۱۰۰:۰) مربوط به افزایش سهم کارایی مصرف نور سویا در مخلوط است. به‌طور کلی آرایش برگ‌ها در تاج‌پوشش عامل مهم و تاثیرگذار بر کارایی جذب نور است؛ لذا به نظر می‌رسد گیاه سویا در مقایسه با گیاه ارزن در نسبت‌های مختلف کشت از طریق توسعه بیشتر سطح تاج‌پوشش و همچنین سازوکار حرکت دم‌برگ، پدیده هیپوناستی (Wu et al., 2017) در تولید مواد فتوسنتزی موفق‌تر بوده است؛ لذا افزایش سایه‌انداز تاج‌پوشش سویا به‌ویژه در نسبت کشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) نقش مهمی در تسریع فرآیند پیری و همچنین تخصیص بیشتر مواد فتوسنتزی به اندام زایشی در سازوکار فرار گیاه ارزن داشت. به‌همین دلیل با افزایش تعداد ردیف کاشت سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، کارایی مصرف نور

جدول ۲- مقایسه میانگین کارایی مصرف نور ($\text{g MJ.m}^{-2} \text{d}^{-1}$) سویا و ارزن در نسبت‌های مختلف کاشتTable 2. The means comparison of radiation use efficiency ($\text{g MJ.m}^{-2} \text{d}^{-1}$) of soybean and millet in different planting ratio

Planting ratios (soybean:millet)	Day after planting in 2018					Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
100 : 0	1.75 ±0.12	1.90 ±0.11	1.93 ±0.07	1.67 ±0.10	1.92 ±0.10	2.09 ±0.09	2.11 ±0.08	1.84 ±0.04	1.61 ±0.17	1.39 ±0.13
75 : 25	2.45 ±0.18	1.64 ±0.10	1.85 ±0.25	1.74 ±0.10	1.82 ±0.23	2.67 ±0.41	2.33 ±0.16	1.95 ±0.13	1.58 ±0.07	1.39 ±0.07
50 : 50	1.54 ±0.19	1.04 ±0.11	1.54 ±0.04	1.42 ±0.14	1.54 ±0.13	2.16 ±0.24	1.80 ±0.07	1.61 ±0.09	1.29 ±0.14	1.36 ±0.04
25 : 75	0.79 ±0.05	0.78 ±0.02	0.99 ±0.11	1.11 ±0.11	1.53 ±0.12	1.23 ±0.02	0.97 ±0.05	1.01 ±0.02	0.93 ±0.11	1.19 ±0.08
0 : 100	0.53 ±0.02	0.35 ±0.05	0.49 ±0.02	0.79 ±0.10	1.24 ±0.12	0.49 ±0.07	0.39 ±0.06	0.42 ±0.05	0.48 ±0.10	0.85 ±0.08
LSD (0.05)	0.23 **	0.14 **	0.19 **	0.15 **	0.23 **	0.32 **	0.16 **	0.13 **	0.19 **	0.11 **
C.V (%)	10.55	7.84	9.29	7.11	9.34	12.13	6.68	6.13	10.25	6.20

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

جدول ۳- مقایسه میانگین نسبت کلروفیل a/b سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط با ارزن

Table 3. The means comparison of chlorophyll a/b ratio of soybean in different intercropping ratio with millet

Planting ratios (soybean:millet)	Day after planting in 2018					Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
100 : 0	0.34 ±0.03	0.32 ±0.03	0.44 ±0.02	0.39 ±0.02	0.42 ±0.01	0.38 ±0.12	0.35 ±0.12	0.32 ±0.12	0.44 ±0.12	0.39 ±0.12
75 : 25	0.40 ±0.01	0.39 ±0.03	0.44 ±0.02	0.39 ±0.01	0.43 ±0.01	0.35 ±0.18	0.36 ±0.18	0.39 ±0.18	0.41 ±0.18	0.38 ±0.18
50 : 50	0.39 ±0.01	0.39 ±0.06	0.48 ±0.04	0.42 ±0.01	0.43 ±0.01	0.41 ±0.19	0.39 ±0.19	0.39 ±0.19	0.44 ±0.19	0.39 ±0.19
25 : 75	0.42 ±0.01	0.37 ±0.03	0.46 ±0.03	0.47 ±0.01	0.42 ±0.02	0.40 ±0.05	0.37 ±0.05	0.37 ±0.05	0.44 ±0.05	0.36 ±0.05
LSD (0.05)	0.03 **	0.07 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.02 **	0.02 ^{ns}	0.03 *	0.04 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.02 **	0.03 ^{ns}
C.V (%)	5.24	12.54	7.54	2.93	3.16	5.62	6.09	12.54	2.29	5.33

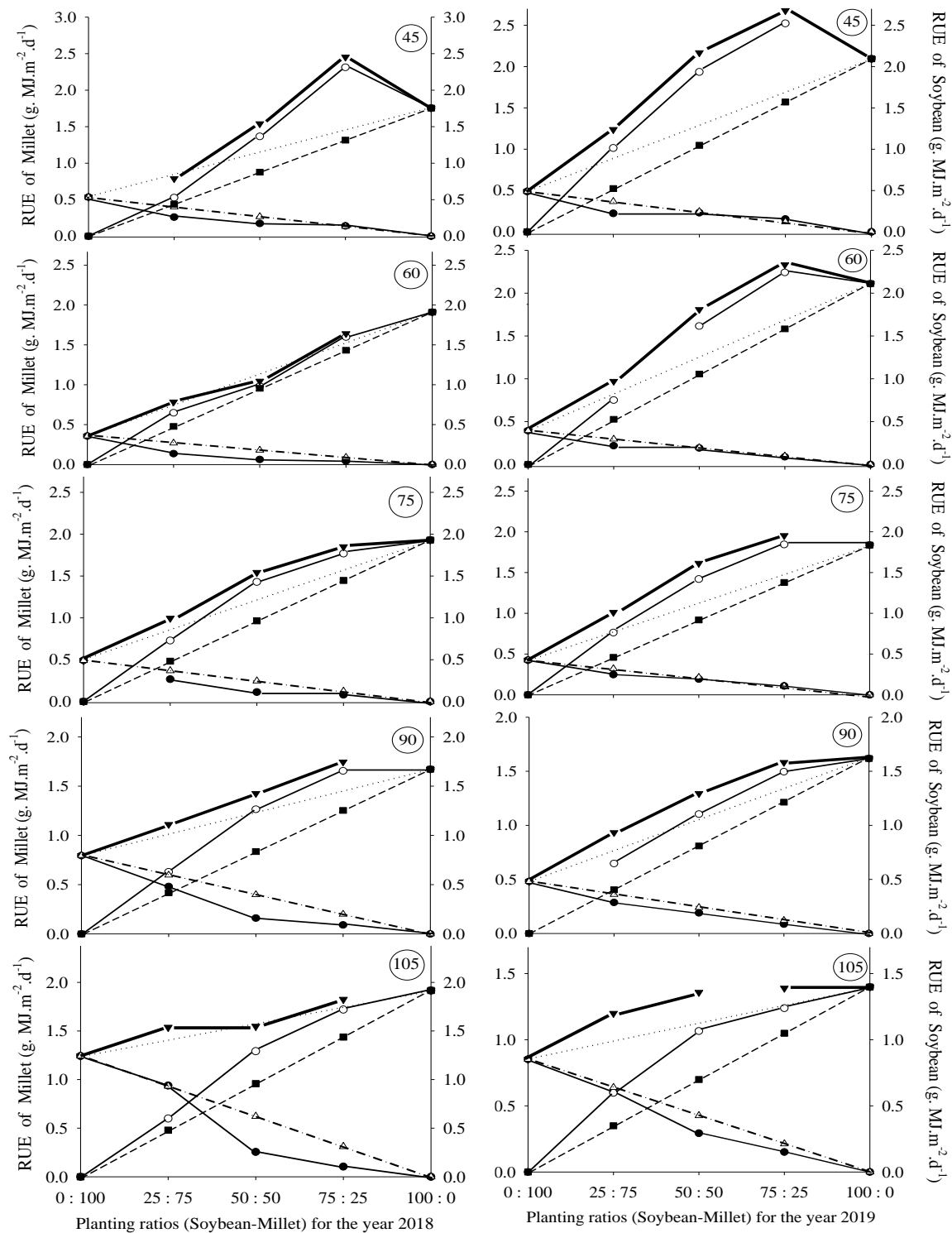
ns, * and **: Not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively. The values are means ± standard deviation ($\bar{X} \pm \text{SD}$).

جدول ۴- مقایسه میانگین نسبت کلروفیل a/b ارزن در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط با سویا

Table 4. The means comparison of chlorophyll a/b ratio of millet in different intercropping ratio with soybean

Planting ratios (soybean:millet)	Day after planting in 2018					Day after planting in 2019				
	45	60	75	90	105	45	60	75	90	105
0 : 100	0.37 ±0.02	0.30 ±0.04	0.46 ±0.02	0.42 ±0.01	0.41 ±0.01	0.39 ±0.03	0.37 ±0.02	0.30 ±0.05	0.43 ±0.01	0.35 ±0.01
25 : 75	0.39 ±0.02	0.40 ±0.05	0.48 ±0.03	0.47 ±0.01	0.39 ±0.02	0.35 ±0.02	0.41 ±0.03	0.41 ±0.05	0.42 ±0.01	0.35 ±0.02
50 : 50	0.34 ±0.05	0.38 ±0.06	0.48 ±0.02	0.42 ±0.02	0.40 ±0.02	0.39 ±0.01	0.43 ±0.02	0.38 ±0.06	0.42 ±0.02	0.36 ±0.02
75 : 25	0.33 ±0.04	0.35 ±0.03	0.49 ±0.02	0.35 ±0.02	0.42 ±0.03	0.39 ±0.03	0.36 ±0.01	0.35 ±0.03	0.39 ±0.02	0.35 ±0.02
LSD (0.05)	0.06 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.03 **	0.03 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.03 **	0.08 ^{ns}	0.02 *	0.03 ^{ns}
C.V (%)	11.14	14.58	4.73	4.37	4.12	5.98	5.50	14.58	3.32	5.33

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



شکل ۱- تاثیر رقابت دو گیاه ارزن و سویا بر کارایی مصرف نور در نسبت‌های مختلف کشت (● کارایی مصرف نور گیاه ارزن، ○ کارایی مصرف نور گیاه سویا، ▼ مجموع کارایی مصرف نور دو گیاه در کشت مخلوط، Δ مقدار پیش‌بینی شده گیاه ارزن، ■ مقدار پیش‌بینی شده گیاه سویا و اعداد داخل دایره در تصاویر، مربوط به تعداد روز پس از کشت است).

Figure 1. The effect of millet and soybean crop competition on radiation use efficiency in different planting ratios ● actual radiation use efficiency of millet in intercropping, ○ actual radiation use efficiency of soybean in intercropping, ▼ total actual yields of millet and soybean in intercropping, Δ expected of radiation use efficiency in millet, ■ expected of radiation use efficiency in soybean and the numbers inside the circle in the pictures are related to the day after planting.

میانگین ۷۸/۴۶- و ۰/۴۴- درصد، دارای بیشترین و کمترین میزان کاهش بودند.

بررسی شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط نیز نشان داد در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، نسبت کشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) و ۵۰:۵۰ به ترتیب با میانگین ۱/۲۳ و ۱/۰۲ دارای نسبت برابری زمین بالاتر از یک بودند (جدول ۶) و این موضوع نشان‌دهنده برتری نسبت‌های کشت مذکور بر کشت خالص گیاهان مورد مطالعه است. نسبت کشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) نیز با نسبت برابری زمین ۰/۹۵ فاقد سودمندی لازم در مقایسه با کشت خالص گیاه ارزن و سویا بودند. یکی از دلایل مهم برتری نسبت کشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) در سیستم کشت مخلوط می‌تواند استفاده بهتر از منابع به‌ویژه دریافت نور توسط گیاه ارزن در طی دوره رشد باشد. این موضوع نقش مهمی در افزایش میزان مواد فتوسنتزی و در نتیجه مقدار عملکرد دانه در نسبت کشت مذکور داشته است. ضریب نسبی تراکم نیز در بین نسبت‌های کشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) و ۵۰:۵۰ بیشتر از واحد بود (جدول ۶). در بین نسبت‌های مختلف کشت بیشترین ضریب نسبی تراکم متعلق به نسبت کشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) با میانگین ۳/۸۸ بود. علاوه بر مطالب مذکور نسبت مختلف کاشت اثر معنی‌داری بر شاخص افت عملکرد واقعی گیاه ارزن و سویا داشتند (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین افت عملکرد واقعی جزئی ارزن تنها در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) دارای مقدار مثبتی بود که این موضوع نشان می‌دهد عملکرد دانه ارزن احتمالاً به دلیل تاثیر مثبت سویا در الگوی کشت مخلوط افزایش یافته است. این در حالی است که با کاهش تعداد ردیف کاشت ارزن در الگوی کشت مخلوط، مقدار شاخص مذکور به شدت کاهش یافت و با منفی شدن مقدار شاخص افت عملکرد واقعی ارزن، قدرت رقابت سویا در الگوی کشت مخلوط بیشتر

در سال دوم نیز در مرحله ۹۰ روز پس از کاشت، افزایش نسبت کلروفیل a/b ارزن در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ مشاهده شد؛ بنابراین با کاهش تعداد ردیف کاشت سویا، نسبت کلروفیل a/b در گیاهان مورد مطالعه افزایش یافت (جدول ۴). اما در مقابل کاهش نفوذ نور و افزایش سایه‌اندازی توسط تاج‌پوشش سویا در الگوی کشت مخلوط ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) باعث کاهش معنی‌دار نسبت کلروفیل a/b ارزن شد. به‌طور کلی گیاهان تحت شرایط نور کم از طریق افزایش سطح برگ و میزان کلروفیل b انرژی خورشیدی بیشتری را ذخیره می‌کنند. بنابراین نفوذ بیشتر نور به درون تاج‌پوشش در کشت مخلوط می‌تواند باعث افزایش نسبت کلروفیل a/b در گیاه مکمل شود (Yao et al., 2017).

همچنین نسبت‌های مختلف کشت اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه داشتند (جدول ۵). در خصوص سویا، بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب مربوط به کشت خالص سویا و نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) با میانگین ۴۶۷۹/۱۶ و ۲۲۴۹/۷۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). این نتایج در خصوص گیاه ارزن نیز صادق بود و کشت خالص ارزن (۰:۱۰۰) با میانگین ۱۲۷۳/۶۳ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه ارزن را در اختیار داشت. اما مقایسه مقادیر عملکرد واقعی دانه با مقادیر قابل پیش‌بینی نشان داد با کاهش ردیف کشت سویا در نسبت‌های مختلف، مقدار عملکرد دانه سویا در مقایسه با مقادیر مورد انتظار افزایش یافت (جدول ۵). به‌نحوی که مقدار آن در نسبت‌های کشت ۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) به ترتیب ۱۹/۶۹، ۵۴/۶۷ و ۹۲/۳۲ درصد بیشتر از مقادیر قابل پیش‌بینی بود. اما در گیاه ارزن با کاهش ردیف کشت گیاه مذکور در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط میزان عملکرد دانه در مقایسه با مقادیر مورد انتظار به شدت کاهش یافت. نسبت کشت ۷۵:۲۵ و ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) به ترتیب با

گیاه ارزن فقط در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ و با کاهش تعداد ردیف کاشت سویا، گونه غالب بود.

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد باتوجه به تسلط رقابتی سویا، عملکرد دانه گیاه ارزن به عنوان گونه مغلوب به شدت تحت تاثیر الگوی کشت در نسبت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) قرار گرفت. به همین دلیل شاخص سودمندی در نسبت کشت مذکور کمتر از سایر نسبت-های کشت مخلوط بود. این در حالی است که در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، افزایش کارایی مصرف نور ارزن به عنوان گونه غالب در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ به دلیل کاهش تسلط رقابتی سویا باعث افزایش ۲۳ درصدی عملکرد دانه در سیستم کشت مخلوط شد. هر چند کشت مخلوط نقش مهمی در افزایش بهره‌وری دارد؛ ولی انتخاب گونه همراه، قابلیت رقابت و الگوی مناسب کشت در این زمینه بسیار تاثیرگذار است؛ لذا به منظور افزایش بهره‌وری در سیستم کشت مخلوط، نسبت کاشت گیاه ارزن رقم پیشاهنگ باید بیشتر از سویا باشد. به همین دلیل نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) دارای بیشترین شاخص سودمندی در سیستم کشت مخلوط بود.

نمایان شد. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده، میانگین شاخص افت عملکرد واقعی جزئی سویا در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) مثبت بود (جدول ۶). همچنین شاخص افت عملکرد واقعی سویا در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ منفی (۰/۳۶-) بود؛ بنابراین می‌توان بیان داشت مقدار عملکرد سویا در نسبت کاشت مذکور ۳۶ درصد در مقایسه با کشت خالص سویا (۱۰۰:۰) کاهش یافت (جدول ۵). اما در نهایت مقدار مثبت شاخص کل افت عملکرد واقعی در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) نشان می‌دهد افزایش عملکرد جزء مثبت در کشت مخلوط، قادر به جبران افت عملکرد گیاه مکمل شده است. این در حالی است که افزایش عملکرد سویا در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) قادر به جبران کاهش شدید عملکرد ارزن در نسبت کاشت مذکور نبوده است. به همین دلیل مقدار شاخص کل افت عملکرد واقعی در نسبت کاشت ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) منفی است. همچنین باتوجه به افزایش شاخص افت عملکرد واقعی جزئی سویا در نسبت‌های کاشت ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ (ارزن-سویا) نسبت به ارزن، می‌توان به غالبیت بیشتر گیاه سویا در نسبت‌های کاشت مذکور اذعان کرد. این در حالی است که در نسبت کاشت ۲۵:۷۵ (ارزن-سویا) شاخص افت عملکرد واقعی جزئی ارزن بیشتر از سویا بود. بنابراین

جدول ۵- میانگین عملکرد واقعی و مورد انتظار دانه گیاه ارزن و سویا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط و در سال‌های مورد مطالعه

Table 5. The average actual and expected seed yield of millet and soybean in different intercropping ratios and the studied years

Planting ratios (soybean-millet)	Millet			Soybean		
	Actual yield (kg. ha ⁻¹)	Expected yield (kg. ha ⁻¹)	Actual yield:Expected yield (%)	Actual yield (kg. ha ⁻¹)	Expected yield (kg. ha ⁻¹)	Actual yield:Expected yield (%)
0: 100	1273.63 ±133.93	-	-	-	-	-
25: 75	950.94 ±170.88	955.23 ±100.45	- 0.44	2249.79 ±193.08	1169.79 ±107.98	+ 92.32
50: 50	310.83 ±91.05	636.82 ±66.97	- 51.19	3618.76 ±324.53	2339.58 ±215.95	+ 54.67
75: 25	68.55 ±33.09	318.41 ±33.48	- 78.46	4200.68 ±603.10	3509.37 ±323.93	+ 19.69
100: 0	-	-	-	4679.16 ±431.90	-	-
LSD (0.05)	100.09 **	26.45 **	-	321.75 **	112.182 **	-
C.V (%)	14.64	3.16	-	8.31	3.65	-

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

جدول ۶- اثر نسبت‌های مختلف کشت بر کارایی کشت مخلوط ارزن-سویا

Table 6. Effect of planting ratios on intercropping efficiency of soybean:millet

Intercropping Index	Crop	Planting ratios (soybean:millet)		
		75: 25	50: 50	25: 75
LER	Soybean	0.90	0.77	0.48
	Millet	0.05	0.25	0.75
	Total	0.95	1.02	1.23
RCC	Soybean	4.41	3.52	-2.79
	Millet	0.17	0.32	1.32
	Total	-0.75	1.13	3.68
AYL	Soybean	0.19	0.03	- 0.36
	Millet	- 0.78	- 0.02	2.01
	Total	- 0.58	0.01	1.65

REFERENCES

1. Ambas, V. & Baltas, E. (2014). Spectral analysis of hourly solar radiation. *Environmental Processes*, 1: 251-263.
2. Banik, P., Sasmal, T., Ghosal, P.K. & Bagchi, D.K. (2000). Evaluation of mustard (*Brassica campestris* var. Toria) and legume intercropping under 1:1 and 2:1 row-replacement series systems. *Agronomy and Crop Science*, 185: 9-14.
3. 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 Crops Research*, 124: 25-36.
4. Bitew, Y., Alemayehu, G. & Assefa, A. (2019). Boosting land use efficiency, profitability and productivity of finger millet by intercropping with grain legumes. *Cogent Food and Agriculture*, 5 (1): 1-22.
5. Carciochi, 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 environmental in north America. *Agronomy Journal*, 111 (4): 1-10.
6. De Wit, C.T. (1964). On competition. 2nd Ed. Verslag Landbouw-Kundige Onderzoek, Wageningen. 87.
7. Ehsanifar, A.R., Dahmardeh, M. & Khammari, I. (2015). Effect of different tillage systems on yield and yield components in cowpea-millet intercropping. *Science and Technology*, 8 (11): 1-8.
8. Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T. & Pennington, J.S. (1971). Stage of development descriptions for soybean, *Glycine max* L. *Crop Science*, 11(6): 929-931.
9. Gerwing, J. & Gelderman, R. (2019). Fertilizer recommendation guide. (Annual Report EC750). U.S. Department of Agriculture, South Dakota State University. 27.
10. 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.
11. Hangria, M. & Mendes, I.C. (2015). Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? In F.J. de Bruijn (Ed.), *Biological Nitrogen Fixation*. (pp. 1009-1023.) John Wiley and Sons press. New jersey.
12. Hill, J. & Shimamoto, Y. (1973). A method of analyzing competition with special reference to herbage plants. *Agricultural Sciences*, 81: 77-88.
13. 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 Farsi)
14. Layek, J., Shivakumar, B.G., Rana, D.S., Munda, S., Lakshman, K., Das, A., & Ramkrushna, G.I. (2014). Soybean-cereal intercropping systems as influenced by nitrogen nutrition. *Agronomy Journal*, 106(6): 1933-1946.
15. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148: 350-382.
16. 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.
17. Mead, R. & Willey, R.W. (1980). The concept of a land equivalent ratio and advantages in yields for intercropping. *Experimental Agriculture*, 16: 217-228.
18. Mehrani, A. (2011). Instructions for planting, holding and harvesting forage of proso millet (*Panicum miliaceum* var. pishahang). Seed Breeding Research Institute, karaj, Iran. 6.
19. Mehrani, A., Mosavat, S.A., Shoushi, A.A., Tabatabaei, S.A., Ghasemi, A., Shoushi, A., Tabatabaei, S., Ghasemi, A., Abbasi, M.R., & Zamanian, M. (2013). Bastan the first cultivar of foxtail millet for emergency feed production. *Research Achievement for Field and Horticulture Crops*, 2 (2): 119-128. (In Farsi)
20. Namdari, M., Behdani, M.A. & Arab, G.H. (2012). Effect of yield, yield components and seed quality of intercropping soybean cultivars in Ghaemshahr weather conditions. *The Plant Production*, 34 (2): 13-26. (In Farsi)
21. Neamatollahi, E., Jahansuz, M.R., Mazaheri, D. & Bannayan, M. (2013). Intercropping. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews*. (pp. 119-142.) Springer press, Dordrecht.
22. 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*. (pp. 1-50) Elsevier Inc.

23. 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.
24. Ventura, F., Vignudelli, M., Poggi, G.M., Negri, L. & Dinelli, G. (2020). Phenological stages of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) encoded in BBCH scale. *Biometeorology*, 64: 1167-1181.
25. Wang, Z., Zhao, X., Wu, P., He, J., Chen, X. & Gao, Y. (2015). Radiation interception and utilization by wheat/maize strip intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204: 58-66.
26. Wu, Y., Gong, W. & Yang, W. (2017). Shade inhibits leaf size by controlling cell proliferation and enlargement in soybean. *Scientific Reports*, 7:9259: 1-10.
27. Yao, X., Zhou, H., Zhu, Q., Li, C., Zhang, H. & Xiu, F. (2017). Photosynthetic response of soybean leaf to wide light fluctuation in maize-soybean intercropping system. *Frontiers in Plant Science*, 28: 1-9.
28. Zhang, X., Huang, G., Bian, X. & Zhao, Q. (2013). Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere. *Plant Soil and Environment*, 59(2): 80-88.